

NATIONAL INSTITUTE FOR FUSION SCIENCE

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」
Plasma-Wall Interactions Data Compendium-1
"Hydrogen Retention Property, Diffusion and Recombination
Coefficients Database for Selected Plasma-Facing Materials"

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
Hirotomo Iwakiri, Kenjiro Matsuhiro, Yoshi Hirooka, Yasunori Yamamura and PWI-Taskgroup

(Received - Apr. 22, 2002)

NIFS-MEMO-34

May 2002

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 for future publication in a journal after some rearrangements of its contents.

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

RESEARCH REPORT
NIFS MEMO Series

プラズマ-壁相互作用関連データ集-1

Plasma-Wall Interactions Data Compendium-1

NIFS-MEMO-34

「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”

岩切宏友¹⁾、松廣健二郎²⁾、廣岡慶彦³⁾、山村泰道⁴⁾、PWI-作業会メンバー
九州大学応用力学研究所¹⁾、大阪大学²⁾、核融合科学研究所³⁾、岡山理科大学⁴⁾

Hiroto Iwakiri, Kenjiro Matsuhiro, Yoshi Hirooka, Yasunori Yamamura and PWI-Taskgroup
RIAM of Kyushu Univ. ¹⁾, Osaka Univ. ²⁾, NIFS³⁾, Okayama Univ. Science⁴⁾

Abstract

A summary on the recent activities of the plasma-wall interactions database task group at the National Institute for Fusion Science is presented in this report. These activities are focused on the compilation of literature data on the key parameters related to wall recycling characteristics that affect dynamic particle balance during plasma discharges and also on-site tritium inventory. More specifically, in this task group a universal fitting formula has been proposed and successfully applied to help compile hydrogen implantation-induced retention data. Also, presented here are the data on hydrogen diffusion and surface recombination coefficients, both critical in modeling dynamic wall recycling behavior. Data compilation has been conducted on beryllium, carbon, tungsten and molybdenum, all currently used for plasma-facing components in magnetic fusion experiments.

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

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、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（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注入・放出挙動、即ち、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協力核融合実験炉（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。

本稿では、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。

言うまでもないが、これら調査結果は、今後、更なる検討を加えて英文のレポートとして出版する予定であるが、ここでは本年（平成14年）5月に開かれる「核融合装置に於けるプラズマ壁相互作用」の国際会議に向けて論文執筆中の国内研究者の利便を図るため敢えて日本語での出版・公開を行うものである。

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。

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

Fig. 1は、一例として、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）プロットしたものである。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逆算したものである。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。

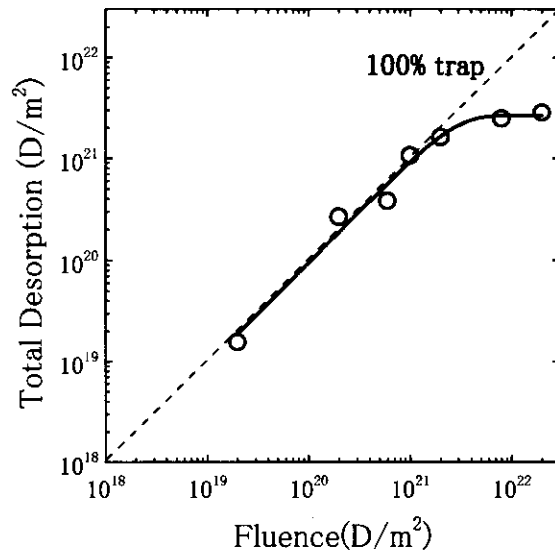


Fig. 1 Deuterium retention in beryllium at 4 keV[6].

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 : リテンション量(D atoms/m²)、 A_1 : 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 $A_1=2.6676 \times 10^{21}$ D/m²、 $A_2=2.8210 \times 10^{21}$ D/m²、 $p=1$ となり、その結果を実線で同じく Fig. 2 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はほぼ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(>8x10²¹D/m²)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。

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でフィッティングを行った：

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

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

ここで、Dは拡散係数、K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、拡散係数の単位は cm^2/s 、再結合係数の単位は一般に cm^3/s である。

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. -Jacques, 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.

本レポートの著者以外の主な作業会メンバー（平成12年4月—平成14年3月）

森田健治（名大）
大野哲靖（名大）
大宅薫（徳島大）
川上烈生（徳島大）
上田良夫（阪大）
奥井隆雄（阪大）
岡田成分（阪大）
中嶋洋輔（筑波大）
川村孝弑（中部大）
吉田直亮（九大）
小野忠良（岡山理大）
村本哲也（岡山理大）
剣持貴則（岡山理大）

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%焼結タンゲステン (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

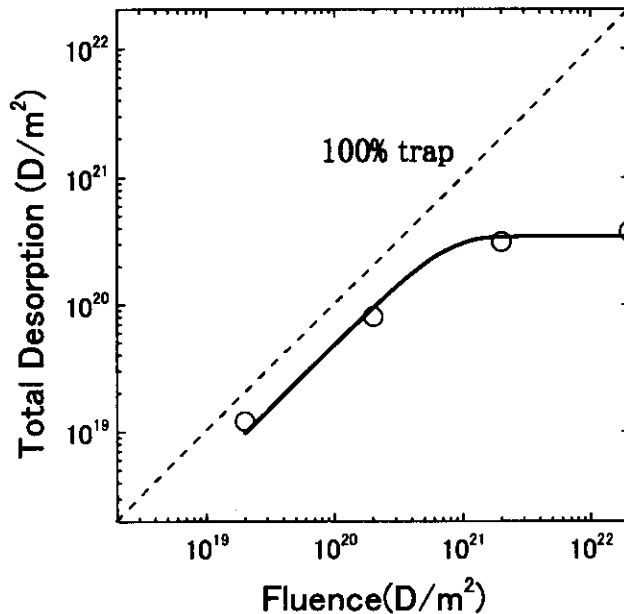
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は

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

(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

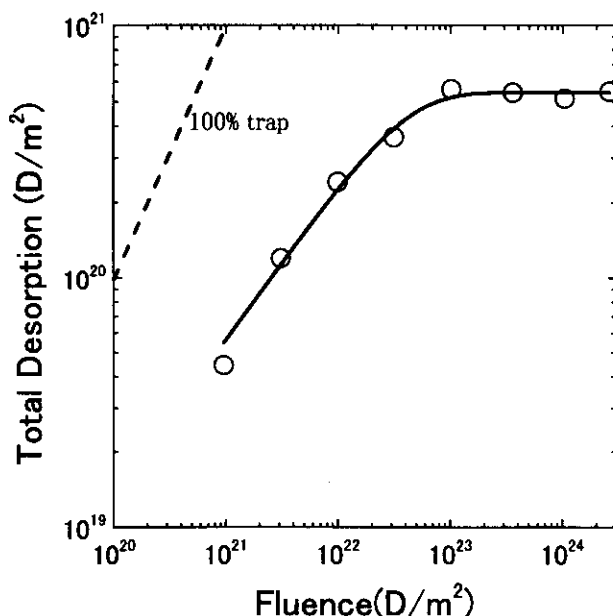
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は

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

(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25μm (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

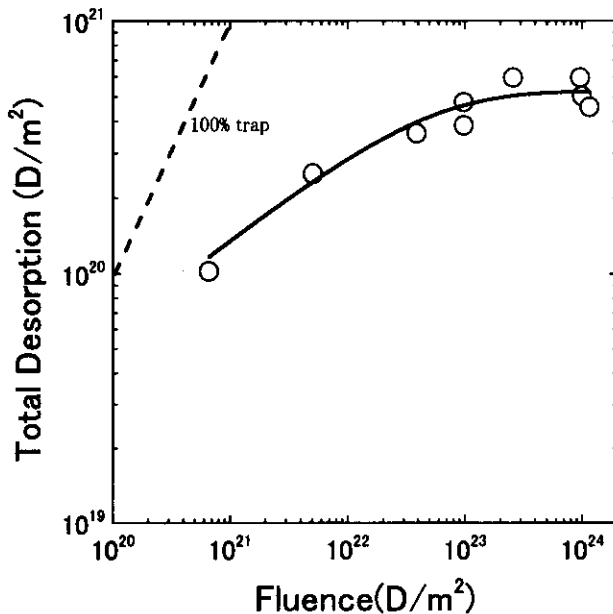
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は

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

(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

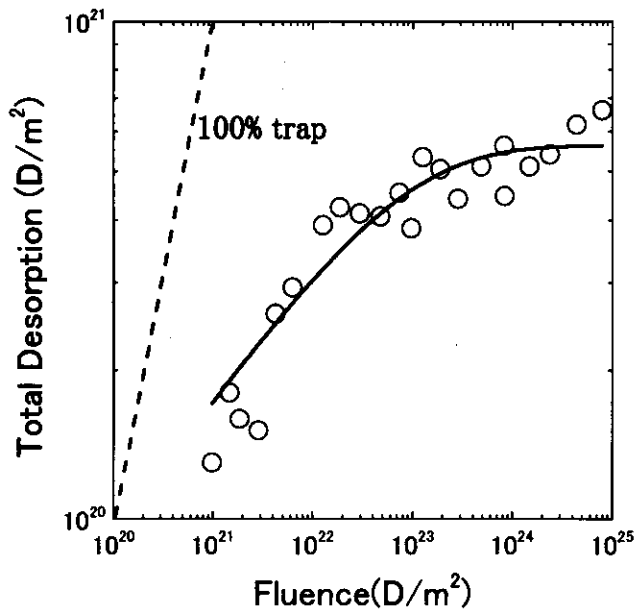
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は

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

(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

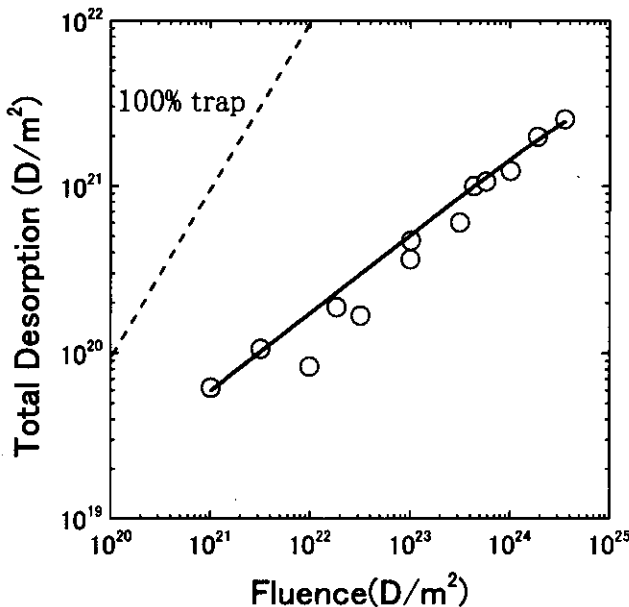
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は

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

(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

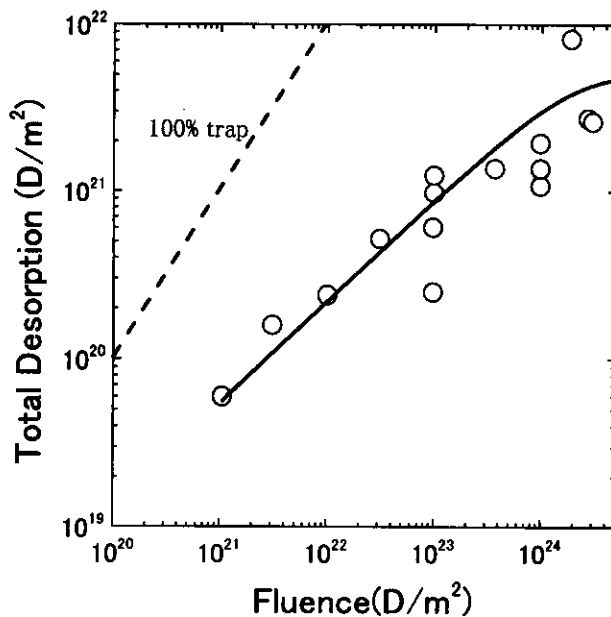
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は

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

(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

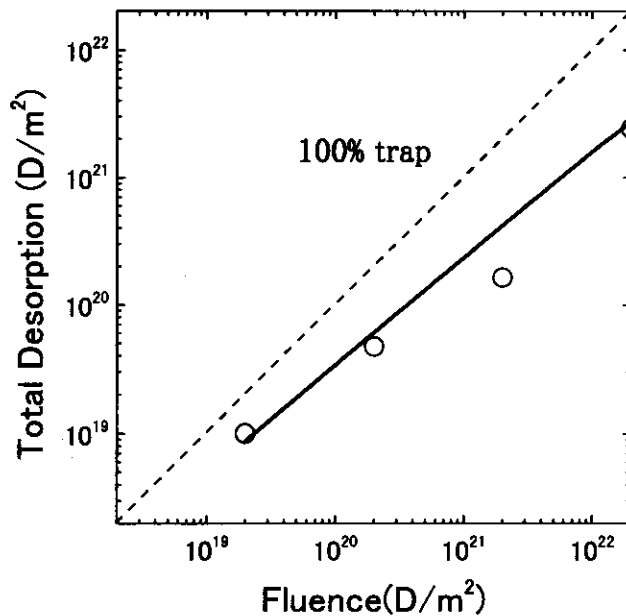
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は

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

(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

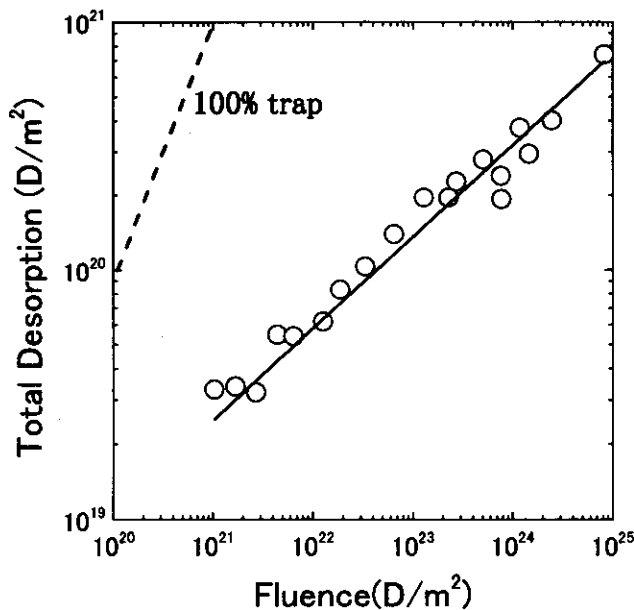
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は

$$y = A_1 \tanh(x / A_2)^p \quad \begin{cases} A_1=1.6385E22 \\ A_2=4.2541E28 \end{cases} \quad p=0.3698$$

(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

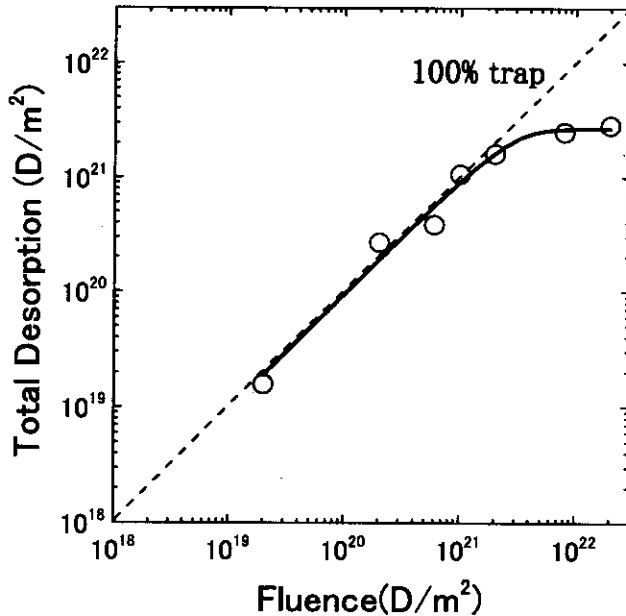
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は

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

(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⁺ → 焼結ベリリウム (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

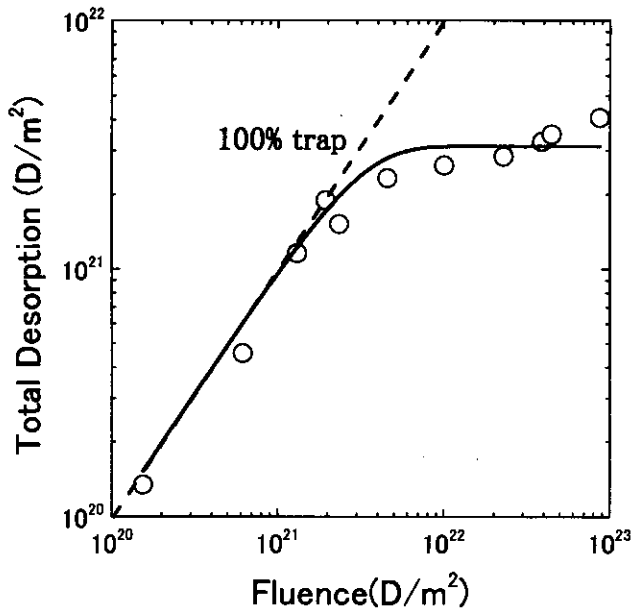
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は

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

(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

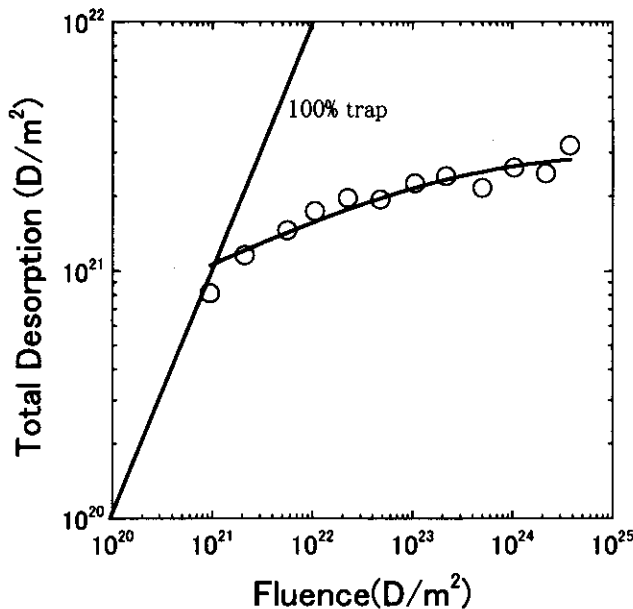
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は

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

(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、10 μm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

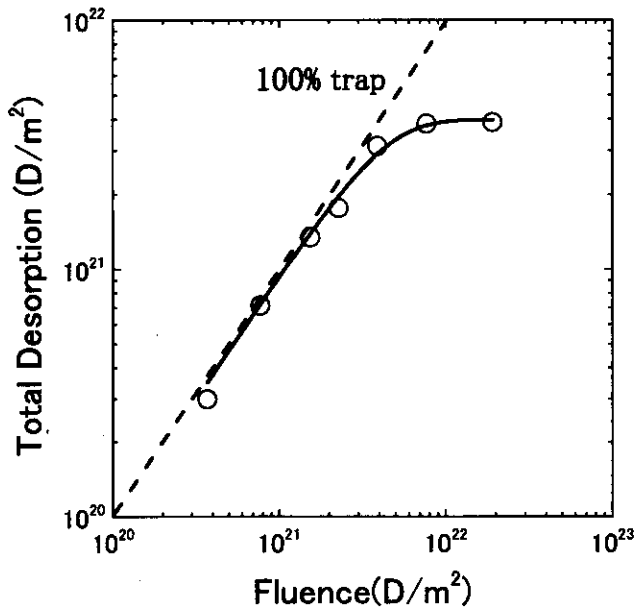
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は

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

(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

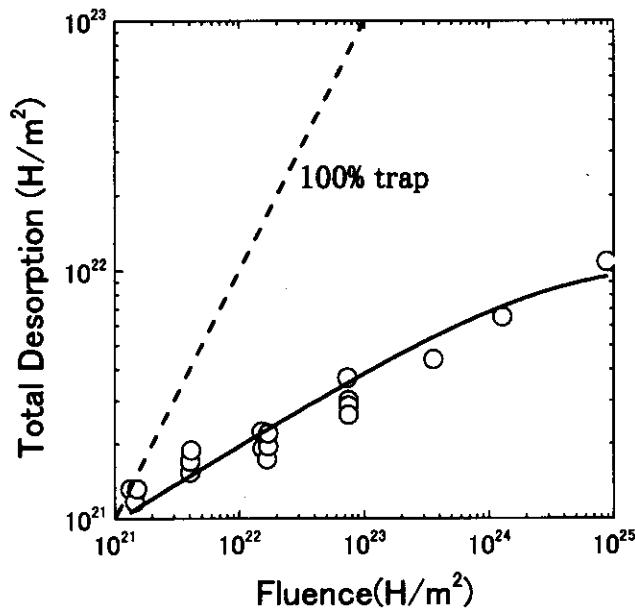
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は

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

(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

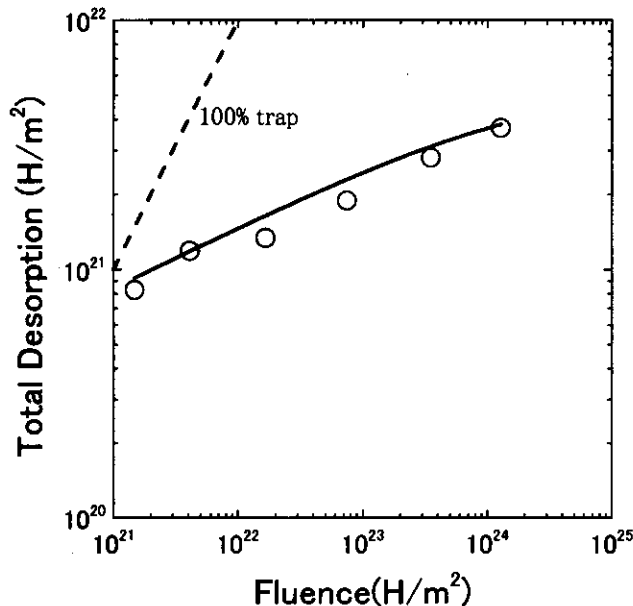
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は

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

(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

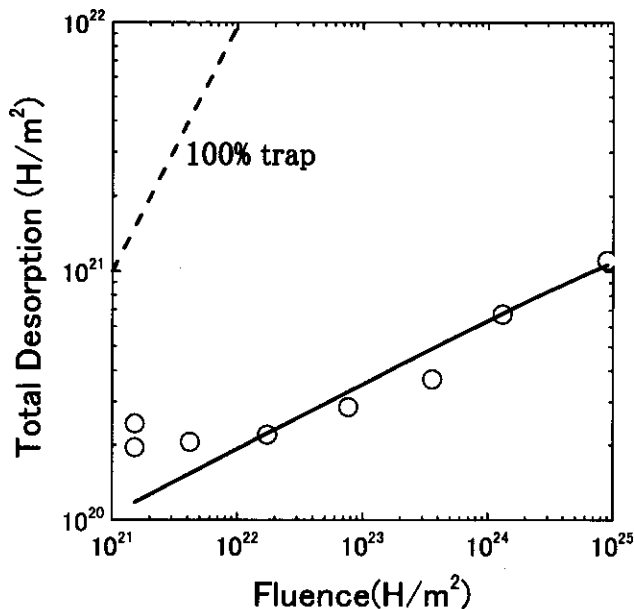
重水素の照射量(x)に対するリテンション量(y)は

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

(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

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

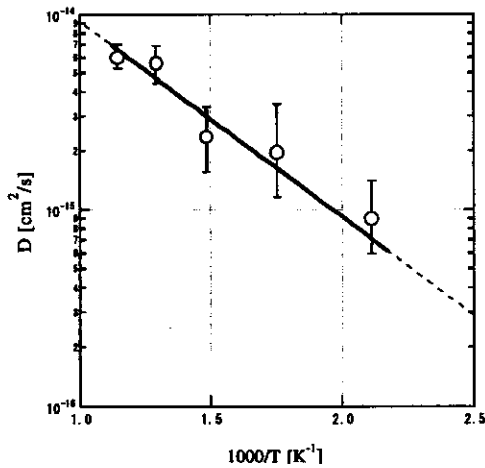
- 3keV H₂⁺ → 等方性黒鉛(東洋炭素 : IG-110U)
- ERD 法による照射中の水素の深さ分布測定
- 水素を trapped, mobile の2種に分けた質量平衡方程式モデルでデータを解析

4. フィッティング結果

水素の拡散係数 : $D = 9.3 \times 10^{-14} \exp(-0.2/kT)$ [cm²/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 [cm ² /s]
1.15	870	6.0E-15
1.29	770	5.6E-15
1.49	670	2.4E-15
1.75	570	2.0E-15
2.11	470	9.0E-16

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

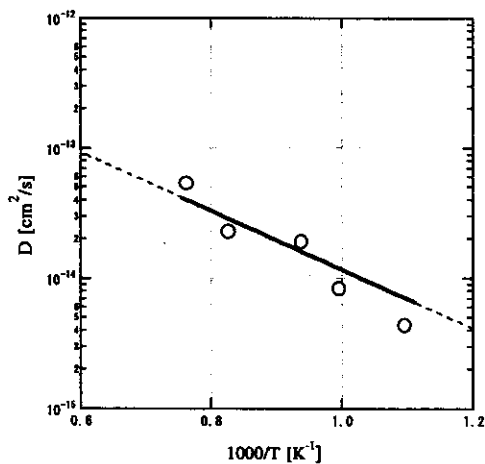
- $D^0 \rightarrow$ 等方性黒鉛(Ibiden : ETP-10,T-6P) (原子状水素生成はタングステンフィラメントによる)
- 照射中における急昇温脱離によって、総水素吸蔵量を測定
- 上記の昇温脱離のデータから、拡散によって導出

4. フィッティング結果

重水素の拡散係数 : $D = 2.1 \times 10^{-12} \exp(-0.45/kT)$ [cm^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 [cm ² /s]
0.76	1310	5.4E-14
0.83	1210	2.3E-14
0.94	1070	1.9E-14
1.00	1000	8.3E-15
1.10	910	4.4E-15

1. 出典

M. Saeki, 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

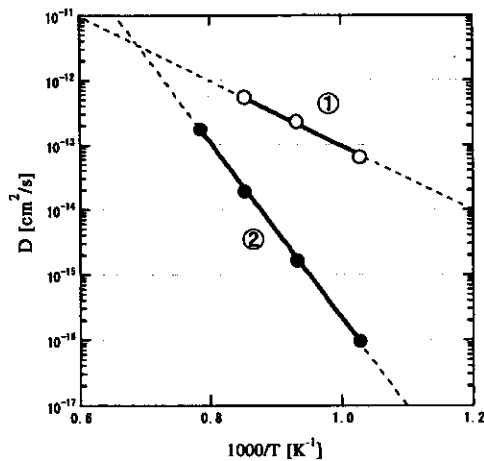
4. フィッティング結果

水素の拡散係数 : □ $D = 1.0 \times 10^{-8} \exp(-1.0/kT)$ [cm^2/s] (適用温度範囲 : 973 - 1173 K)

水素の拡散係数 : ● $D = 7.53 \times 10^{-3} \exp(-2.7/kT)$ [cm^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 [cm^2/s]
0.85	1170	5.4E-13
0.93	1070	2.3E-13
1.03	970	6.5E-14

②

1000/T (/K)	Temp (K)	D [cm^2/s]
0.79	1270	1.7E-13
0.85	1170	1.9E-14
0.93	1070	1.7E-15
1.03	970	9.5E-17

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 : $\square D = 1.8 \times 10^3 \exp(-1.25/kT)$ [cm^2/s] (適用温度範囲 : 573 - 773 K)

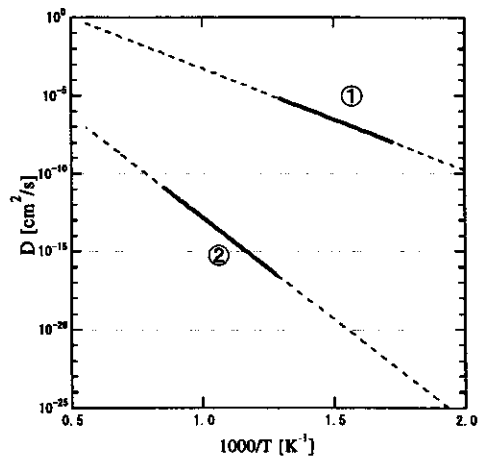
$\square D = 1.69 \exp(-2.69/kT)$ [cm^2/s] (適用温度範囲 : 773 - 1173 K)

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。

閉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

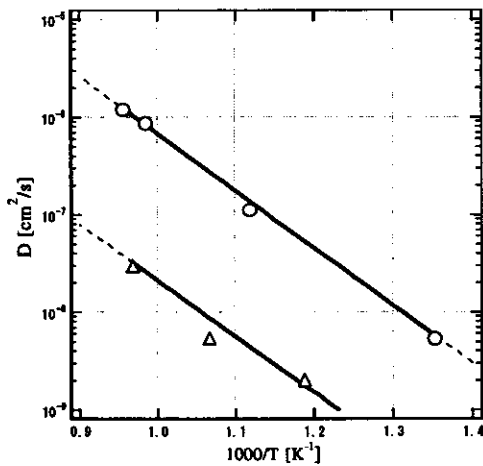
4. フィッティング結果

炭素中の He 拡散係数 : $D = 5 \times 10^{-1} \exp(-1.17/kT)$ [cm²/s] (適用温度範囲 : 740–1046 K)

SiC中の He 拡散係数 : $D = 1.1 \times 10^{-2} \exp(-1.14/kT)$ [cm²/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 [cm ² /s]
0.96	1050	1.2E-06
0.98	1020	8.6E-07
1.12	890	1.1E-07
1.35	740	5.3E-09

SiC

1000/T (/K)	Temp (K)	D [cm ² /s]
0.97	1030	2.9E-08
1.07	940	5.3E-09
1.19	840	2.0E-09

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

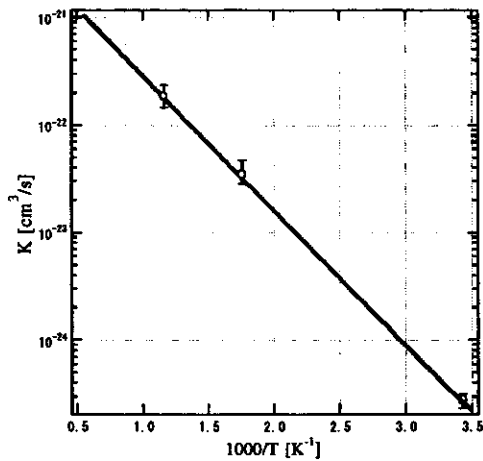
4. フィッティング結果

mobile 水素と trapped 水素の再結合係数 :

$$K = 5.1 \times 10^{-21} \exp(-0.25/kT) \text{ [cm}^3/\text{s]} \quad (\text{適用温度範囲 : RT} - 873 \text{ K})$$

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 [cm ³ /s]
1.16	860	1.9E-22
1.76	570	3.5E-23
3.43	290	2.8E-25

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

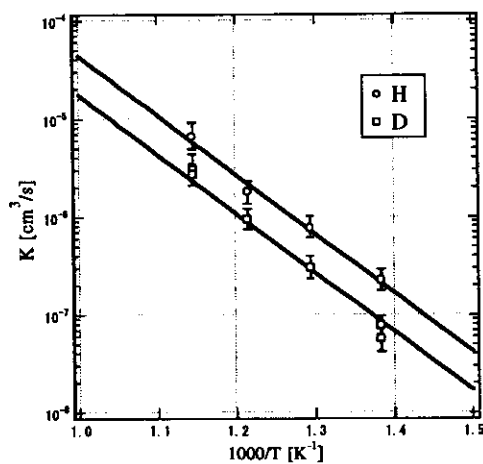
4. フィッティング結果

mobile 水素同士の再結合係数 : $K_1 = 45\exp(-1.2/kT)$ [cm³/s] (適用温度範囲 : RT - 873 K)

mobile 重水素同士の再結合係数 : $K_1 = 18\exp(-1.2/kT)$ [cm³/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 [cm ³ /s]
1.15	870	6.6E-06
1.22	820	1.8E-06
1.29	770	7.8E-07
1.38	720	2.3E-07

重水素

1000/T (/K)	Temp (K)	K [cm ³ /s]
1.15	870	3.1E-06
1.15	870	2.8E-06
1.22	820	9.5E-07
1.29	770	3.1E-07
1.38	720	7.8E-08
1.38	720	5.8E-08

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(Ringsdorff : 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)

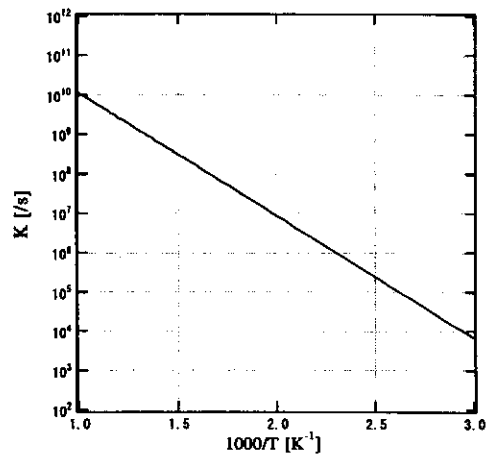
水素の再結合係数 : $K_1 = 14.4 \times 10^{12} \exp(-0.62/kT)$ [s] (適用温度範囲 :)

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

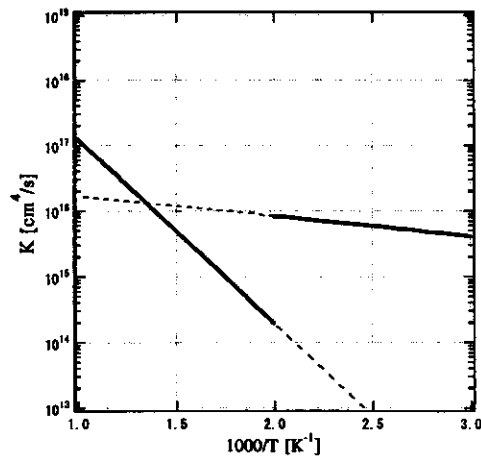
4. フィッティング結果 (上記論文に実験データ記述なし)

水素の再結合係数 : $K = 3.31 \times 10^{16} \exp(-0.06/kT)$ [cm³/s] (適用温度範囲 : < 500 K)

$K = 8 \times 10^{19} \exp(-0.56/kT)$ [cm³/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。



NIFS-MEMOシリーズ出版リスト
(Recent Issues of NIFS-MEMO Series)

- NIFS-MEMO-19 K. Itoh (ed.),
Study on Sawtooth and Transport in Part of Japan-TEXTOR Collaboration 1995; Feb. 1996
- NIFS-MEMO-20 編集責任、核融合科学研究所、太刀川恭治、山本純也、
「核融合科学研究所共同研究、核融合炉用先進超伝導体、研究調査報告書 Nb₃Sn系超伝導体」
Editors: K. Tachikawa and J. Yamamoto,
"Studies on Advanced Superconductors for Fusion Device" Part 1 - Present Status of Nb₃Sn Conductors -, Mar. 1996 (In Japanese)
- NIFS-MEMO-21 飯吉厚夫、藤原正巳、岡本正雄、大藪修義、金子修、笹尾眞貴子、須藤滋、菅野龍太郎、武藤敬、村上定義、竹入康彦、富田幸博、
山崎耕造
「LHDにおけるD-³He核融合の検討」
A. Iiyoshi, M. Fujiwara, M. Okamoto, N. Ohyabu, O. Kaneko, M. Sasao, S. Sudo, R. Kanno, T. Mutoh, S. Murakami, Y. Takeiri,
Y. Tomita and K. Yamazaki,
"Studies on D - ³He Fusion in LHD", Mar. 1996 (In Japanese)
- NIFS-MEMO-22 編集責任、核融合科学研究所、太刀川恭治、山本純也、三戸利行
「核融合科学研究所共同研究、核融合炉用先進超伝導体、研究調査報告書 2先進金属系超伝導体」
Editors: K. Tachikawa, J. Yamamoto and T. Mito,
"Studies on Advanced Superconductors for Fusion Device" Part 2 - Metallic Superconductors other than Nb₃Sn -, Mar. 1997 (In Japanese)
- NIFS-MEMO-23 K. Itoh (ed.), S.-I. Itoh, U. Stroth, T. Iwasaki, M. Yagi and A. Fukuyama,
"Discussion Record of the Workshop on Nonlocal Transport" June 1997
- NIFS-MEMO-24 Collapse, Terminating Eventsの物理
日本物理学会 シンポジウム 第52回年会 1997.3.29
"Physics of Collapse and Terminating Events" (In Japanese); July 1997
- NIFS-MEMO-25 中村浩章、池田一昭、山口作太郎
「強磁場中でのネルンスト素子の輸送現象とエネルギー変換」
H. Nakamura, K. Ikeda, S. Yamaguchi,
"Transport Phenomena and Energy Conversion of the Nernst Element in a Strong Magnetic Field" (In Japanese); Nov. 1997
- NIFS-MEMO-26 核融合科学研究所技術部
「平成9年度核融合科学研究所技術研究会
日時：1998年9月11日・12日 場所：セラトピア土岐」1998年3月
"Proceedings of Symposium on Technology in Laboratories by Department of Engineering and Technical Services" Mar. 1998
(In Japanese)
- NIFS-MEMO-27 編集責任、核融合科学研究所、太刀川恭治、三戸利行
「核融合科学研究所共同研究、核融合炉用先進超伝導体、研究調査報告書 3酸化物系超伝導体」
Editors: K. Tachikawa and T. Mito,
"Studies on Advanced Superconductors for Fusion Device, Part 3 - High-T_c Oxide Superconductors -", Mar. 1998 (In Japanese)
- NIFS-MEMO-28 陰山聡、佐藤哲也
「VRシステムCompleXcopeプログラミングガイド」
A. Kageyama and T. Sato,
"VR System CompleXcope Programming Guide" ; Sep. 1998 (In Japanese)
- NIFS-MEMO-29 北内英章、木田重雄
「回転球殻内のMHDシミュレーションコードの開発」
H. Kitauchi and S. Kida,
"Numerical Code for an MHD Simulation in a Rotating Spherical Shell": Feb. 1999 (In Japanese)
- NIFS-MEMO-30 津田健三、山本孝志、加藤文雄、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
「プラズマ対抗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)