

J A E R I - M

88-161

粒子・固体相互作用

—固体内粒子分布に於ける基礎過程の研究 II—

1988年8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）で複写による実費頒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, Tokaimura, 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 いばらき印刷(株)

粒子・固体相互作用
— 固体内粒子分布に於ける基礎過程の研究 II —

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7月28日受理)

61年度に行った、磁場閉じ込め装置に於けるデポジションプローブ実験の現状に関する調査に引き続き、本調査研究に於いては、近年大型トカマク装置の壁材・リミター材などに多く使用されるようになったカーボン系材料に対しプラズマ及び軽粒子が生じるさまざまな現象について調査を行った。多岐にわたる問題の中、主にプラズマのリサイクリングに関連する項目を選び、最近のトカマク装置に於けるカーボン材使用の現状、リサイクリングに於けるカーボン材の役割、カーボン材の基本的性質、脱ガス特性、水素同位体粒子のグラファイトへの入射に関して保持量・深さ分布・再放出・同位体置換・拡散などの基本的事項についてまとめた。

本報告書は62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 II -

Syukuro YANO*

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

(Received July 28, 1988)

Basic processes in plasma-material interactions have been surveyed and reviewed. Problems concerned with carbon materials, which have been progressively used for the first wall and limiters in Tokamaks, are mainly discussed. Recent usage of carbon materials, basic properties and characteristics of carbon/graphite materials, desorption of gasses are described. As to the interactions of incident hydrogen isotope particles with graphite surface, data of trapping, depth profile, re-emission, isotope exchange, and diffusion are reviewed and discussed.

Keywords: Particle-Solid Interaction, Hydrogen Recycling, Carbon Materials

Work supported by JAERI under contract with Kobe University of Mercantile Marine in the fiscal year 1987.

* Kobe University of Mercantile Marine

目 次

1.はじめに	1
2.トカマク装置におけるグラファイトの使用例	2
3.水素同位体のリサイクリング	6
4.グラファイト・カーボン材の基本的特性	13
4.1 グラファイトの実効表面積と熱原子吸着	13
4.2 粒子の捕捉及び保持	22
4.3 鮑和保持と同位体交換（置換）の問題	30
4.4 イオン誘導放出効果	39
5.結び	56
謝辞	56
参考文献	57
付録	63

Contents

1. Introduction	1
2. Usage of graphite materials in Tokamaks	2
3. Recycling of hydrogen isotopes	6
4. Basic properties of graphite/carbon materials	13
4.1 Effective surface dimension and thermal adsorption of atoms .	13
4.2 Trapping and retention of particles	22
4.3 Problems on saturated retention and isotope exchange (replacement)	30
4.4 Ion induced release effect	39
5. Conclusion	56
Acknowledgement	56
References	57
Appendix	63

1. はじめに

粒子と固体の相互作用の研究は、極めて広範囲の領域にわたっている。核融合のエネルギー利用のための開発研究に限っても、最近の PWI 研究の報告の数はおびただしいものがある。本調査研究報告では、61年度のデポジションプローブ実験の現状調査に続き、デポジションプローブのみではなく、磁場閉じ込め装置の壁やリミター材に用いられる炭素もしくはグラファイト材に重点を置き、それに対してプラズマ及び軽粒子（主に H, D, T など）が生じる多くの現象について調査を行った。TFR の計画を始めとし、近づきつつある三重水素による実験計画のために、H, D プラズマから DT プラズマへの切り替えを考え、50 D - 50 T プラズマの達成の方法、及び T の保有量、投入量の評価などの問題は DT のグラファイト中での振舞と密接な関係になっており、このための基礎的な実験により実証された事実が必要となっている¹⁾。このような観点から現在までの研究報告を概観し、粒子と固体の相互作用について述べる。

今回主に固体としてグラファイトを対象とした理由は(1)プラズマ閉じ込め装置に於ける第 1 壁の材料として、この数年、グラファイトが多く用いられるようになったこと、特に、そのリサイクリング特性、不純物生成に対する効果、プラズマに対する熱的・機械的耐性、などとの関連から、将来に対しても他の材料では達成できない特性を備えた有望な材料であること。(2)H 及び D の炭素及びグラファイトへのインプランテーションに対する基礎データは 1976 年頃から次第に蓄積されはじめ、1980-84 年間にも多量のデータが蓄えられた。これらについては、61年度の調査が不十分であったこと。(3) 62 年度、著者と日本原子力研究所の協力研究に於て、JFT-2M にグラファイトの壁が用いられ、それと同じ材質のデポジションプローブにより、H 及び D のプラズマ・壁間の粒子バランスが研究対象となったことも本調査項目に関連した。

以上のような点から、2. に於て最近のトカマク装置に於けるカーボン材使用の状況と使用上の特徴及び今後の問題などを述べ、3. ではリサイクリングに於けるカーボン材の役割に就いて、4. ではカーボン材の基本的性質、脱ガス特性、主に水素同位体粒子のグラファイトへの入射に関して、保持量、深さ分布、再放出、同位体置換、拡散などの基本的事項に就いてまとめる。

61 年度、主眼を置いたデポジションプローブの研究調査では、スクレーパオフレーザー・プラズマの診断に Si を用いる利点を示したが、グラファイトをデポジションプローブとして用いる場合には、多くの問題があることが分かった。しかし、壁材料にグラファイトを用いる場合には、グラファイトプローブは壁への粒子の出入に対するシミュレーションとして分析出来る意義がある。そしてこのような場合のデータの解釈に対しても、グラファイトの材質的な基礎的データが必要となる。

2. トカマク装置におけるグラファイトの使用例

トカマク装置の壁には、ステンレス鋼、インコネルなどの金属材料が用いられているが、イオン衝撃による重イオン不純物の発生が問題となる。その抑制のために、表面に低Z物質のTiCコーティングまたはグラファイトタイルを張り付け、壁を防護するが多く行われている。例えば、JETに於てはハイグレードのカーボン(Carbone Lorraine CL 5890 PT)が用いられ、またリミター材にもカーボンが使われた²⁾。

またTFRでは1985年頃、高出力NBIの設置とともに、1850 kgのグラファイトタイルから出来たトロイダルバンパリミターが付けられ、プラズマに向かうグラファイトの表面積はその前の2 m²から20 m²まで増加している³⁾。バンパリミターはPOCO AXF-5Qグラファイト(密度約1.8 g/cm³)で、コンディショニングにより、そのリサイクリングの様子が変化する。このことはプラズマをHからDへと置き換える時の問題となるとともに、放電中のプラズマ密度の制御にも大いに影響する。TFRに於けるバンパリミターに対するコンディショニングに対しては、H. F. DyllaらがFig. 1に示すような実験結果を得ている⁴⁾。即ち、プラズマの補給ガスを停止した後のプラズマ密度の減少が $\exp\{-t/\tau_p^*\}$ で与えられる。ここで τ_p^* はプラズマ粒子の実効的閉じ込め時間である。(a)では $\tau_p^* > 10$ sであり、プラズマの粒子閉じ込め時間を τ_p とすればリサイクリング係数Rは

$$R = 1 - \tau_p / \tau_p^*$$

で与えられる。 $\tau_p = 0.1 \sim 0.15$ sであるので、R = 99%となり、プラズマ密度はリサイクリングによるガスの補給により維持されていることが分かる。これに対して、低密度のHe放電を行った場合(b)のようにR = 96%となり、更にバンパリミターのコンディショニングを継続することにより $\tau_p^* = 0.15$ s; 即ちR = 0.3 ± 0.2まで低下することが出来た。このようにTFRでリミターによるポンピング効果によって、壁付近の中性粒子密度を下げてエネルギー閉じ込めに大きい前進を示している⁵⁾。

TEXTORトカマクでは第1壁の全面にわたってプラズマ化学の手法で均一な薄いカーボンの層を蒸着している。これをカーボニゼイション(Carbonization)と呼んでいる。このフィルムはアモルファス、半透明でH/C ~ 0.4の大量(飽和)のHを吸蔵している。これにより水素リサイクリングの実験を行っている⁶⁾。カーボニゼイションはJET⁷⁾、JIPP-T-IIU⁸⁾、ASDEXでも用いられている。この場合、金属表面と較べて、異なった水素リサイクリングが得られており、不純物としての酸素は減少し、カーボン不純物はある程度増加が抑制され、金属不純物は極端に減少する⁶⁾。TEXTORの金属ライナー、リミターの総てのカーボニゼーションの結果、 10^{-5} 以下の金属不純物に抑えられた。しかし、ディスラプションが生じるとカーボンフィルムが部分的に破れ、金属が蒸発した⁹⁾。全カーボン壁でのD-プラズマの典型的な組成はTable 1に示す値となっている。表中(b)の()中は得られた最良の値を示している¹⁰⁾。

また、磁気ダイバーターの働きをするように、ポンプリミターの研究も行われている。TEXTORではALT-I(Advanced Limiter Test-I)の実験がなされた¹¹⁾。Fig. 2にその

形状を示した¹⁰⁾。なお、ALT-I の初期の報告は A.E.Pontau らのものがある¹²⁾。ポンプリミターについては次章でも述べる。

以上のように、トカマクに於いてグラファイトが多く用いられているが、使用後の分析も報告されるようになった。例えば、W.R.Wampler, B.L.Doyle, A.E.Pontau¹³⁾は TFTR, PDX, PLT のグラファイトタイル及びリミターの中の H と D の量を求めている。分析は ³He を用いた核反応分析で D の、7 Mev ¹⁹F の共鳴核反応を用いて H の分析をそれぞれ行っている。¹⁹F の分析では H の内蔵量が F の入射で失われていくので、F のゼロフルエンスにおける外挿値を用いている。PDX のグラファイトリミター (POCO AXF-5Q) の表面近くの D のプロファイリングの 1 例を Fig. 3 に示した。D の量は表面 1 μm まで多く入っており、さらに深くまでも分布が見られる。放電は OH の外に 7 MW の NBI を加え、約 6 箇月にわたり行われた (1982 年 2 月 - 7 月)。この例に於いては、通常のプラズマ温度での飛程よりも十分深くまで D がグラファイト中に侵入していることが分かる¹³⁾。

Table 1 Typical composition of a deuterium plasma for various wall conditions.
Best values ever achieved for (b) in brackets. Impurity figures are relative concentrations on the axis. The carbon and oxygen values in (b) and (c) are evaluated under the assumption of equal concentration⁹⁾

	Without	With carbonization	
	Inconel liner steel limiters (a)	Inconel liner steel limiters (b)	Inconel liners graphite limiters (c)
$Z_{\text{eff}}(0)$	3.2	1.6 (1.2)	2.0
Oxygen	3×10^{-2}	6×10^{-3} (2×10^{-3})	1×10^{-2}
Carbon	-	6×10^{-3} (2×10^{-3})	1×10^{-2}
Iron	5×10^{-4}	2×10^{-5} ($< 10^{-5}$)	2×10^{-5}

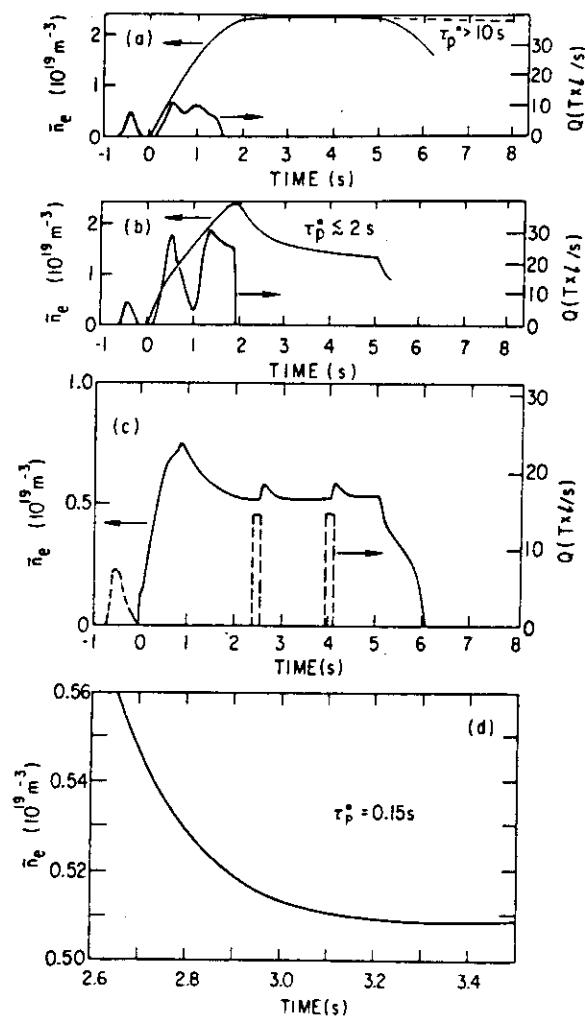


Fig. 1 Plasma density and gas input behaviour for three operational cases in TFTR: (a) Standard conditions on the movable limiter or the bumper limiter when recycling is close to one and the density decay constant τ_p^* is 10 s. (b) 1.4 MA discharge on the bumper limiter ($R/a = 2.45\text{ m}/0.80\text{ m}$) after the initial conditioning with ten low density helium discharges. (c) 0.8 MA discharge on the bumper limiter after extensive conditioning. (d) Lowest observed value of τ_p^* (0.15 s) for the 0.8 MA discharge⁴⁾

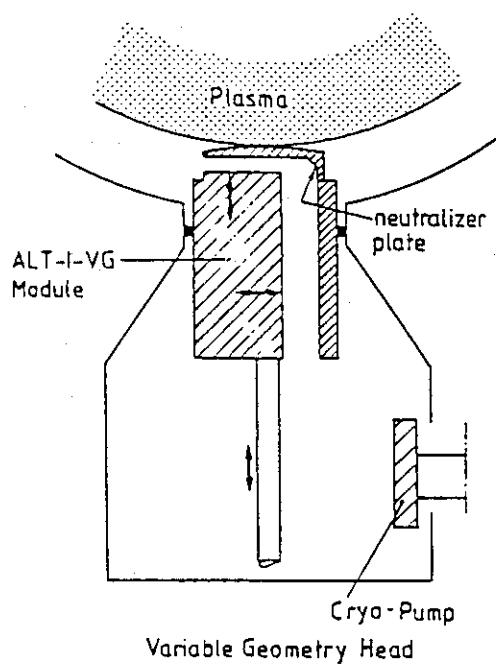


Fig. 2 Schematic view of the ALT-I pump limiter with the variable geometry head module¹⁰⁾

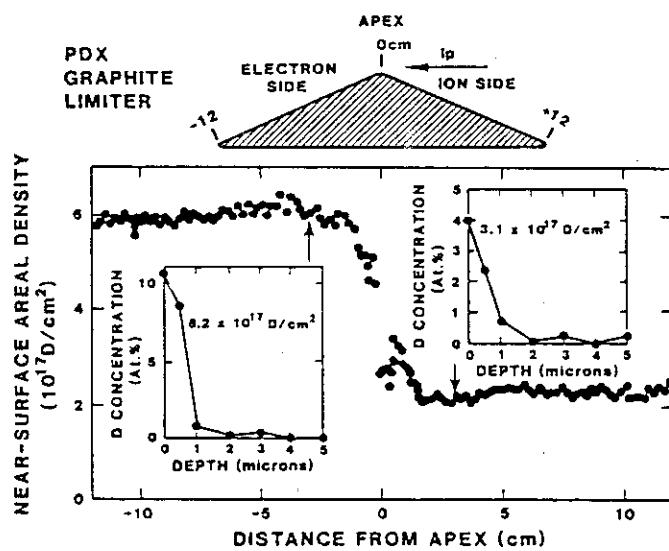


Fig. 3 Areal density of near-surface D and depth profiles for the graphite limiter from PDX¹³⁾

3. 水素同位体のリサイクリング

プラズマ粒子は閉じ込めを逃れて、その密度が減衰していくが、それを補うために外部からの粒子の補給 J と、壁からの粒子の再放出（リサイクリング） \dot{N}_R がある。リミターへの粒子損失及びダイバータへの粒子損失は閉じ込めと別に扱いうるが、ここでは実効的な閉じ込め時間に含むものと解釈する。プラズマ粒子が定常である条件は

$$\frac{dN}{dt} = \dot{N}_R + J - \frac{N}{\tau_p} = 0$$

となる。プラズマの密度を定常に保つにはリサイクルが無ければ中性粒子やガスを注入し、閉じ込めの損失を補う必要があるが、壁からのリサイクルが多い場合には密度が増加し、プラズマが閉じ込められなくなることが多い。R. E. Clausing らは Plasma - Material - Interaction Test Facility ; RICS (Recycle, Impurities and Conditioning Simulator) を用いて、リサイクルの係数を、よく脱ガスした清浄な金属（ステンレス鋼）とカーボンフィルムについて調べた¹⁴⁾。ここにリサイクル率 R は（壁から出て来る粒子／壁への入射粒子）で定義される。

Fig. 4 に示すように、250°C の金属では、1 s のプラズマ放電において R が初めの小さい値から上昇して 1 になり、一方、C-フィルムでは始めは $R > 2$ であるが、1 まで減少する。金属は H を吸収し、C-フィルムは H を放出する。 $R < 1$ ならガスパフによりプラズマ密度のコントロールが出来るが、 $R > 1$ ではポンプリミターやダイバーターが必要になる。またリサイクルは三重水素の壁中の保持量の計算に重要である¹⁴⁾。リサイクリングの初期の研究について、E. S. Marmar は 1978 年に解説し、リサイクリングの研究の行われたトカマクとして ATC, Alcator, T-3, DITE を挙げている。測定法としては分光法、作動ガスの水素同位体の交換によるもの、また壁温度の効果なども述べている¹⁵⁾。

リサイクリングの機構をモデル化したものについては既に多くの研究報告がある。筆者は 1975 年頃の原研委託調査研究の中性粒子の輸送計算に於て、壁に於ける境界条件を取り扱う場合に壁からの粒子反射率の問題を考察したことがある¹⁶⁾。電荷交換中性粒子にもとづいてプラズマの輸送を解くとき、その壁での境界条件にリサイクル率 R を考えた報告がある^{17, 18)}。S. J. Fielding はプラズマと壁とのリサイクルモデルを Fig. 5 のように考えた¹⁹⁾。イオンと中性粒子の流れによるものがあり、ダイバーターのあるところでは、高速と低速の粒子の区別が必要になる。DITE トカマクに対しては 4 成分リサイクリングが考えられている。数式的には Rate Equation をたてて計算し、DITE での D/H のリサイクル実験と較べている。4 成分は、入射粒子はイオン、高速中性粒子、壁からの粒子は反射高速中性粒子と壁に捕捉されている低速中性粒子である。G. M. McCracken らの DITE での実験は、H から D へ、及び D から H へプラズマを変換し、その成分変化をファブリーペローの干渉計を用いて調べ、脱離原子の率を求めている。リサイクルには 2 つの主なプロセスがあり、反射及びイオン誘導放出 (Ion Induced Release) で、両者が DITE ではほぼ同じとしている²⁰⁾。また、McCracken は 1979 年の Nucl. Fusion の PWI に関するレビュー論文²¹⁾でリサイクリングについて記し、壁での後方散乱、壁物

質中の捕捉と再放出、また脱離の中にイオン誘導のものと、熱的なものの存在に就いて論じている。リサイクリングをコントロールする必要があり、 $R < 1$ が望ましく R を小さくする方法について述べている。このためにはカーボンは Z が低いため、後方散乱を少なくできる。また壁温度が高い時、熱脱離が生じやすい。

P. Wienfield らの開発したリサイクリングのコンピュータコードは、壁の透過性を含めたもので、PERI (Permeation, Recycling, Inventory) と呼んでいる。壁への入射水素粒子束 ϕ に対し $\alpha \phi$ ($\alpha \approx 1$) が壁の中に侵入し、拡散方程式により濃度分布が求められる。一方壁の表面に於ける水素濃度に対し、 σk (σ : 壁の粗さ係数) の放出割合があるとする。これらの量は実験により求められ、数値計算を行うことが出来る²²⁾。また、PERI を拡張して JET の場合に NBI の時の温度上昇を含めた計算も行われている²³⁾。同中の計算法が F. Waelbroeck らにより使われているが、ここではステンレスとインコネルなどでの水素拡散への熱活性化過程が考えられており、表面に存在している水素と再結合して分子となって放出される²⁴⁾。P.C. Stangeby は同様な拡散方程式に対し、時間を含んだ解析解を得ている。これを数値計算による PERI と較べ一致した結果を得ている²⁵⁾。これに対して、B. L. Doyle は拡散方程式の中に源の項を含め、プラズマから水素粒子が壁の表面を通ってある深さに沈着するモデルを用いている²⁶⁾。この取り扱いはやはり解析的であるのでコンピュータコード PERI や DIFFUSE に較べ関数関係を明確に出来る利点がある。壁表面付近での分子の解離や原子の再結合について、やや詳しいプロセスを取り入れるモデルを H. C. Howe が簡単に述べている。この領域では 10 eV 以下のエネルギーの粒子の反射係数を明らかにすることが必要であると述べている²⁷⁾。

この調査で重点を置いているカーボンに対しては、金属と異なるところが大きい。即ちカーボンは高温にならないと中を水素が移動しない。ただし、グラファイトはグレイン構造であり単純にそのようにはならないが、次章でやや詳しく記す。従って DIFFUSE コードや、拡散方程式を用いた上述の計算はこの場合有用ではない。トカマクでのリサイクリング実験は、初め金属壁が多く、最近グラファイトで内張りした壁が多くなった。ステンレス鋼の H のリサイクリングについては、ORNL の R. E. Clausing らが RICS により実験的に調べている。300 ~ 500 K ではステンレス鋼は $8 \times 10^{16} \text{ H/cm}^2 \text{ s}$ の粒子束に対し 100 ms において $R \sim 1$ であった。80 K では R は小さいが、プラズマ誘導放出過程が主で、また高温で R が増加するのは熱的過程によると述べている²⁸⁾。

TFR グループはインコネル壁に於けるリサイクリング率と粒子閉じ込め時間の測定を行った。インコネル壁は R が低くプラズマに入射したガスの 50 % が捕捉され、引き続く 2 回のプラズマ放電の間に壁からそれらが放出された²⁹⁾。その後にインコネルリミターとグラファイトリミターを用いたリサイクリングの測定が行われている。壁の温度を 20 °C 及び 250 ~ 300 °C とし、Fig. 6, 7 の結果を得ている³⁰⁾。即ち、始め H₂ で放電し、その後 D₂ に供給ガスを変更した。この時、H / (H + D) が図のように変わっている。Fig. 6 では、20 °C ではリサイクルがなく 250 °C 以上ではややリサイクルする。一方、Fig. 7 のグラファイトの場合にはリサイクルが大きいことが示された。TFR では 1985 年頃にリミターをカーボンに変更し、H / D の比を時間分解の質量分析により行っている。カーボンリミターはリサイクリング特性を大幅に変化し、H から D へプラズマの作動ガスを変換するのに 1 日を要した。これは壁へ始めに入った H が、いつまでも放出されるか

らである³¹⁾。なお、1981年にステンレス鋼のHのリサイクリングについて、K.L.Wilsonが全般的な紹介論文を出している³²⁾。

カーボン、グラファイトの使用例が最近多くなってきた。この実験の例としては、さきに Carbonization で引用した JET に於いてその壁で同位体の変換実験が行われた³³⁾。Fig. 8 は JET において H を十分吸収したカーボニゼーション壁の 1.5 keV 電荷交換の H と D の粒子束比を、H 放電後に D 放電へ変化したとき、その切り替え後の放電数に対して示したものである。初めの部分は 250 °C の冷たいリミター放電、後半は 1000 °C 以上のリミター放電に対するものである。1000 °C 以上の温度では同位体交換が熱的プロセスにより支配されている。グラファイトリミターを TiC で被覆したときの同様な同位体変換の実験が TEXT でも報告されている³⁴⁾。

最後に次章に関連するが、Livermore SNL の K.L.Wilson が 1987 年の J. Nucl. Mater. にグラファイトの水素リサイクル特性についてよくまとめた解説を行っている³⁵⁾。ここではその中でトカマク実験の部分を引用する。TFR ではプラズマと接触する可動リミター上のグラファイトタイルの使用後の D の分析が述べられている。電子側 (BP 211) とイオン側 (BO 89) の両者の周辺に沿う D/cm² を Fig. 9, 10, 11 に示した。前者では侵食されたカーボンと金属及びプラズマ原子が共にリミター上に沈積し、それに D が保持された。これを D-リッチの "Tokamakium" 層と呼んでいる。これに対して後者に於てはリミターの中心軸から 5~10 cm のところに ~10¹⁵ D/cm² しか保持されない。これはその部分が 2700 K まで上昇し、付着が最小になったためである³⁶⁾。また、類似の結果が JET のグラファイトリミターの使用後の測定で水素同位体の保持傾向に得られている³⁷⁾。

同位体変換の理論的な取り扱いには LMM (Local Mixing Model) があり、リサイクルの解析にも有用である。これについては次章の水素保持の項で述べる。この理論は最初、金属の同位体交換の実験結果をよく説明した³²⁾。

なお最後にポンプリミターのリサイクルに於けるプラズマ密度の増加を抑制するための TFR グループの報告について述べておく³⁸⁾。ポンプリミターの評価には

$$\frac{dN}{dt} = q + (R - 1) \frac{N}{\tau_p}$$

の式が用いられた。ここで、N は全粒子数、τ_p は粒子の閉じ込め時間、q は注入ガス・フラックス、R はリサイクリング係数を表わす。TFR では τ_p は 10 ms 程度で、リサイクルの有ることによる実効的な閉じ込め時間は τ* = τ_p / (1 - R) である。前に紹介した Dylla の場合と同様に TFR グループでもポンピングに因り R = 0.816 から 0.682 へ改善されている。

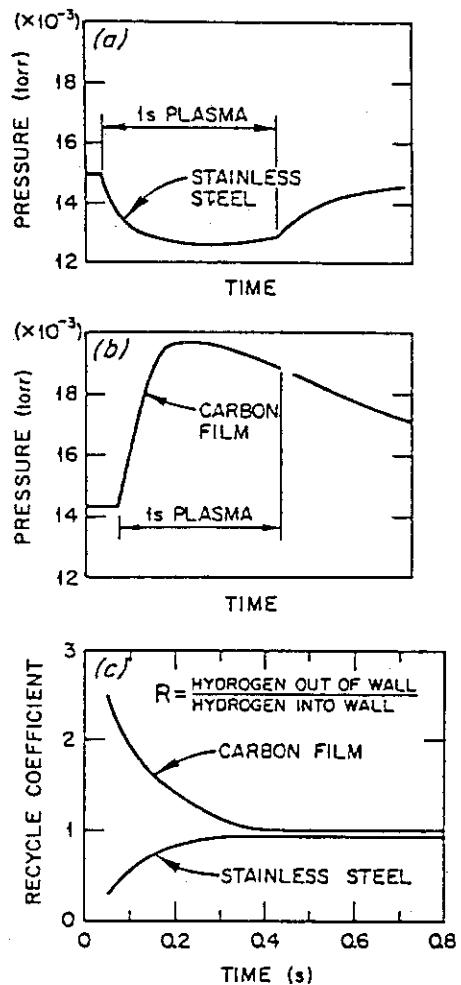


Fig. 4 A comparison between the pressure changes resulting from (a) a standard plasma pulse on a clean stainless steel surface at 250 °C and (b) a carbon film at 250 °C. Part (c) shows the calculated recycle coefficients for the data of (a) and (b)¹⁴⁾

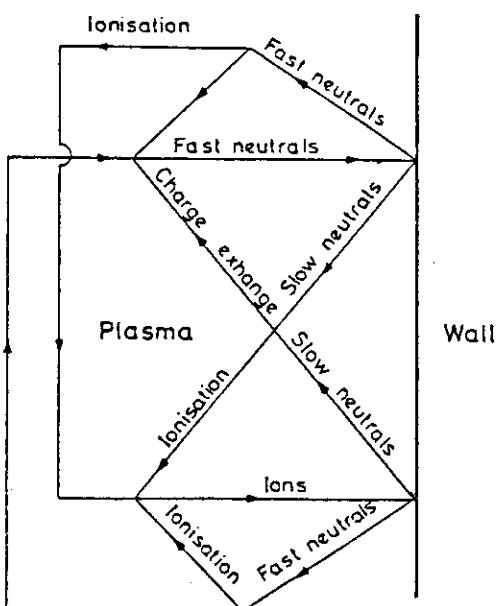


Fig. 5 Schematic of recycling model¹⁹⁾

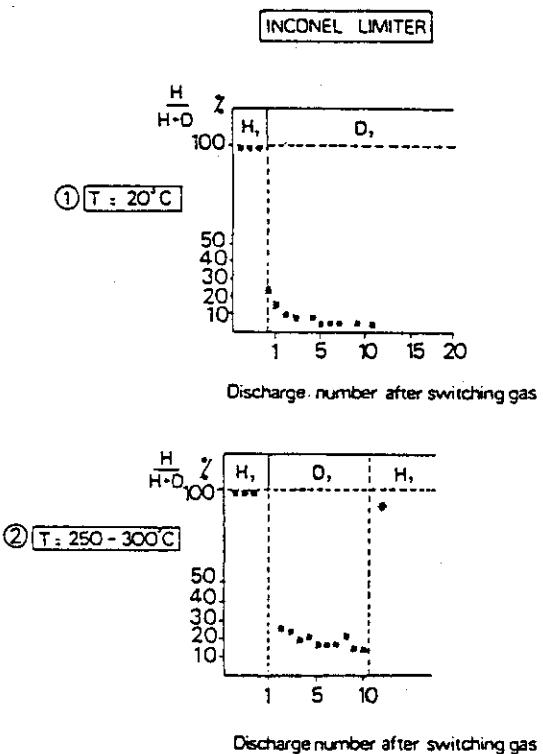


Fig. 6 Evolution of the isotopic ratio versus the discharge number with an inconel limiter³⁰⁾

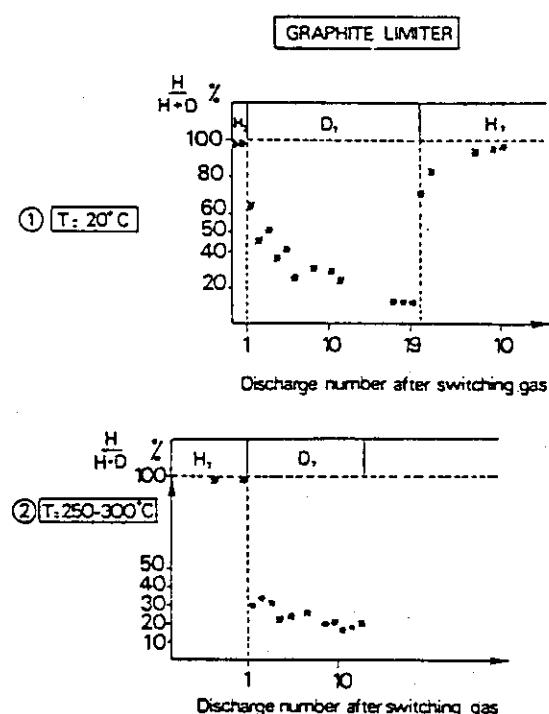


Fig. 7 Evolution of the isotopic $H/(H + D)$ versus the discharge number with a graphite limiter³⁰⁾

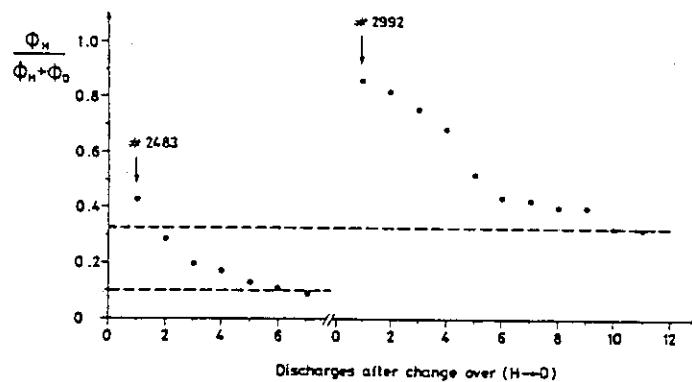


Fig. 8 Variation of the ratio of hydrogen to hydrogen plus deuterium fluxes from the plasma (1.5 keV charge exchange neutrals, CXN) as a function of the discharge number in isotope exchange experiments in JET. The ratios were measured at the end of the flat top phase of the density. Discharges from 2483 on had rather cold limiters ($= 250^{\circ}\text{C}$) while from 2992 on (post carbonisation) they became hot ($> 1000^{\circ}\text{C}$)³³

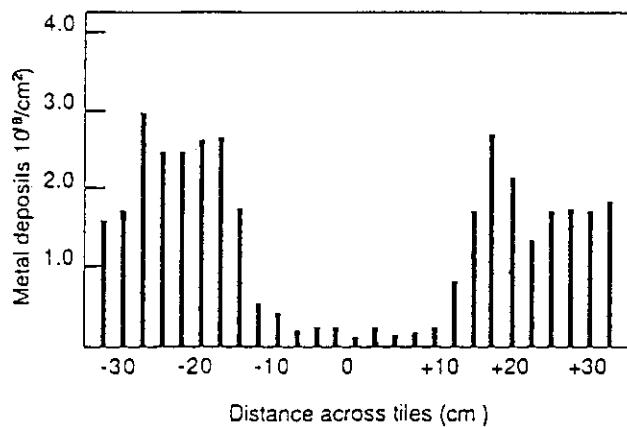


Fig. 9 Total amount of Ni, Fe, and Cr measured along surfaces of tiles 211 (left) and 89 (right) using X-PIXE³⁶

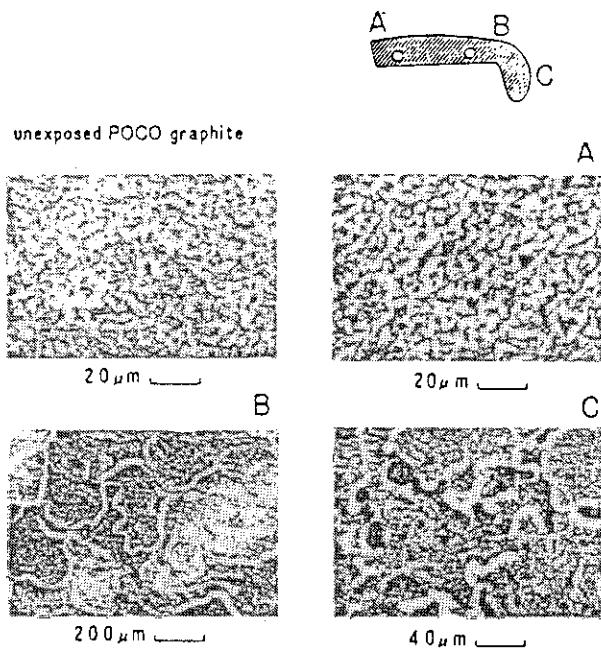


Fig. 10 SEM's of as-received POCO AXF-5Q graphite and samples cut from tile 89 at A: 2 cm, B: 20 cm, and C: 27 cm from the apex³⁶⁾

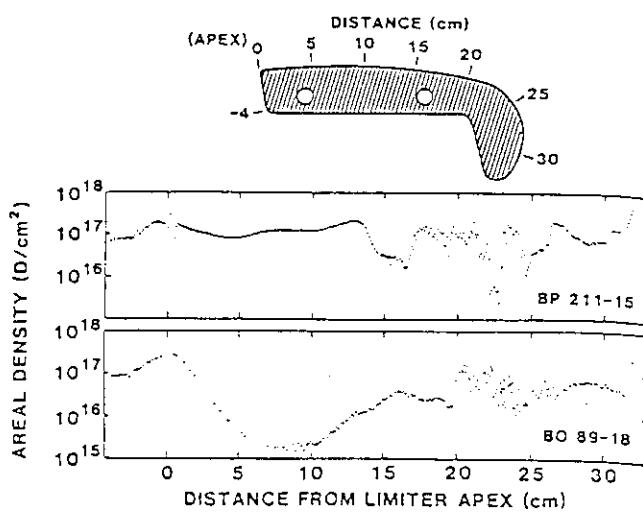


Fig. 11 Near-surface areal density of D measured across tiles 21 (electron side) and 89 (ion side) using NRA. A significant reduction in near-surface D levels is seen in the high heat flux region on the ion side³⁶⁾

4. グラファイト・カーボン材の基本的特性

カーボン材料の物理的諸性質は工業材料の著書に概説されている。(例えば文献39) プラズマ装置に用いる炭素材は、結晶質グラファイトから非晶質のカーボンにわたる。電極用黒鉛、熱分解黒鉛(パイロカーボン)など密度、製法の異なる黒鉛が使用されている。

4.1 グラファイトの実効表面積と熱原子吸着

グラファイトは多結晶焼結体となっており、単結晶と異なり実質的な表面積が大きい。POCO グラファイト(以下POCO-GRと記す)の表面粗さ係数(SRF=測定表面積/幾何学的面積)を Nakayama らが測定しているが⁴⁰⁾、9 keV の H_3^+ ビームを照射する前と後の測定で、ビーム照射の効果を求めている。 H_3^+ 照射前は SRF が 300 近くであったが(ただし十分研磨した後、超音波洗浄)，ビームフルエンスの増加とともに Fig. 12 のように低下した。これは熱解離現象とも関連していることが示されているが、ここでは、SRFのみに注目した。

Davis, Doyle らは単結晶カーボン(s-C)とパイロリティクグラファイト(Py-Gr)について sub-eV の中性 D 粒子の保持量を Laser Thermal Desorption Method (LTD) で測定している⁴¹⁾。この D 中性原子の表面吸着は D^+ のトラッピングに較べ小さい。これらは表面の 1 ~ 2 単原子層に吸着されているので、表面の粗さ効果が大きいと思われる。LTD 及び NRA 法で測定した結果は Table 2 のようであった。

結論としては s-C では sub-eV D^0 は $\sim 3 \times 10^{13} D^0/cm^2$ で、この値は Py-Gr での吸着量の 1/50 にしかならない。このことは Py-Gr 試料は 50 倍の SRF を持つと考えられる。同様な高温の熱原子 H の吸着係数の研究を P. Hucks らが Py-Gr に対して行っている。

P. Hucks らは非常に多い熱原子 H の捕捉を電解黒鉛に見いだしている。初めは真空装置でオイルポンプが用いられていたが、その後オイルフリーの実験を行った。H は W 管加熱のビーム源で発生し 0.5 mbar で H_2 が 80 % 解離している。回転板の速度選別器を用い、Q-マスで検出した。温度 295, 473, 700 K で Py-Gr へフルエンス 10^{17} 台の H をあてている。結果を Fig. 13 に示した。 10^{19} のフルエンスの場合を Fig. 14 に示した。捕捉効率は 2700 K の H で 10^{15} では 4 %, 10^{19} では 0.24 % であった。また 700 K まで連続的に上昇し、それ以上では急速に低下した(Fig. 15)。実験では H_2 に T_2 を僅かに混合した⁴²⁾。

デポジションプローブ(DP)としてカーボンを用いた実験では、C 中に本来内在している H の量が問題になる。DP として s-Si を用いる場合、そのような H の量は極めて少ないので問題にならなかった⁴³⁾。初めからの内蔵水素を脱ガスする研究を Beutler らが行っている。測定法には LRA (Laser Release Analysis) が用いられた。 $51 \times 8.5 \times 0.25 mm^3$ の Py-Gr を直接通電し、2400 K まで加熱した。真空は 10^{-10} Torr (H_2)、Gr はトカマクでの使用に合わせ、(a) 500 K, 24~48 hr, (b) 800 K, 1 hr, (c) 1500 K, 1 hr, (d) 2200 K, 4 min, (e) 2400 K, 30 s, 低温から高温へ変化した。結果を Fig. 16 に示す⁴⁴⁾。表面から $1 \mu m$ 以内の吸着量は以下

のようである。(a) $2 \times 10^{16} \sim 4 \times 10^{17}$ H/cm², 即ち 0.1 ~ 1 % H/C になる。TFTR に使われた POCO-Gr の NRA での測定では H/C ~ 1 % も入っており, H から Dへの変換が遅い原因と思われる¹³⁾。より高温への加熱では表面へ拡散放出が生じ, (d)では < 10^{14} , (e)では ~ 10^{13} となる。始めにベークしたものを大気にさらすと, 前の図から 1 ~ 24 hr 大気後に > 1500K でベークしたものは, (a)のものより 2 ~ 3 倍 H の量が少なくなる。

Livermore SNL と西独 IPP が協力して, 大型トカマク JET, TFTR などに使われるグラファイト材の脱ガス特性, 熱衝撃抵抗, 熱化学的性質を研究している⁴⁵⁾。大気にさらしたグラファイトのガス吸収の様子を, 重量測定した例を Fig. 17 に, 温度上昇の時のガス分析例を Fig. 18 に示した。ここに amu 2 = H₂, 18 = H₂O, 28 = CO と考えられる。始めに 350 °C で H₂O のピークがあり, 1200 °C 以上で H₂O と CO が放出される。材質の異なる HITCO weave (CC 139 C) では Fig. 19 のようになる。この論文にはトカマクの壁でのパルス的な熱負荷に対するグラファイトの特性も述べられているが省略する。このほか使用上のいろいろの問題として ~ kw/cm² の高い熱負荷での 100 s 程度, 及び 10 kw/cm² で 1 s のパルス的熱負荷に対する重量変化, 粒子放出及び繰り返し負荷に対する熱化学的性質などが総説されており, 壁材料を考える上で有用な図表が多く記されている。最後に, 少し変わった例として, W.R. Wampler のカーボン抵抗プローブ (C-RP) の実験を述べる。薄い C-フィルムの電気抵抗が粒子照射によって増大する現象を利用する。SiO₂ 上に金属接点と C-フィルムを蒸着する。C-フィルムの厚さと, ビームの飛程が同じ位か, より大きいかによって, 取扱が変わるが, Fig. 20, 21 にその例を示した⁴⁶⁾。後の報告では 20 ~ 1600 eV の H 及び D により較正し, プローブとして使用している。薄い層のプローブにより粒子のエネルギーも測定できる⁴⁷⁾。

Table 2 Comparison of LTD and NRA retention results in graphite samples exposed to 10^{19} D 0 /cm 2 41)
 (The sensitivity of the NRA technique is limited to $\sim 10^{13}$ D 0 /cm 2)

Sample	W coverage (monolayers)	LTD D 0 /cm 2	NRA ^{a)} D 0 /cm 2	NRA ^{b)} D 0 /cm 2	NRA ^{c)} D 0 /cm 2
2 SCG	-	3×10^{13}	1.5×10^{13}	-	2.6×10^{13}
3 PG	0.01	8×10^{14}	-	8.1×10^{14}	14.8×10^{14}
4 SCG	10	3×10^{14}	-	2.27×10^{14}	4.56×10^{14}
5 SCG	< 0.01	3.2×10^{13}	-	0.8×10^{13}	2.9×10^{13}

- a) Laser spot, but no desorption by LTD
- b) Laser spot, after desorption by LTD
- c) Off laser spot

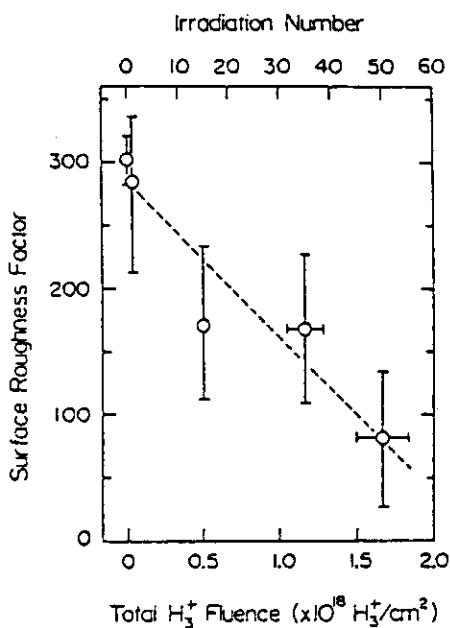


Fig. 12 Change of the surface roughness factor as a function of the total fluence⁴⁰⁾

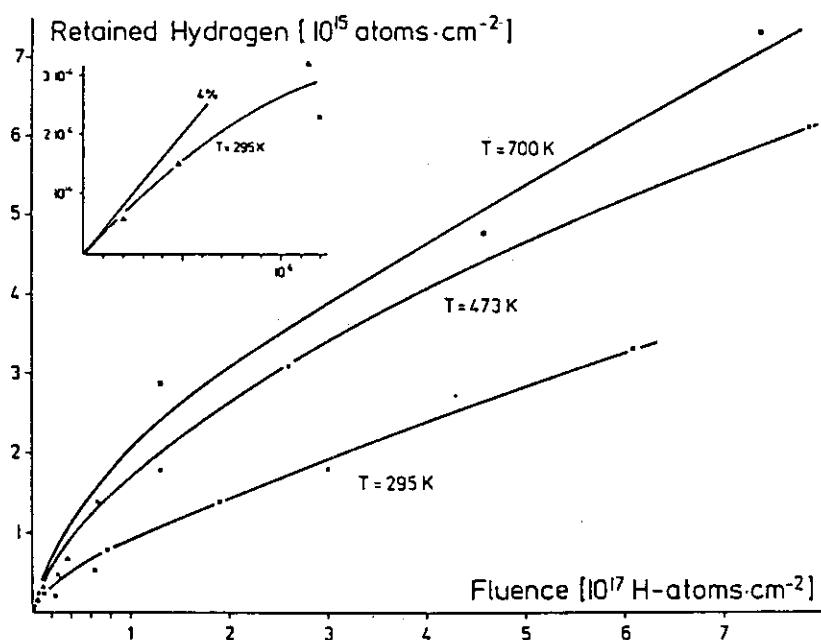


Fig. 13 Retention of hydrogen as a function of the irradiation fluence for different temperatures. Most of these results were obtained in one series except for (Δ), where another source tube and also another selector arrangement was used. The mixing ratio between hydrogen and tritium was 820:1⁴²⁾

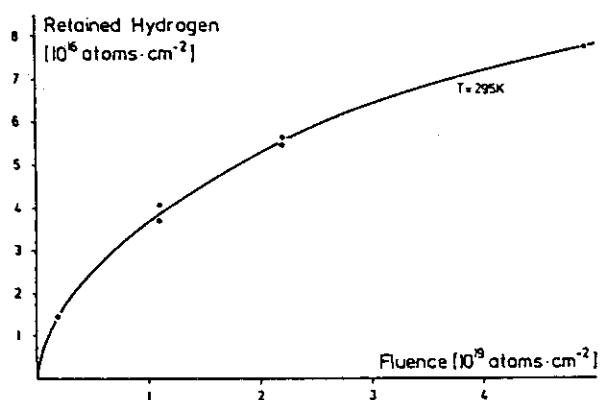


Fig. 14 Retention of hydrogen for high irradiation fluences. Mixing ratio between hydrogen and tritium was $4 \times 10^4 : 1^{42}$)

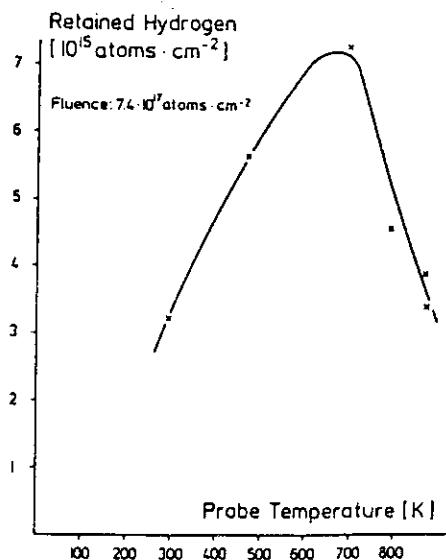


Fig. 15 The temperature dependence of the retention of hydrogen at an irradiation fluence of $7.4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ (H:T = 820:1)⁴²)

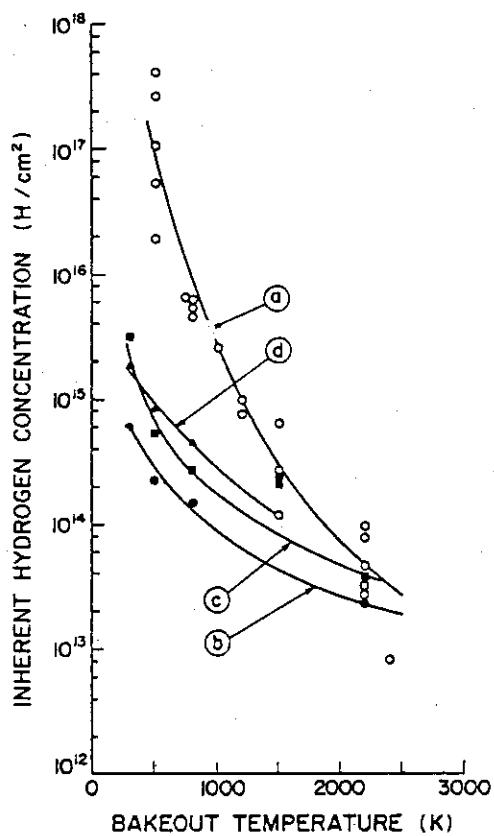


Fig. 16 (a) Inherent hydrogen concentration in the near-surface region of pyrolytic graphite for various bakeout temperatures,
 (b) Hydrogen concentration after 1 h atmospheric exposure,
 (c) Hydrogen concentration after 24 h atmospheric exposure
 for a sample initially baked up to 2200 K,
 (d) Hydrogen concentration for a sample initially baked at
 1500 K for 1 h and exposed to atmosphere for 1 h⁴⁴⁾

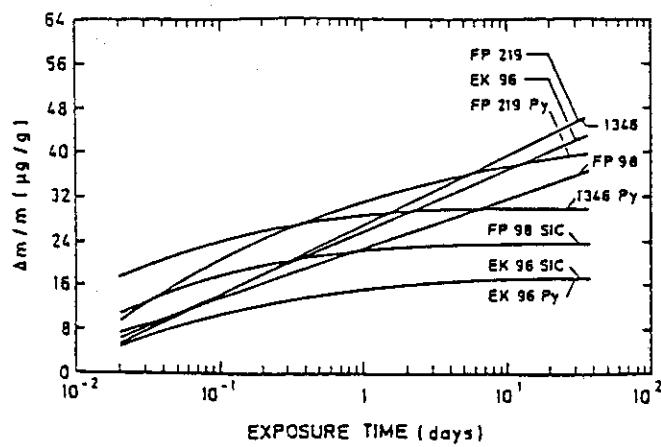


Fig. 17 Weight change of different types of graphite exposed to air⁴⁵⁾

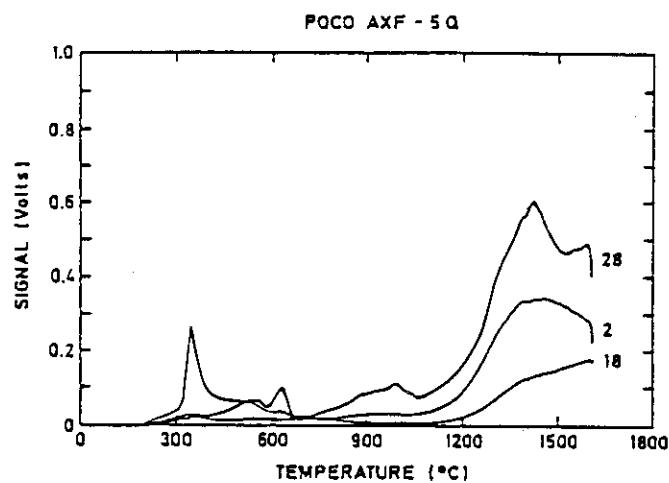


Fig. 18 POCO AXF-5Q graphite desorption spectra for the amu 2 (H_2), 18(H_2O), and 28(CO) gained at a ramp rate of $1 \text{ }^\circ\text{C/s}$ ⁴⁵⁾

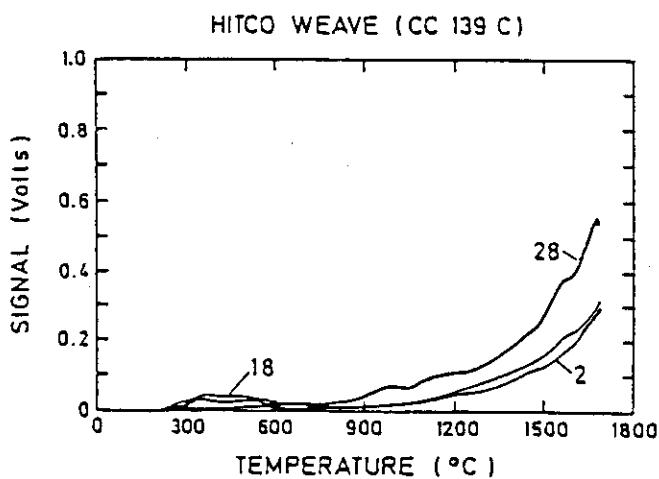


Fig. 19 HITCO weave graphite (carbon-carbon composite) desorption spectra for the amu 2(H_2), 18(H_2O), and 28(CO) gained at a ramp rate of $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}^{45}$

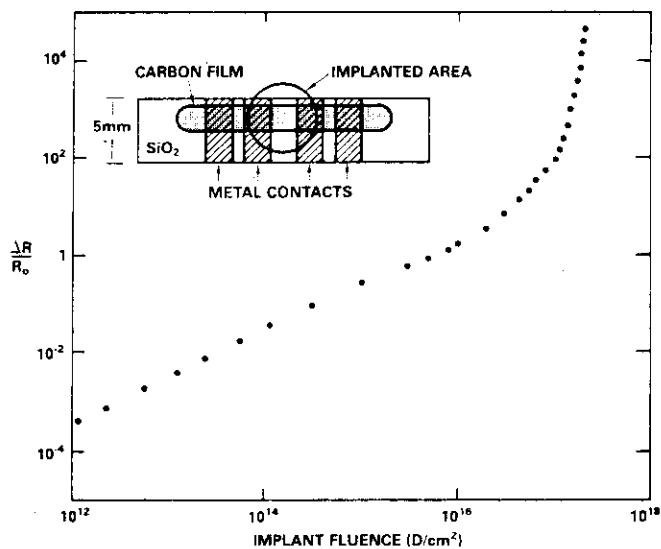
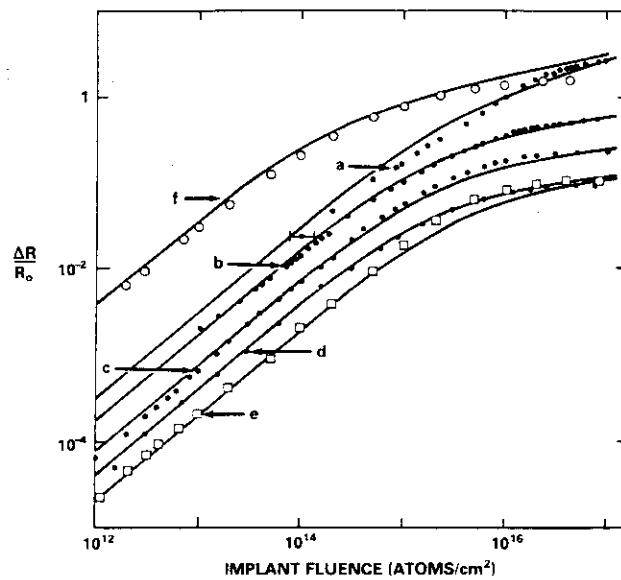


Fig. 20 Relative resistance change of a carbon film 92 nm thick vs. fluence of deuterium implanted at 3 keV. At this energy the entire thickness of the carbon is being implanted. The inset figure shows the geometry and size of the samples⁴⁶)



Sample	Implanted atoms	Energy (eV)	Thickness (nm)
a	D	500	49
b	D	250	49
c	D	125	49
d	D	125	92
e	H	125	92
f	C	3000	49

Fig. 21 Relative change in the resistance of carbon films for the case where the range of the implanted particles is less than the thickness of the carbon film. The solid dots are deuterium implants, the squares and circles are hydrogen and carbon implants, respectively. The solid lines were calculated using the model described in ref. 46). The horizontal error bar indicates the uncertainty in the incident particle fluence⁴⁶⁾

4.2 粒子の捕捉及び保持

R.A. Langley 及び J. Roth らは 1978 年に < 100 °C で Py-C へ 8 keV の D または He をインプラントし、プロトンの後方散乱により深さプロファイルを測定した、 Trapping (捕捉), Thermal Desorption (熱解離) をインプラントフルエンス及びその後のアニール温度の関数として測定した。この研究では 10^{18} D/cm² まで D は 100 % 捕捉されること、測定された平均の飛程と全幅は 10^{18} まで計算より広い。さらに、これ以上のフルエンスではプロファイルは大きく広がってしまうこと、その他脱離で D₂, CD₄ などの放出温度が後の図のようになること、900 °C でも D/C ≤ 0.028 の D が残ること。一方、室温でインプラントされた He では $10^{18} \sim 10^{19}$ He/cm² に於いては約 95 % が放出されるなどを初めて明らかにした。Fig. 22, 23, 24 に以上の結果を示した⁴⁸⁾。

1979 年には G. Staudenmaier らは Papyex (Le Carbone, Port Slade, Sussex, UK) のりボンに D⁺ をインプラントし、保持量、入射フルエンスに対する再放出率、飽和保持量、D⁺ のエネルギーに対する反射係数、入射粒子にエネルギー分布を持たせた場合の保持量について基本的なデータを得ている⁴⁹⁾。これらを Fig. 25, 26, 27, 28, 29 に示した。この実験では s-Si にも同様のデータが取られ、これらはデポジションプローブにとり有用であるが、ここでは省略する。なお、飽和に於ける保持量は入射粒子のエネルギー E が 50 eV ~ 20 keV に於いて、カーボンでは $E^{0.9}$ 、シリコンでは $E^{0.8}$ に比例する関係を導いている。また室温では、この時には飽和の D/C ~ 0.5 となっているが、この値は後に述べるように 0.4 付近になることが分かっている。

S.A. Cohen らはカーボンと a-Si に対し、水素同位体の後方散乱、捕捉、深さ分布の理論モデルを提唱している。Brice の計算コード⁶⁶⁾で投影飛程とストラグリングを求め、飛程の分布は球対称のガウシアン、拡散理論の鏡像を差し引く。このような方法で反射と飽和を含めた計算を行った。結果は実験とよく一致した。Fig. 30 に Brice の計算コードの結果、Fig. 31, 32 に C 中の D の深さプロファイルを、それぞれフルエンスとエネルギーをパラメーターとして示した。又 D のカーボン及び Si 中の保持量の入射フルエンスに対する依存性の計算と実験の比較を Fig. 33, 34 に示した。さらに粒子分布が単エネルギーではなくマクスウェル分布である場合の入射についての計算なども示されているが、省略する⁵⁰⁾。

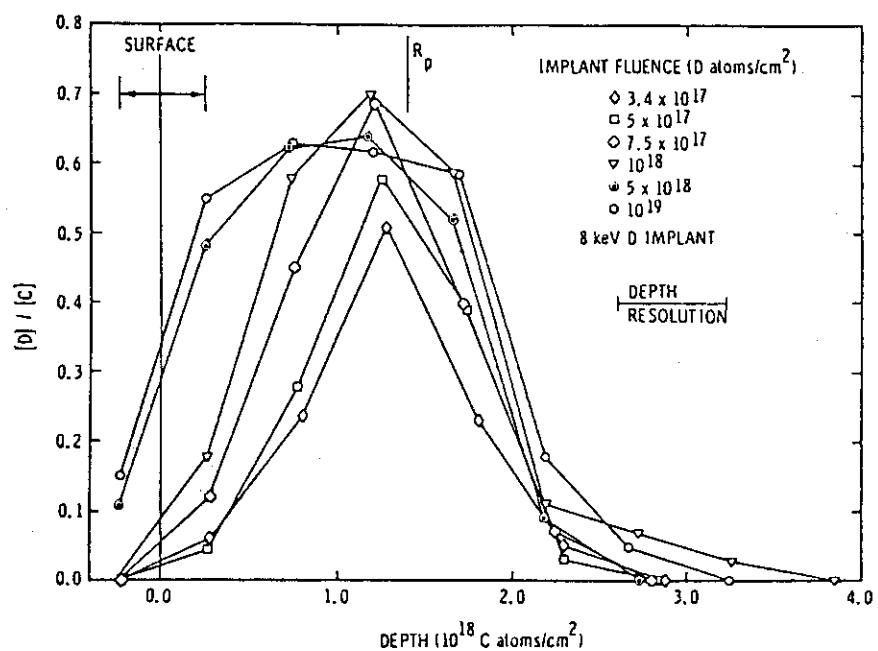


Fig. 22 Depth profiles for implanted 8 keV D as a function of implant fluence⁴⁸⁾

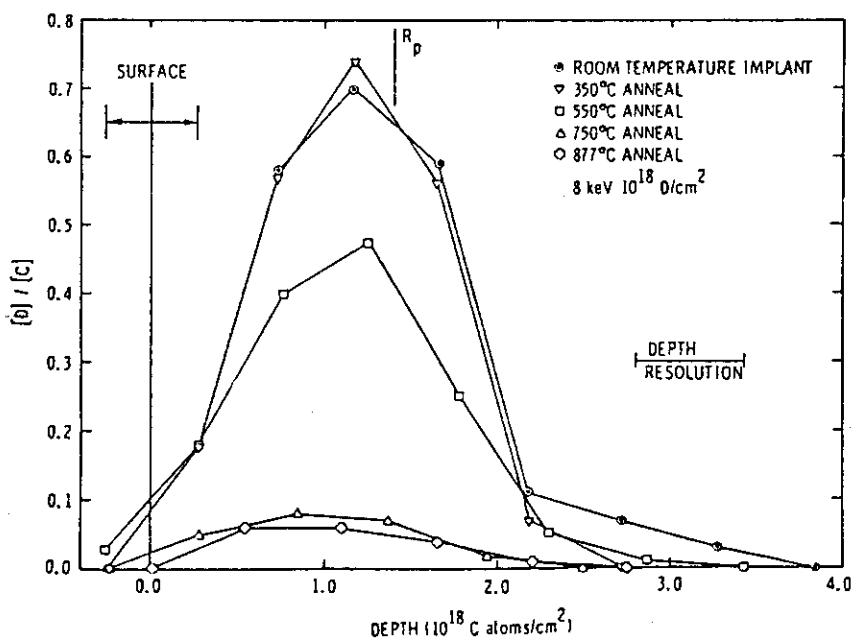


Fig. 23 Deuterium profile change as a function of anneal temperature⁴⁸⁾

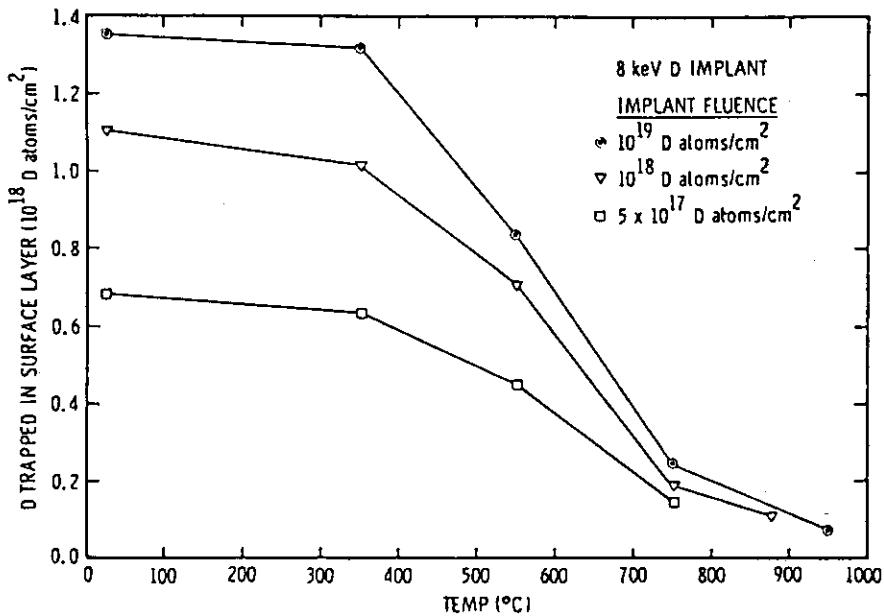


Fig. 24 Amount of deuterium implant trapped in the near-surface region as a function of anneal temperature for different fluences⁴⁸⁾

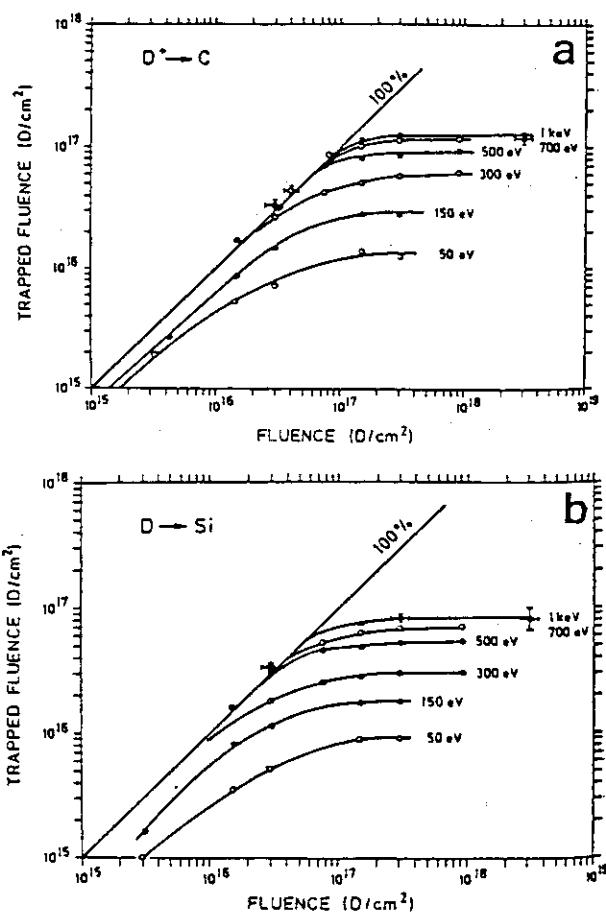


Fig. 25 The amount of deuterium trapped as a function of the implantation fluence for different implantation energies measured with the nuclear reaction technique. (a) Trapping in carbon (Papyex), (b) trapping in a Si single crystal with normal incidence on a (111) plane⁴⁹⁾

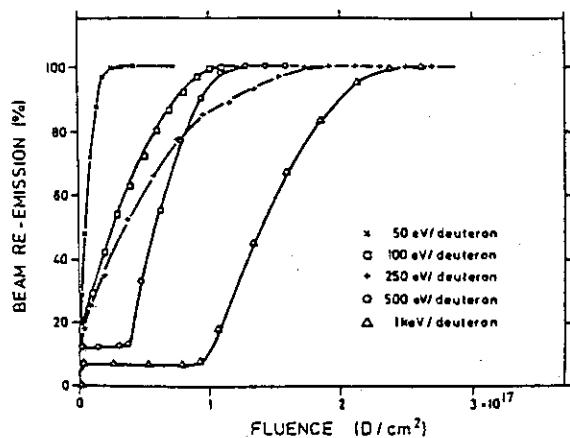


Fig. 26 Re-emission of deuterium during implantation in carbon (Papyex) for different energies⁴⁹⁾

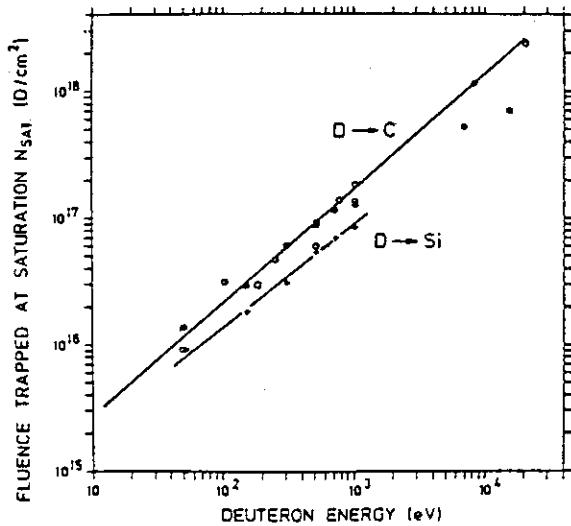


Fig. 27 Fluence trapped at saturation versus energy: (●, +) nuclear reaction, (○) re-emission, (□) thermal desorption spectrometry. Values at higher energies are taken from the literature: 6, 7 and 15 keV⁶³⁾, 8 keV⁴⁸⁾, 20 keV⁶⁷⁾. The straight line corresponds to $E^{0.9}$ for carbon and $E^{0.8}$ for silicon⁴⁹⁾

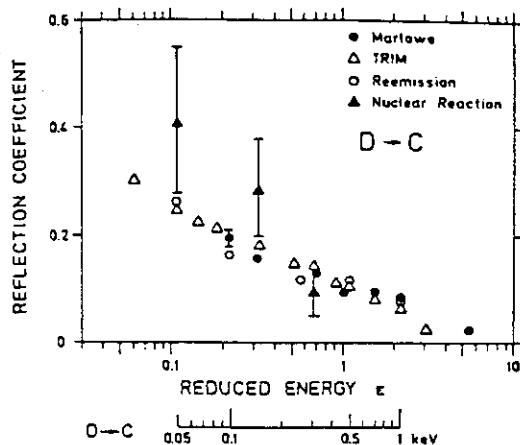


Fig. 28 Energy dependence of the reflection coefficient obtained from the experiment and from computer simulation⁴⁹⁾

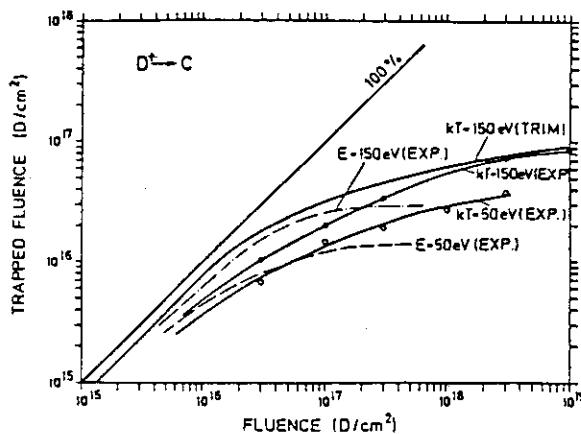


Fig. 29 Trapped fluence versus primary fluence for an energy distribution simulated by a subsequent implantation of suitable fluences at fixed energies. For comparison the mono-energetic curves for 50 eV (----) and 150 eV (- - -) are given. In addition, a calculated curve for a mean energy $\bar{E} = 150$ eV (-----) is shown⁴⁹⁾

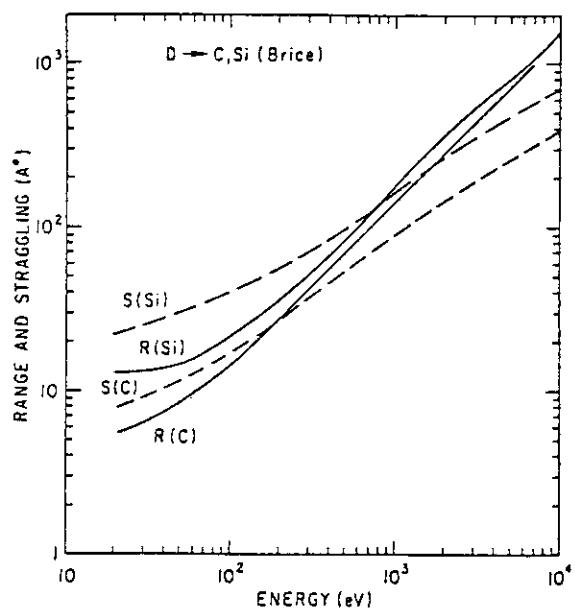


Fig. 30 Staggling, S, and mean projected range, R, for deuteriums on carbon and silicon taken from Brice code calculation (Ref. 66)⁵⁰⁾

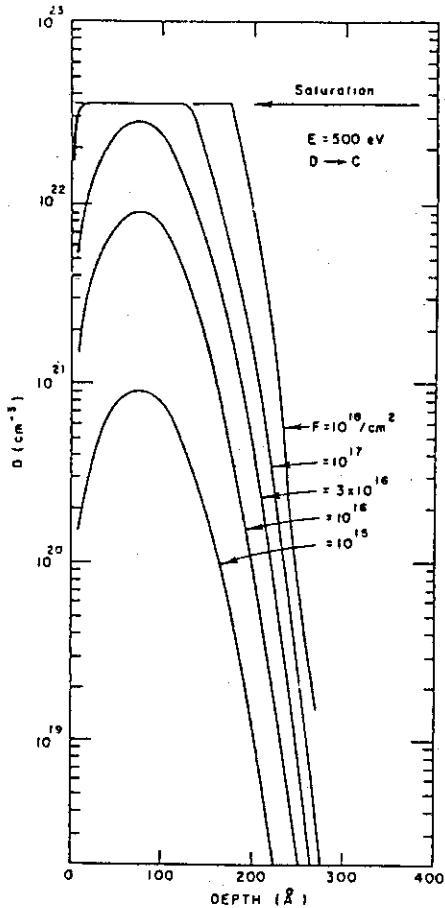


Fig. 31 Calculated depth profile versus fluence, F , for normally incident 500 eV D on C. Saturation occurs at a concentration of $3.5 \times 10^{22}/\text{cm}^3$ (50)

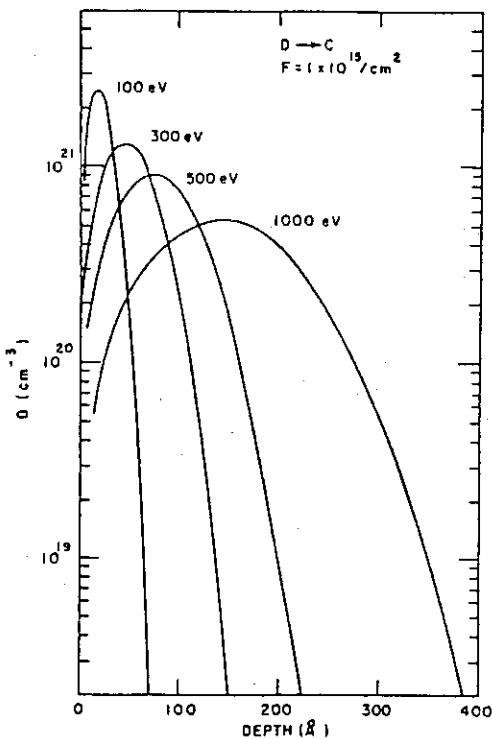


Fig. 32 Depth profiles for normally incident mono-energetic beams of deuterium bombarding carbon. The fluence, F , is $10^{15}/\text{cm}^2$ (50)

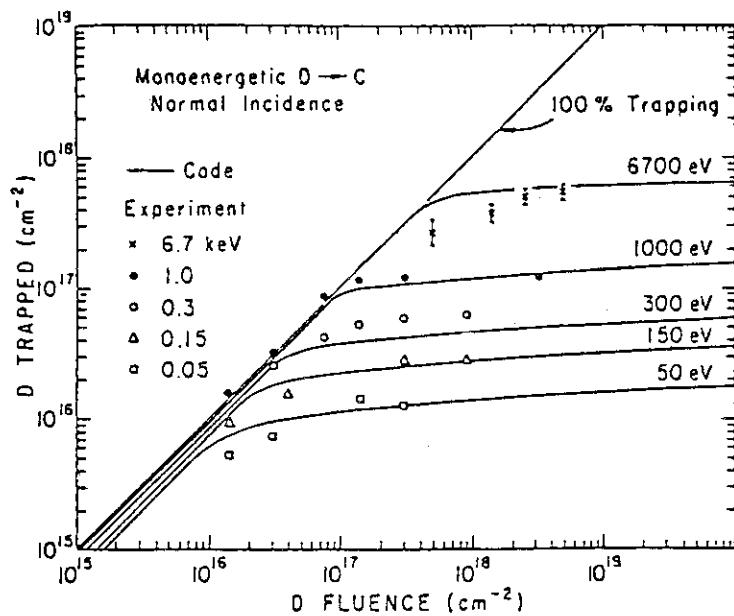


Fig. 33 Comparison of calculated trapped deuteriums in carbon versus fluence with data of Staudenmaier et al. (Ref. 49)⁵⁰)

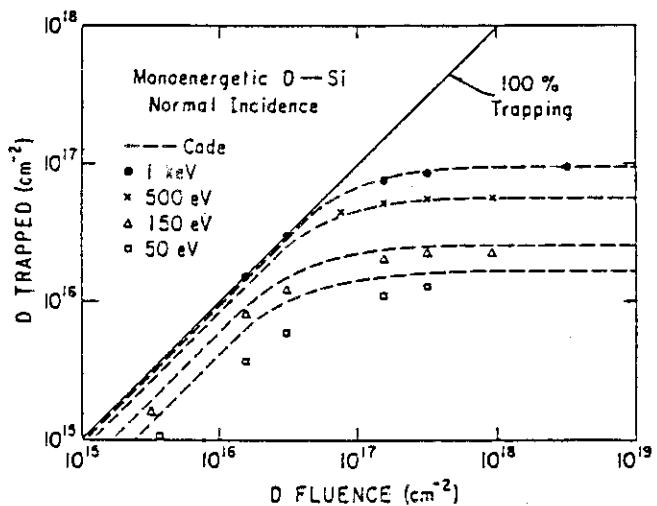


Fig. 34 Comparison of calculated trapped deuteriums in silicon versus fluence with data of Staudenmaier et al. (Ref. 49)⁵⁰)

4.3 飽和保持と同位体交換（置換）の問題

すでに述べたように、同位体の置換はプラズマと壁の間の粒子のリサイクルの研究に有用な手段であるが、DT核融合炉の開発にとって、DからTへとプラズマの核種を変換することは工学的に必要な手続きである。このため、水素同位体の変換実験が多く行われ、特に最近はグラファイト壁を対象とした研究が盛んである。

初期の研究では、1978年にR.S.Blewer, R.Behrischらが、150 Kで、316ステンレス鋼における1~14 keVのHとDの捕捉と置換（Replacement, Changeover）を実験的に研究し、Fig. 35の結果を得た。置換現象の始まり以後の減衰を置換しやすいDと、しくいDの2種として説明した⁵¹⁾。

カーボンに対しては、B.L.Doyleらが低Z物質として、TiC, TiB₂などとともに、飽和保持と置換の実験と理論を報告している⁵²⁾。これらはTFRでTを用いる時の考察として有用である。この報告とほぼ同様の内容の報告が文献53)にある。現象としては、先に述べたように、Dをインプランツしていくと、始めは入れただけが表面の散乱反射分を除き保持されしていくが、次第に飽和が始まり、その場所の濃度比D/Cがある値になると、それ以上は総て放出される。そこへHを注入していくと、次第にDが追い出されDの濃度が低下していくがDとHの和の濃度は飽和値N_sになっている。これを説明する理論としてDoyleらはLocal Mixing Model (LMM)を考え出した。現象を2部に分け、1部では飽和まで、2部では飽和後とする。

(1) 飽和まで($N_1 + N_2 < N_s$)では深さxに於ける各粒子の濃度 N_i は、入射フラックス $d\phi_i/dt$ とその粒子が(x, x+dx)に留まる確率 $P_i(E_i, x)$ の積となる($i = 1, 2$)。したがって

$$\frac{dN_1(x, t)}{dt} = P_1(E_1, x) \frac{d\phi_1}{dt},$$

$$\frac{dN_2(x, t)}{dt} = P_2(E_2, x) \frac{d\phi_2}{dt}$$

(2) 飽和後($N_1 + N_2 = N_s$)では、ある種別の粒子密度の時間変化は、その場所の他種の粒子の占める割合とその粒子のデポジション率との積の分だけの増加率と、その粒子の占める割合と他種の粒子のデポジション率の積の分だけの減少率の和となる。即ちある粒子が置き換わる確率は、他の粒子のフルエンスとそこに存在するその粒子の飽和に対する占有率に比例するという考え方である。方程式で書けば

$$\frac{dN_1(x, t)}{dt} = \frac{N_2}{N_s} P_1(E_1, x) \frac{d\phi_1}{dt} - \frac{N_1}{N_s} P_2(E_2, x) \frac{d\phi_2}{dt},$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \frac{dN_1}{dt}$$

となる。ここで飽和濃度が実験から決められるパラメーターである。この時までの研究では Cohen, Mccracken, Roth, Langley, Staudenmaier らにより H/C では 0.3 ~ 0.63 までのいろいろな値が得られていた。異なった結果となる理由は明確でない⁵²⁾。しかし LMM の理論と実験の一致は極めて良いものであった。即ち、Fig. 36 に 1.5 keV の D と H の C における場合

の計算, Fig. 37 に Py-C と TiC の場合の実験と理論計算の比較を示した。なお Fig. 38 に先の R.S. Blewer の実験⁵¹⁾に対するこのモデルの計算が示されているが、ステンレス鋼に対してもよく当てはまる。

W.R. Wampler, C.W. Magee はガラスの上に付けた $40 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ (220 nm) の厚さの a-C と圧縮焼鈍した Py-Gr を用い、1.5 keV 以下の H と D で置換に伴う深さプロファイルを調べた。測定は SIMS 及び NRA を用いた。Fig. 39 に SIMS で求めた C 中の 0.53, 1.5 keV の D の深さ分布を 10^{16} 及び $10^{18} \text{ D}/\text{cm}^2$ に対して D/C として表してある。飽和の D/C は約 0.44 となった⁵⁴⁾。同じ図が W.R. Wampler の報告⁵⁵⁾にも示されているが、文献 55) では飽和保持量が重点的に論じられている。Fig. 40 に C 中の D の深さ分布の SIMS による測定と、TRIM の計算結果を比較している。計算値の方が FWHM がやや狭い。なお低エネルギーの D の C 中で TRIM による飛程とストラグリングの計算値を Fig. 41 に示した。この図は Fig. 30 に較べ低エネルギーで少し違いがある。グラファイトの種類に対し、保持量対入射フルエンスの関係を Fig. 42 に記した。なおこの図の実線は文献 50) に述べたガウシアンイメージ法によっている。結局、飽和はグラファイトの種類によらないことが分かる。また、3 keV の D_3^+ と 1 keV の D_1^+ の飽和の振る舞いは同じとなったことが記されている。文献 54) の、D の注入後に H を入れた置換実験の結果と、TRIM-LMM の計算結果の比較を Fig. 43, 44 に示した。よい一致が認められる。

Doyle, Wampler, Brice は C 及び TiC の H, D の飽和と同位体交換の温度依存を調べている。まず温度に対する飽和保持量は室温での値を 100 % とすると、Fig. 45 に示すようになった。更に 600 °C までの温度で H-D の置換実験を行っている⁵⁶⁾。この図は次で記す。

上記の結果のように高温になるほど実効的な飽和保持量が減少することは、LMM モデルでは考慮されていない。そこで、D.K. Brice らは LMM モデルを拡張して、水素がその捕捉されている位置から熱放出 (Thermal Release) される場合を含む理論を記している。温度が高い場合に Thermal Release の主な機構に Beam Enhanced Thermal Transport (BETT) が寄与すると考えられる。例えば 800 ~ 900 K でのグラファイトに於ける水素の放出は 50% 以上 BETT が担う。BETT とは、空孔の介在する拡散とは違い、強いトラップから弱いトラップへビームが在ることにより捉えられる輸送現象である⁵⁷⁾。従って、再捕捉効果が含まれた方程式となる。このモデルによる理論を ELM (Extended Local Model) と呼んでいる。実験の結果とこの方程式で計算した比較を Fig. 46 に示した。なお、詳細を省略したが、この計算に使われた色々なパラメーター及び特性値は文献 57) の Table - 1 にある。

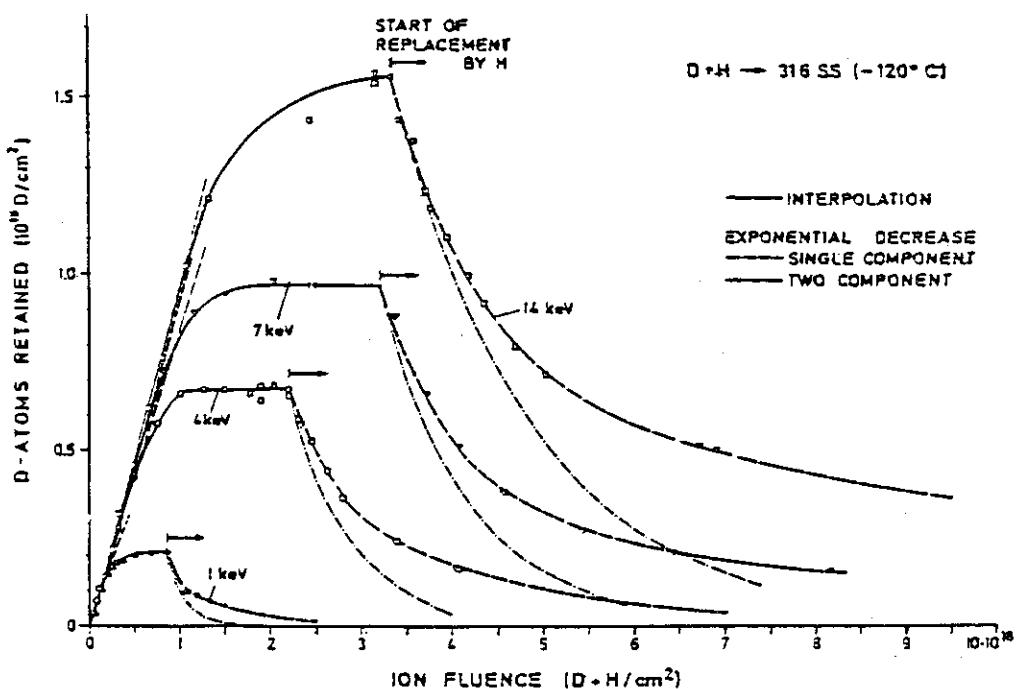


Fig. 35 Trapping and replacement behavior of deuterium implanted stainless steel at 150 K as a function of fluence. The thin dashed lines in the linear portion of the trapping curves represent 100 % trapping after kinematic reflection is taken into account. The break in the 7 keV curve at saturation corresponds to an additional fluence of $2 \times 10^{18} \text{ D}/\text{cm}^2$ [51]

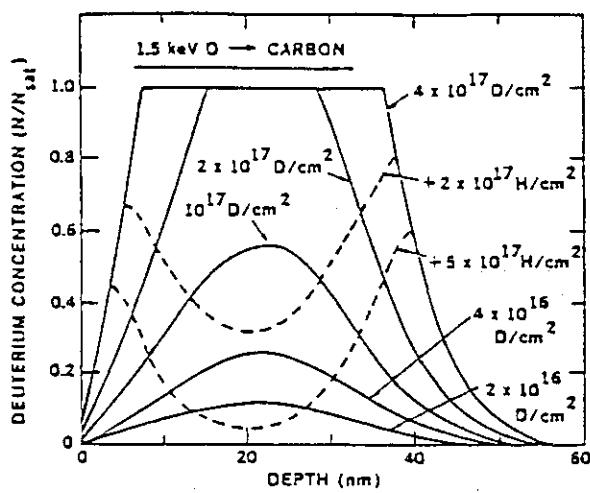


Fig. 36 Calculated D concentration versus depth profiles for (1) 1.5 keV D implanted to saturation and (2) subsequent replacement with 1.5 keV H⁵²)

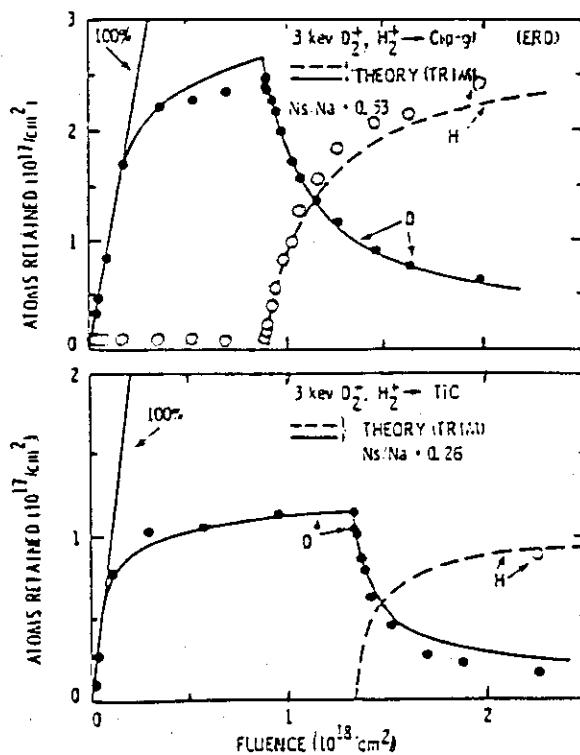


Fig. 37 D saturation and isotopic replacement curves for 3 keV D and H on pyrolytic graphite (top) and TiC (bottom)⁵²)

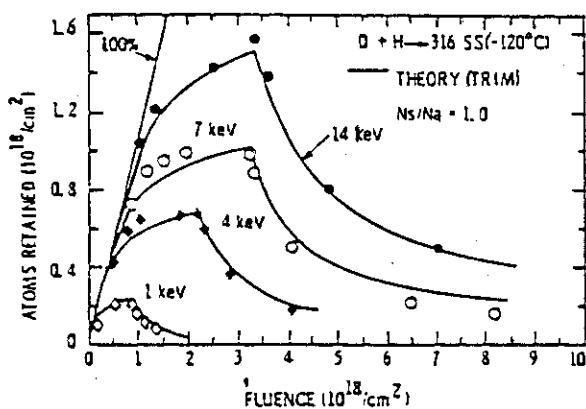


Fig. 38 D saturation and isotope exchange curves for 316 stainless steel at several incident energies⁵²⁾

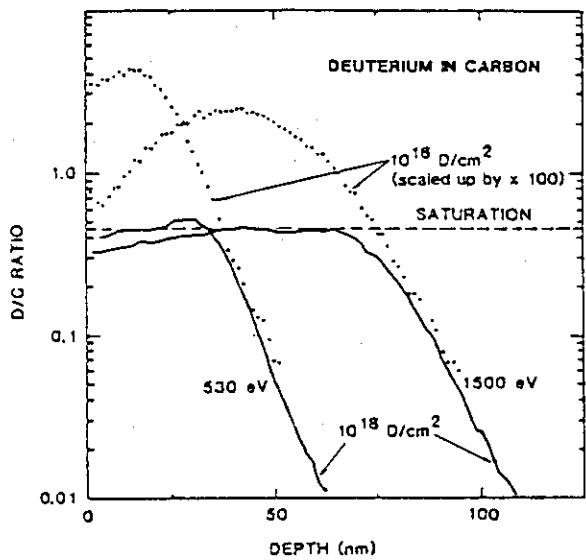


Fig. 39 Concentration versus depth measured by SIMS for 530 eV and 1500 eV D implanted in carbon to an incident fluence of 10^{18} D/cm² (solid curves) and 10^{16} D/cm² (dotted curves)⁵⁵⁾

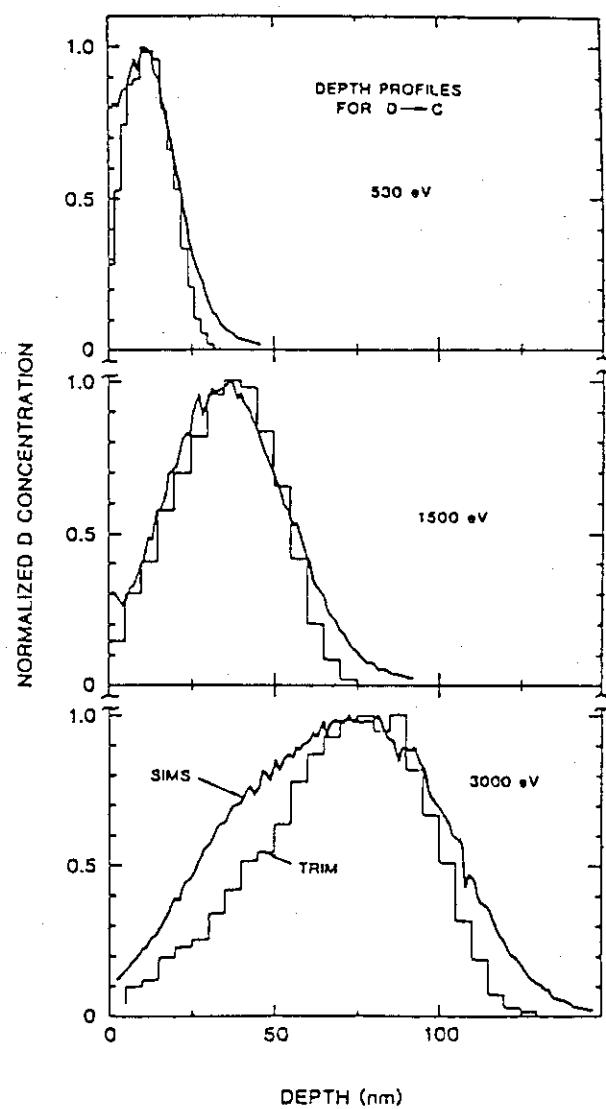


Fig. 40 Measured (SIMS) and calculated (TRIM) depth profiles for deuterium implanted in carbon at energies of 530, 1500 and 3000 eV and normal incidence⁵⁵⁾

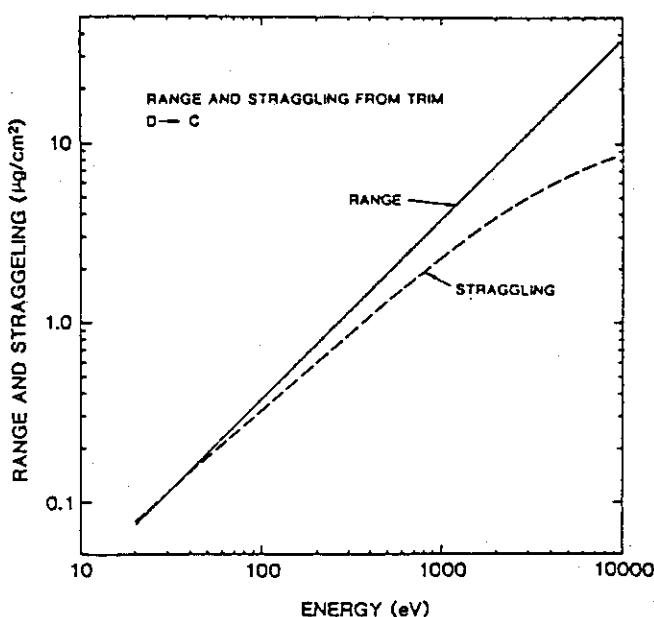


Fig. 41 Range and straggling parameters for deuterium in carbon for an infinite medium calculated using TRIM. Note these do not include the effect of the surface⁵⁵)

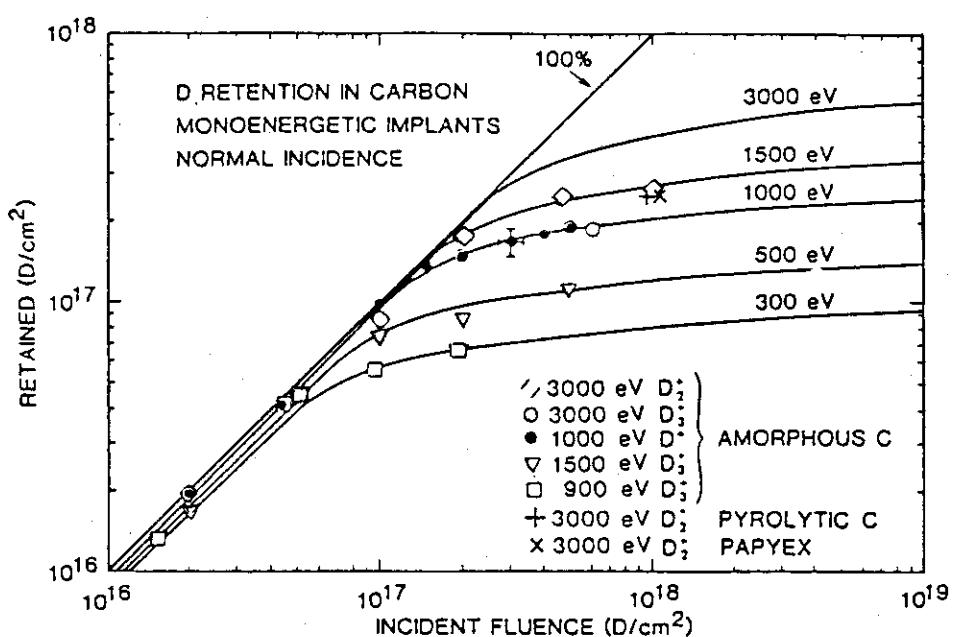


Fig. 42 Retention for monoenergetic deuterium at normal incidence on carbon, calculations (curves) and data (symbols). Typical error bars are indicated⁵⁵)

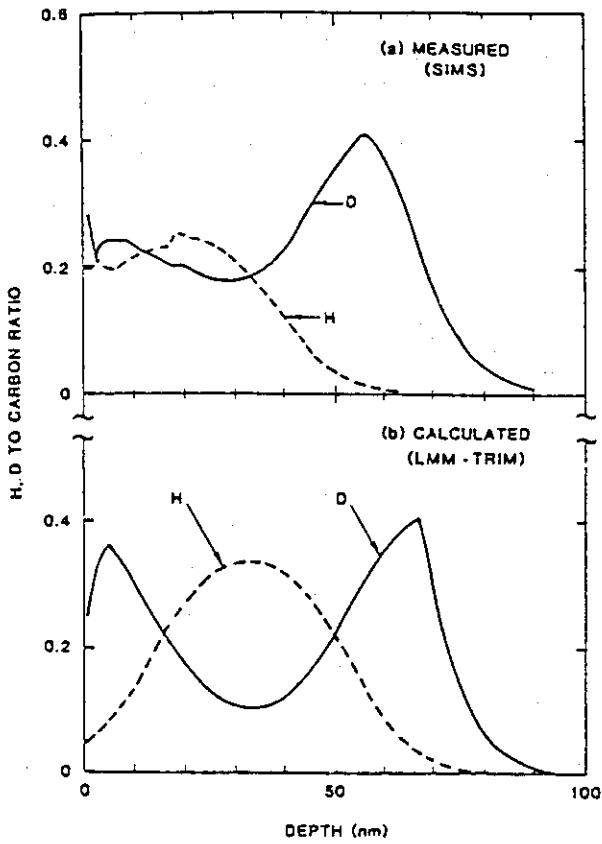


Fig. 43 H and D profiles in carbon implanted with 10^{18} D/cm 2 followed by 2×10^{17} H/cm 2 both at 1.5 keV showing isotope exchange of the D by the H 54)

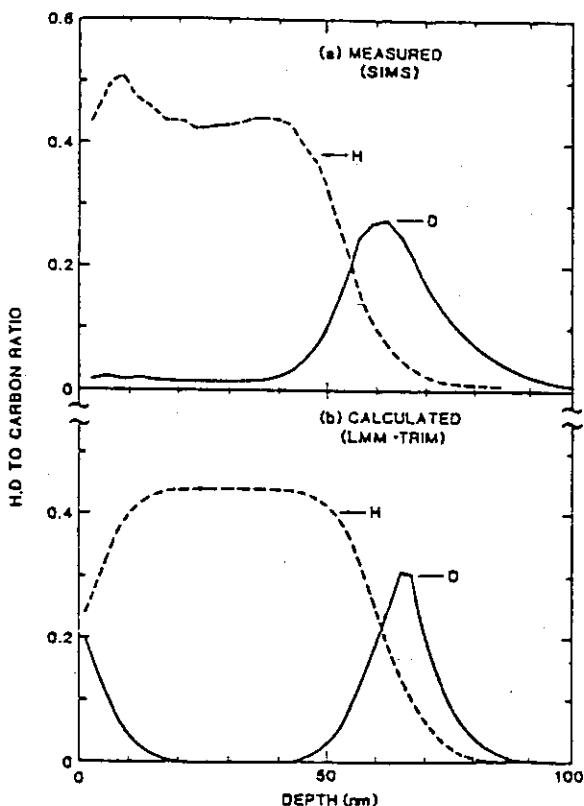


Fig. 44 H and D profiles in carbon implanted with 10^{18} D/cm 2 followed by 10^{18} H/cm 2 both at 1.5 keV. Beyond the range of the H 23 % of the initially retained D still remains 54)

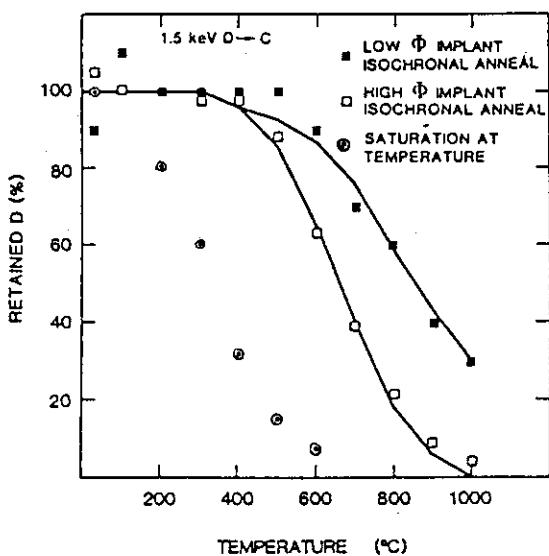


Fig. 45 The relative D retention vs. sample temperature in carbon
1) an unsaturated and 2) a saturated sample implanted at
30 °C and then isochronally annealed and 3) a sample satura-
ted at the given temperature⁵⁶⁾

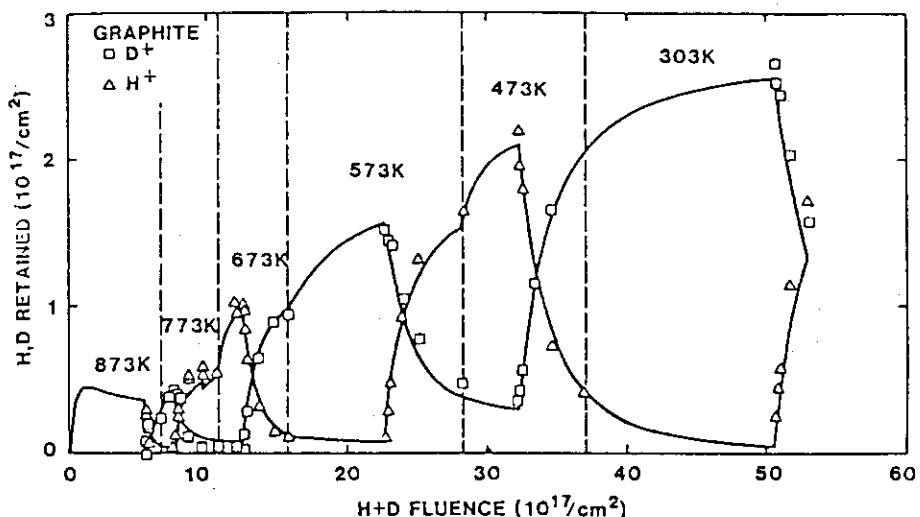


Fig. 46 Retained H and D versus H plus D accumulated fluence for gra-
phite substrate. Solid curves are calculated ones. Vertical
dashed lines mark points at which substrate temperature was
decreased. Temperature indicated between vertical lines⁵⁷⁾

4.4 イオン誘導放出効果

W. Möller らはアイソスタティクに圧縮されたグラファイトについて ≥ 450 Kで 9 keV の H_3^+ 及び D_3^+ をインプラントし、定常状態で保持量の温度依存性を実験した。実験に用いたグラファイトは EK98 (密度 1.85 g/cm^3 , グレイサイズ $\leq 25 \mu\text{m}$) のものである。定常的な照射の後に温度を上げると、続けて照射した場合超飽和のイオン誘導放出が生じる。200 °C の一定温度で d, p インプラント中の放出実験では、D により、始めにインプラントされた H が放出される方が、H による D の放出よりは少し速い。これらの結果は LMM モデルの計算と較べてある。インプラント中のカーボンの温度の関数として、保持される D の量を Fig. 47 に示した。これらは実線で表わされているが、破線は室温でインプラントした後、横軸の温度で熱アニールした場合を与える。この図で、例えば、1.5 keV の実線と破線の 670 K に於ける差はイオン誘導放出効果 (Ion Induced Release) によるものである。さらに、ある温度で飽和まで D をインプラントした後、温度を 100 ~ 300 K 上昇し、その温度でさらに D をあるフルエンスまで照射し続けた場合に、再放出するフラックスをフルエンスの関数として示したもののが Fig. 48 である。これらの放出現象に対し、放出される粒子の種類を分析すると、分子として放出されている。Fig. 49 に実線結果と、LMM で計算した結果を Fig. 50 に示した。放出が分子であるため、計算には分子の形成条件が含めている。Möller は初め金属 (Mo, Pd, Ta, Ni など) 中の水素について詳細な研究を行っている⁵⁹⁾。以上の計算法は文献 59) 中に示されている。

J. Roth は Papyex カーボン、Py-C に 1 keV の D をインプラントして捕捉、脱離、置換の研究をかなり初期に行っている。測定は NRA, RBS, ERD である。得られたスペクトルの例を Fig. 51 に示した。上の図で D のプロファイルを与える ${}^3\text{He}$ による α のスペクトルが得られ、これは横軸の下方に目盛った深さに換算されている。また、下の図は反跳の D と H の信号でうまく分離出来ている。Roth らは測定の為のビームのフルエンスの増加とともに、H や D の保持量が減少していくので、保持量の算出には 0 フルエンスに外挿した値を用いている。Papyex 及び Py-Gr 中の保持量の減少の模様を Fig. 52, 53 に示す。この結果、室温飽和保持量として $D/C = 0.4 \pm 0.06$ と結論している。この値は信頼性が高い。イオン誘導離脱には離脱断面積を求め、そのエネルギーに対して阻止能と同じ傾向となるが、ビームの粒子質量の増加に対する効果が遙かに大きい事を指摘している。これを Fig. 54 に示す。この報告では SNL と IPP の両研究所で実験を行い、8 keV の H を 7 keV の D で置換し Fig. 55 の結果を得ている。理論曲線は LMM による⁶⁰⁾。なお、脱離と置換は類似の現象ではあるが、後者では 2 種の粒子の和は飽和値に保たれる。

イオン誘導放出に関して、W. R. Wampler, S. M. Myers はカーボンターゲットに 150 ~ 600 eV の D を飽和まで入れ、それを 3 keV の H, He, 30 keV の He, C, 60 keV の C イオンで衝撃して、D の誘導放出を測定した⁶¹⁾。実験と結果の要点を示す。Fig. 56 は深さに対する飽和のプロファイル、プローブビームの静止分布とエネルギー付与の深さ分布を示す。また、Fig. 57 はプローブビームのフルエンスに対する D 粒子の相対的保持率の変化を示してある。LMM の計算は同位体の交換のみを考えたものでイオン誘導放出は含まれていない。Fig. 58 には 300 eV でインプラントした D の保持率を 30 keV の He 及び C で測定した場合のフルエンスに対する変化で、

R はインプラント厚さに対応し、 L はRetrapping（再捕捉）の特性長さで、 $R/L < 1$ なら再捕捉は省略でき、 $R/L > 1$ なら強い再捕捉である。理論式ではトラップのあるときの拡散方程式を用い

$$\frac{\partial C_S}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C_S}{\partial x^2} - S$$

$$S = \frac{\partial C_T}{\partial t} = \alpha D C_S (N_T - C_T) - \sigma \phi C_T$$

ここに S は正味の捕捉率、 C_T と C_S はトラップに捕捉及び非捕捉のDの濃度、 N_T は全トラップ濃度、 D は拡散係数である。また、 α 、 σ 、 ϕ はそれぞれトラッピングレート係数、デトラッピング断面積、入射イオンのフラックスを表す。ここで、熱的にアクチベートされたデトラッピングの項は、この実験では無視出来るので、省かれている。計算結果を Fig. 59 に示す。Fig. 58との比較により、 $R/L \sim 10$ であることが分かる。

カーボン標的の温度が高い時の飽和保持量の温度依存性については M. Braun, E. Emmoth がきれいなデータを出している⁶²⁾。試料は papyex、密度 1.1 g/cm^3 、“Le Carbone” のもので、機械研磨した。標的温度は $25 \sim 1000^\circ\text{C}$ 、 $2, 5, 10, 20 \text{ keV}$ で D をインプラントした。加熱は電子衝撃で 12°C/s 、真空度 $5 \times 10^{-9} \sim 10^{-7} \text{ Torr}$ であった。Fig. 60 に室温インプラントの場合の全保持量を示す。イオンエネルギーとともに飽和値は高くなることは既に述べた他のデータと同様である。Fig. 61 及び 62 はカーボンの温度をパラメーターとして、それぞれ 2 keV 及び 20 keV の D^+ をインプラントした時の保持量をとったものである。いずれも温度が高いほど、保持量は減少している。この結果は B. M. U. Scherzer らの 1976 年の報告⁶³⁾ と一致している。Fig. 63 は 20 keV の D^+ を室温で、低ドーズ $8 \times 10^{16}/\text{cm}^2$ （飽和値以下）、及び高ドーズ $9 \times 10^{18}/\text{cm}^2$ （飽和値以上）にそれぞれインプラントしたものと、それぞれ 10 分間の等時的焼純（Isochronal Annealing）を行い保持量を求めたものと、その焼純の温度に於いてインプラントした時、その温度に於ける保持量を求めて両者を比較したものである。これらの実験に対する説明は次のようである。深さ分布の形は温度が高くなても変わらず、飽和のレベルが低下するだけである。このモデルでは D は照射によって出来た損傷の位置にトラップされる。いま、 $c(t)$ を時刻 t に於ける捕捉された D の面積密度、 J_0 を入射ビームフラックスとすると、入射ビームにより脱離するならば次の式が成立する。

$$\frac{dc(t)}{dt} = J_0 - J_0 c(t) \delta_{\text{eff}}$$

$$c(t) = \frac{1}{\delta_{\text{eff}}} (1 - e^{-\sigma_{\text{eff}} J_0 t})$$

$$c(0) = 0, \quad c(\infty) = 1/\sigma_{\text{eff}}$$

ここに、 σ_{eff} は実効脱離断面積である。Fig. 60～62 に合うように σ_{eff} を算出すると温度の関数として Fig. 64 のようになる。放出に 2 つの機構が考えられ、 $< 500^\circ\text{C}$ ではイオン誘導脱離が主で、 $> 900^\circ\text{C}$ では熱脱離が主となる。Fig. 63 から、Thermal Enhanced Ion Induced Detrapping の 20 KeV D の場合の温度依存は Fig. 65 のようになる。しかし、化学的、ガススペ

タリングがあり、Roth は 600 °C で Errosion の最大を見いだしている⁶⁴⁾。

既に述べた報告では飽和保持量はグラファイトの種類の違いによって変わりがないと述べられていた。しかし、最近 R. A. Causey はグラファイトのグレードによる違い、測定法の違いなどのため、食い違った結果が得られていると述べている。例えば、Py-Gr で Doyle らは⁵⁶⁾ 1.5 keV の D が表面付近にすっきりした形で保持されると報告しているのに対し、中の方まで入り込んだなだらかな分布も Stangeby らでは得られている⁶⁵⁾。この1例を Fig. 66 に示した。

Stangeby の報告では D の濃度 $c(x)$ は

$$c(x) = c_0 e^{-x/\lambda}$$

の式で示される。 c_0 は D の表面密度、 λ は D 濃度の深さに対する減少を表すパラメータである。従って単位表面積あたりの D の全濃度 N_D は

$$N_D = \int c(x) dx = c_0 \lambda$$

で与えられる。測定によると 3 種のカーボン材に対して Table 3 の値が得られている。このような違いがあるので TFTR に使用されている POCO AXF-5 Q グラファイト（不純物、灰分 0.2 %, グレインサイズ 10 μm, 密度 1.84 g/cm³, 表面積 1 m²/g）について三重水素の使用に備え、本実験は 100 eV の D と T の保持特性を 323-1773 K の領域で NRA 法と Dissolution Counting 法で測定している⁶⁶⁾。DT の注入には TPX (Tritium Plasma Experiment) 装置を用い、100 eV の全フラックスは $5.6 \times 10^{16} \text{ D/cm}^2 \text{s}$ 、D の圧力は 0.66 Pa で 1.5 時間プラズマ中に置いた。この場合 1 ~ 2 eV の中性 D, T もイオンと同程度注入される。得られた結果を Fig. 67 に示した。図の点線は見易くするためのものに過ぎない。この説明は 973 K を境にして、2 つの領域に分けて考える。(1) 323 ~ 973 K の保持の機構はインプラン特領域の飽和及び内部に存在する空孔の表面に沿う表面拡散であり、(2) 973 ~ 1773 K では温度が高くなると水素同位体はグレインの中に入り、高いエネルギーのトラップに捕えられる。1000 K 以下の領域の保持量を LMM モデルと較べると Fig. 68 のようになる。NRA は 500 K 以上ではほぼ一致するが、溶解計測（試料の表面を取り出し、液体シンチレーターで計測）の値は非常に高く、また 500 K 以下では実験値が極めて大きくなる。また、Fig. 69 に深さ方向の D の分布を 573 K, 773 K の場合に示した。これから表面拡散係数が推定出来る。一方高温度の D の量は Fig. 70 に示す。注目すべきは 1473 K 以上で、プラズマのみの場合と、ガスとプラズマの両方のある場合とが等しくなる。この温度ではトラップがすべて D で埋められる。これらの実験値に合うようにとると、トラップの濃度は $1.7 \times 10^{-5} \text{ trap/C-atom}$: $\text{trap energy} = 4.3 \text{ eV}$ などが得られている。

Table 3 $D(^3He, p)^4He$ analysis of samples exposed to sub-eV D^0 at 600 K⁶⁵⁾

Sample	D^0 Exposure Time (hrs)	C_0 ($10^{19}/\text{cm}^3$)	λ (μm)	N_D ($10^{15}/\text{cm}^2$)
Pyrolytic Graphite	6	2.2	0.7	1.6
Papyex	8	0.4	3.7	1.6
Eroded Papyex	8	0.2	2.8	0.5

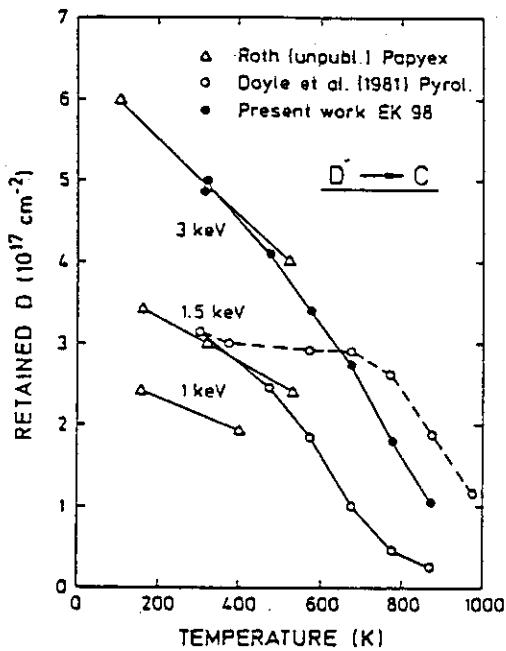


Fig. 47 Retained amount of deuterium implanted into carbon as function of implantation temperature (solid lines) and during thermal annealing with a ramp of 0.33 K/s (dashed line). Open circles are taken from Ref. 59)⁵⁸⁾

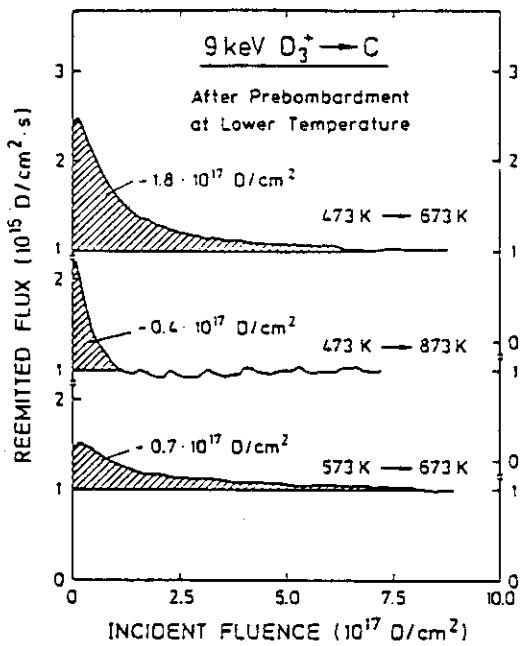


Fig. 48 Reemitted deuterium flux during 3 keV D bombardment after prebombardment at a lower temperature. The incident flux was $10^{15} \text{ D}/\text{cm}^2 \text{ s}$. The inserted numbers denote the approximate integral of atoms released in addition to the steady-state release (dashed area)⁵⁸⁾

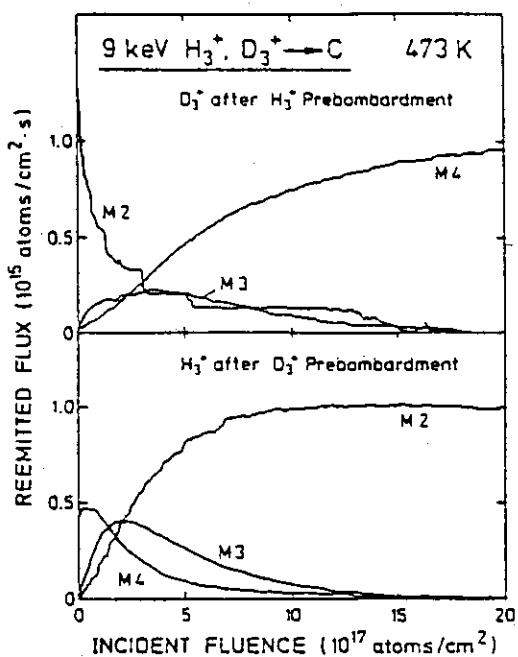


Fig. 49 Release of different hydrogen molecules during post-bombardment with deuterium after saturation with protium and vice versa. Ion fluxes as for Fig. 48⁵⁸)

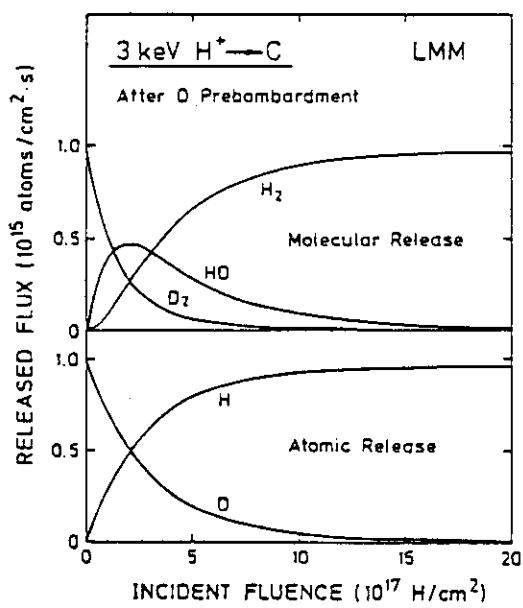


Fig. 50 Local Mixing Model calculations corresponding to the lower half of Fig. 49, Yielding the release of atoms (bottom) and their release in the form of different molecules (top)⁵⁸)

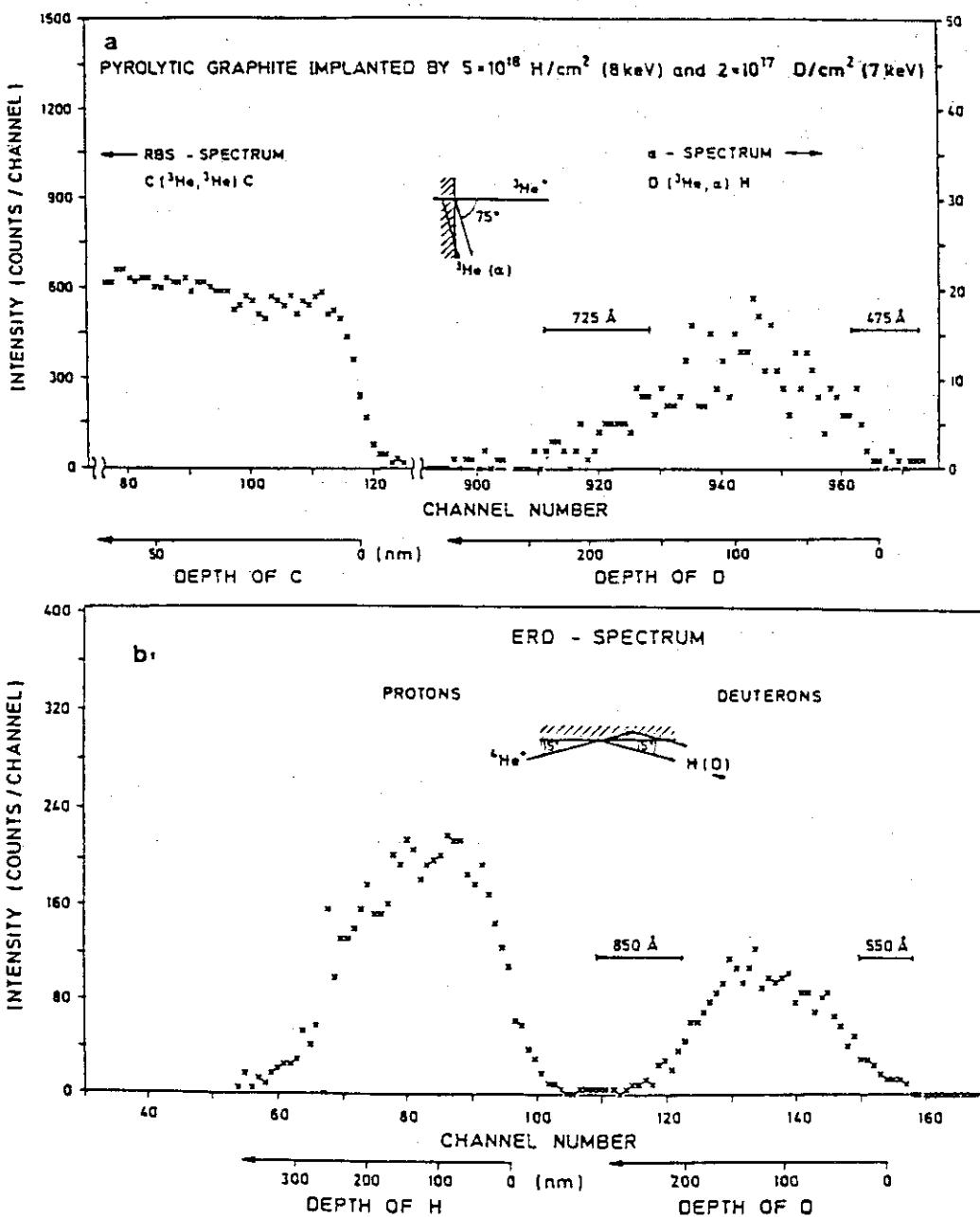


Fig. 51 (a) Energy distribution of particles from the $\text{D}(^3\text{He}, \alpha)\text{H}$ nuclear reaction and backscattered ^3He atoms obtained by analyzing a C target implanted with H and D with 790 keV ^3He . (b) Energy distribution of recoil H and D atoms obtained by analyzing a C target implanted with H and D with 2.6 MeV ^4He . The forward-scattered ^4He atoms are stopped in a 5 μm stainless steel foil in front of detector. The scales indicate the depth resolution of the different techniques for various depths of D in graphite⁶⁰⁾

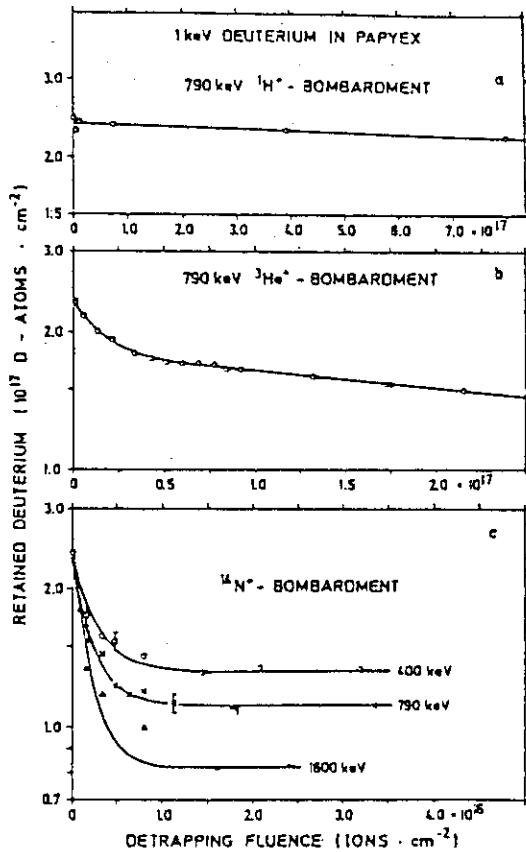


Fig. 52 Retained deuterium implanted to saturation into Papyex at 1 keV as a function of H, He, and N fluence: (O, X, Δ) measured values; (—) two component exponential dependence⁶⁰)

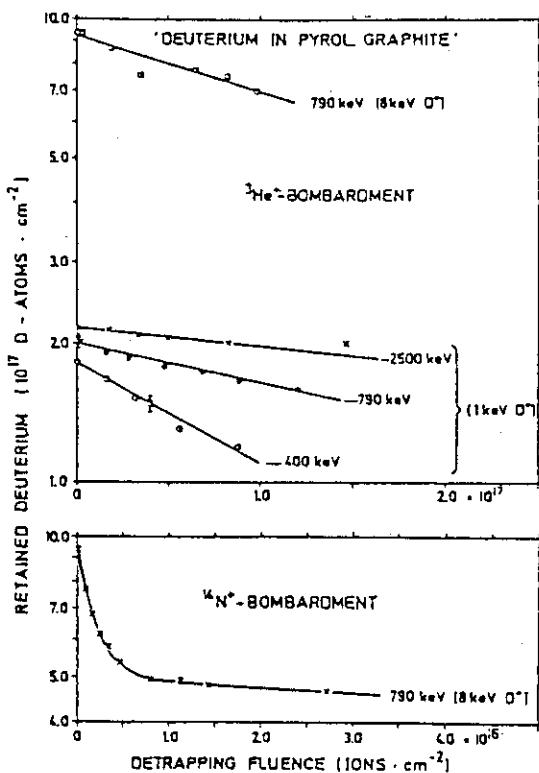


Fig. 53 Retained deuterium implanted to saturation into pyrolytic graphite at 1 and 8 keV as a function of He and N fluence: (O, X, ●, □) measured values; (—) two component exponential dependence⁶⁰)

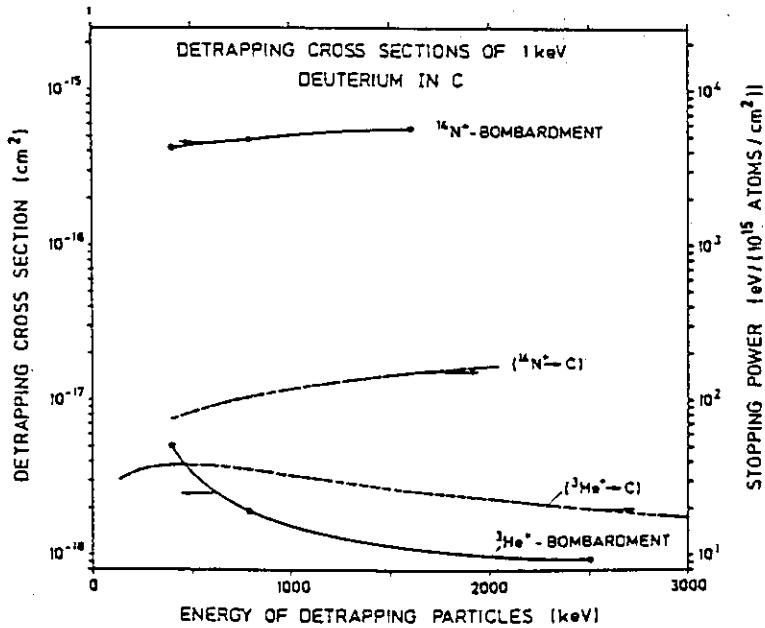


Fig. 54 Detrapping cross sections of 1 keV D^+ implanted in Papyex graphite by $^{14}N^+$ -bombardment and in pyrolytic graphite by $^3He^+$ bombardment as a function of detrappping energy. For comparison the respective electronic stopping powers are included⁶⁰⁾

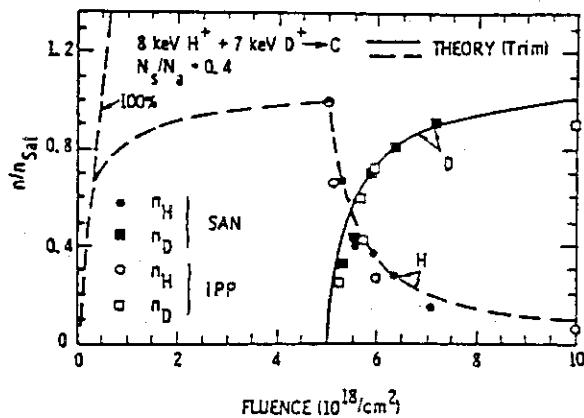


Fig. 55 Decrease of trapped amount of H, n_H and increase of D, n_D in pyrolytic graphite during 7 keV D implantation following a preimplantation of 5×10^{18} H/cm² at 8 keV. The trapped amounts are normalized to the amount trapped in saturation n_{sat} . The dashed and solid lines are the calculated curves using the Local Mixing Model (Ref. 52))⁶⁰⁾

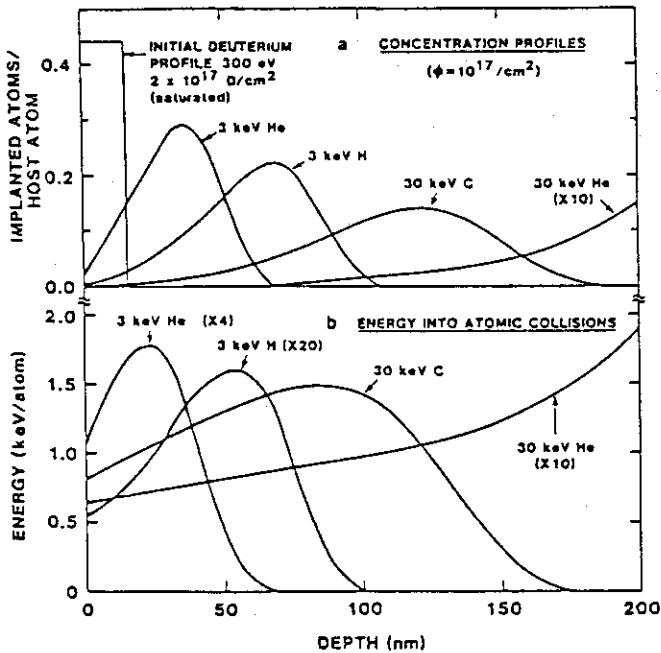


Fig. 56 The depth distributions for the implanted particles (a) and the energy loss to atomic collisions (b). These profiles were calculated using the TRIM Monte Carlo particle transport code⁶⁸⁾ with Lindhard electronic stopping. Except for the deuterium the profiles correspond to an incident fluence of 10^{17} particles/cm²⁶¹⁾

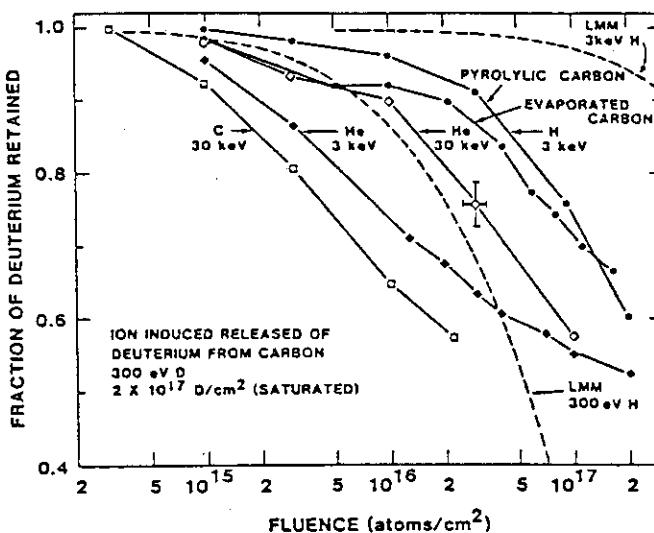


Fig. 57 The fraction of deuterium retained as a function of bombarding ion fluence for carbon samples initially implanted with 2×10^{17} D/cm² incident fluence of 300 eV deuterium. The type of ion and energy of the bombarding ions are indicated. The experimental uncertainty is indicated by the error bars on one of the data points. Except for the curve labelled pyrolytic carbon all the data were taken on evaporated carbon film samples. For comparison the dashed lines show D release curves calculated using the Local Mixing Model⁶¹⁾

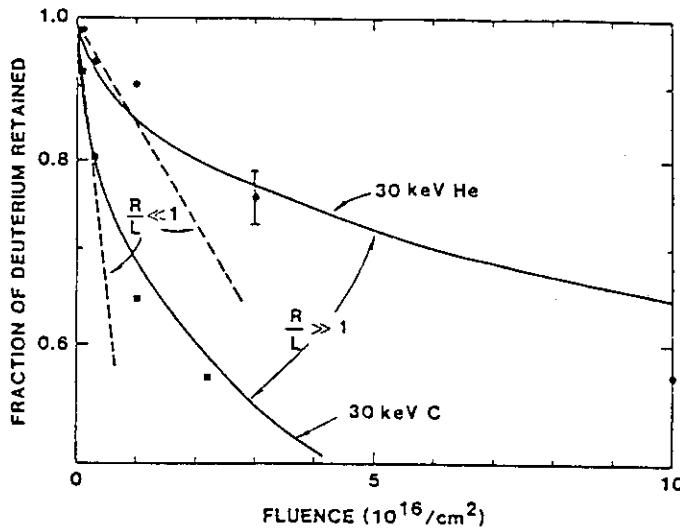


Fig. 58 The fraction of deuterium retained as a function of bombarding ion fluence for carbon implanted with 300 eV deuterium saturation. The dots show the measured data. The dashed lines show the fit for an exponential release curve (corresponding to no retrapping) to the low-fluence portion of the data. The solid lines show the fit for very strong trapping⁶¹⁾

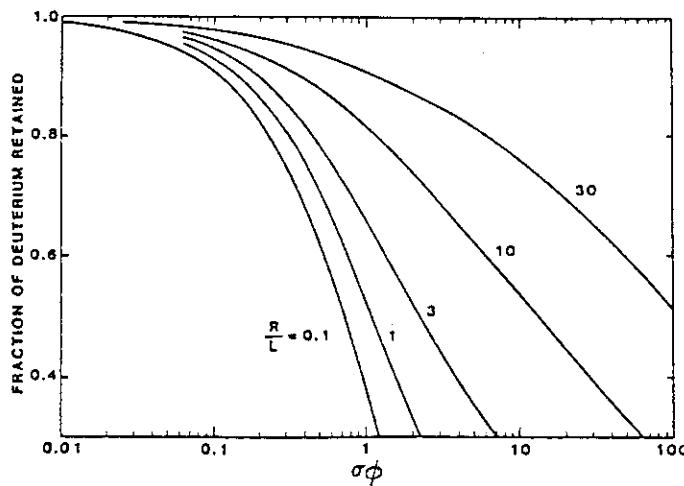


Fig. 59 The fraction of deuterium retained calculated using the model of diffusion under trapping (see 4.4 in the text) for various values of R/L as a function of the detrapping cross-section σ times the particle fluence ϕ .

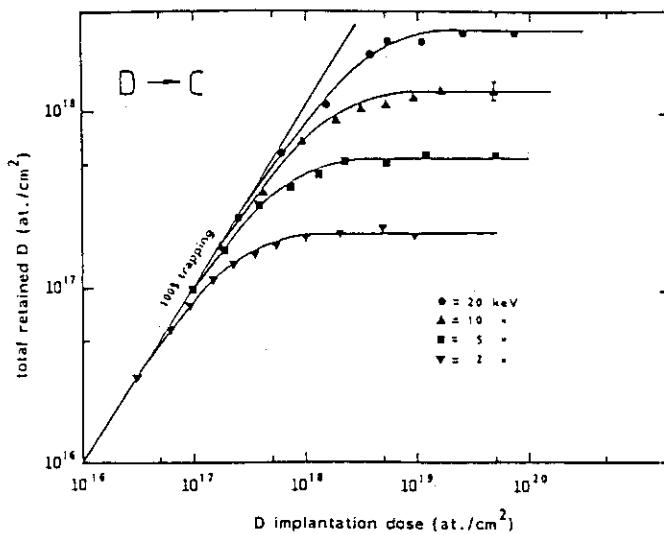


Fig. 60 Total retained deuterium in carbon versus D ion fluence implanted with different energies and the substrate at room temperature. The solid lines are calculated curves by the equation; $c(t) = \{1 - \exp(-\Phi\sigma_{\text{eff}})\}/\sigma_{\text{eff}}$

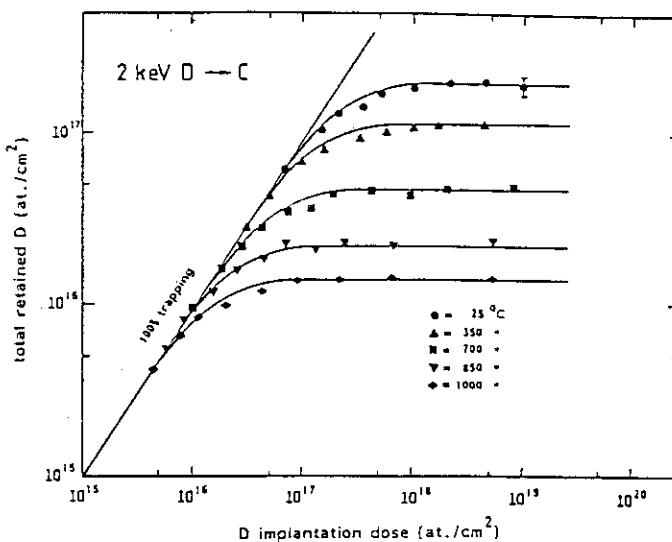


Fig. 61 Total retained deuterium in carbon versus D^+ ion fluence implanted with an energy of 2 keV at different substrate temperatures. The solid lines are calculated curves; see the caption of Fig. 60 62)

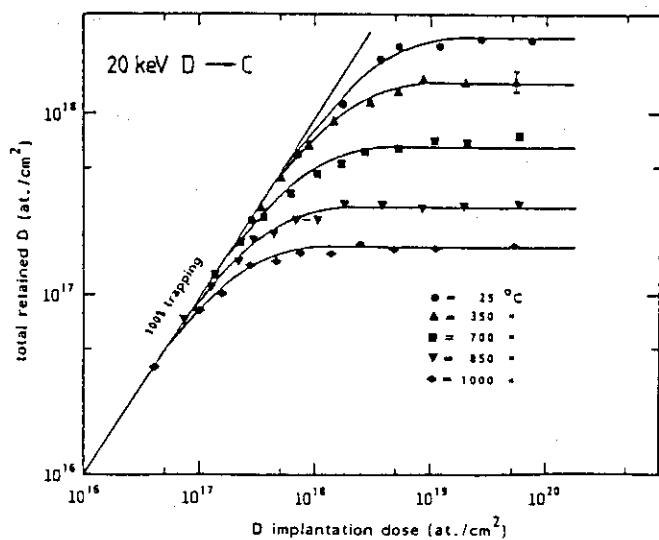


Fig. 62 Total retained deuterium in carbon versus D^+ ion fluence implanted with an energy of 20 keV at different temperatures. The solid lines are calculated curves; see the caption of Fig. 60 (62)

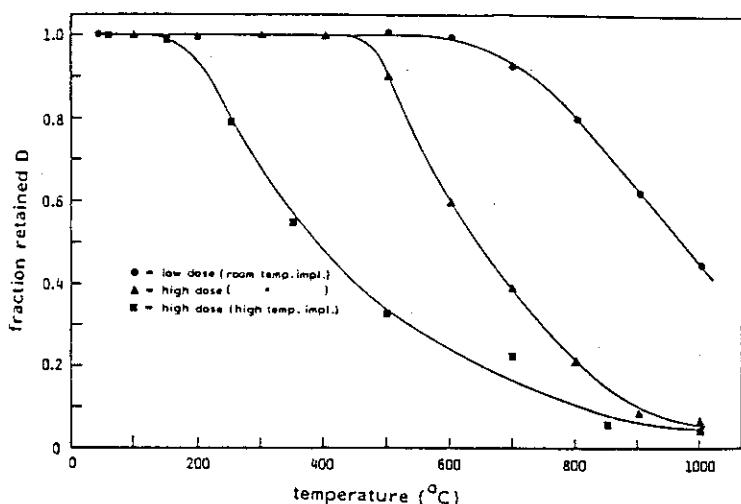


Fig. 63 Fractional retained deuterium versus temperature. The solid lines are drawn to guide the eye. The two upper curves correspond to isochronal annealing after low dose (8×10^{16} at/ cm^2) and high dose (9×10^{18} at/ cm^2) implantation done with 20 keV. The lower curve is obtained by implantation to saturation during elevated temperatures (62)

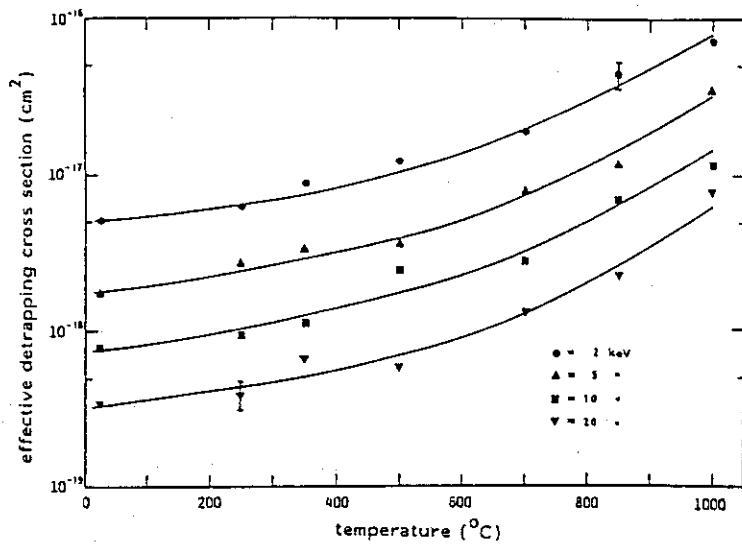


Fig. 64 Effective detrapping cross section as a function of temperature for different deuterium implantation energies. The solid lines are drawn to guide the eye⁶²⁾

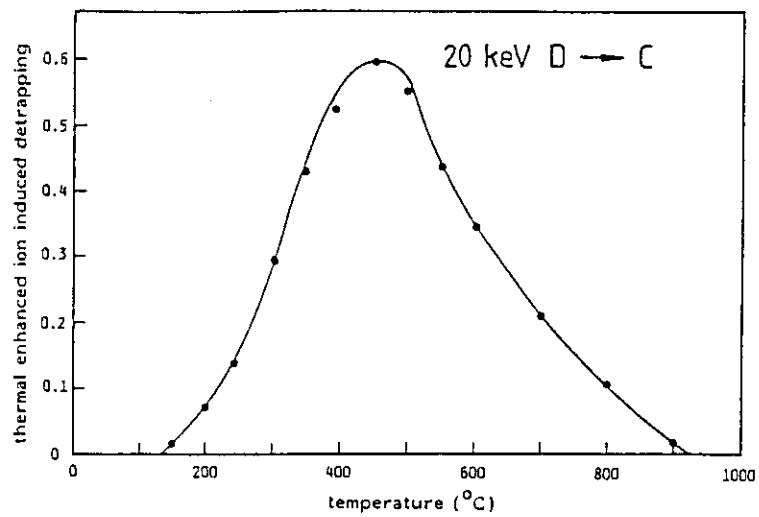


Fig. 65 The relative thermal enhanced ion induced detrapping yield as a function of temperature, as obtained from Fig. 63. The solid line is drawn to guide the eye⁶²⁾

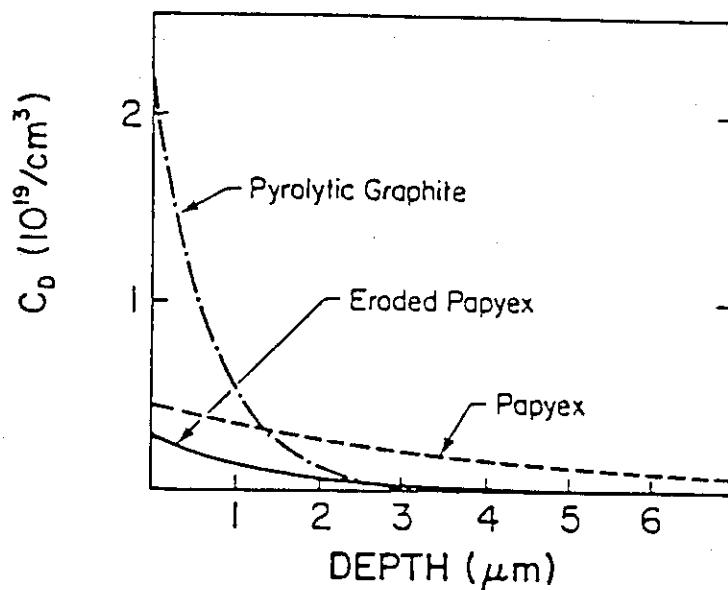


Fig. 66 Deuterium concentration profiles obtained by Nuclear Reaction Analysis⁶⁵⁾

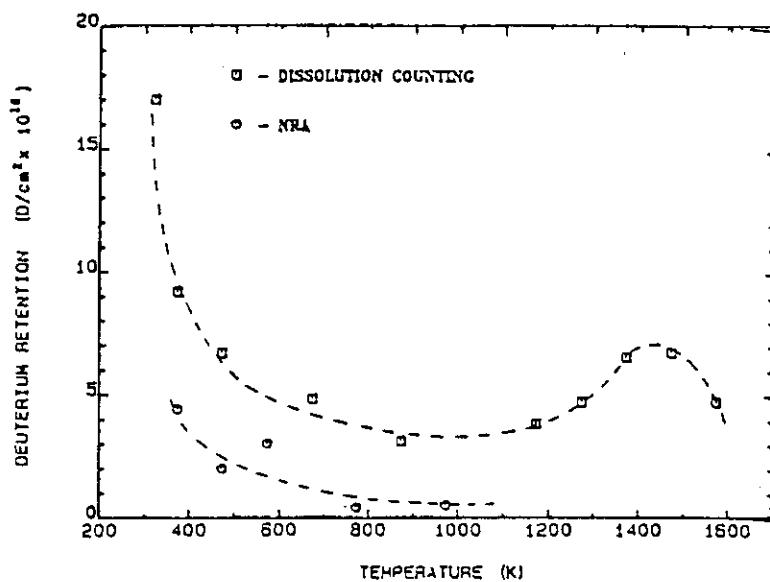


Fig. 67 Deuterium retention in POCO AXF-5Q graphite⁶⁶⁾

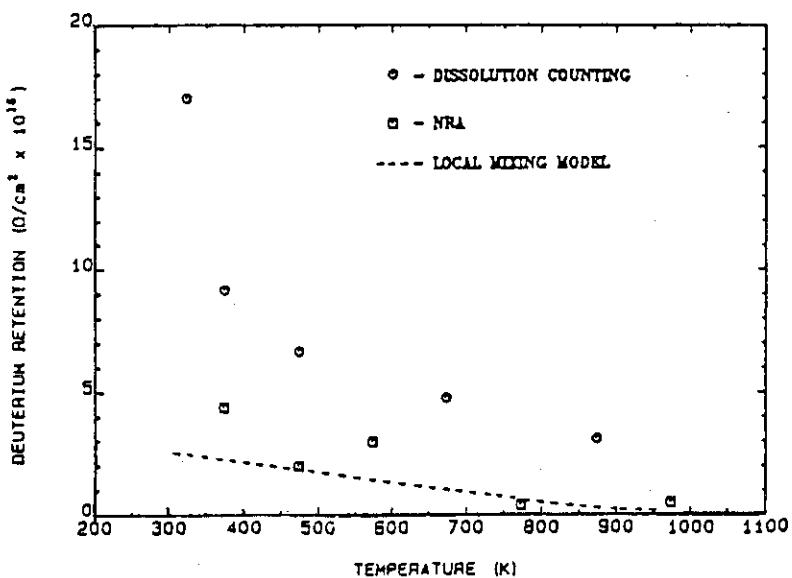


Fig. 68 Comparison of Local Mixing Model to experimental results⁶⁶⁾

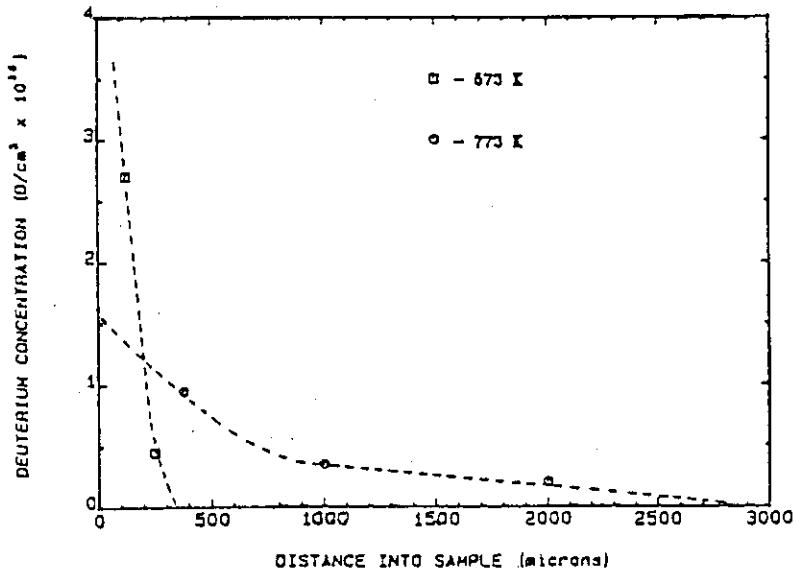


Fig. 69 Surface diffusion of deuterium into POCO AXF-5Q graphite⁶⁶⁾

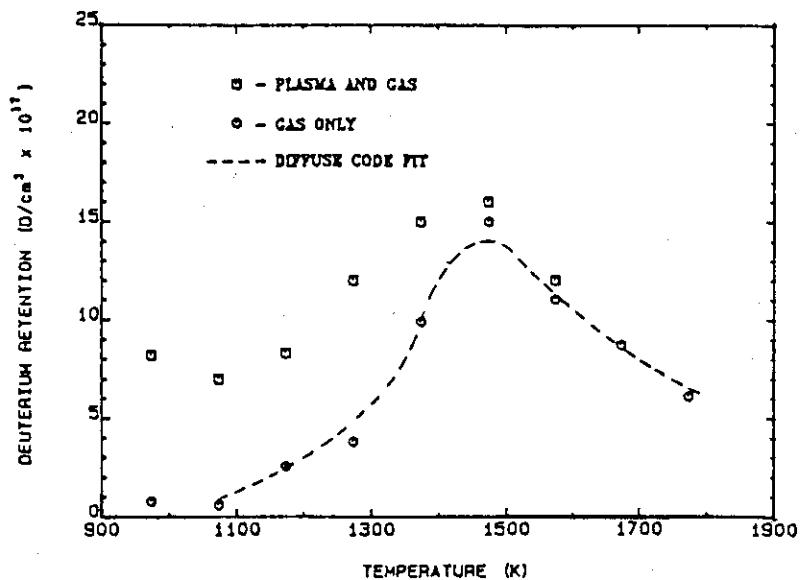


Fig. 70 High temperature D/T retention in POCO AXF-5Q graphite⁶⁶⁾

5. 結び

今回の調査は最近の大型トカマクで第一壁として用いられる事の多くなったグラファイトについて、水素同位体の振舞に焦点を当てて400編を遥かに越える文献を集め、多岐にわたる問題点の中で、主にプラズマのリサイクリングに関連の深い問題を取り上げることにした。重要な問題のいくつか、例えば、水素放出の問題、スペッタリング、ブリスタリング、化学反応の効果に関する研究については、文献の収集のみに終わり、今回はデータをまとめるまでに至らなかった。

昭和62年度のデポジションプローブの研究は、61年度にシリコンを用いてかなり明確な結果を得たが、62年度のカーボンの実験では、プラズマ粒子がその飛程にくらべ、はるかに大きい深さまで侵入し、デポジションプローブとしては解釈に複雑な様相を呈している。これは前節の終わりの方に見られる報告に述べられている結果に類似した現象のように考えられる。グラファイトに於ける水素の問題はまだ多くの明らかにすべき機構を残しており、実際の核融合炉の壁として用いられるためには、プラズマでのバルクの試料による実験とともに、種々のグラファイトについて低エネルギーまでのビームを用いた実験研究が必要であろう。これらは強い中性子場での測定のためにも明確にされなければならない。

謝辞

本調査研究に協力して頂いた神戸商船大学・原子動力科の中島雅助教授に感謝いたします。

5. 結び

今回の調査は最近の大型トカマクで第一壁として用いられる事の多くなったグラファイトについて、水素同位体の振舞に焦点を当てて400編を遥かに越える文献を集め、多岐にわたる問題点の中で、主にプラズマのリサイクリングに関連の深い問題を取り上げることにした。重要な問題のいくつか、例えば、水素放出の問題、スペッタリング、ブリスタリング、化学反応の効果に関する研究については、文献の収集のみに終わり、今回はデータをまとめるまでに至らなかった。

昭和62年度のデポジションプローブの研究は、61年度にシリコンを用いてかなり明確な結果を得たが、62年度のカーボンの実験では、プラズマ粒子がその飛程にくらべ、はるかに大きい深さまで侵入し、デポジションプローブとしては解釈に複雑な様相を呈している。これは前節の終わりの方に見られる報告に述べられている結果に類似した現象のように考えられる。グラファイトに於ける水素の問題はまだ多くの明らかにすべき機構を残しており、実際の核融合炉の壁として用いられるためには、プラズマでのバルクの試料による実験とともに、種々のグラファイトについて低エネルギーまでのビームを用いた実験研究が必要であろう。これらは強い中性子場での測定のためにも明確にされなければならない。

謝辞

本調査研究に協力して頂いた神戸商船大学・原子動力科の中島雅助教授に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Doyle B. L.:
 A Method to Control Isotopic Composition of Initial DT Plasmas in Tokamaks,
J. Nucl. Mater., 144, 280L (1987).
- Terreault B.:
 Another View of the Control of the Isotopic Composition of Initial DT
 Plasmas in Tokamaks,
J. Nucl. Mater., 150, 244L (1987).
- Doyle B. L.:
 Respond to the Article: Another View of the Control of the Isotopic
 Composition of Initial DT Plasmas in Tokamaks by B. Terreault,
J. Nucl. Mater., 150, 246L (1987).
- 2) De Kock L. et al.:
 JET: Recent Results and Edge Phenomena,
J. Nucl. Mater., 145-147, 26 (1987).
- 3) Dylla H. F. and the TFTR Team:
 Plasma-Material Interactions in TFTR,
J. Nucl. Mater., 145-147, 48 (1987).
- 4) Dylla H. F. et al.:
 Conditioning of the Graphite Bumper Limiter for Enhanced Confinement
 Discharges in TFTR,
Nucl. Fusion, 27, 1221 (1987).
- 5) Schwarzschild B.:
 Princeton Tokamak Reaches Record Plasma Ion Temperature,
Phys. Today, November, 19 (1986).
- 6) Winter J.:
 Carbonization in Tokamaks,
J. Nucl. Mater., 145-147, 131 (1987).
- 7) Coad J. P. et al.:
 Depth Profiling Experiments on JET Wall Samples,
J. Nucl. Mater., 145-147, 736 (1987).
- 8) Noda N. et al.:
 Effect of In Situ Carbon Coating on ICRF-Heated Tokamak Plasmas Relat-
 ing to Radiation Loss by Iron-Impurities in JIPP T-II U,
Jpn. J. Appl. Phys., 25, L397 (1986).
- 9) Waelbroeck F. et al.:
 Origin of Low Z Impurities in TEXTOR with an "All Carbon" Surrounding,
J. Nucl. Mater., 145-147, 665 (1987).
- 10) The TEXTOR Team and the ALT-I Group, by Pippel H. K.:
 Plasma-Wall Interaction and Plasma Performance in TEXTOR - A Review,
J. Nucl. Mater., 145-147, 3 (1987).

- 11) Thomas G. J. et al.:
Density Drift in TEXTOR with a Graphite Pumped Limiter,
J. Nucl. Mater., 145-147, 830 (1987).
- 12) Pontau A. E. et al.:
Initial ALT-I Pump Limiter Studies on TEXTOR,
J. Nucl. Mater., 128&129, 434 (1984).
- 13) Wampler W. R. et al.:
Hydrogen and Deuterium in Graphite Limiter from TFTR, PDX and PLT,
J. Nucl. Mater., 145-147, 353 (1987).
- 14) Clausing R. E. and Heatherly L.:
Hydrogen Recycle and Isotope Exchange from Dense Carbon Films,
J. Nucl. Mater., 145-147, 317 (1987).
- 15) Marmar E. S.:
Recycling Process in Tokamaks,
J. Nucl. Mater., 76&77, 59 (1978).
- 16) 矢野淑郎:
高温高密度プラズマの粒子診断法,
委託調査研究報告書, Feb. (1977), March (1975).
- 17) Shu-bei Li :
Wall Reflection and Hydrogen Recycling in Tokamaks,
J. Nucl. Mater., 111&112, 226 (1982).
- 18) Hotston E. S. and McCracken G. M.:
The Investigation of Plasma Recycling at Surfaces Using a Self-Consistent Model for the Wall Interaction,
J. Nucl. Mater., 63, 177 (1976).
- 19) Fielding S. J. et al.:
Recycling in Gettered and Diverted Discharges in DITE Tokamak,
J. Nucl. Mater., 76&77, 273 (1978).
- 20) McCracken G. M. et al.:
Recycling Experiments in the DITE Tokamak,
Nucl. Fusion, 18, 35 (1978).
- 21) McCracken G. M. and Stott P. E.:
Review Paper; Plasma-Surface Interactions in Tokamaks,
Nucl. Fusion, 19, 889 (1979).
- 22) Wienhold P. et al.:
Computer Code PERI for the Calculation of Recycling, Volume Distribution, and Permeation of Hydrogen in First Wall Materials of Tokamaks,
J. Nucl. Mater., 93&94, 866 (1980).
- 23) Wienhold P. et al.:
Influence of a Heat Flux on the Hydrogen Recycling from the Tokamak Walls,
J. Nucl. Mater., 111&112, 240 (1982).

- 24) Waelbroeck F. et al.:
Thermally Activated processes in Hydrogen Recycling,
J. Nucl. Mater., 111&112, 185 (1982).
- 25) Stangeby P. C.:
An Analytic Approximation for Time-Dependent Retention and Recycle of
Atomic Hydrogen in Materials,
J. Nucl. Mater., 126, 190 (1984).
- 26) Doyle B. L.:
A Simple Theory for Maximum H Inventory and Release: A New Transport
Parameter,
J. Nucl. Mater., 111&112, 628 (1982).
- 27) Howe, Jr. H. C.:
Dependence of Hydrogen Recycling on Molecular Effects in Tokamaks,
J. Nucl. Mater., 111&112, 424 (1982).
- 28) Clausing R. E. et al.:
Studies of Mechanisms of Hydrogen Recycle Using a Plasma-Wall Interac-
tion Experiment,
J. Nucl. Mater., 93&94, 542 (1980).
- 29) TFR Group:
Recycling and Particle Confinement Characteristics in TFR 600,
J. Nucl. Mater., 93&94, 272 (1980).
- 30) TFR Group:
Gas Recycling Studies on the TFR Tokamak,
J. Nucl. Mater., 111&112, 199 (1982).
- 31) TFR Group, Terreault B.:
An Increase Understanding of Gas Recycling in Tokamaks by Mass Spectro-
metry: Principle and Application in TFR,
J. Nucl. Mater., 127, 18 (1985).
- 32) Wilson K. L.:
Hydrogen Recycling Properties of Stainless Steels,
J. Nucl. Mater., 102&104, 453 (1981).
- 33) Ehrenberg J.:
Modelling of Isotope Exchange Experiments in JET,
J. Nucl. Mater., 145-147, 551 (1987).
- 34) Rewan W. L. et al.:
Recycling Measurements in the TEXAS Experimental Tokamak,
J. Nucl. Mater., 145-147, 562 (1987).
- 35) Wilson K. L. and Hsu W. L.:
Hydrogen Recycling Properties of Graphite,
J. Nucl. Mater., 145-147, 121 (1987).
- 36) Pontau A. E. et al.:
Surface Analysis of 1984/1985 Tokamak Fusion Test Reactor Limiter Tiles,
J. Vac. Sci. Technol., A4, 1193 (1986).

- 37) Bergsaker H. et al.:
Hydrogen Isotope Retention in the JET Limiters,
J. Nucl. Mater., 145-147, 727 (1987).
- 38) The TFR Group:
Pump Limiter Experiment in the TFR Tokamak,
J. Nucl. Mater., 145-147, 819 (1987).
- 39) 佐多敏之他：
「工業材料」森北出版、第3編 第6章 (1974).
- 40) Nakayama K. et al.:
Thermal Desorption Process and Surface Roughness of POCO Graphite Irradiated by Hydrogen Ion Beam,
J. Nucl. Mater., 145-147, 301 (1987).
- 41) Davis J. W. et al.:
Measurement of Retained Deuterium by Laser Thermal Desorption for Carbon Exposed to Sub-eV Atomic Deuterium,
J. Nucl. Mater., 128&129, 788 (1984).
- 42) Hucks P. et al.:
The Trapping of Thermal Atomic Hydrogen on Pyrolytic Graphite,
J. Nucl. Mater., 93&94, 558 (1980).
- 43) 矢野淑郎：
粒子固体相互作用に関する調査：固体内粒子分布における基礎過程の調査。
JAERI-M 88-007 (1988).
- 44) Beutler R. et al.:
Pyrolytic Graphite: Inherent H-Content and Trapping of Sub-eV D⁰ Atoms,
J. Nucl. Mater., 145-147, 280 (1987).
- 45) Bohdansky J. et al.:
Behavior of Graphite under Heat Load and in Contact with a Hydrogen Plasma,
Nucl. Instrum. Methods, B23, 527 (1987).
- 46) Wampler W. R.:
Resistance Probe for Energetic Particle Dosimetry with Applications for Plasma Edge Studies,
Appl. Phys. Lett., 41, 335 (1982).
- 47) Wampler W. R.:
Energy-Resolving Carbon Resistance Probes for Plasma Edge Characterization,
J. Nucl. Mater., 128&129, 951 (1984).
- 48) Langley R. A. and Blewer R. S.:
Behavior of Implanted D and He in Pyrolytic Graphite,
J. Nucl. Mater., 76&77, 313 (1978).
- 49) Staudenmaier G. et al.:
Trapping of Deuterium Implanted in Carbon and Silicon: A Calibration for Particle-Energy Measurements in the Plasma boundary of Tokamaks,
J. Nucl. Mater., 84, 149 (1979).

- 50) Cohen S. A. and McCracken G. M.:
A Model for Hydrogen Isotope Backscattering, Trapping and Depth Profiles
in Carbon and Amorphous Silicon,
J. Nucl. Mater., 84, 157 (1979).
- 51) Blewer R. S. et al.:
Trapping and Replacement of 1-14 keV Hydrogen and Deuterium in 316 Stain-
less Steel,
J. Nucl. Mater., 76&77, 305 (1978).
- 52) Doyle B. L. et al.:
Saturation and Isotope Replacement of Deuterium in Low-Z Materials,
J. Nucl. Mater., 93&94, 551 (1980).
- 53) Doyle B. L. et al.:
A Local Mixing Model for Deuterium Replacement in Solids,
Radiat. Effects Lett., 57, 81 (1980).
- 54) Wampler W. R. and Magee C. W.:
Depth Resolved Measurements of Hydrogen Isotope Exchange in Carbon,
J. Nucl. Mater., 103&104, 509 (1981).
- 55) Wampler W. R. et al.:
Saturation of Deuterium Retention in Carbon, A New Calibration for Plas-
ma Edge Probes,
J. Nucl. Mater., 102, 304 (1981).
- 56) Doyle B. L. et al.:
Temperature Dependence of H Saturation and Isotope Exchange,
J. Nucl. Mater., 103&104, 513 (1981).
- 57) Brice D. K. et al.:
Extended Local Mixing Model for Hydrogen Retention and Isotope Exchange,
J. Nucl. Mater., 111& 112, 598 (1982).
- 58) Möller W. et al.:
Thermal and Ion-Induced Release of Hydrogen Atoms Implanted into graphite,
Nucl. Instrum. Methods, B19/20, 826 (1987).
- 59) Möller W. et al.:
Saturation and Isotope Mixing during Low-Temperature Implantations of
Hydrogen into Metals,
Appl. Phys., A27, 19 (1982).
- 60) Roth J. et al.:
Trapping and Detrapping of Hydrogen Implanted into Graphite,
J. Nucl. Mater., 93&94, 601 (1980).
- 61) Wampler W. R. and Myers S. M.:
Ion-Induced Release of Deuterium from Carbon,
J. Nucl. Mater., 111&112, 616 (1982).
- 62) Braun M. and Emmoth B.:
Deuterium Implantation in Carbon at Elevated Temperature,
J. Nucl. Mater., 128&129, 657 (1984).

- 63) Scherzer B. M. U. et al.:
Temperature Dependence of Trapping and Depth Profiles of 6 to 15 keV
Deuterium in Carbon,
J. Nucl. Mater., 63, 100 (1976).
- 64) Roth J.:
Physical and Chemical Sputtering of Graphite and SiC by Hydrogen and
Helium in 600 - 7500 eV,
J. Nucl. Mater., 63, 222 (1976).
- 65) Stangeby P. C. et al.:
Trapping of Sub-eV Hydrogen and Deuterium Atoms in Carbon,
J. Nucl. Mater., 122&123, 1592 (1984).
- 66) Cited in Winterbon, K. B.:
Heavy-Ion Range Profiles and Associated Damage Distributions,
Radiat. Eff., 13, 215 (1972).
- 67) Erents, S. K. et al.:
A Novel Technique for Measurement of Energetic Hydrogen Flux to the
Walls in Fusion Devices,
J. Phys. D: Appl. Phys., 11, 227 (1978).
- 68) Biersack, J. P. and Haggmark, L. G.:
A Monte Carlo Computer Program for the Transport of Energetic Ions
in Amorphous Targets,
Nucl. Instrum. Methods, 174, 257 (1980).

付 錄

List of Compilations on Atomic and Molecular Data

1. "Production processes of multiply charged ions by electron impact": N. Oda, JAERI-M 8675 (1980) (in Japanese).
2. "Review of theories of charge transfer processes involving highly stripped heavy ions": M. Matsuzawa, JAERI-M 8676 (1980) (in Japanese).
3. "Data on collisions of helium atoms and ions with atoms and molecules I. (Cross sections for charge transfer of He, He^+ , and He^{++} with H, H_2 , and He)": Y. Nakai, M. Sataka, and T. Shirai, JAERI-M 8849 (1980) (in Japanese).
4. "Cross section for charge transfer collision involving hydrogen atoms": Y. Kaneko, T. Arikawa, Y. Itikawa, T. Iwai, T. Kato, M. Matsuzawa, Y. Nakai, K. Okuno, H. Ryufuku, H. Tawara, and T. Watanabe, IPPJ-AM-15 (1980).
5. "Ionization cross sections for ion-atom and ion-molecule collisions I (Ionization cross sections for H^+ , H_2^+ , H_3^+ , He^+ and He^{++} incident on H, H_2 and He)": M. Sataka, T. Shirai, A Kikuchi and Y. Nakai, JAERI-M 9310 (1981).
6. "Report of workshop on particle material interactions for fusion research", A & M data research committee, JAERI-M 9775 (1981) (in Japanese).
7. "Electron capture and loss cross sections for collisions between heavy ions and hydrogen molecules": Y. Kaneko, Y. Itikawa, T. Iwai, T. Kato, Y. Nakai, K. Okuno, and H. Tawara, IPPJ-AM-20 (1981).
8. "Negative ion formation and neutralization process (I) - Related to plasma heating by "Negative ion based neutral beam injection" -": T. Sugiura, JAERI-M 9902 (1982) (in Japanese).
9. "Negative ion formation and neutralization process (II) - Related to plasma heating by "Negative ion based neutral beam injection" -": T. Sugiura, JAERI-M 82-116 (1982) (in Japanese).
10. "Data on trapping and re-emission of energetic hydrogen isotopes and helium in materials": S. Yamaguchi, K. Ozawa, Y. Nakai, and Y. Sugizaki, JAERI-M 82-118 (1982).

11. "Data on collisions of hydrogen atoms and ions with atoms and molecules I (cross sections for charge transfer of H, H⁺ and H⁻ with H₂, N₂, O₂, H₂O, C and carbon containing molecules)": Y. Nakai, A. Kikuchi, T. Shirai, and M. Sataka, JAERI-M 83-013 (1983).
12. "Data on thick target bremsstrahlung produced by electrons": S. Tanaka, R. Tanaka, T. Tabata, R. Ito, Y. Nakai, and K. Ozawa, JAERI-M 83-019 (1983).
13. "Atomic structure calculation of energy levels and oscillator strength in Mo ion, I (3p⁶3d⁸-3p⁵3d⁹ 3d⁸-3d⁷4p and 3d⁸-3d⁷4f transitions in Mo XVII)": K. Ishii, JAERI-M 83-034 (1983).
14. "Data on collisions of hydrogen atoms and ions with atoms and molecules II (Cross sections for charge transfer of H, H⁺ and H⁻ with He, Ne, Ar, Kr and Xe)": Y. Nakai, A. Kikuchi, T. Shirai, and M. Sataka, JAERI-M 83-143 (1983).
15. "Atomic structure calculation of energy levels and oscillator strength in Ti ion, I (3s-3p and 3p3d transitions in Ti IX)": K. Ishii, JAERI-M 83-155 (1983).
16. "Atomic structure calculation of energy levels and oscillator strength in Ti ion, II (3s-3p and 3p3d transitions in Ti X)": K. Ishii, JAERI-M 83-164 (1983).
17. "Atomic structure calculation of energy levels and oscillator strength in Ti ion, III (3s-3p and 3p3d transitions in Ti XI)": K. Ishii, JAERI-M 83-198 (1983).
18. "Stopping power for ions in solids": M. Kitagawa, JAERI-M 83-223 (1983) (in Japanese).
19. "Report of workshop on computer simulation of atomic collision processes in solids": A & M data research committee, JAERI-M 83-226 (1983) (in Japanese).
20. "Report of the 2nd workshop on particle material interactions for fusion research": A & M data research committee, JAERI-M 83-235 (1983) (in Japanese).
21. "Atomic structure calculation of energy levels and oscillator strength in Fe ion, I (3s-3p and 3p3d transitions in Fe XV)": K. Ishii, H. Kubo, and K. Ozawa, JAERI-M 83-240 (1983).

22. "Data on ionization, excitation, dissociation, and dissociative ionization of targets by helium ion bombardments (I) (Target ionization, excitation, dissociation, and dissociative ionization induced by several keV to 3.5MeV helium ions incident on a thin gas targets)": N. Oda and J. Urakawa, JAERI-M 84-049 (1984).
23. "Data on collisions of helium atoms and ions with atoms and molecules II (Cross sections for charge transfer of He^{2+} , He^+ , He and He^- with He, Ne, Ar, Kr and Xe)": Y. Nakai, A. Kikuchi, T. Shirai, and M. Sataka, JAERI-M 84-069 (1984).
24. "Data compilation of radiation effects on hydrogen recycle in fusion materials": K. Ozawa, K. Fukushima, and K. Ebisawa, JAERI-M 84-089 (1984).
25. "Data compilation for depth distribution of ion-induced damage and ion-implanted atom": M. Terasawa, S. Nakahigashi, and K. Ozawa, JAERI-M 84-092 (1984).
26. "Data on trapping and re-emission of energetic hydrogen isotopes and helium in materials, supplement 1": S. Yamaguchi, K. Ozawa, Y. Nakai, and Y. Sugizaki, JAERI-M 84-093 (1984).
27. "Data compilation for particle impact desorption": T. Oshiyama, S. Nagai, K. Ozawa, and F. Takeuchi, JAERI-M 84-094 (1984).
28. "Data on collisions of hydrogen atoms and ions with atoms and molecules III (Cross sections for charge transfer of H, H^+ and H^- with metal vapors)": Y. Nakai, T. Shirai, M. Sataka, and T. Sugiura, JAERI-M 84-169 (1984).
29. "Cross sections for electron capture and loss by positive ions in collisions with atomic and molecular hydrogen": H. Tawara, T. Kato, and Y. Nakai, Atom. Data Nucl. Data Tables 32, 235 (1985).
30. "Hydrogen re-emission data analysis in austenitic stainless steel": K. Fukushima, K. Ozawa, K. Ebisawa, and M. Terasawa, JAERI-M 85-099 (1985).
31. "Data compilation for particle impact desorption II": T. Oshiyama, S. Nagai, K. Ozawa, and F. Takeuchi, JAERI-M 85-100 (1985).
32. "Review on the calculations of atomic collisions in solids": M. Fuse and T. Iwata, JAERI-M 85-118 (1985) (in Japanese).
33. "Data compilation for radiation effects on ceramic insulators": K. Fukaya, K. Ozawa, M. Terasawa, and S. Nakahigashi, JEARI-M 86-127 (1986).

34. "Spectral data and Grotrian diagrams for highly ionized titanium, Ti V - Ti XXII": K. Mori, W.L. Wiese, T. Shirai, Y. Nakai, K. Ozawa, and T. Kato, Atom. Data Nucl. Data Tables 34, 79 (1986).
35. "Computer simulations of knock-on processes in BCC Ta crystal": M. Fuse, T. Taji, and T. Iwata, JAERI-M 87-026 (1987) (in Japanese).
36. "Grotrian diagrams for the hydrogen I isoelectronic sequence H I through Kr XXXVI": Y. Funatake, T. Shirai, and Y. Nakai, JAERI-M 87-053 (1987).
37. "Data compilation for radiation damage on ceramic insulators (Revised with updated data and review)": K. Fukuya, M. Terasawa, and K. Ozawa, JAERI-M 87-217 (1987).
38. "Cross sections for charge transfer of hydrogen atoms and ions colliding with gaseous atoms and molecules": Y. Nakai, T. Shirai, T. Tabata, and R. Ito, Atom. Data Nucl. Data Tables, 37, 69 (1987).
39. "Spectral data and Grotrian diagrams for highly ionized nickel, Ni IX - Ni XXVIII": T. Shirai, K. Mori, J. Sugar, W.L. Wiese, Y. Nakai, and K. Ozawa, Atom. Data Nucl. Data Tables 37, 235 (1987).
40. "Spectral data for molybdenum ions, Mo VI - Mo XLII": T. Shirai, Y. Nakai, K. Ozawa, K. Ishii, J. Sugar, and K. Mori, J. Phys. Chem. Ref. Data 16, 327 (1987).
41. "Investigation on particle-solid interactions - Basic process relating to the plasma particle deposition profiles in solids -": S. Yano, JAERI-M 88-007 (1988) (in Japanese).
42. "Ion-impact desorption": T. Oshiyama, S. Nagai, and K. Ozawa, JAERI-M 88-146 (1988).
43. "Investigation on particle-solid interactions - Basic process relating to the plasma particle desorption profiles in solids II -": S. Yano, JAERI-M 88-161 (1988) (in Japanese).

Available upon request to Nuclear Data Center, Department of Physics,
Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura 319-11, Japan