

NATIONAL INSTITUTE FOR FUSION SCIENCE

プラズマ壁相互作用関連データ集-3
 「プラズマ対向材料中の水素同位体リテンションと
 関連する拡散係数・再結合係数データベース」

Plasma-Wall Interactions Data Compendium-3
 "Hydrogen Retention Property, Diffusion and Recombination
 Coefficients Database for Selected Plasma-Facing Materials"

石本祐樹、宮本光貴、森本泰臣、吉田登、松廣健二郎、岩切宏友、
 廣岡慶彦、山村泰道、森田健治、PWI一作業会メンバー
 Yuki Ishimoto, Mitsutaka Miyamoto, Yasutomi Morimoto, Hajime Yoshida, Kenjiro Matsuhira,
 Hirotomo Iwakiri, Yoshi Hirooka, Yasunori Yamamura, Kenji Morita and the PWI-Taskgroup

(Received - Jan. 5, 2004)

NIFS-MEMO-42

Jan. 2004

This report was prepared as a preprint of work performed as a collaboration research of the National Institute for Fusion Science (NIFS) of Japan. The views presented here are solely those of the authors. This document is intended for information only and may be published in a journal after some rearrangement of its contents in the future.

Inquiries about copyright should be addressed to the Research Information Center, National Institute for Fusion Science, Oroshi-cho, Toki-shi, Gifu-ken 509-5292 Japan.

E-mail: bunken@nifs.ac.jp

<Notice about photocopying>

In order to photocopy any work from this publication, you or your organization must obtain permission from the following organization which has been delegated for copyright for clearance by the copyright owner of this publication.

Except in the USA

Japan Academic Association for Copyright Clearance (JAACC)
 41-6 Akasaka 9-chome, Minato-ku, Tokyo 107-0052 Japan
 TEL:81-3-3475-5618 FAX:81-3-3475-5619 E-mail:naka-atsu@muj.biglobe.ne.jp

In the USA

Copyright Clearance Center, Inc.
 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 USA
 Phone: (978) 750-8400 FAX: (978) 750-4744

プラズマ-壁相互作用関連データ集-3

Plasma-Wall Interactions Data Compendium-3

NIFS-MEMO-42

「プラズマ対向材料中の水素同位体リテンションと
関連する拡散係数・再結合係数データベース」

“Hydrogen Retention Property, Diffusion and Recombination Coefficients Database for Selected Plasma-Facing Materials”

石本祐樹¹⁾、宮本光貴²⁾、森本泰臣³⁾、吉田肇⁴⁾、松廣健二郎¹⁾、岩切宏友²⁾、廣岡慶彦⁵⁾、
山村泰道⁶⁾、森田健治⁷⁾、PWI-作業会メンバー
日本原子力研究所那珂研究所¹⁾、九州大学応用力学研究所²⁾、静岡大学放射化学研究施設³⁾、
北海道大学⁴⁾、核融合科学研究所⁵⁾、岡山理科大学⁶⁾、名城大学⁷⁾、

Yuki Ishimoto¹⁾, Mitsutaka Miyamoto²⁾, Yasutomi Morimoto³⁾, Hajime Yoshida⁴⁾, Kenjiro Matsuhira¹⁾,
Hiroto Iwakiri²⁾, Yoshi Hirooka⁵⁾, Yasunori Yamamura⁶⁾, Kenji Morita⁷⁾ and the PWI-Taskgroup
JAERI Naka¹⁾, RIAM of Kyushu Univ.²⁾, Radiochemistry Research Lab., Sizuoka Univ.³⁾,
Hokkaido Univ.⁴⁾, NIFS⁵⁾, Okayama Univ. Science⁶⁾, Meijo Univ.⁷⁾

Abstract

This report will present additional data to those included in the previous report of this series. These new data are “effective” hydrogen (deuterium) recombination coefficients estimated under the assumption that hydrogen recombination occurs in the bulk of materials, followed by immediate desorption to vacuum. The SI units are used for all the data collected in this report.

Keywords:

hydrogen retention, hydrogen recycling, tritium inventory, steady-state magnetic fusion device, plasma-wall interactions database, hydrogen diffusion coefficient, hydrogen recombination coefficient, surface recombination, bulk recombination, effective recombination coefficient

目次

1. はじめに	2
2. 水素リテンションデータベース	
2-1 水素リテンション測定法	2
2-2 データベース・フォーマット	3
2-3 水素リテンションデータのフィッティング式	3
2-4 水素拡散係数・再結合係数文献データの整理	4
2-5 TDS データ解析による水素の実効的再結合係数の導出	4

水素リテンションデータ

• 8keV D_2^+ (4keV D^+) → 純度 99.95%焼結タングステン	7
• 1.5keV D_3^+ (500eV D^+) → 純度 99.95%多結晶タングステン	8
• 3keV D_3^+ (1keV D^+) → 純度 99.95%多結晶タングステン	9
• 3keV D_3^+ (1keV D^+) → タングステン	10
• 1.5keV D_3^+ (500eV D^+) → 純度 99.95%多結晶タングステン	11
• 3keV D_3^+ (1keV D^+) → 純度 99.95%多結晶タングステン	12
• 8keV D_2^+ (4keV D^+) → 純度 99.95%焼結モリブデン	13
• 3keV D_3^+ (1keV D^+) → モリブデン	14
• 8keV D_2^+ (4keV D^+) → 焼結ベリリウム	15
• 9keV D^+ → 焼結ベリリウム	16
• 3keV D_3^+ (1keV D^+) → 焼結ベリリウム	17
• 3keV D_2^+ (1.5keV D^+) → 等方性黒鉛	18
• 1keV H^+ → 熱分解炭素	19
• 1keV H^+ → 熱分解炭素	20
• 1keV H^+ → 熱分解炭素	21
• 8keV D → 熱分解炭素	22
• 100eV D_3^+ → Papyex	23
• 100eV D_3^+ → Papyex	24
• D^0 (1eV 以下) → 等方性黒鉛(原子状水素生成はタングステンフィラメントによる)	25
• D^0 (1eV 以下) → 等方性黒鉛(原子状水素生成はタングステンフィラメントによる)	26
• D^0 (1eV 以下) → 等方性黒鉛(原子状水素生成はタングステンフィラメントによる)	27
• D^0 (1eV 以下) → 等方性黒鉛(原子状水素生成はタングステンフィラメントによる)	28
• 2keV D^+ → Papyex	29
• 2keV D^+ → Papyex	30

• 2keV D ⁺ → Papyex	31
• 2keV D ⁺ → Papyex	32
• 2keV D ⁺ → Papyex	33
• 20keV D ⁺ → Papyex	34
• 20keV D ⁺ → Papyex	35
• 20keV D ⁺ → Papyex	36
• 20keV D ⁺ → Papyex	37
• 20keV D ⁺ → Papyex	38
• 5keV D ⁺ → Papyex	39
• 10keV D ⁺ → Papyex	40

水素拡散係数データ

• 3keV H ₂ ⁺ → 等方性黒鉛(東洋炭素:IG-110U)	41
• D ⁰ → 等方性黒鉛(原子状水素生成はタングステンフィラメントによる)	42
• T (³ He(n,p)T反応による反跳Tを利用) → PyC	43
• D(低温ガス吸収による注入) → 等方性黒鉛	44

ヘリウム拡散係数データ

• Max. 28MeV He ⁺ → Pyrolytic graphite	45
---	----

水素再結合係数データ

• 3keV H ₂ ⁺ → 等方性黒鉛	46
• 3keV H ₂ ⁺ → 等方性黒鉛	47
• 3keV D ⁺ → Fine grain graphite	48
• 1keV D ⁺ → pyrolytic graphite	49

水素熱脱離 TDS データ

• 8keV D ₂ ⁺ → 純度 99.95%焼結タングステン	50
• 3keV D ₂ ⁺ → 純度 99.95%焼結モリブデン	51
• 8keV D ₂ ⁺ → 純度 99%焼結ベリリウム	52
• 8keV D ₂ ⁺ → 純度 99.99%Fe-9Cr	53
• 1keV D ₂ ⁺ → HOPG	54
• カーボングラスト (D ₂ ガス中にてアーク放電)	55
• T ₁ ~3keV H (CX-neutral) → 炭素繊維材料	56

1. はじめに

核融合科学研究所、研究・企画情報センター主催の「プラズマ-壁相互作用データベースの整備と関連コードのライブラリー化」作業会(研究代表者:山村泰道[平成11年年度から13年度まで]、森田健治[平成14年度より]、所内世話人:廣岡慶彦)では、磁気閉じ込め核融合炉内のトリチウムインベントリーに関連する材料中の燃料粒子の静的な水素吸蔵特性(水素リテンション)やプラズマ放電中の対向壁での動的な水素トラッピングと放出過程のせめぎ合い、即ち、水素リサイクリングに関してこれまで得られている知見を整理するため広く国内外の文献調査を行い、実験方法・測定手段・データ及びコメントをまとめ、後に示すような統一されたフォーマットで整理しデータベース化した。ここで、コメントとは本作業会参加者によって議論された文献データの信頼性や解析法の問題点を指摘したもので従来の単なるデータ集には見られない辛口の論評である。

今回、調査の対象となった材料は、ベリリウム、炭素・黒鉛材料、タングステン、モリブデン等、既に現存の磁気閉じ込め実験装置のプラズマ対向機器に用いられている低原子番号及び高原子番号材料である。また、現在、建設が議論されている国際熱核融合実験炉(ITER)にもこれらの材料が用いられることが予想されるので、本作業会の活動は非常にタイムリーと言えるであろう。

本レポートでは、上記プラズマ対向機器材料中の水素リテンション実験データをイオンビーム照射量の関数として整理したものと、それらのデータを統一的に整理するために提唱されたフィッティング式の適用結果も紹介する。また、水素の動的な挙動解析に必要な拡散係数と表面(バルク)再結合係数についても作業会メンバーによって評価されたコメント付きで収録した。

今回、第3集では、名城大学森田教授の提案する熱的脱捕獲・捕獲・再結合係数の組み合わせからなる実効的再結合係数を昇温脱離スペクトルから算出したデータを追加した。

次節は、第3集のみでも利用可能な様にあえて第1集・第2集と重複した内容の解説とした。

2. 水素リテンションデータベース

2-1. 水素リテンション測定法

材料中にイオンビームやプラズマ照射等に注入された水素の挙動の解析やここで扱うリテンション量を評価するために種々の手法による測定が行われている。代表的なものとしては、昇温脱離法(TDS: Thermal Desorption Spectrometry) [1]、核反応(NRA: Nuclear Reaction Analysis) [2]、二次イオン質量分析法(SIMS: Secondary Ion Mass Spectrometry) [3]、反跳粒子検出法(ERD: Elastic Recoil Detection) [4]等が挙げられる。詳しい解説は上記の引用文献を参照されたい。

各データシートを見るときに読者に注意していただきたいのは、水素リテンション量の測定法である。本レポートで取り上げられたデータは、主として、TDS法によって測定されたものである。TDS測定は、イオンビーム等による水素注入が終了してから行うため、照射温度等の照射条件を反映した水素保持量に左右されることになる。たとえば、高温照射においては、低温照射に比べ拡散係数および再結合係数が大きくなることから、注入された水素の再放出過程が低温照射におけるそれよりも促進され、結果としてTDS測定における水素放出量の低下につながる。言い方を換えればTDSによる測定データは、このような過渡的放出の後に残留する水素であるので、むしろ、前述の静的水素インベントリーに関連するデータと言えるであろう。これに対して、照射中に注入された水素量の同時測定が可能であるような手法(例えばNRA法)を用いた場合は、測定されたリテンション量は、動的な水素リサイクリングに関連する物理量であると考えられる。

2-2. データベース・フォーマット

今回採用されたデータベースには、1. 出典、2. 問い合わせ先の電子メールアドレス (又は、郵便住所)、3. 測定方法・試料、4. 結果 及び 5. コメント が1ページにまとめられている。ここでの結果には文献から抽出・数値化されたデータと後で述べるフィッティング式とパラメータとそれを適用したリテンションカーブが含まれている。このフォーマットは、最近、IAEA から出版されたスパッタリング率データベース・レポート [5]のそれに準ずるものである。

2-3. 水素リテンションデータのフィッティング式

一例として、Fig. 1に8keVの D_2^+ (即ち、4keVの D^+)を焼結ベリリウム (日本ガイシ社製)に照射したときのリテンション量のデータ[6]を、照射量の関数として (白丸で)プロットものを示した。照射フルエンスは $1 \times 10^{18} D^+/m^2$ 、照射温度は300Kで水素リテンション量はTDS測定の水素放出スペクトルより換算したものである。照射終了からTDS測定を開始するまでの時間は2~3時間である。したがって、この間に移動度の高い重水素原子は放出されるが、室温照射のため、その割合は大きくないと考えられる。ただし、この文献ではTDS測定までの水素放出量の評価はされていない。

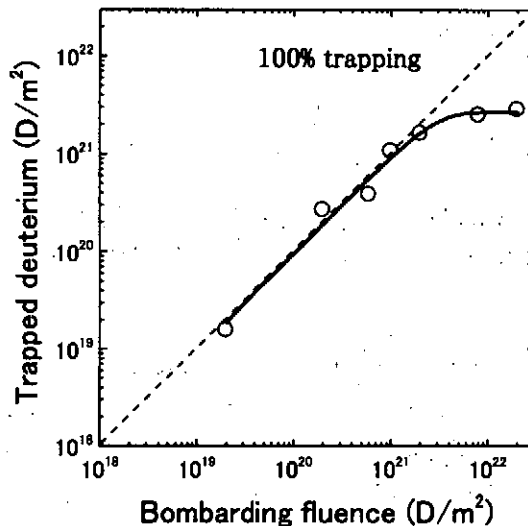


Fig. 1 Deuterium retention in beryllium at 4 keV[6].

このデータから分かるように、一般に、水素リテンション量は照射の初期に直線的な増加があり、屈曲点を経て飽和する傾向がある。この特徴は、一般の多項式や指数関数では近似しにくいいため、本作業会では以下のフィッティング式を考案・適用した。

$$y = A_1 \tanh(x/A_2)^p \quad (1)$$

ここで、 x : 照射量(D atoms/m²)、 y : 水素リテンション量(D atoms/m²)、 A_1 : 水素リテンション飽和値(D atoms/m²)、 A_2 : 屈曲点に対応する照射量(D atoms/m²)、 p : 屈曲特性を特徴づける無次元パラ

メータである。上記(1)式を前出のベリリウムデータのデータに適用するとフィッティングパラメータ $A_1=2.7 \times 10^{21} \text{D/m}^2$ 、 $A_2=2.8 \times 10^{21} \text{D/m}^2$ 、 $p=1$ となり、その結果を実線で同じく Fig. 1 に示した。実験データとフィッティング式によるリテンションカーブが非常によく一致していることが判る。また、このデータでは屈曲点に至るまでほぼ100%トラッピングの状態の水素注入が進行していることが示されている。実際、モンテカルロ・コード (TRIM.SP [7]) を用いて反射係数を計算すると1.3%と非常に小さな値が得られ実験データと矛盾しない。

ところで、無次元パラメータ p はこれまでの調査・フィッティング結果から、水素注入効率が100%に近く、しかも、リテンションカーブの屈曲が顕著な場合に1に近い値を示す傾向があることが作業会参加者から指摘されている。この傾向を注入された水素の材料挙動、即ち、移動度と対応付けることが出来る場合がある。例えば、先の照射条件ではベリリウム格子中に多数のはじき出し損傷が導入されることが期待される。実際、高照射領域 ($>8 \times 10^{21} \text{D/m}^2$) では電子顕微鏡によりバブルが観察されている。したがって、注入された重水素はこれらの格子欠陥にトラップされていると考えられる。しかしながら、このパラメータのより詳しい物理的考察については今後の検討に待ちたい。

2-4. 水素拡散係数・再結合係数文献データの整理

水素の材料中の拡散係数と表面(バルク)再結合係数に関しては、最も広く用いられている下記の式を用いて整理した：

$$D(T) = D_0 \exp(-E_a / kT) \quad (2)$$

$$K_r(T) = K_0 \exp(-E_r / kT) \quad (3)$$

ここで、 D は拡散係数、 K_r は再結合係数、 D_0 と K_0 はそれぞれの振動数項、 T は絶対温度、 E_a は活性化エネルギー、 k はボルツマン定数である。また、第2集から拡散係数の単位はSI系を用いて m^2/s 、再結合係数の単位は m^3/s とした。

2-5. TDS データ解析による水素の実効的再結合係数の導出

材料中の水素の拡散・再結合は、核融合研究においても大きな関心が寄せられてきた[8]。しかし、算出された拡散・再結合係数や活性化エネルギーは、用いられた物理モデルが同じ場合においてのみ比較できるものである。本節で示すデータベースは、加熱再放出実験(昇温脱離実験)の結果を Morita が提唱する質量平衡方程式に基づき解析した実効的再結合係数である。このモデルは、物質中における水素を動くことのできるモバイル水素、捕獲座に捉えられているトラップ水素の2つにわけ、拡散・バルク再結合・イオン照射による脱捕獲・熱的な脱捕獲等の素過程から構成されている。また、このモデルは、黒鉛中の水素の動的振る舞いのイオンビーム分析法に基づく解析から導かれたが、金属等に対しても、次のように考えると適用できる。金属等では、再結合は表面(粒界表面をも含む)で生じると考えられている。粒径の小さな多結晶体では、水素が捕獲座から脱捕獲されて表面に到達するまでの時間が短いとき、拡散を省略して、表面再結合をバルク再結合に置き換えることが可能であると考えられる。このモデルは全ての素過程を含んでいるので、計算結果と実験結果の比較から、水素の動的挙動の詳細な考察を可能とする。これがこのモデルを採用した理由である。

加熱再放出実験における質量平衡方程式は、モバイル水素・トラップ水素に関して以下のように表すことができる[9]。

$$\frac{dn(t)}{dt} = \Sigma_a n_T(t) - \Sigma_T n(t)(C_0 - n_T(t)) - 2K_r^2 n(t)^2 \quad (4)$$

$$\frac{dn_T(t)}{dt} = -\Sigma_d n_T(t) + \Sigma_T n(t)(C_0 - n_T(t)) \quad (5)$$

ここで、 $n(t)$ 、 $n_T(t)$ は、それぞれ時間 t におけるモバイル・トラップ水素の密度、 Σ_d は熱的脱捕獲係数、 Σ_T は捕獲係数、 K_1 はモバイル水素同士の再結合係数、 C_0 はトラップサイトの密度である。黒鉛では捕獲係数が極めて大きいため脱捕獲してもすぐに捕獲され、モバイル水素の密度は準定常状態になると仮定できれば、(4)、(5)式を解析的に解くことができる。

$$\frac{C_0}{n_0} \left[1 - \frac{1}{N_T(t)} \right] - 2 \ln[N_T(t)] + \frac{n_0}{C_0} [N_T(t) - 1] = -2 \frac{K_1}{C_0} \left[\frac{\Sigma_d}{\Sigma_T} \right]^2 t \quad (6)$$

ここで、 n_0 は初期水素密度、 $N_T(t)$ は規格化した水素密度 $n_T(t)/n_0$ である。ここで(6)式右辺の t を除いた部分が実効的再結合定数 K_{eff} である。これは、熱活性化過程による反応の組み合わせであるので、アレニウスの式で表すことができる。

$$\frac{2K_1}{C_0} \left[\frac{\Sigma_d}{\Sigma_T} \right]^2 = K_{eff} = K_0 \exp\left(-\frac{E_k}{kT}\right) \quad (7)$$

ここで T は、温度で初期温度を T_0 、昇温速度を γ とすると $T = T_0 + \gamma t$ と表される。また、ピークをとる温度を $T_p = T_0 + T_m$ とする。(6)式の解を時間について微分すると加熱再放出実験におけるトラップ水素の変化量、すなわち昇温脱離スペクトル $F(t)$ が得られる。

$$F(T) = \frac{n_0 K_0}{C_0 \gamma} \frac{e^{-E_k/kT} \left[1 + \frac{E_k(T-T_0)}{kT^2} \right]}{\left[\left(1 - \frac{n_0}{C_0} \right) + \frac{n_0 K_0}{C_0 \gamma} e^{-E_k/kT} \right]^2} \quad (8)$$

このモデルの妥当性を示す例として、等方性黒鉛 (IG-430U) に 5 keV の D_3^+ を 5×10^{17} D/cm² 注入した後の昇温脱離スペクトルと(8)式を用いて計算した結果、および2次の脱離を仮定して計算した結果を Fig. 2 に示す。(8)式を用いた計算では、 $E_k = 1.2$ [eV]、 $K_0 = 18$ [s⁻¹] [9]、 $n_0/C_0 = 0.9$ 、また2次の脱離を仮定した計算では、活性化エネルギーを 2.5 [eV]、頻度因子を 10^8 [s⁻¹] とし、昇温速度はともに $\gamma = 0.5$ [K/s] とした。この図から、Morita のモデルの計算結果と実験値が良く一致していることがわかる。

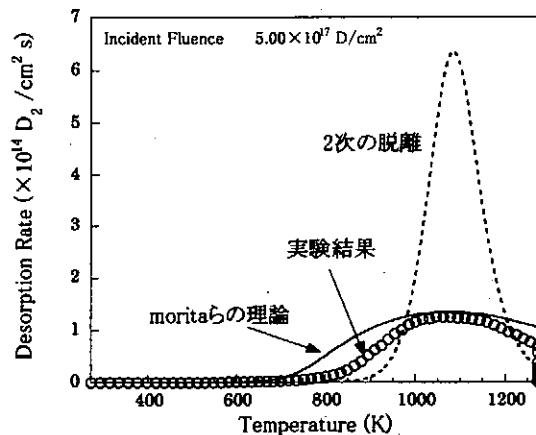


Fig.2 A comparison between experimental and calculation spectra.

(8) 式を温度で微分し、 $dF/dt = 0$ とおくと次式を得る。

$$K_0 \exp\left(-\frac{E_k}{kT}\right) = \frac{\left(1 - \frac{n_0}{C_0}\right) \gamma E_k}{\frac{n_0}{C_0} T_m E_k + 0.2} \quad (9)$$

n_0/C_0 と T_m の値を(9)式へ代入し、右辺の $E_k/(E_k + 0.2)$ を除いた部分の対数値を縦軸に、 $1/T_p$ を横軸にとってプロットするとその傾きから E_k を求めることができる。 C_0 の値については、(1)式の A_1 を用い、TDS 実験等から n_0 を求める場合 (測定値) とリテンションカーブとフルエンスの値から n_0 を見積もる (評価値) 2つの方法がある。

参考文献

- [1] 安倍哲郎, 荒木 健, 田中一英, 日本金属学会誌 53(7)(1989)635
- [2] J. Böttiger, J. Nucl. Mater. 78 (1978) 161
- [3] J. P. Thomas and A. Cachard, "Material Characterization Using Ion Beams" PLENUM PRESS, (1976)
- [4] J. L'Ecuyer, C. Brassard, C. Cardinal, L. Deshênes, J. P. Labrie, B. Terreault, J. G. Martel and R. St. -Jaques, J. Appl. Phys. 47 (1976) 381
- [5] Atomic and Plasma-Material Interaction Data for Fusion - Particle Induced Erosion of Be, C and W, Vol. 7, Part A(1998)"Chemical Erosion", Part B(2001)"Physical Erosion", IAEA.
- [6] Yoshida et al., J. Nucl. Mater. 233-237 (1996) 874.
- [7] J. P. Beirsack and W. Eckstein, Appl. Phys. A34(1984)73.
- [8] K. L. Wilson, Nuclear Fusion Special Issue (1984) 28.
- [9] K. Morita and Y. Muto, J. Nucl. Mater. 220-222 (1995)1038.

本作業会メンバー (平成15年11月現在)

中嶋洋輔 (筑波大) 上田良夫 (阪大) 岡田成分 (阪大) 奥井隆雄 (阪大) 大野哲靖 (名大) 小野忠良 (岡山理大)
奥野健二 (静岡大) 大宅薫 (徳島大) 川上烈生 (徳島大) 川村孝弐 (中部大) 広畑優子 (北大) 吉田直亮 (九大)

水素リテンションデータ

1. 出典

坂本隆一 平成七年度九大総理工博士論文

2. 問い合わせ先 (e-mailアドレス) : iwakiri@riam.kyushu-u.ac.jp

3. 測定方法・試料

- 8keV D₂⁺ (4keV D⁺) → 純度99.95%焼結タングステン (ニラコ)
- 照射強度: 1x10¹⁸D/m²s, 照射温度: 300K
- TDS法を用いた照射後の重水素放出スペクトルにより測定 (昇温速度1K/sec)
- 照射から測定までの時間は2~3時間

4. フィッティング結果

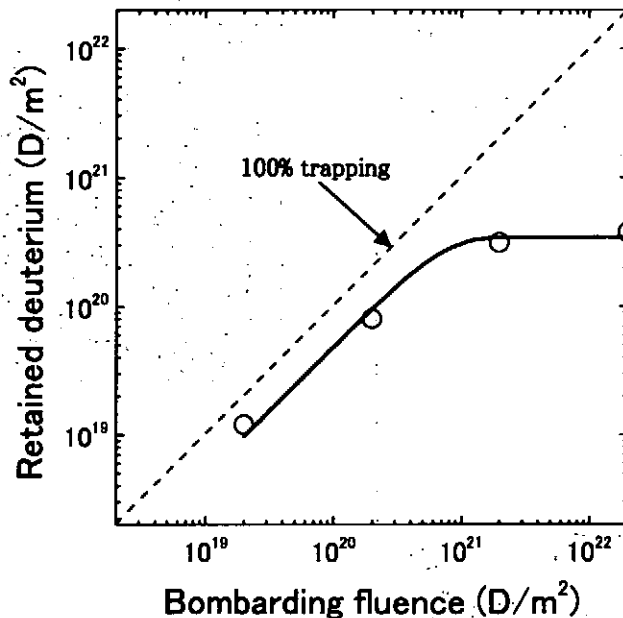
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は

$$y = A_1 \tanh(x / A_2) \quad \left\{ \begin{array}{l} A_1 = 3.4437E20 \\ A_2 = 7.0862E20 \end{array} \right.$$

(適用照射量範囲 : 2x10¹⁹D/m²~2x10²²D/m²)

5. コメント

TDS測定の結果、400K~600K付近に大きな放出ピークがあり、それ以外の温度対からの放出はほとんど見られない。TEMによる観察も行なわれており、この照射量の範囲において転位ループの形成は行なわれているが、バブルは観察されなかった。



x(D/m ²)	y(D/m ²)
2.0E+19	1.2E+19
2.0E+20	8.0E+19
2.0E+21	3.1E+20
2.0E+22	3.8E+20

1. 出典

A. A. Haasz et al., J. Nucl. Mater. 258-263 (1998) 889

2. 問い合わせ先 (e-mailアドレス) : aahaasz@utias.utoronto.ca.

3. 測定方法・試料

- 1.5keV D₃⁺ (500eV D⁺) → 純度99.95%多結晶タングステン (>1473K で1時間焼鈍)
- 照射強度: 8x10¹⁹D/m²s, 照射温度: 300K
- TDS法を用いた照射後の重水素放出スペクトルにより測定 (昇温速度10K/sec)
- 照射から測定までの時間は16~72時間

4. フィッティング結果

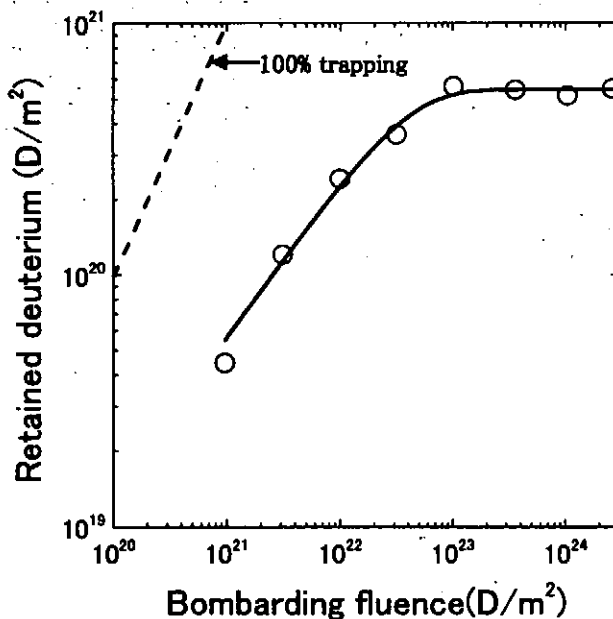
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は

$$y = A_1 \tanh(x / A_2)^p \quad \begin{cases} A_1=5.4325E20 \\ A_2=3.6818E22 \end{cases} \quad p=0.62841$$

(適用照射量範囲 : 1x10²¹D/m²~2x10²⁴D/m²)

5. コメント

NRAによる重水素の深さ分布も測定しており、注入レンジをはるかに超えて試料中に拡散している。注入レンジは深さ30nm程度であるが、500nm以上にまで分布している。ただし25 μm (試料の厚み) 以上の拡散はない。



x(D/m ²)	y(D/m ²)
9.6E+20	4.5E+19
3.1E+21	1.2E+20
9.9E+21	2.4E+20
3.1E+22	3.6E+20
1.0E+23	5.6E+20
3.6E+23	5.4E+20
1.0E+24	5.1E+20
2.6E+24	5.5E+20

1. 出典

A. A. Haasz et al., J. Nucl. Mater. 258-263 (1998) 889

2. 問い合わせ先 (e-mailアドレス) : aahaasz@utias.utoronto.ca.

3. 測定方法・試料

- 3keV D₃⁺ (1keV D⁺) → 純度99.95%多結晶タングステン (>1473K で1時間焼鈍)
- 照射強度: 1x10²⁰D/m²s, 照射温度: 300K
- TDS法を用いた照射後の重水素放出スペクトルにより測定 (昇温速度10K/sec)
- 照射から測定までの時間は16~72時間

4. フィッティング結果

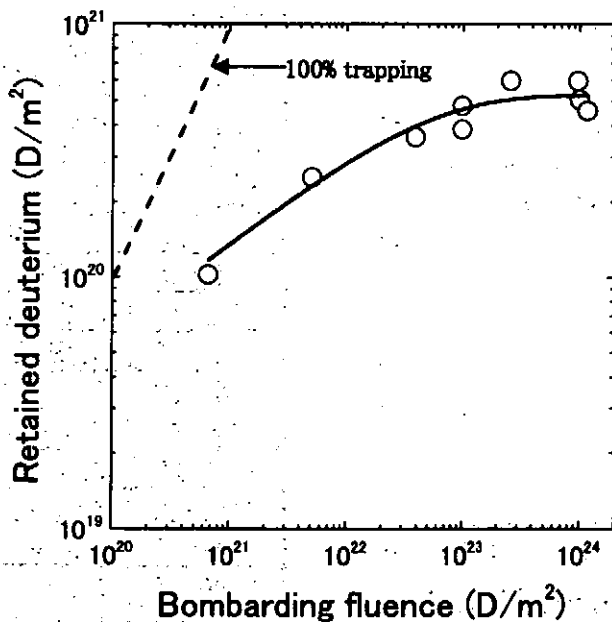
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は

$$y = A_1 \tanh(x / A_2)^p \quad \begin{cases} A_1 = 5.2661E20 \\ A_2 = 4.0872E22 \end{cases} \quad p = 0.36087$$

(適用照射量範囲: 1x10²¹D/m²~1x10²⁴D/m²)

5. コメント

NRAによる重水素の深さ分布も測定しており、注入レンジをはるかに超えて試料中に拡散している。注入レンジは深さ30nm程度であるが、500nm以上にまで分布している。ただし25μm (試料の厚み) 以上の拡散はない。



x(D/m ²)	y(D/m ²)
6.6E+20	1.0E+20
5.0E+21	2.5E+20
3.9E+22	3.6E+20
9.8E+22	3.9E+20
9.8E+22	4.8E+20
2.6E+23	6.0E+20
9.6E+23	6.0E+20
1.0E+24	5.0E+20
1.2E+24	4.6E+20

1. 出典

A. A. Haasz et al., J. Nucl. Mater. 241-243 (1997) 1076

2. 問い合わせ先 (e-mailアドレス) : aahaasz@utias.utoronto.ca.

3. 測定方法・試料

•3keV D₃⁺ (1keV D⁺) → タングステン (Rember)

•照射強度: 1x10²⁰D/m²s, 照射温度: 300K

•TDS法を用いた照射後の重水素放出スペクトルにより測定 (昇温速度20K/sec)

4. フィッティング結果

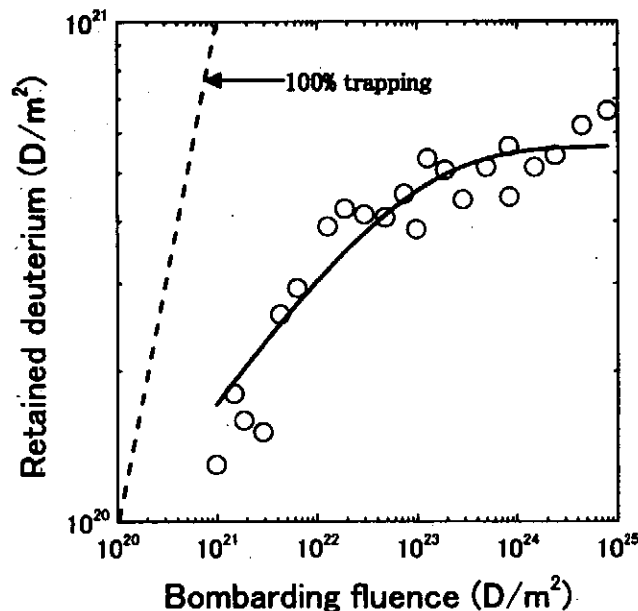
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は

$$y = A_1 \tanh(x / A_2)^p \quad \begin{cases} A_1 = 5.6277E20 \\ A_2 = 6.0781E22 \end{cases} \quad p = 0.28044$$

(適用照射量範囲 : 1x10²¹D/m² ~ 1x10²⁵D/m²)

5. コメント

TDS測定の結果、400K~800K付近に大きな放出ピークがあり、それ以外の温度帯からの放出はほとんど見られない。SEM観察も行なわれており、1x10²⁵D/m²照射した試料では際立った表面形状の変化が見られ、1μm程度の穴が密集して形成された。



x(D/m ²)	y(D/m ²)
9.8E+20	1.3E+20
1.5E+21	1.8E+20
1.9E+21	1.6E+20
2.9E+21	1.5E+20
4.3E+21	2.6E+20
6.3E+21	2.9E+20
1.3E+22	3.9E+20
1.9E+22	4.2E+20
3.0E+22	4.1E+20
4.8E+22	4.1E+20
7.4E+22	4.5E+20
9.7E+22	3.9E+20
1.3E+23	5.3E+20
1.9E+23	5.1E+20
2.9E+23	4.4E+20
4.9E+23	5.1E+20
8.2E+23	5.6E+20
8.4E+23	4.5E+20
1.5E+24	5.1E+20
2.4E+24	5.4E+20
4.4E+24	6.2E+20
8.0E+24	6.6E+20

1. 出典

A. A. Haasz et al., J. Nucl. Mater. 258-263 (1998) 889

2. 問い合わせ先 (e-mailアドレス) : aahaasz@utias.utoronto.ca.

3. 測定方法・試料

- 1.5keV D₃⁺ (500eV D⁺) → 純度99.95%多結晶タングステン (>1473K で1時間焼鈍)
- 照射強度: 8x10¹⁹D/m²s, 照射温度: 500K
- TDS法を用いた照射後の重水素放出スペクトルにより測定 (昇温速度10K/sec)
- 照射から測定までの時間は16~72時間

4. フィッティング結果

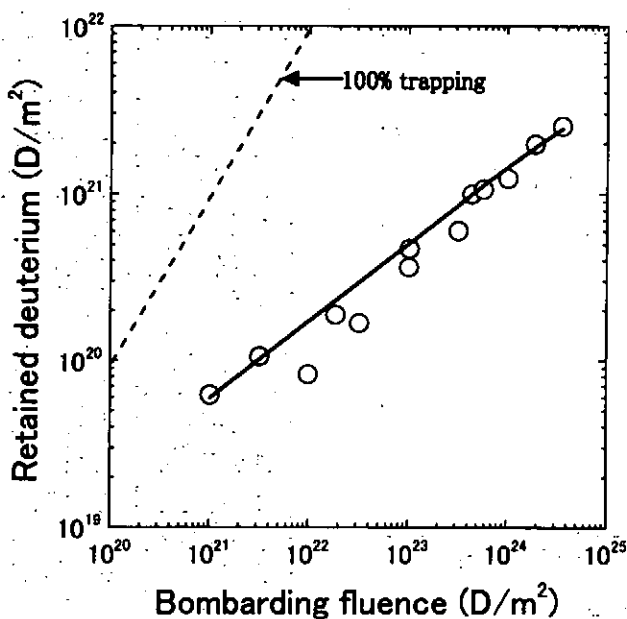
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は

$$y = A_1 \tanh(x / A_2)^p \quad \begin{cases} A_1=4.9899E21 \\ A_2=1.3619E25 \end{cases} \quad p=0.46585$$

(適用照射量範囲 : 1x10²¹D/m²~4x10²⁴D/m²)

5. コメント

NRAによる重水素の深さ分布も測定しており、注入レンジをはるかに超えて試料中に拡散している。注入レンジは深さ30nm程度であるが、25μm (試料の厚み) の領域にほぼ均一に分布している。



x(D/m ²)	y(D/m ²)
1.0E+21	6.2E+19
3.2E+21	1.1E+20
9.9E+21	8.3E+19
1.9E+22	1.9E+20
3.2E+22	1.7E+20
1.0E+23	3.7E+20
1.0E+23	4.7E+20
3.2E+23	6.0E+20
4.4E+23	1.0E+21
5.8E+23	1.1E+21
1.0E+24	1.2E+21
1.9E+24	2.0E+21
3.6E+24	2.5E+21

1. 出典

A. A. Haasz et al., J. Nucl. Mater. 258-263 (1998) 889

2. 問い合わせ先 (e-mailアドレス) : aahaasz@utias.utoronto.ca

3. 測定方法・試料

- 3keV D₃⁺ (1keV D⁺) → 純度99.95%多結晶タングステン (>1473Kで1時間焼鈍)
- 照射強度: 1x10²⁰D/m²s, 照射温度: 500K
- TDS法を用いた照射後の重水素放出スペクトルにより測定 (昇温速度10K/sec)
- 照射から測定までの時間は16~72時間

4. フィッティング結果

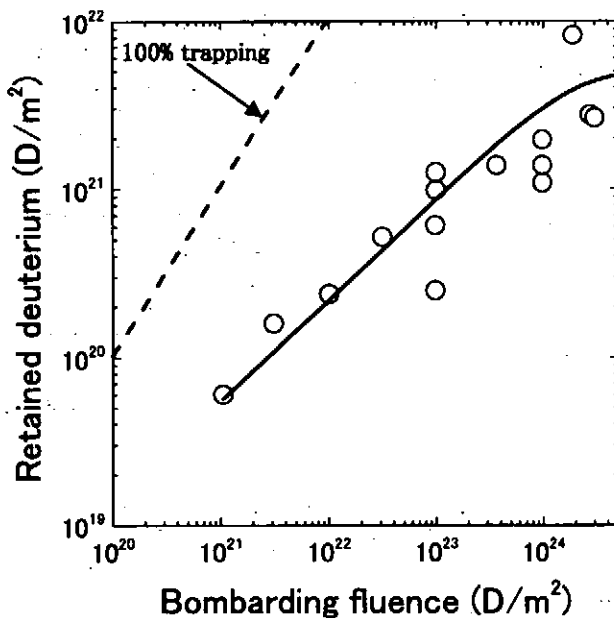
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は

$$y = A_1 \tanh(x / A_2)^p \quad \begin{cases} A_1 = 4.9438E21 \\ A_2 = 1.7931E24 \end{cases} \quad p = 0.60109$$

(適用照射量範囲: 1x10²¹D/m²~3x10²⁴D/m²)

5. コメント

照射量が1x10²³D/m²までは300Kで同様の照射を行なったときと比べて吸蔵量は少ないが、それ以上の照射量では300Kよりも吸蔵量が多くなる。飽和傾向も示さない。



x(D/m ²)	y(D/m ²)
1.1E+21	6.0E+19
3.1E+21	1.6E+20
1.0E+22	2.4E+20
3.1E+22	5.2E+20
9.8E+22	2.5E+20
9.8E+22	6.0E+20
9.9E+22	9.8E+20
9.9E+22	1.2E+21
3.7E+23	1.4E+21
9.8E+23	1.1E+21
9.8E+23	1.4E+21
9.8E+23	1.9E+21
1.9E+24	8.2E+21
2.7E+24	2.7E+21
3.0E+24	2.6E+21
9.7E+24	5.9E+21

1. 出典

坂本隆一 平成七年度九大総理工博士論文

2. 問い合わせ先 (e-mailアドレス) : iwakiri@riam.kyushu-u.ac.jp

3. 測定方法・試料

- 8keV D₂⁺ (4keV D⁺) → 純度99.95%焼結モリブデン (ニラコ)
- 照射強度: 1x10¹⁸D/m²s, 照射温度: 300K
- TDS法を用いた照射後の重水素放出スペクトルにより測定 (昇温速度1K/sec)
- 照射から測定までの時間は2~3時間

4. フィッティング結果

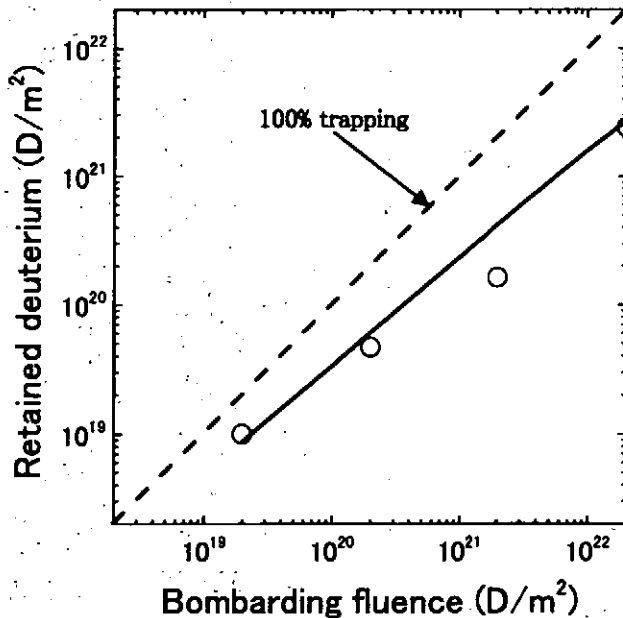
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は

$$y = A_1 \tanh(x / A_2)^p \quad \begin{cases} A_1 = 5.8585E21 \\ A_2 = 4.5777E22 \end{cases} \quad p = 0.84099$$

(適用照射量範囲 : 1x10¹⁹D₂/m² ~ 1x10²²D₂/m²)

5. コメント

TDS測定の結果、400K~600K付近に大きな放出ピークがあり、それ以外の温度対からの放出はほとんど見られない。TEMによる観察も行なわれており、この照射量の範囲において転位ループの形成は行なわれているが、バブルは観察されなかった。



x(D/m ²)	y(D/m ²)
2.0E+19	1.0E+19
2.0E+20	4.7E+19
2.0E+21	1.6E+20
2.0E+22	2.4E+21

1. 出典

A. A. Haasz et al., J. Nucl. Mater. 241-243 (1997) 1076

2. 問い合わせ先 (e-mailアドレス) : aahaasz@utias.utoronto.ca.

3. 測定方法・試料

- 3keV D₃⁺ (1keV D⁺) → モリブデン (Johnson Matthey)
- 照射強度: 1x10²⁰D/m²s, 照射温度: 300K
- TDS法を用いた照射後の重水素放出スペクトルにより測定 (昇温速度9K/sec)

4. フィッティング結果

重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は

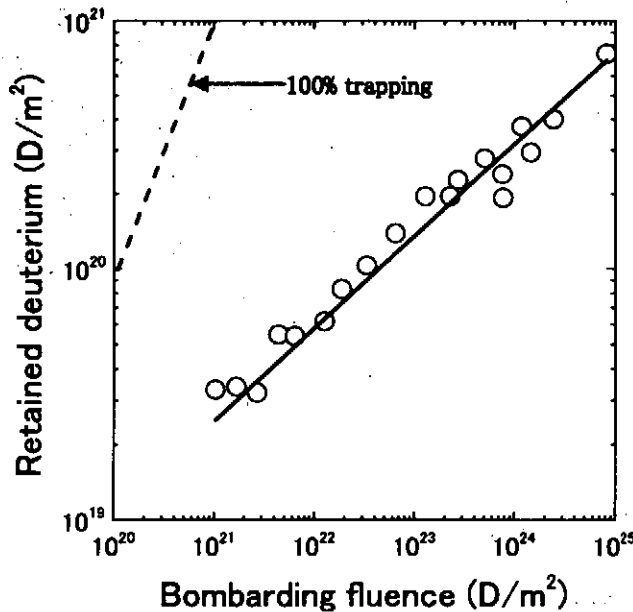
$$y = A_1 \tanh(x / A_2)^p$$

$$\begin{cases} A_1 = 1.6385E22 \\ A_2 = 4.2541E28 \end{cases} \quad p = 0.3698$$

(適用照射量範囲 : 1x10²¹D/m² ~ 1x10²⁵D/m²)

5. コメント

TDS測定の結果、700K~800K付近に鋭い放出ピークがあり、それ以外の温度帯からの放出はほとんど見られない。SEMによる表面観察も行なわれており、3x10²⁵D/m²照射した試料では表面形状の変化が見られるが、結晶粒によって異なる。結晶によっては1μm程度の穴が密集して形成された。



x(D/m ²)	y(D/m ²)
1.0E+21	3.3E+19
1.7E+21	3.4E+19
2.7E+21	3.2E+19
4.4E+21	5.5E+19
6.4E+21	5.4E+19
1.3E+22	6.2E+19
1.9E+22	8.3E+19
3.3E+22	1.0E+20
6.5E+22	1.4E+20
1.3E+23	2.0E+20
2.3E+23	2.0E+20
2.7E+23	2.3E+20
5.1E+23	2.8E+20
7.6E+23	2.4E+20
7.7E+23	1.9E+20
1.2E+24	3.7E+20
1.5E+24	2.9E+20
2.5E+24	4.0E+20
8.2E+24	7.4E+20

1. 出典

N. Yoshida et al., J. Nucl. Mater. 233-237 (1996) 874.

2. 問い合わせ先 (e-mailアドレス) : yoshida@riam.kyushu-u.ac.jp

3. 測定方法・試料

- 8keV D₂⁺ (4keV D⁺) → 焼結ベリリウム (ニラコ)
- 照射強度: 1x10¹⁸D/m²s, 照射温度: 300K
- TDS法を用いた照射後の重水素放出スペクトルにより測定 (昇温速度1K/sec)
- 照射から測定までの時間は2~3時間

4. フィッティング結果

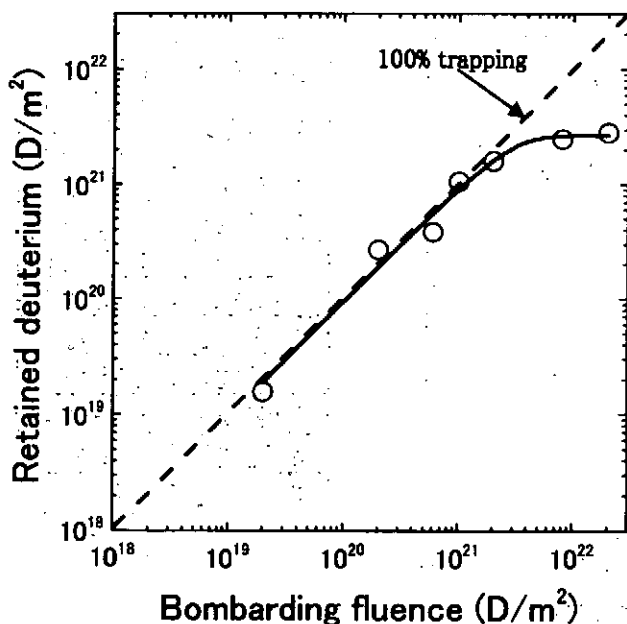
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は、

$$y = A_1 \tanh(x / A_2) \quad \begin{cases} A_1=2.6676E21 \\ A_2=2.8210E21 \end{cases}$$

(適用照射量範囲 : 2x10¹⁹D/m²~2x10²²D/m²)

5. コメント

TDS測定の結果、照射量が1x10²⁰D₂/m²以下では800~900Kにのみ放出ピークが見られ、照射量が1x10²¹D₂/m²以上になると、600K~700K付近にも大きな放出ピークが形成される。照射量が1x10²¹D₂/m²以下では重水素はほぼ100%吸蔵される。TEM観察も行なわれており、照射量が4x10²¹D₂/m²を超えるとヘリウムバブルが観察されるようになる。



x(D/m ²)	y(D/m ²)
2.0E+19	1.6E+19
2.0E+20	2.7E+20
6.0E+20	3.8E+20
1.0E+21	1.1E+21
2.0E+21	1.6E+21
8.0E+21	2.5E+21
2.0E+22	2.8E+21

1. 出典

V. Kh. Alimov et al., J. Nucl. Mater. 241-243 (1997) 1047

2. 問い合わせ先 (e-mailアドレス) : alimov@surface.phyche.msk.su.

3. 測定方法・試料

- 9keV D⁺ → 焼結ペリリウム (1 wt%のBeOを含む)
- 照射強度: 1x10¹⁹D/m²s (照射量 1x10²¹D/m²未満), 3x10¹⁹D/m²s (照射量 1x10²¹D/m²以上)
- 照射温度: 300K
- SIMSによる試料中の重水素の直接測定

4. フィッティング結果

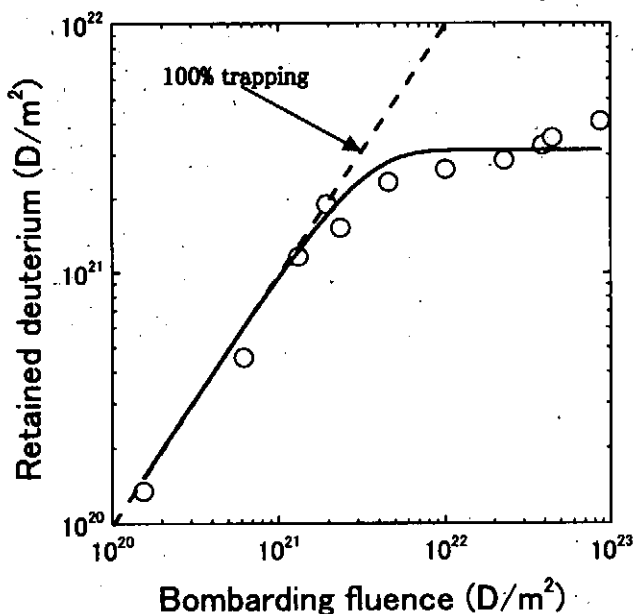
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は

$$y = A_1 \tanh(x / A_2) \quad \begin{cases} A_1=3.1282E21 \\ A_2=3.1735E21 \end{cases}$$

(適用照射量範囲 : 1x10²⁰D/m²~1x10²³D/m²)

5. コメント

重水素分子と重水素原子を分離測定している。照射量が小さいときには (<1x10²¹D/m²)原子状で捕獲されているものが多いが、照射量が多くなると分子状で捕獲されているものが大部分を占めるようになる。これは、照射が増加するとヘリウムバブルの形成が行なわれ (TEMにより観察されている)、捕獲される大多数の重水素がその内部に分子として存在するようになるからである。



x(D/m ²)	y(D/m ²)
1.5E+20	1.3E+20
6.2E+20	4.6E+20
1.3E+21	1.2E+21
1.9E+21	1.9E+21
2.4E+21	1.5E+21
4.6E+21	2.3E+21
1.0E+22	2.6E+21
2.3E+22	2.8E+21
3.9E+22	3.3E+21
4.5E+22	3.5E+21
8.7E+22	4.1E+21

1. 出典

A. A. Haasz et al., J. Nucl. Mater. 241-243 (1997) 1076

2. 問い合わせ先 (e-mailアドレス) : aahaasz@utias.utoronto.ca.

3. 測定方法・試料

•3keV D₃⁺ (1keV D⁺) → 焼結ベリリウム (Brush Wellman)

•照射強度: 1x10²⁰D/m²s, 照射温度: 300K

•TDS法を用いた照射後の重水素放出スペクトルにより測定 (昇温速度7K/sec)

4. フィッティング結果

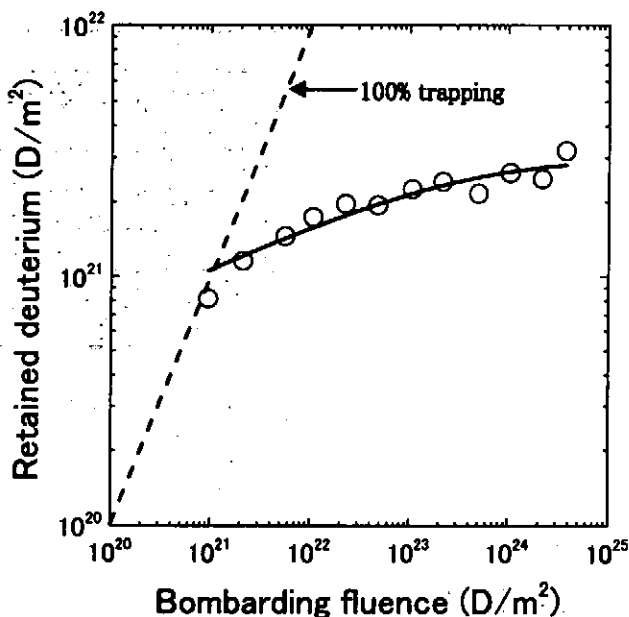
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は

$$y = A_1 \tanh(x / A_2)^p \quad \begin{cases} A_1=2.948E21 \\ A_2=1.5085E23 \end{cases} \quad p=0.19387$$

(適用照射量範囲 : 1x10²¹D/m²~3x10²⁴D/m²)

5. コメント

TDS測定の結果、500K~600K付近に強い放出ピークがあり、それから900K程度までは広がりをもった放出スペクトルを示す。SEM観察も行なわれており、1x10²⁵D/m²照射した試料では際立った表面形状の変化が見られ、10μm程度の穴が密集して形成された。



x(D/m ²)	y(D/m ²)
9.5E+20	8.1E+20
2.1E+21	1.2E+21
5.6E+21	1.5E+21
1.1E+22	1.7E+21
2.2E+22	2.0E+21
4.8E+22	1.9E+21
1.1E+23	2.2E+21
2.2E+23	2.4E+21
5.0E+23	2.2E+21
1.0E+24	2.6E+21
2.2E+24	2.5E+21
3.8E+24	3.2E+21

1. 出典

A. Sagara et al., J. Nucl. Mater. 220-222 (1995) 627

2. 問い合わせ先 (e-mailアドレス) : sagara@LHD.nifs.ac.jp

3. 測定方法・試料

- 3keV D₂⁺ (1.5keV D⁺) → 等方性黒鉛
- 照射強度: 不明
- 照射温度: 303K
- ERD法による試料中の重水素の直接測定(1.5MeV-He⁺を使用)

4. フィッティング結果

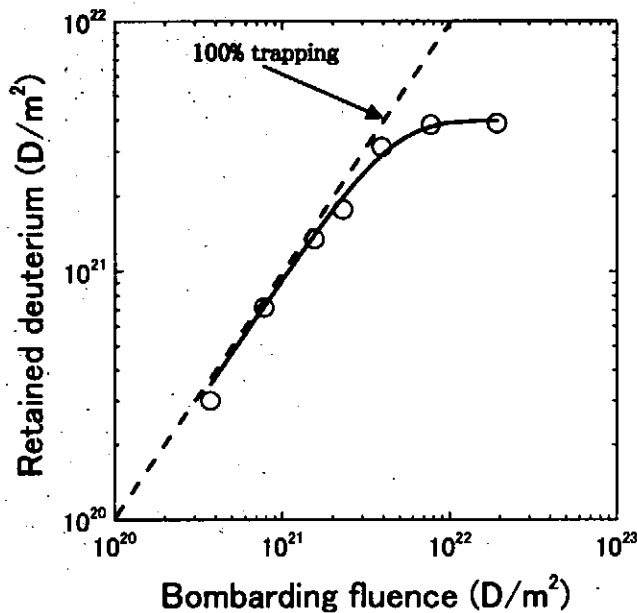
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は

$$y = A_1 \tanh(x / A_2) \quad \begin{cases} A_1 = 3.9647E21 \\ A_2 = 4.1928E21 \end{cases}$$

(適用照射量範囲 : 4x10²⁰D/m² ~ 2x10²²D/m²)

5. コメント

ERDによる重水素の深さ分布も測定しており、重水素は試料表面から20nm付近をピークとして200nm程度まで分布している。



x(D/m ²)	y(D/m ²)
3.7E+20	3.0E+20
7.7E+20	7.1E+20
1.5E+21	1.3E+21
2.3E+21	1.8E+21
3.9E+21	3.1E+21
7.7E+21	3.8E+21
1.9E+22	3.9E+21

1. 出典

J. W. Davis et al., J. Nucl. Mater. 176&177 (1990) 992

2. 問い合わせ先 (住所) : University of Toronto Institute for Aerospace Studies, Fusion Research Group, 4925 Dufferin Street, North York, Ontario, Canada M3H 5T6

3. 測定方法・試料

- 1keV H⁺ → 熱分解炭素 (HPG99, Union carbide)
- 照射強度: 1.3x10²⁰H/m²s, 照射温度: 400K
- TDS法を用いた照射後の水素放出スペクトルにより測定 (昇温速度30~100K/sec)

4. フィッティング結果

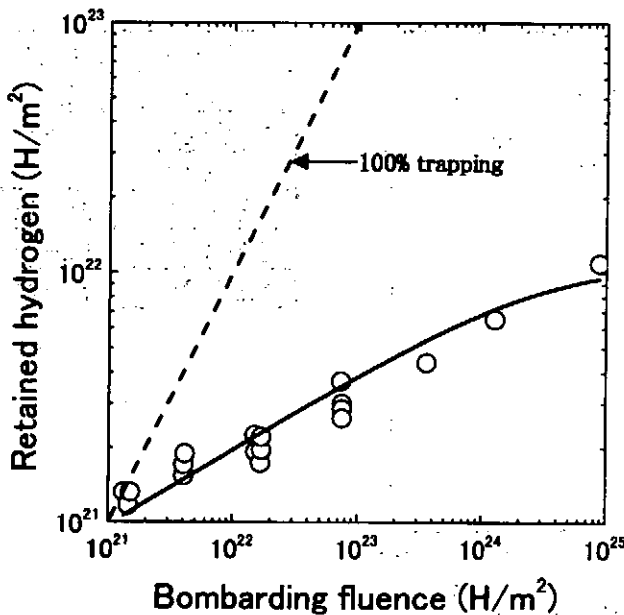
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は

$$y = A_1 \tanh(x/A_2)^p \quad \begin{cases} A_1=1.0422E22 \\ A_2=2.2207E24 \end{cases} \quad p=0.30753$$

(適用照射量範囲: 1x10²¹H/m²~1x10²⁵H/m²)

5. コメント

照射直後(1秒後)に同一チャンバー内でTDS測定をしているため、試料内を拡散中の水素(モバイルな水素)の影響も現れている。照射強度による影響も実験しており、1.0x10²⁰H/m²s~1.3x10²⁰H/m²sの範囲で大きな違いはなかった。



x(H/m ²)	y(H/m ²)
1.3E+21	1.3E+21
1.5E+21	1.2E+21
1.5E+21	1.3E+21
4.0E+21	1.5E+21
4.0E+21	1.7E+21
4.1E+21	1.9E+21
1.5E+22	2.2E+21
1.5E+22	1.9E+21
1.7E+22	1.7E+21
1.7E+22	2.0E+21
1.7E+22	2.2E+21
7.4E+22	3.7E+21
7.5E+22	3.0E+21
7.5E+22	2.9E+21
7.5E+22	2.6E+21
3.6E+23	4.4E+21
1.3E+24	6.5E+21
8.8E+24	1.1E+22

1. 出典

J. W. Davis et al., J. Nucl. Mater. 176&177 (1990) 992

2. 問い合わせ先 (住所) : University of Toronto Institute for Aerospace Studies, Fusion Research Group, 4925 Dufferin Street, North York, Ontario, Canada M3H 5T6

3. 測定方法・試料

- 1keV H⁺ → 熱分解炭素 (HPG99, Union carbide)
- 照射強度: 1.3x10²⁰H/m²s, 照射温度: 600K
- TDS法を用いた照射後の水素放出スペクトルにより測定 (昇温速度30~100K/sec)

4. フィッティング結果

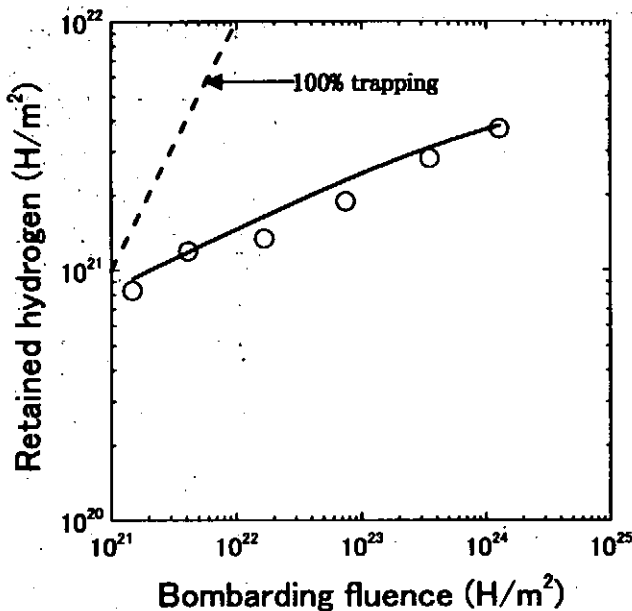
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は

$$y = A_1 \tanh(x / A_2)^p \quad \begin{cases} A_1 = 5E21 \\ A_2 = 1.2741E24 \end{cases} \quad p = 0.24805$$

(適用照射量範囲 : 1x10²¹H/m²~2x10²⁴H/m²)

5. コメント

照射直後 (1秒後) に同一チャンバー内でTDS測定をしているため、試料内を拡散中の水素 (モバイルな水素) の影響も現れている。照射強度による影響も実験しており、1.0x10²⁰H/m²s~1.3x10²⁰H/m²sの範囲で大きな違いはなかった。



x(H/m ²)	y(H/m ²)
1.5E+21	8.3E+20
4.1E+21	1.2E+21
1.7E+22	1.3E+21
7.5E+22	1.9E+21
3.5E+23	2.8E+21
1.3E+24	3.7E+21

1. 出典

J. W. Davis et al., J. Nucl. Mater. 176&177 (1990) 992

2. 問い合わせ先 (住所) : University of Toronto Institute for Aerospace Studies, Fusion Research Group, 4925 Dufferin Street, North York, Ontario, Canada M3H 5T6

3. 測定方法・試料

- 1keV H⁺ → 熱分解炭素 (HPG99, Union carbide)
- 照射強度: 1.3x10²⁰H/m²s, 照射温度: 900K
- TDS法を用いた照射後の水素放出スペクトルにより測定 (昇温速度30~100K/sec)
- 照射直後に同一チャンバー内で昇温脱離測定をしている。

4. フィッティング結果

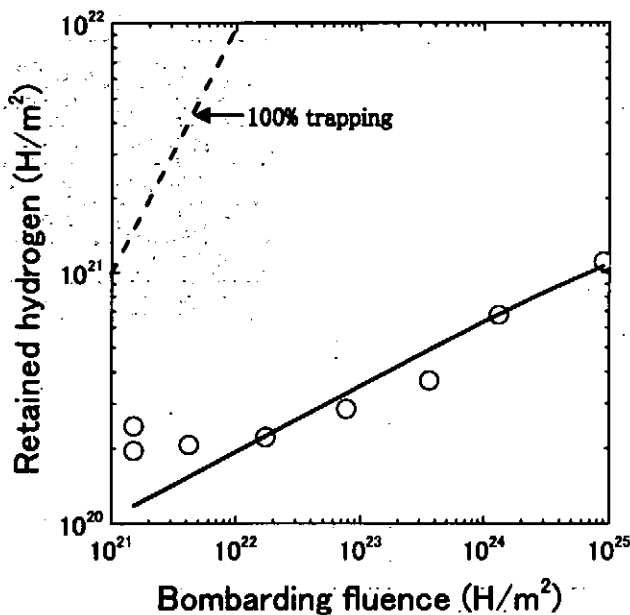
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は

$$y = A_1 \tanh(x / A_2)^p \quad \begin{cases} A_1 = 2.1661E21 \\ A_2 = 9.4808E25 \end{cases} \quad p = 0.26365$$

(適用照射量範囲 : 1x10²¹H/m²~1x10²⁵H/m²)

5. コメント

照射直後 (1秒後) に同一チャンバー内でTDS測定をしているため、試料内を拡散中の水素 (モバイルな水素) の影響も現れている。照射強度による影響も実験しており、1.0x10²⁰H/m²s~1.3x10²⁰H/m²sの範囲で大きな違いはなかった。



x(D/m ²)	y(D/m ²)
1.5E+21	2.4E+20
1.5E+21	2.0E+20
4.2E+21	2.1E+20
1.7E+22	2.2E+20
7.7E+22	2.9E+20
3.6E+23	3.7E+20
1.3E+24	6.7E+20
9.0E+24	1.1E+21

1. 出典

R.A. Langley, et al., J. Nucl. Mater. 76-77 (1978) 313

2. 問い合わせ先 (e-mailアドレス) : Sandia Laboratories, Albuquerque, N.M. 87115, USA

3. 測定方法・試料

•8keV D → PyC(HPG Union Carbide) (100°C以下)

•Fluxは不明

•吸蔵量は2.5MeV水素を用いたbackscatteringにより深さ分布を測定

4. 結果

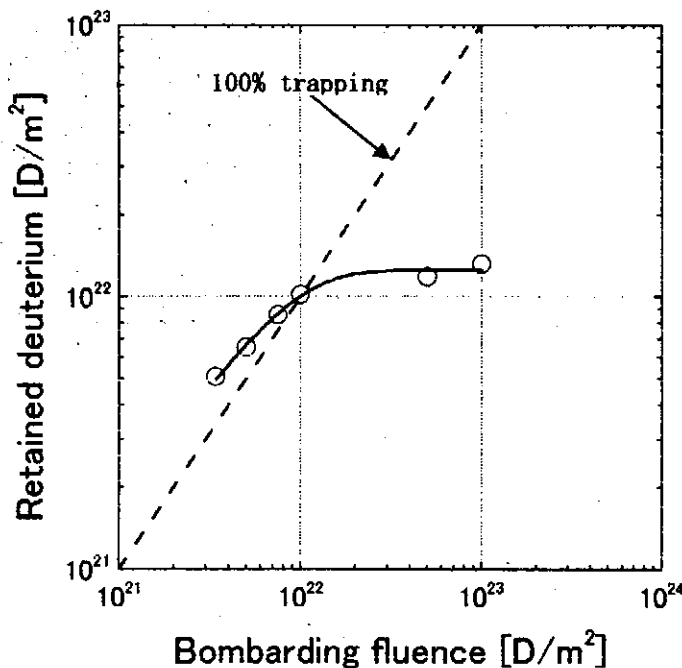
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は

$$y = A_1 \tanh(x / A_2)^p \quad \begin{cases} A_1 = 1.2494E22 \\ A_2 = 8.9763E21 \end{cases} \quad p = 0.89886$$

(適用照射量範囲 : $3 \times 10^{21} \text{D/m}^2 \sim 1 \times 10^{23} \text{D/m}^2$)

5. コメント

$1 \times 10^{22} [\text{atoms/m}^2]$ 以降の緩やかな増加は照射により発生した新しいトラップサイトへの拡散によるものである。



x(D/m ²)	y(D/m ²)
3.4E+21	5.1E+21
5.0E+21	6.5E+21
7.5E+21	8.5E+21
1.0E+22	1.0E+22
5.0E+22	1.2E+22
1.0E+23	1.3E+22

1. 出典

R.A. Causey and R.L. Wilson, J. Nucl. Mater. 138 (1986) 57

2. 問い合わせ先 (e-mailアドレス) : Sandia National Laboratories, Livermore, CA, USA

3. 測定方法・試料

- 100eV D_3^+ → Papyex (low density (1.1g/cm³) and high porosity)
- D:T=99:1のプラズマを使用
- 照射温度 : 673 K
- 照射Flux : $1 \times 10^{20} - 1 \times 10^{21}$ [D/m²]
- 測定はNuclear Reaction Analysis ($D(^3He, p)^4He$) (測定範囲 : ~1mm (試料厚さ: 0.15mm))

4. 結果

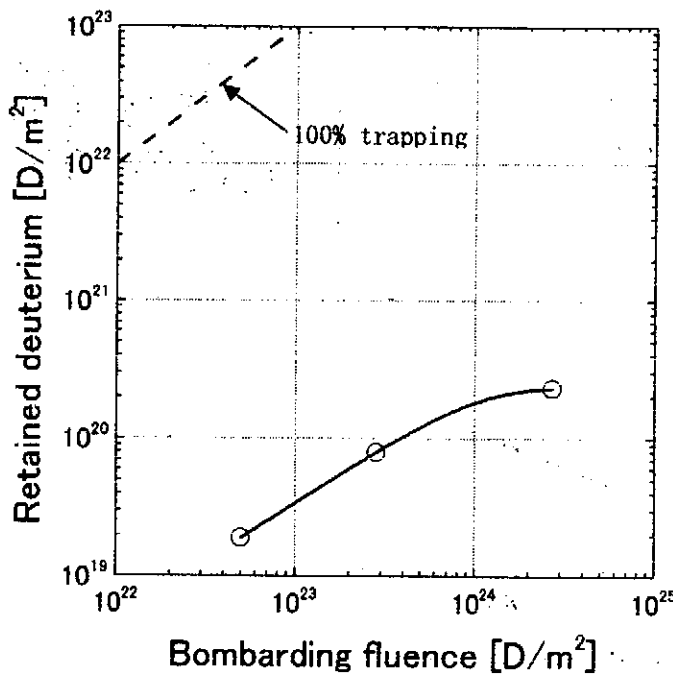
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は

$$y = A_1 \tanh(x / A_2)^p \quad \begin{cases} A_1 = 2.3422E20 \\ A_2 = 9.706E23 \end{cases} \quad p = 0.85064$$

(適用照射量範囲 : $5 \times 10^{22} D/m^2 \sim 3 \times 10^{24} D/m^2$)

5. コメント

奥への拡散の効果が大きい場合、Nuclear Reaction Analysisのような深さ分布測定結果からは水素吸蔵量を評価できない。



x(D/m ²)	y(D/m ²)
5.0E+22	1.9E+19
2.8E+23	7.9E+19
2.7E+24	2.3E+20

1. 出典

R.A. Causey and R.L. Wilson, J. Nucl. Mater. 138 (1986) 57

2. 問い合わせ先 (e-mailアドレス) : Sandia National Laboratories, Livermore, CA, USA

3. 測定方法・試料

- 100eV D_3^+ → Papyex (low density (1.1 g/cm³) and high porosity)
- D:T=99:1のプラズマを使用
- 照射温度 : 673 K
- 照射Flux : $1 \times 10^{20} - 1 \times 10^{21}$ [D/m²]
- 測定はDissolution Tritium Counting (トリチウムの崩壊を測定)

4. 結果

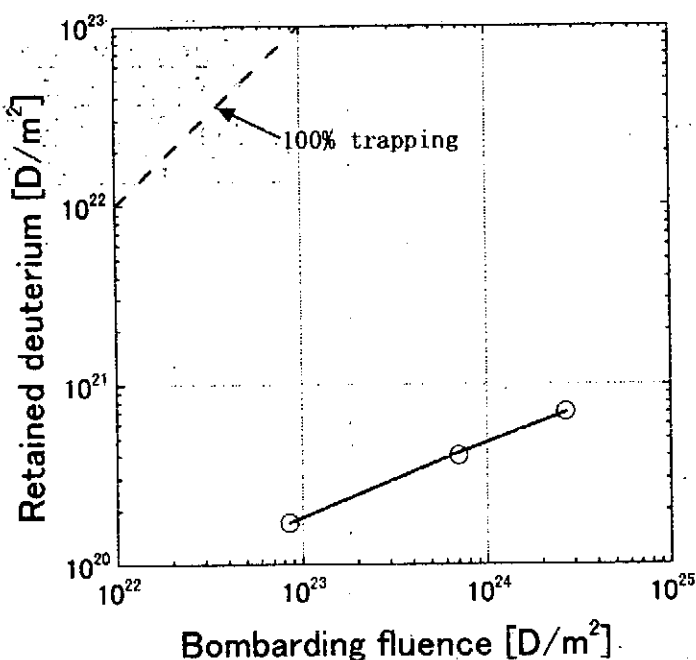
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は

$$y = A_1 \tanh(x / A_2)^p \quad \text{収束せず} \quad \left[\begin{array}{l} A_1 = 1.3174E21 \\ A_2 = 9.1603E24 \end{array} \right. \quad p = 0.89886$$

(適用照射量範囲 : $9 \times 10^{22} \text{D/m}^2 \sim 3 \times 10^{24} \text{D/m}^2$)

5. コメント

奥への拡散の効果が大きい場合、Nuclear Reaction Analysisのような深さ分布測定結果からは水素吸蔵量を評価できない。



x(D/m ²)	y(D/m ²)
8.5E+22	1.7E+20
7.0E+23	4.0E+20
2.7E+24	7.0E+20

1. 出典

T. Tanabe, et al., J. Nucl. Mater. 179-181 (1991) 231

2. 問い合わせ先 (e-mailアドレス) : tanabe@cirse.nagoya-u.ac.jp

3. 測定方法・試料

•D⁰ (1eV以下) → 等方性黒鉛(Ibiden : ETP-10,T-6P) (原子状水素生成はタングステンフィラメントによる)

•照射Flux : 6x10²¹ [D/m²], 照射温度 : 460 K

•照射中における急昇温脱離によって、総水素吸蔵量を測定

4. 結果

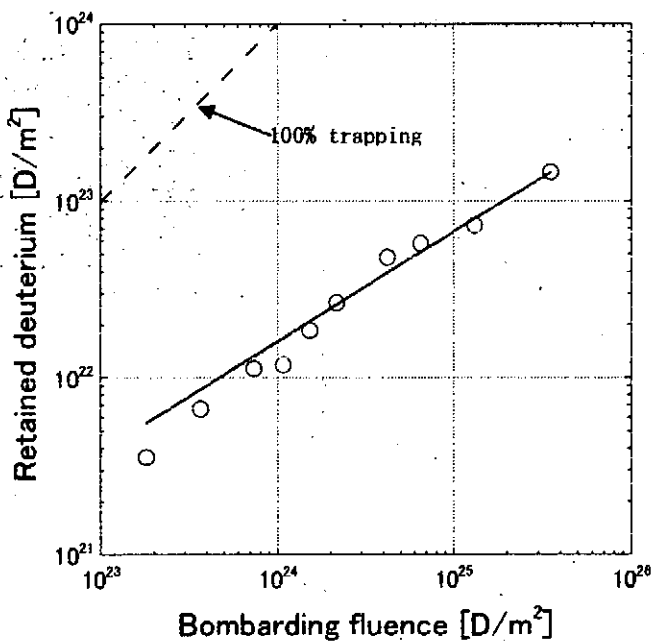
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は

$$y = A_1 \tanh(x / A_2)^p \quad \begin{cases} A_1=5.7871E23 \\ A_2=3.1443E26 \end{cases} \quad p=0.6228$$

(適用照射量範囲 : 2x10²³D/m²~4x10²⁵D/m²)

5. コメント

吸蔵量の増加は奥への拡散のみに起因する。



x(D/m ²)	y(D/m ²)
1.8E+23	3.6E+21
3.7E+23	6.7E+21
7.4E+23	1.1E+22
1.1E+24	1.2E+22
1.5E+24	1.8E+22
2.2E+24	2.7E+22
4.2E+24	4.8E+22
6.5E+24	5.7E+22
1.3E+25	7.3E+22
3.5E+25	1.5E+23

1. 出典

T. Tanabe, et al., J. Nucl. Mater. 179-181 (1991) 231

2. 問い合わせ先 (e-mailアドレス) : tanabe@cirse.nagoya-u.ac.jp

3. 測定方法・試料

•D⁰ (1eV以下) → 等方性黒鉛(Ibiden : ETP-10,T-6P) (原子状水素生成はタングステンフィラメントによる)

•照射Flux : 6x10²¹ [D/m²], 照射温度 : 690 K

•照射中における急昇温脱離によって、総水素吸蔵量を測定

4. 結果

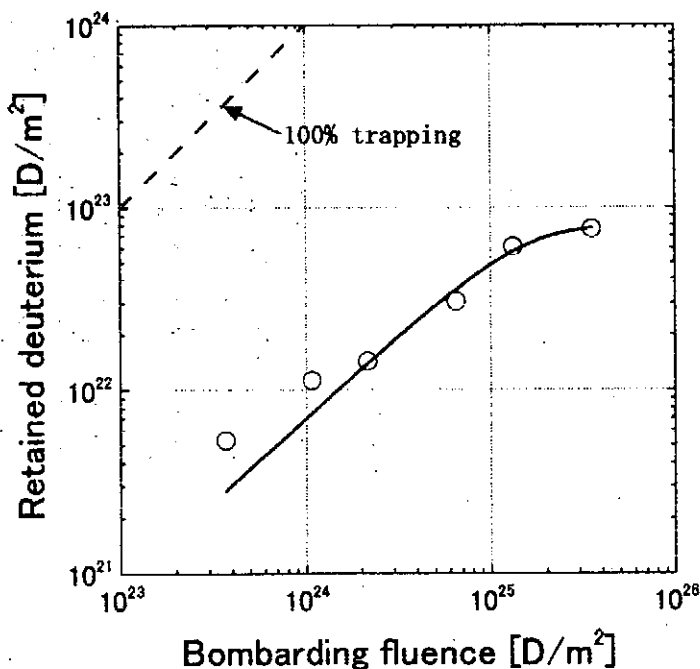
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は

$$y = A_1 \tanh(x / A_2)^p \quad \begin{cases} A_1 = 7.8165E22 \\ A_2 = 1.4316E25 \end{cases} \quad p = 0.90661$$

(適用照射量範囲 : 4x10²³D/m²~4x10²⁵D/m²)

5. コメント

吸蔵量の増加は奥への拡散のみに起因する。



x(D/m ²)	y(D/m ²)
3.7E+23	5.3E+21
1.1E+24	1.1E+22
2.2E+24	1.4E+22
6.5E+24	3.0E+22
1.3E+25	6.1E+22
3.5E+25	7.6E+22

1. 出典

T. Tanabe, et al., J. Nucl. Mater. 179-181 (1991) 231

2. 問い合わせ先 (e-mailアドレス) : tanabe@cirse.nagoya-u.ac.jp

3. 測定方法・試料

•D⁰ (1eV以下) → 等方性黒鉛(Ibiden : ETP-10,T-6P) (原子状水素生成はタングステンフィラメントによる)

•照射Flux : 6x10²¹ [D/m²], 照射温度 : 893 K

•照射中における急昇温脱離によって、総水素吸蔵量を測定

4. 結果

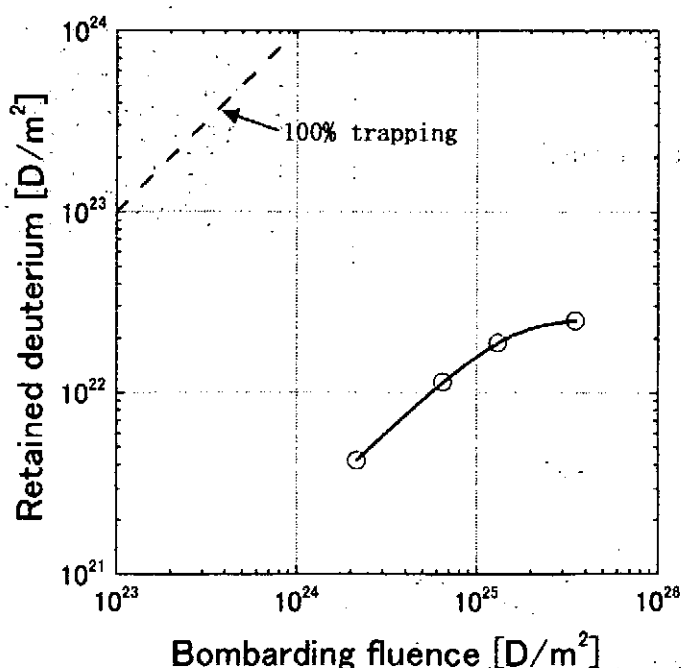
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は

$$y = A_1 \tanh(x / A_2)^p \quad \begin{cases} A_1 = 2.5326E22 \\ A_2 = 1.3951E25 \end{cases} \quad p = 0.95882$$

(適用照射量範囲 : 2x10²⁴D/m²~4x10²⁵D/m²)

5. コメント

吸蔵量の増加は奥への拡散のみに起因する。



x(D/m ²)	y(D/m ²)
2.2E+24	4.2E+21
6.5E+24	1.1E+22
1.3E+25	1.9E+22
3.5E+25	2.5E+22

1. 山典

T. Tanabe, et al., J. Nucl. Mater. 179-181 (1991) 231

2. 問い合わせ先 (e-mailアドレス) : tanabe@cirse.nagoya-u.ac.jp

3. 測定方法・試料

- D⁰ (1eV以下) → 等方性黒鉛(Ibiden : ETP-10,T-6P) (原子状水素生成はタングステンフィラメントによる)
- 照射Flux : 6x10²¹ [D/m²], 照射温度 : 1063 K
- 照射中における急昇温脱離によって、総水素吸蔵量を測定

4. 結果

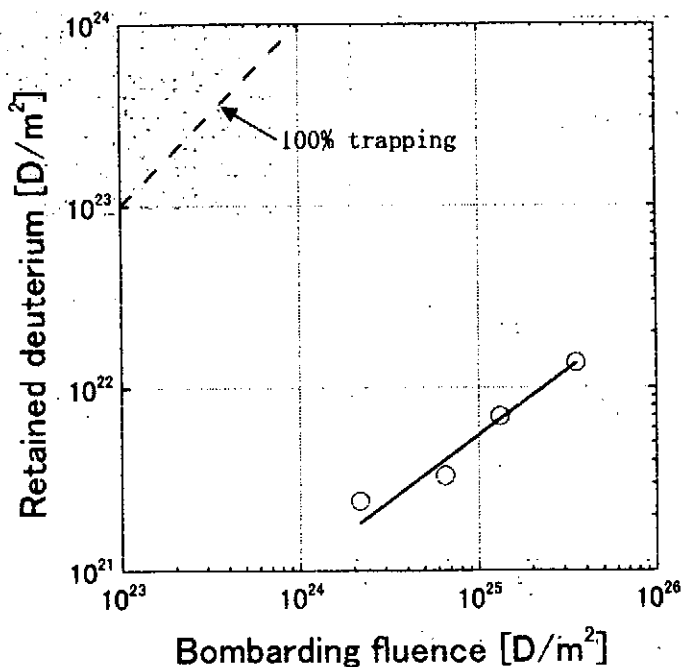
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は

$$y = A_1 \tanh(x / A_2)^p \quad \text{収束せず} \quad \left(\begin{array}{l} A_1=1.7115E23 \\ A_2=1.1769E27 \end{array} \right) \quad p=0.7218$$

(適用照射量範囲 : 2x10²⁴D/m²~4x10²⁵D/m²)

5. コメント

吸蔵量の増加は奥への拡散のみに起因する。



x(D/m ²)	y(D/m ²)
2.2E+24	2.4E+21
6.5E+24	3.3E+21
1.3E+25	6.9E+21
3.5E+25	1.4E+22

1. 出典

M. Braun and B. Emmoth, J. Nucl. Mater. 128 & 129 (1984) 657-663

2. 問い合わせ先 (e-mailアドレス): Research Institute of Physics, S-104 05 Stockholm, Sweden

3. 測定方法・試料

- 2keV D⁺ → Papyex (Density: 1.1 g/cm³)
- 照射強度: 1x10¹⁸D/m²s, 照射温度: 298K
- Nuclear Reaction Analysis(D(³He,p)⁴He)(測定範囲: $\approx 1\text{mm}$)

4. 結果

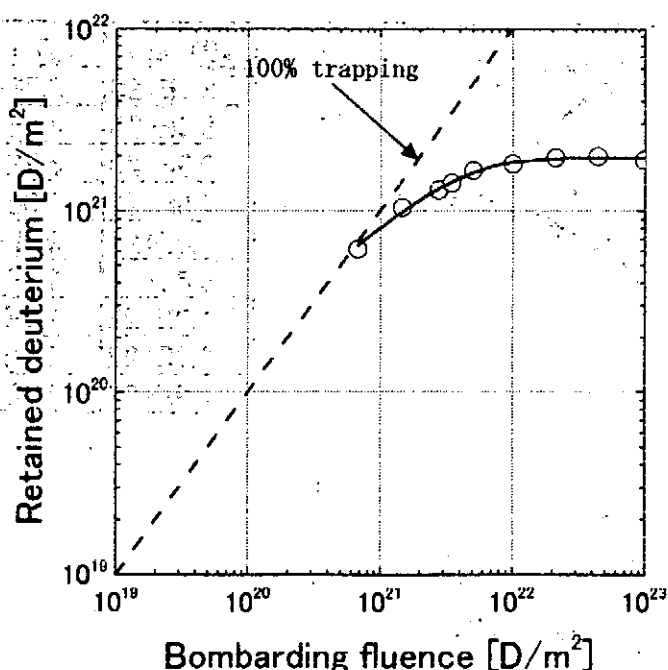
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は

$$y = A_1 \tanh(x / A_2)^p \quad \begin{cases} A_1 = 1.9428E21 \\ A_2 = 3.7203E21 \end{cases} \quad p = 0.62286$$

(適用照射量範囲: 7x10²⁰D/m²~1x10²³D/m²)

5. コメント

NRA測定のため試料全体の吸蔵量を測ってはいない。



x(D/m ²)	y(D/m ²)
6.8E+20	6.1E+20
1.5E+21	1.0E+21
2.8E+21	1.3E+21
3.5E+21	1.4E+21
5.1E+21	1.7E+21
1.0E+22	1.8E+21
2.1E+22	2.0E+21
4.4E+22	2.0E+21
9.9E+22	1.9E+21

1. 出典

M. Braun and B. Emmoth, J. Nucl. Mater. 128 & 129 (1984) 657-663

2. 問い合わせ先 (e-mailアドレス) : Research Institute of Physics, S-104 05 Stockholm, Sweden

3. 測定方法・試料

•2keV D⁺ → Papyex (Density: 1.1 g/cm³)

•照射強度 : 1x10¹⁸D/m²s, 照射温度 : 623K

•Nuclear Reaction Analysis(D(³He,p)⁴He)(測定範囲 : ~1mm)

4. 結果

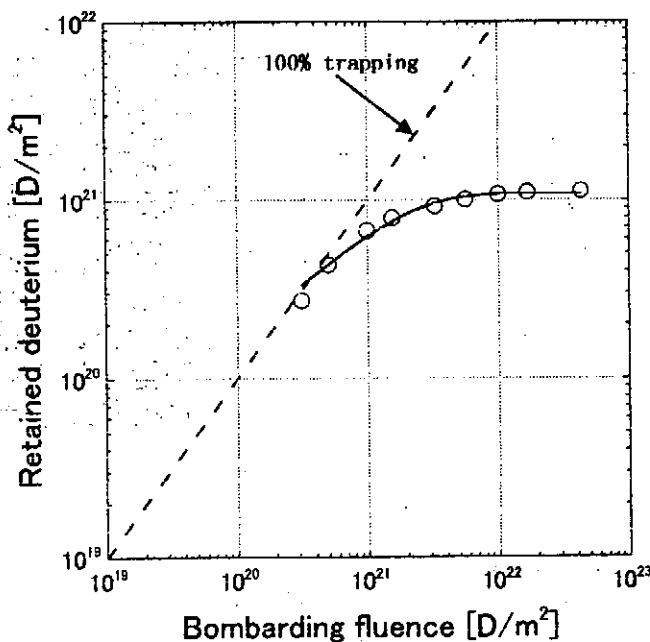
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は

$$y = A_1 \tanh(x / A_2)^p \quad \begin{cases} A_1=1.0848E21 \\ A_2=1.9338E21 \end{cases} \quad p=0.63337$$

(適用照射量範囲 : 3x10²⁰D/m²~4x10²²D/m²)

5. コメント

NRA測定のため試料全体の吸蔵量を測ってはいない。



x(D/m ²)	y(D/m ²)
3.1E+20	2.7E+20
5.0E+20	4.3E+20
9.9E+20	6.7E+20
1.5E+21	7.9E+20
3.3E+21	9.2E+20
5.6E+21	1.0E+21
1.0E+22	1.1E+21
1.7E+22	1.1E+21
4.3E+22	1.1E+21

1. 出典

M. Braun and B. Emmoth, J. Nucl. Mater. 128 & 129 (1984) 657-663

2. 問い合わせ先 (e-mailアドレス) : Research Institute of Physics, S-104 05 Stockholm, Sweden

3. 測定方法・試料

- 2keV D⁺ → Papyex (Density: 1.1 g/cm³)
- 照射強度 : 1x10¹⁸D/m²s, 照射温度 : 973K
- Nuclear Reaction Analysis(D(³He,p)⁴He)(測定範囲 : ~1mm)

4. 結果

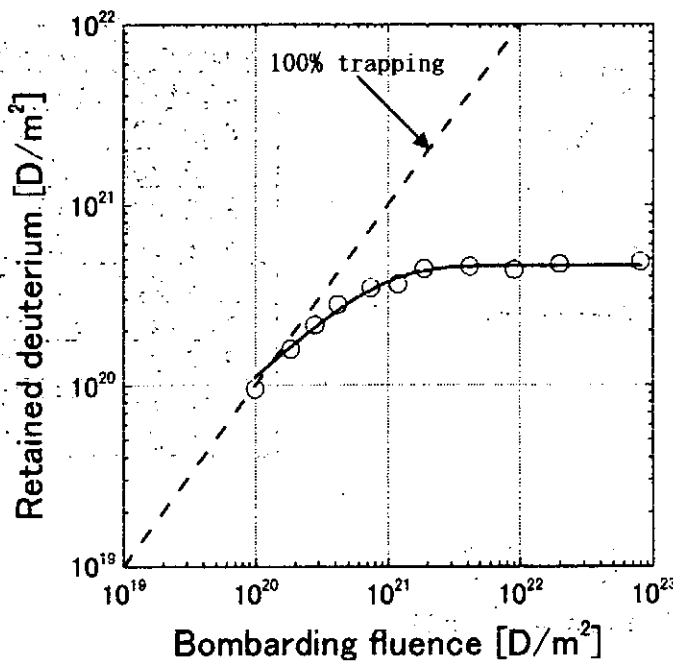
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は

$$y = A_1 \tanh(x/A_2)^p \quad \begin{cases} A_1 = 4.5785E20 \\ A_2 = 8.2142E20 \end{cases} \quad p = 0.66328$$

(適用照射量範囲 : 1x10²⁰D/m²~8x10²²D/m²)

5. コメント

NRA測定のため試料全体の吸蔵量を測ってはいない。



x(D/m ²)	y(D/m ²)
1.0E+20	9.5E+19
1.9E+20	1.6E+20
2.8E+20	2.1E+20
4.2E+20	2.8E+20
7.5E+20	3.5E+20
1.2E+21	3.6E+20
1.9E+21	4.4E+20
4.2E+21	4.5E+20
9.1E+21	4.3E+20
2.0E+22	4.7E+20
8.0E+22	4.8E+20

1. 出典

M. Braun and B. Emmoth, J. Nucl. Mater. 128 & 129 (1984) 657-663

2. 問い合わせ先 (e-mailアドレス) : Research Institute of Physics, S-104 05 Stockholm, Sweden

3. 測定方法・試料

- 2keV D⁺ → Papyex (Density: 1.1 g/cm³)
- 照射強度 : 1x10¹⁸D/m²s, 照射温度 : 1123K
- Nuclear Reaction Analysis(D(³He,p)⁴He)(測定範囲 : ~1mm)

4. 結果

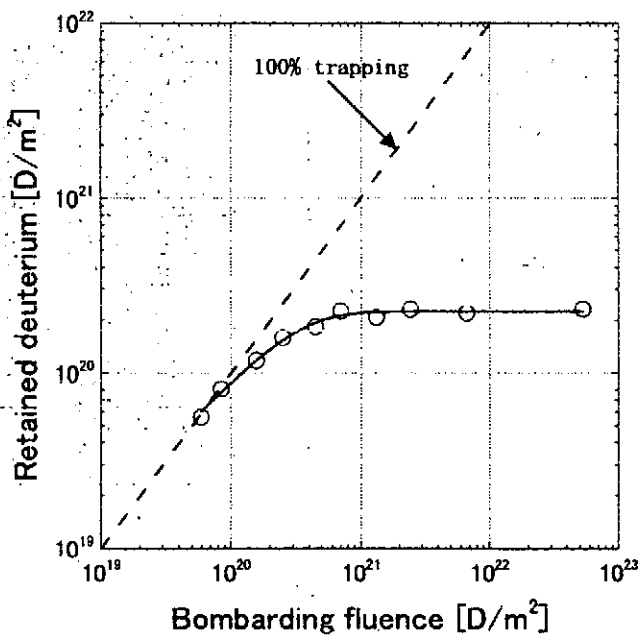
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は

$$y = A_1 \tanh(x / A_2)^p \quad \begin{cases} A_1 = 2.2436E20 \\ A_2 = 3.1231E20 \end{cases} \quad p = 0.77479$$

(適用照射量範囲 : 6x10¹⁹D/m²~5x10²²D/m²)

5. コメント

NRA測定のため試料全体の吸蔵量を測ってはいない。



x(D/m ²)	y(D/m ²)
5.9E+19	5.6E+19
8.4E+19	8.1E+19
1.6E+20	1.2E+20
2.5E+20	1.6E+20
4.5E+20	1.8E+20
7.0E+20	2.3E+20
1.3E+21	2.1E+20
2.4E+21	2.3E+20
6.6E+21	2.2E+20
5.3E+22	2.3E+20

1. 出典

M. Braun and B. Emmoth, J. Nucl. Mater. 128 & 129 (1984) 657-663

2. 問い合わせ先 (e-mailアドレス) : Research Institute of Physics, S-104 05-Stockholm, Sweden

3. 測定方法・試料

- 2keV D⁺ → Papyex (Density: 1.1 g/cm³)
- 照射強度 : 1x10¹⁸D/m²s, 照射温度 : 1273K
- Nuclear Reaction Analysis(D(³He,p)⁴He)(測定範囲 : ~1mm)

4. 結果

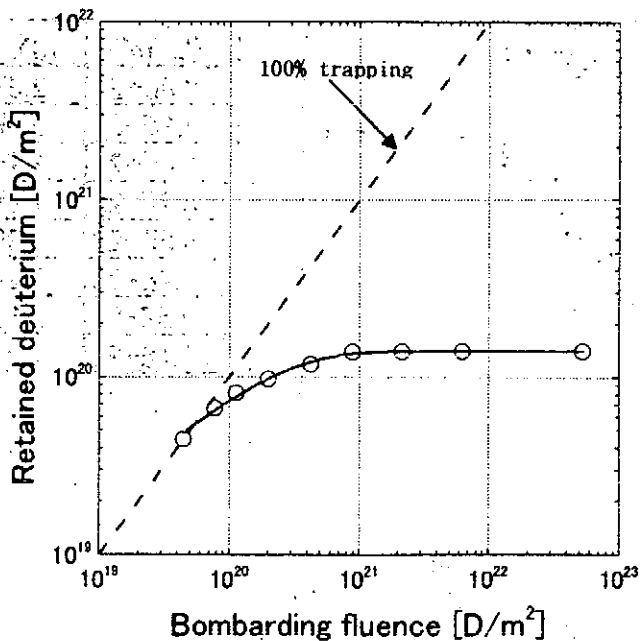
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は

$$y = A_1 \tanh(x / A_2)^p \quad \begin{cases} A_1 = 1.4E20 \\ A_2 = 2.6046E20 \end{cases} \quad p = 0.57599$$

(適用照射量範囲 : 5x10¹⁹D/m²~5x10²²D/m²)

5. コメント

NRA測定のため試料全体の吸蔵量を測ってはいない。



x(D/m ²)	y(D/m ²)
4.5E+19	4.5E+19
7.8E+19	6.6E+19
1.1E+20	8.1E+19
2.0E+20	9.7E+19
4.3E+20	1.2E+20
8.9E+20	1.4E+20
2.2E+21	1.4E+20
6.3E+21	1.4E+20
5.3E+22	1.4E+20

1. 出典

M. Braun and B. Emmoth, J. Nucl. Mater. 128 & 129 (1984) 657-663

2. 問い合わせ先 (e-mailアドレス) : Research Institute of Physics, S-104 05 Stockholm, Sweden

3. 測定方法・試料

- 20keV D⁺ → Papyex (Density: 1.1 g/cm³)
- 照射強度 : 1x10¹⁸D/m²s, 照射温度 : 298K
- Nuclear Reaction Analysis(D(³He,p)⁴He)(測定範囲 : ~1mm)

4. 結果

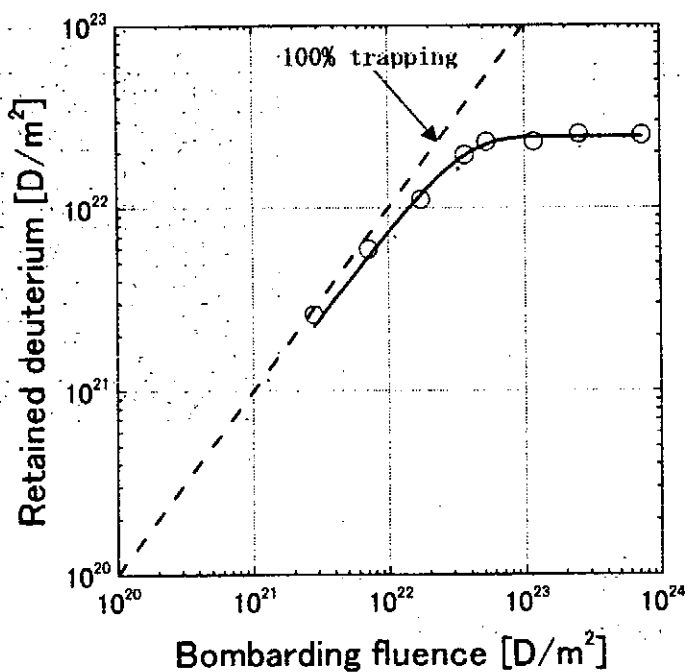
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は

$$y = A_1 \tanh(x / A_2)^p \quad \begin{cases} A_1 = 2.4463E22 \\ A_2 = 3.4061E22 \end{cases} \quad p = 0.95491$$

(適用照射量範囲 : 3x10²¹D/m²~7x10²³D/m²)

5. コメント

NRA測定のため試料全体の吸蔵量を測ってはいない。



x(D/m ²)	y(D/m ²)
2.8E+21	2.6E+21
7.1E+21	5.9E+21
1.8E+22	1.1E+22
3.7E+22	1.9E+22
5.3E+22	2.3E+22
1.2E+23	2.3E+22
2.5E+23	2.5E+22
7.4E+23	2.5E+22

1. 出典

M. Braun and B. Emmoth, J. Nucl. Mater. 128 & 129 (1984) 657-663

2. 問い合わせ先 (e-mailアドレス) : Research Institute of Physics, S-104 05 Stockholm, Sweden

3. 測定方法・試料

•20keV D⁺ → Papyex (Density: 1.1 g/cm³)

•照射強度 : 1x10¹⁸D/m²s, 照射温度 : 623K

•Nuclear Reaction Analysis(D(³He,p)⁴He)(測定範囲 : ~1mm)

4. 結果

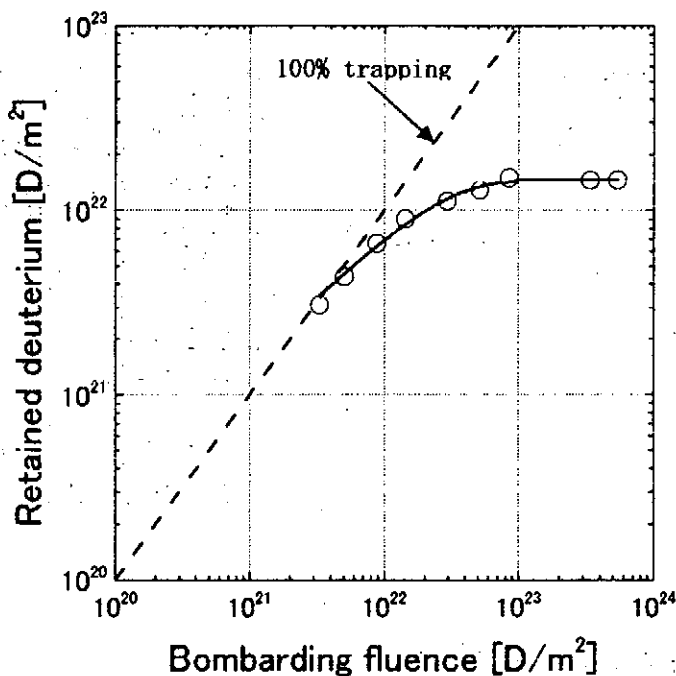
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は

$$y = A_1 \tanh(x / A_2)^p \quad \begin{cases} A_1 = 1.4749E22 \\ A_2 = 2.714E22 \end{cases} \quad p = 0.68413$$

(適用照射量範囲 : 3x10²¹D/m²~5x10²³D/m²)

5. コメント

NRA測定のため試料全体の吸蔵量を測ってはいない。



x(D/m ²)	y(D/m ²)
3.3E+21	3.1E+21
5.1E+21	4.4E+21
8.9E+21	6.6E+21
1.4E+22	9.0E+21
3.0E+22	1.1E+22
5.2E+22	1.3E+22
8.6E+22	1.5E+22
3.4E+23	1.5E+22
5.4E+23	1.5E+22

1. 出典

M. Braun and B. Emmoth, J. Nucl. Mater. 128 & 129 (1984) 657-663

2. 問い合わせ先 (e-mailアドレス): Research-Institute of Physics, S-104 05 Stockholm, Sweden

3. 測定方法・試料

•20keV D⁺ → Papyex (Density: 1.1 g/cm³)

•照射強度: 1x10¹⁸D/m²s, 照射温度: 973K

•Nuclear Reaction Analysis(D(³He,p)⁴He)(測定範囲: ~1mm)

4. 結果

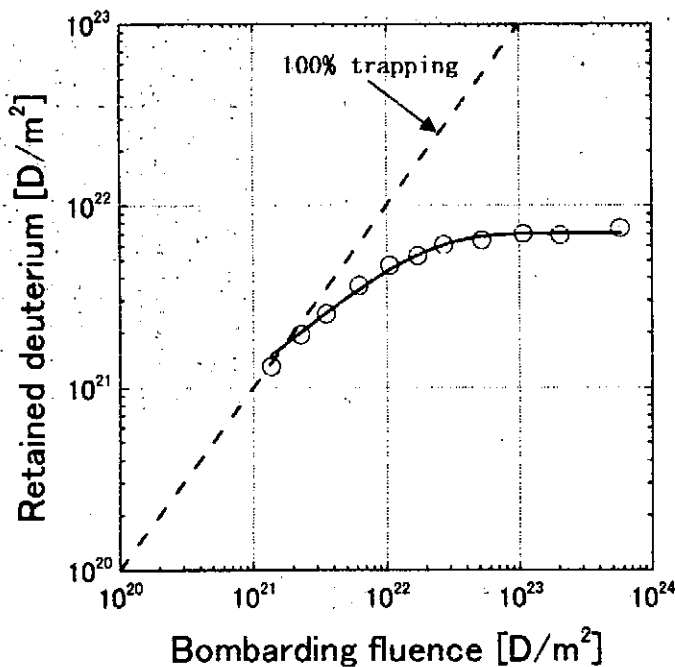
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は

$$y = A_1 \tanh(x / A_2)^p \quad \begin{cases} A_1 = 7.0342E21 \\ A_2 = 1.7401E22 \end{cases} \quad p = 0.60038$$

(適用照射量範囲: 1x10²¹D/m²~6x10²³D/m²)

5. コメント

NRA測定のため試料全体の吸蔵量を測ってはいない。



x(D/m ²)	y(D/m ²)
1.4E+21	1.3E+21
2.3E+21	1.9E+21
3.5E+21	2.5E+21
6.2E+21	3.6E+21
1.1E+22	4.7E+21
1.7E+22	5.3E+21
2.7E+22	6.1E+21
5.2E+22	6.4E+21
1.1E+23	7.0E+21
2.0E+23	6.8E+21
5.7E+23	7.5E+21

1. 出典

M. Braun and B. Emmoth, J. Nucl. Mater. 128 & 129 (1984) 657-663

2. 問い合わせ先 (e-mailアドレス) : Research Institute of Physics, S-104 05 Stockholm, Sweden

3. 測定方法・試料

- 20keV D⁺ → Papyex (Density: 1.1 g/cm³)
- 照射強度 : 1x10¹⁸D/m²s, 照射温度 : 1123K
- Nuclear Reaction Analysis(D(³He,p)⁴He)(測定範囲 : ~1mm)

4. 結果

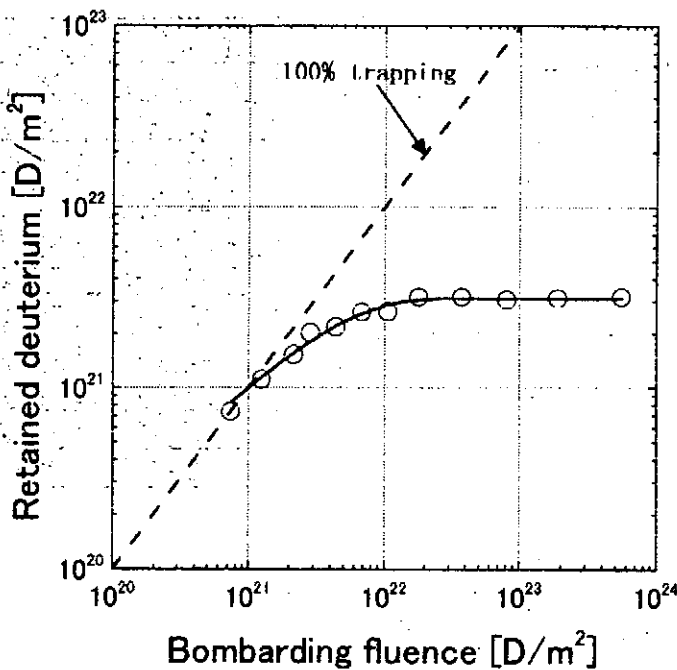
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は

$$y = A_1 \tanh(x / A_2)^p \quad \begin{cases} A_1 = 3.1272E21 \\ A_2 = 5.3879E21 \end{cases} \quad p = 0.65783$$

(適用照射量範囲 : 8x10²⁰D/m²~5x10²³D/m²)

5. コメント

NRA測定のため試料全体の吸蔵量を測ってはいない。



x(D/m ²)	y(D/m ²)
7.4E+20	7.4E+20
1.3E+21	1.1E+21
2.2E+21	1.5E+21
2.9E+21	2.0E+21
4.4E+21	2.2E+21
6.8E+21	2.6E+21
1.1E+22	2.6E+21
1.8E+22	3.2E+21
3.7E+22	3.2E+21
8.1E+22	3.1E+21
1.9E+23	3.1E+21
5.5E+23	3.2E+21

1. 出典

M. Braun and B. Emmoth, J. Nucl. Mater. 128 & 129 (1984),657-663

2. 問い合わせ先 (e-mailアドレス) : Research Institute of Physics, S-104 05 Stockholm, Sweden

3. 測定方法・試料

- 20keV D⁺ → Papyex (Density: 1.1 g/cm³)
- 照射強度 : 1×10¹⁸D/m²s, 照射温度 : 1273K
- Nuclear Reaction Analysis(D(³He,p)⁴He)(測定範囲 : ~1mm)

4. 結果

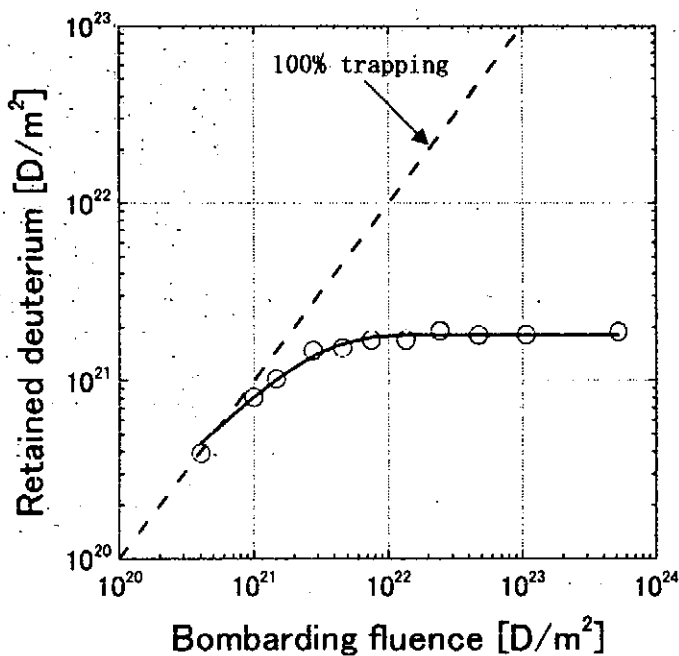
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は

$$y = A_1 \tanh(x / A_2)^p \quad \begin{cases} A_1 = 1.8076E21 \\ A_2 = 2.8299E21 \end{cases} \quad p = 0.70638$$

(適用照射量範囲 : 4×10²⁰D/m²~5×10²³D/m²)

5. コメント

NRA測定のため試料全体の吸蔵量を測ってはいない。



x(D/m ²)	y(D/m ²)
4.1E+20	3.9E+20
1.0E+21	8.0E+20
1.5E+21	1.0E+21
2.8E+21	1.5E+21
4.6E+21	1.5E+21
7.5E+21	1.7E+21
1.4E+22	1.7E+21
2.4E+22	1.9E+21
4.7E+22	1.8E+21
1.1E+23	1.8E+21
5.2E+23	1.9E+21

1. 出典

M. Braun and B. Emmoth, J. Nucl. Mater. 128 & 129 (1984) 657-663

2. 問い合わせ先 (e-mailアドレス) : Research Institute of Physics, S-104 05 Stockholm, Sweden

3. 測定方法・試料

- 5keV D⁺ → Papyex (Density: 1.1 g/cm³)
- 照射強度 : 1x10¹⁸D/m²s, 照射温度 : 298K
- Nuclear Reaction Analysis(D(³He,p)⁴He)(測定範囲 : ~1mm)

4. 結果

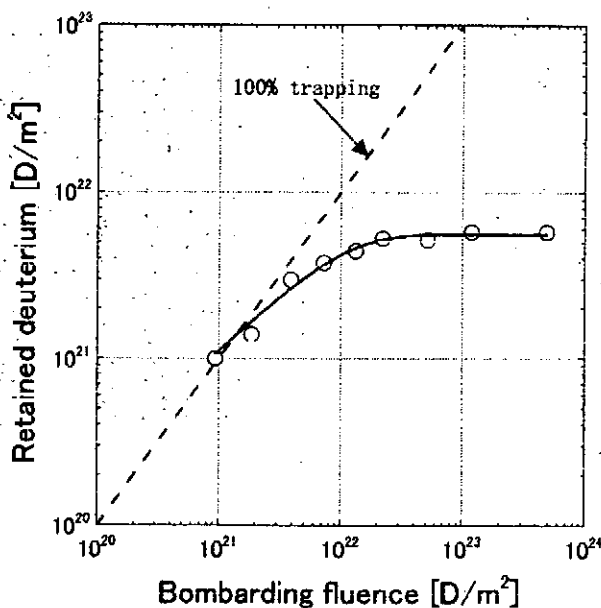
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は :

$$y = A_1 \tanh(x / A_2)^p \quad \begin{cases} A_1 = 5.5549E21 \\ A_2 = 1.0214E21 \end{cases} \quad p = 0.68789$$

(適用照射量範囲 : 1x10²¹D/m²~5x10²³D/m²)

5. コメント

NRA測定のため試料全体の吸蔵量を測ってはいない。



x(D/m ²)	y(D/m ²)
9.4E+20	1.0E+21
1.9E+21	1.4E+21
3.9E+21	3.0E+21
7.3E+21	3.8E+21
1.3E+22	4.4E+21
2.2E+22	5.2E+21
5.2E+22	5.2E+21
1.2E+23	5.8E+21
4.9E+23	5.8E+21

1. 出典

M. Braun and B. Emmoth, J. Nucl. Mater. 128 & 129 (1984) 657-663

2. 問い合わせ先 (e-mailアドレス) : Research Institute of Physics, S-104 05 Stockholm, Sweden

3. 測定方法・試料

• 10keV D⁺ → Papyex (Density: 1.1 g/cm³)

• 照射強度 : 1x10¹⁸D/m²s, 照射温度 : 298K

• Nuclear Reaction Analysis(D(³He,p)⁴He)(測定範囲 : ~1mm)

4. 結果

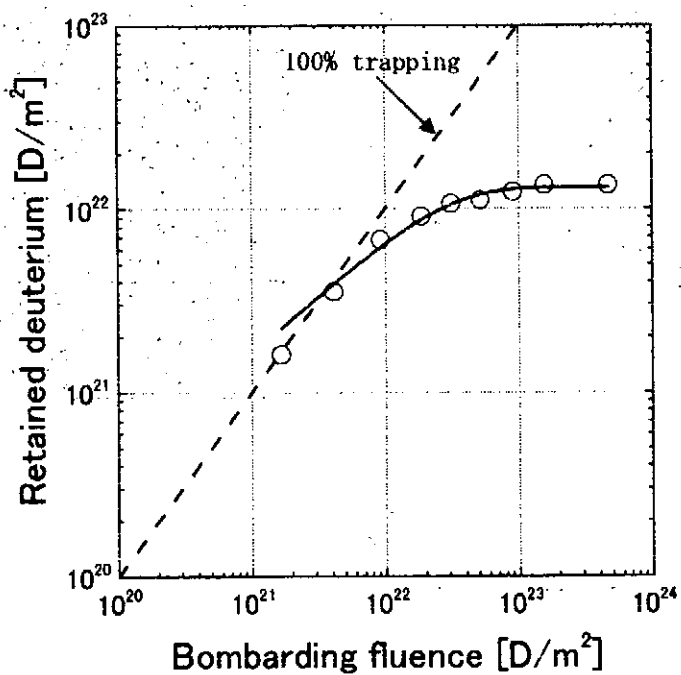
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は:

$$y = A_1 \tanh(x / A_2)^p \quad \begin{cases} A_1 = 1.3052E22 \\ A_2 = 2.642E22 \end{cases} \quad p = 0.63639$$

(適用照射量範囲 : 2x10²¹D/m²~1x10²³D/m²)

5. コメント

NRA測定のため試料全体の吸蔵量を測ってはいない。



x(D/m ²)	y(D/m ²)
1.7E+21	1.6E+21
4.1E+21	3.5E+21
9.2E+21	6.8E+21
1.9E+22	9.1E+21
3.1E+22	1.1E+22
5.2E+22	1.1E+22
9.1E+22	1.2E+22
1.6E+23	1.3E+22
4.7E+23	1.3E+22

水素拡散係数データ

1. 出典

K. Morita, et al., J. Nucl. Mater. 162-164(1989)990

2. 問い合わせ先 (e-mail アドレス) : k-morita@nucl.nagoya-u.ac.jp

3. 測定方法・試料

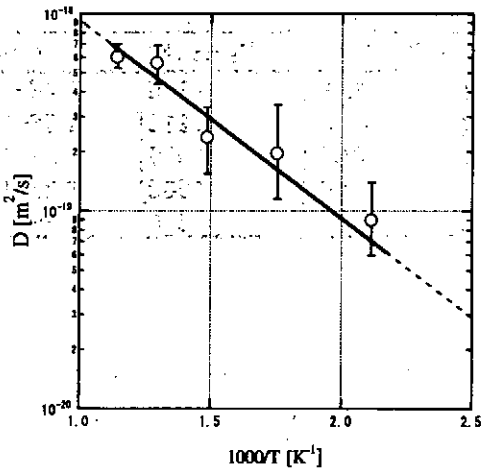
- 3keV H_2^+ → 等方性黒鉛(東洋炭素 : IG-110U)
- ERD 法による照射中の水素の深さ分布測定
- 水素を trapped, mobile の2種に分けた質量平衡方程式モデルでデータを解析

4. フィッティング結果

水素の拡散係数 : $D = 9.3 \times 10^{-18} \exp(-0.2/kT)$ [m^2/s] (適用温度範囲 : 473 - 873.K)

5. コメント

活性化エネルギーが既存の文献値中で最小で黒鉛基底面に平行方向の拡散に関する確度の高いデータと評価される。但し、等方性黒鉛試料のため拡散係数の振動数項 D_0 は基底面に平行・垂直方向個々には評価できない。



1000/T (/K)	Temp (K)	D [m ² /s]
1.15	870	6.0E-19
1.29	770	5.6E-19
1.49	670	2.4E-19
1.75	570	2.0E-19
2.11	470	9.0E-20

1. 出典

T. Tanabe, et al., J. Nucl. Mater. 179-181(1991)231

2. 問い合わせ先 (e-mail アドレス) : tanabe@cirse.nagoya-u.ac.jp

3. 測定方法・試料

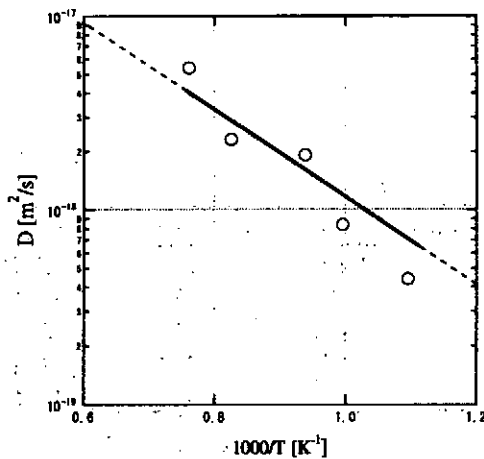
- ・ $D^0 \rightarrow$ 等方性黒鉛(Ibiden : ETP-10,T-6P) (原子状水素生成はタングステンフィラメントによる)
- ・ 照射中における急昇温脱離によって、総水素吸蔵量を測定
- ・ 上記の昇温脱離のデータから、拡散によって導出

4. フィッティング結果

重水素の拡散係数 : $D = 2.1 \times 10^{-16} \exp(-0.45/kT)$ [m^2/s] (適用温度範囲 : 873 - 1323 K)

5. コメント

試料表面から原子状 D を注入しトラップしきれない粒子が拡散によりペブル中に輸送されるモデルを考えている。ただし、内部における再結合を考慮していない。



1000/T (/K)	Temp (K)	D [m^2/s]
0.76	1310	5.4E-18
0.83	1210	2.3E-18
0.94	1070	1.9E-18
1.00	1000	8.3E-19
1.10	910	4.4E-19

1. 出典

M. Sasaki, et al., J. Nucl. Mater. 131(1985)32

2. 問い合わせ先 (住所) : 茨城県東海市 日本原子力研究所

3. 測定方法・試料

- ・ T ($^3\text{He}(n,p)\text{T}$ 反応による反跳 T を利用)
→ PyC(□Randomly oriented (BAF > 1.78) and □Highly oriented (BAF = 1.07))
- ・ Iso-thermal Annealing による水素放出を測定
- ・ その水素放出速度の時間変化から拡散律速モデルによって導出

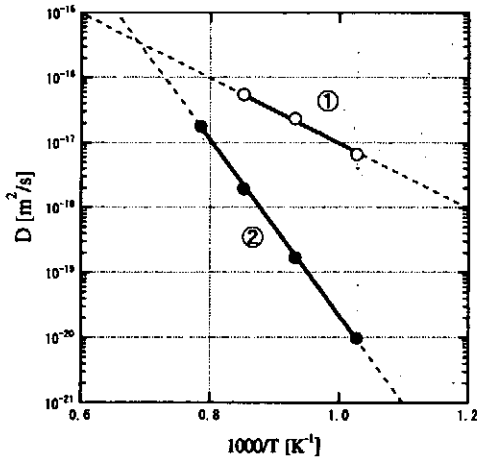
4. フィッティング結果

水素の拡散係数 : □ $D = 1.0 \times 10^{-12} \exp(-1.0/kT)$ [m^2/s] (適用温度範囲 : 973 - 1173 K)

水素の拡散係数 : ● $D = 7.53 \times 10^{-7} \exp(-2.7/kT)$ [m^2/s] (適用温度範囲 : 973 - 1273 K)

5. コメント

モデル導出のためのメカニズムが単純化されすぎである (表面・バルク再結合を無視)。
trapped, mobile の区別なし。



①

1000/T (/K)	Temp (K)	D [m^2/s]
0.85	1170	5.4E-17
0.93	1070	2.3E-17
1.03	970	6.5E-18

②

1000/T (/K)	Temp (K)	D [m^2/s]
0.79	1270	1.7E-17
0.85	1170	1.9E-18
0.93	1070	1.7E-19
1.03	970	9.5E-21

1. 出典

H. Atsumi, et al., J. Nucl. Mater. 155-157(1988)241

2. 問い合わせ先 (住所) : 大阪府東大阪市小若江 3-4-1 近畿大学理工学部 原子炉工学科

3. 測定方法・試料

- D(低温ガス吸収による注入) → 等方性黒鉛 (東洋炭素 : IG-88)
- Iso-thermal Annealing による水素放出を測定
- その水素放出速度の時間変化から拡散律速モデルによって導出

4. フィッティング結果 (上記論文に実験データ記述なし)

水素の拡散係数 : $D = 1.8 \times 10^{-1} \exp(-1.25/kT)$ [m^2/s] (適用温度範囲 : 573 – 773 K)

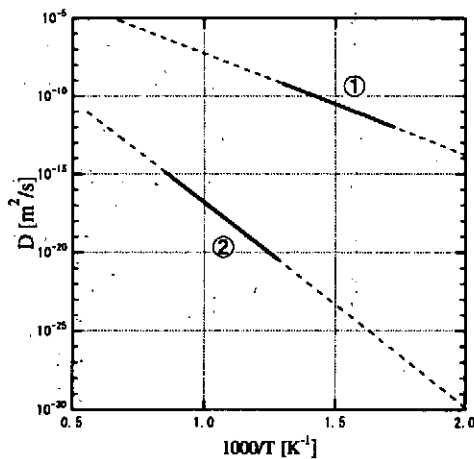
$D = 1.69 \times 10^{-4} \exp(-2.69/kT)$ [m^2/s] (適用温度範囲 : 773 – 1173 K)

5. コメント

モデル導出のためのメカニズムが単純化されすぎである (表面・バルク再結合を無視)。

trapped, mobile の区別なし。

開気孔中の分子輸送の影響あり



ヘリウム拡散係数データ

1. 出典

P. Jung, J. Nucl. Mater. 191-194(1992)377

2. 問い合わせ先 (住所) : Institut für Festkörperforschung, Forschungszentrum Jülich, Association Euratom-KFA, Postfach 1913, W-5170 Jülich, Germany

3. 測定方法・試料

- Max. 28MeV He⁺ → Pyrolytic graphite(Union Carbide : HPG grade)
- 照射中、及び、照射後の試料からの He 放出を四重極質量分析器で測定
- その結果から拡散律速モデルによって導出

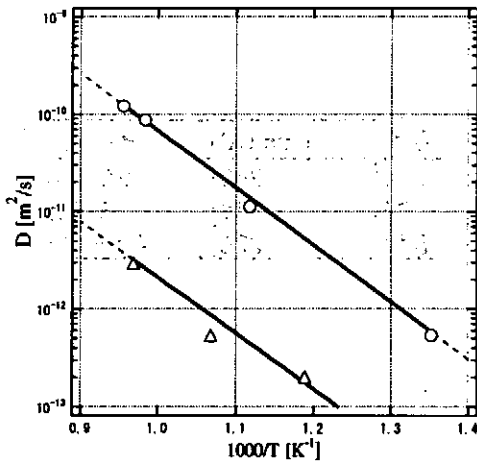
4. フィッティング結果

炭素中の He 拡散係数 : $D = 5 \times 10^{-5} \exp(-1.17/kT)$ [m²/s] (適用温度範囲 : 740 - 1046 K)

SiC 中の He 拡散係数 : $D = 1.1 \times 10^{-6} \exp(-1.14/kT)$ [m²/s] (適用温度範囲 : 740 - 1046 K)

5. コメント

trapped, mobile の区別なし。



炭素

1000/T (/K)	Temp (K)	D [m ² /s]
0.96	1050	1.2E-10
0.98	1020	8.6E-11
1.12	890	1.1E-11
1.35	740	5.3E-13

SiC

1000/T (/K)	Temp (K)	D [m ² /s]
0.97	1030	2.9E-12
1.07	940	5.3E-13
1.19	840	2.0E-13

水素再結合係数データ

1. 出典

K. Morita, et al., J. Nucl. Mater. 176-177(1990)213

2. 問い合わせ先 (e-mail アドレス) : k-morita@nucl.nagoya-u.ac.jp

3. 測定方法・試料

- 3keV H_2^+ → 等方性黒鉛(東洋炭素 : IG-110U)
- ERD 法による照射中の水素の深さ分布測定
- 水素を trapped, mobile の2種に分けた質量平衡方程式モデルでデータを解析

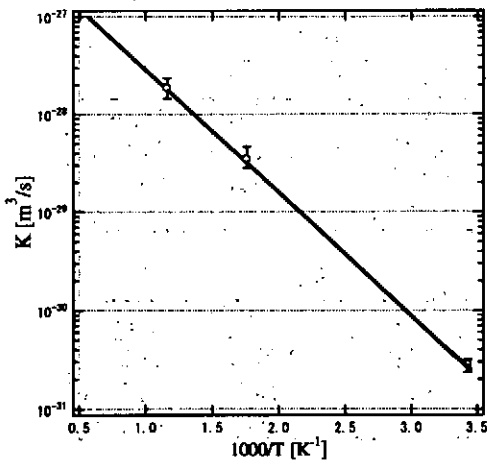
4. フィッティング結果

mobile 水素と trapped 水素の再結合係数 :

$$K = 5.1 \times 10^{-27} \exp(-0.25/kT) \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (\text{適用温度範囲 : RT} - 873 \text{ K})$$

5. コメント

表面再結合でなくバルク内再結合を仮定している。



1000/T (/K)	Temp (K)	K [m³/s]
1.16	860	1.9E-28
1.76	570	3.5E-29
3.43	290	2.8E-31

1. 出典

K. Morita, et al., J. Nucl. Mater. 196-198(1992)963

2. 問い合わせ先 (e-mail アドレス) : k-morita@nucl.nagoya-u.ac.jp

3. 測定方法・試料

- 3keV H₂⁺ → 等方性黒鉛(東洋炭素 : IG-110U)
- ERD 法による isothermal annealing 時の水素の深さ分布測定
- 水素を trapped, mobile の 2 種に分けた質量平衡方程式モデルでデータを解析

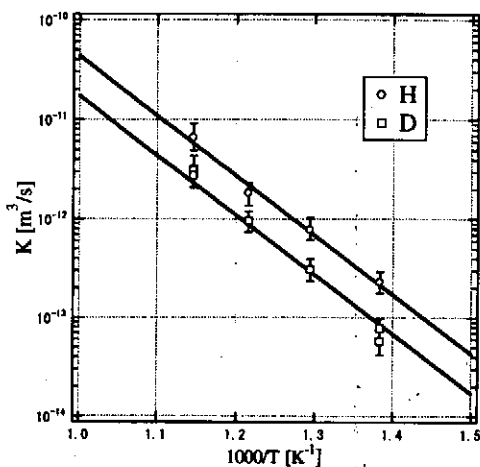
4. フィッティング結果

mobile 水素同士の再結合係数 : $K_1 = 4.5 \times 10^{-5} \exp(-1.2/kT)$ [m³/s] (適用温度範囲 : RT - 873 K)

mobile 重水素同士の再結合係数 : $K_1 = 1.8 \times 10^{-5} \exp(-1.2/kT)$ [m³/s] (適用温度範囲 : 723 - 873 K)

5. コメント

表面再結合でなくバルク内再結合を仮定している。



水素

1000/T (/K)	Temp (K)	K [m ³ /s]
1.15	870	6.6E-12
1.22	820	1.8E-12
1.29	770	7.8E-13
1.38	720	2.3E-13

重水素

1000/T (/K)	Temp (K)	K [m ³ /s]
1.15	870	3.1E-12
1.15	870	2.8E-12
1.22	820	9.5E-13
1.29	770	3.1E-13
1.38	720	7.8E-14
1.38	720	5.8E-14

1. 出典

W. Möller, et al., J. Appl. Phys. 64(1988)4860

2. 問い合わせ先 (住所) : Max-Planck-Institut für Plasmaphysik; EURATOM Association, D-8046 Garching/München, Germany

3. 測定方法・試料

- 3keV D⁺ → Fine grain graphite(Ringsdorf : EK98)
- 飽和吸蔵量の温度依存性を測定
- 水素を trapped, mobile の2種に分けたモデルでデータを解析

4. フィッティング結果 (上記論文中に実験データ記述なし)

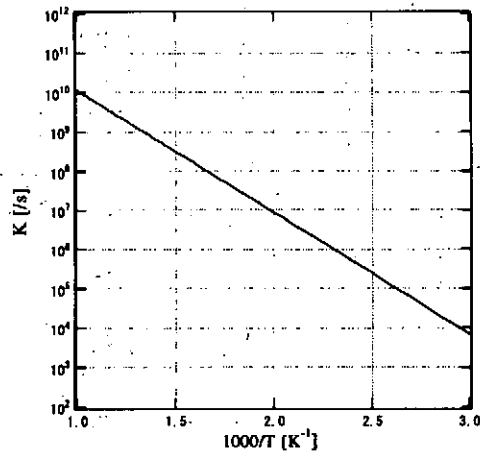
水素の再結合係数 : $K_1 = 14.4 \times 10^{12} \exp(-0.62/kT)$ [1/s] (適用温度範囲 :)

5. コメント

表面再結合でなくバルク内再結合を仮定している。

Mobile 水素同士の再結合のみを考慮している。

損耗による表面後退を考慮していない。



1. 出典

A. A. Haasz, J. Appl. Phys. 77(1995)66

2. 問い合わせ先 (e-mail アドレス) : aahaasz@utias.utoronto.ca

3. 測定方法・試料

- 1keV D⁺ → pyrolytic graphite(Union Carbide : HPG99)
- 照射中の試料からの再放出を測定
- 水素を trapped, mobile, mobile(inner surface)の3種に分けたモデルでデータを解析

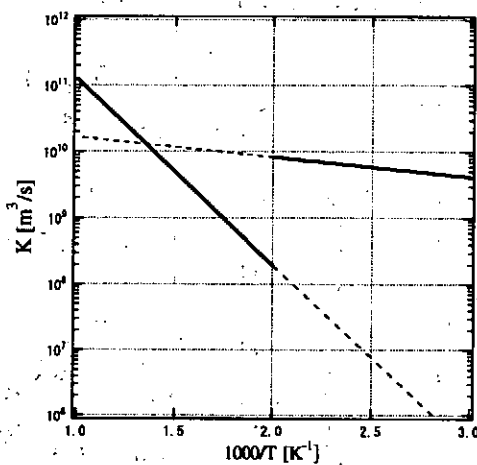
4. フィッティング結果 (上記論文中に実験データ記述なし)

水素の再結合係数 : $K = 3.31 \times 10^{10} \exp(-0.06/kT)$ [m³/s] (適用温度範囲 : < 500 K)

$K = 8 \times 10^{13} \exp(-0.56/kT)$ [m³/s] (適用温度範囲 : > 500 K)

5. コメント

内部表面で mobile 水素同士の再結合のみを考慮している。



水素熱脱離[TDS]データ

1. 出典

坂本隆一 平成七年度九州大学博士論文

2. 問合せ先 (e-mail アドレス) : mitsu@riam.kyushu-u.ac.jp

3. 測定方法・試料

- 8keV D₂⁺→純度 99.95%焼結タングステン (ニラコ)
- 照射量: 2×10²¹ D/m², 照射強度: 1×10¹⁸ D/m²s, 照射温度: 300K
- 照射終了2時間後, 別チャンバーにて昇温脱離中の重水素分子 (D₂, m/e=4) をQMSにより測定. (ex-situ, 昇温速度: 0.25~6.67K/s)

4. フィッティング結果

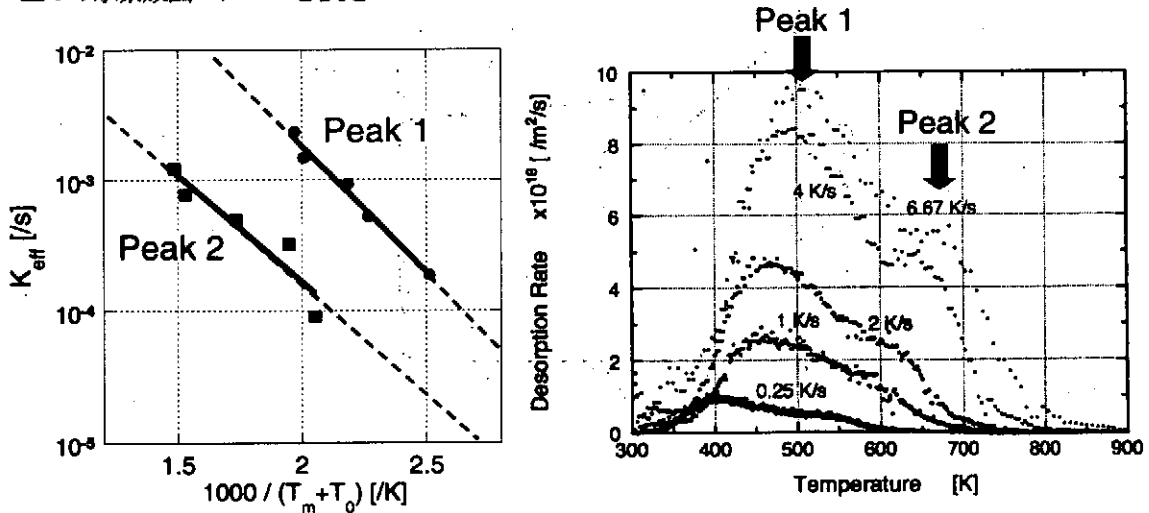
実効的再結合係数: peak 1; $K_{eff} = 13.9 \exp(-0.39[\text{eV}]/kT)$ (s⁻¹)

peak 2; $K_{eff} = 0.30 \exp(-0.32[\text{eV}]/kT)$ (s⁻¹)

5. コメント

飽和濃度はリテンションデータより算出. ($n_0/C_0 \sim 0.90$) NIFS-MEMO-37

二つの水素放出ステージを仮定.



昇温速度 γ(K/s)	Peak 1			Peak 2		
	T _p (K)	1000/T _p (1/K)	K _{eff} (/s)	T _p (K)	1000/T _p (1/K)	K _{eff} (/s)
0.25	398.2	2.5111	1.861E-04	487.5	2.0514	9.153E-05
1	441.6	2.2647	5.166E-04	513.8	1.9463	3.211E-04
2	457.8	2.1843	9.267E-04	576.7	1.7340	4.961E-04
4	498.2	2.0071	1.476E-03	654.3	1.5283	7.748E-04
6.67	507.5	1.9705	2.351E-03	673.5	1.4848	1.226E-03

1. 出典

坂本隆一 平成七年度九州大学博士論文

2. 問合せ先 (e-mail アドレス) : mitsu@riam.kyushu-u.ac.jp

3. 測定方法・試料

- ・ 3keV D₂⁺→純度 99.95%焼結モリブデン (ニラコ)
- ・ 照射量: 2x10²¹ D/m², 照射強度: 1x10¹⁸ D/m²s, 照射温度: 300K
- ・ 照射終了 2 時間後, 別チャンパーにて昇温脱離中の重水素分子 (D₂, m/e=4) を QMS により測定. (ex-situ, 昇温速度: 0.25~6.67K/s)

4. フィッティング結果

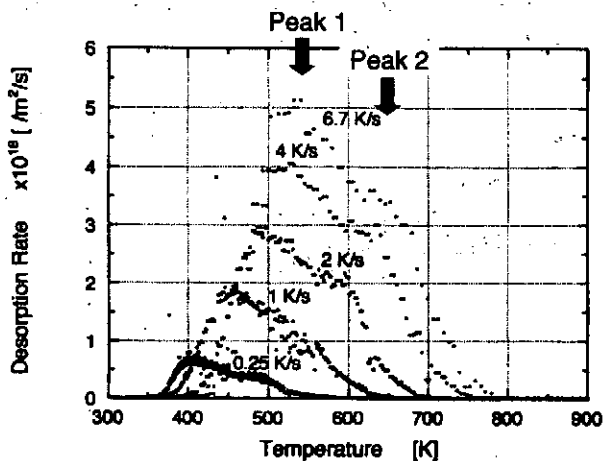
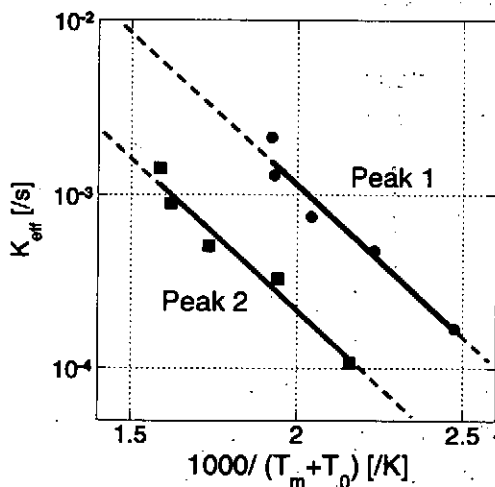
実効的再結合係数 : peak 1; $K_{eff} = 3.6 \exp(-0.35[eV]/kT)$ (s⁻¹)

peak 2; $K_{eff} = 0.72 \exp(-0.35[eV]/kT)$ (s⁻¹)

5. コメント

リテンションカーブに飽和傾向は見られない. (便宜上 n₀/C₀~0.90 とした.)

二つの水素放出ステージを仮定.



昇温速度 γ(K/s)	Peak 1			Peak 2		
	T _p (K)	1000/T _p (/K)	K _{eff} (/s)	T _p (K)	1000/T _p (/K)	K _{eff} (/s)
0.25	404.1	2.4745	1.694x10 ⁻⁴	463.5	2.1577	1.081x10 ⁻⁴
1	447.9	2.2329	4.771x10 ⁻⁴	515.2	1.9409	3.284x10 ⁻⁴
2	489.7	2.0420	7.436x10 ⁻⁴	577.4	1.7320	5.096x10 ⁻⁴
4	518.4	1.9290	1.292x10 ⁻³	617.4	1.6196	8.905x10 ⁻⁴
6.67	520.4	1.9216	2.135x10 ⁻³	630.4	1.5863	1.423x10 ⁻³

1. 出典

水澤周二 平成七年度九州大学総合理工学研究科修士論文

2. 問合せ先 (e-mail アドレス) : mitsu@riam.kyushu-u.ac.jp

3. 測定方法・試料

- 8keV D₂⁺→純度 99%焼結ベリリウム (日本ガイシ)
- 照射量: 2x10²¹ D/m², 照射強度: 1x10¹⁸ D/m²s, 照射温度: 300K
- 照射終了2時間後, 別チャンバーにて昇温脱離中の重水素分子 (D₂, m/e=4) をQMSにより測定. (ex-situ, 昇温速度: 0.5~2.0K/s)

4. フィッティング結果

実効的再結合係数: peak 1; $K_{eff} = 0.67 \exp(-0.29[\text{eV}]/kT)$ (s⁻¹)

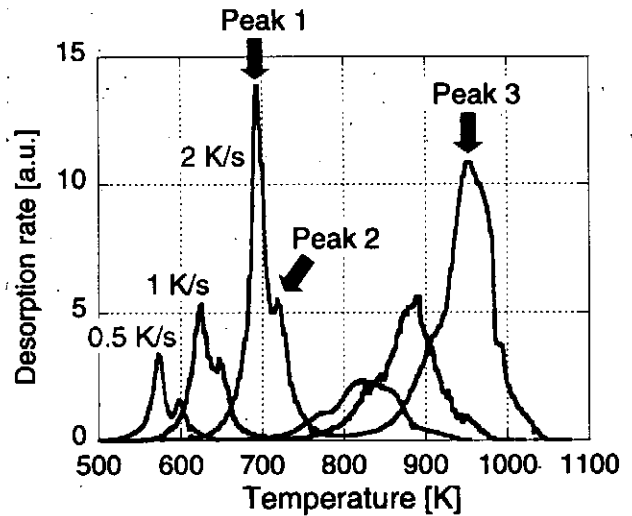
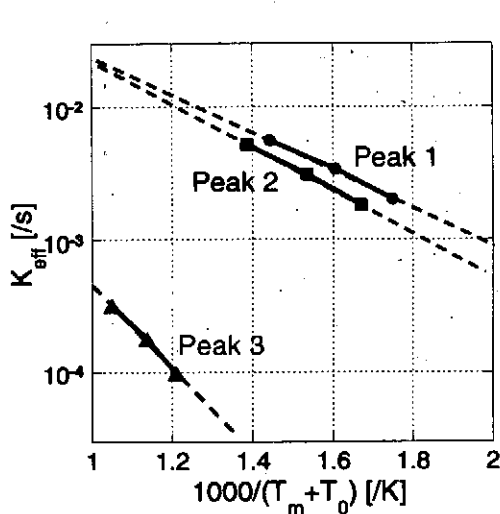
peak 2; $K_{eff} = 0.92 \exp(-0.32[\text{eV}]/kT)$ (s⁻¹)

peak 3; $K_{eff} = 0.87 \exp(-0.63[\text{eV}]/kT)$ (s⁻¹)

5. コメント

n_v/C₀はリテンションデータより算出. (Peak 1; 0.35, Peak 2; 0.35, Peak 3; 0.85)

三つの水素放出ステージを仮定.



γ (K/s)	Peak 1			Peak 2			Peak 3		
	T _p (K)	10 ³ /T _p (K)	K _{eff} (/s)	T _p (K)	10 ³ /T _p (K)	K _{eff} (/s)	T _p (K)	10 ³ /T _p (K)	K _{eff} (/s)
0.5	571.6	1.749	2.009x10 ⁻³	599.2	1.669	1.824x10 ⁻³	826.8	1.209	9.844x10 ⁻⁵
1.0	623.1	1.605	3.378x10 ⁻³	651.6	1.535	3.105x10 ⁻³	880.2	1.136	1.788x10 ⁻⁴
2.0	693.1	1.443	5.553x10 ⁻³	721.1	1.387	5.184x10 ⁻³	953.2	1.049	3.156x10 ⁻⁴

1. 出典

高尾康之 平成13年度九州大学総合理工学府修士論文

2. 問合せ先 (e-mail アドレス) : mitsu@iam.kyushu-u.ac.jp

3. 測定方法・試料

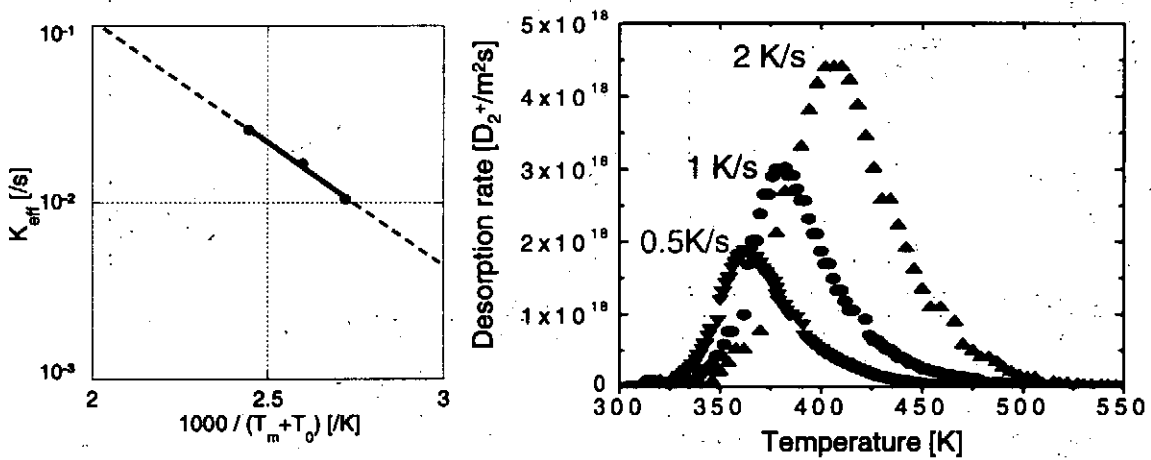
- ・ 8keV D_2^+ →純度 99.99%Fe-9Cr (九大応力研)
- ・ 照射量: 2×10^{21} D/m², 照射強度: 1×10^{18} D/m²s, 照射温度: 300K
- ・ 照射終了2時間後, 別チャンバーにて昇温脱離中の重水素分子 (D_2 , $m/e=4$) を QMS により測定. (ex-situ, 昇温速度: 0.5~2.0K/s)

4. フィッティング結果

実効的再結合係数: $K_{eff} = 13.7 \exp(-0.28[eV]/kT)$ (s⁻¹)

5. コメント

飽和濃度はリテンションデータより算出. ($n_D/C_0 \sim 0.70$) NIFS-MEMO-37
 二つの水素放出ステージを仮定.



γ (K/s)	T_p (K)	$1000/T_p$ (1/K)	K_{eff} (1/s)
0.5	367.4	2.722	1.045×10^{-2}
1.0	384.6	2.600	1.664×10^{-2}
2.0	408.9	2.446	2.586×10^{-2}

1. 文献

Y. Morimoto and K. Okuno, J. Nucl. Mater. 313-316 (2003) 595

2. 問合せ先 (e-mail アドレス) : r5144009@ipc.shizoka.ac.jp

3. 測定方法・試料

- 重水素 (D_2^+) イオン (重水素, 1.0 keV, $1.0 \times 10^{18} D^+/m^2 s$, $6.4 \times 10^{21} D^+/m^2$) → HOPG (Pechiney Co. Ltd) 照射温度 173 K
- 重水素 (D_2^+) イオン照射後、2 時間経過してから、In situ にて昇温脱離を行い、重水素分子 (D_2 , $m/e=4$) を QMS によって測定

4. フィッティング結果

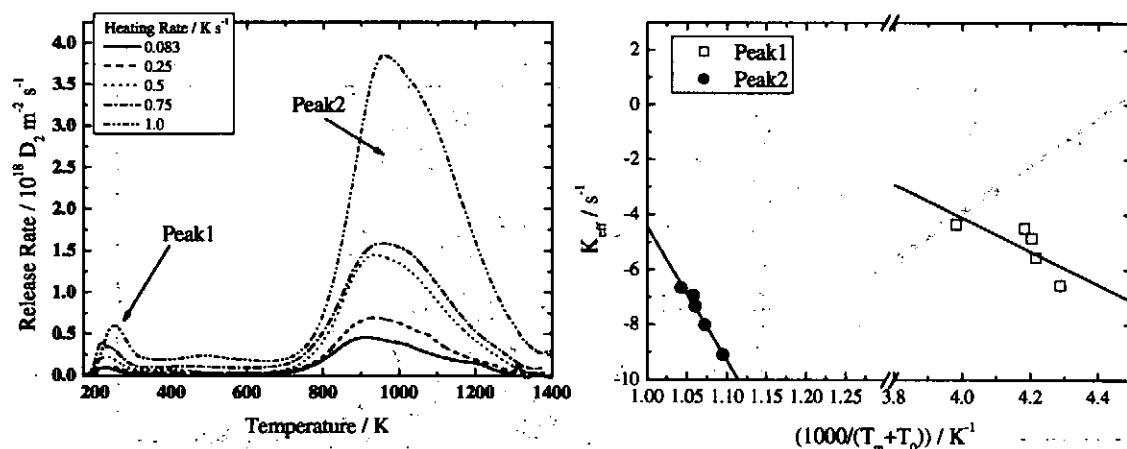
実効的再結合係数 : Peak1 ; $K_{eff} = 2.9 \times 10^6 \exp(-0.52 [eV]/kT) (s^{-1})$

Peak2 ; $K_{eff} = 2.7 \times 10^{10} \exp(-4.2 [eV]/kT) (s^{-1})$

5. コメント

各ピークにおける n_0/C_0 の値 : Peak1 ; 0.63, Peak2 ; 0.47

n_0/C_0 値は、リテンションのフィッティング式にフルエンスを代入して算出。



昇温速度 $\gamma / K s^{-1}$	Peak 1		Peak 2	
	$(1000/(T_m + T_0)) / K^{-1}$	K_{eff} / s^{-1}	$(1000/(T_m + T_0)) / K^{-1}$	K_{eff} / s^{-1}
0.083	4.28786	-6.57216	1.09505	-9.09177
0.25	4.21557	-5.55501	1.07243	-8.02124
0.50	4.20345	-4.85577	1.06027	-7.34285
0.75	4.18218	-4.49736	1.05822	-6.94195
1.0	3.98195	-4.35028	1.04285	-6.67036

1. 出典

吉田肇 平成十五年度北海道大学博士論文、 吉田肇 他、真空 44 (2001)310

2. 問合せ先 (e-mail アドレス) : yoshida@apollo.qe.eng.hokudai.ac.jp

3. 測定方法・試料

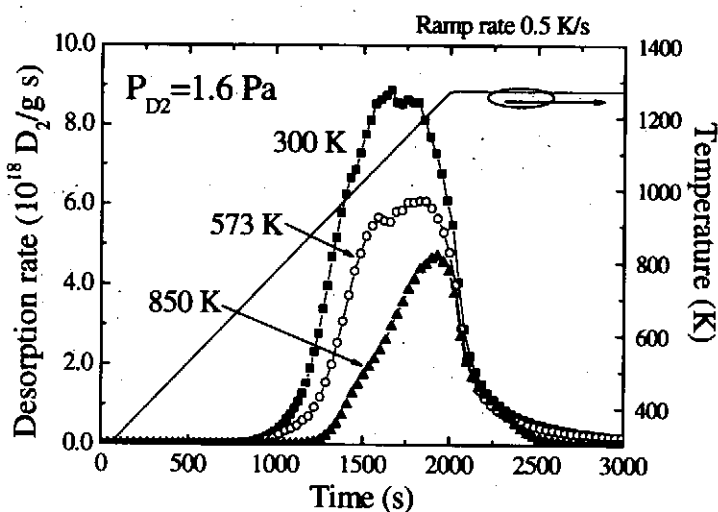
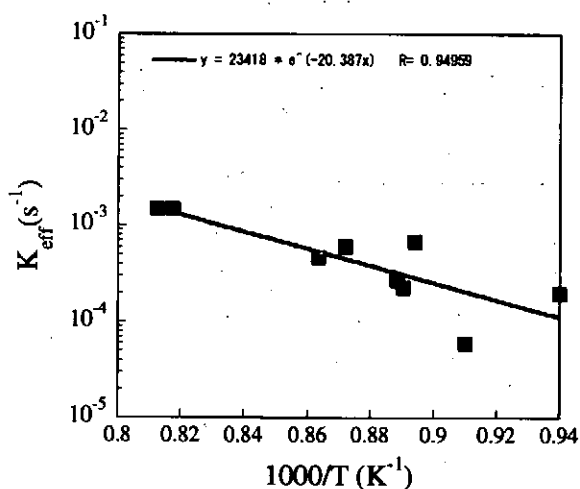
- ・炭素電極を用いた重水素アーク放電で、重水素原子と炭素を同時に堆積させて、カーボンダスト試料を製作。重水素ガス圧 0.5 - 4.0 Pa、基板温度 300-873 K まで変化させた。
- ・試料作製後、試料をデシケータ内で数日間保管。その後、TDS 装置に試料を移して分析。
- ・D₂脱離率を、標準リークを用いて校正した QMS によって測定。(m/e=4)

4. フィッティング結果

実効的再結合係数: $K_{eff} = 2.61 \times 10^4 \exp(-1.76[\text{eV}]/kT) \text{ (s}^{-1}\text{)}$

5. コメント

- ・D/C 原子比=0.5 を、C₀として計算した。これは試料の最大 D/C 原子比が 0.45 となったため、n_D/C₀が 1 以上になることを避けるためである。
- ・TDS スペクトルの一例として、平均重水素ガス圧 1.6 Pa で、基板温度を 300, 573, 873 K と変化させたときのデータを示す。



γ (K/s)	T_p (K)	$1000/T_p$ (K ⁻¹)	n_D/C_0^*	K_{eff} (s ⁻¹)	D/C 原子比
0.5	1099	0.910	0.90	6.04E-05	0.45
0.5	1064	0.940	0.74	1.99E-04	0.37
0.5	1123.5	0.890	0.70	2.26E-04	0.35
0.5	1158.6	0.863	0.52	4.68E-04	0.26
0.5	1223.4	0.817	0.24	1.50E-03	0.12
0.5	1126	0.888	0.66	2.71E-04	0.33
0.5	1147	0.872	0.46	6.03E-04	0.23
0.5	1231	0.812	0.24	1.48E-03	0.12

1. 出典

石本祐樹 平成十四年度筑波大学博士論文

2. 問合せ先 (e-mail アドレス) : ishimoty@fusion.naka.jaeri.go.jp

3. 測定方法・試料

- 荷電交換中性粒子 (軽水素, $T_i \sim 3\text{keV}$, $5 \times 10^{17} \text{H/m}^2 \text{sec}$) →
炭素繊維材料 (東洋炭素 : CX-270) 照射温度 473K
- 12 分間に一回 0.2 秒のプラズマ放電を数日間行った後、In situ にて昇温脱離を行い、水素分子 (H_2 , $m/e=2$) を QMS によって測定

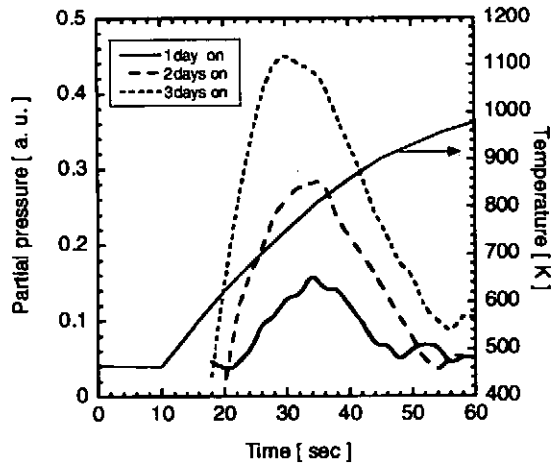
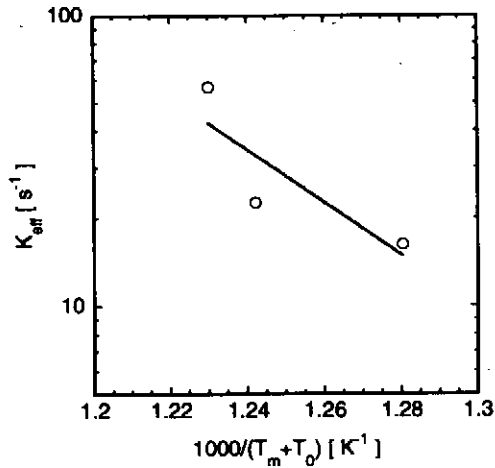
4. フィッティング結果

$$K_{\text{eff}} = 6.2 \times 10^{12} \exp(-1.8[\text{eV}]/kT) \quad (\text{s}^{-1})$$

5. コメント

プラズマからの荷電交換中性粒子のフルエンスが非常に小さく、飽和試料ではない ($n_0/C_0 \sim 10^{-3}$: 評価値)。初期水素濃度は、ERDA によって得た深さ方向分布とショット毎のプラズマパラメーターから求めたフルエンスから評価した。

実機における照射のため、照射時の圧力が高く ($\sim 10^{-4} \text{Pa}$) 昇温脱離時のバックグラウンドを仮定して差し引きピークを導出している。



γ (K/s)	T_p (K)	$1000/T_p$ (K^{-1})	n_0/C_0	K_{eff} (s^{-1})
$7 \sim 15$	813	1.23	0.63×10^{-3}	56.4
$7 \sim 15$	805	1.24	1.61×10^{-3}	22.6
$7 \sim 15$	781	1.28	2.46×10^{-3}	16.2

NIFS-MEMOシリーズ出版リスト

- NIFS-MEMO-30 津田健三、山本孝志、加藤丈雄、中村修、渡邊國彦、渡邊令子、津川和子、上村鉄雄
「核融合科学研究所キャンパス情報ネットワークNIFS-LANの構築」
K. Tsuda, T. Yamamoto, T. Kato, O. Nakamura, K. Watanabe, R. Watanabe, K. Tsugawa and T. Kamimura.
"Construction of the NIFS Campus Information Network NIFS-LAN": Oct. 2000 (In Japanese)
- NIFS-MEMO-31 文部科学省 核融合科学研究所 安全管理センター
「放射線安全管理年報 -1999年度-」
Safety and Environmental Research Center, National Institute for Fusion Science.
"Report on Administrative Work at Radiation Safety Center in fiscal year 1999": Apr. 2001 (In Japanese)
- NIFS-MEMO-32 渡邊國彦、渡邊令子、津川和子、津田健三、山本孝志、中村修、上村鉄雄
「大型汎用計算機システム2001運用報告」
K. Watanabe, R. Watanabe, K. Tsugawa, K. Tsuda, T. Yamamoto, O. Nakamura and T. Kamimura.
"Report on the Operation and Utilization of General Purpose Use Computer System 2001": Sep. 2001 (In Japanese)
- NIFS-MEMO-33 西尾成子、植松英穂、大林治夫、川上一郎、高岩義信、竹田辰興、寺嶋由之介、難波忠清、藤田順治、若谷誠宏、木村一枝
「日本の核融合研究開発の経緯 1965～1986 関口忠氏インタビュー記録」
Nisio, S., Uematsu, E., Obayashi, H., Kawakami, I., Takaiwa, Y., Takeda, T., Terashima, Y., Namba, C., Fujita, J., Wakatani, M. and Kimura, K.
"An Archival Study on the Fusion Researches in Japan from 1965 to 1986 An Interview with Sekiguchi Tadashi": Dec. 2001 (in Japanese)
- NIFS-MEMO-34 岩切宏友、松廣健二郎、廣岡慶彦、山村泰道、PWI作業会メンバー
プラズマ壁相互作用関連データ集-1
「プラズマ対向材料中の水素同位体リテンションと関連する拡散係数・再結合係数データベース」
Hiroto Iwakiri, Kenjiro Matsuhiro, Yoshi Hirooka, Yasunori Yamamura and PWI-Taskgroup.
Plasma-Wall Interactions Data Compendium-1
"Hydrogen Retention Property, Diffusion and Recombination Coefficients Database for Selected Plasma-Facing Materials"
May 2002 (in Japanese)
- NIFS-MEMO-35 文部科学省 核融合科学研究所 安全管理センター
「放射線安全管理年報 -2000年度-」
Safety and Environmental Research Center, National Institute for Fusion Science.
"Report on Administrative Work at Radiation Safety Center in fiscal year 2000": May. 2002 (In Japanese)
- NIFS-MEMO-36 核融合科学研究所技術部
「平成13年度核融合科学研究所技術研究会
日時：2002年3月14日・15日 場所：セラトピア土岐」
"Proceedings of Symposium on Technology in Laboratories by Department of Engineering and Technical Services" June. 2002
(In Japanese)
- NIFS-MEMO-37 松廣健二郎、岩切宏友、廣岡慶彦、山村泰道、森田健治、PWI作業会メンバー
プラズマ壁相互作用関連データ集-2
「プラズマ対向材料中の水素同位体リテンションと関連する拡散係数・再結合係数データベース」
Kenjiro Matsuhiro, Hiroto Iwakiri, Yoshi Hirooka, Yasunori Yamamura, Kenji Morita and PWI-Taskgroup.
Plasma-Wall Interactions Data Compendium-2
"Hydrogen Retention Property, Diffusion and Recombination Coefficients Database for Selected Plasma-Facing Materials"
Aug. 2002 (in Japanese)
- NIFS-MEMO-38 江本雅彦、駒田誠司
実用的テレビ会議システムの構築
～研究系ミーティングの利用に耐えうる2～4地点テレビ会議システムの実現～
M. Emoto, S. Komada.
"Development of a Practical Video Conference System:" Nov. 2002 (in Japanese)
- NIFS-MEMO-39 文部科学省 核融合科学研究所 安全管理センター
「放射線安全管理年報 -2001年度-」
Safety and Environmental Research Center, National Institute for Fusion Science.
"Report on Administrative Work at Radiation Safety Center in fiscal year 2001": Feb. 2003 (In Japanese)
- NIFS-MEMO-40 西尾成子、植松英穂、大林治夫、川上一郎、小島知恵子、佐藤浩之助、佐藤徳芳、高岩義信、竹田辰興、寺嶋由之介、難波忠清、藤田順治、若谷誠宏、木村一枝
Nisio, S., Uematsu, E., Obayashi, H., Kawakami, I., Kojima, C., Sato, K.N., Sato, N., Takaiwa, Y., Takeda, T., Terashima, Y., Namba, C., Fujita, J., Wakatani, M. and Kimura, K.
「1980年代後半以降の日本の核融合研究開発の経緯 関口忠氏インタビュー記録」
"An Archival Study on the Nuclear Fusion Researches in Japan Later Half of 1980's. An Interview with SEKIGUCHI Tadashi, Professor Emeritus at The University of Tokyo" May 2003 (in Japanese)
- NIFS-MEMO-41 J. Miyazawa, H. Yamada and M. Matsuoka.
"Gas Flow Velocity of the Direct Gas Puff" Aug. 200335
- NIFS-MEMO-42 石本祐樹、宮本光貴、森本泰臣、吉田肇、松廣健二郎、岩切宏友、廣岡慶彦、山村泰道、森田健治、PWI作業会メンバー
プラズマ壁相互作用関連データ集-3
「プラズマ対向材料中の水素同位体リテンションと関連する拡散係数・再結合係数データベース」
Yuki Ishimoto, Mitsutaka Miyamoto, Yasutomi Morimoto, Hajime Yoshida, Kenjiro Matsuhiro, Hiroto Iwakiri, Yoshi Hirooka, Yasunori Yamamura, Kenji Morita and the PWI-Taskgroup
Plasma-Wall Interactions Data Compendium-3
"Hydrogen Retention Property, Diffusion and Recombination Coefficients Database for Selected Plasma-Facing Materials" Jan. 2004 (in Japanese)