JAERI-Conf
2001-001

プラズマ・壁相互作用(PSI)及びプラズマ対向機器(PFC)合同研究会講演要旨集

2000年12月1日、那珂研究所、那珂町

2001年3月

NBI加熱研究室

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

編集兼発行　日本原子力研究所

JAERI－Conf 2001－001

プラズマ・壁相互作用（PSI）及びプラズマ対向機器（PFC）合同研究会講演要旨集
2000 年 12 月 1 日、那珂研究所、那珂町

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部
NBI 加熱研究室

（2001 年 1 月 18 日受理）

平成 12 年度のプラズマ・壁相互作用（PSI）及びプラズマ対向機器に関する合同研究会が、2000 年 12 月 1 日に那珂研究所において開催された。この研究会は、プラズマ対向機器の開発研究に従事している研究者とプラズマ・壁相互作用の研究者が一同に会して相互の情報交換と研究課題の整理を行うもので、今回は ITER、JT-60、LHD などの大型核融合装置におけるプラズマ・壁相互作用研究や機器開発研究、および核融合炉材料中における水素同位体挙動などに関する最新の研究成果を中心に合計 11 件の講演が行われた。本報告書は、講演要旨及び講演に使用された OHP をまとめたものである。

那珂研究所：〒311-0193　茨城県那珂郡那珂町向山 801-1

Proceedings of the Joint Meeting on Plasma Surface Interaction (PSI) and Plasma Facing Components (PFC)
December 1, 2000, Naka Fusion Establishment, Naka-machi, Japan

NBI Heating Laboratory

Department of Fusion Engineering Research
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 18, 2001)

The joint meeting on Plasma Surface Interaction (PSI) and Plasma Facing Components (PFC) was held in Naka Fusion Establishment on December 1, 2000. This meeting has been held to enhance information exchange between PSI and PFC researchers. In the present meeting, there were 11 presentations which covered current status of PSI and PFC studies for large fusion devices such as ITER, JT-60 and LHD, and basic studies on Hydrogen isotope behavior in the fusion material. This report includes abstracts and view graphs of these presentations.

Keywords: PSI, PFC, Tritium, ITER, JT-60, LHD, JFT-2M, Tungsten, Carbon, Divertor

目　　次

1. 研究会趣旨 ･･････ 1

2. セッション１（大型核融合装置における研究の現状）･･････ 3
2.1 LHD 実験の現状 ･･････ 5
核融合科学研究所　野田　信明
2.2 JT-60 ダイバータタイル上のベリリウム分布 ･･････ 16
日本原子力研究所　正木　　圭
2.3 JFT-2M における低放射化フェライト鋼の真空容器内設置及びボロンコーティングの影響 ･･････ 23
日本原子力研究所　都築　和泰
2.4 ITER ダイバータ開発の現状 ･･････ 34
日本原子力研究所　佐藤　和義

3. セッション２（基盤技術開発における研究の現状）･･････ 45
3.1 イメージングプレートによるトリチウム検出 JT-60U 協力研究に向けての新技術紹介 ･･････ 47
名古屋大学　田辺　哲朗
3.2 BIXS 法によるトリチウムの拡散挙動の追跡－タングステン材料－ ･･････ 61
富山大学　松山　政夫
3.3 紫外線（光／レーザー）によるトリチウム除染 ･･････ 67
日本原子力研究所　洲　　亘
3.4 純トリチウムイオンビームを利用した PSI 研究 ･･････ 79
日本原子力研究所　中村　博文
3.5 水素濃度による黒鉛中の水素拡散係数の変化 ･･････ 88
近畿大学　渥美　寿雄
3.6 中性粒子の直接測定による低エネルギーイオン散乱解析 ･･････ 97
名古屋大学　森田　健治
3.7 定常高粒子束ビーム装置の開発と材料照射試験 ･･････ 110
大阪大学　上田　良夫

付録 ･･････ 119

Contents

1 Opening ········· 1

2 Session 1 (PSI and PFC Studies in Large Fusion Devices) ········· 3
2.1 Current Status of the LHD Experiments ········· 5
N. Noda (National Institute for Fusion Science)
2.2 Beryllium Distribution on the JT-60 Divertor Tiles ········· 16
K. Masaki (Japan Atomic Energy Research Institute)
2.3 Influence of Installation of Reduced Activation Ferritic Steel and Boronization in the JFT-2M Vacuum Vessel ········· 23
K. Tsuzuki (Japan Atomic Energy Research Institute)
2.4 Current Status of the ITER Divertor Developments ········· 34
K. Sato (Japan Atomic Energy Research Institute)

3 Session 2 (Basic Studies on PSI and PFC) ········· 45
3.1 Detection of Tritium by an Imaging Plate - New Technology Proposal for the Collaborative Research with JT-60U - ········· 47
T. Tanabe (Nagoya University)
3.2 Investigation of Tritium Diffusion Behavior by BIXS Technique - Tungsten Material - ········· 61
M. Matsuyama (Toyama University)
3.3 Tritium Removal by Ultra Violet Light and UV Laser ········· 67
W. Shu (Japan Atomic Energy Research Institute)
3.4 Results of Plasma Surface Interaction with Tritium Ion Beams ········· 79
H. Nakamura (Japan Atomic Energy Research Institute)
3.5 Effect of Hydrogen Concentration on Hydrogen Diffusion Coefficient in Graphite · 88
T. Atsumi (Kinki University)
3.6 Analysis of Low Energy Ion Scattering by Means of Direct Measurement of Neutral Particles ········· 97
K. Morita (Nagoya University)
3.7 Development of Steady-state High-particle-flux Irradiation Device and Preliminary Test Results ········· 110
Y. Ueda (Osaka University)

Appendix ········· 119

１．研究会趣旨

本会合は、プラズマ対向機器の開発研究に従事している研究者とプラズマ・壁相互作用の研究者が一同に会して相互の情報交換と研究課題の整理を行う目的で、年３回程度の割合で１０年以上にわたり開催されてきたもので、この分野での研究の発展に大いに貢献して参りました。この度は平成 12 年度第 2 回 PSI･PFC 合同研究会を日本原子力研究所を会場として平成 12 年 12 月 1 日に開催致しました。

今回は原研での開催ということもあり、基礎・基盤技術研究の現状に加え、JT-60、ITER や LHD などの大型装置における研究開発のセッションを設け最新の研究成果についてご講演を頂きました。研究会は、

１．大型核融合装置

２．基盤技術開発

の２テーマを中心に企画され、11 編の最新の研究成果が発表されました。特に、ＪＴ－６０やＪＦＴ－２Ｍなど原研におけるＰＦＣ、ＰＳＩ研究の成果が紹介されるとともに、核融合科学研究所や大学からはＬＨＤの最近の成果やＰＳＩ関連研究の新しい成果が報告されました。研究会では、大学はもとより企業を含む多くの研究機関から 30 名を越える参加者があり、極めて活発な議論が交わされました。

この資料集は各研究発表のアブストラクトと OHP、プログラム等を収録したもので、研究会で報告された最新の研究成果をこれからの研究に活用して頂くための一助となれば幸いです。

平成 12 年 12 月

研究会世話人
野田信明
吉田直亮
田辺哲朗
秋場真人

This is a blank page.

２．大型核融合装置における研究の現状

This is a blank page.

2.1 LHD実験の現状

核融合科学研究所　　野田信明

LHD実験は３年目に入り，より高い加熱入力，プラズマパラメータ，より長時間の放電を目指し，種々の物理実験を織り込みながら実験を続けています。１１月２４日現在で，ICRF単独加熱において2.4MW入射，蓄積エネルギー240 kJ，NBI長時間加熱で1MW，密度 $4 \times 10^{19}/m^3$, 25秒という，昨年度を１歩超えるレベルの放電を実現しています。

この講演ではその状況も含みつつ，主として９８年から９９年にかけてのダイバータ設置とそれに伴うプラズマ実験の進歩についてまとめ，報告します。また，１年間の実験後に取り出されたダイバータ板，カーボンタイルの分析結果について、相良らによって得られた最近の成果を紹介します。

LHDダイバータは９８年の実験後に設置が完了し，９９年の第３サイクル実験から本格的に使用が開始されました。コイルと同ピッチのヘリカルらせん構造をもち，ダイバータトレースに沿って1742枚の等方製黒鉛が設置され，総面積は約 $10m^2$，プラズマ対向壁の面積のおよそ４％を占めています。ダイバータ設置後のプラズマ挙動にはいくつかの顕著な変化が見られました。列挙すると，

1）　設置後の実験開始直後には鉄不純物の放射強度が1/10以下に減少，
2）　鉄不純物放射強度は半年の実験期間中徐々に上昇を続けた，
3）　長時間放電において密度上限の一因となっていた"breathing" oscillation が起こらなくなり，同一条件での密度上限が $1 \times 10^{19}/m^3$ から $6 \times 10^{19}/m^3$ に上昇した，

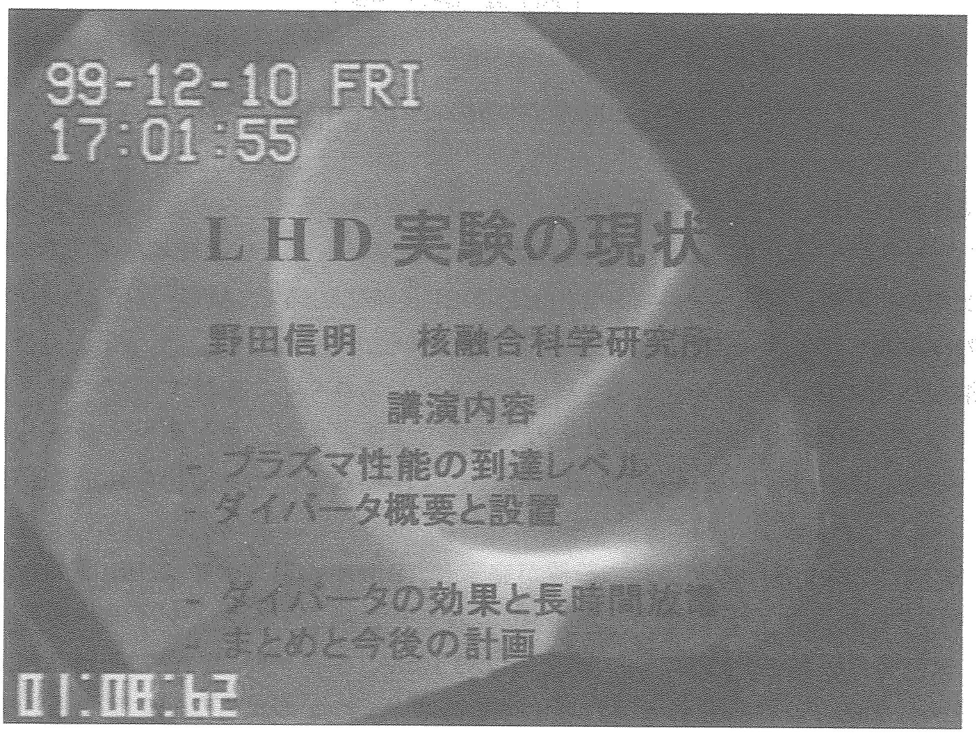
などであり，さらにダイバータ板による真空容器保護が完成した事により，

4）　５MWまでの大電力加熱，８０秒までの長時間放電が可能

となりました。この中で，１）はヘリカル型装置においてもプラズマと壁との相互作用はダイバータで支配的であることをはじめて明瞭な形で示した結果であり，複雑な３次元形状にも関わらず, striking point 領域をダイバータ板でほぼ100％カバーする事に成功したことを証明するものです。

実験終了後取り出された黒鉛タイルの分析を現在進めています。タイル表面には目視でもダイバータレグのフットプリントが認められます。EDS，RBS等の分析によると，黒鉛表面の全面にわたって鉄不純物が見られていますが，これは毎夜行われたグロー放電中にダイバータ以外のSS鋼第一壁からスパッタされ堆積したものであるということで理解できます。また，磁場構造計算とタイル表面の損耗，堆積構造分析を比較する事により，目視で観察された構造は主放電プラズマによる損耗，再堆積の結果であることも明確に示されました。ただし，鉄不純物と炭素の損耗，再堆積結果はミクロに見ると複雑な様相をしており，鉄はむしろ堆積した炭素の層の陰の部分に多い事もわかりました。すなわち主プラズマが接する領域の大部分は実験末期においても依然として炭素が主である事を示す結果です。これと上記２）の結果がどのように統一的に理解できるかは今後の検討に待つ必要があります。

今期のLHD実験は2001年２月半ばまで継続され，その間に６～８MWの短パルス加熱による新領域達成，５分放電と実時間磁場スキャンなどを目指します。その後はNBI装置１基の増設による加熱入力増力を行い，２００１年の実験へと進む予定となっています。



Hardware system in 1999

- Field strength 1.5 ⇨ 2.75 T (max. 2.89)
  magnetic axis R_{ax} = 3.75 ⇨ 3.6 m
- Heating power (< 4 sec. short pulse)
  NBI 3 ⇨ 4.2 MW
  ICRF 0.6 ⇨ 1.4 MW
  ECH 0.4 ⇨ 0.9 MW
- Full toroidal helical divertor (carbon)
- Diagnostics

Dec.1, 2000　　12年度第2回PSI合同研究会　　N. Noda 2

Achieved plasma parameters

(short pulse)

	T_e (kev)	T_i (kev)	τ_E (s)	P_{heat} (MW)	$\overline{n}_e$ ($10^{19}/m^3$)
High T_e	4.4	2.7	0.06	1.8	0.53
High T_i	3.3	3.5	0.09	3.9	1.0
High τ_E	1.1	-	0.3	2.0	-

Highest $n\tau T$ 2.0×10^{19} keVs/m^3

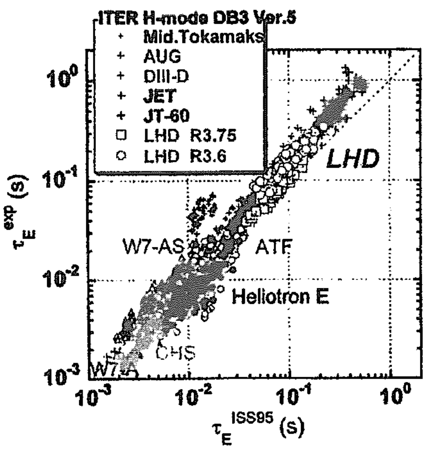
Max. stored energy 0.88 MJ

Highest beta 2.4 % at B =1.3 T

Max. density 1.1×10^{20} /m^3

Dec.1, 2000 12年度第2回PSI合同研究会 N. Noda 3

Confinement scaling



- follows ISS95

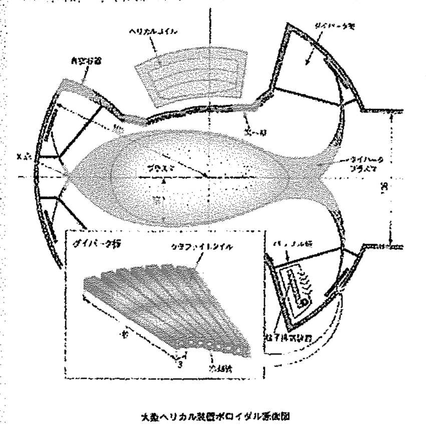
- ~ 50 % better

(R_{ax}= 3.6 m)

$$\tau_E^{ISS95} = 0.08\, a^{2.21} R^{0.65} P^{-0.59} \overline{n}_e^{0.51} B^{0.83} \iota_{2/3}^{0.40}$$

Dec.1, 2000 12年度第2回PSI合同研究会 N. Noda 4

Features & requirements for LHD divertor

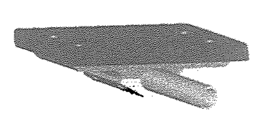


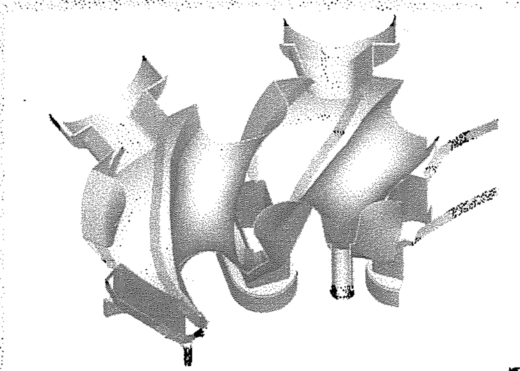
- Double null, 4 legs
- Helically running, 3-dimensional
- Direction of mag. field lines at striking point is poloidal → Discrete bar array

- Heat load
  10s pulse 5 MW/m^2
  steady state 0.75 MW/m^2

Dec.1, 2000 12年度第2回PSI合同研究会 N. Noda 5

Divertor Element →
graphite armor + copper heat sink
bolted to stainless steel cooling pipe
typical size 250 x 100 x 12



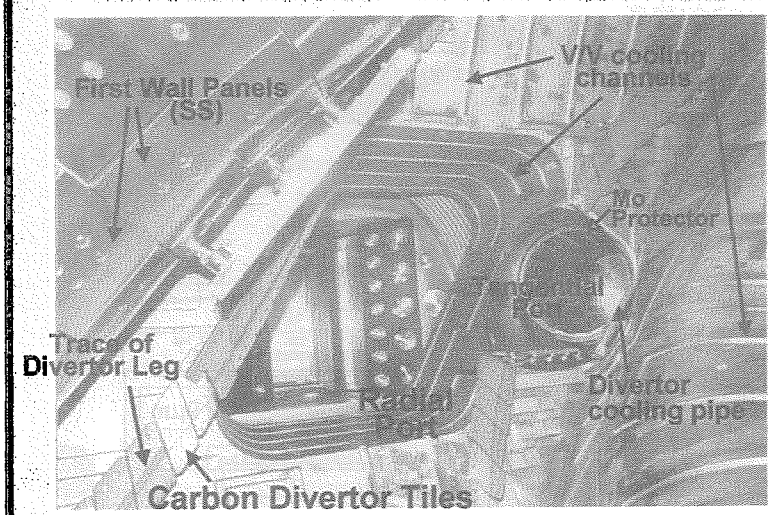


1 unit
poloidal angle 180°

40 units in total
number of C tiles
--- around 1700

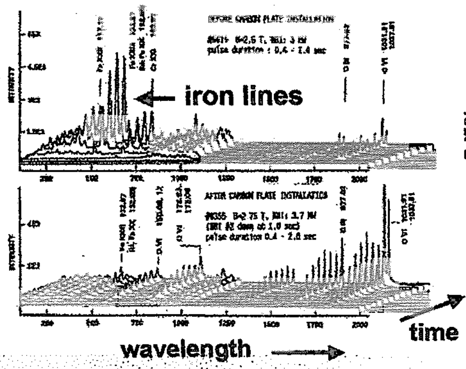
Dec.1, 2000 12年度第2回PSI合同研究会 N. Noda 6

Inside view of the Vacuum vessel

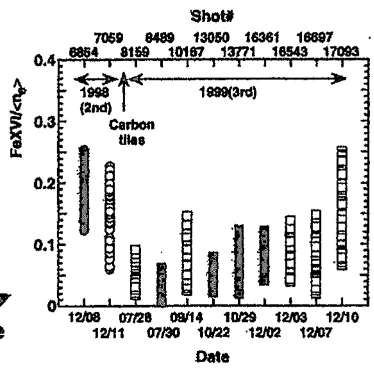


Dec.1, 2000 12年度第2回PSI合同研究会 *N. Noda* 7

Iron impurity decreased after carbon divertor installation, but gradually recovered



Impurity line intensities w/o (top) and with (bottom) carbon divertor
after Kuninori Sato



Change in Fe XVI during the '99 Exp.
after Shigeru Morita

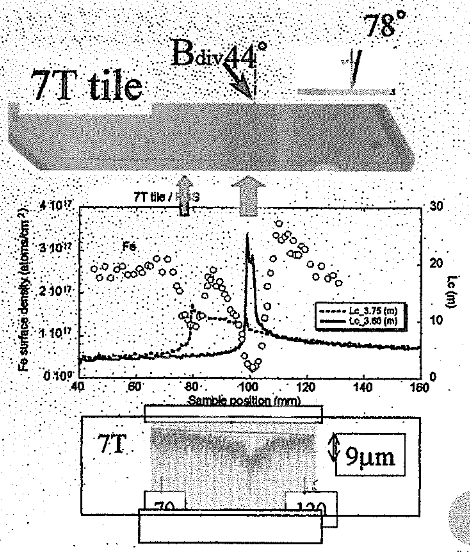
Dec.1, 2000 12年度第2回PSI合同研究会 *N. Noda* 8

Feは主にGDC(積算2,300時間)によるSUS第1壁からの再付着による。

磁気軸3.6mと3.75m(全ショットの17%でサイクル終盤でも実施)のLcによく一致する。

Fe量の極大は局所再堆積によると推定できる。

スパッタ損耗はSEM観察でも確認できた。



A.Sagara / NIFS

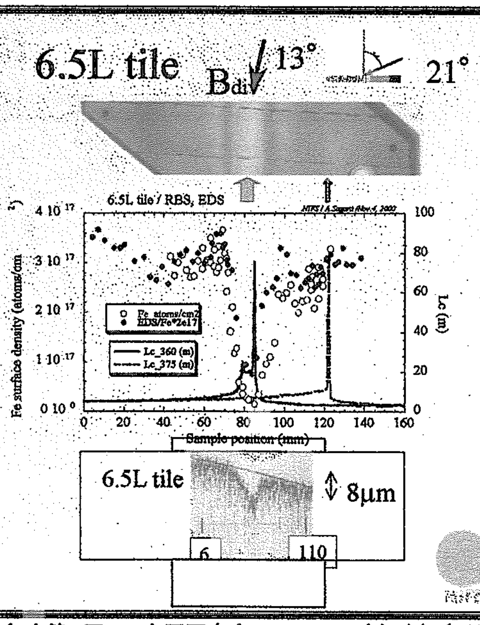
Dec.1, 2000 12年度第2回PSI合同研究会 *N. Noda* 9

RBSとEDS分析は良く一致している。

約3×10^{17} Fe 原子/cm²は約100原子層であるが、一様な被覆層ではない。
(→形態分析)

約8μmの浸食は黒鉛の約10^{-3}の物理スパッタ率でよく説明できる。
(→IR-TV<100° C)

タイル近傍の表面サンプルに顕著な炭素堆積が認められた。

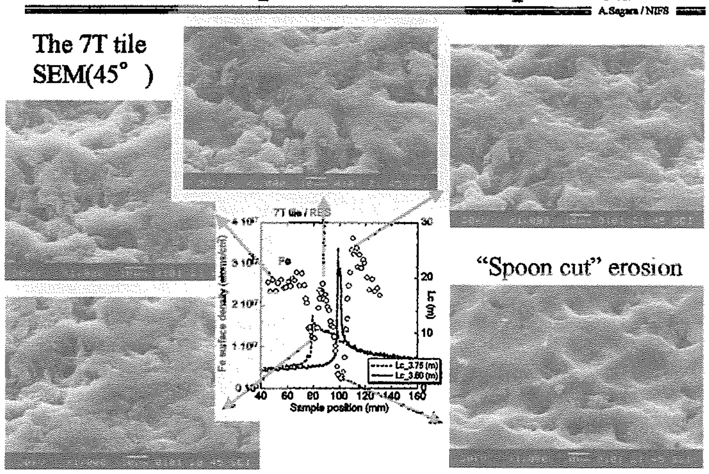


A.Sagara / NIFS

Dec.1, 2000 12年度第2回PSI合同研究会 *N. Noda* 10

Microscopic surface morphology

A.Sagara / NIFS

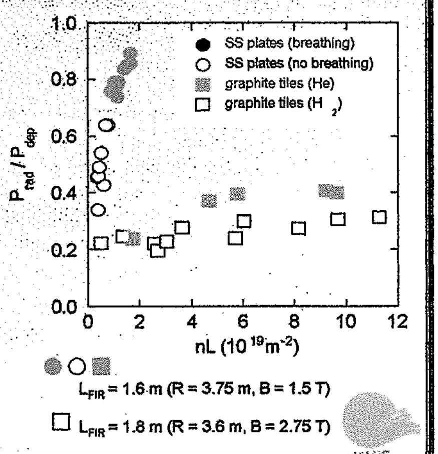


Dec.1, 2000 12年度第2回PSI合同研究会 N. Noda11

Ratio of radiated power to deposited power

after Yukio Nakamura

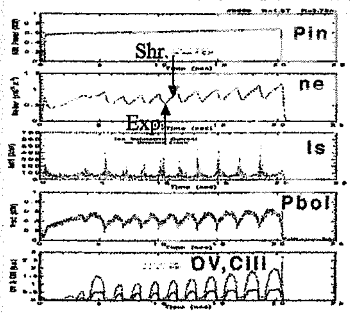
- With SS divertor plates, radiation rapidly increases with the density.
- Operational regime is limited by a relaxation oscillation phenomenon "breathing".
- After installation of graphite tiles, a remarkable reduction of radiation is observed.
- Radiated fraction increases with the density and saturates in high density region.
- Difference between He and H_2 discharges may be caused by the magnetic configuration and field.

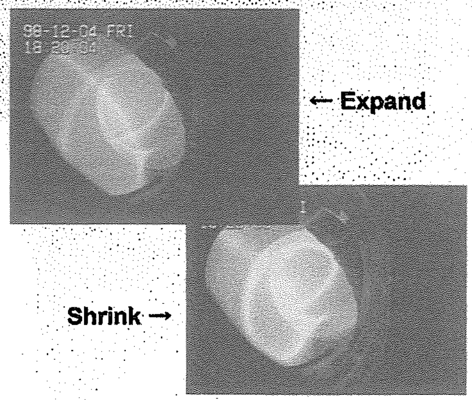


Dec.1, 2000 12年度第2回PSI合同研究会 N. Noda12

NBI Long Pulse with "Breathing"

NBI 21 sec. with 1.5T
Slow Oscillation





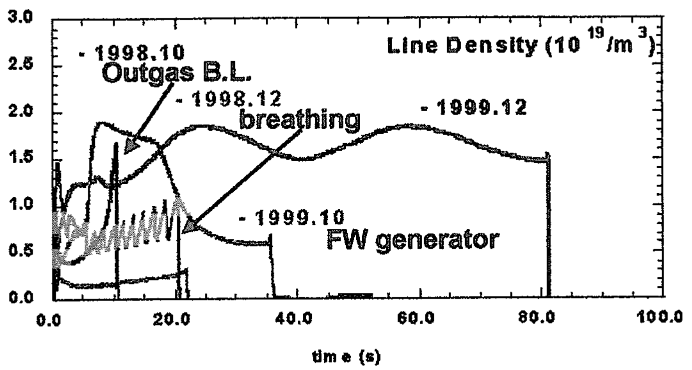
Tangential View
With CCD Camera

Dec.1, 2000 12年度第2回PSI合同研究会 *N. Noda*13

Progress in NBI shots

1998 w/o carbon divertor, 1.5 T
1999 full carbon divertor, 2.75 T

0.5 - 1 MW



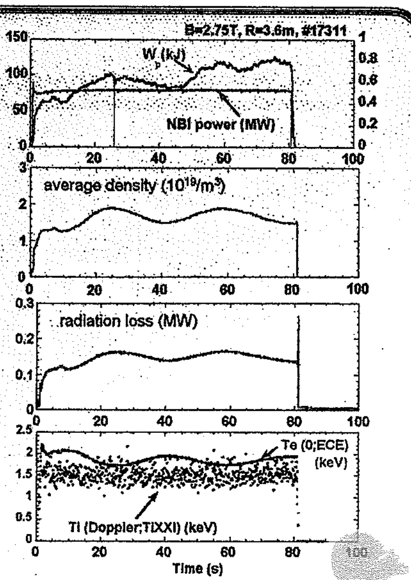
Dec.1, 2000 12年度第2回PSI合同研究会 *N. Noda*14

NBI Long Pulse Discharge 99.12.14

0.5 MW, B=2.75T, R=3.6 m sustained for 80 sec.

T_{e0}~T_{i0} ~ 1.5~1.8 keV

$\langle n_e \rangle$ ~ 1.5~2.0 x $10^{19}/m^3$

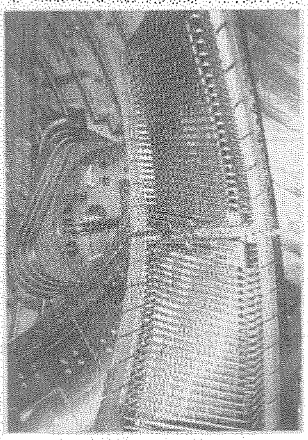


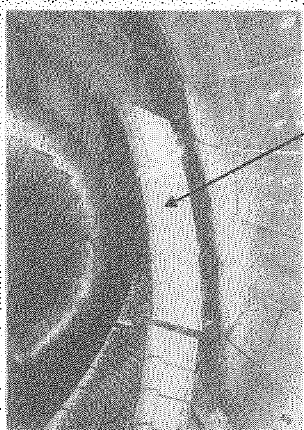
⇐ Tangential View of Plasma at 80 sec.

Dec. 1, 2000 12年度第2回PSI合同研究会 *N. Noda* 15

RF antenna

2 x ¼ turn, high field side, water cooled, radially movable

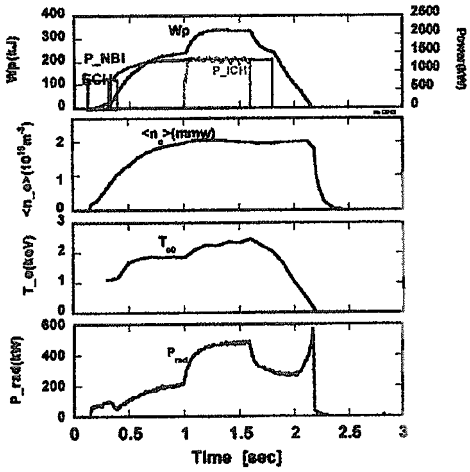




carbon protector

Dec. 1, 2000 12年度第2回PSI合同研究会 *N. Noda* 16

ICRF is effectively heating NBI plasma



- 2.75 T, R_{ax} = 3.6 m
- f =38.47 MHz

  He + H minority

  He-puff only

  H from NB & wall
- P_{rf} ~ 1.3 MW

  $\overline{n}_e$ ~ 2 x 10^{19}/m^3

  T_e, T_i ~ 2 keV

  ΔW_p ~ 200 kJ

Dec.1, 2000 12年度第2回PSI合同研究会 *N. Noda* 17

ICRF Long Pulse Discharge 99.12.10

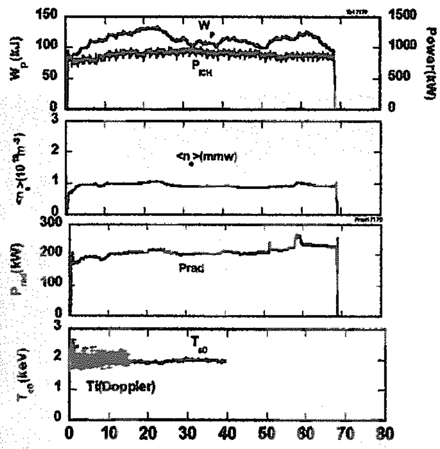
0.9 MW, B=2.75 T

He + H minority 38.47 MHz

sustained for 68 sec.

T_{eo}~T_{i0} ~ 2 keV

$\langle n_e \rangle$ ~ 1 x 10^{19}/m^3



Limited by minor trouble in power source

Dec.1, 2000 12年度第2回PSI合同研究会 *N. Noda* 18

まとめ

- プラズマ性能向上 ダイバータ設置が有効
- 閉じ込め性能は ISS95 に従う。50 %程度よい
- ダイバータ設置により金属不純物減少
  その後半年間の実験中に次第に増加
- ダイバータ・フットプリント部解析結果
  striking point 付近の炭素は損耗
  鉄不純物堆積ただし“谷”の部分に多い
  プラズマの接する部分は炭素が主

Dec.1, 2000 *12年度第2回PSI合同研究会* *N. Noda*19

2000 年実験および今後の計画

- 加熱入力増強
  NBI > 6 MW in FY2000
  new NBI system in FY 2001
  5 ICRF antennae in FY2000, > 2 MW
- 今年度中にBoronization
- Longer pulse operation
  (1) 5 min. for physics experiment
  (2) toward 1 hour discharge

Dec.1, 2000 *12年度第2回PSI合同研究会* *N. Noda*20

2.2 JT-60 ダイバータタイル上のベリリウム分布

^{7}Be distribution on the divertor tile of JT-60

正木　圭、児玉　幸三、柳生　純一、笹島　唯之、宮　直之

日本原子力研究所　那珂研究所

1．はじめに

臨界プラズマ試験装置（JT-60）では、定期的にゲルマニウム検出器を用いて、第一壁及びダイバータタイルの放射能測定を行っている。JT-60 運転開始以来、ベリリウム（^{7}Be）が常に検出され、重水素運転開始後の測定ではポロイダル方向に非対称に分布していることがわかっている。しかし、その生成過程、非対称分布発生機構については、十分には理解されていなかった。ここでは、重水素運転でのベリリウムを継続的に測定した結果について紹介する。

2．ダイバータ部のベリリウムポロイダル分布

図１に JT-60 の断面図とオープンダイバータを示す。また、図２にオープンダイバータ部のベリリウムポロイダル分布を示す。JT-60 では、酸素不純物量及び水素リサイクリング量の低減のために、デカボラン（$B_{10}H_{14}$）を用いたボロナイゼーションを定期的に実施し、第一壁及びダイバータタイル表面にボロンを～200nm 程度コーティングしている［1］。また、同様の目的でダイバータ外側の f 列（1992 年 12 月：～100μm）、e 列（1993 年 12 月：～300μm）にトロイダル方向一周に渡って B_4C タイルを設置した［2］。その結果、タイル表面上のベリリウム量が急増し、ベリリウムの生成にはボロンが深く関わっていることがわかった。このことより、天然ボロン中に含まれる ^{10}B と D-D 反応により生成されるプロトンとの反応（$^{10}B(p,\alpha)^{7}Be$ ）によりベリリウムが生成されたと考えられる。また、外側ダイバータタイルに B_4C タイルを設置したにもかかわらず、内側ダイバータのベリリウム濃度が高いことから、外側ダイバータから内側ダイバータへの不純物輸送が存在する可能性がある。真空容器内観察結果においても外側と比較して内側に堆積物が多いことが報告されている［3］。今後、高エネルギープロトンの軌道を考慮した非対称性分布の評価、及びタイルの表面分析を行ってボロン残留量の評価を行っていく予定である。

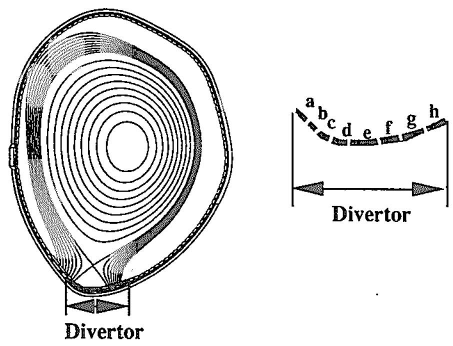


図１ JT-60断面図

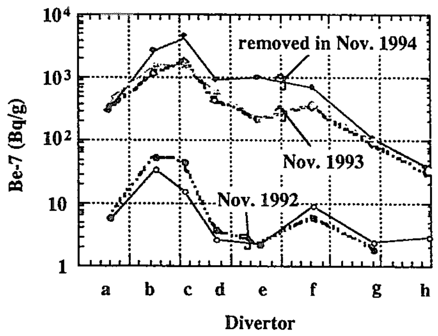


図２ベリリウムポロイダル分布

［1］J. Yagyu et al., J. Nucl. Mater. 241-243 (1997) 579-584

［2］T. Ando et al., J. Nucl. Mater. 220-222 (1995) 380-384

［3］正木　圭、他　プラズマ・核融合学会誌　Vol.74、No.9 (1998)、pp.1048～1053

JT-60 ダイバータタイル上のベリリウム分布

原研（那珂）
○正木　圭、児玉　幸三、柳生　純一、笹島　唯之、宮　直之
MASAKI Kei、KODAMA Kozo、YAGYU Junichi、SASAJIMA Tadayuki、Miya Naoyuki

序論

臨界プラズマ試験装置（JT-60）では、定期的にゲルマニウム検出器を用いて第一壁及びダイバータタイルの放射能測定を行っている。JT-60運転開始以来、 ^{7}Beが常に検出され、ポロイダル方向に非対称に分布していることがわかっている。しかし、その生成過程、非対称分布発生機構については、十分に理解されていなかった。

そこで、検出された ^{7}Beの濃度、その分布をもとに生成過程、分布発生機構について議論する。

JAERI

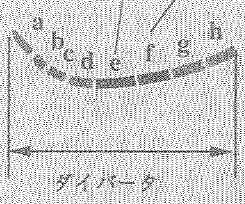
JT-60ダイバータに関する運転履歴

～1991年～	1992年7月	1992年12月	1993年12月	1997年2-5月	1998年12月
大電流化改造	デカボランを用いたボロナイゼーション開始	f列ダイバータにB_4Cタイル設置	e列ダイバータにB_4Cタイル設置	ダイバータ改造 内側排気	ダイバータ外側排気設置 両側排気
	以後、年２回程度ボロナイゼーション実施				
オープンダイバータ				W型ダイバータ	

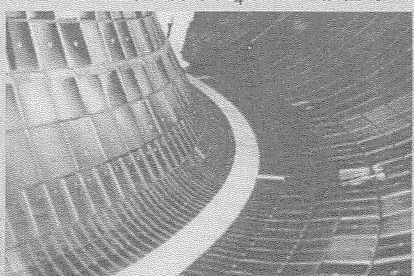
JAERI

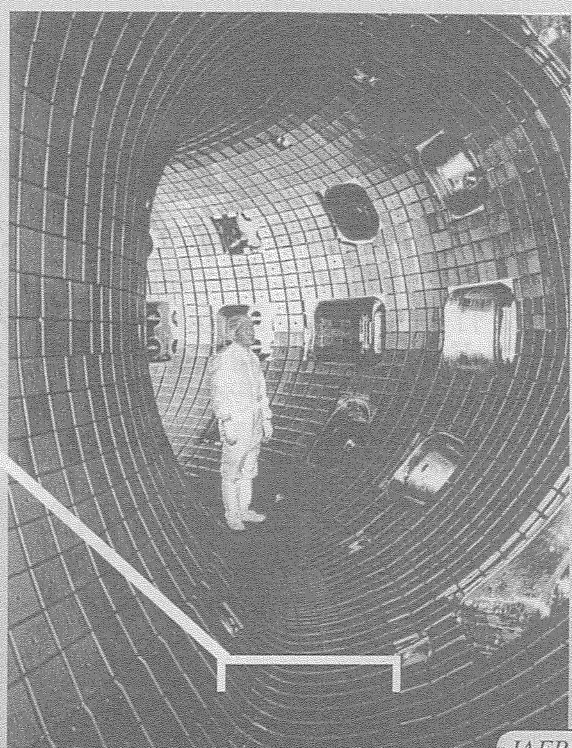
JT-60真空容器内

1991年4月 ～1997年1月



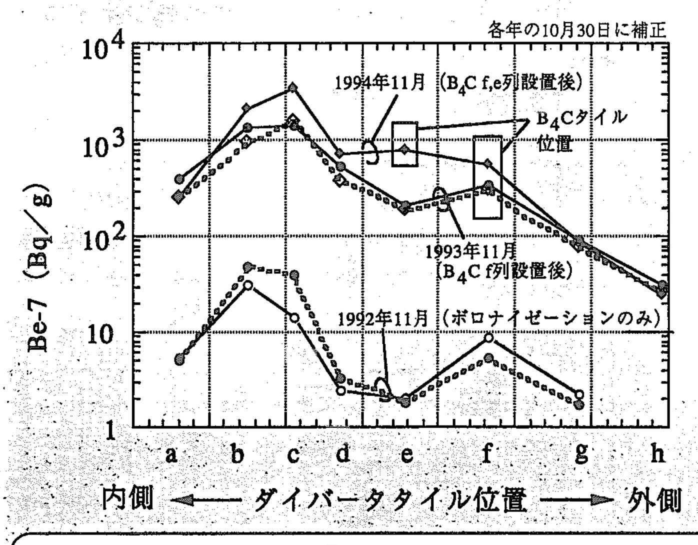
1993年12月e列B_4Cタイル設置時

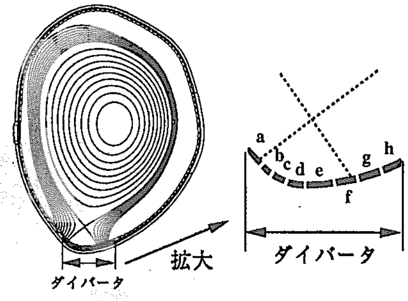




JAERI

^{7}Be ポロイダル分布（オープンダイバータ）



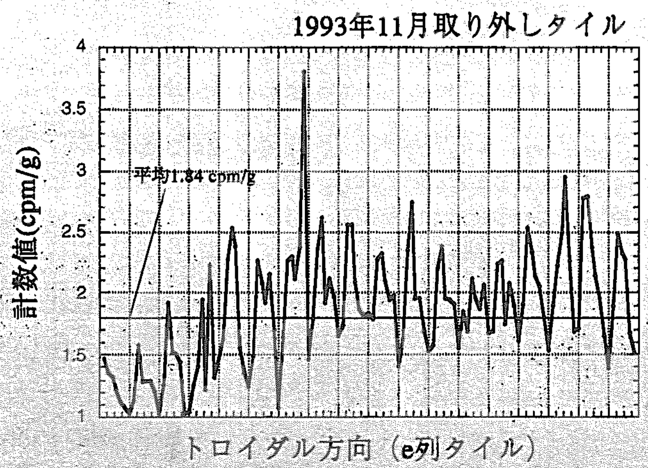


- ボロナイゼーション1992年7月に開始、その後年2回 程度実施（膜厚～200nm/回）
- <1992年12月> f列にB_4Cタイル設置（膜厚～100μm）
- <1993年12月> e列にB_4Cタイル設置（膜厚～300μm）

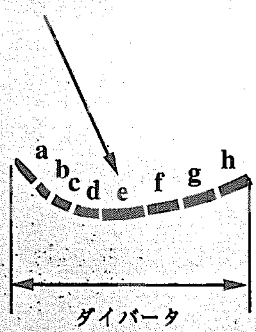
B_4Cタイルを設置後、^{7}Be発生量が約100倍増大した。
→ ボロンが関与している可能性
ボロン源は外側にしかないが、内側列の濃度高
→ 拡散のメカニズム寄与の可能性

JAERI

^{7}Be トロイダル分布（オープンダイバータ）



e列タイルをトロイダル方向に全周測定

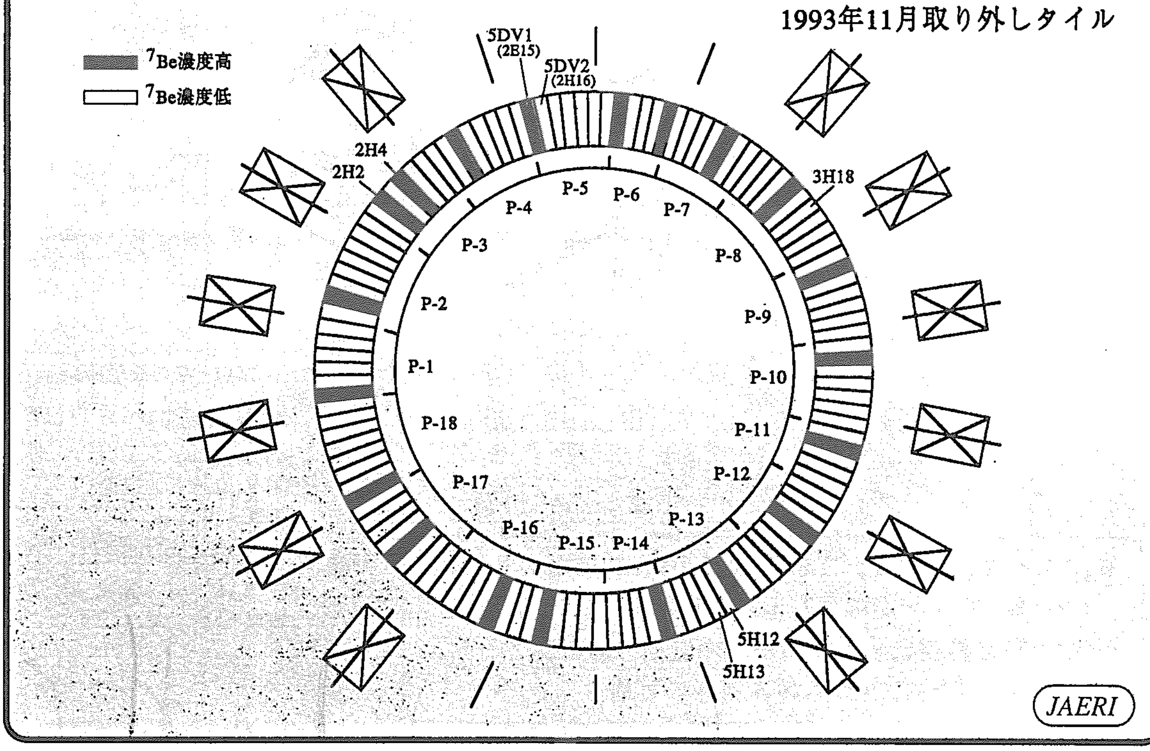


ベリリウムはトロイダル方向に周期的に分布している。
→ トロイダル磁場コイルのリップルの影響を受けている可能性

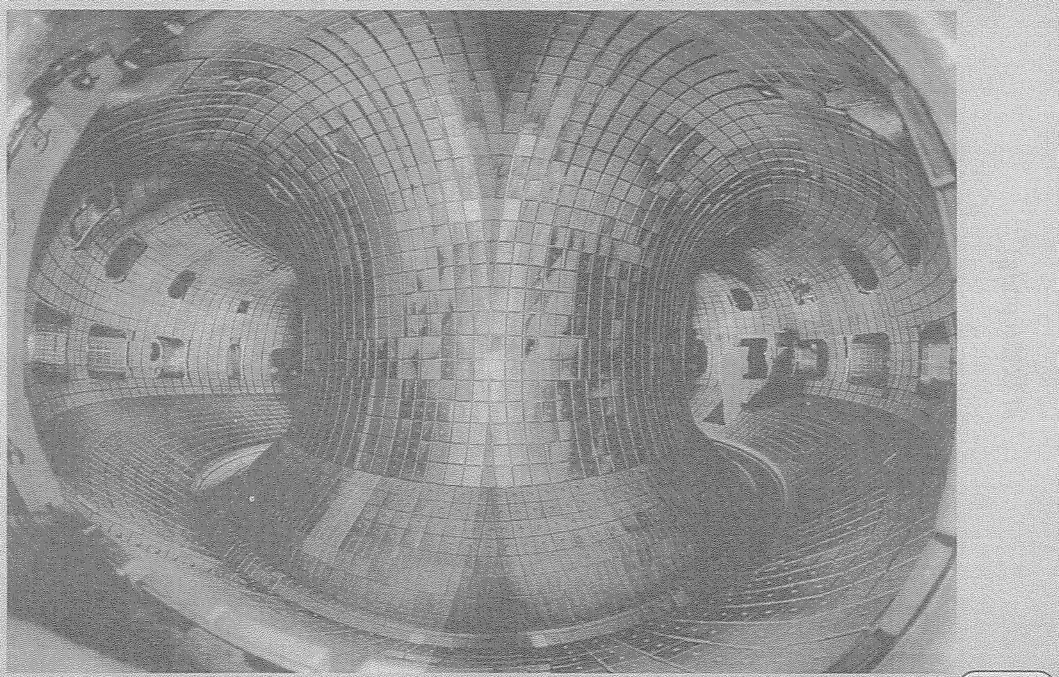
JAERI

^{7}Be トロイダル分布（オープンダイバータe列展開図）

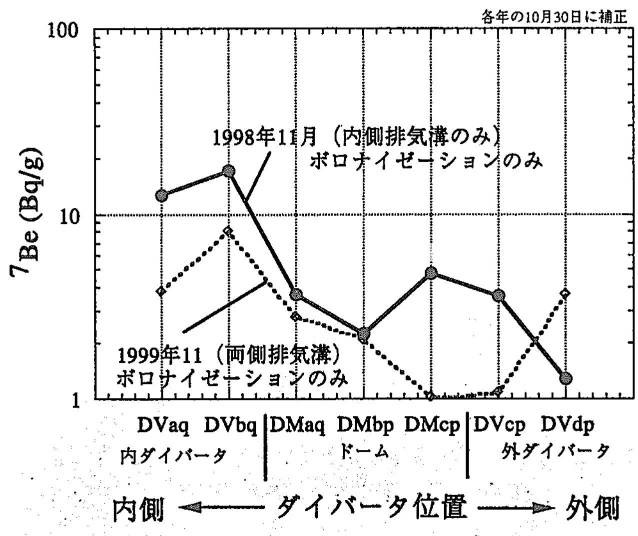
1993年11月取り外しタイル

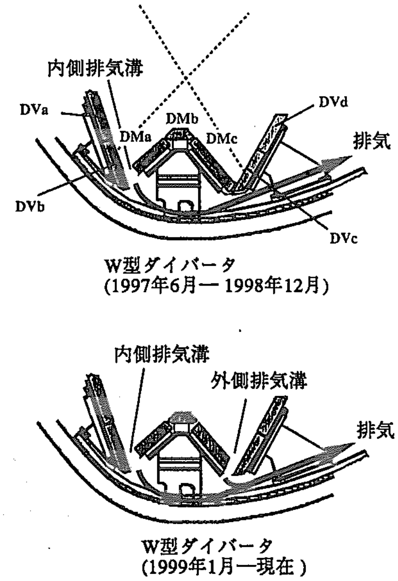


JT-60真空容器内　（W型ダイバータ：1997年6月～現在）



Be-7 ポロイダル分布（W型ダイバータ）





7Beの濃度はオープンダイバータと同程度である。

内外非対称性の変化 ——→ 外側排気溝設置の影響の可能性

JAERI

^{7}Beのおもな生成反応

生成反応	反応断面積（barn）	照射粒子のエネルギー（MeV）
^{10}B (p,a)	0.210	1.53
^{12}C (γ , na)	0.446 x 10 $^{-3}$	38.8
^{12}C (^{3}He,4p4n)	0.100	17.5
^{7}Li (p,n)	0.580	2.25
^{6} Li (d,n)	0.039	0.35
^{9}Be (p,p2n)	0.015	41
^{14}N (p,2a)	0.045	20.5

JAERI

^{7}Beの生成過程、分布発生機構

● B_4Cタイル設置により、 ^{7}Be発生量増加（約100倍）

^{10}B (p,a) ^{7}Be ：D-D反応及びICRFにより生成された高エネルギープロトンとの反応による。

D＋D → T＋p (3MeV)　　　ICRF

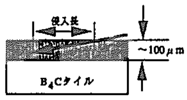
D＋D → ^{3}He＋n　　　p：～数MeV

ダイバータ部には高エネルギープロトンが侵入するに十分なボロン層厚が存在。

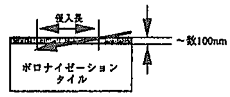
B_4Cタイル：100μm～300μm

ボロン中の3MeVプロトン飛程：～100μm

1MeVプロトン飛程：～20μm



飛程：～数10μm



ボロン層：～数100nm

^{7}Be発生量の急増
（約100倍）

生成された高エネルギープロトンの一部がダイバータ部に流れている可能性。

プラズマ中で生成される ^{7}Be量について評価が必要。

● 非対称性分布： 内側の^{7}Be濃度が高く、外側が低い。B_4Cタイルは外側に設置。

外側ダイバータのボロン又はベリリウムが内側に堆積している可能性。

外側から内側への拡散のメカニズムが存在。

JAERI

結論

^{7}Beの発生

⟶ ^{7}Beは ^{10}B (p,a) ^{7}Be より生成

主に、タイル上に存在するボロン層に高エネルギープロトンが入射されて生成された可能性。

非対称性分布

⟶ 外ダイバータのボロン又はベリリウムが内側に堆積している可能性

外側ダイバータから内側への不純物輸送

課題

高エネルギープロトンの軌道を考慮した非対称性分布の評価

ダイバータタイルの表面分析

タイル表面の付着層分布

タイル表面のボロン残留量の検証

JAERI

2.3 JFT-2M における、低放射化フェライト鋼の真空容器内設置及びボロンコーティングの影響

都筑和泰、伊世井宣明、川島寿人、佐藤正泰、木村晴行、小川宏明、三浦幸俊、小川俊英、柴田孝俊、秋山隆、岡野文範、鈴木貞明、山本正弘、宮地兼吾、JFT-2M グループ

はじめに JFT-2M においては、核融合炉構造材の有力な候補材料である低放射化フェライト鋼、F82H、とプラズマとの適合性を調べる実験を段階的に行ってきている。第1段階ではフェライト鋼を真空容器の外部に設置し、フェライト鋼によるリップル低減の効果を実証した[1]。

第2段階では、最終段階の真空容器内壁の全面フェライト化（原型炉の炉壁の模擬）の前段階として、フェライト鋼板（FB）を真空容器内に部分的に設置した（厚さ 7mm）。トロイダル方向に一様（全 32 セクター）設置することでリップルへの影響を抑え、プラズマへの磁気的影響をリップル率と区別して評価出来るようにした。また、設置面積を真空容器内壁全体の約 20%に抑えることで、真空特性を予備的に評価する。なお、リップル低減用の真空容器外部のフェライト鋼はそのまま取り付けられている。さらに、プラズマ壁相互作用の改善のためその場ボロン化設備を新設し、プラズマへの影響を評価した。

実験結果 H12 年 4 月より真空排気、放電洗浄を開始した。これまでと同様の手法によって（120℃ベーキング、及びテイラー放電洗浄）、設置前と同程度の到達真空度が得られた。H12 年 5 月よりプラズマ実験を開始したが、プラズマの生成、制御は従来とほぼ同様の手法で行うことが出来、不純物放出量は設置前と同程度であった。磁気的影響に関しては、プラズマ位置の評価、ロックトモード発生領域の評価を行い、悪影響がないことを確認した[2]。また、シングルヌルダイバータ配位では H モードも得られ、遷移エネルギーも装着前と大差がなかった。すなわち、フェライト鋼の磁気的影響、不純物発生とも、大きな問題とはならなかったと結論付けられる。

コーティング前のデータを一通り取得した後、6 月初旬に最初のコーティングを行った。その結果、酸素不純物低減（可視分光で 1/10 以下）、放射損失半減、密度限界 1.5 倍以上、H モード遷移パワー半減等、プラズマ性能は大きく改善された。ただし、室温で実験を行っていることもあり、密度制御は困難であった。また、水素リサイクリングの上昇によって、H モードが ELMy になる、MHD 揺動が生じる等の現象が生じた。

ボロン化後過去の最高値である β_N=2.7 のプラズマが生成出来た。フェライト鋼の存在下でも高規格化ベータプラズマが生成できるということが実証され、今後の安定性に関する実験に明るい見通しを与えた。

[1] H. Kawashima et. al., 18th IAEA Fusion Energy Conference (2000,Sorrent)
[2] N. Isei et. al., 14th ANS (2000, Utah)

PSI PFC合同研究会
2000.12.01　於　原研　那珂研

JFT-2M

JFT-2Mにおけるフェライト鋼真空容器内設置及びボロンコーティングの影響

原研那珂
都筑和泰、伊世井宣明、川島寿人、佐藤正泰、木村晴行、
小川宏明、三浦幸俊、小川俊英、柴田孝俊、秋山隆、
岡野文範、鈴木貞明、山本正弘、宮地謙吾、JFT-2Mグループ

内容

JFT-2M

- 全体計画
- 部分設置の目的、手法
- フェライト鋼からの不純物放出
- フェライト鋼の磁気的影響
- ボロン化の効果
- まとめ

低放射化フェライト鋼は核融合炉構造材料の有力候補

- フェライト鋼は強磁性体（Ms～2T）
  - 磁気的影響が懸念
  - 磁場リップル低減等によるプラズマ改善が期待
- 超高真空構造材としての実績小※
  - 錆びやすい
  - 不純物吸蔵が大きい

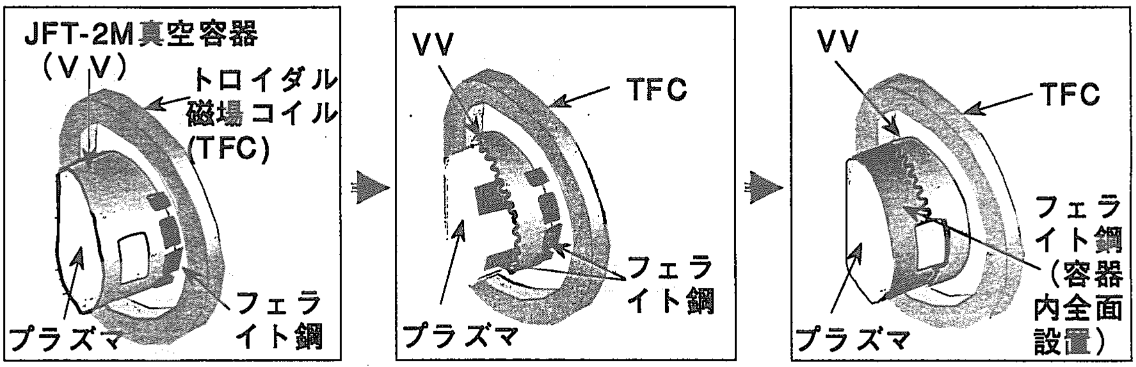
※日立のHT２トカマクで、オーミックプラズマとの適合性は実証済み

プラズマに悪影響を与えないことを実証し、むしろ高性能化に役立つことを示す。

先進材料プラズマ試験：AMTEX 3段階で実施

外部設置FBにより、リップル低減を試験

内部設置FBにより、プラズマとの適合性を試験



外部設置	部分設置	全面設置
ITERでも重要	現在実施中	炉壁の模擬

第一段階ではリップル損失低減を実証

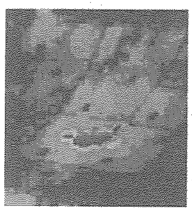
JFT-2M

トロイダルコイルは離散的
→トロイダル磁場に局所的強弱
→高速イオンの損失
→第一壁の損傷

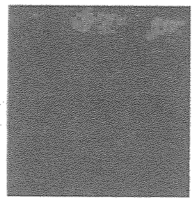
強磁性体を用いて磁場を補正

フェライト鋼により高速イオンのリップル損失が有効に低減できることを実証

赤外カメラでリップル損失測定 H. Kawashima et al, IAEA 2000 Sorrent



フェライト鋼装着前（最大75℃）



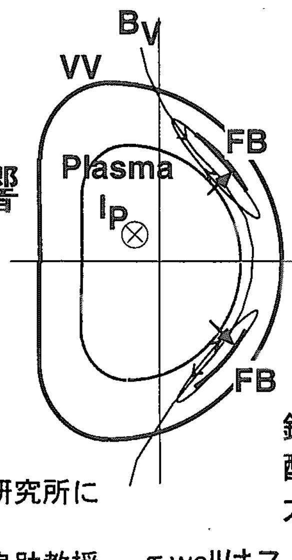
フェライト鋼装着後（最大10℃）

第二段階では部分設置で予備的な評価（現在実施中）

JFT-2M

- 不純物放出の評価
- プラズマ制御への影響
- プラズマの安定性への影響
  - ロックトモード発生領域
  - 運転領域
- ボロンの適合性確認※
  - フェライト鋼上
  - ベーキング120℃
  - トリメチルボロン

※核融合科学研究所にて予備実験
野田教授、相良助教授、久保田氏の協力



引き寄せ効果

制御への影響

錆びやすい
酸素吸蔵が大きい

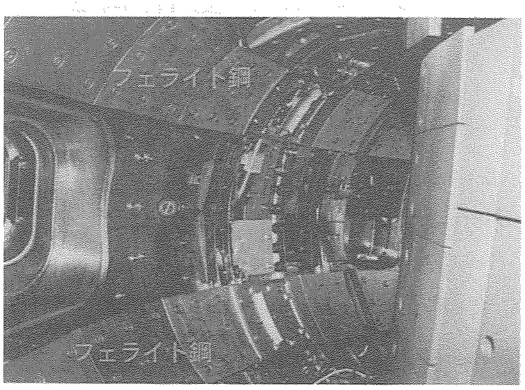
τ wallはステンレス鋼の3～5倍

フェライト鋼の設置

JFT-2M

- 厚さ7mmの低放射化フェライト鋼（F82H）をベルト状に2列配置（内壁面の約20％をカバー）

○トロイダル方向に一様に配置
　→リップル率への影響を抑える
○外部のフェライト鋼も設置
○前処理 尾高他 プラ核73（1997）1002
　表面研磨
　曲げ、穴開け加工
　脱脂洗浄
　350℃ベーキング20時間

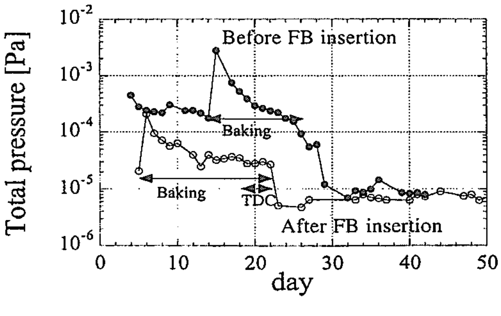


○外側に黒鉛ガードリミターを設置
（フェライト鋼より20mmプラズマ側）

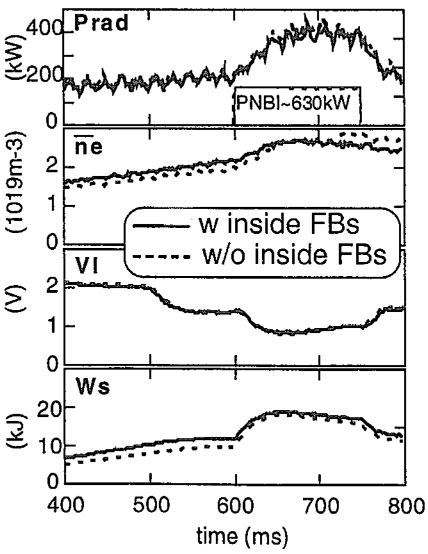
フェライト鋼からの不純物放出は顕著ではない

JFT-2M

- 通常の手法で良好な真空排気特性
  - 120℃ベーキング
  - テイラー放電洗浄



- プラズマへの不純物放出小



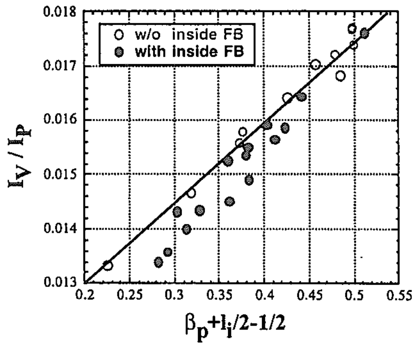
プラズマ制御への影響は小さい

JFT-2M

- プラズマ生成はこれまでと同様の手法で行うことが出来た。
- プラズマ境界は平衡計算結果よりも 相対的に1-2cm 外にずれている＊。

＊重イオンビームプローブ計測（井戸、NIFS）、及びレシプロプローブ計測（永島、東大）

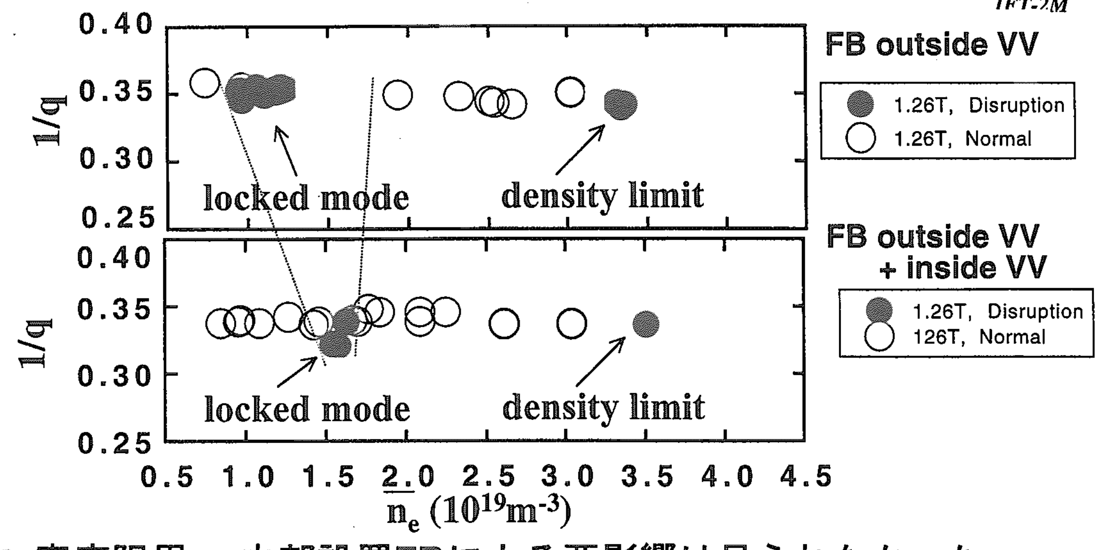
- V-coil 電流値と平衡計算値（Λ）との関係において、若干のずれが観測された。



制御ポロイダル磁場コイル
(V-coil)電流と平衡計算値（Λ）

ロックトモード発生領域はむしろ縮小

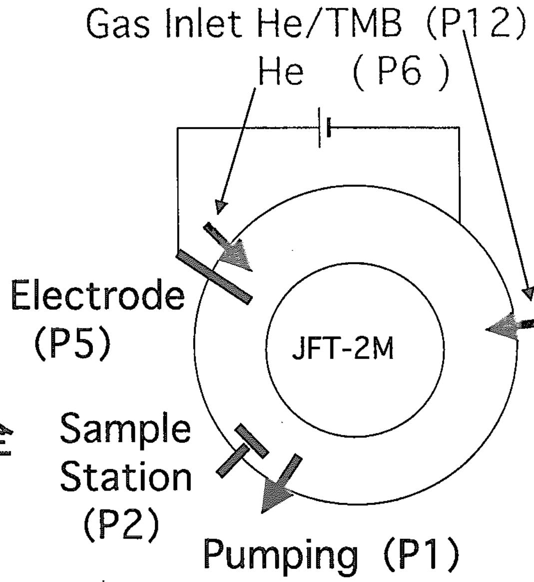
JFT-2M



- 密度限界： 内部設置FBによる悪影響は見られなかった
- ロックトモード：発生領域の縮小が観測された

ボロン化システム

- ヘリウム希釈の1%トリメチルボロン TMB : $B(CH_3)_3$を導入
- DCグロー放電にて成膜
- B : 15%、C : 85%の膜が真空容器のほぼ全面に成膜 （～100nm）



トリメチルボロン

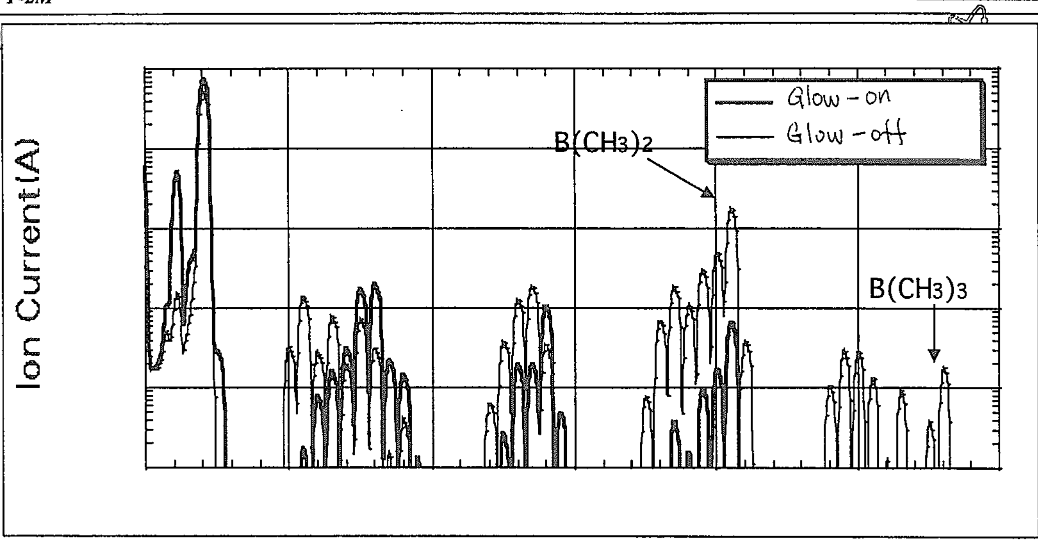
トリメチルボロンの性質

- 化学式 : $B(CH_3)_3$
- 分子量 : 55.8
- 沸　点 : -20.2℃
- -161.5℃
- 外　観 : 無色気体
- 特　性 : 毒性、可燃性、自然発火性
  暴露時　皮膚-火傷
  吸入-

安全性を考慮し、Heで1%に希釈したTMBを使用。(He/TMB)
さらに、ガス検知、除害等の安全対策を実施した。

成分ガス分析

原研 JFT-2M



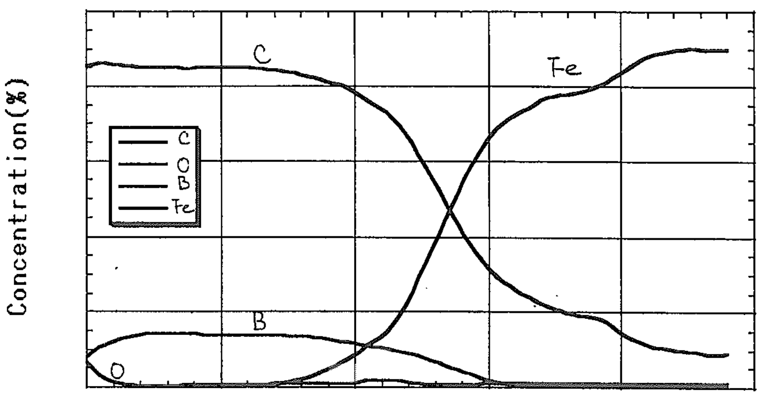
- Glow-OFF：$B(CH_3)_3$[５６]、$B(CH_3)_2$ [41]、等
- Glow-ON：$B(CH_3)_2$ 1/20減少　H_2上昇、CH_4上昇、
- 導入したTMBは、ほぼ全てボロン膜として成膜されている。

膜の成分評価

原研 JFT-2M

小試料をXPS(X線光電子分光装置)で評価

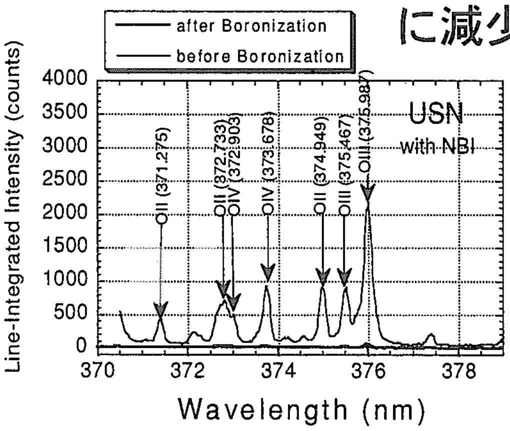
- 膜　厚：約130nm
- 成　分：ボロン約15％、炭素約85％、酸素1％以下



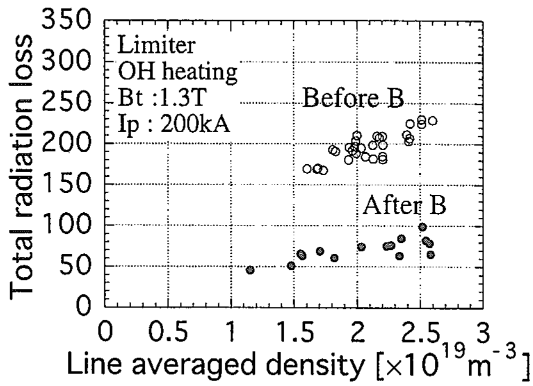
ボロン化により不純物は大幅に減少

JFT-2M

- 可視分光　酸素1/10以下に減少



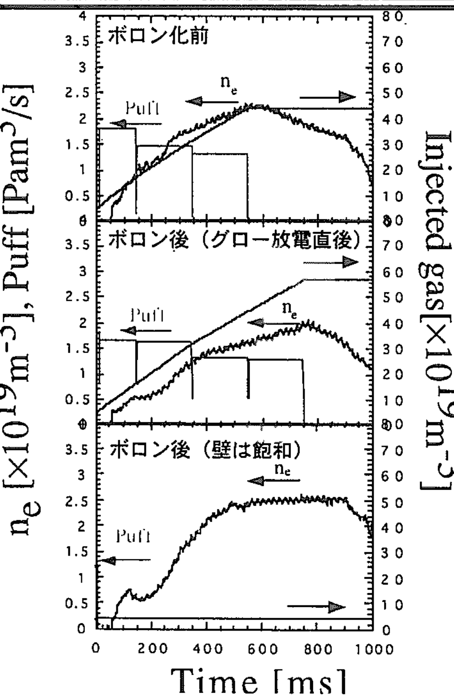
- 放射損失 1/3に減少



- 炭素もやや減少
- Hモード遷移パワー半減
- 高密度限界1.6倍以上に上昇

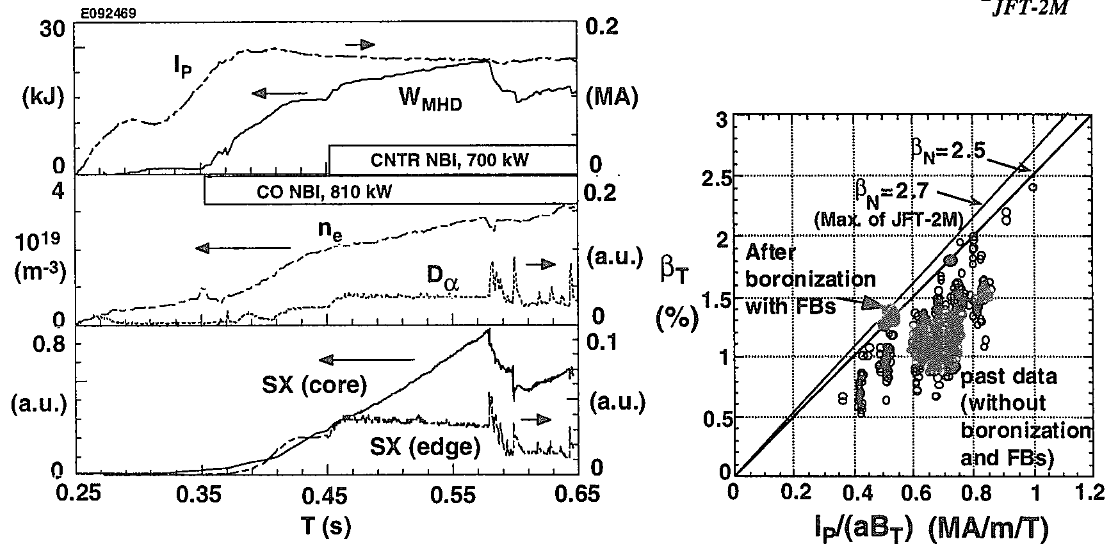
ボロン化前後の密度制御

JFT-2M



- ボロン化により、密度制御は大きく変化
- ヘリウムグロー放電直後
  - ボロン化前と同様のパフで、密度の立ち上がりが遅い
  - パフを切った後の密度の立ち下がりが速い
- 10～20ショット後
  - 放電開始前のパフだけで、放電生成
  - プラズマ中の粒子数は、ガスパフの量よりも多い
  - 放電が不安定になりやすい

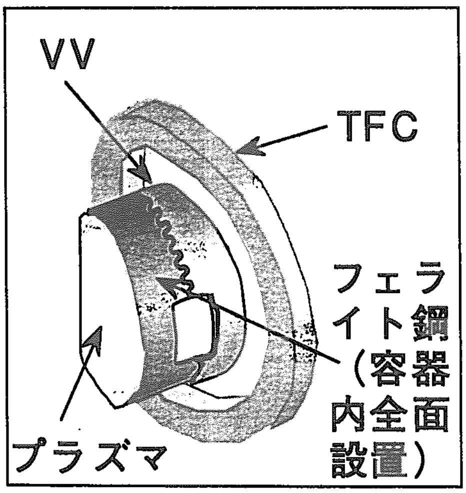
β_N =2.7のプラズマを生成



FBの存在下でも、β_N =2.7の高 β_N 放電が実現出来た。

第3段階：真空容器内全面設置

- フェライト鋼の厚さ分布を最適化することにより、リップル率を0.2%程度に抑える。
  - 精密な磁場分布測定装置を準備
- 設置面積が増えることにより、磁気的影響が増加。
  - 安定化効果の究明
- フェライト鋼壁と高性能プラズマとの両立性を調べていく。



まとめ

- 真空容器内にフェライト鋼板（F82H）を部分的（面積比約20％）に設置した。
- 不純物放出の影響は小さかった。
- 磁気的な悪影響はみられなかった。
- ボロン化により不純物を有効に低減出来た。
- 高β_Nプラズマを実現出来た。
- これらの結果をふまえ第3段階に進む。

2.4　ITERダイバータ開発の現状

佐藤和義
原研那珂　ＮＢＩ加熱研究室

【はじめに】

原研では、国際熱核融合実験炉（ITER）の実現を目指し、現在、構造合理化、安全性及び信頼性向上の観点から研究開発を進めている。ここでは、炉内機器の一つであるダイバータの研究開発の現状について述べる。なかでも、構造合理化の一環として進めている同軸冷却管の開発及びタングステン／銅熱間プレス接合技術開発について報告する。

【同軸冷却管の開発】

ダイバータは、高熱負荷を除熱するため多数の冷却管が内蔵されている。これらの配管を冷却水マニフォールドへ溶接する際には、空間的に制約を受けるとともに作業量が膨大になることが予想される。このため、受熱機器内部で冷却水を折り返し、マニフォールドそのものを設けない同軸冷却管の採用が提案されている。原研では、本構造を模擬した試験体を製作し、圧力損失測定及び限界熱流束測定を実施した。本試験体は二重管構造で、外管の外径／内径は、21mm／15mm、内管の外径／内径は、11mm／9mm である。機器の除熱を直接行う外管の冷却性能を向上させるため、スワール管を模擬したねじり状のフィンを内管の外側に設けている。フィンのピッチは、これまでに実施したスワール管の限界熱流束実験等の結果からツイスト比 3（180°回転長さ／テープ幅）を採用した。また、試験体端部形状の最適化をはかるため、形状の異なる 6 種類のエンドプラグを用意し、それぞれについて圧力損失測定を実施した。圧力損失測定の結果、冷却管エンドプラグの形状依存性は、高流速領域において明らかな差が認められ、R7.5mm の半球状における圧力損失が最も低く、流速 10m/s において 0.1MPa 程度であることが明らかとなった。また、限界熱流束測定の結果、ツイスト比３のスワール管と同等の限界熱流束が得られ、流速 10m/s において 35MW/m^{2}程度であった。

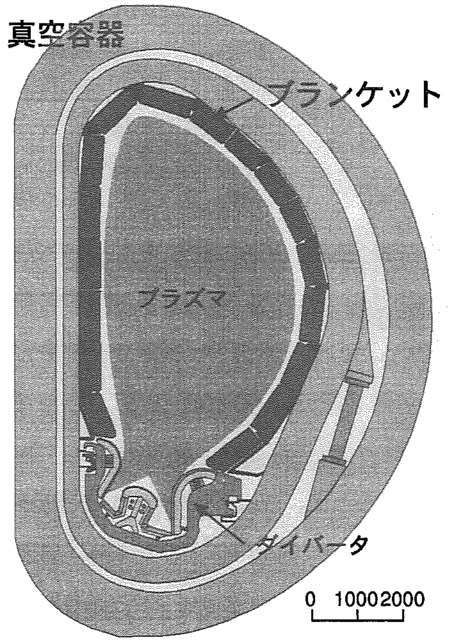
【W／Ｃｕ熱間プレス接合】

原研では、また、設計信頼性の向上及び低コスト化の観点からタングステン／銅熱間プレス接合について開発を進めている。本接合では、従来のタングステンタイルの代わりにロッド型のタングステンを用いることで接合部分の応力の低減をはかるとともに、市販のタングステン棒を使用することにより、低コスト化が見込めるものである。タングステン／銅熱間プレス接合の接合特性を調べるため、ダイバータ試験体を製作し加熱試験を実施した。加熱条件は、ダイバータ上部の熱負荷条件である 3MW/m^2 を越える 5MW/m^2 とし、試験体がほぼ定常となる 15s の照射を行った。ITER 設計条件の 3000 回の繰り返し照射を行った結果、タイル 1 個については銅製熱シンクの変形が認められたが、その他のものについては、冷却時定数の劣化等熱疲労による接合部の異常は認められなかった。今後、中間層を挿入する等熱抵抗の低減をはかる予定である。

ＩＴＥＲダイバータ開発の現状

原研那珂　NBI加熱研究室
佐藤和義

ＩＴＥＲの設計



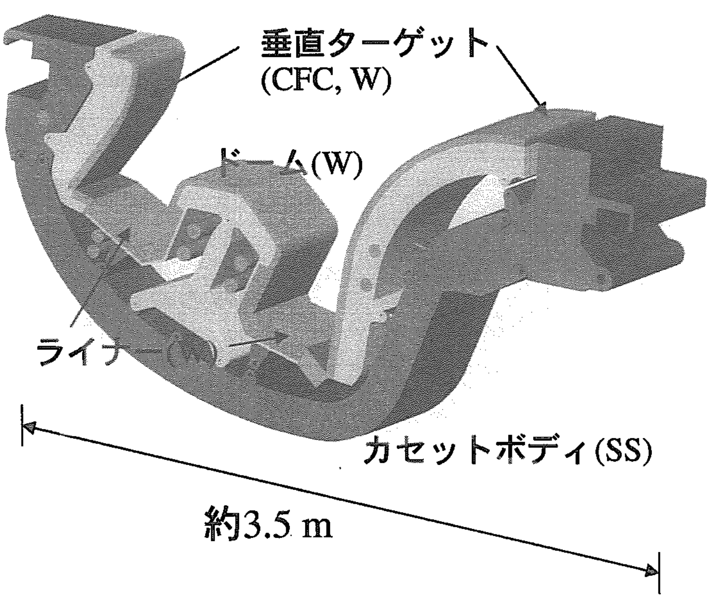
ITERの主要仕様

プラズマ大半径（メートル）	6～6.2
プラズマ電流（メガアンペア）	13～14
トロイダル磁場（テスラ）	5.4
誘導方式パルス長（秒）	～400
エネルギー増倍率（Q）	＞10
核融合出力（メガワット）	500～750

ダイバータの設計条件

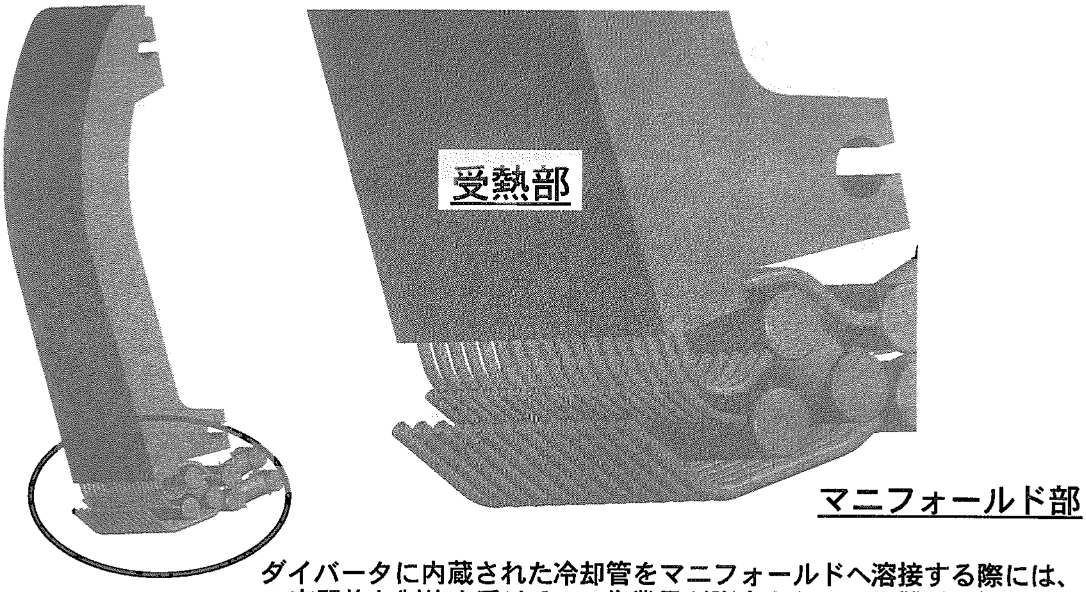
熱負荷条件 ・通常運転時（400秒） ・非定常時（10秒）	 10 MW/m² 20 MW/m²
設計寿命（３年間） ・通常運転による熱負荷 ・非定常熱負荷 ・ディスラプション	 3000サイクル以上 300回 300回
材料 ・アーマ材 ・熱シンク材 ・構造材	 CFC, タングステン CuCrZr, DSCu 316LN-IG
冷却水 ・種類 ・最大設計圧力 ・入口温度	 水 4.2 MPa 100℃

ダイバータの構造



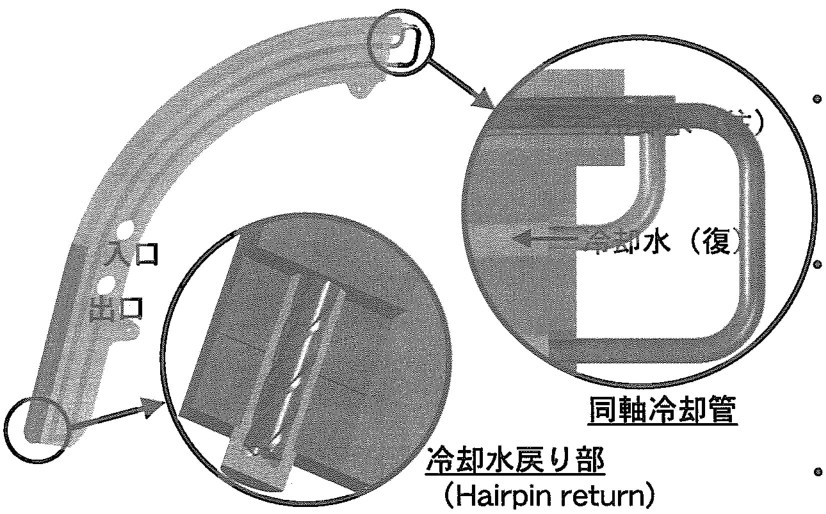
- 高熱負荷受熱機器の基本的な構造（アーマ＋冷却管＋バックプレート；冶金接合）
- トーラス全周に54個のカセットを配置
- 遠隔保守による交換を行うためカセットボディと呼ばれる可搬性の構造
- リンクによる高熱負荷受熱機器の支持

垂直ターゲットの構造



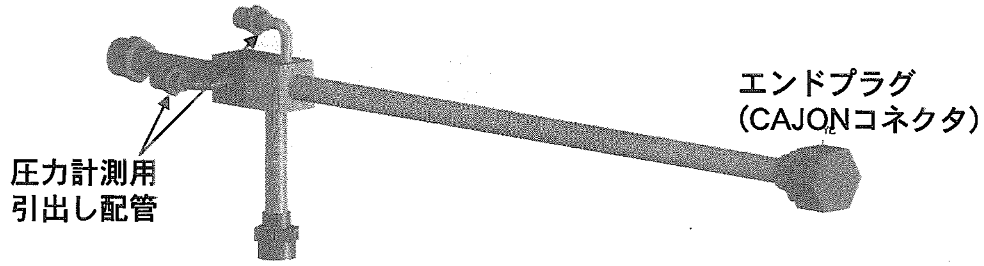
ダイバータに内蔵された冷却管をマニフォールドへ溶接する際には、
1) 空間的な制約を受ける。2)作業量が膨大となる。困難が予想される。

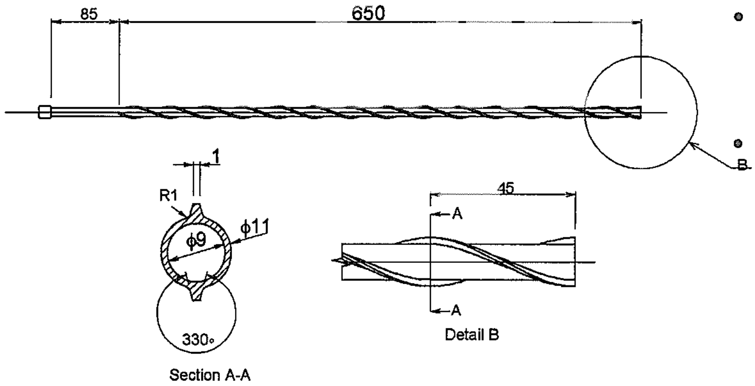
同軸冷却管の開発



- 受熱機器内部で冷却水を折返しマニフォールドを設けない構造
- 同軸冷却管の内管外側にねじり状のフィンを設け冷却水を旋回させ伝熱を促進
- 圧力損失の増大が見込まれる

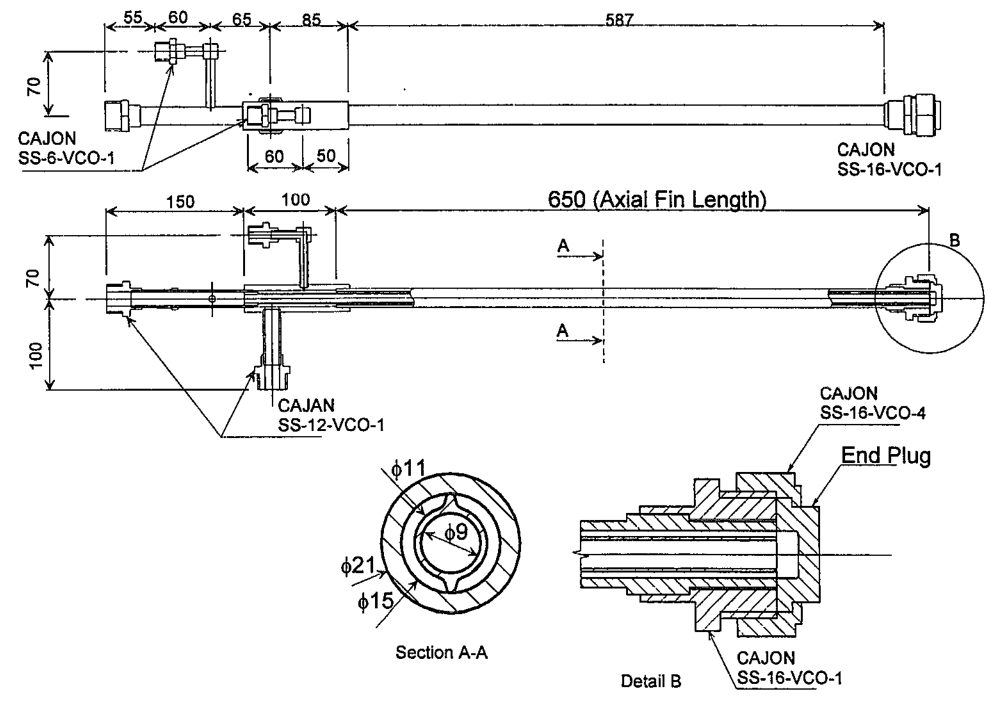
同軸冷却管試験体の開発



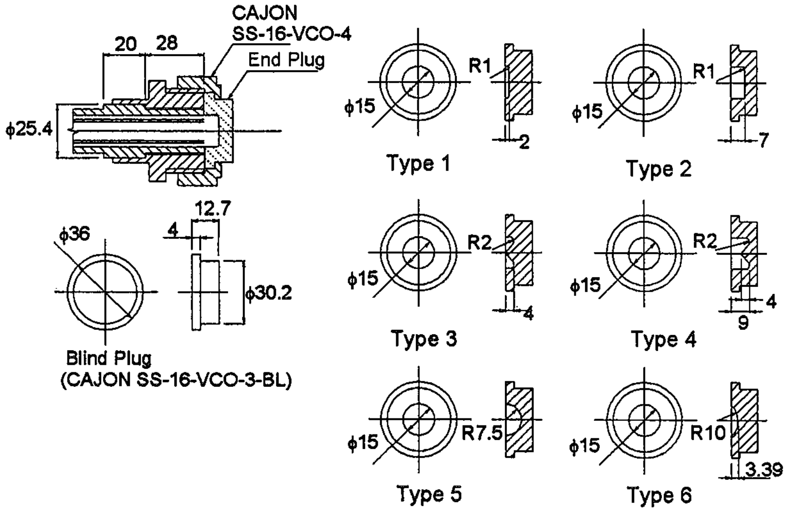


- 圧力損失及び限界熱流束測定用試験体の製作
- 同軸管内管外側のねじり状フィンのピッチは、ツイスト比3（180° 回転長さ／テープ幅）

同軸冷却管試験体の開発（側面図）

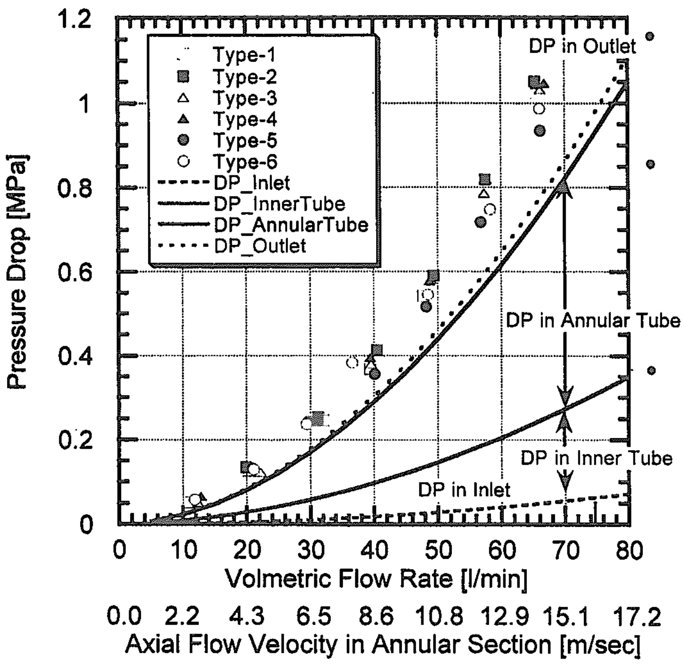


同軸冷却管試験体の開発（エンドプラグ）

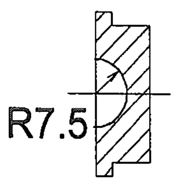


- 試験体端部形状の最適化をはかるため、６種類のエンドプラグを用意
- 試験体端部のみの圧力損失測定は困難なため、内管のみ及び外管のみの圧力損失を測定し、端部の圧損を評価

圧力損失測定（試験体全体）



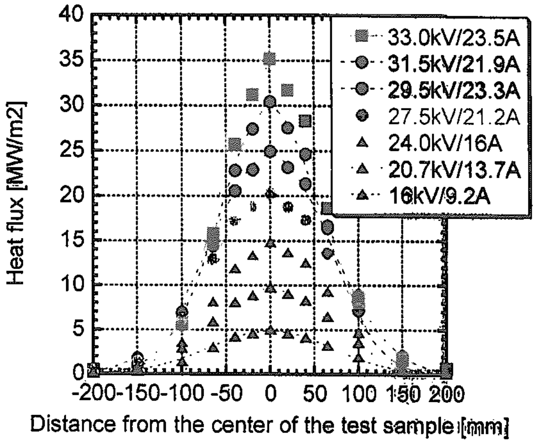
- 試験体の圧力損失は、エンドプラグよりも外管部で大きく試験体全体の50%程度
- エンドプラグの形状依存性は、高流速領域において差が認められ、半球状のエンドプラグで最も低い圧力損失
- 流速10m/sにおける半球状エンドプラグの圧力損失は0.1MPa程度で全体の約20%



Critical Heat flux test on the annular tube with the twisted fins

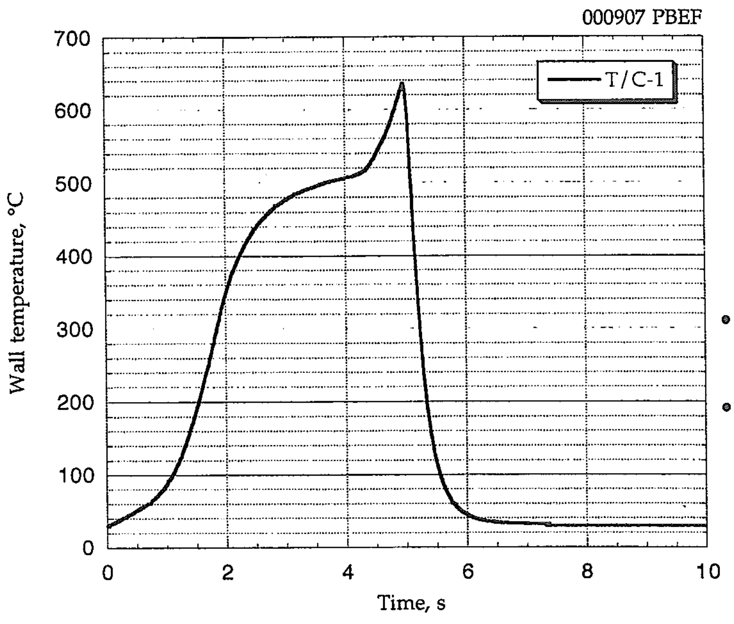
- Critical heat flux (CHF) test on the annular tube with the twisted fins were performed in hydrogen ion beam facility(PBEF).
- The end-plug for the hair-pin return was Type-5, that provided the least pressure drop.

❒ Experimental conditions:
Heat flux : Gaussian profile, up 35 MW/m2
Axial velocity at the annular section: up to 14 m/sec (65 l/min)
Local pressure: 1 MPa
Inlet water temperature : RT (27-33°C)



Typical heat flux profiles at the mock-up position

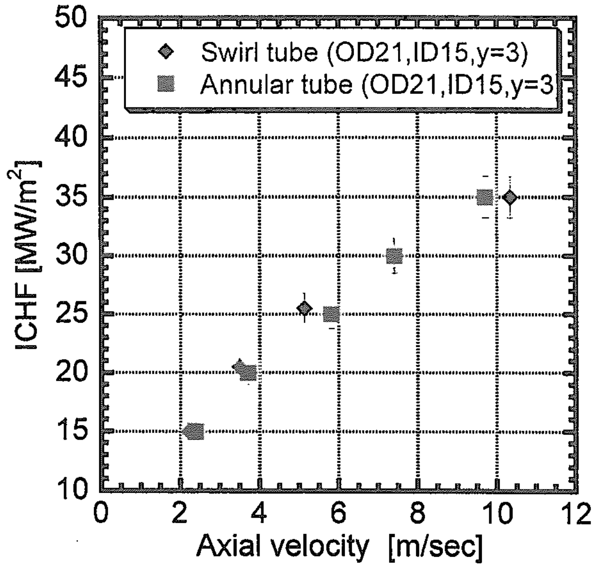
限界熱流束測定



バーンアウト時の典型的な温度応答

- 試験体に埋め込んだ熱伝対で壁温を測定
- 計測系にインターロックを掛けバーンアウトを検知

限界熱流束測定

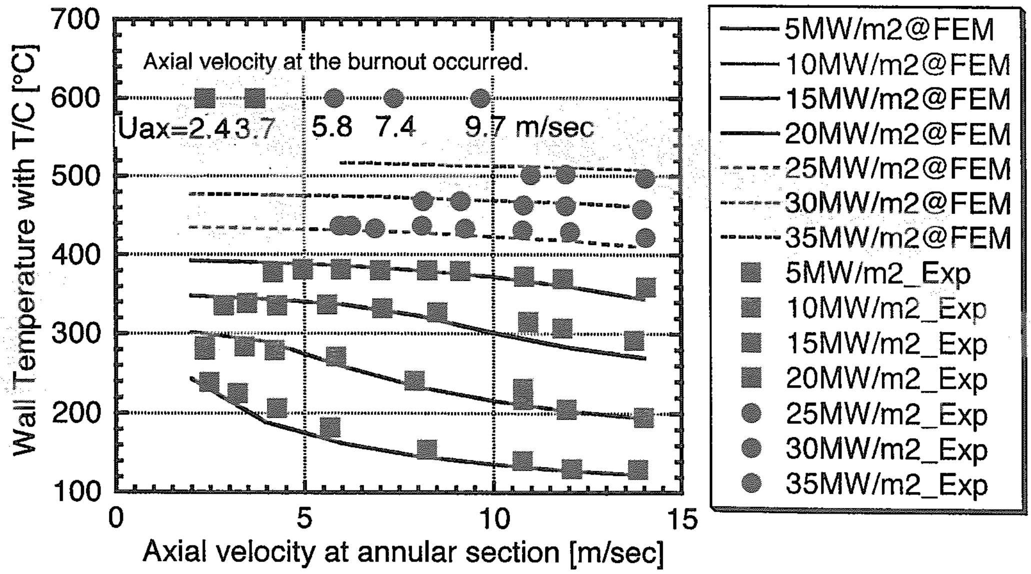


- 得られた限界熱流束は、ツイスト比３のスワール管とほぼ同等
- 流速10m/sにおける限界熱流束は、35MW/m²程度

Local pressure : 1 MPa

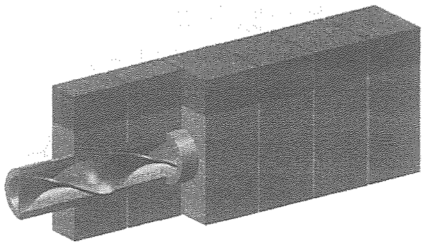
Inlet water temp.: 27-33°C

限界熱流束測定



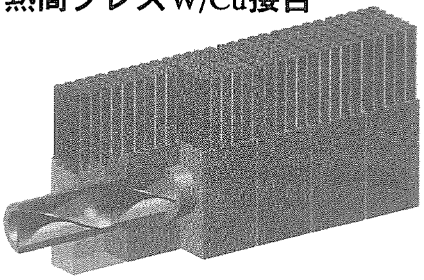
タングステン／銅熱間プレス接合

焼結W/Cuろう付け接合



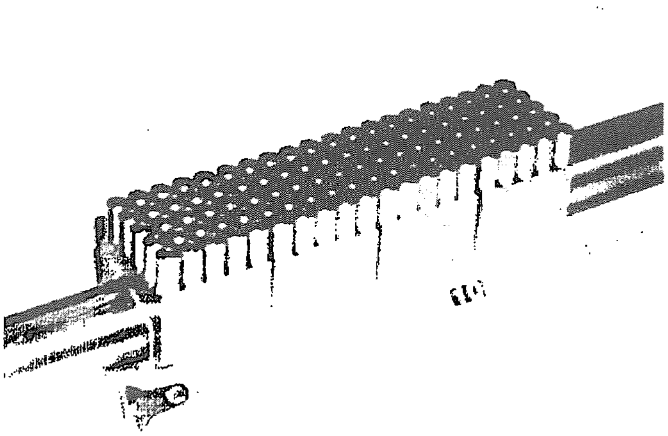
- 厚い(10mm^t)タングステンタイルの製作が困難
- １枚板接合のため、接合部応力が大きい

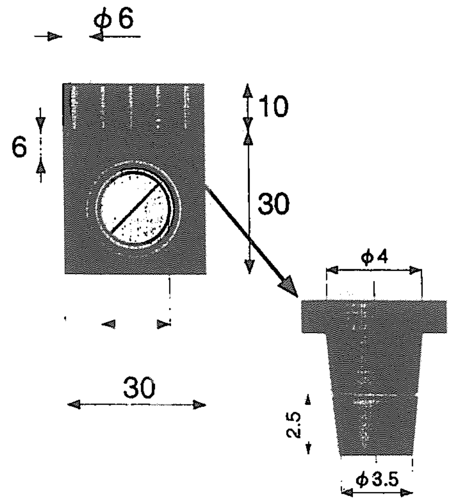
熱間プレスW/Cu接合



- W棒により厚いアーマの使用が可能
- 厚みを変えることにより表面温度制御が可能
- 接合面積の縮小により接合部応力の低減が可能（信頼性の向上）
- 穴、先端部の加工後、加熱雰囲気中で圧入（接合の単純化）
- 市販のW棒の選択（材料費の低減）

熱間プレスW/Cuダイバータ試験体

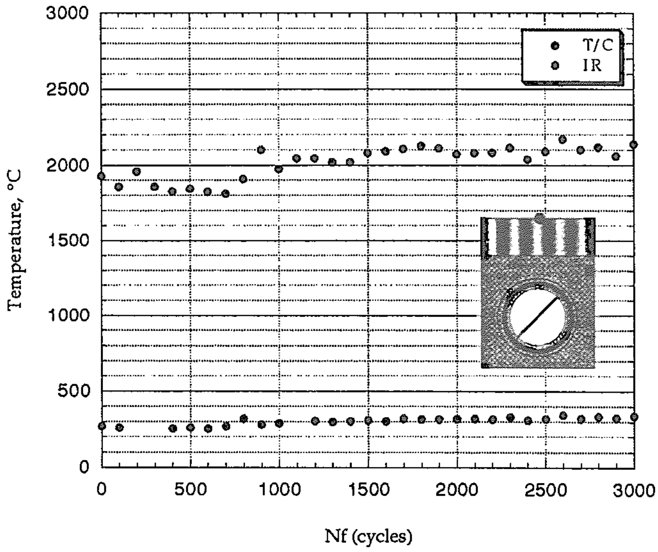




接合条件		
	荷重	500 kgf
	保持時間	5 min
	温度	900 。C
	接合形状	溝１本加工

JAERI
NBI Heating Lab

熱サイクル試験



- 加熱条件
  - 熱流束　5 MW/m^2
  - 照射／冷却時間　15/15 s
- 冷却条件
  - 冷却材　純水
  - 流速　10 m/s
  - 入口圧力　1 MPa
  - 入口温度　室温

まとめ

- コスト削減及び空間制約に見通しのある同軸冷却管の開発を行った。
- 圧力損失測定を行った結果、エンドプラグの形状依存性は、高流速領域において差が認められ、半球状の形状において最も低く、流速10m/sにおける圧力損失は、0.1MPa程度であった。
- 限界熱流束測定を行った結果、ツイスト比３のスワール管と同等の限界熱流束が得られ、流速10m/sにおいて35MW/m^{2}程度であった。
- コスト削減に見通しのあるW/Cu熱間プレス接合による試験体を製作し熱サイクル試験を行った。その結果、ITER定常条件に対し健全性を保つことを明らかにした。

This is a blank page.

3．基盤技術開発における研究の現状

3.1 イメージングプレートによるトリチウム検出
JT-60U協力研究に向けての新技術紹介

田辺哲朗，名古屋大学理工科学総合研究センター

共同研究
宮坂和孝，名大工院生
Philipps, V，The TEXTOR Team，ユーリッヒ研究機構
Rubel, M，スウェーデン王立技術研究所
和田　元，同志社大学工学部
大後　忠士，福岡教育大学自然系

原研のご努力により、JT-60Uの黒鉛タイルがトリチウム含有物として、試験に供されるようになることをふまえ、大学側と原研とで協力研究「JT-60U真空容器内構造物の照射後試験および蓄積トリチウムに関する研究」を実施することを計画している。講演ではまずその計画策定の現状を紹介する。つぎに協力研究として可能と思われる次の5つの課題について簡単に述べる。

1．JT-60U内で生成したトリチウムの挙動
　第1壁黒鉛タイルおよびダイバータタイル内のトリチウム蓄積（分布、定量）
　その他炉内構造物、あるいはデブリ（ダスト）への蓄積
　重水素との挙動の違い
2．不純物の挙動、重水素、トリチウムとの関連
3．トリチウムの存在状態と脱離方法
4．プラズマにさらされた材料の特性変化

これに引き続き最近我々が開発しているイメージングプレートによるトリチウム分布計測について

1．イメージングプレートとは何か
2．いくつかの応用例
　各種食品中の^{40}Kの分布状態
　トリチウムガスにさらされたステンレス板および黒鉛板上のトリチウム分布
　TEXTORプラズマにさらされたリミッタタイル上のトリチウム分布

を紹介し、この方法がトリチウムの分布計測にきわめて有効であることを示す。

最後にこの方法に限らず、JT-60U黒鉛タイル内のトリチウム分布計測に非常に有効であり、実際に利用出来る可能性のある装置あるいは実験方法を提案する。

2000年秋PSI･PFC共同研究会／日本原子力学会研究専門員会

イメージングプレートによるトリチウム検出

JT-60U協力研究に向けての新技術紹介

田辺哲朗，名古屋大学理工科学総合研究センター

共同研究
宮坂和孝，名大工院生
Philipps, V，The TEXTOR Team，ユーリッヒ研究機構
Rubel, M，スウェーデン王立技術研究所
和田　元，同志社大学工学部
大後　忠士，福岡教育大学自然系

JT-60Uでトリチウムの取り扱いが可能になる！

JT-60U協力研究の提案

「JT-60U真空容器内構造物の照射後試験および蓄積トリチウムに関する研究」

JT-60U協力研究に何を期待するか

☆JT-60U内で生成したトリチウムの挙動
　第1壁黒鉛タイルおよびダイバータタイル内のトリチウム蓄積（分布、定量）
　その他炉内構造物、あるいはデブリ（ダスト）への蓄積
　重水素との挙動の違い

☆不純物の挙動、重水素、トリチウムとの関連

☆トリチウムの存在状態と脱離方法

☆プラズマにさらされた材料の特性変化

イメージングプレートの紹介

1．イメージングプレートとは何か

輝尽性発光（Photo−stimulated luminescence）を利用

2．応用例

各種食品中の^{40}Kの分布状態

トリチウムガスにさらされたステンレス板および黒鉛板上のトリチウム分布

TEXTORプラズマにさらされたリミッタタイル上のトリチウム分布

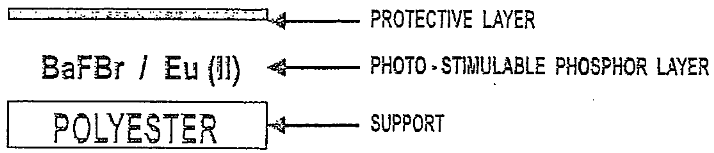
3．JT−60U黒鉛タイルへの応用（予定）

FUJIFILM

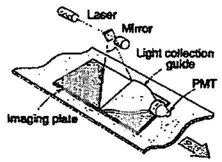
Science Imaging Systems

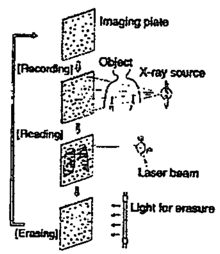
What is Imaging Plate ?

I. A flexible image sensor containing crystals (5 μm) of photo-stimulable BaFBr doped with Eu^{2+} as a luminescence center.



II. The exposed plate is scanned with a red laser beam and the photo stimulated luminescence released is recorded by a photomultiplier.





III. The exposed plate is reusable after the image erasing with visible light.

MECHANISM OF IMAGE FORMATION

THE ACTIVE LAYER:
BaFX doped with Eu^{2+} (X = Cl, Br, I) - an ionic crystal of tetragonal structure in which Ba is replaced by Eu.

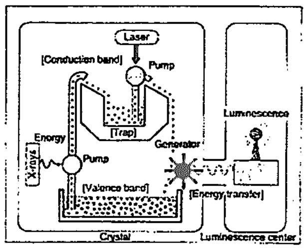
The luminescence mechanism is related to the Eu^{2+} to Eu^{3+} transition stimulated by the radiation (X-rays, UV, electrons, protons) and electrons released are trapped by X ions.

Under irradiation colour centers are produced when electrons are trapped by F or X ions.

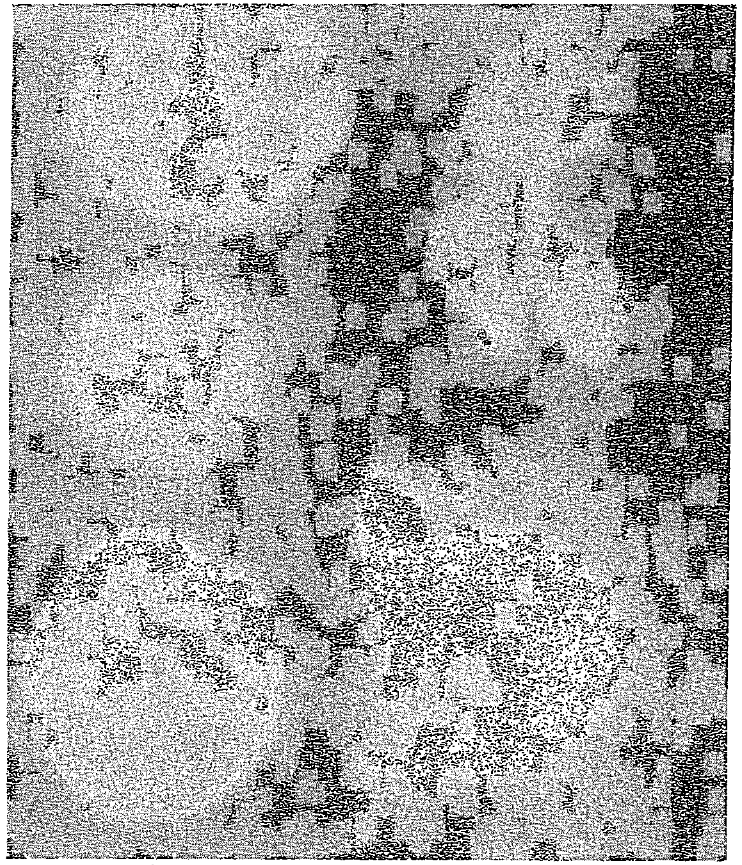
The colour actually produced depends mainly on the stoichiometric composition (F and X).

Photo-stimulated luminescence (by a laser beam) is proportional to the adsorbed radiation energy.

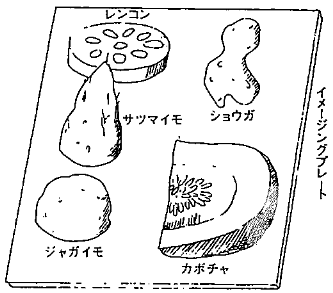
Imaging plate luminescence mechanism.



An excited electron is trapped into the halogen ion empty lattice in the crystal, makes a color center having a metastable state, and emits the radiation energy. Irradiation by the laser beam to be absorbed by the electron again, and the recombination energy with the hole is transferred to the Eu ion, the luminescence center, resulting in luminescence.



表紙写真説明

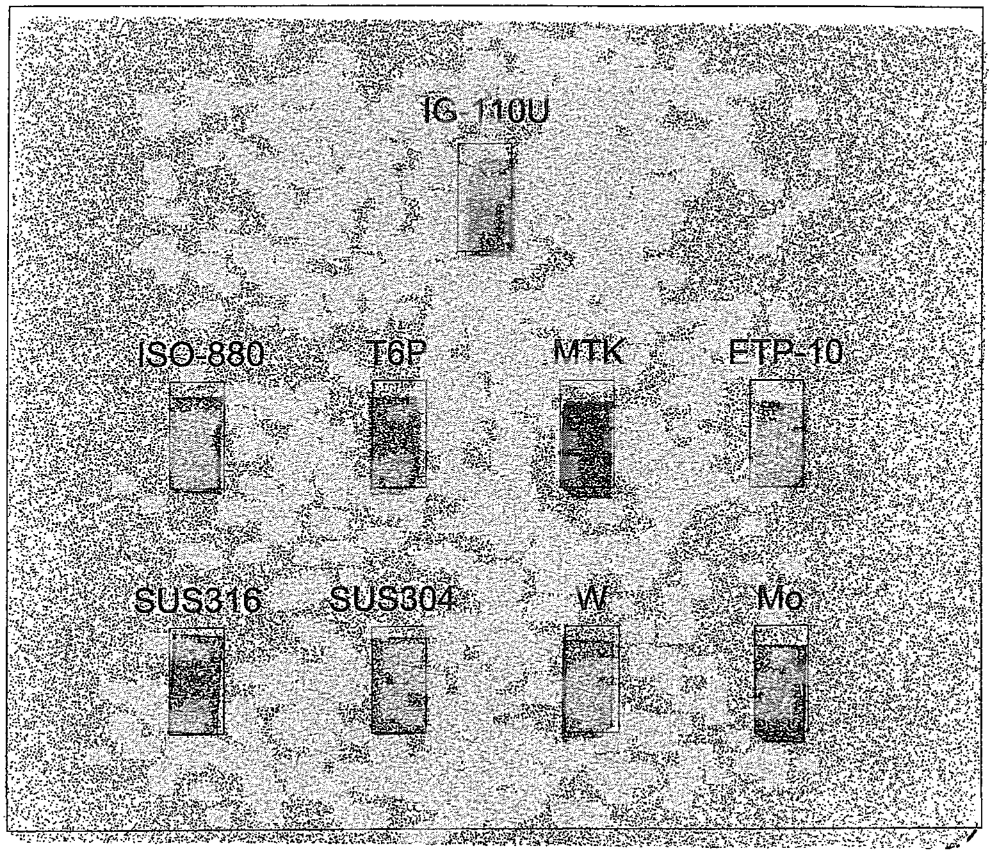


【出典1】

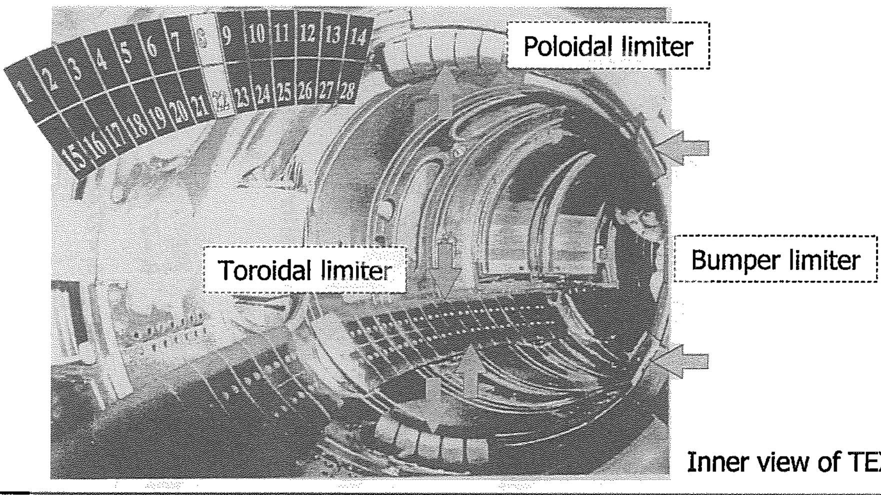
表紙の写真は、厚さ10cmの鉛の箱の内面に工夫をこらして、周辺からの自然放射線の強度を非常に少なくし、その中に野菜と放射線に高感度な検出器であるイメージングプレートを約20日間重ねて測定したものです。

左上から下へ、レンコン、サツマイモ、ジャガイモ、ショウガ、カボチャで、これらの野菜に含まれているカリウム－40という放射性同位元素から放出されているベータ線によって作られた放射能分布の像です。

放射線はもちろん色はついていませんが、表紙の写真では放射能の強い部分をコンピュータ処理によって黄色で表示しています。世界で初めてえられた像です。これらの野菜は単に例として取り上げただけで全ての野菜、食物そして人間を含む動物体、鉱石などにカリウム－40は含まれています。



Limiter tiles in TEXTOR



Inner view of TEXTOR

	Toroidal limiter	Bumper limiter	Poloidal limiter
Material	Graphite (IG-110U)	Graphite (~~EK-98~~ IG-110)	VPS-W (0.5mm) coated graphite
Plasma exposure	~10^4 shots	~10^4 shots	Several 10s shots

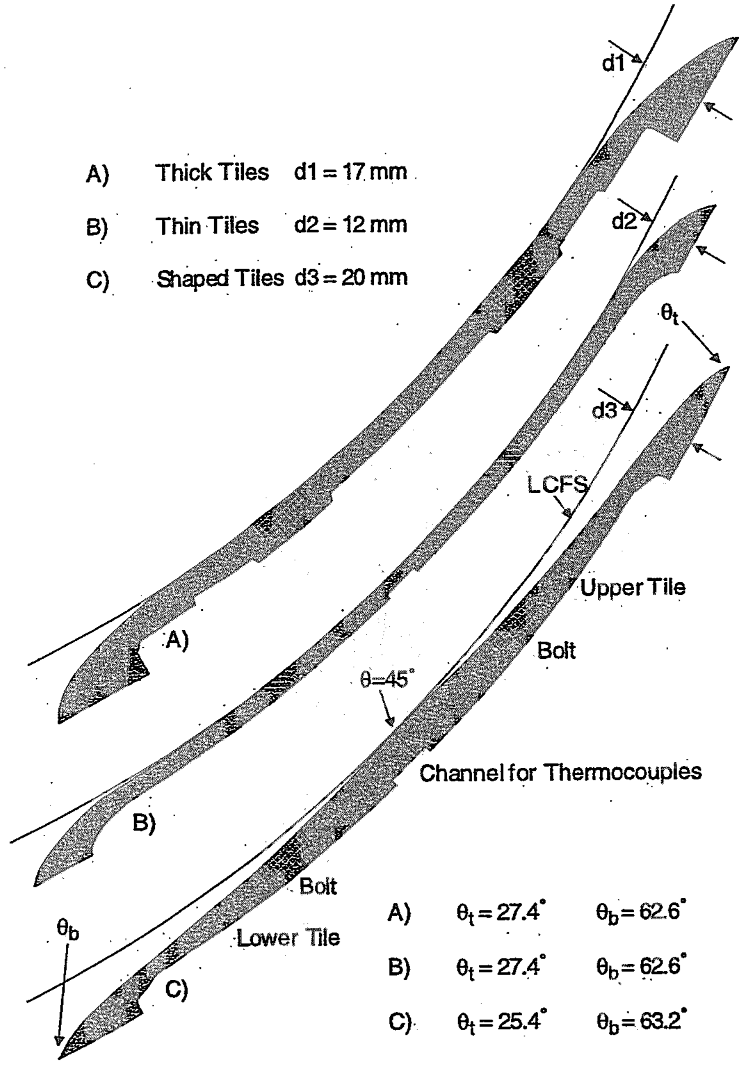
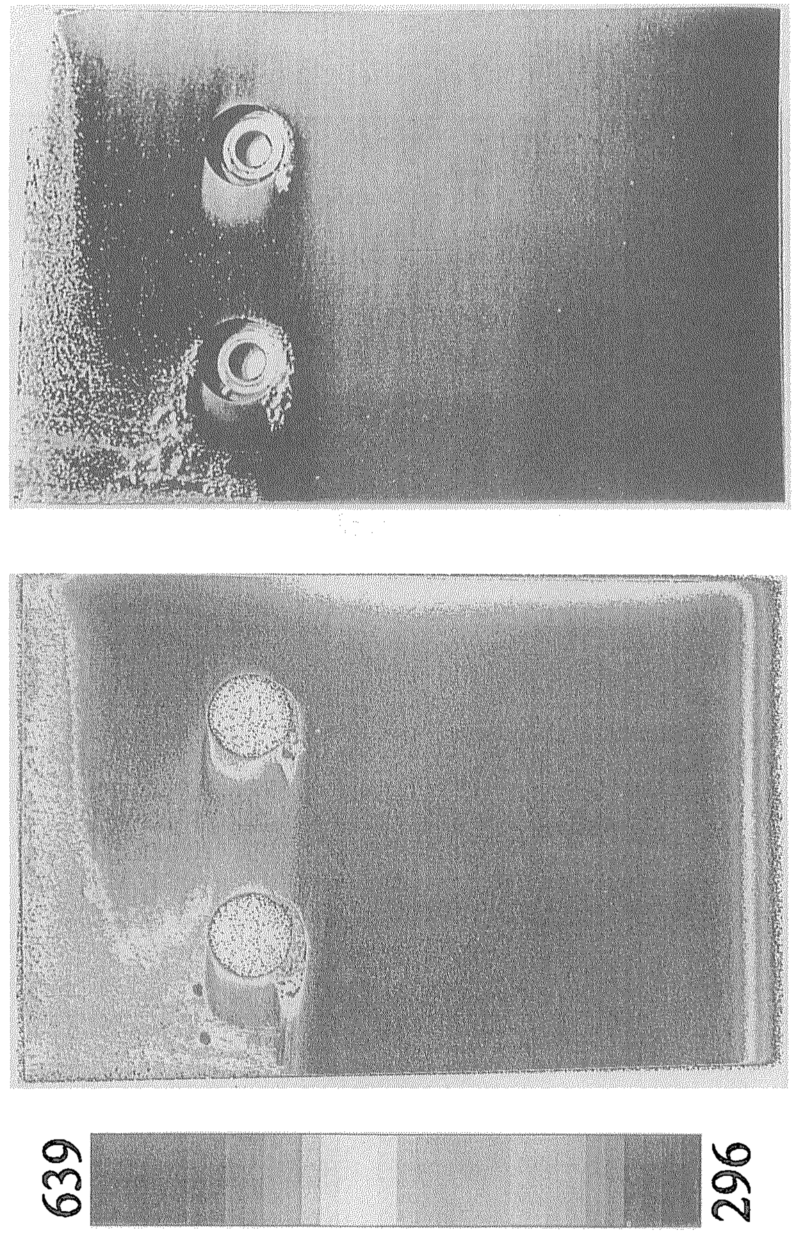
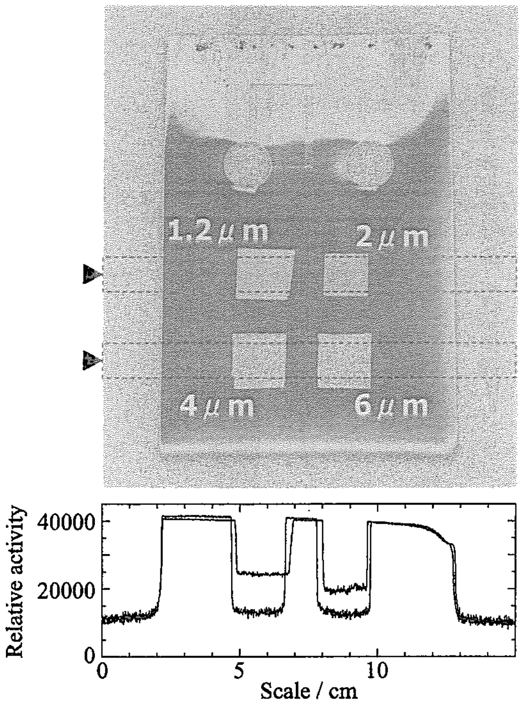


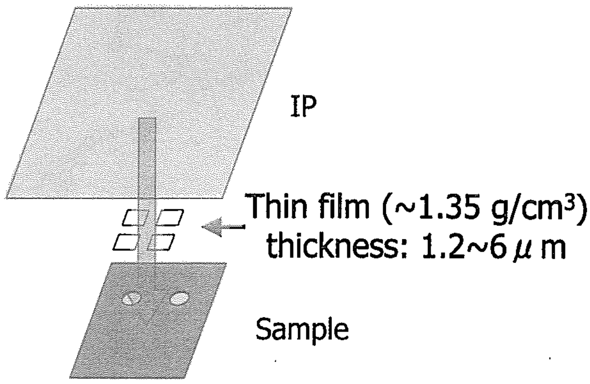
Figure 2. Poloidal cross-section through tiles 13 and 27 for the three limiter shapes used at TEXTOR-94. The poloidal length of the lower tile is shorter to avoid 'leading edges' caused by the gap between the two blades [10]. A circle at radius 44.2 cm indicates the position of the



Confirmation of radiation source

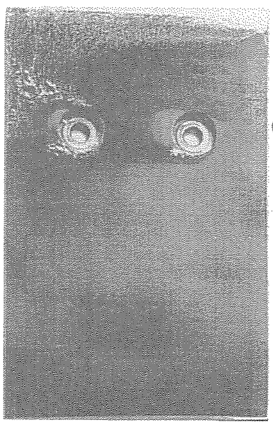
Tritium β-ray have a range of about 5 μm in graphite (~1.7 g/cm^3)



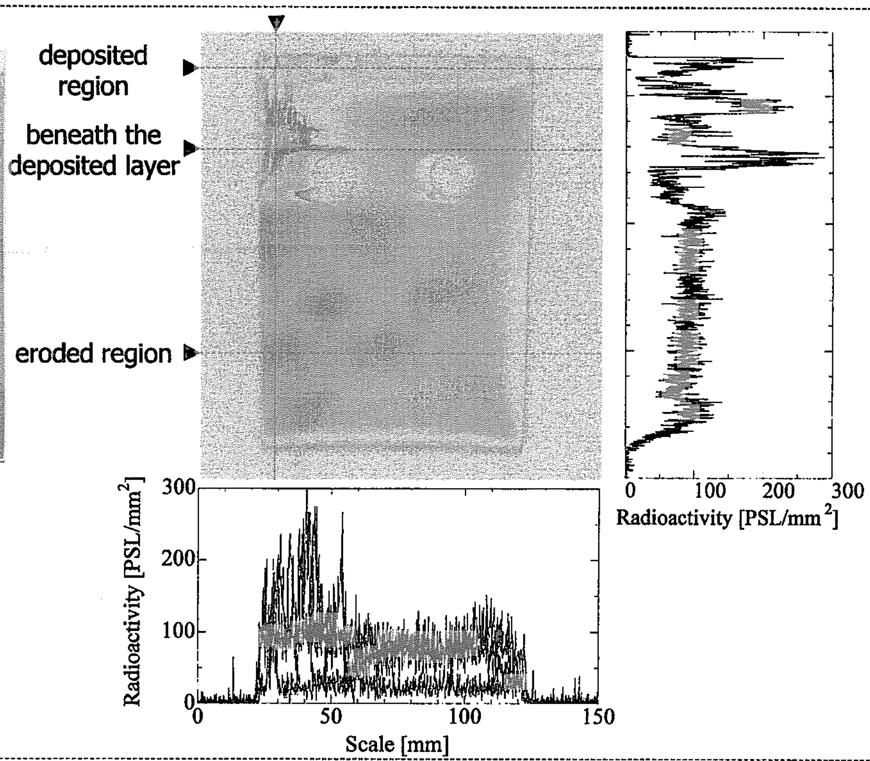


- Signals obtained by IP are entirely due to tritium
  - —This technique measures tritium within 5 μm from the surface

ALT-II tile (No. 22) with peeling the deposited layer off



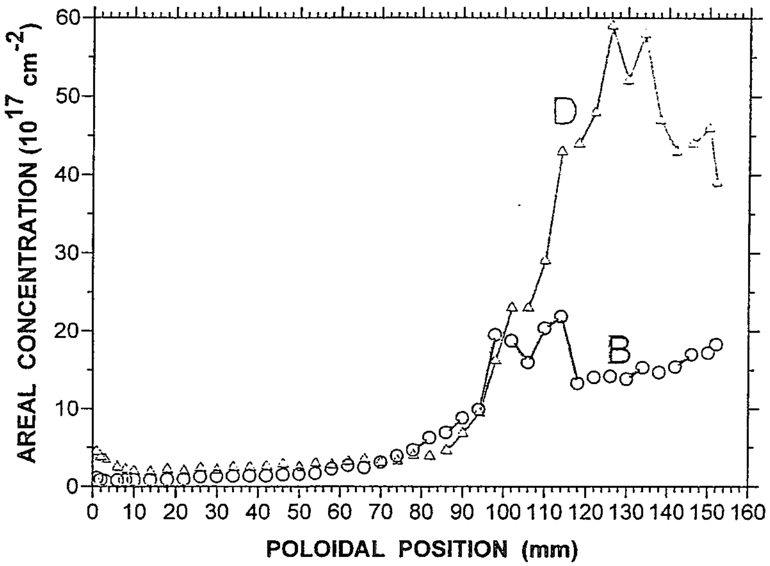
Photograph (No. 22)

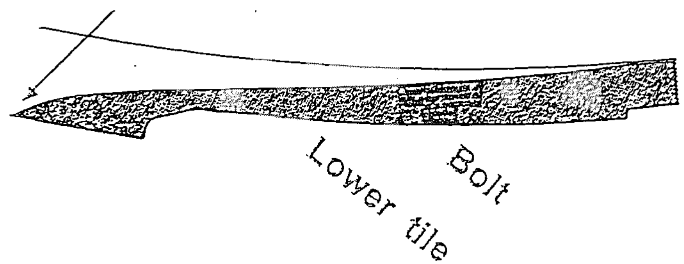


DEUTERIUM DISTRIBUTION AND CONTENT IN ALT II TILE (20): SUMMARY OF RESULTS

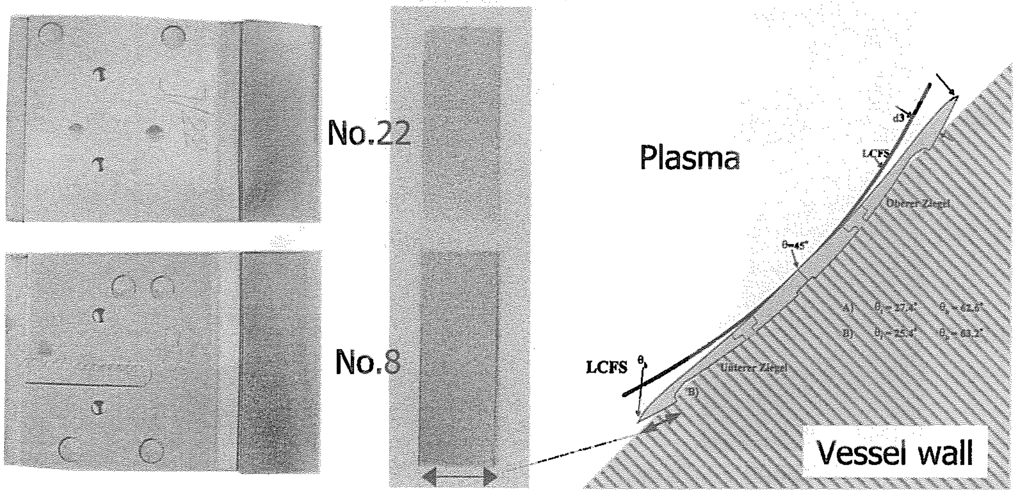
	D CONTENT
AREA 1: **HIGH and UNIFORM** **in DEPTH** ***THICK FLAKING LAYER***	~ 94 x 10^{19}
AREA 2: **3.2 – 7.8 x 10^{17} cm^{-2}** ***LAYER up to 5 μm*** ***NON-UNIFORM DEPTH PROFILE***	~ 2.0 x 10^{19}
AREA 3: **2.6 – 3.5 x 10^{17} cm^{-2}** ***THIN LAYER***	~ 1.7 x 10^{19}
BACK SIDE OF THE TILE: **0.9 – 1.8 x 10^{17} cm^{-2}** ***THIN LAYER***	~ 0.5 x 10^{19}
TOTAL	1 x 10^{21}

DEUTERIUM AND BORON CONTENT IN THE SURFACE LAYER (4.5 microns) OF THE ALT TILE

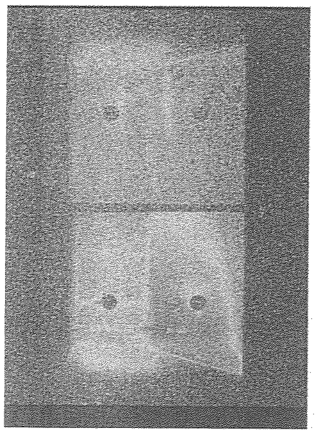
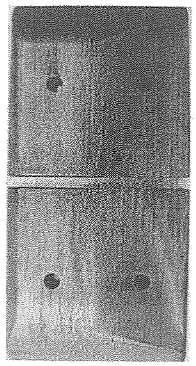




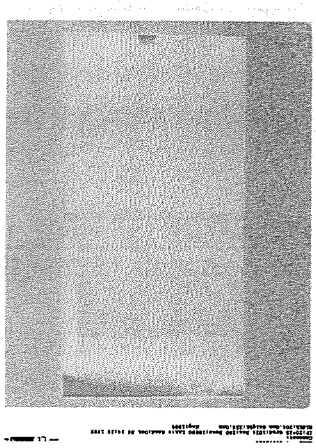
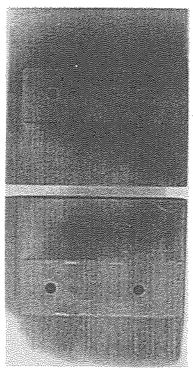
Tritium on the backside of ALT-II Limiter Tiles



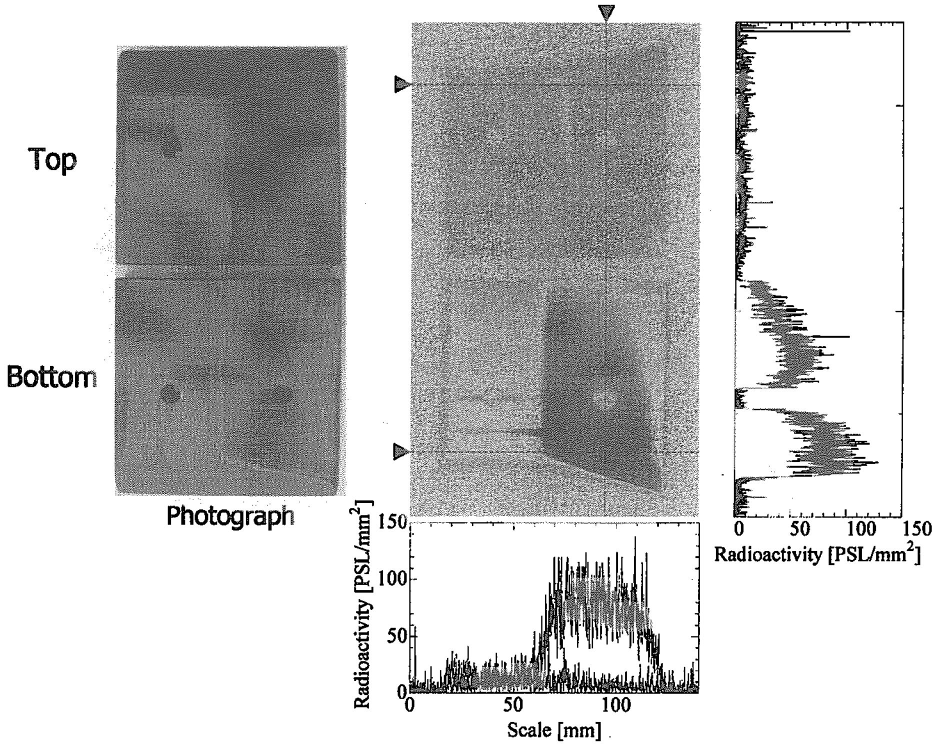
- Tritium was detected
  —Due to gyration of energetic tritium (1.01MeV)

Back side

Bumper limiter



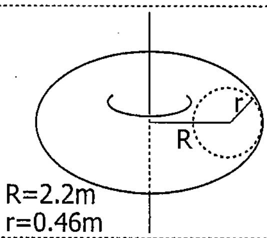
Homogeneous T distribution

Tritium in TEXTOR

- Generated by D-D reaction in plasma
  D + D → T (1MeV) + p (3Mev)
- 1MeV tritium has a large gyro-radius: 11cm at maximum
  —Whereas deuterium has gyro-radius: ~several mm

⇨ Tritium is not likely to lose fully their energies in the plasma and impinge into the limiters with rather high energies

- Tritium impinges uniformly everywhere on limiter tiles
- If there is sufficient space, implantation into the backside is possible

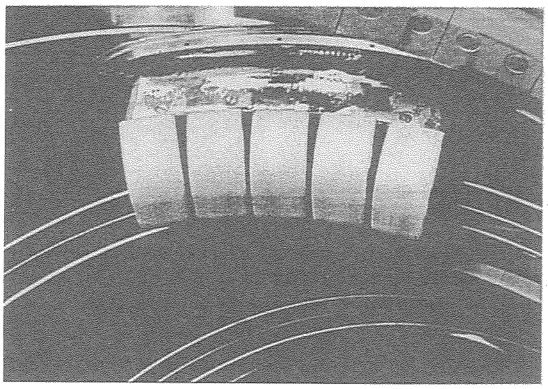


$$\frac{\text{T generated in TEXTOR (53 MBq)}}{\text{Total surface area of torus with 46 cm (49 m}^2\text{)}} = 109\ \text{Bq/cm}^2$$

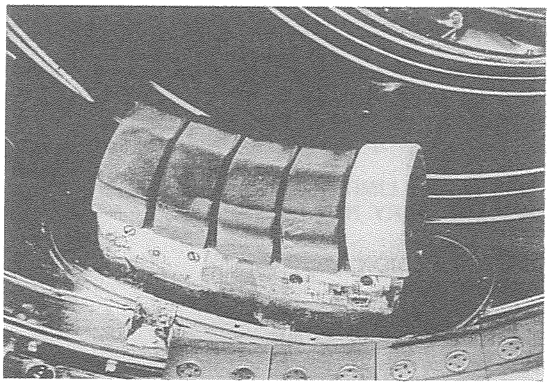
Absolute amount of T on the ALT-II tile = ~ 100 Bq/cm²
by means of BIXS [Matsuyama et al.]

CO-DEPOSITS ON THE POLOIDAL LIMITERS

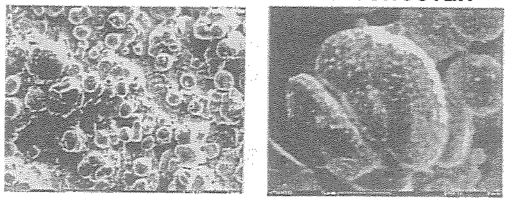
[Limiter material: VPS tungsten coating (0.5 mm) on graphite.]



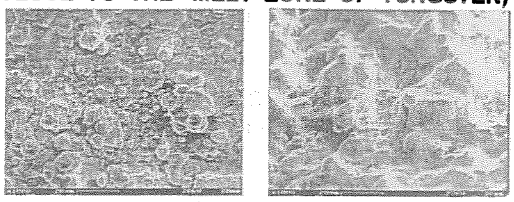
Arrays of poloidal limiters.



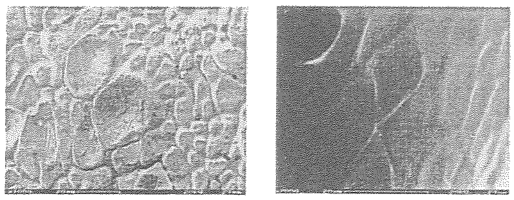
INITIAL STRUCTURE OF VPS TUNGSTEN



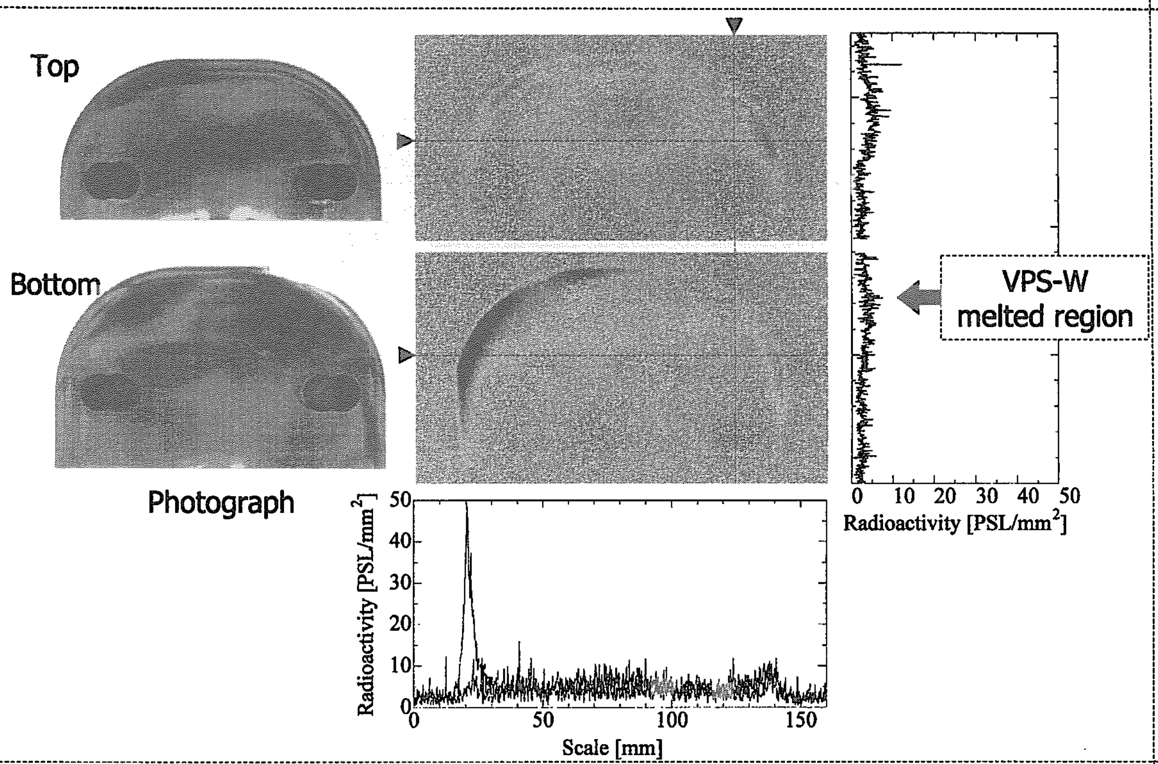
CARBON DEPOSIT (CLOSE TO THE MELT ZONE OF TUNGSTEN)



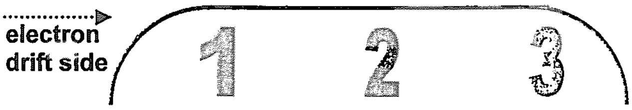
TUNGSTEN IN THE MELT ZONE



Poloidal limiter (Side view)



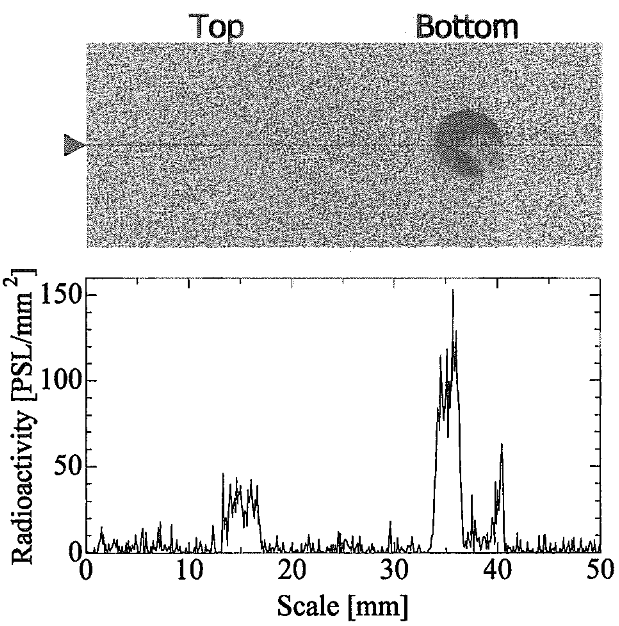
POLOIDAL LIMITER: SUMMARY OF RESULTS FOR D, B and C ON TUNGSTEN COATING
[ANALYSIS PERFORMED EVERY 1 or 2 mm]



SPECIES	CONCENTRATION Area 1	Area 2	Area 3
DEUTERIUM (10^{16} cm^{-2})	24 – 36	8 – 16	0.4 – 4
CARBON (10^{18} cm^{-2})	5.2- 8.3	0.6 – 1.4	1.4 – 3.4
BORON (10^{18} cm^{-2})	1.4 – 2.8	0.9 – 1.7	0.05 – 2.1

- DEUTERIUM IS DETECTED OVER THE WHOLE LIMITER SURFACE – EVEN IN AREAS WHICH WERE VERY HOT.
- INTERMIXING OF C, B, W IN THE SURFACE REGION (DEEP DIFFUSION or COMPOUND FORMATION)
- VERY SMALL QUANTITIES OF D, B, C ARE OBSERVED ON THE BACK SIDE OF THE DETACHED W COATING.

Si collector probe



結論

(1) 重水素は、炭素やボロンと共に再堆積層形成。

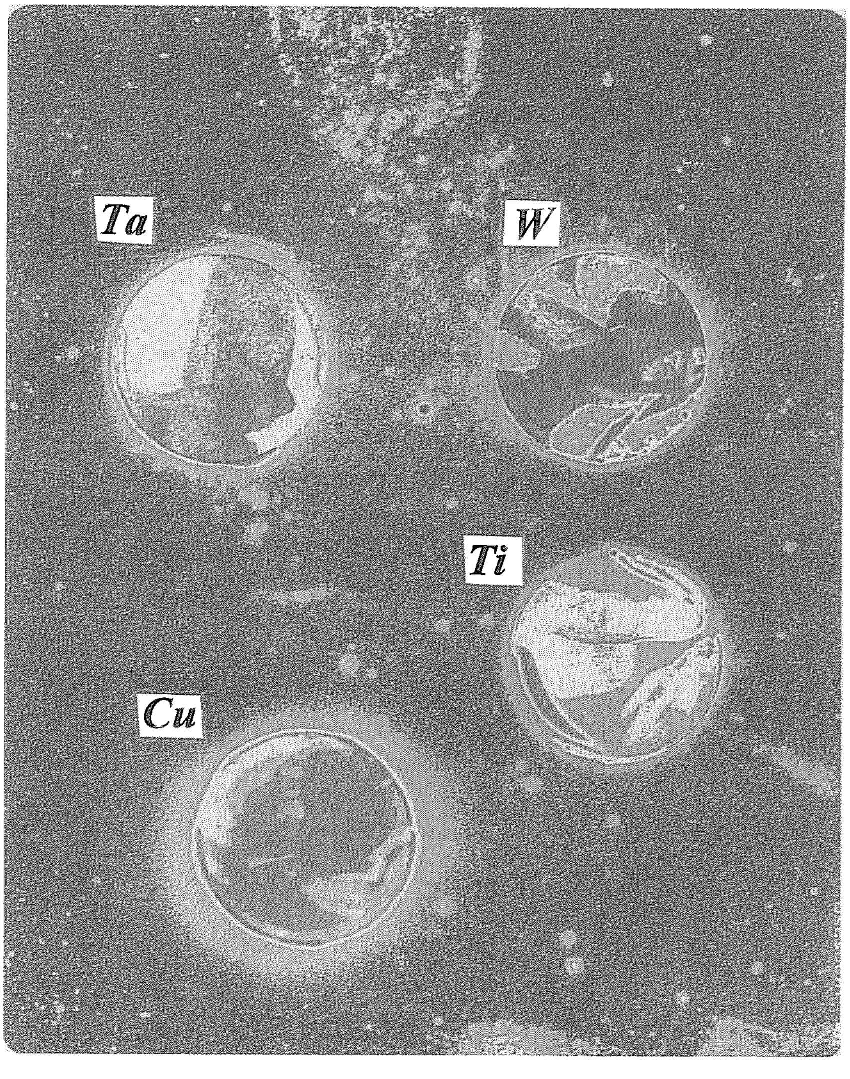
(2) D-D反応で生成したトリチウムはほぼ均一にプラズマ対向壁に打ち込まれた。

(3) リミタ裏側のようなプラズマが直接当たるない部分でもトリチウムを検出。

(4) 高温部分では脱ガスによりトリチウム濃度はやや減少。

(5) 粒子束の高いところでトリチウム濃度が高い傾向
　　ターゲットにおけるD-D反応を示唆。

(6) トーラス上下で対向壁のトリチウム分布はやや不均一
　　トーラス内でのプラズマの位置あるいは密度の不均一さを反映か？



3．JT-60U　黒鉛タイルへの応用予定

☆ポロイダル方向
　トロイダル方向　　の分布

☆ダイバータタイル上での分布
　温度、フラックス等との関係

☆炉内ダスト(デブリ)のトリチウム測定

☆炉内構造物のトリチウム分布

トリチウム脱離法の有効性の確認

ガス置換、　昇温、　放電、　電子ビーム、　レーザー、　紫外線

3.2 BIXS法によるトリチウムの拡散挙動の追跡
--タングステン材料--

（富山大・水素同位体研　松山 政夫）

1. 緒 言

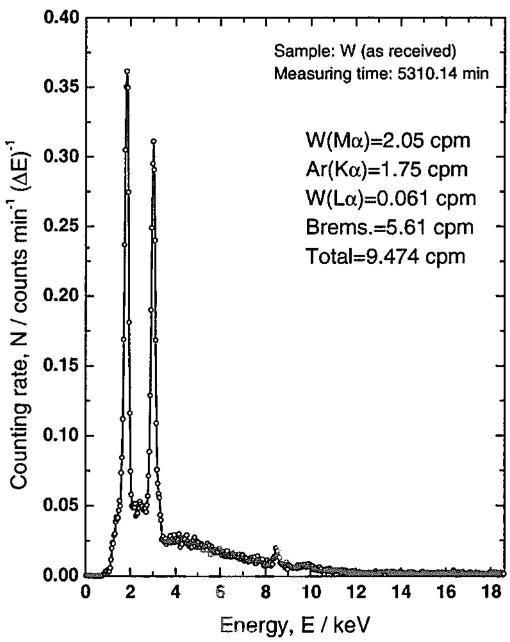
材料の表面層に捕獲されているトリチウム量の非破壊測定法を開発するために，演者らはこれまでトリチウムイオンを照射した黒鉛材料を主として用いて検討し，新しい測定原理に基づく有望な測定法としてβ線誘起X線計測法（BIXS）を確立した。本測定法は，表面トリチウムの評価のみならず材料内部に存在するトリチウムの分布状態の非破壊測定にも適用できる。本研究では，高熱負荷材料として注目されているタングステンにトリチウムイオンを照射してβ線誘起のX線スペクトルを測定し，その変化からトリチウム量及び分布状態の経時変化を追跡し，タングステン中でのトリチウム挙動に対する幾つかの知見を得た。

2. 実験方法

測定に使用したタングステン試料の大きさは$10\times10\times0.02\mathrm{mm}^3$であり，トリチウムイオン照射装置に入れて400℃で加熱排気したのちに室温まで冷却し，1keVのイオンエネルギーで15分間照射した。この際トリチウムの捕捉量を検討するために，これまでにデータが蓄積されている黒鉛材料にも同時照射した。この後約1週間室温で真空排気して両者の試料を取り出した。取り出した試料は，従来と同様の方法でAr雰囲気内にて約1ヶ月ごとにX線スペクトルを測定し，拡散挙動を調べるためにその経時変化を追跡した。1回の測定時間は約100時間である。

3. 結果及び考察

右の図はイオン照射後17日間経過した時点で観測されたX線スペクトルを表す。Arの特性X線ピーク(2.97 keV)に加え，2本の特性X線と制動X線ピークが観測された。2本の特性X線ピークはタングステンからのM_α及びL_α線に一致し，それぞれ約1.8及び8.4keVに出現した。なお，強度は非常に弱いが10keV付近にL_β線も確認された。特性X線及び制動X線ピークの強度は図中に示したとおりである。



これまでの研究から求められたβ線の転換係数を用いて，Arの特性X線ピーク強度よりタングステン表面のトリチウム量を評価すると，約7 kBqとなった。このトリチウム量はタングステンと同時に照射した黒鉛(32 kBq)に比べ1/4.6 であった。即ち，タングステンでは黒鉛に比べ，トリチウムイオンの捕獲係数が小さいか又は真空排気中に再放出したことを示している。

更に，これらの特性X線ピーク及び制動X線ピークの強度は時間と共に減少したが，それぞれの減少割合は異なっていた。また、制動X線ピークの形状が時間と共に僅かに変化した。これらのことより、室温でもタングステン内でトリチウムの拡散が起こっていることが確認された。次いで、X線スペクトルのシミュレーション解析より，トリチウムの拡散に伴う室温でのトリチウムの深さ分布の経時変化が推定された。

（平成12年12月1日：那珂研究所）
平成12年度第2回PSI・PFC合同研究会

BIXS法によるトリチウムの拡散挙動の追跡 --タングステン材料--

富山大・水素同位体研　　松山 政夫

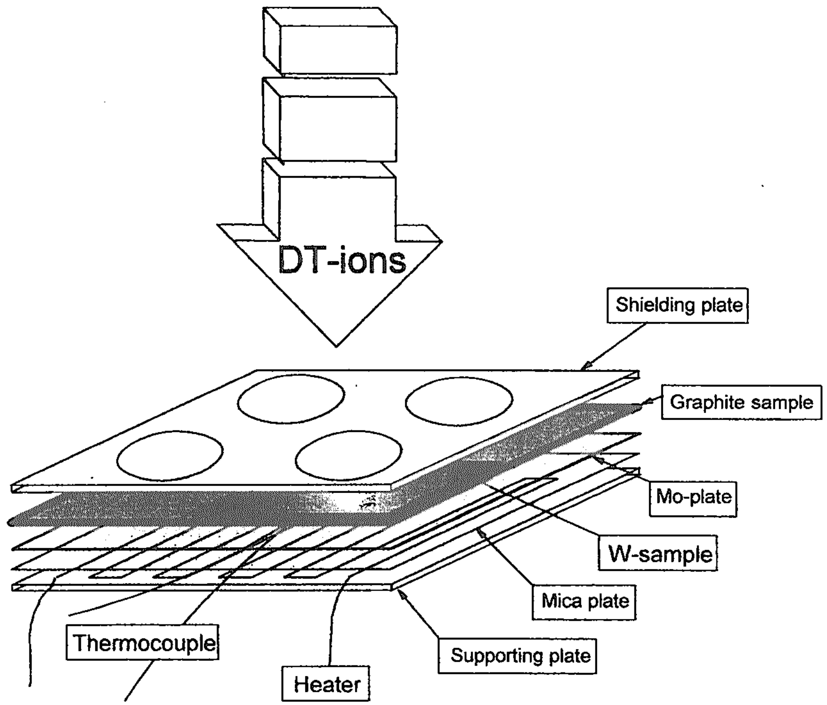
[目 的]

トリチウムの非破壊測定法として新しく開発したBIXS法による各種材料中でのトリチウム挙動の解明

[内 容]

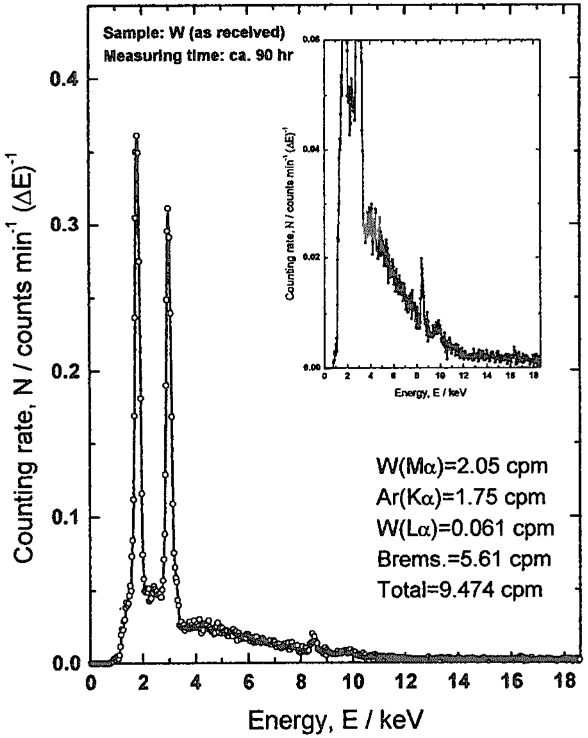
1.トリチウムイオンを照射したW材料からのX線スペクトルの観察及びスペクトルの経時変化
2.X線スペクトルのシミュレーション
3.シミュレーションによって求められたトリチウムの深さ分布及びその経時変化

タングステン試料のイオン照射図



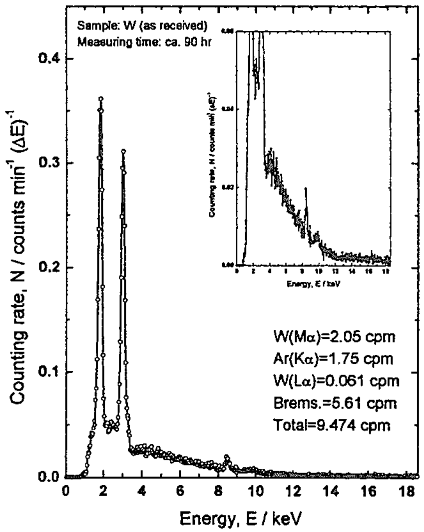
Sample:
(1) W(as received):powder metallurgy product, 99.95%
(2) W(He):8keV He-ions, $5\times10^{21}\ He^{+}/m^{2}$, Area=5mm$\phi$x 3.5 mm ϕ
(3) Graphite: IG-430U
Irradiation conditions:
(1) Pretreatment: 400C in vacuum
(2) DT ions: 1keV
(3) Area: 6mmϕ

タングステン試料で観測されるスペクトルの一例

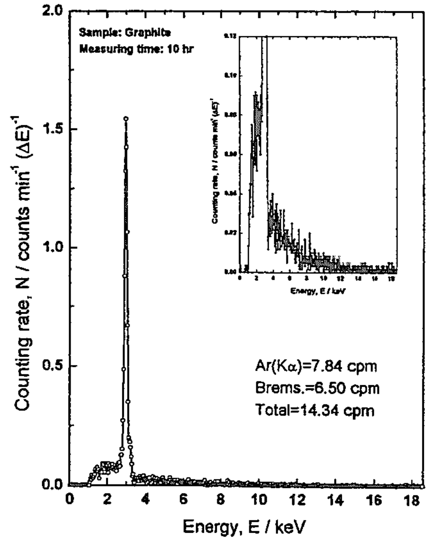


Characteristic X-rays from W:
K(α1)=59.3 keV, K(α2)=58.0
L(α1)=8.40, L(α2)=8.33
M(β) =1.835
M(α1)=1.775, M(α2)=1.773

トリチウムを同時照射したタングステン試料と黒鉛試料のX線スペクトル比較

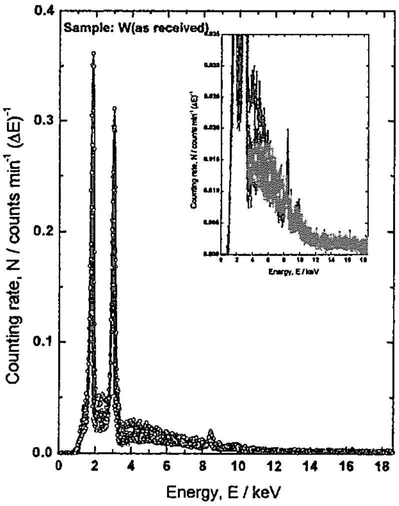


X-ray spectrum observed for W(as received)-sample.

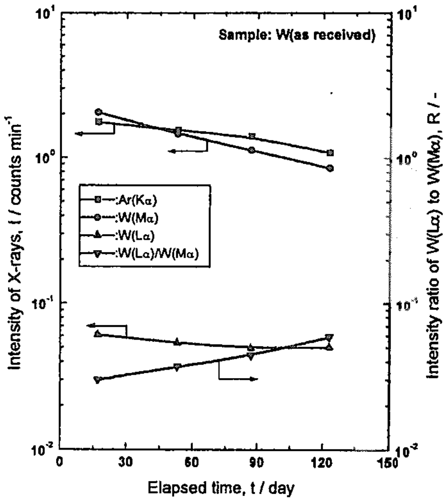


X-ray spectrum observed for graphite(IG-430U)-sample.

ヘリウム未照射試料でのX線スペクトルの経時変化

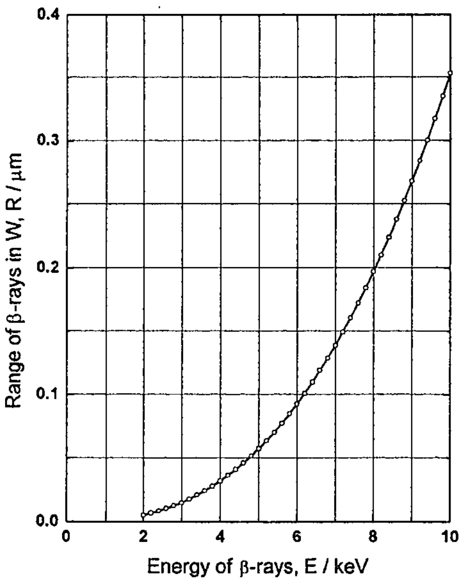


Change in the X-ray spectra with time.

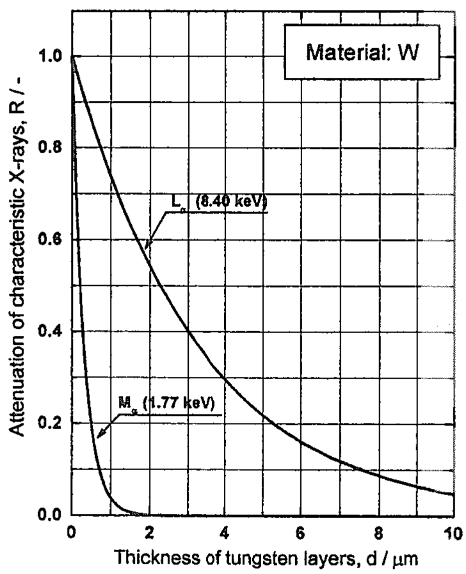


Changes in X-ray peak intensities and the ratio of W(Lα) to W(Mα) with time.

タングステン中でのβ線の飛程及びX線の減衰

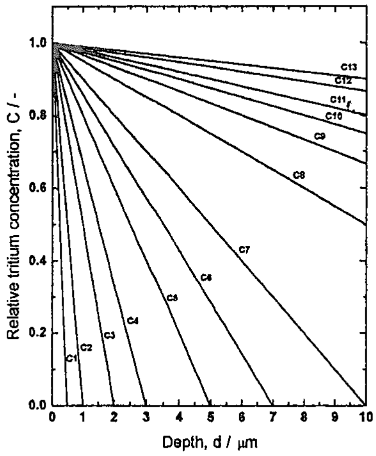


Range of β-rays in tungsten.

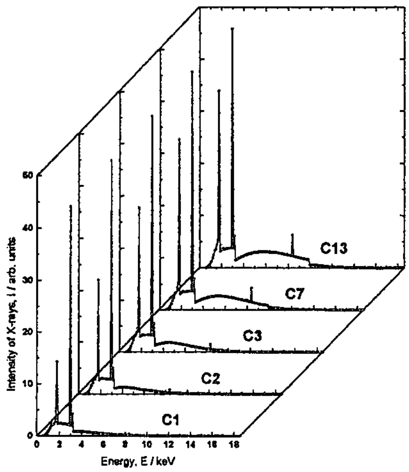


Attenuation of X-ray intensity in tungsten.

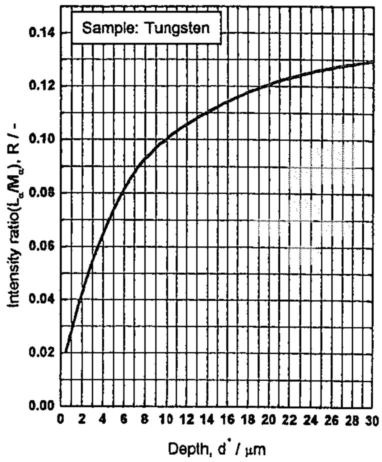
シミュレーションによるスペクトル変化の検討



Depth profiles of tritium in tungsten.



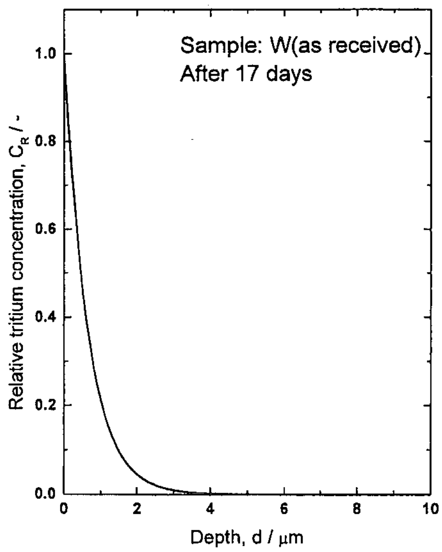
Simulation X-ray spectra calculated basing on the depth profiles.



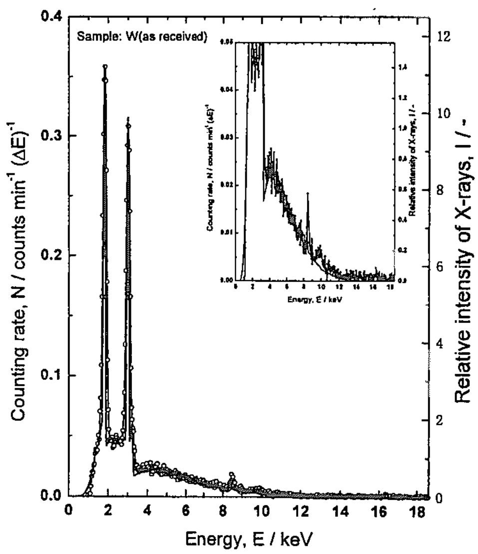
Intensity ratio of Lα to Mα obtained from the simulation spectra.

Main results:
(1) Two characteristic x-ray peaks and a bremsstrahlung x-ray peak are observed. (2) Intensity and shape of the x-ray spectrum change with depth profile. (3) Intensity ratio of W(Lα) to W(Mα) increases with depth profile.

観測スペクトルのシミュレーション

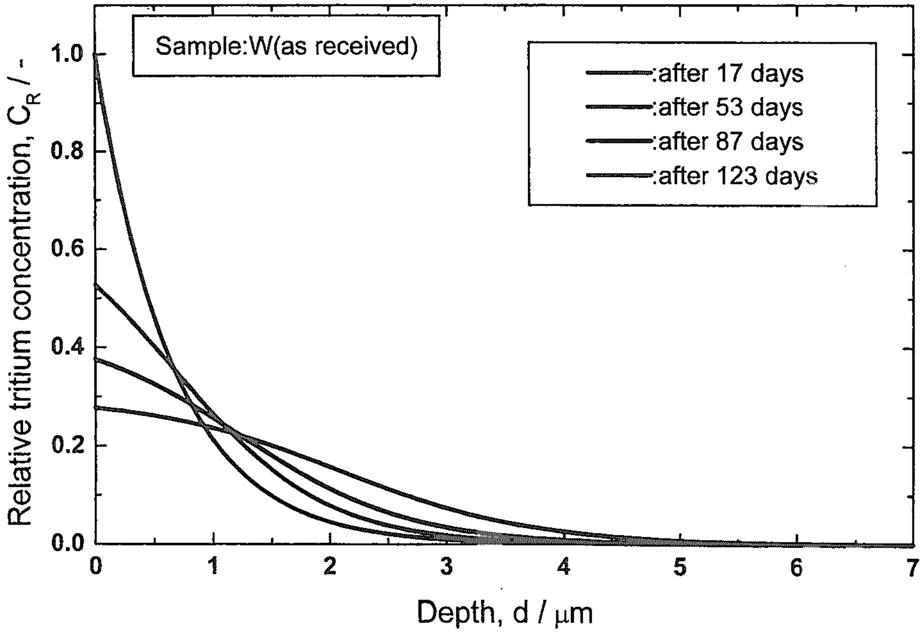


Depth profile of tritium



Simulation spectrum based on the tritium depth profile

観測スペクトルのシミュレーション解析により求められたW中のトリチウム分布



ま と め

トリチウムイオンを照射したタングステンからのX線スペクトルを観測し、室温でのその経時変化を調べた。また、X線スペクトルのシミュレーション解析を行い、トリチウムの深さ分布の変化を検討した。
これらのことより、以下のことが明らかとなった。

1.観測されたX線スペクトルには、Arからの特性X線に加え、W(Lα)及びW(Mα)の特性X線並びに制動X線が出現した。

2.特性X線の強度はW(Lα) << W(Mα)となった。.

3.タングステンの表面層に捕捉されたトリチウム量は、同時にイオン照射した黒鉛材料の約1/5であった。

4.スペクトルの強度は時間と共に減少し、制動X線スペクトルの形状変化及び特性X線強度比の増大より、イオン照射されたトリチウムの内部拡散及び放出を示唆している。

5.トリチウムの深さ分布を仮定することにより、観測スペクトルの変化を計算機シミュレーションにより求め、上記観測結果と同じ傾向を再現できた。

6.シミュレーション解析により、トリチウムの深さ分布の経時変化を推定した。

7.トリチウムの拡散係数の評価

3.3 紫外線（光/レーザー）によるトリチウム除染

日本原子力研究所　核融合工学部　トリチウム工学研究室
○洲　　亘、大矢恭久、田所孝広、大平　茂、林　　巧、中村博文、岩井保則、西　正孝

１．緒言　ITERの運転に伴い、トリチウムで高度に汚染した様々な廃棄物が発生する。プラズマ対向機器の共堆積層中に多く含まれるトリチウムは真空内において酸素ベーキングで除去する方式が検討されているが、放射毒性の高いトリチウム水の生成などの問題が指摘されている。また、トリチウムプラントやホットセル等の機器は高濃度のトリチウムに曝されて汚染するので、その効率的な除染方法の開発が望まれている。本研究では、紫外線（光/レーザー）照射によるトリチウム除染方法の有効性を検証した。

２．実験方法　試料として、C_2D_2（または C_2H_2）グロー放電で作製した共堆積層、JT-60水素放電タイル、TFTR D-T 燃焼実験で実際に使用されたプラズマ対向機器（タイル、シャッター、黒鉛クーポン）を用いた。２種類の紫外線発生装置、即ちランプ（172 nm, 50 mW/cm^2）またはレーザー（193 nm, 200 mJ, 25 ns/pulse, 1-50 Hz）により照射試験を実施し、照射前後の表面を偏光変調型 FT-IR または開放型電離箱、照射中の放出ガスを四重極質量分析計またはトリチウムモニターで測定した。

３．結果と考察　試料に紫外線（光/レーザー）を照射すると、水素の放出が顕著に見られた。実験室の共堆積層（a-C:D, 約 4 μm）が図１に示すように、50 秒の紫外線レーザー照射（193 nm, 86 mJ/cm^2, 25 ns/pulse, 5 Hz）によりきれいに除去された。TFTR D-T タイルの照射結果を図２に示す。照射開始の約 30 秒後にトリチウム放出速度が最大となった。照射前後の表面状態を比較すると、C-H 結合強度の減少（共堆積層試料）及び表面トリチウム濃度の減少（TFTR 機器）が確認された。紫外線照射はトリチウムと表面炭素原子との結合を直接切断し、表面トリチウムを効率的に除去する方法である。

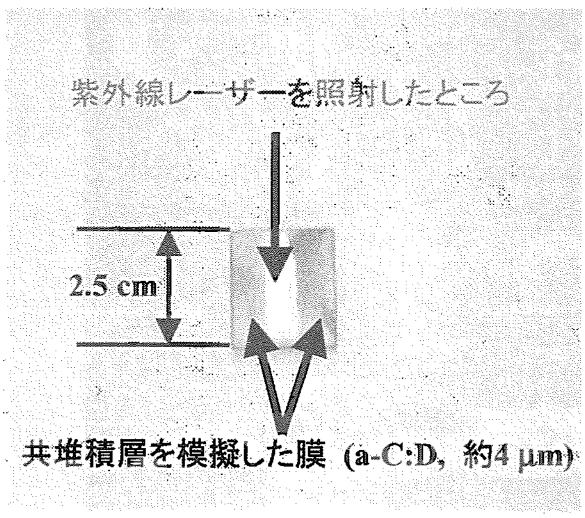


図１　共堆積層の紫外線レーザー照射

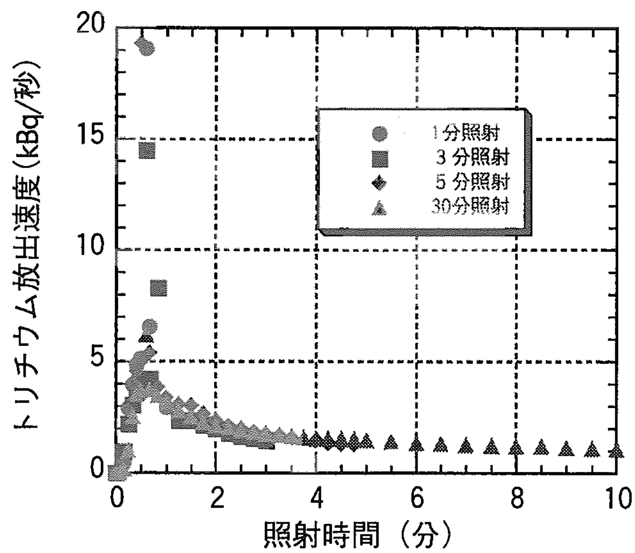


図２　TFTR タイルの紫外線レーザー照射

平成12年度 第2回 PSI研究会

紫外線(光/レーザー)によるトリチウム除染

日本原子力研究所 トリチウム工学研究室

○洲 亘、大矢恭久、田所孝広、大平 茂、林 巧、中村博文、岩井保則、西 正孝

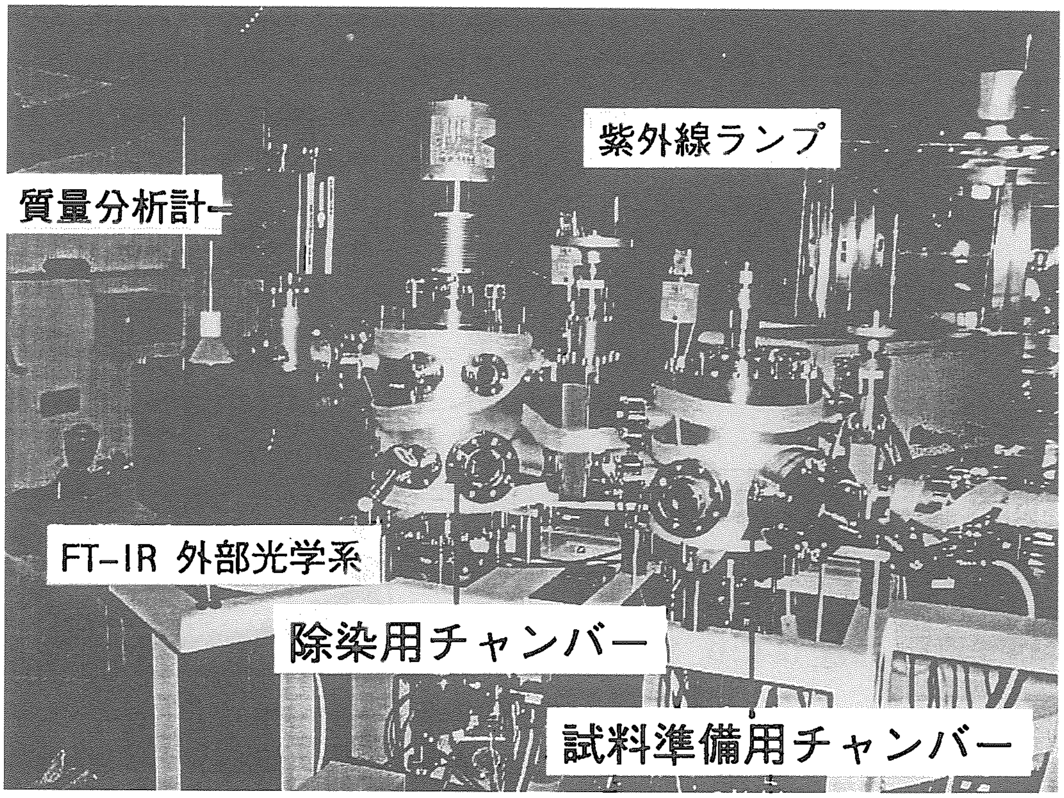
背景：

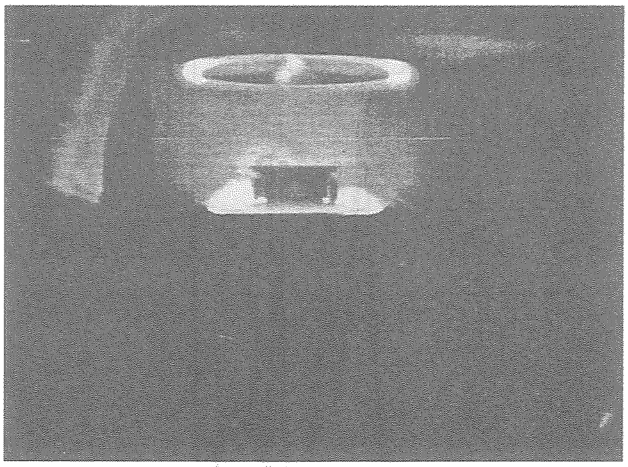
- ITER真空容器のトリチウム除染法：酸素ベーキング
  問題：トリチウム水の生成、材料の酸化など
- 紫外光/紫外線レーザー照射法
  特徴：C-H(T)結合を切断し、原子レベルに分解

内容:

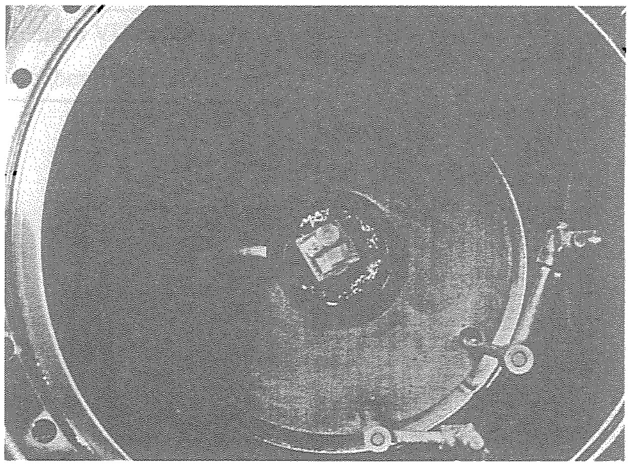
- 模擬共堆積層の紫外光/紫外線レーザー照射試験
- JT-60水素放電タイルの紫外線レーザー照射試験
- 3種類のTFTR D-T対向機器の紫外線レーザー照射試験

紫外光照射の装置図





(a) グロー放電中



(b) グロー放電後のチャンバー内の様子

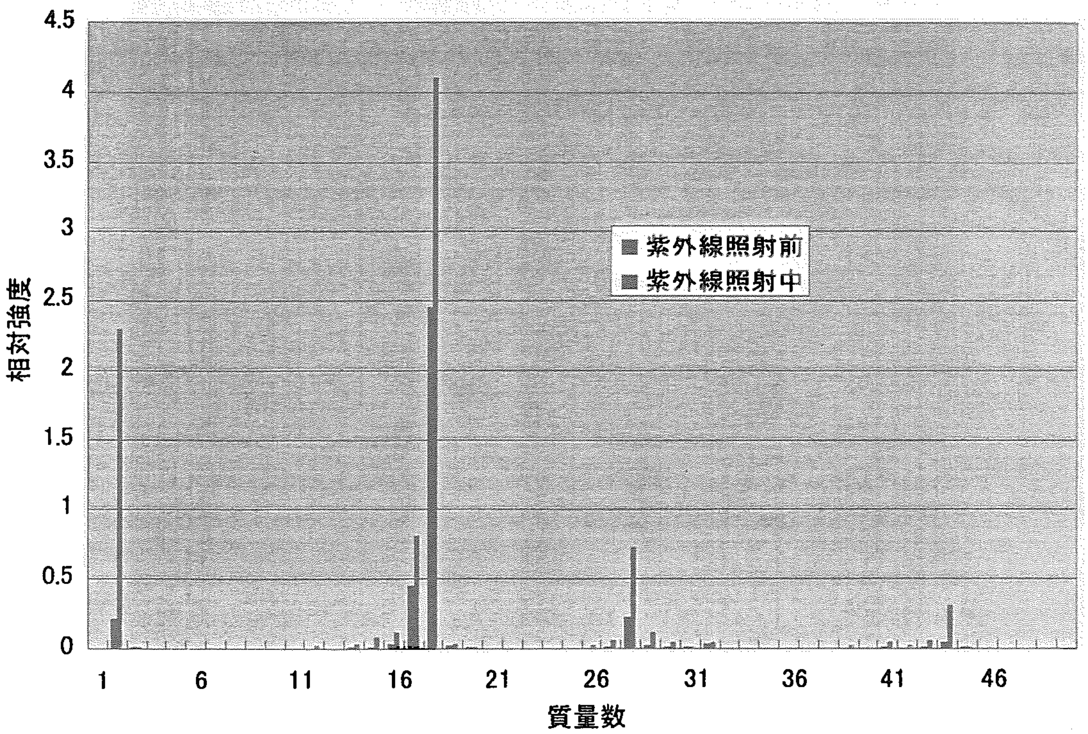
共堆積層を模擬した膜生成のための C_2D_2 (C_2H_2) ガスを用いたグロー放電写真

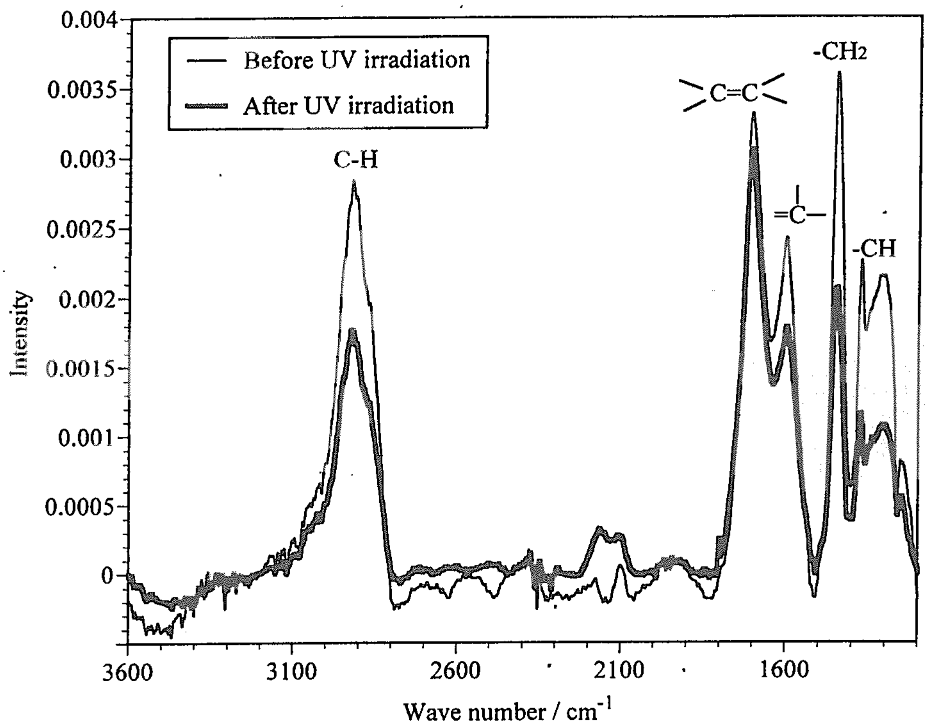
共堆積層 (a-C:H) の紫外線ランプ照射結果

試料: W基板にC_2H_2グロー放電で作製した共堆積層

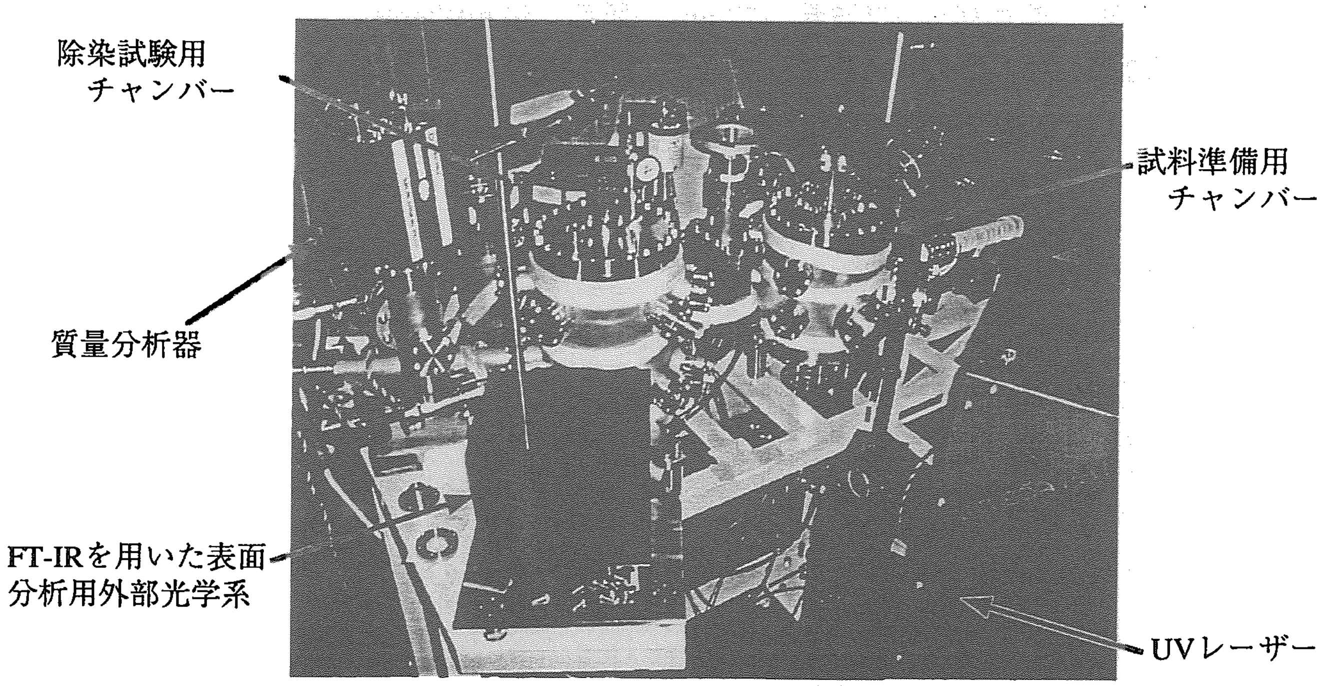
条件: 紫外線ランプ波長: 172 nm; 照度: 50 mW/cm^2

効果: トリチウム（水素）が主に水素同位体ガスとして放出される。

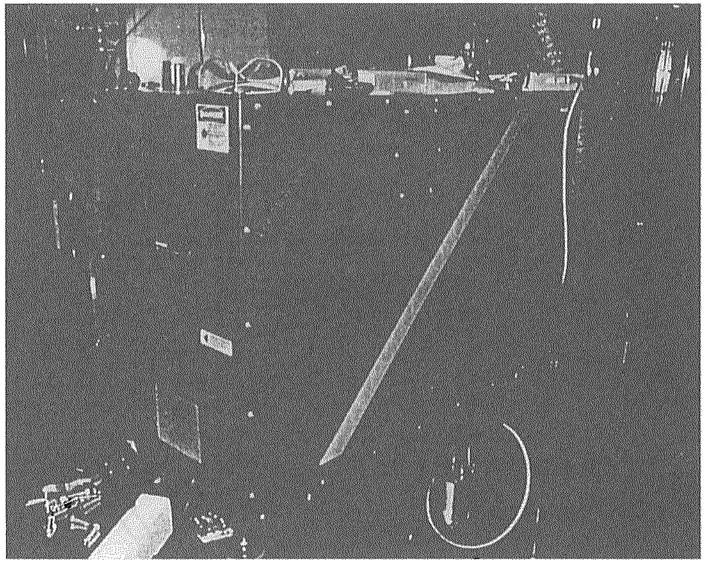




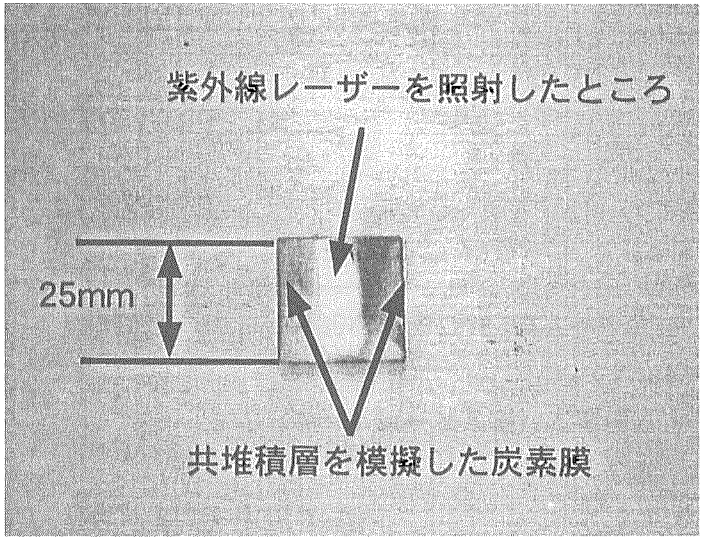
タングステン上にアセチレングロー放電で生成した膜への
紫外線照射前と後におけるFT-IRスペクトル変化



原研における除染試験装置写真



(a) UV laser (LAMBDA PHYSIK COMPex102)



(b) 紫外線レーザー照射結果

紫外線レーザーを用いたトリチウム除染試験

紫外線ランプと紫外線レーザーの比較

紫外線ランプ

波長：172 nm；光子エネルギー：7.1 eV
照度：50 mW/cm^2
光子フラックス：$5.3x10^{16}$ photons/cm^2/s

紫外線レーザー

波長：193 nm；光子エネルギー：6.3 eV
パルスエネルギー：250 mJ
繰り返し頻度：1～20 Hz
パルス幅：25 ns
照射面積：2 cm^2
光子フラックス：$6.0x10^{24}$ photons/cm^2/s

D/C 深さ方向分布測定

・ERDA及びRBS ： 表面近傍分布
（データベースを用いて規格）

・SIMS ： 深さ方向分布
（上記ERDA及びRBSのデータを用いて規格）

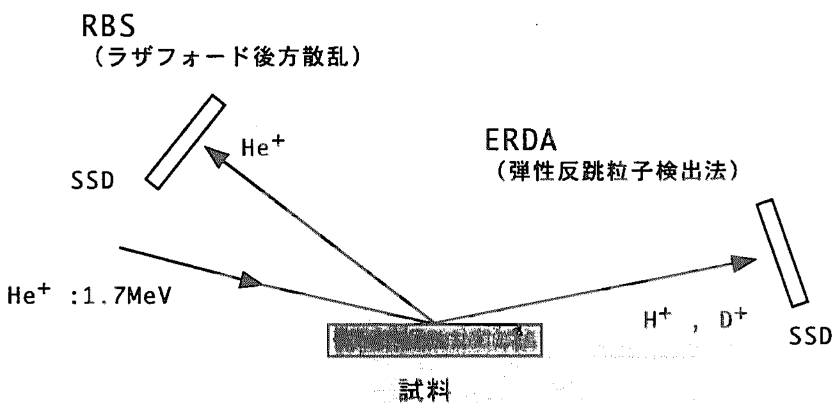
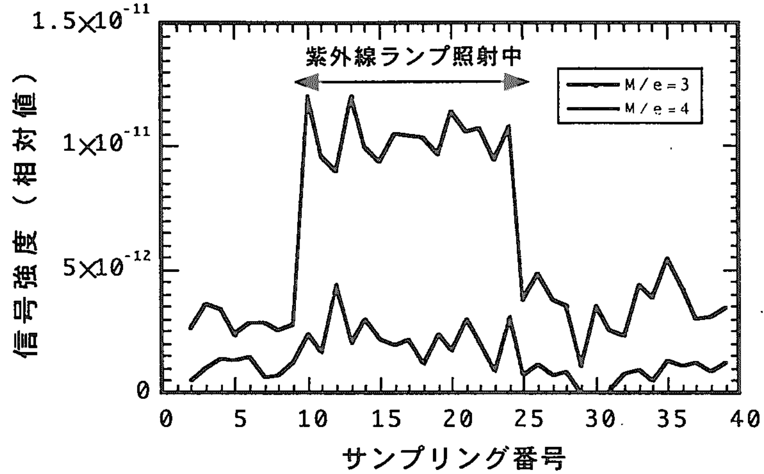
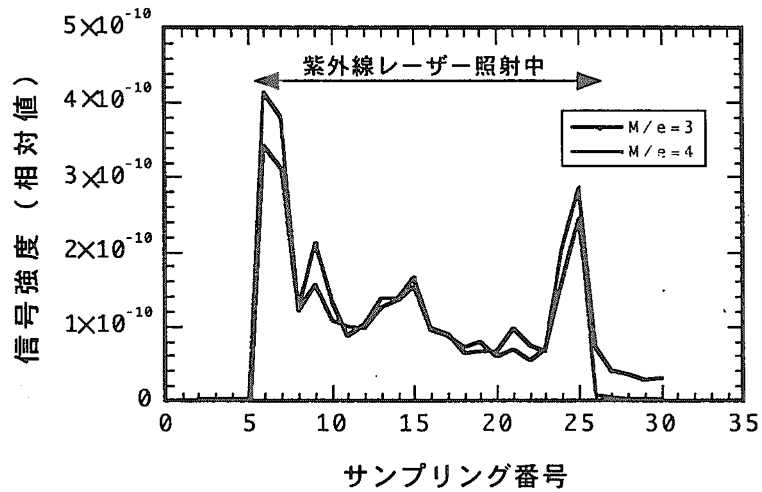


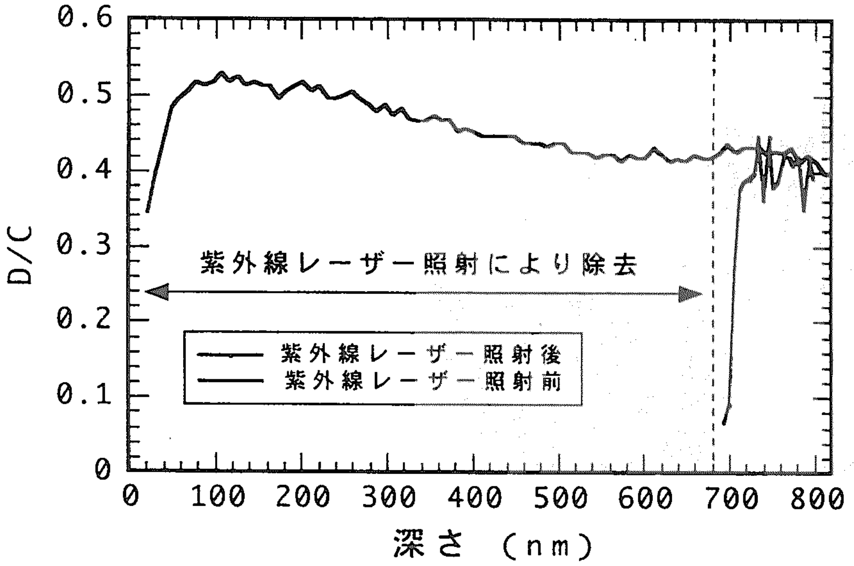
図 ERDA及びRBS

紫外線ランプ (172 nm, <1 mJ)



紫外線レーザー (193 nm, 86 mJ)





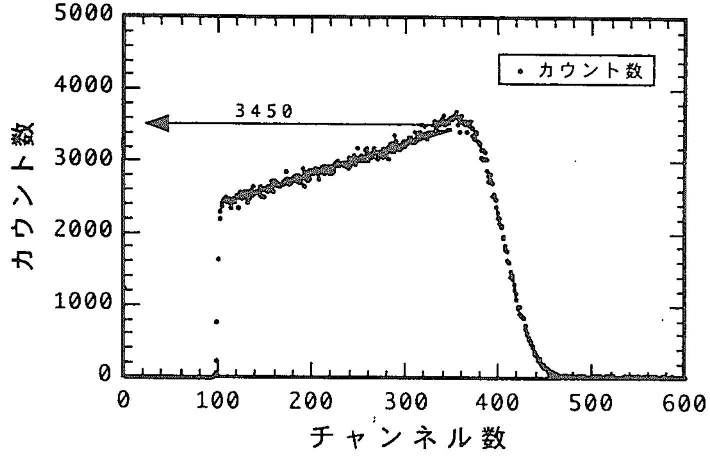
D/C 深さ方向分布

紫外線レーザー

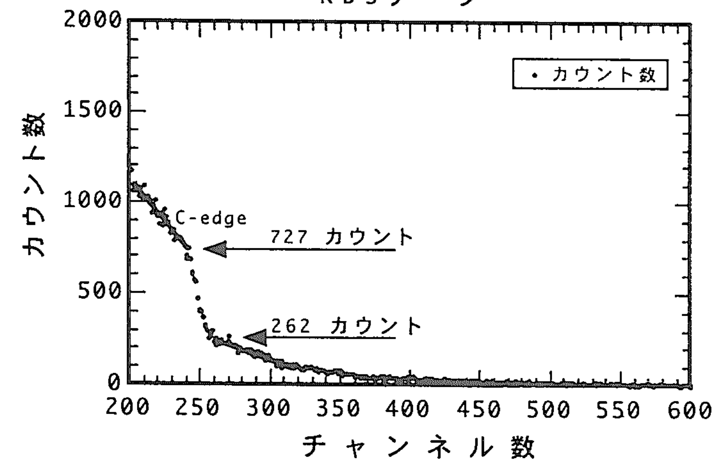
波長	:	193 nm
出力	:	86 mJ (試料表面)
照射時間	:	1.25×10^{-6} 秒(25 ns/パルス, 50 パルス)
		(2.6×10^{18} photon/cm^2)

⇒ 1 nm ⇨ 3.8×10^{15} photon/cm^2

ERDAデータ



RBSデータ



参照データ

H/C	:	0.4
N_{RBS}	:	99 [カウント]
N_{ERDA}	:	555 [カウント]

測定データ

N_{RBS}	:	465 [カウント]
N_{ERDA}	:	3450 [カウント]

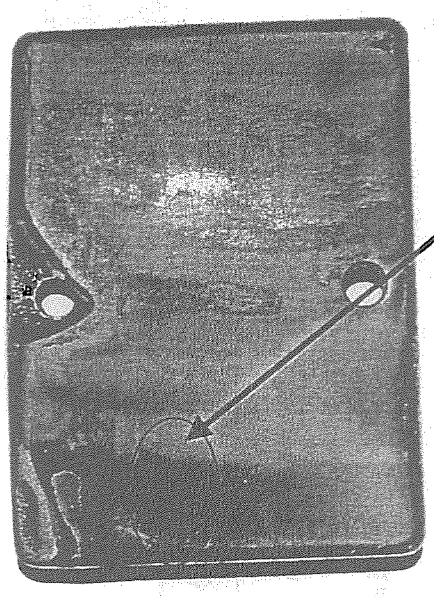
⇩

H/C ～ 0.53

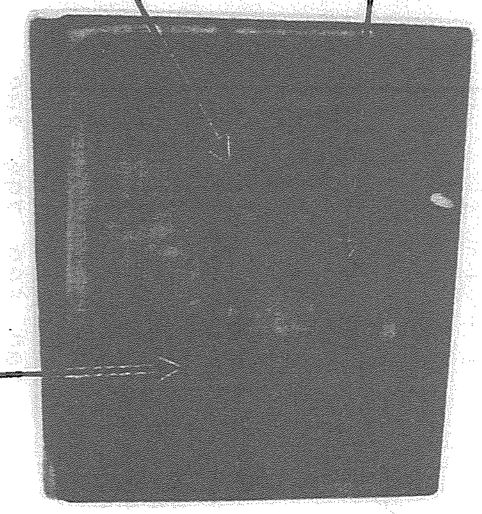
エッチング速度

試料	膜厚 (nm)	エッチング時間 (分)	エッチング速度 (nm/分)
紫外線未照射領域 1	835.4	38.0	22.0
紫外線照射領域 1	131.8	9.8	13.4
紫外線未照射領域 2	848.4	39.3	21.6
紫外線照射領域 2	153.7	9.8	15.7

エッチング ： Cs^+ (14.5keV,100nA)

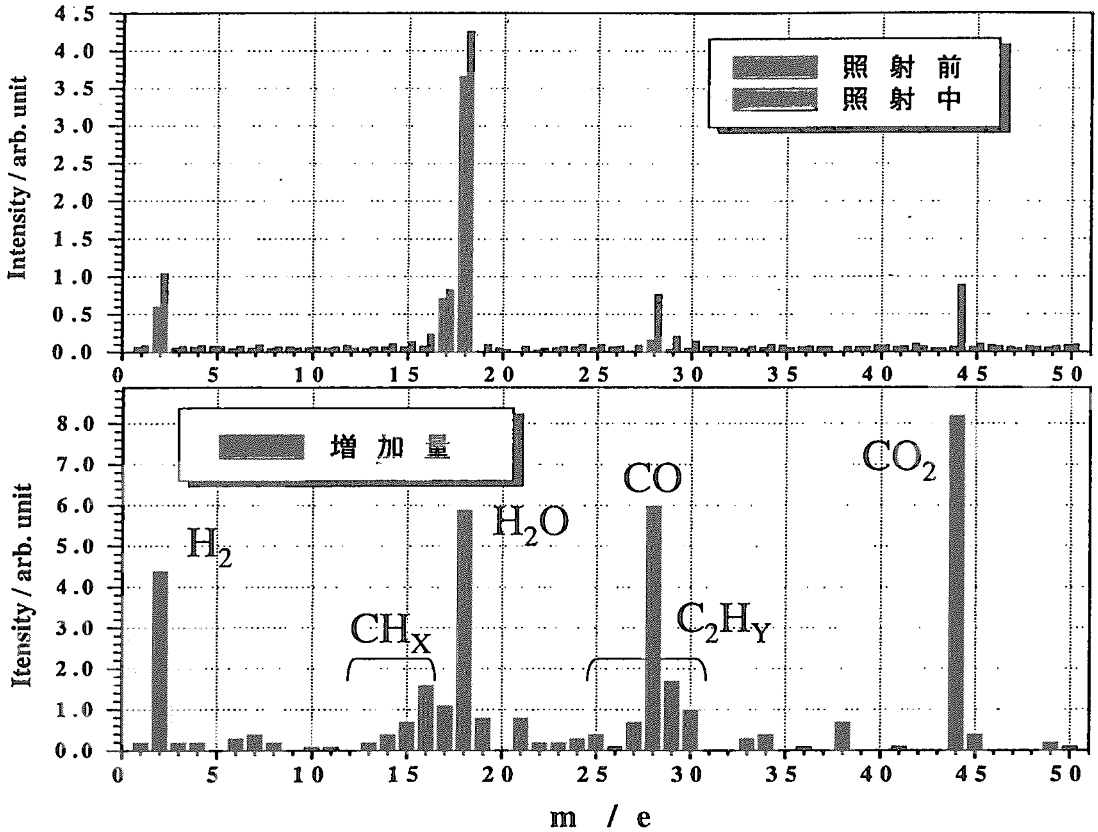


真空中照射



大気中照射:100 ショット

紫外線レーザー照射したJT-60タイルの写真



紫外線照射中のQMSスペクトル

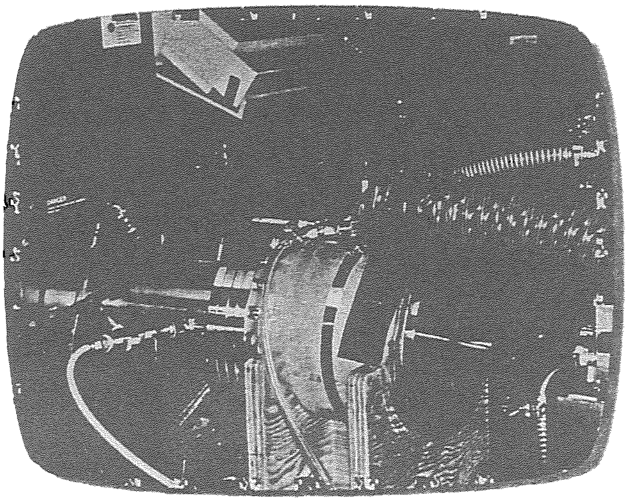
TFTR D-T対向機器の紫外線レーザー照射試験

<u>試料：</u>

①リミッタタイル：CFC、12.6 cm×8.3 cm、表面汚染：2.6,3.5 MBq/cm²。
②金属シャッター：SS304、表面に共堆積層あり、表面汚染：2 MBq/cm²。
③黒鉛板状試料：汚染調査用試料片、表面汚染：16 MBq/cm²。

<u>取得したデータ：</u>

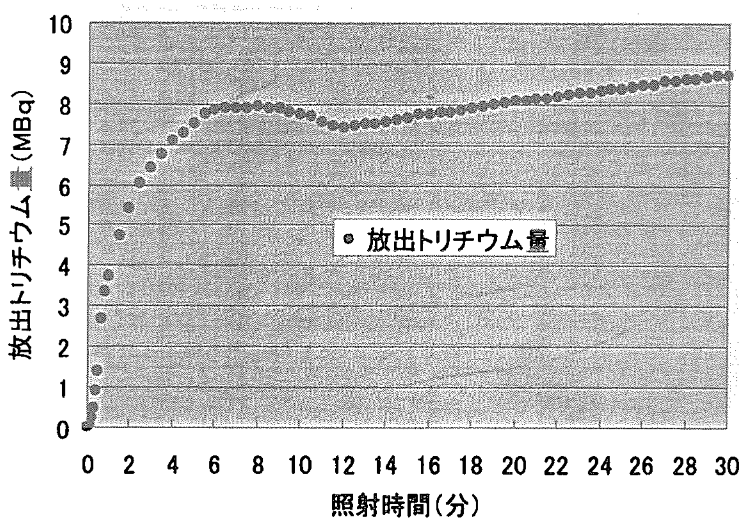
①照射前後の表面トリチウム濃度
（開放型電離箱）
②アルゴン雰囲気の照射中、試料から放出したトリチウム量の経時変化
（通気式トリチウムモニター）
③真空照射中、試料から放出したガススペクトル（四重極質量分析器）

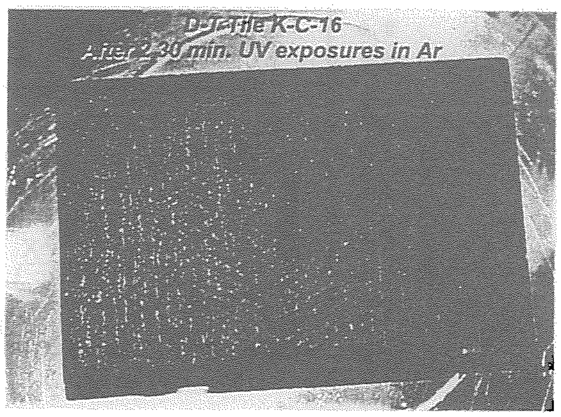


D-Tタイ イ ルKC-16の照射結果

照射条件: 170 mJ @193 nm, 5 Hz
Ar循環フロー: 2 liter/min
チャンバー容積: 6 liter

照射①: 2.6 MBq/cm^2 ->
1.7 MBq/cm^2: 35%減少
照射②: 2.3 MBq/cm^2 ->
1.6 MBq/cm^2: 31% 減少

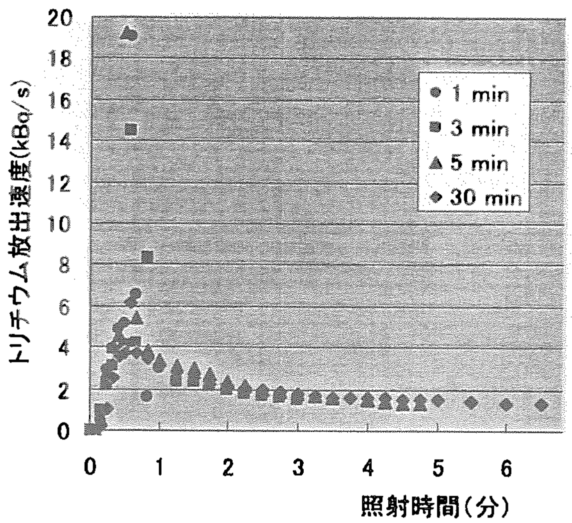


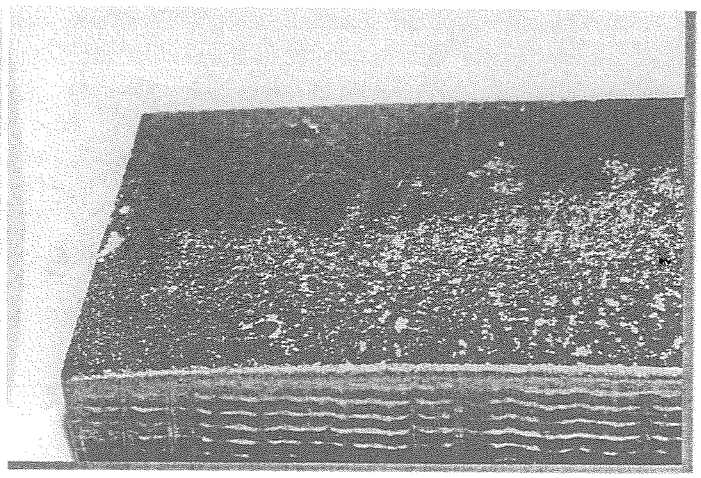


D-Tタイ イ ルKB-12の照射結果

照射条件: 170 mJ @193 nm, 5 Hz
Ar換気フロー: 2 liter/min
チャンバー容積: 6 liter

照射時間: 1分, 3分, 5分, 30分
3.5 MBq/cm^2 ->2.9, 2.8, 2.8, 2.6
MBq/cm^2
質量分析器: H_2: 4.67 x 10^{-8} -> 8.90 x 10^{-8}

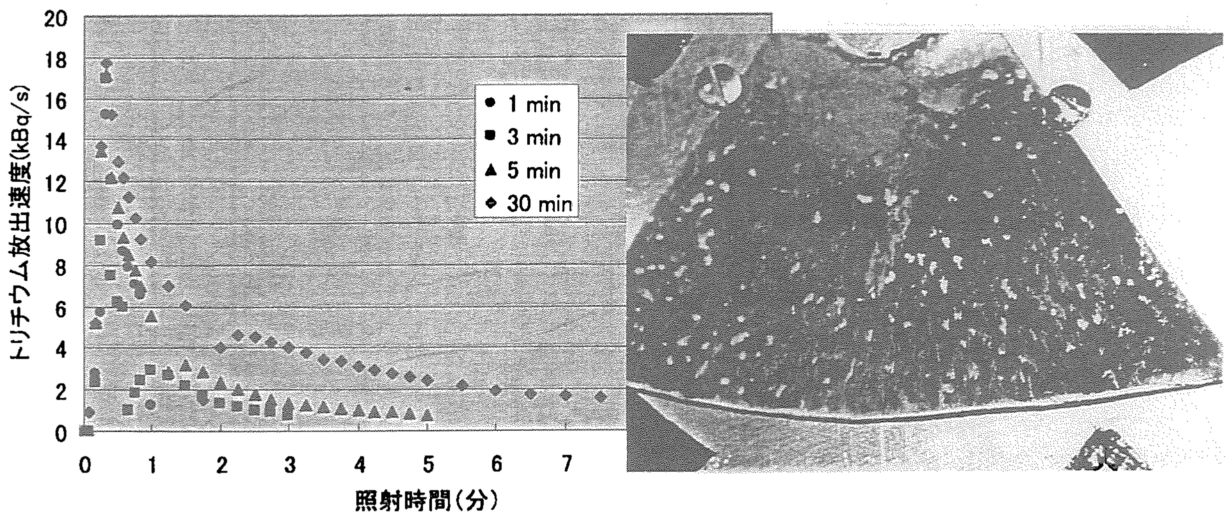




シャッター(SS304)の照射結果

照射条件: 170 mJ @193 nm, 5 Hz
照射時間:1 min, 3 min, 5 min, 30 min
Ar換気フロー:2 liter/min
チャンバー容積:6 liter

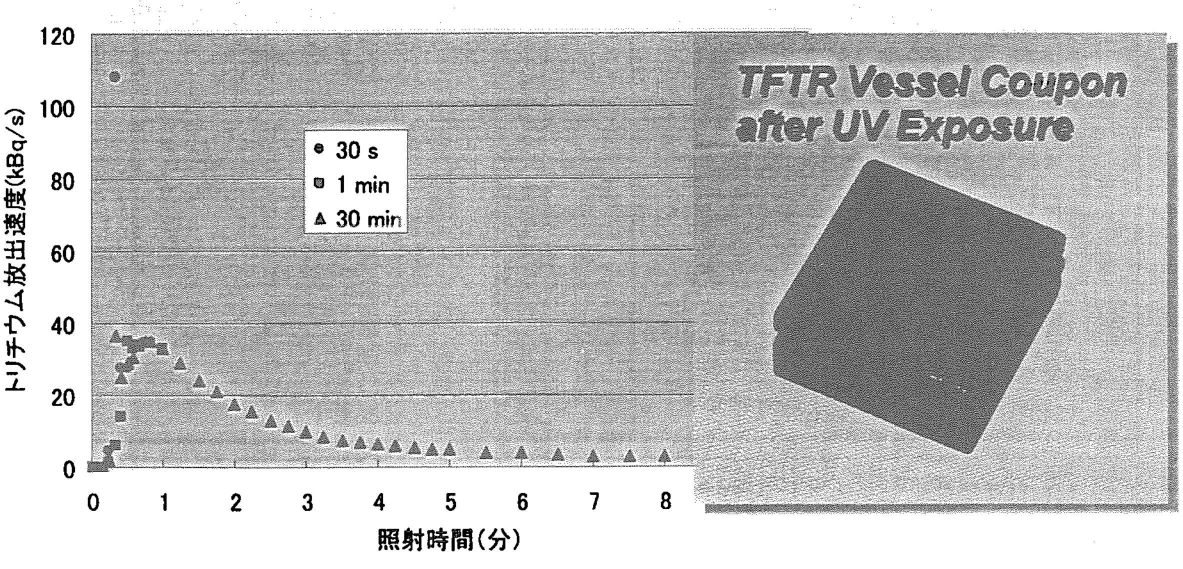
照射①: 2.0 MBq/cm^2 ->
0.7 MBq/cm^2: 65%減少
照射②: 2.0 MBq/cm^2 ->
1.1 MBq/cm^2: 45% 減少



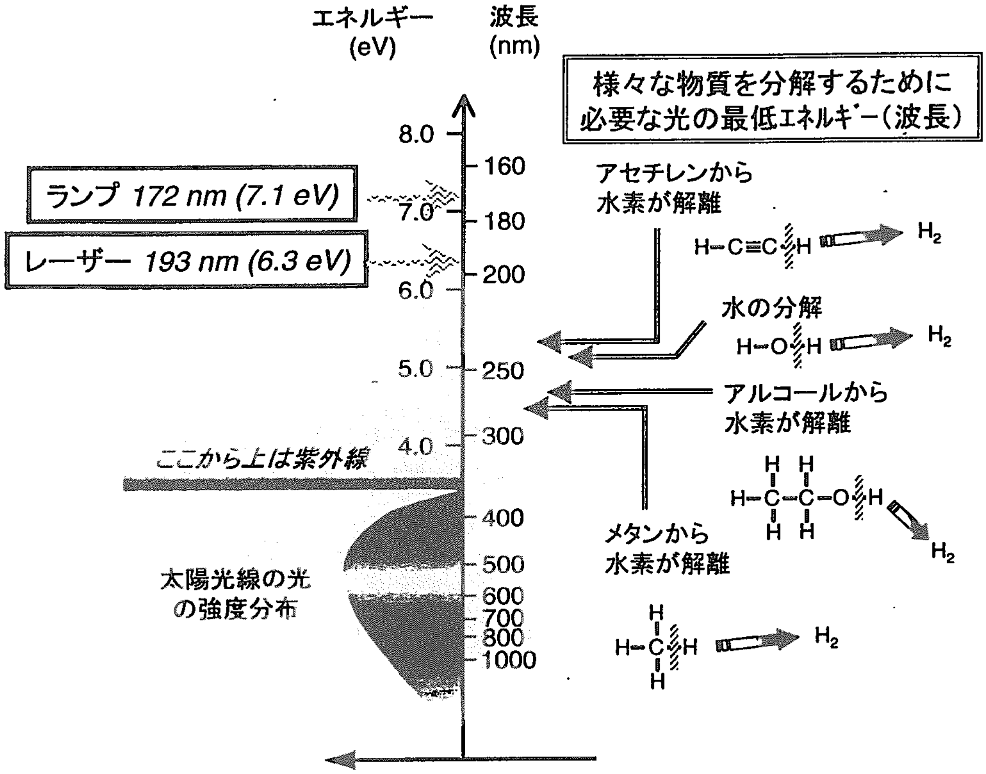
黒鉛クーポンの照射結果

照射条件: 170 mJ @193 nm, 5 Hz
照射時間:30 s, 1 min, 30 min
Ar換気フロー:2 liter/min
チャンバー容積:6 liter

照射①: 16 MBq/cm^2 ->
10 MBq/cm^2: 37%減少
照射②: 16 MBq/cm^2 ->
12 MBq/cm^2: 25% 減少



考察：紫外線（光/レーザー）の除染機構



紫外光子の進入深さ：10 nm; β線の炭素での飛程：1000 nm;表面温度上昇：100度以下

結　　論

1．共堆積層を紫外線（光/レーザー）の照射により分解できることを明らかにした。ガス分析により水素（トリチウム）が主に水素同位体ガスとして放出されることを検証した。炭化水素の形で放出される量がほとんど無いことは、その付着による2次汚染の可能性が少ないことを意味する。

2．実機装置のプラズマ対向材料（JT−60タイル、TFTRタイル・シャッター・クーポン）を用いて紫外線レーザー照射試験を実施した結果、表面層のトリチウムを数秒の紫外線レーザー照射で除去できることを確認した。

紫外線光/レーザー照射は原子レベルで被照射部分の材料表面を分解・除去できる。

3.4 純トリチウムイオンビームを利用したPSI研究

The PSI studies using Pure Tritium Ion Beam

原研　中村　博文、林　巧、西　正孝

DT 核融合炉においてトリチウムの関連するプラズマー表面相互作用(PSI)として挙げられるトリチウム透過・滞留現象は安全評価上重要であり、高精度での予測が要求される。このためには、プラズマ対向材料(PFC)中に打ち込まれたトリチウムの単体としての材料中挙動に関する知見が不可欠である。原研においては、本現象の解明のためにトリチウムが使用可能なイオン源を利用して、純トリチウム(T)イオンを生成し、これを利用したPSI研究が進められている。本研究は、純 T イオンを使用することにより、希釈効果のないトリチウム単体としての挙動に関する情報が得られると共に、軽水素、重水素と同一の測定手法が採用でき、測定手法の違いに依存しない同位体効果の測定が可能となる利点を有している。

現在までに純 T イオンを使用した PSI 研究として、PFC 候補材料中のトリチウム透過試験と T イオン注入材料からのトリチウムの昇温脱離試験が実施されてきている。

トリチウム透過実験では、ITER-PFC 候補材であるタングステンとその他の比較用材料(ニッケル、鉄)に関する純 T 及び重水素(D)のイオン注入透過試験を実施し、各材料における透過挙動及び拡散挙動に関する同位体効果の測定を行った。この結果、タングステン及びニッケル中の D-T の拡散に関する同位体効果は、古典拡散理論から予測される同位体効果よりも小さい傾向を有することが観察された。

トリチウム昇温脱離試験に関しては、T イオン注入材料からのトリチウム単体としての脱離挙動の測定が可能であることが確認され、今後トリチウム関連の PSI 研究に利用できることを示した。

平成12年度 第2回 PSI研究会

於 原研那珂

純トリチウムイオンビームを用いたPSI研究

日本原子力研究所核融合工学部
トリチウム工学研究室
中村 博文、林 巧、西 正孝

JAERI

トリチウムとプラズマ表面相互作用（PSI）

PSI 関連項目
- プラズマ中不純物制御（スパッタリング、損耗）
- 材料強度（高熱負荷、粒子負荷）
- **安全性（トリチウム挙動）**

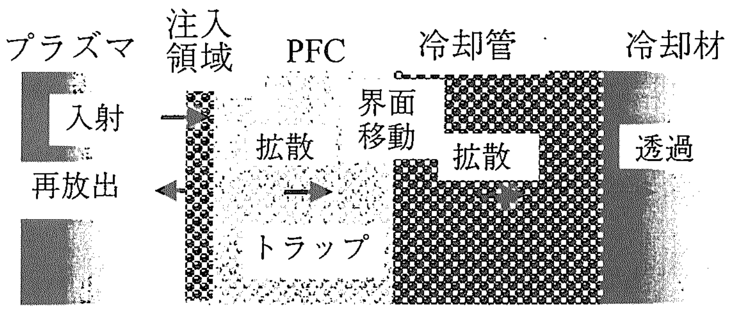
PSI におけるトリチウム関連現象
- トリチウム透過
- PFC 中のトリチウム滞留

透過現象 → 冷却材中のトリチウム濃度上昇
関連項目
- トリチウム除去系の設計
- 安全評価上のソースターム

滞留現象 → トーラス内Ｔインベントリ増大
関連項目
- トリチウム計量管理
- 安全評価上のソースターム

JAERI

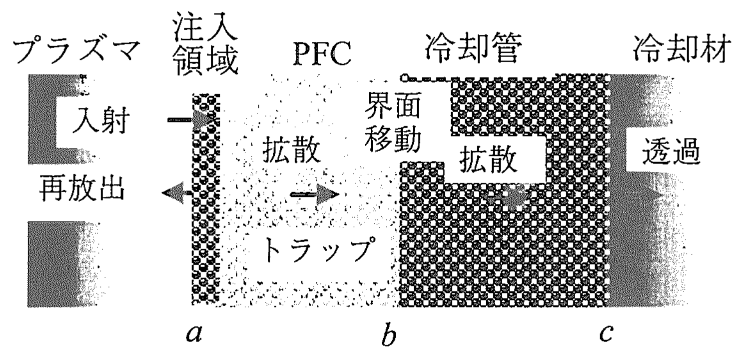
PFC 中のトリチウム挙動(1)



評価対象領域	トリチウム輸送過程	評価上考慮すべき事項
注入領域	・拡散律速 ・再結合律速 ・ Special diffusivity ・ Saturation Model ・共堆積	・適用可能モデルの検証 ・拡散、再結合の同位体効果 ・共堆積機構　等
PFC 領域	・拡散過程 ・トラップ過程 ・熱拡散過程	・拡散の同位体効果 ・トラップ密度、エネルギー ・輸送熱
界面	・界面平衡モデル	・溶解の同位体効果
冷却管領域	・拡散過程 ・熱拡散過程	・拡散の同位体効果 ・輸送熱
冷却水への透過	・拡散律速 ・再結合律速 ・同位体交換反応	・適用可能モデルの検証 ・移行機構　等

JAERI

PFC 中のトリチウム挙動(2)



注入領域

$$J_i = kr_i^{PFC} C_i(a,t)^2 \text{ or } J_i = D_i^{PFC}(T)\frac{\partial C_i(a,t)}{\partial x}$$

$$\text{or } C_i(a,t) = Ks_i^{PFC} P_i^n \quad n = 0.5 \text{ or } 1 \text{ etc.}$$

PFC 領域

$$\frac{\partial C_i(x,t)}{\partial t} = -\frac{\partial J_i(x,t)}{\partial x} - \frac{\partial C_T(x,t)}{\partial t} + \gamma C_i(x,t) + S_i(x,t)$$

$$J_i(x,t) = -D_i(T)\left(\frac{\partial C_i(x,t)}{\partial x} + \frac{C_i(x,t)Q^*}{kT^2}\right)$$

界面

$$\left(\frac{C_i^{PFC}(b,t)}{Ks_i^{PFC}}\right) = \left(\frac{C_i^{CP}(b,t)}{Ks_i^{CP}}\right)$$

冷却管領域

$$\frac{\partial C_i(x,t)}{\partial t} = -\frac{\partial J_i(x,t)}{\partial x} + \gamma C_i(x,t)$$

$$J_i(x,t) = -D_i^{CP}(T)\left(\frac{\partial C_i(x,t)}{\partial x} + \frac{C_i(x,t)Q^*}{kT^2}\right)$$

水への透過

$$J_i = kr_i^{CP} C_i(c,t)^2 \text{ or } J_i = D_i^{CP}(T)\frac{\partial C_i(c,t)}{\partial x}$$

$$\text{or } C(c,t) = Ks_i^{CP} P_i^n \quad n = 0.5 \text{ or } 1$$

$i = D, T,$

J:flux, C:concentration, C_T:traped concentaration,

D:diffusivity, kr:Recombination coefficient, Ks:Solbility, Q^*:transfer heat

P: Partial pressure, k: Boltzman constant, fÅDecay constant

JAERI

高精度でのトリチウム挙動予測には、

・各領域（特に注入領域）におけるトリチウム輸送モデルの同定
・各領域における材料中トリチウムの物性値が不可欠

材料中トリチウム挙動における主要物性値
・拡散係数(*D*)
・表面再結合係数(*kr*)
・溶解度(*Ks*)
・トラップ密度、エネルギー　等

PFC 候補材料に関するトリチウム(T)物性値
・軽水素(H),重水素(D)で多数、希釈 T で少数の研究例
・高濃度 T による研究例稀少

材料中トリチウム挙動に関する知見不十分

↓

トリチウム単体の材料中挙動を検証する必要性

↓

純トリチウムを使用した PSI 模擬実験の計画

JAERI

純トリチウムイオンビーム発生装置
(TPA: Tritium Permeation Apparatus)

目　的：

・純トリチウムイオンの材料注入による材料中トリチウムの単体挙動の解明
・同一測定手法による H,D,T 間の材料中挙動に関する同位体効果の検証

↓

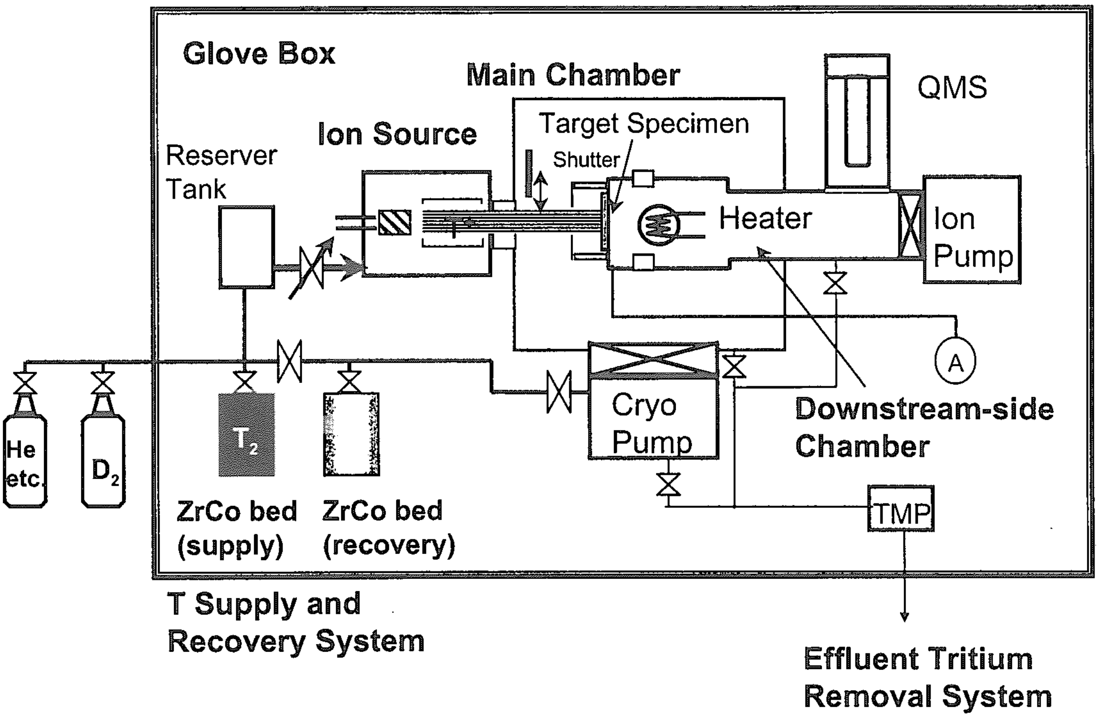
純トリチウムイオン源の製作・試験実施
(原研トリチウムプロセス研究棟)

トリチウムイオン源仕様
改良型キャピラリー DuoPIGatron
イオンエネルギー：　200～2000eV
イオンフラックス：　最大　1×10^{19}ions/m^{2}s
低エネルギー、高フラックスのイオン源

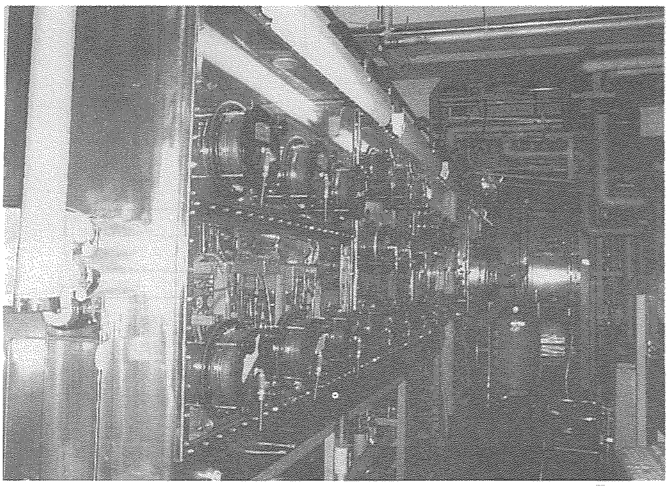
最大トリチウム使用可能量：　1PBq(30,000Ci)
トリチウム同位体純度：　＞95%
（任意の同位体組成の調整可能）

（純 T^+生成可能なイオン源は、現時点で世界唯一）

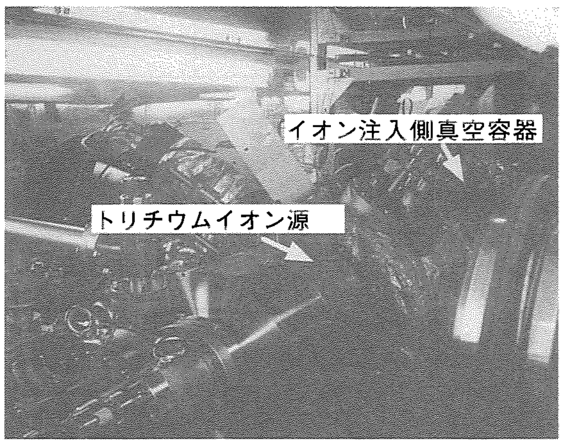
JAERI



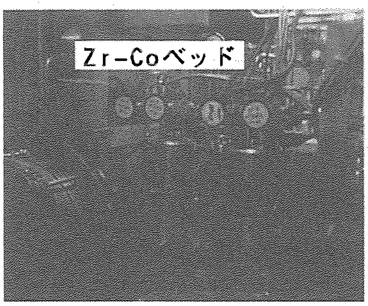
Schematic Diagram of the Tritium Permeation Apparatus



TPAグローブボックス外観図



TPAイオン源及び真空容器外観図



トリチウム供給・
回収用Zr－Coベッド

JAERI

TPA を用いた研究例 1

トリチウム透過実験

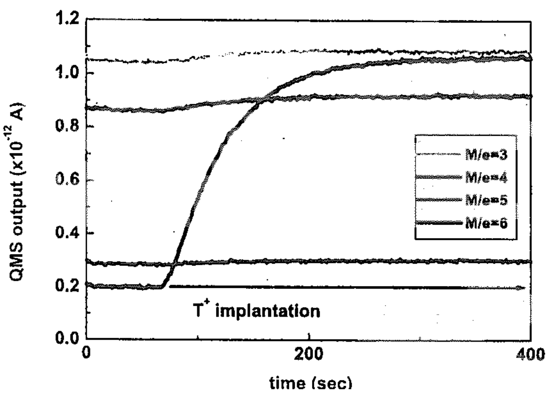
目的　トリチウム単体の透過挙動測定
透過挙動の同位体効果の測定

対象材料
ITER 候補材
タングステン（0.025mm 厚材）
基礎試験
ニッケル（0.1mm 厚材）
鉄（0.1mm 厚材）

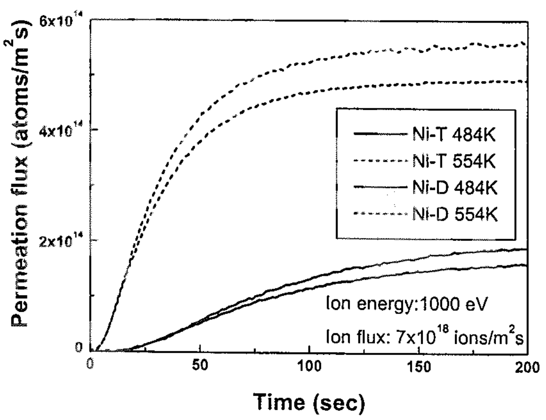
評価対象領域	トリチウム輸送過程	評価上考慮すべき事項
注入領域	・拡散律速 ・再結合律速 ・ Special diffusivity ・ Saturation Model ・共堆積	・適用可能モデルの検証 ・拡散、再結合の同位体効果 ・共堆積機構　等
PFC 領域	・拡散過程 ・トラップ過程 ・熱拡散過程	・拡散の同位体効果 ・トラップ密度、エネルギー ・輸送熱

JAERI

研究例 1　T 透過



QMS による透過量の測定例



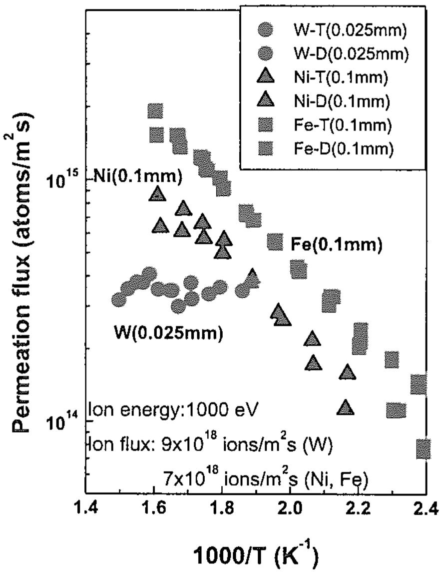
同一条件下における D,T の透過挙動比較

・透過したトリチウムはそのほとんど(>90%)が T_2 の化学形で放出
↓
トリチウム単体の挙動として取扱が可能なことを確認

・ D-T 間の透過挙動の直接比較により定常透過挙動、過渡挙動の同位体効果の検証が可能

JAERI

研究例１　Ｔ透過（定常挙動）



Ni,Fe,W 中の D,T の定常透過の温度依存性

定常透過挙動

1．透過の律速過程の同定

Ni:入射側再結合－透過側拡散律速

Fe:入射側再結合－透過側再結合律速

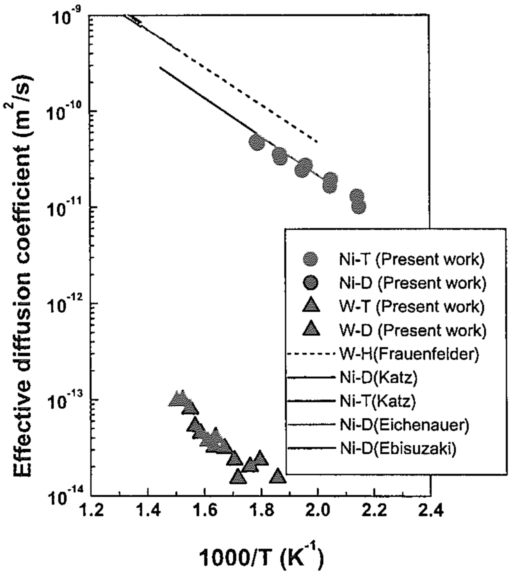
W :入射側拡散－透過側拡散律速

2．透過の同位体効果

D,T 間で若干の差が見られるが、顕著な違いは見られず

JAERI

研究例１　Ｔ透過（過渡挙動）



過渡解析により求めた Ni と W 中の D,T の見かけの拡散係数

過渡解析－透過挙動のカーブフィット

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = -D\frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2}$$

$$\phi_p(t) = D\frac{\partial C(d,t)}{\partial x}$$

$$C(x,0) = 0$$

$$C(0,t) = C_0,\quad C(d,t) = 0$$

$$\frac{\phi_p(t)}{\phi_p(\infty)} = 1 + 2\sum_{n=1}^{\infty}(-1)^n \exp(-D(\frac{n\pi}{d})^2 t)$$

見かけの拡散係数の同位体効果

・古典拡散理論の予測値

$$D^\alpha / D^\beta = (m^\beta / m^\alpha)^{1/2}$$

と一致せず。

・ Ni、W 共に同位体効果が理論値より小さい

・同位体効果の逆転の可能性示唆

JAERI

TPA を用いた研究例２

トリチウム注入試験

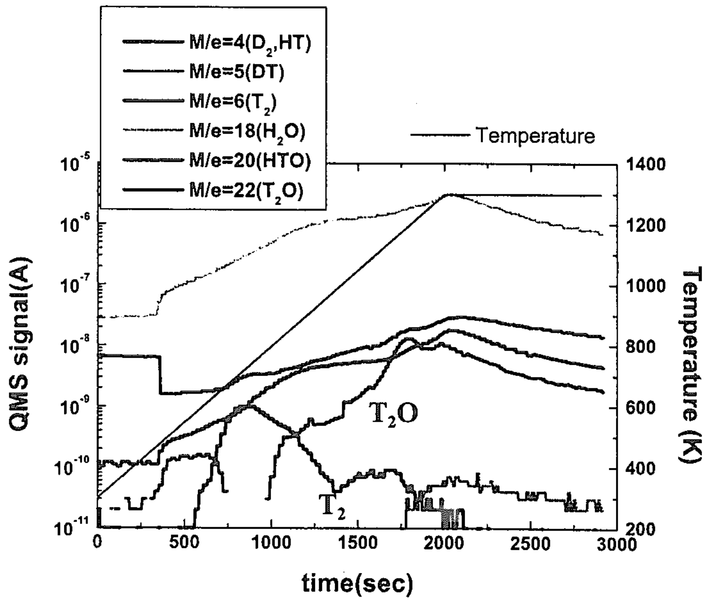
概要

TPA をトリチウムイオン注入用照射スタンドとして使用

T^+照射材の
- 昇温脱離(TDS)挙動
- トリチウム除染試験
- 絶縁性能試験
- 機械的特性変化　等に供する可能性

評価対象領域	トリチウム輸送過程	評価上考慮すべき事項
注入領域	・拡散律速 ・再結合律速 ・ Special diffusivity ・ Saturation Model ・共堆積	・適用可能モデルの検証 ・拡散、再結合の同位体効果 ・共堆積機構　等
PFC 領域	・拡散過程 ・トラップ過程 ・熱拡散過程	・拡散の同位体効果 ・トラップ密度、エネルギー ・輸送熱

JAERI



T^+照射した酸化物の TDS 例
(名古屋大学　森田教授との協力研究)

研究例２　T 注入

トリチウム単独の TDS 挙動測定が可能であることを確認

↓

- 注入された材料中トリチウム挙動
- 材料中挙動の同位体効果
- 崩壊 He 等の影響　等

に関する知見の取得が期待できる。

JAERI

まとめ

原研既設の純トリチウムイオン注入装置及びこれを利用した原研におけるPSI研究の紹介を行った。

トリチウム透過実験

３種類の材料に関し、トリチウム透過実験を実施し、トリチウム自身の透過特性を以下のように明らかとした。

1．透過挙動に関しては若干の同位体効果の存在が示唆されるものの予測の範囲内である。

2．拡散係数の同位体効果に関しては、古典拡散理論から予測される差より小さい傾向が見られる。同位体効果の逆転現象の可能性も示唆される。

トリチウムイオン注入試験

各種材料への純トリチウムイオン注入試験を開始し、新たな材料中トリチウム挙動研究が展開されつつある。今後、PFC 材料中のトリチウム-表面相互作用に関する貴重なデータの取得が期待される。

JAERI

3.5 水素濃度による黒鉛中の水素拡散係数の変化

近畿大学理工学部　渥美寿雄

1．はじめに

核融合炉プラズマ対向壁材料としては、ベリリウムや高融点金属へ注目が移っているものの、当面は黒鉛や CFC 材が多く使われ、次期装置でもこれら炭素系材料と他の材料との組合せが検討されている。黒鉛、及び炭素系材料を核融合炉環境下に置いた場合には水素のリテンションが高くなるため、プラズマの安定制御の観点から、材料中での水素の動的な挙動を評価しておく必要がある。しかし、材料中での水素の移動や放出速度を決める拡散係数については、同一温度で文献値に５桁もの差違があり、信頼できるデータベースを得る必要がある。本研究では、このような拡散係数の差違の原因究明と正しい拡散係数の評価を目的として、黒鉛中への気相水素の吸収を測定して水素拡散のモデル評価を行った。

2．実験方法

試料は、等方性黒鉛（主として東洋炭素社製 IG-110U, IG-430U, ISO-880U）を用い、これを一定体積の雰囲気中で所定の温度（800～1050℃）に加熱し、水素圧力の減少より吸収量を、圧力減少の時間変化より吸収速度を求めた。解析では、粒界（あるいはポア）を通しての拡散が十分に速いと見なすことができるため、黒鉛のフィラー粒内での拡散律速モデルにより見かけの拡散係数を求めた。また、ここで得られた水素捕獲エネルギーなどのデータより、水素拡散のシミュレーションを試みた。

3．結果と考察

圧力減少の実測値は、球体系の解析評価によってうまく表すことができ、見かけの拡散係数を求めることができた。しかし、ここで得られた拡散係数には、強い水素濃度依存性があり、活性化エネルギーも約 1.3 eV と、文献値の 2.3～2.8 eV よりもかなり低い値となった。水素濃度依存性に関しては、低水素圧力下、すなわち低水素濃度では、拡散が極めて遅く、一方、高圧力（高水素濃度）では、速い拡散が起こっており、今回の実験条件で最大 15 倍の違いが見られた。これは、一般に金属中の水素拡散係数の濃度依存性とは全く逆の傾向であり、水素の拡散に強い捕獲が関わっていることを示唆している。

活性化エネルギーに関しては、これまでに求めた、水素溶解（バルクリテンション）の溶解熱（1.13 eV）とあわせて考えると、水素吸収に必要な活性化エネルギー（1.3 eV）とは、水素分子が格子間に入るためのエネルギーであり、水素放出に必要な活性化エネルギー（2.3～2.8 eV）とは、捕獲されている水素が格子間へ出るためのエネルギーとすれば、良い整合性が得られる。

以上のデータより、拡散過程のシミュレーションを行った結果、実験データ通り、高水素濃度で見かけ上速い拡散、低水素濃度で見かけ上遅い拡散が得られることがわかった。未知係数が多いため真の拡散係数を得るところまでには至っていないが、拡散係数の文献値に見られる大きな差異の説明や、中性子照射によって水素拡散が遅くなることを実証できることがわかった。

平成 12 年 12 月 1 日
平成 12 年度 第 2 回 PSI・PFC 合同研究会

Department of Nuclear Engineering
Faculty of Science and Engineering
Kinki University

水素濃度による黒鉛中の水素拡散係数の変化

近畿大学理工学部原子炉工学科　渥美 寿雄

研究の概要

目的

- 炭素材料中の水素
  バルクリテンション評価
- 水素拡散係数の測定・評価
  「真の拡散係数」を求める
  （トラッピング効果の定量的評価）

試料

IG-110U, IG-430U
ISO-880U, CX-2002U
ETP-10
EK-98, AXF-5Q1,
ATJ, CL-5890PT
（これらを 1500℃、1 時間脱ガス）

装置

- 定容積、閉鎖系での
  圧力減少を測定

方法

- 測定温度領域 （800-1050℃）
- 圧力範囲 （0.02-38 kPa）

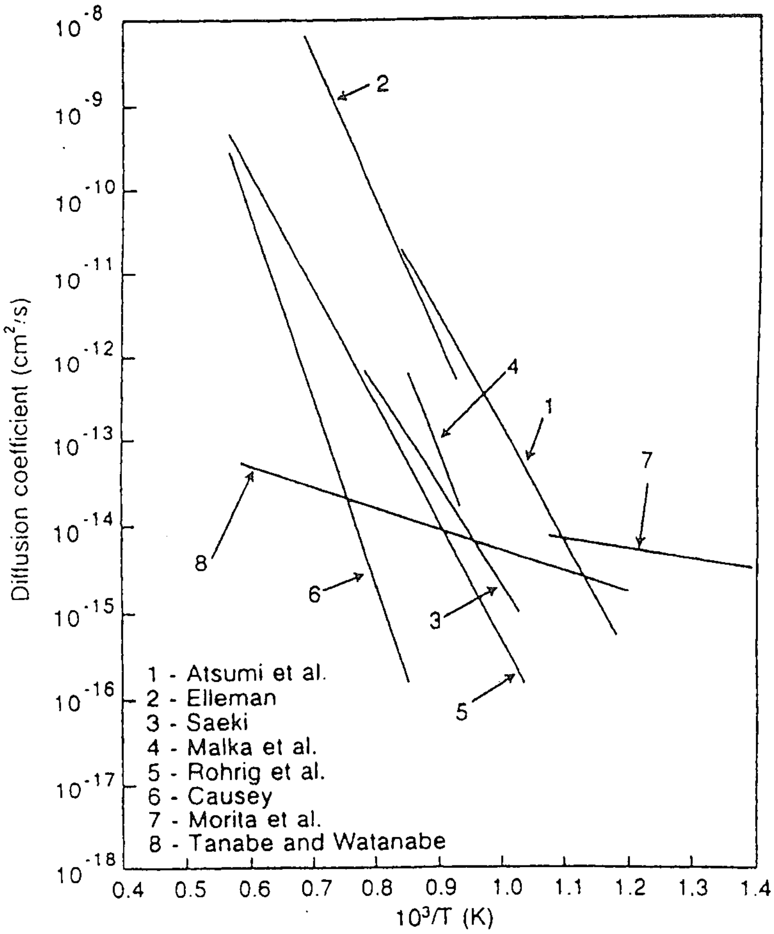
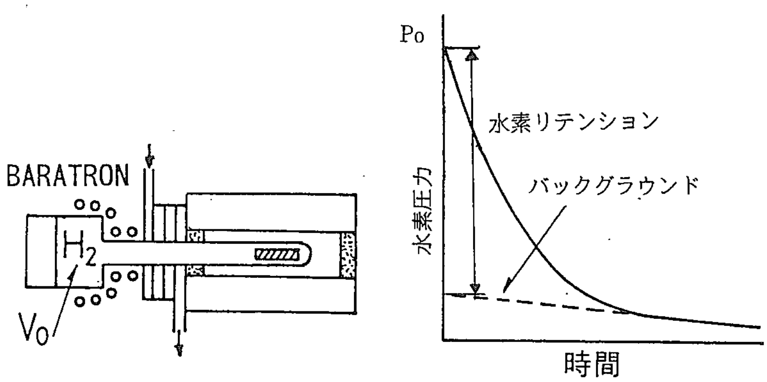


Fig.1 Hydrogen Diffusion Coefficients in Graphite.

(田辺哲朗、丸山忠司：プラズマ・核融合学会誌 69(5) (1993) 415-450 より引用)



$$-\frac{dP(t)}{dt}=\frac{S_0\sqrt{P(t)}}{V_0}\times\frac{d}{dt}\left\{-\frac{6}{\pi^2}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n^2}\exp\left(-n^2\pi^2\cdot\frac{D}{r^2}t\right)\right\}+R_0P(t)$$

黒鉛内平均水素濃度変化率　　バックグラウンド圧力減少

P (t)：水素圧力　　R_0：バックグラウンド水素圧減少速度定数

S_0　：溶解度定数

V_0　：測定系体積　　r　：拡散体系の半径

溶解速度の評価方法

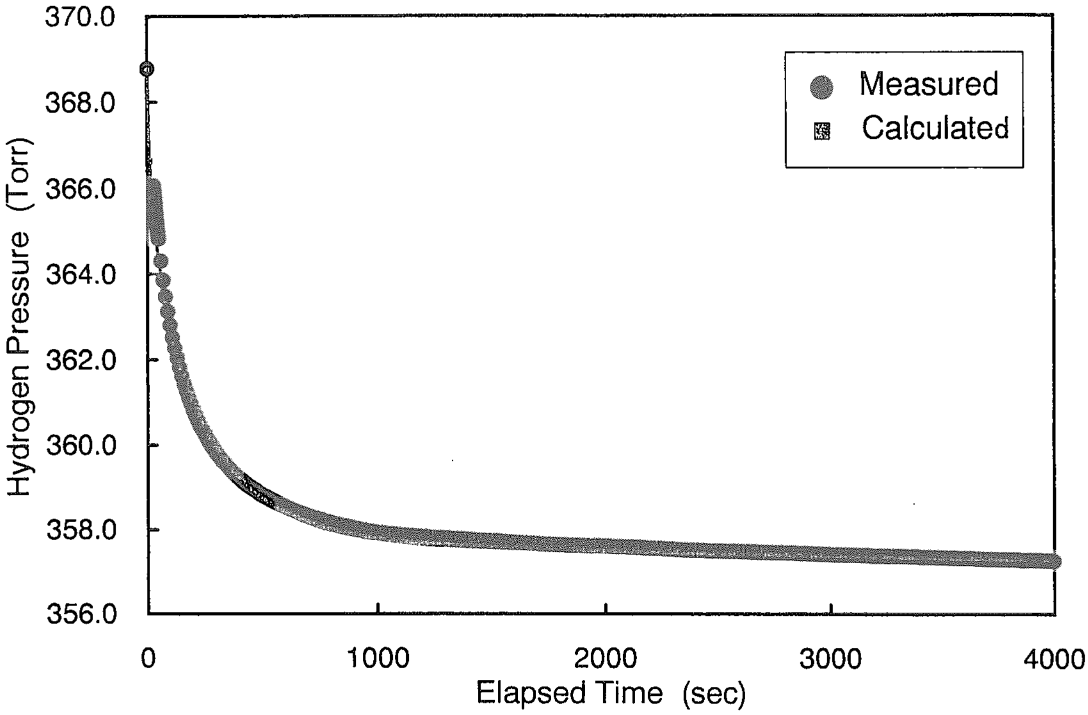


Fig.2 Fitting of Calculated Curve on Measured Pressure Decrease. (ISO-880U, 1000℃) (Diffusion-Controlled Process, Medium: Sphere)

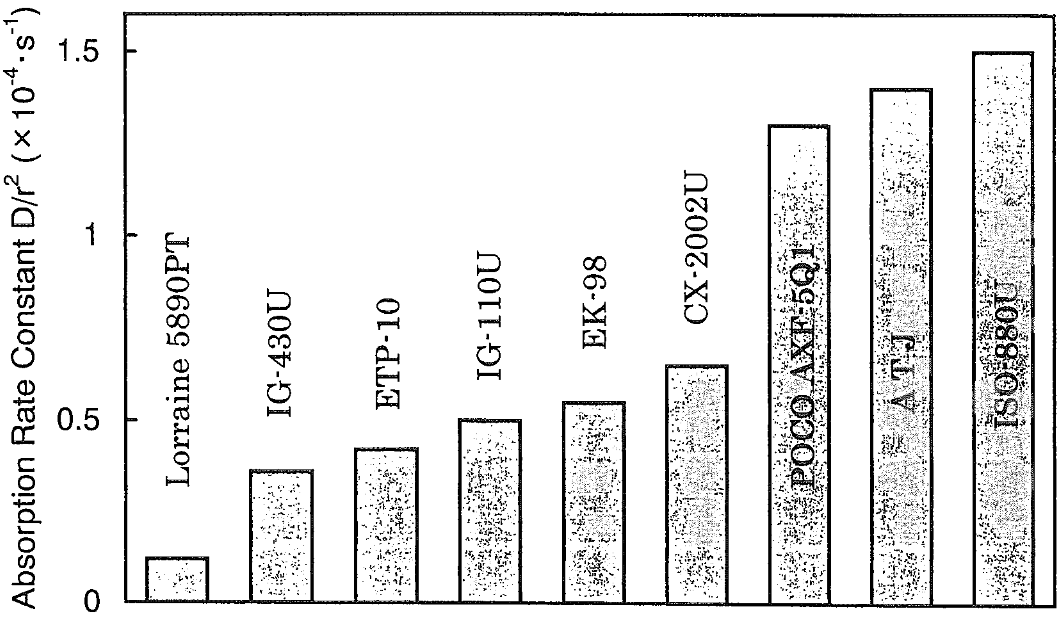


Fig.3 Hydrogen Absorption Rate into Graphite and Carbon Material. (1000℃, 10 kPa)

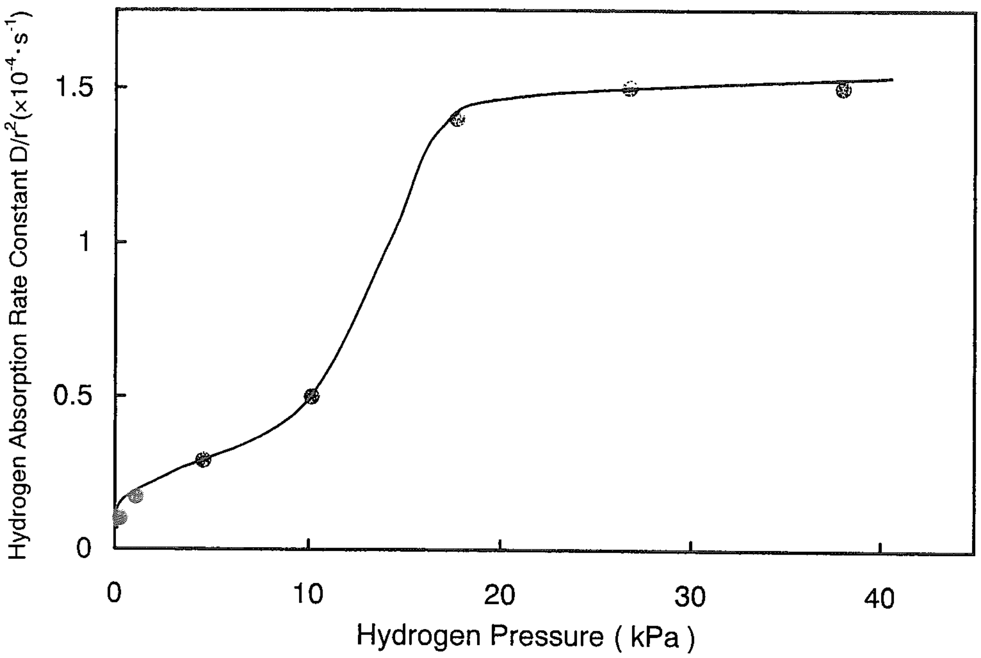


Fig.4 Pressure Dependence of Hydrogen Absorption Rate into Graphite.
(IG-110U, 1000℃)

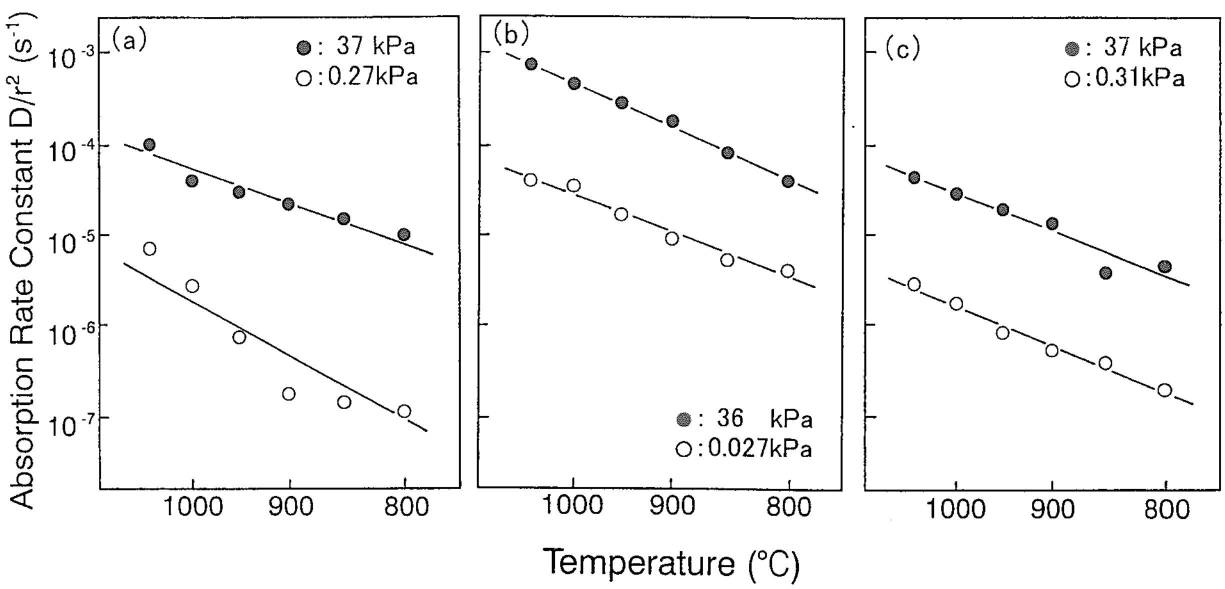


Fig.5 Temperature Dependence of Absorption Rate Constants.
(a): IG-110U, (b): ISO-880U, (c): IG-430U
●: at high hydrogen pressure, ○: at low hydrogen pressure

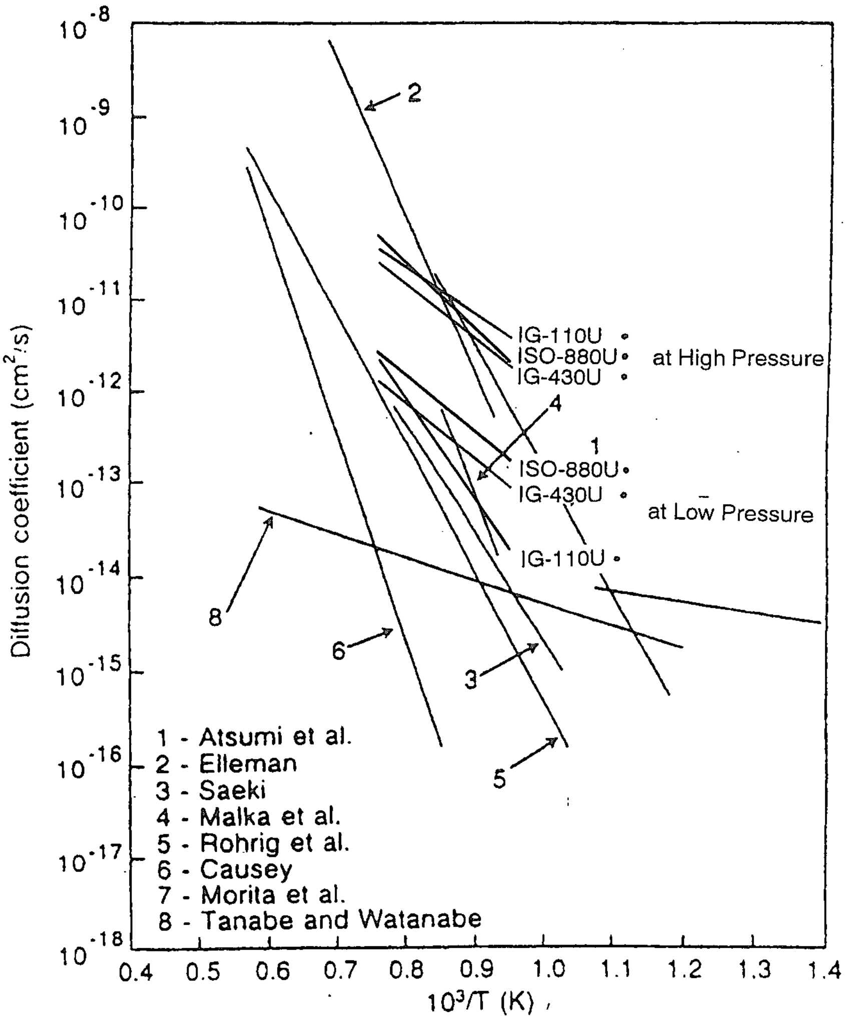
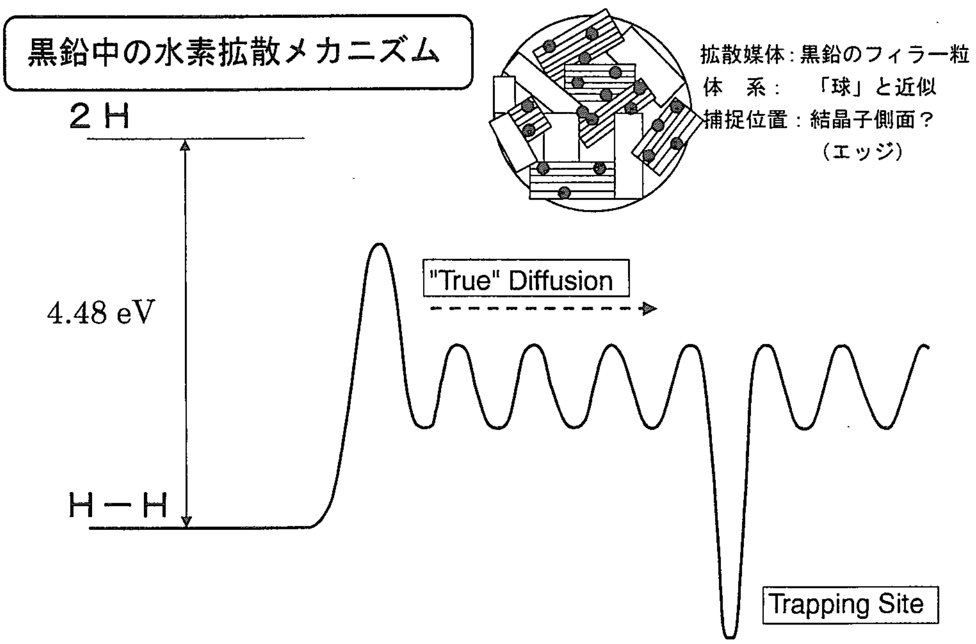


Fig.6 Present Results and Reported Hydrogen Diffusion Coefficients in Graphite.

（原図は、田辺哲朗・丸山忠司：プラズマ・核融合学会誌 69(5) (1993) 415-450 より引用）



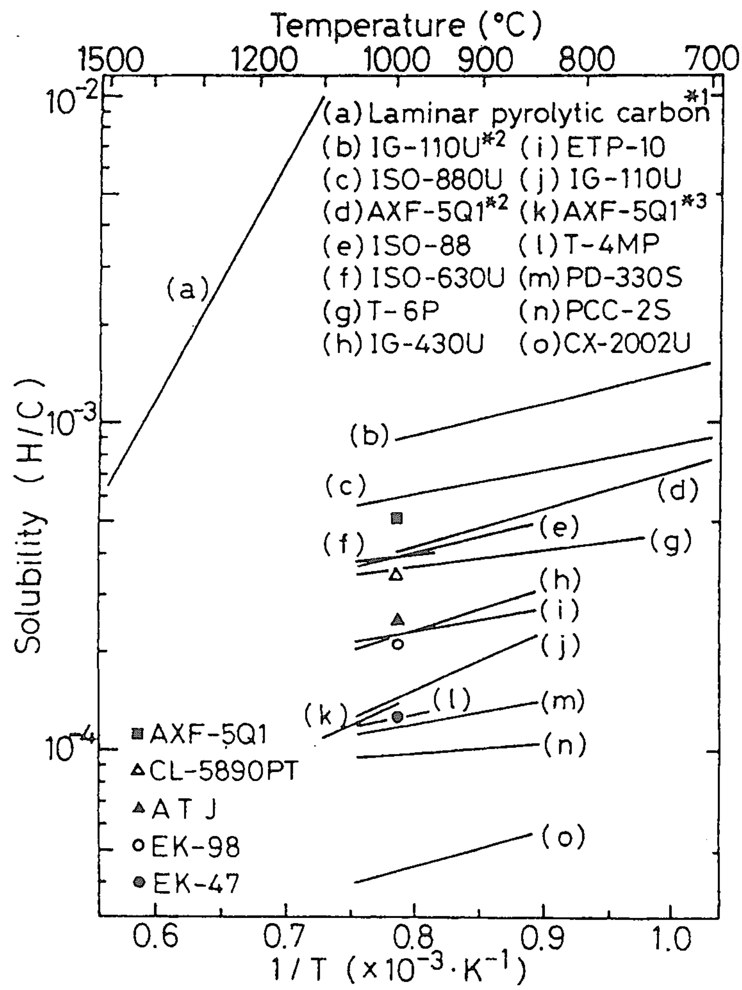
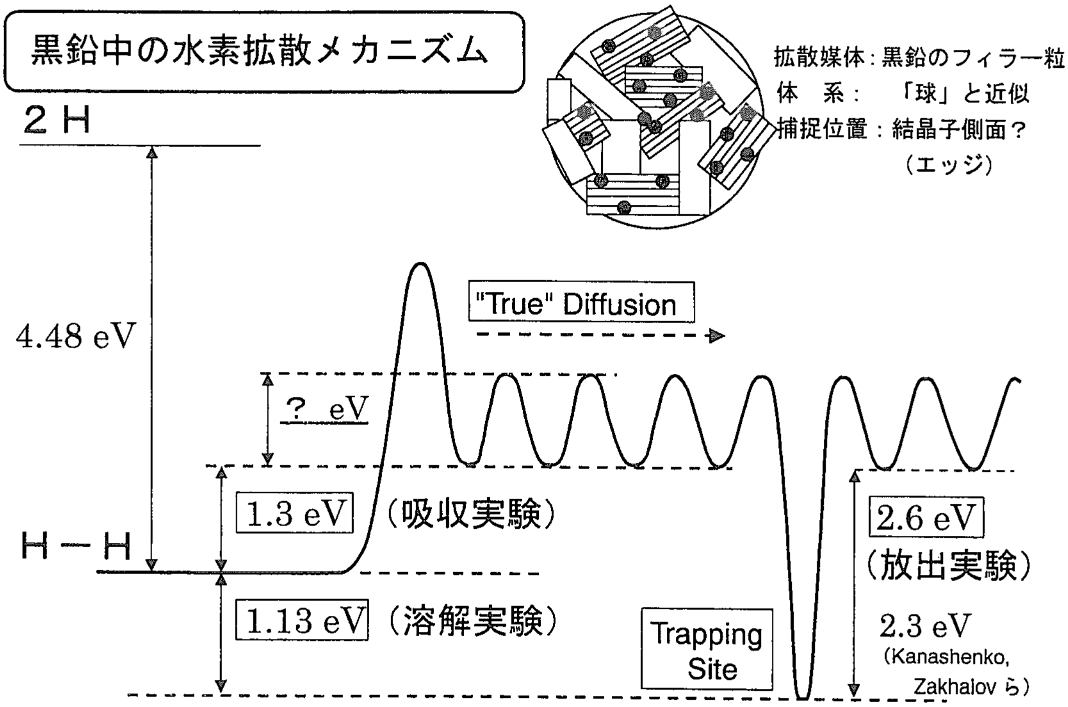
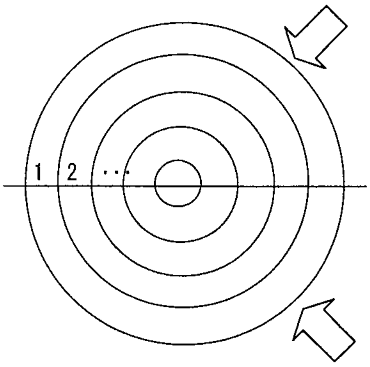


Fig.7　Hydrogen Solubility (Hydrogen Bulk Retention) in Graphite.



水素拡散の解析方法



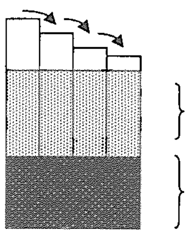
拡散の Rate Equation

$$\frac{dN(r,t)}{dt} = D\nabla^2 N(r,t) + \Sigma_d N_t(r,t) - \Sigma_t N(r,t)\cdot C(r,t)$$

$$\frac{dN_t(r,t)}{dt} = -\Sigma_d N_t(r,t) + \Sigma_t N(r,t)\cdot C(r,t)$$

$$\frac{dC(r,t)}{dt} = \Sigma_d N_t(r,t) - \Sigma_t N(r,t)\cdot C(r,t)$$

$N(r,t)$: 動き得る水素の濃度、$N_t(r,t)$: トラップされている水素の濃度
D: 動き得る水素に対する「真の」拡散係数
Σ_d: 脱捕獲率、 Σ_t: 捕獲率
$C(r,t)$: 未だ水素を捕捉していないトラッピングサイト濃度



予想される結果
水素濃度低：ほとんどの動き得る水素が捕捉
水素濃度高：トラッピングサイトが有限数なら
ほとんどのサイトを埋める

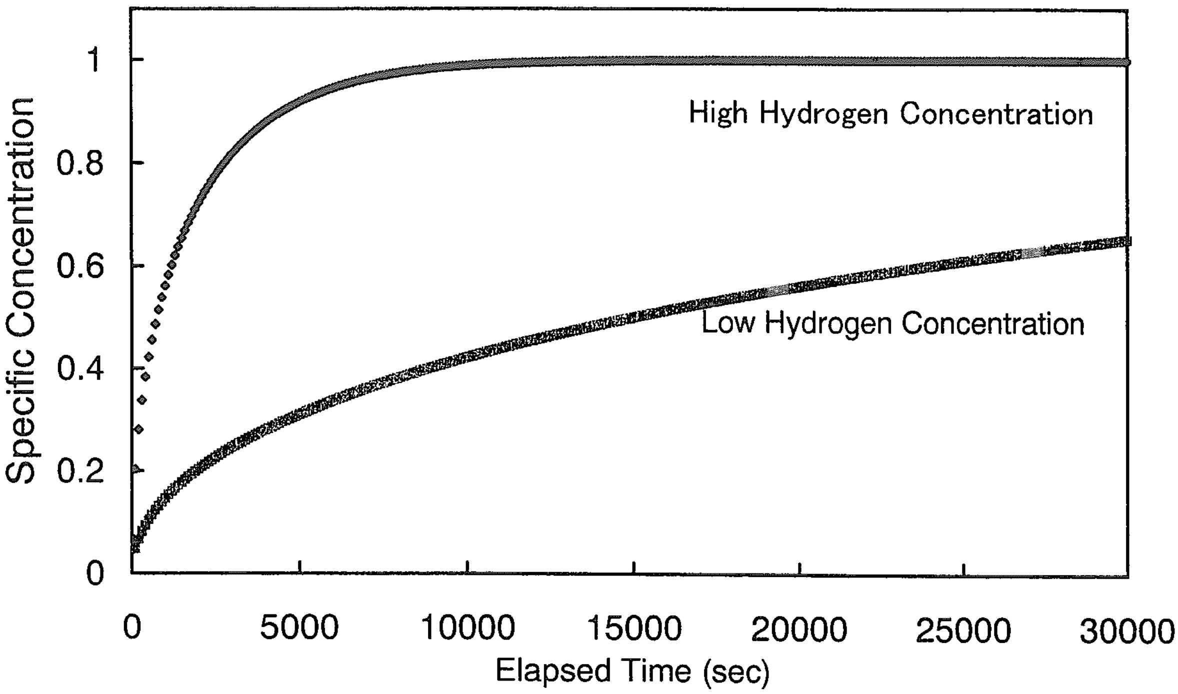


Fig. An Example of Diffusion Analysis for High and Low Hydrogen Concentration

まとめ

黒鉛中への水素拡散係数

1．拡散係数には強い濃度依存性がある。

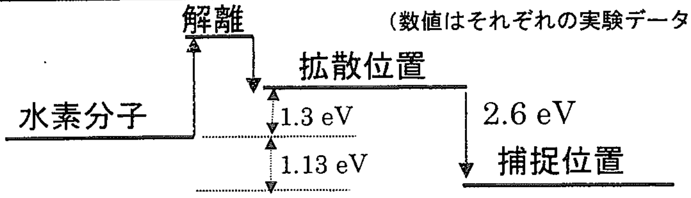
低水素圧（低水素濃度）0.02～1 kPa　遅い拡散
高水素圧（高水素濃度）20 kPa～　速い拡散

拡散係数で最大 15 倍
拡散の活性化エネルギーは、大差無い　: 1.2～1.4 eV

2．吸収実験で求めた活性化エネルギー（1.3 eV）と
放出実験で求めた活性化エネルギー（2.6 eV）は
大きく異なる。

吸収は、水素分子→内部の拡散位置へ上がるエネルギー
放出は、捕捉位置→内部の拡散位置へ上がるエネルギー

（数値はそれぞれの実験データ）



3．拡散、捕獲、脱捕獲を基礎過程とする拡散解析により、
黒鉛の水素吸収をうまくシミュレーションできる。
また、真の拡散係数、拡散の活性化エネルギーの導出が
今後の課題

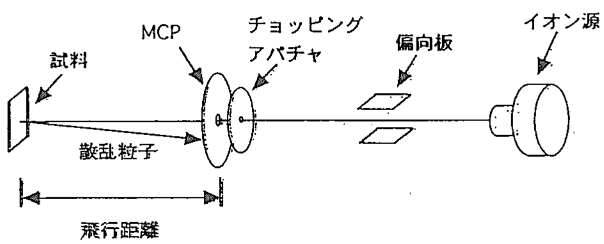
3.6　中性粒子の直接測定による低エネルギーイオン散乱解析

名大工　森田　健治、　岸　宣孝、　アントン・グレゴリエフ
Morita Kenji, Kishi Nobutaka, Anton Grigoriev
核融合研　室賀　健夫、　増崎　貴
Muroga Takeo, Masuzaki Suguru

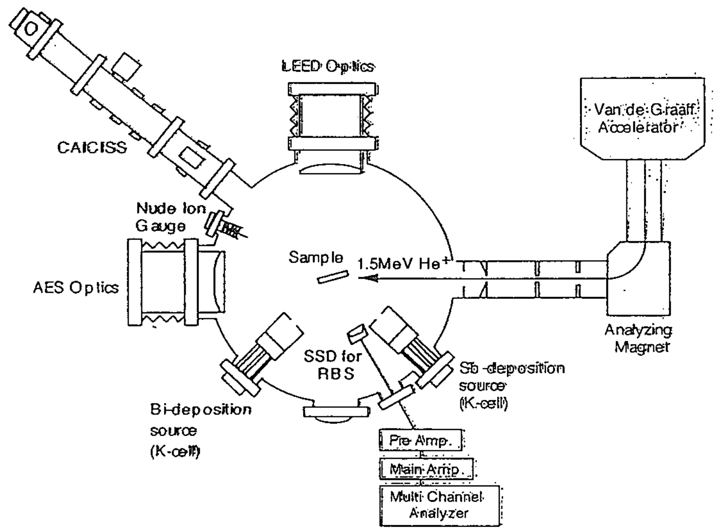
要約：Sub-keV 軽粒子の検出のためのマイクロ・チャネルプレートの量子効率を実験的に決定し、それを用いて低エネルギー軽イオンの反射スペクトルが解析された。
キーワード：低エネルギー軽イオン反射、ＴＯＦ解析、量子効率、プラズマ壁相互作用

１．諸言　核融合装置のプラズマ対向材料表面における燃料粒子や灰のヘリウムのリサイクリングの詳細な理解のためには、境界プラズマから荷電変換過程により放出される中性粒子のエネルギー・スペクトルを測定することが極めて重要である。中性粒子検出に最も有効な手段の一つは、飛行時間分解である。極く最近、我々は、市販の直衝突イオン散乱分光装置（ＣＡＩＣＩＳＳ）のマイクロ・チャネルプレートが低エネルギーのＨｅ粒子に対して高い量子効率を持つことを知った。そこで、中性粒子検出への応用のため、ＬＨＤ共同研究として、Ｓｉ（１１１）表面上の単原子層吸着金属原子からのサブｋｅＶHe^+イオンの反射スペクトルをＣＡＩＣＩＳＳ装置を用いて調べてきた。本稿では、その検出器の量子効率と反射スペクトルの解析の結果を報告する。

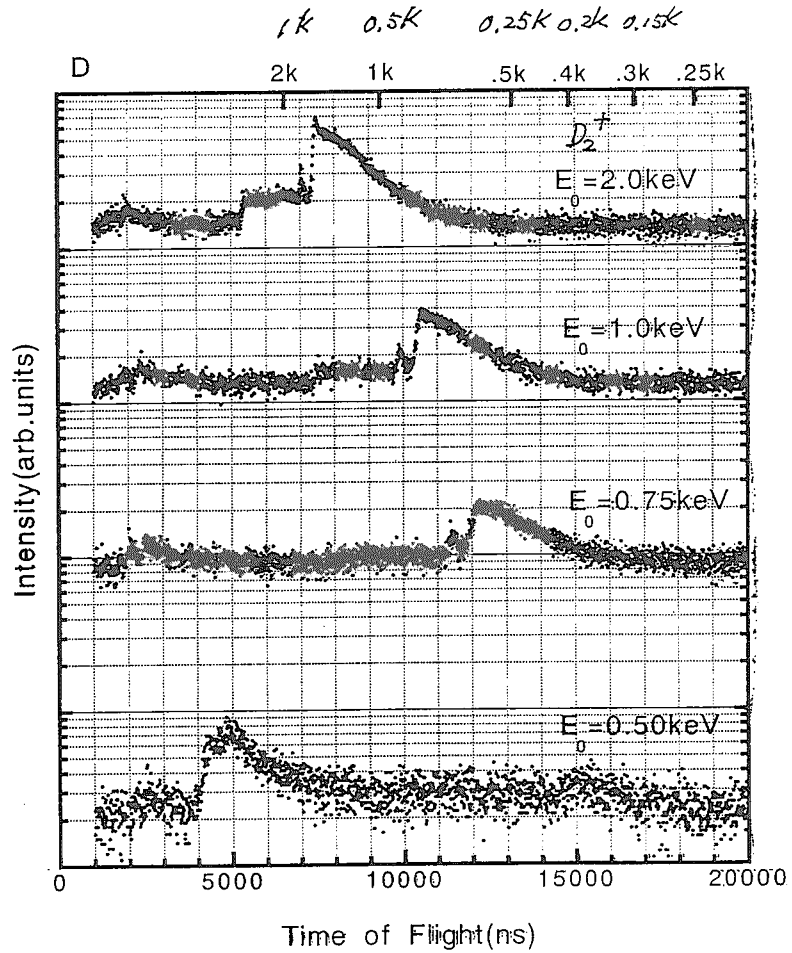
２．実験　試料は単原子層のＳｂ原子が吸着されたＳｉ（１１１）表面である。検出器の量子効率決定に重要なＳｂ原子の被覆率の絶対値は、ＭｅＶHe^+イオンのＲＢＳ測定により決定された。この試料に種々のエネルギーのHe^+イオンを照射し、反射Ｈｅ粒子のエネルギー・スペクトルをＣＡＩＣＩＳＳ装置を用いて測定した。検出器の量子効率はＳｂ原子からの反射率の実験値の計算値に対する比として決定された。

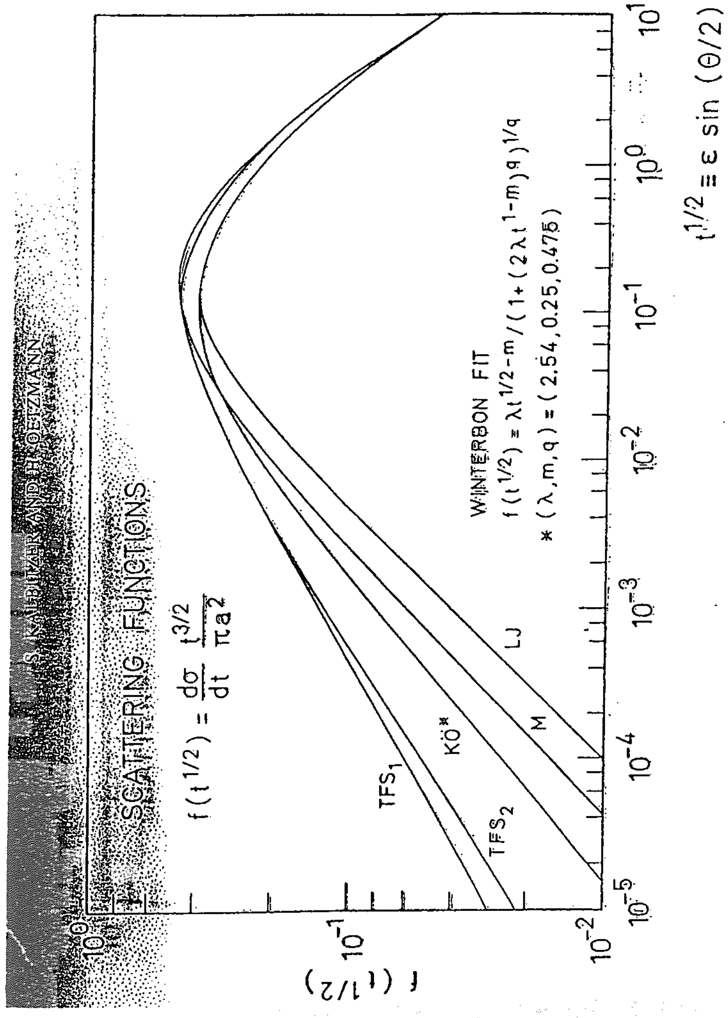


CAICISS法の概念

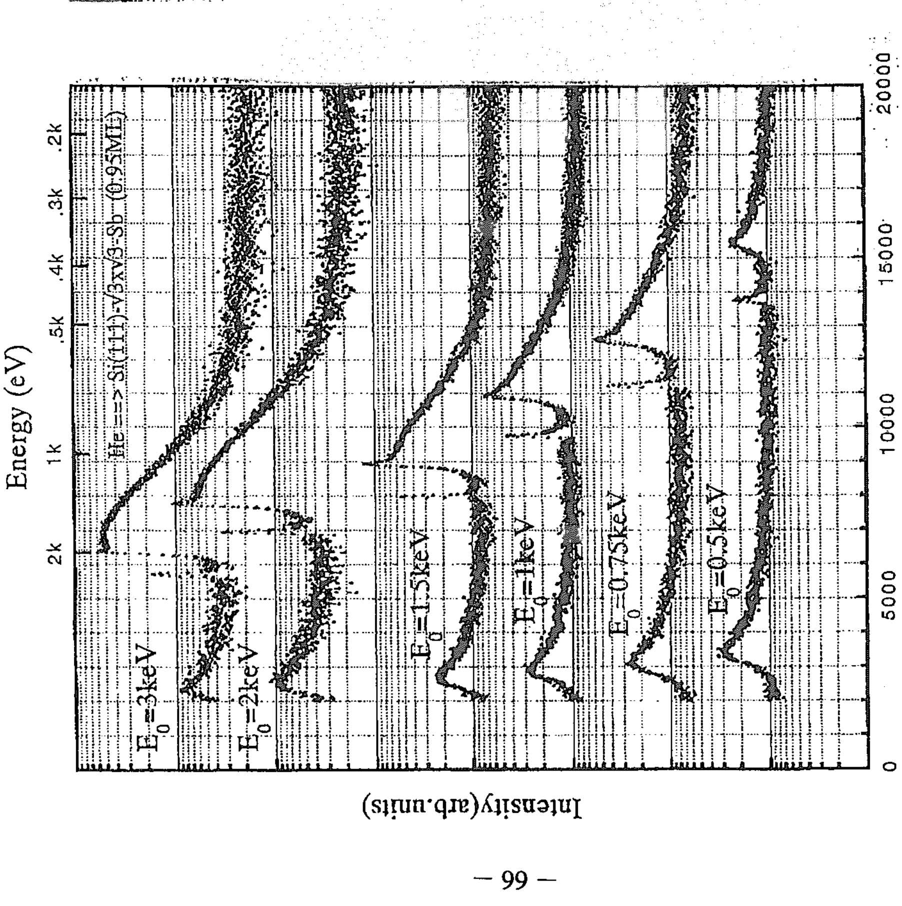


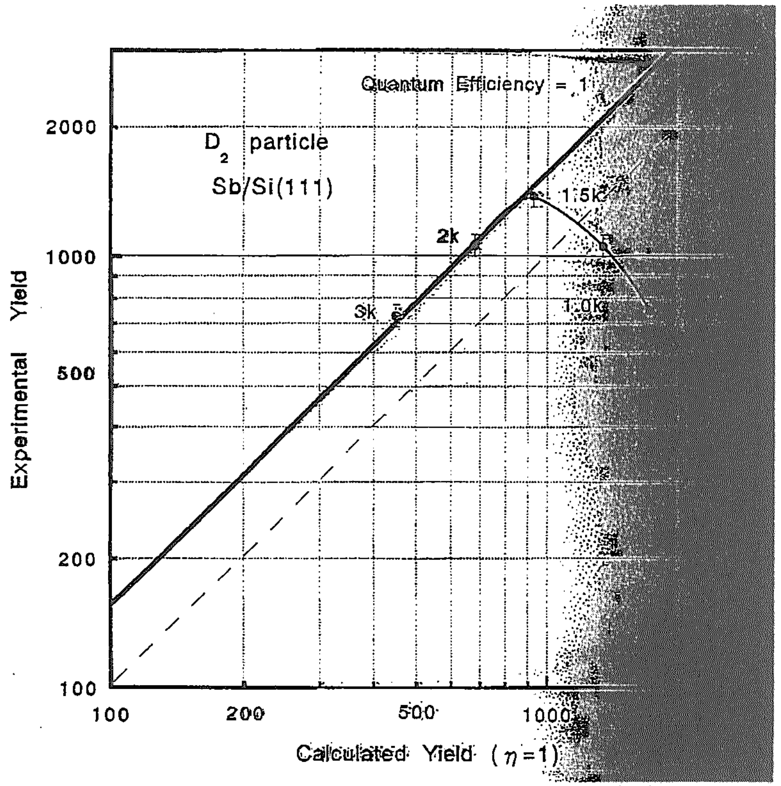
反射粒子挙動解析装置





Universal scattering function vs. energy transfer variable.





マイクロチャネルプレート（検出器）の量子効率評価

単原子層Sb膜からの散乱収率

$$R_{Sb}(\theta=\pi) = I_o N_{Sb}\,\sigma(E,\theta)\,d\Omega\,\eta$$

η ： 量子効率、　　N_{Sb} ： Sbの面密度

$d\Omega$ ： 立体角、　　$\sigma(E,\theta)$ ： 散乱断面積

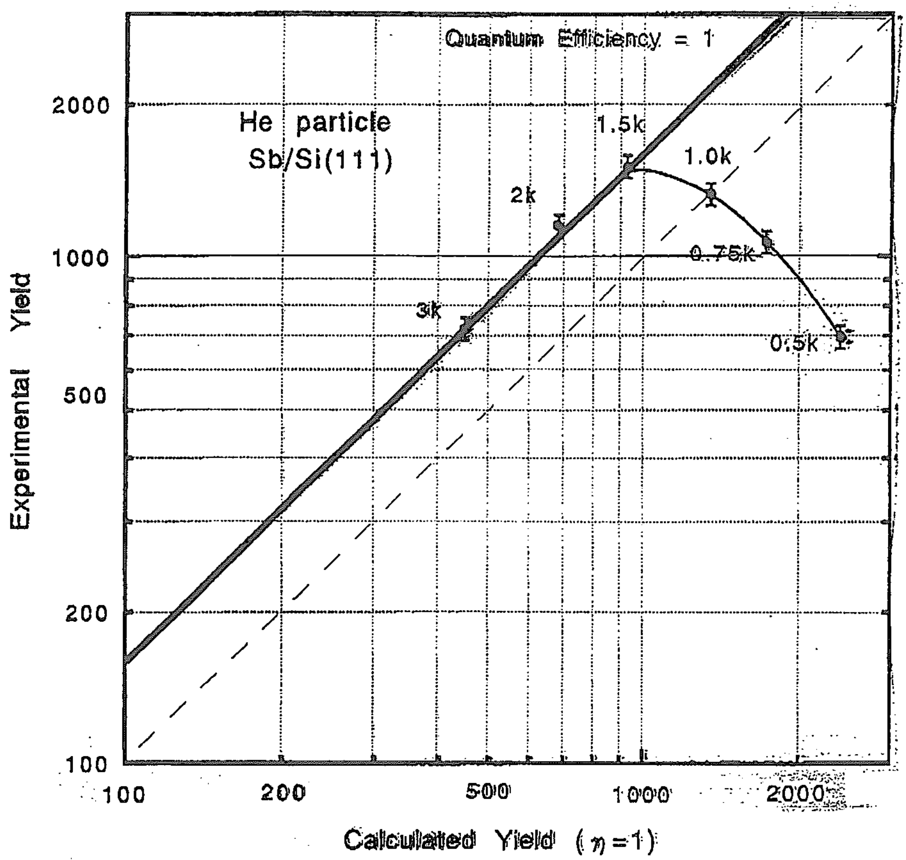
散乱断面積（Magic Formula）

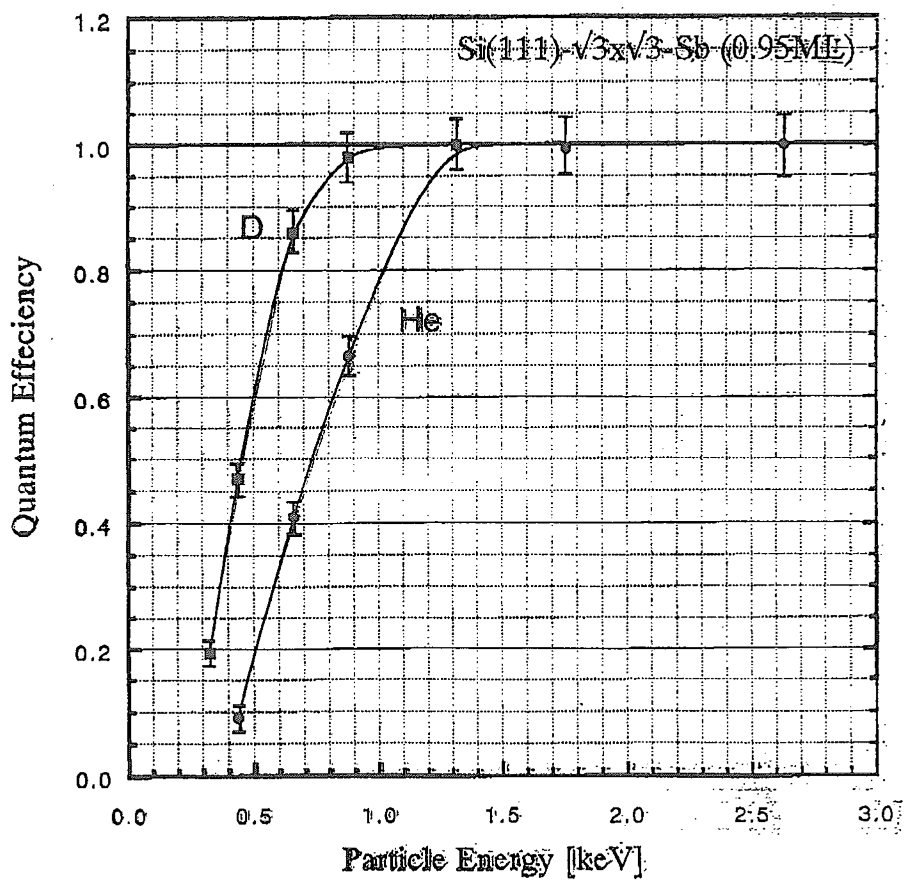
遮へいクーロンポテンシャル

$$\sigma(E,\theta) = \frac{d\sigma(E,\pi)}{d\Omega} = \frac{a^2}{4}\frac{f(\varepsilon)}{\varepsilon}$$

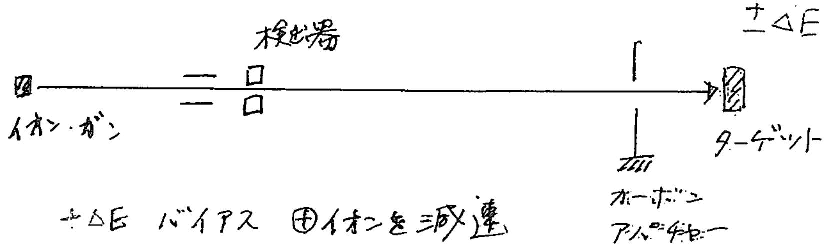
$$\varepsilon = \frac{E}{aZ_1Z_2e^2}\frac{M_2}{(M_1+M_2)}, \quad a = \frac{0.8853a_0}{(Z_1^{2/3}+Z_2^{2/3})^{1/2}}$$

$$f(\varepsilon) = 1.309\varepsilon^{1/3}[1+(2.618\varepsilon^{4/3})^{2/3}]^{-3/2}$$


Quantum Efficiency = 1
He particle
Sb/Si(111)
2000
1000
500
200
100
1.5k
1.0k
2k
0.75k
3k
0.5k
100
200
500
1000
2000
Calculated Yield (η=1)
Experimental Yield


Si(111)-√3x√3-Sb (0.95ML)
1.2
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
D
He
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5
3.0
Particle Energy [keV]
Quantum Effeciency

入射ビーム（イオン）中の中性成分の検出法



+ΔE バイアス ⊕イオンを減速

−ΔE バイアス ⊕イオンを加速

2 keV $He^+/He^0 \rightarrow Sb/Si(111)$

バイアス ΔE， 入射エネルギー E_0

◎ 中性成分入射

$E_s = E_0 \cdot k_{sb}$ [基準] 中性 — 中性

$E_s = E_0 \cdot k_{sb} \underbrace{+\Delta E}_{\text{加速}}$ peak①　中性 — イオン

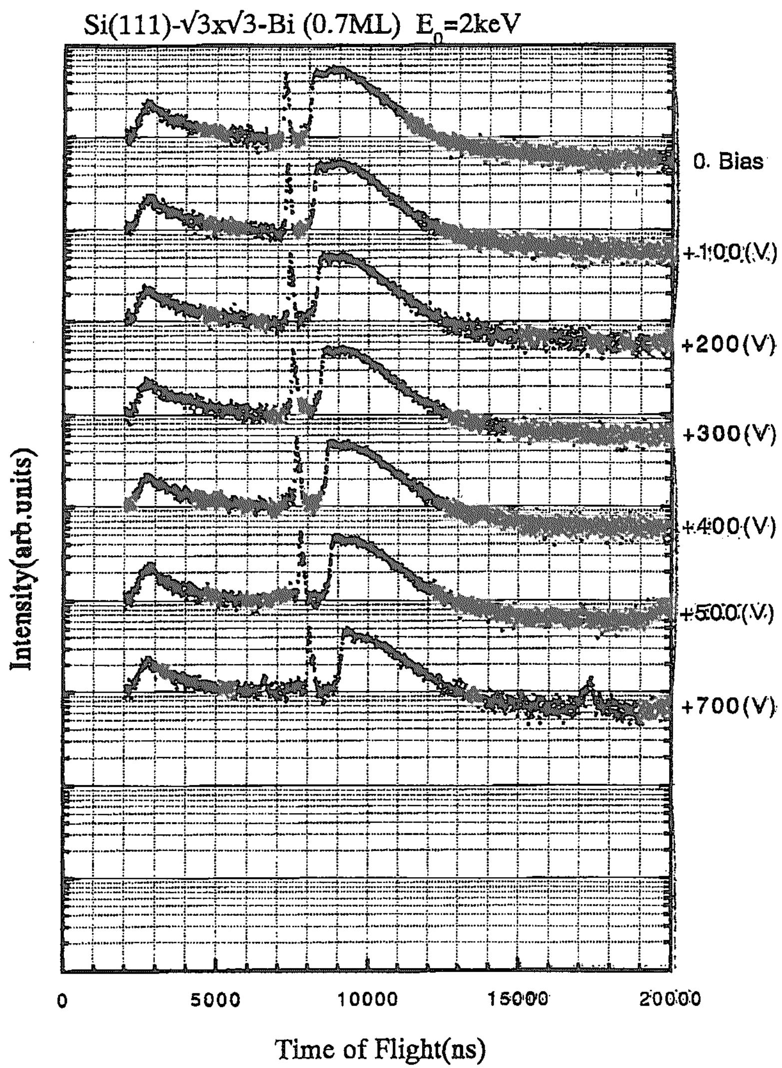
◎ イオン成分入射

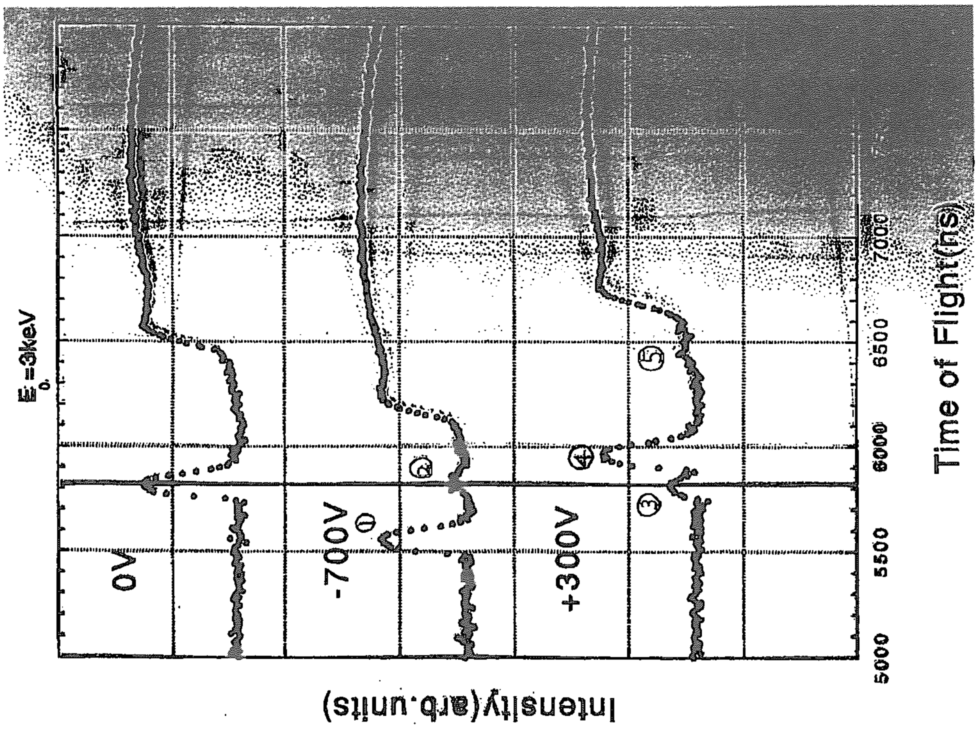
$E_s = (E_0 - \underbrace{\Delta E}_{(\text{減速})}) k_{sb}$　イオン — 中性

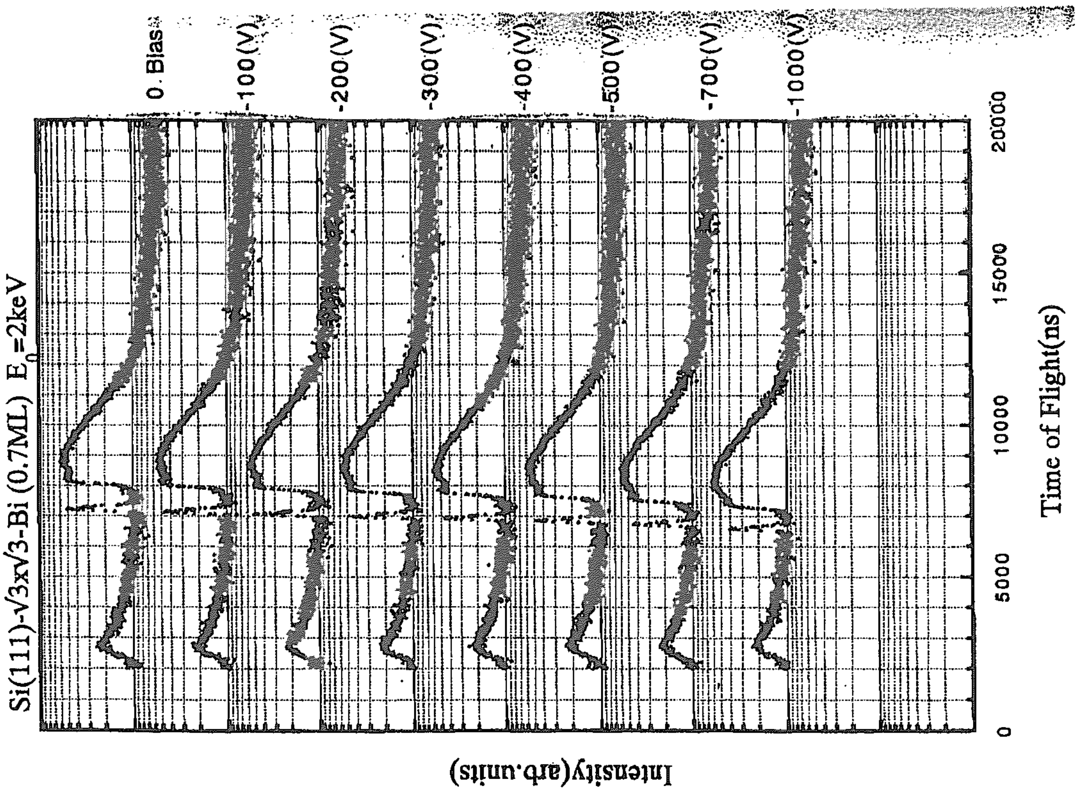
$= k_{sb} E_0 - \Delta E\, k_{sb}$　peak③

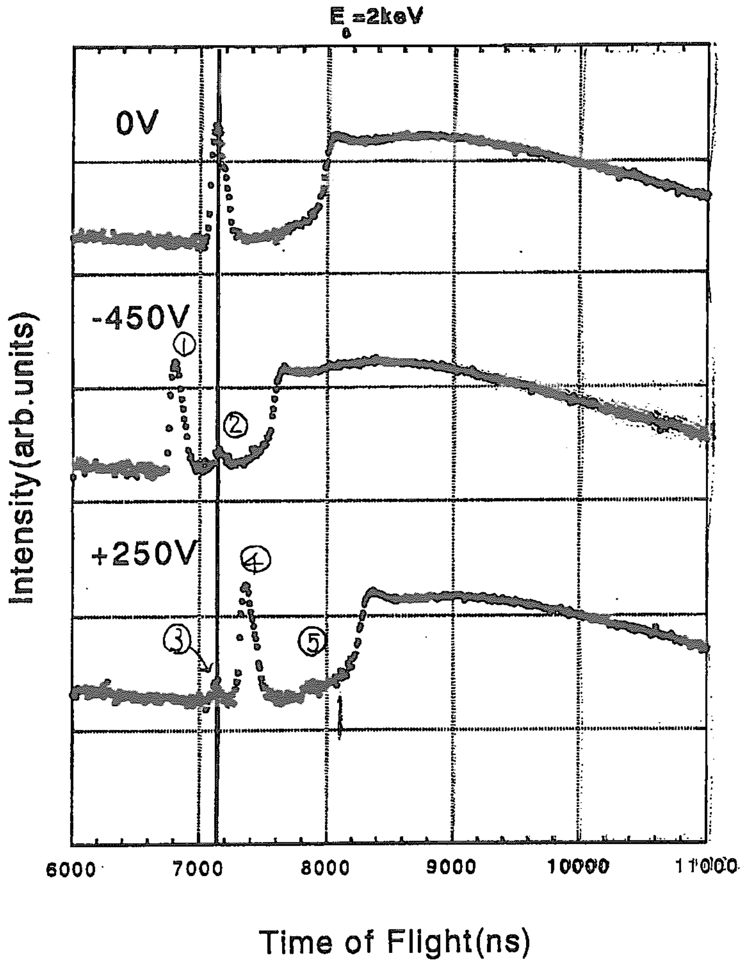
$E_s = (E_0 - \Delta E) k_{sb} + \Delta E$　イオン — イオン

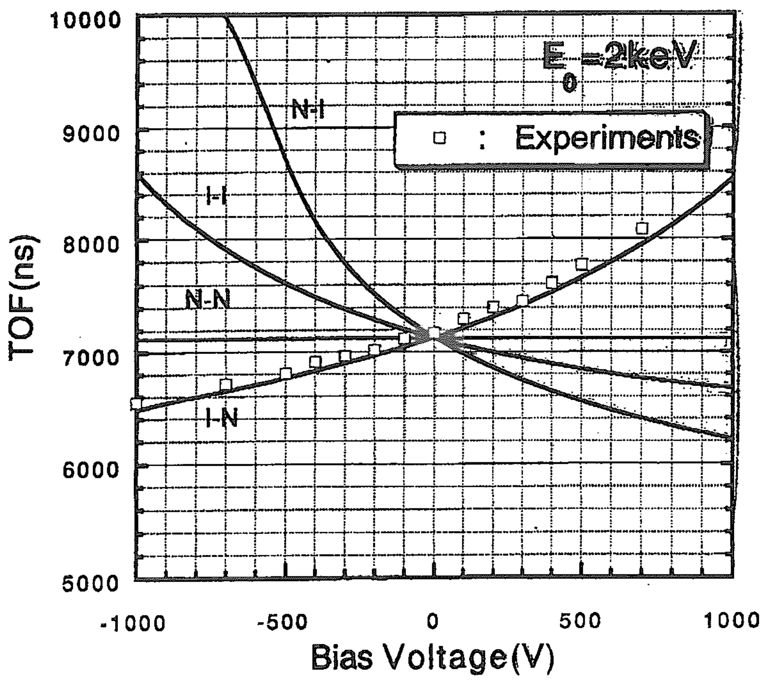
$= k_{sb} E_0 + (1 - k_{sb}) \Delta E$　peak④ ≈ [基準]

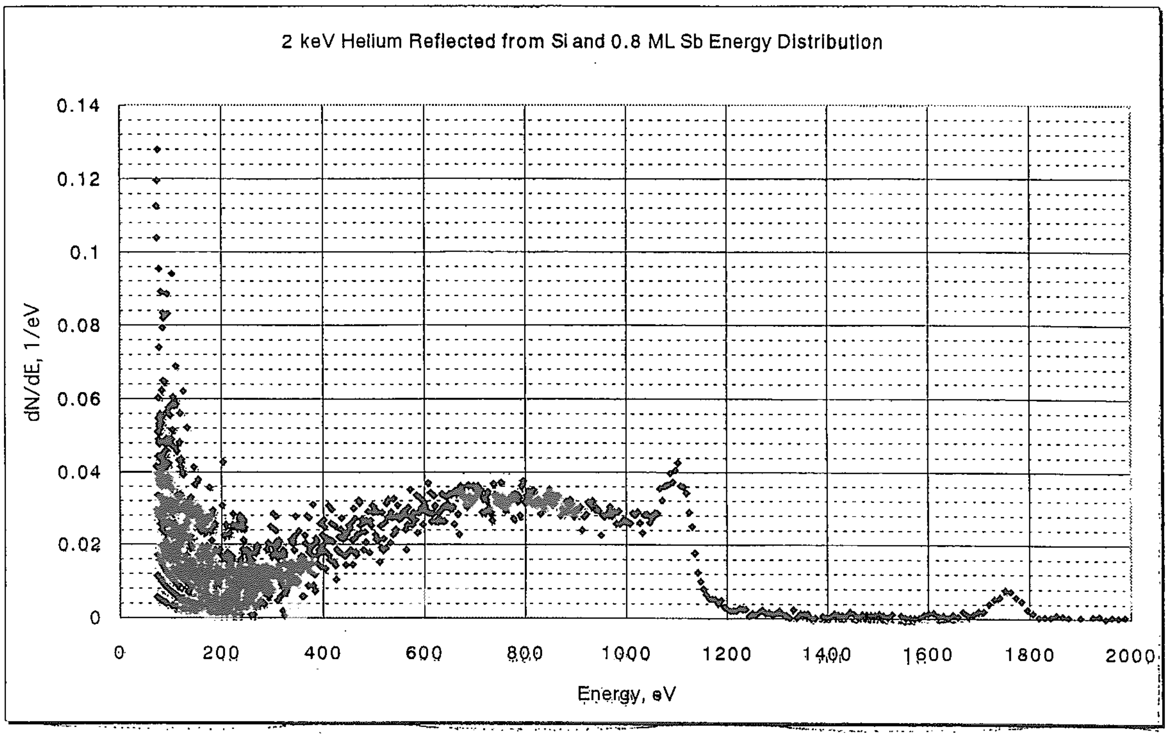


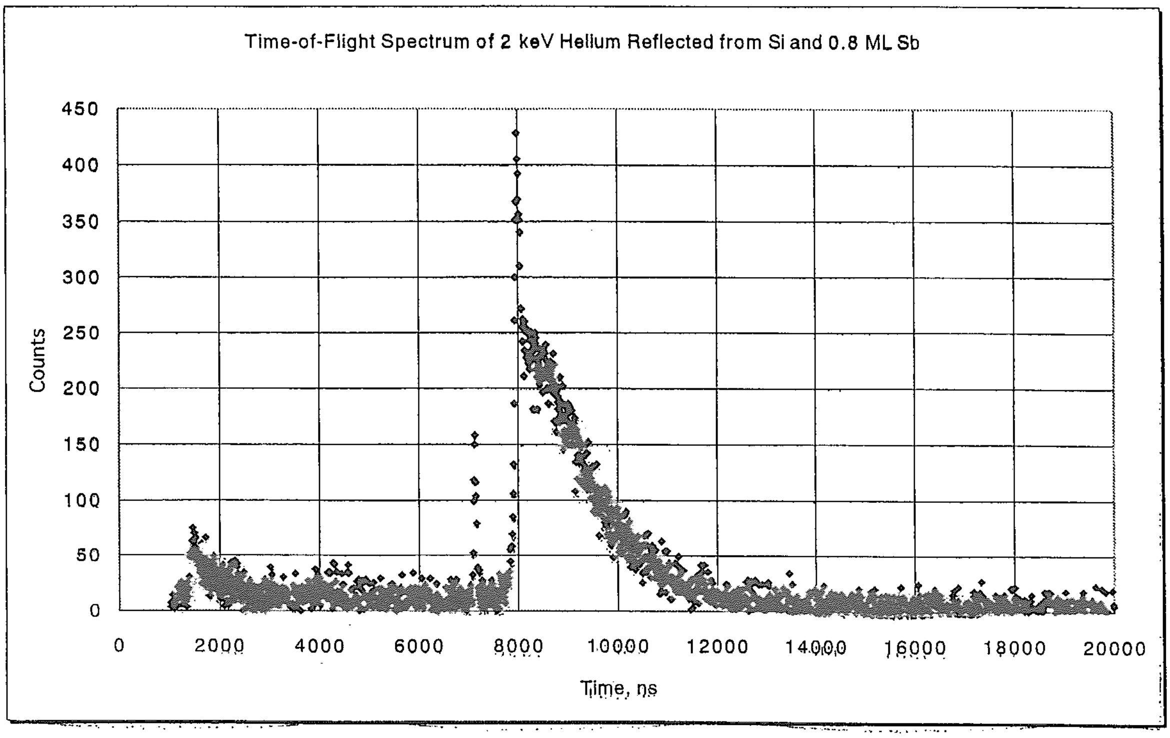

E0=3keV
0V
-700V
+300V
①
②
③
④
⑤
Intensity(arb.units)
5000
5500
6000
6500
7000
Time of Flight(ns)

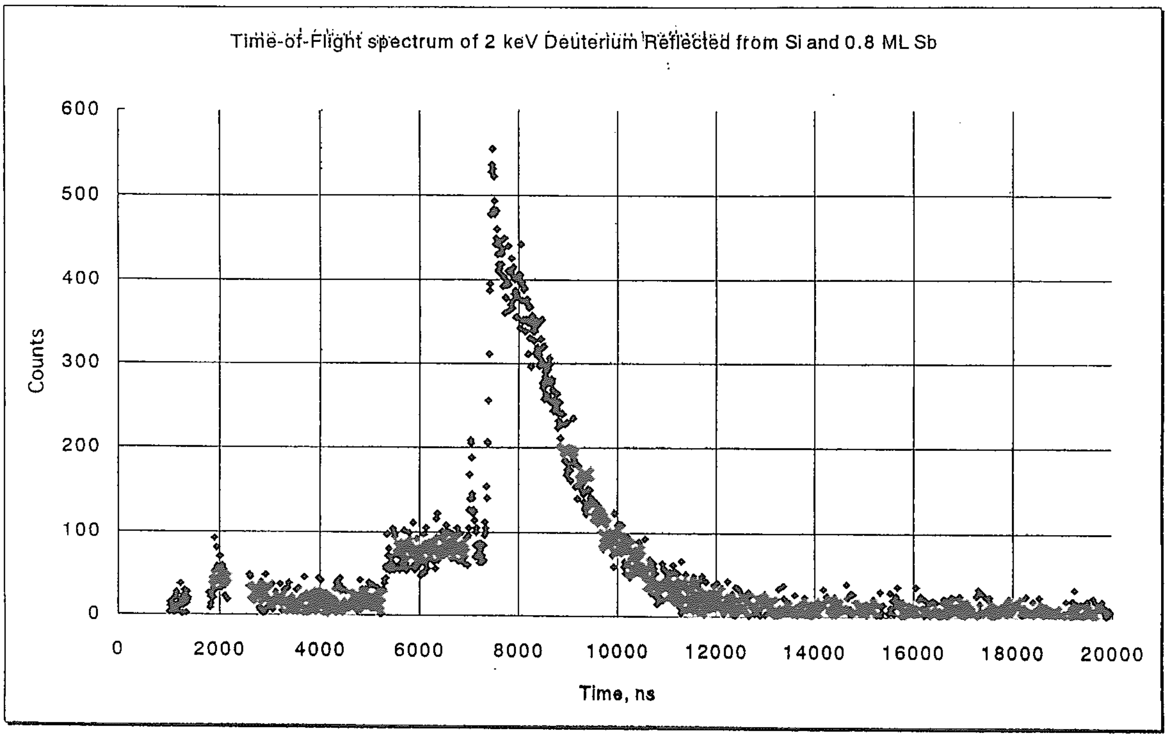

Si(111)-√3x√3-Bi (0.7ML) E0=2keV
0. Bias
-100(V)
-200(V)
-300(V)
-400(V)
-500(V)
-700(V)
-1000(V)
Intensity(arb.units)
0
5000
10000
15000
20000
Time of Flight(ns)


E0=2keV
0V
-450V
+250V
Intensity(arb.units)
6000
7000
8000
9000
10000
11000
Time of Flight(ns)

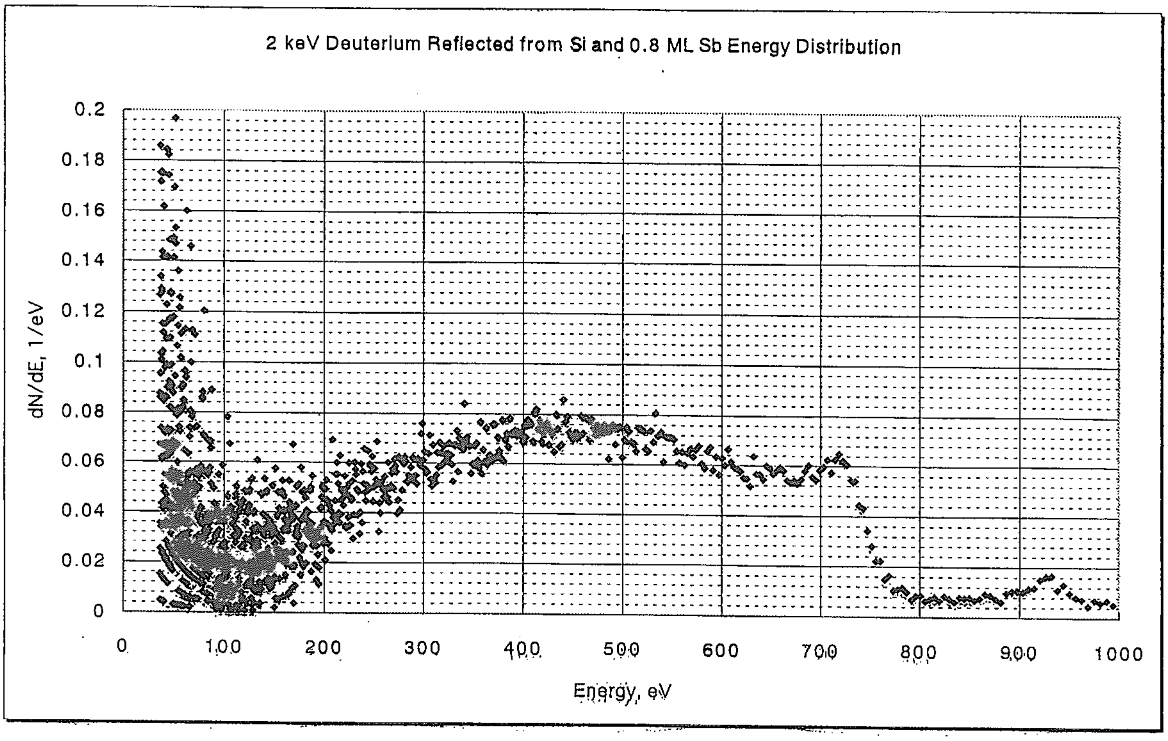

E0=2keV
□ : Experiments
N-I
I-I
N-N
I-N
TOF(ns)
10000
9000
8000
7000
6000
5000
-1000
-500
0
500
1000
Bias Voltage(V)


2 keV Helium Reflected from Si and 0.8 ML Sb Energy Distribution
dN/dE, 1/eV
0.14
0.12
0.1
0.08
0.06
0.04
0.02
0
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000
Energy, eV


Time-of-Flight Spectrum of 2 keV Helium Reflected from Si and 0.8 ML Sb
Counts
450
400
350
300
250
200
150
100
50
0
0
2000
4000
6000
8000
10000
12000
14000
16000
18000
20000
Time, ns



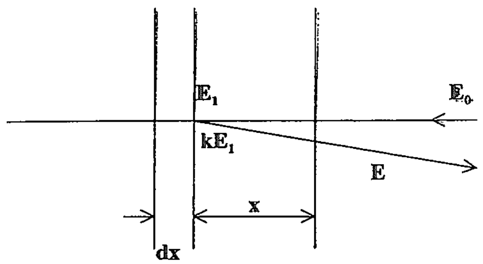
Time-of-Flight spectrum of 2 keV Deuterium Reflected from Si and 0.8 ML Sb
Counts
600
500
400
300
200
100
0
0
2000
4000
6000
8000
10000
12000
14000
16000
18000
20000
Time, ns



2 keV Deuterium Reflected from Si and 0.8 ML Sb Energy Distribution
dN/dE, 1/eV
0.2
0.18
0.16
0.14
0.12
0.1
0.08
0.06
0.04
0.02
0
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
Energy, eV

反射エネルギー・スペクトルの計算

一回散乱モデル



$$F(E,\pi) = I_o(E)\cdot\frac{\sigma(E,\pi)}{\overline{S(E)}}d\Omega$$

$$\overline{S(E)} = kS(E_o) + S(E)$$

$$x = \int_{E_o}^{E_1}\frac{dE'}{N_o S(E')} = \int_{kE_1}^{E}\frac{dE'}{N_o S(E')}$$

$\sigma(E_1,\pi)$ ：散乱断面積 $\left(= \frac{a^2}{4}\cdot\frac{f(\varepsilon)}{\varepsilon}\right)$

$I_o(E)$ ：**Intensity of Incident Ions at Energy E**

$S(E)$ ：**Stopping Cross-section for Particles at Energy E**

$$I(E) = I_o e^{-\int_{E_0}^{E}\sigma_c(E')\frac{dE'}{S(E')}}$$

$$= I_o e^{-\int_{E_o}^{E_1}\sigma_c(E')\frac{dE'}{S(E')}}\cdot e^{-\int_{kE_1}^{E}\sigma_c(E')\frac{dE'}{S(E')}}$$

$\sigma_c(E')$ ： **Scattering Cross-section for Particles at Energy E, which are deflected over an angle θc and are removed out from the incident beam.**

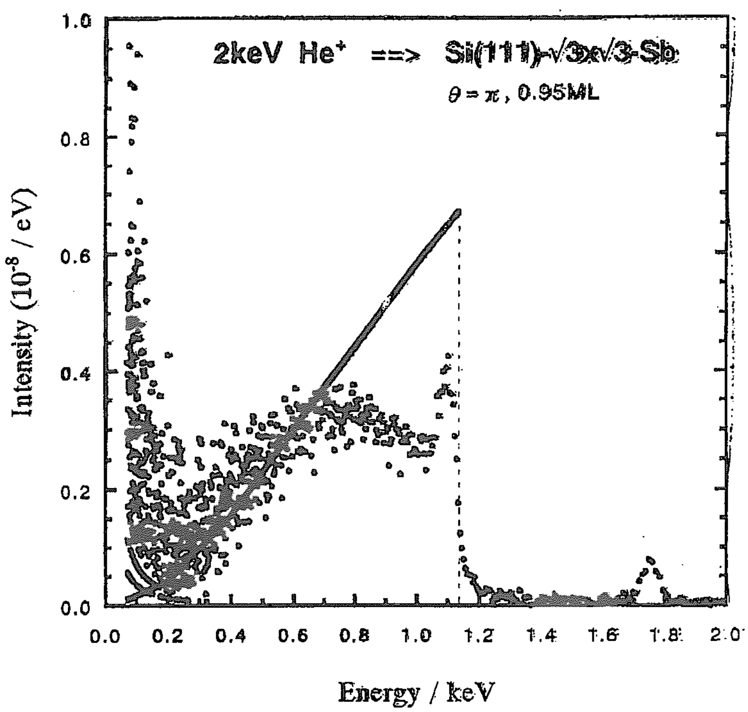
$$\sigma_c(E) = \int_{\theta_c}^{\pi} d\sigma(E,\theta) = \underline{0.43}\pi a^2\frac{1}{\varepsilon}\int_{\theta_c}^{\pi}\frac{\cos\frac{\theta}{2}}{\sin\frac{\theta}{2}}d\theta$$

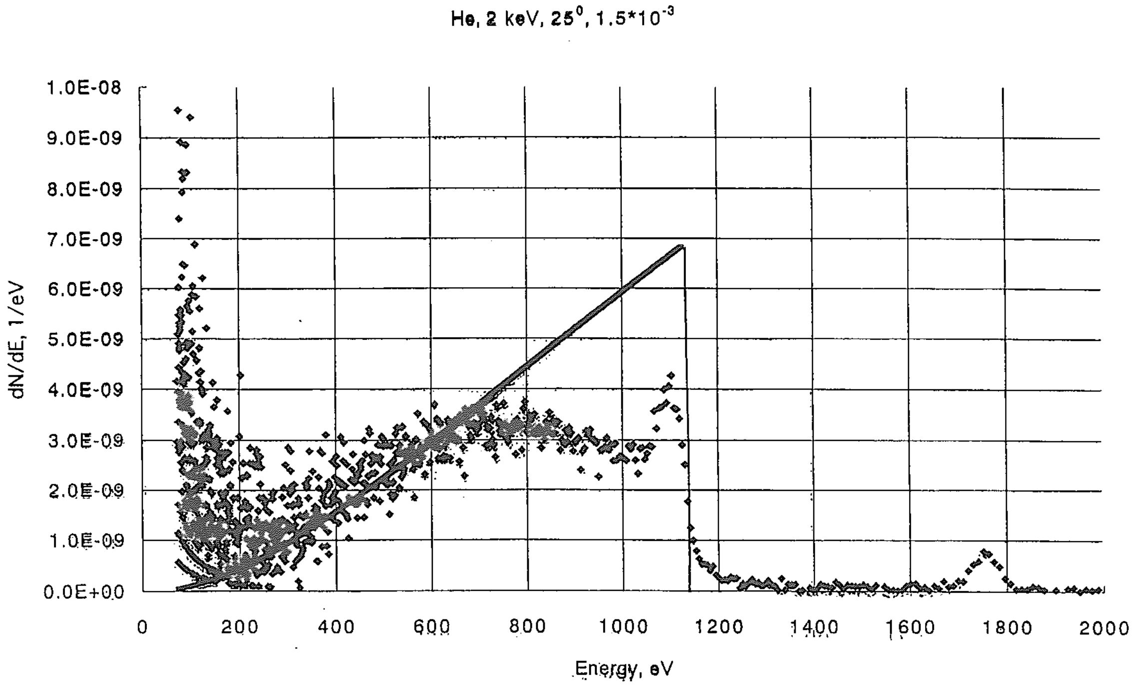
$$= \frac{0.86\pi a^2}{\varepsilon}\left(\frac{1}{\sin\frac{\theta_c}{2}} - 1\right)$$

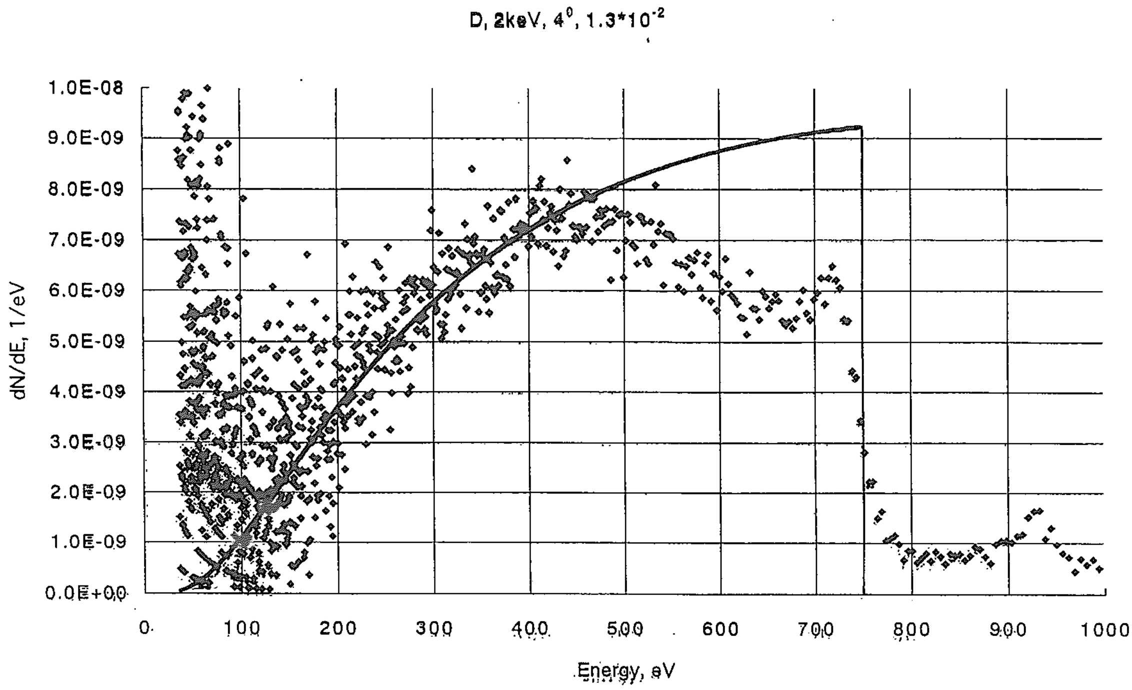
Assumption

$f(\varepsilon) = 0.43$

$S(E)$ ：実験データ


2keV He+ ==> Si(111)-√3x√3-Sb
θ = π , 0.95ML
Intensity (10-8 / eV)
Energy / keV
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0 1.2 1.4 1.6 1.8 2.0


He, 2 keV, 25°, 1.5*10-3
dN/dE, 1/eV
1.0E-08
9.0E-09
8.0E-09
7.0E-09
6.0E-09
5.0E-09
4.0E-09
3.0E-09
2.0E-09
1.0E-09
0.0E+00
0 200 400 600 800 1000 1200 1400 1600 1800 2000
Energy, eV



まとめ

Sub-keV のD_2およびＨｅイオンのSb/Si(111)表面からの１８０°反射スペクトルを飛行時間分解測定し、Ｓｂ原子からの反射収のデータ解析から、検出器（マイクロ・チャネル・プレート）のＤおよびＨｅ原子に対する量子効率の絶対値を決定した。

量子効率の実験データを用いてSi(111) 基板からの反射エネルギースペクトルを決定し、それと単一散乱モデルに基づき計算した理論エネルギースペクトルと比較した。

これらの結果は、マイクロ・チャネル・プレートが高温プラズマから放出される１００eV以上のＨ，Ｄ，Ｈｅの中性粒子のエネルギー分布を飛行時間分解測定するのに使用できることを示している。

3.7 定常高粒子束ビーム装置の開発と材料照射試験

大阪大学 上田良夫、島田朋尚、西川雅弘
核融合科学研究所 相良明男

1．はじめに

プラズマ対向材料や第一壁材料とエッジプラズマの相互作用研究において、①水素同位体イオンと不純物（ボロン［コーティング材］、炭素、金属不純物など）の同時照射効果、②高粒子束下における材料中の動的水素挙動や損耗特性、③定常運転下における高フルーエンス照射下での金属材料の照射損傷の蓄積と水素吸蔵特性の関係、あるいは表面形状の安定性などについての知見が、実機における現象を理解する上で重要である。また、イオンと電子や中性ラジカルの同時照射による協同効果などについても、理解されているとは言えない。

本研究では、これらの現象について基礎的な理解を深めるための材料照射用実験装置として、定常高粒子束ビーム装置（HiFIT, High Flux Irradiation Test device）を開発した。

2．装置構成

装置は最大5 kW－2.45 GHz のマイクロ波を用いたECR放電によりイオン源プラズマを生成し、大口径球面電極でイオンビームを幾何学的に集束して高粒子束を得る。電極には、加速減速引き出し系を用い、電極孔形状を高アスペクト比（アスペクト比：電極孔の径とプラズマ電極－中間電極間距離の比）とし、低加速電圧時に高減速電圧を印加することにより、低エネルギーで高電流密度（高粒子束）を得ることが出来るように設計されている。加速電圧の最大値は6 kV、減速電圧の最大値は-6 kVである。

3．装置特性

水素プラズマからビームを引き出して粒子束と加速電圧、及び減速電圧の関係を調べた。高加速電圧（1 kV以上）では、加速電圧の増加と共に粒子束が増加し、最大粒子束は加速電圧3 kVの場合に約2.8×10^{21} H/m^{2}sであった。また、高加速電圧領域では、減速電圧を変化させても粒子束に大きな変化は無かった（最大減速電圧 -2 kV）。しかしながら、低加速電圧（0.5 kV以下）では、減速電圧を高圧化する事（減速電圧の加速電圧に対する比率が2以上、最大減速電圧 -2.1 kV）で粒子束は飛躍的に上昇した。その結果、加速電圧0.5 kV以下では（0.15 kVまで）、加速電圧を下げても粒子束の減少は見られず、約 3×10^{20} H/m^{2}s の粒子束が得られた。

ビーム中の不純物については、質量電荷比（M/e）が30までの領域では、水素関連のイオン（H^+、H_2^+、H_3^+）のみが観測され、炭素や酸素に起因する不純物は検出限界以下であった（0.1%程度以下）。また、30分の運転を安定に行うことが出来た。

定常高粒子束ビーム装置の開発と材料照射試験

大阪大学　上田良夫、島田朋尚、西川雅弘
核融合科学研究所　相良明男

平成12年度第２回ＰＳＩ研究会
平成12年12月1日　於原研那珂研究所

Outline

1. 高粒子束ビーム照射実験の目的

   高粒子束効果、高フルーエンス効果、複合粒子効果など

2. 高粒子束照射装置の特徴

   設計目標、装置構成、高減速電圧予備実験結果など

3. 照射装置の特性実験

   粒子成分比、粒子束、高減速電圧の効果、不純物など

4. まとめ

Osaka University

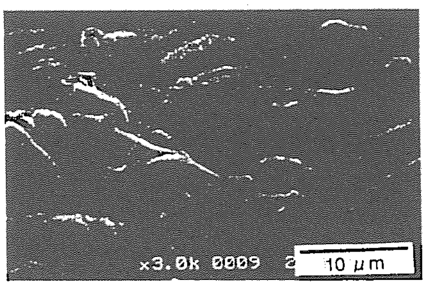
照射実験の目的

1. 混合粒子効果
   - 損耗促進、もしくは堆積（共堆積）
   - 共堆積現象
2. 高粒子束効果
   - 動的水素挙動（Dynamic Retention）
   - 炭素複合材の化学スパッタリング、照射促進昇華の粒子束依存性
3. 高フルーエンス効果
   - 金属材料の照射損傷の蓄積と水素吸蔵特性
   - 表面形状の安定性
4. その他の効果
   - 中性ラジカル、電子など

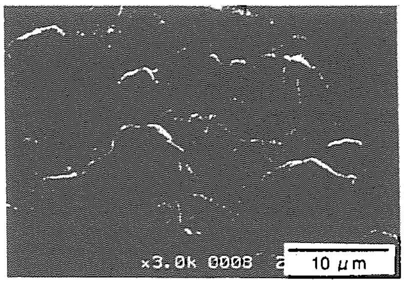
Osaka University

Ti添加炭素材の損耗について

Samples : RG-Ti (1.7 % Ti included)
Beam : 5 keV Ar
Temperature : 1780 K



Flux : 8.0 x 10^{20} Ar/m^{2}s
(Fluence :4.2 x 10^{23} Ar/m^{2}s)

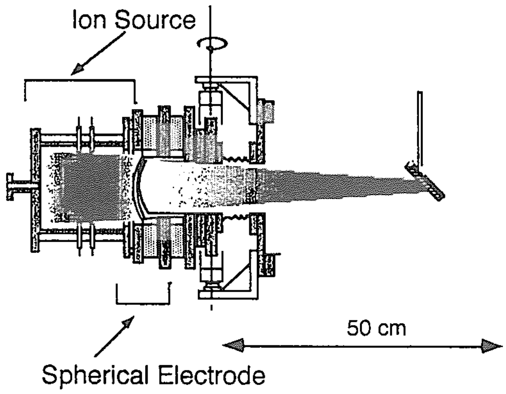


Flux : 1.6 x 10^{20} Ar/m^{2}s
(Fluence :1.9 x 10^{23} Ar/m^{2}s)

高粒子束効果：炭素材の照射促進昇華は、粒子束の増加と共に減少する。
→ 低粒子束ほどTiCの粒が表面に出てくる。
フルーエンス効果：TiCの粒は、高フルーエンスの照射下でも表面に存在しうるか。

Osaka University

従来の装置の特性と新装置の目標



従来の装置：
バケット型イオン源
球面電極収束系

粒子束：~ 1.0 x 10^{22} H/m^2s (5keV H_3^+)

--> 同等（新装置）

エネルギー領域：keV 領域

--> 100 eV近傍まで下げる（新装置）

パルス長：4 sec (low duty：~ 1/50)

--> 定常（新装置）

フルーエンス：10^{24} ~ 10^{25} $m^{-2}s^{-1}$

--> >10^{26} $m^{-2}s^{-1}$ (新装置)

不純物：~ 2% O (typ.)

--> 出来る限り低く（新装置）

Osaka University

高粒子束ビーム装置の特徴

1. 照射条件

電子や中性ラジカルの影響が少ない(プラズマシミュレータに比べて)。

入射角の制御が可能。

複合的な照射環境が実現できる（例：イオンビーム+中性ラジカル）

2. 測定

スパッタ粒子等の直接測定が可能

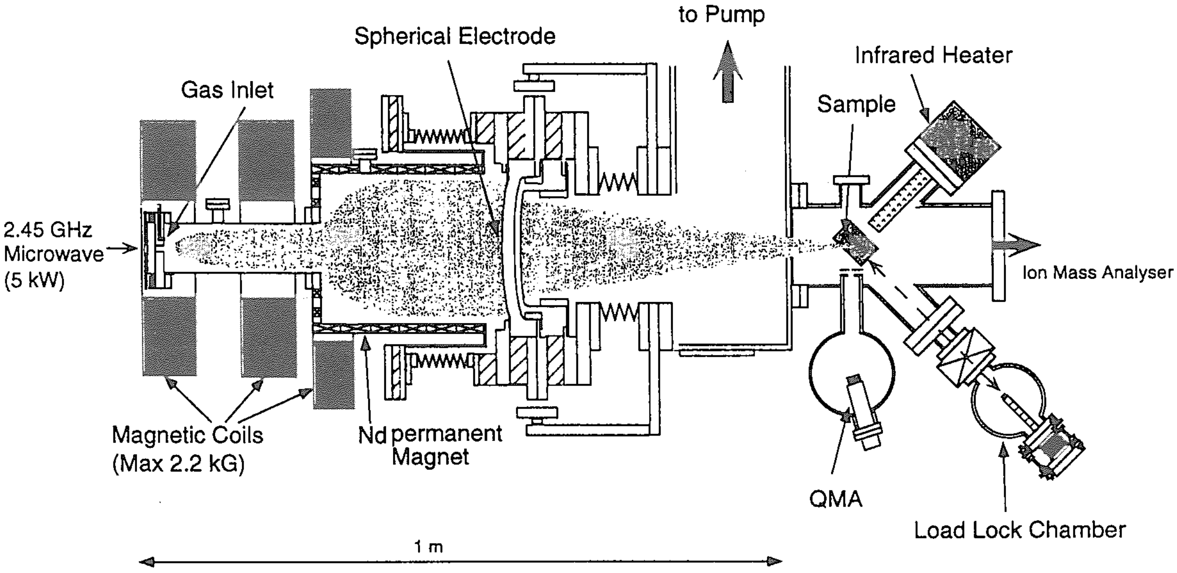
3. エネルギー、粒子束の制御

エネルギーや粒子束を、イオン源プラズマのパラメータを変えずに、変化させることが出来る（減速電圧の利用）。

---> 高粒子束照射実験装置として、有用な装置の一つである。

Osaka University

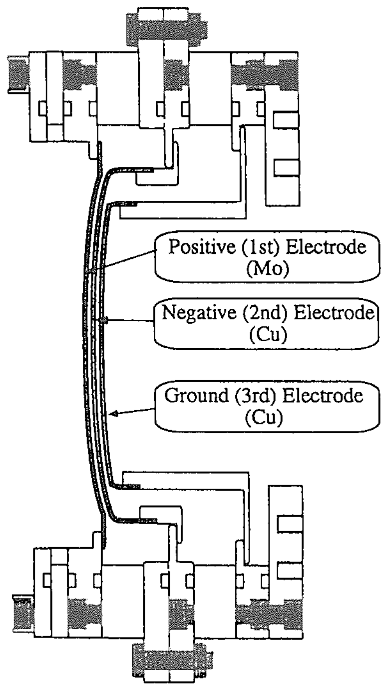
High Flux Irradiation Test Device (HiFIT)



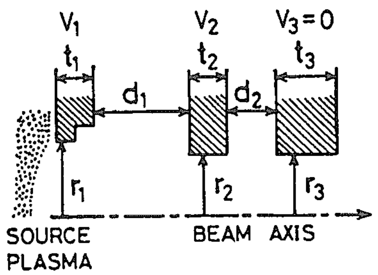
Details of Spherical Electrodes

Radius of Curvature : 600 mm
Thickness of Electrode : 2.0 mm
Number of Apertures : 638
Diameter of Apertures : 4.2 mm
Effective Radius of Electrode : 140 mm
Transparency : 50 %
Distance Between Electrodes :
Positive (1st) - Negative (2nd) : 2.0 mm
Negative (2nd) - Ground (3rd) : 1.3 mm
Maximum Voltage : 6 kV (Positive)
-6 kV (Negative)
Maximum Acceleration Current : 1.3 A

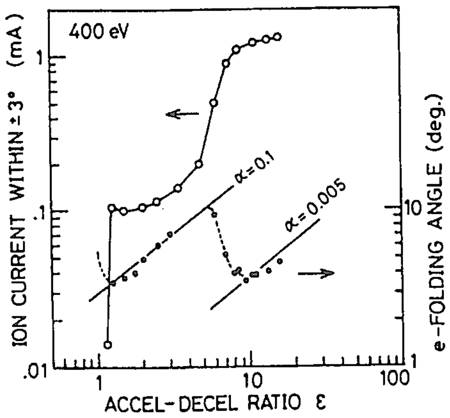
Aspect ratio = 1.05



減速電圧高圧化に関する基礎実験（１）



r_1 = 2.5 mm, d_1 = 3 mm
Aspect ratio r_1/d_1 = 0.83



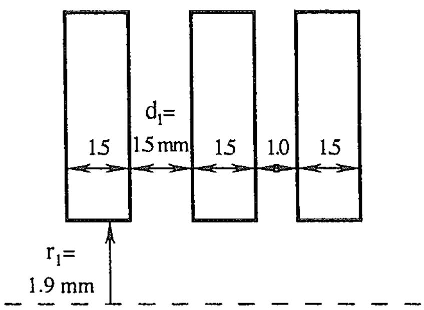
アスペクト比が、0.5の場合は
加減速比 5 付近で極小値

加減速比（$|V_{dec}|/V_{acc}$）<u>10</u> 付近で発散角が極小値をとる。
また、その近傍で電流密度が急激に上昇する。

A. Sagara et al., Production of High-Flux Beams of Hydrogen Ions below 1 keV, Jpn. J. Appl. Phys. 25 (1986) 506.

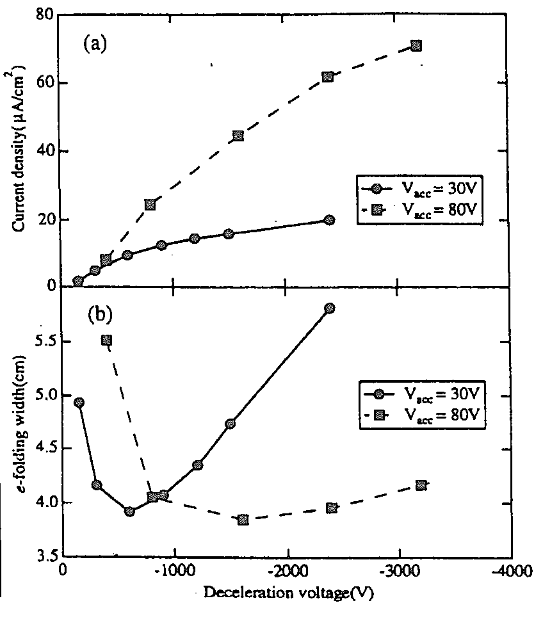
Osaka University

減速電圧高圧化に関する基礎実験（２）



Aspect ratio r_1/d_1 = 1.27

熱電子による電荷中和あり

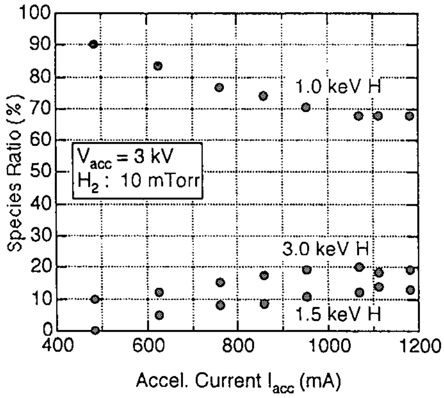


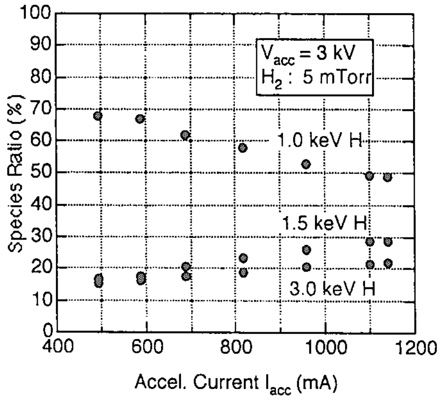
加減速比（$|V_{dec}|/V_{acc}$）<u>20</u> 付近で発散角が極小値をとる。
また、その近傍で電流密度が急激に上昇する。

T. Yoshikawa et al., Production of very low energy and high brightness ion beam, Rev. Sci. Instrum. 67 (1996) 1393.

Osaka University

水素ビームの粒子成分比について

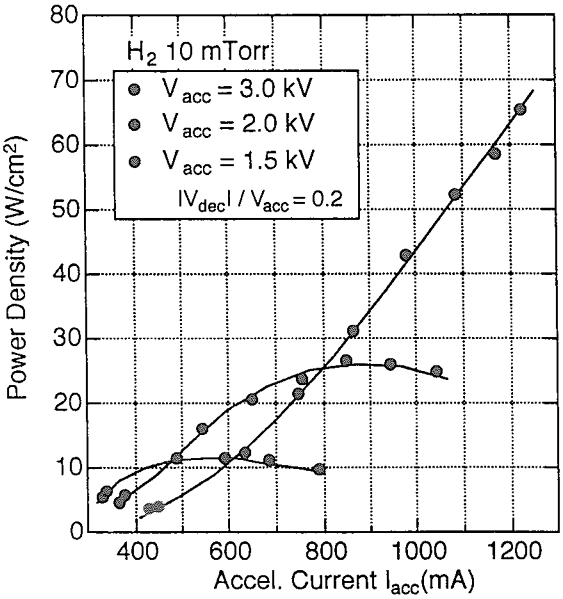




水素ビームは、一般に H_3^+, H_2^+, and H^+を含む。
H_3^+ (1.0 keV H) の割合は イオン源内ガス圧と共に増加し、加速電流（ほぼイオン源内プラズマ密度に対応）と共に減少する。
→ エネルギーと粒子束を変化させて、その依存性を見るときは、ガス圧や加速電流を固定しておくことが望ましい。

Osaka University

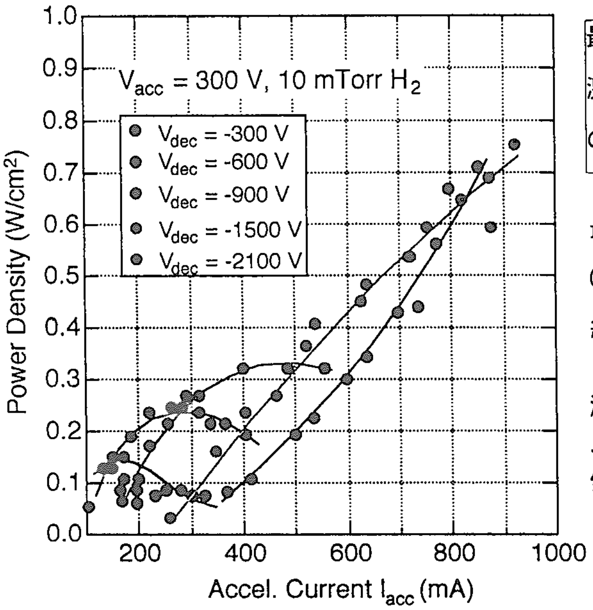
ビームパワー特性（低減速電圧）



最大パワー密度は、65 W/cm^2（加速電圧 3 kV）で、水素フラックスに換算すると、約 2.8×10^{21} H/m^{2}sである。

Osaka University

ビームパワー特性（高減速電圧）



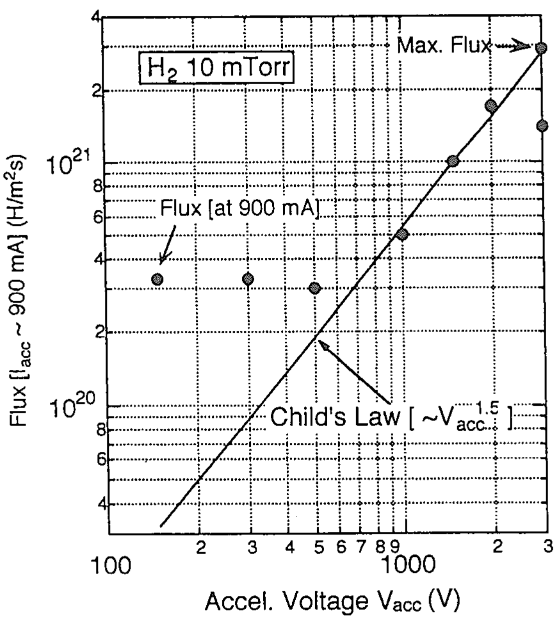
最大パワー密度は、減速電圧の増加と共に急激に増加する。この結果は、減速電圧高圧化の基礎実験結果と良く対応する。

最大パワー密度は、0.75 W/cm^2（加速電圧0.3 kV）で、水素フラックスに換算すると、約3.3 x 10^{20} H/m^{2}sである。

減速電圧を変化させることで、加速電圧（ビームエネルギー）や加速電流（粒子成分比と関係）一定の条件下でフラックスを変化できる。

Osaka University

現在までにHiFIT装置で得られた粒子束

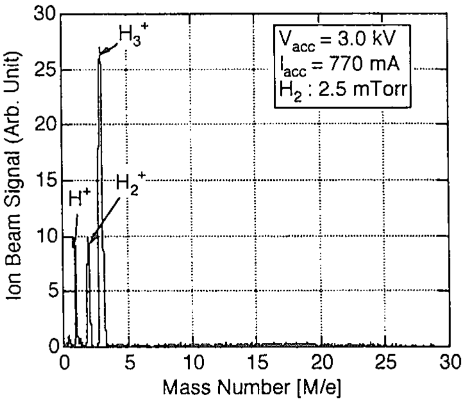


1 keV以上では、粒子束はほぼ加速電圧の3/2乗に比例する。
（減速電圧が高圧化出来ない）

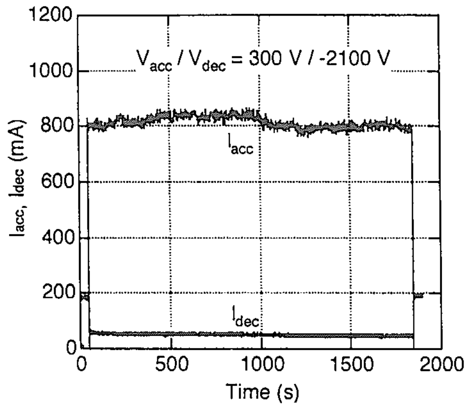
1 keV以下では、減速電圧高圧化の効果で、粒子束はほぼ一定である。

Osaka University

ビーム中の不純物、長時間運転について



Mass Spectrum of Hydrogen Beam



Evolution of Accel. and Decel. Currents

酸素、炭素を含む不純物は検出限界以下である。

30分の長パルス運転を実証。

Osaka University

まとめ

1. ECRイオン源と球面電極を持つ、定常高粒子束ビーム照射装置（HiFIT, High Flux Irradiation Test Device）を製作した。
2. 加速電圧V_{acc} = 3 kVの時、2.8×10^{21} H/m^{2}s、加速電圧 V_{acc} = 0.3 kVの時、3.3×10^{20} H/m^{2}s の粒子束を実現した。
3. 減速電圧高圧化の有用性を大口径低エネルギーイオン源で実証した。
   - 加速電圧500 V以下の場合に、粒子束を大幅に増加させることができた。
   - 加速電流（プラズマ密度）を変えずに、粒子束を変化できる。
4. 酸素及び炭素不純物の含有量は、測定限界以下である。
5. 30分の長パルス運転を実証した。中間電極、接地電極フランジを冷却することでさらなる長パルス化が実現できると考えられる。

Osaka University

付録

This is a blank page.

付録１　平成12年度第２回ＰＳＩ・ＰＦＣ合同研究会プログラム

平成12年12月1日
日本原子力研究所　那珂研究所

10:00 - 10:05	挨拶	秋場真人／原研

セッション１　大型核融合装置における研究の現状

10:05 - 10:35	LHD実験の現状	野田信明／核科研
10:35 - 11:05	JT-60ダイバータタイル上のベリリウム分布	正木　圭／原研
11:05 - 11:35	JFT-2Mにおける低放射化フェライト鋼の真空容器内設置及びボロンコーティングの影響	都築和泰／原研
11:35 - 12:00	ITERダイバータ開発の現状	佐藤和義／原研

＜休憩＞
JT-60見学

セッション２　基盤技術開発における研究の現状

13:45 - 14:15	イメージングプレートによるトリチウム検出 JT-60U協力研究に向けての新技術紹介	田辺哲朗／名大
14:15 - 14:45	BIXS法によるトリチウムの拡散挙動の追跡 －タングステン材料－	松山政夫／富山大
14:45 - 15:15	紫外線（光／レーザー）によるトリチウム除染	洲　　亘／原研
15:15 - 15:45	純トリチウムイオンビームを利用したPSI研究	中村博文／原研

＜休憩＞

16:05 - 16:35	水素濃度による黒鉛中の水素拡散係数の変化	渥美寿雄／近大
16:35 - 17:05	中性粒子の直接測定による低エネルギーイオン散乱の解析	森田健治／名大
17:05 - 17:35	定常高粒子束ビーム装置の開発と材料照射試験	上田良夫／阪大
17:35 - 17:45	総合討論	

付録２　平成12年度第２回ＰＳＩ・ＰＦＣ合同研究会参加者名簿

野田　信明	核融合科学研究所	
宇田　達彦	核融合科学研究所	
田辺　哲朗	名古屋大学	
森田　健治	名古屋大学	
松山　政夫	富山大学	
上田　良夫	大阪大学	
渥美　寿雄	近畿大学	
車田　　亮	茨城大学	
伴野　達也	東京大学	
佐藤　留美	東京大学	
山口　憲司	東京大学	
工藤　文夫	三菱重工	
白形　弘文	日本エクス・クロン	
藤田　一郎	東洋炭素	
小林　重忠	東芝	
安東　俊郎	日本原子力研究所	ITER 開発室
大平　　茂	日本原子力研究所	ITER 開発室
小西　哲之	日本原子力研究所	炉心プラズマ研究部
都築　和泰	日本原子力研究所	炉心プラズマ研究部
宮　　直之	日本原子力研究所	核融合装置試験部
児玉　幸三	日本原子力研究所	核融合装置試験部
正木　　圭	日本原子力研究所	核融合装置試験部
中村　和幸	日本原子力研究所	核融合工学部
中村　博雄	日本原子力研究所	核融合工学部
中村　博文	日本原子力研究所	核融合工学部
洲　　亘	日本原子力研究所	核融合工学部
秋場　真人	日本原子力研究所	核融合工学部
佐藤　和義	日本原子力研究所	核融合工学部
谷口　正樹	日本原子力研究所	核融合工学部
横山　堅二	日本原子力研究所	核融合工学部
大楽　正幸	日本原子力研究所	核融合工学部
中村　弘史	日本原子力研究所	核融合工学部

国際単位系(SI)と換算表

表1　SI基本単位および補助単位

量	名　称	記　号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表2　SIと併用される単位

名　称	記　号
分，時，日	min, h, d
度，分，秒	°, ′, ″
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$1\ \mathrm{eV}=1.60218\times10^{-19}\ \mathrm{J}$

$1\ \mathrm{u}=1.66054\times10^{-27}\ \mathrm{kg}$

表5　SI接頭語

倍数	接頭語	記　号
10^{18}	エクサ	E
10^{15}	ペタ	P
10^{12}	テラ	T
10^{9}	ギガ	G
10^{6}	メガ	M
10^{3}	キロ	k
10^{2}	ヘクト	h
10^{1}	デカ	da
10^{-1}	デシ	d
10^{-2}	センチ	c
10^{-3}	ミリ	m
10^{-6}	マイクロ	μ
10^{-9}	ナノ	n
10^{-12}	ピコ	p
10^{-15}	フェムト	f
10^{-18}	アト	a

表3　固有の名称をもつSI組立単位

量	名　称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s^{-1}
力	ニュートン	N	$m\cdot kg/s^2$
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	$N\cdot m$
工率，放射束	ワット	W	J/s
電気量，電荷	クーロン	C	$A\cdot s$
電位，電圧，起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	$V\cdot s$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	℃	
光束	ルーメン	lm	$cd\cdot sr$
照度	ルクス	lx	lm/m^2
放射能	ベクレル	Bq	s^{-1}
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表4　SIと共に暫定的に維持される単位

名　称	記　号
オングストローム	Å
バーン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$1\ \text{Å}=0.1\ \mathrm{nm}=10^{-10}\ \mathrm{m}$

$1\ \mathrm{b}=100\ \mathrm{fm^2}=10^{-28}\ \mathrm{m^2}$

$1\ \mathrm{bar}=0.1\ \mathrm{MPa}=10^5\ \mathrm{Pa}$

$1\ \mathrm{Gal}=1\ \mathrm{cm/s^2}=10^{-2}\ \mathrm{m/s^2}$

$1\ \mathrm{Ci}=3.7\times10^{10}\ \mathrm{Bq}$

$1\ \mathrm{R}=2.58\times10^{-4}\ \mathrm{C/kg}$

$1\ \mathrm{rad}=1\ \mathrm{cGy}=10^{-2}\ \mathrm{Gy}$

$1\ \mathrm{rem}=1\ \mathrm{cSv}=10^{-2}\ \mathrm{Sv}$

(注)

1. 表1－5は「国際単位系」第5版，国際度量衡局 1985年刊行による。ただし，1 eVおよび1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
2. 表4には海里，ノット，アール，ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
3. barは，JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
4. EC閣僚理事会指令ではbar，barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換　算　表

力	N($=10^5$dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘　度　1 Pa·s($N\cdot s/m^2$)= 10 P(ポアズ)(g/(cm·s))

動粘度　$1\ m^2/s=10^4$St(ストークス)(cm^2/s)

圧力	MPa(=10 bar)	kgf/cm^2	atm	mmHg(Torr)	lbf/in^2(psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062×10^3	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322×10^{-4}	1.35951×10^{-3}	1.31579×10^{-3}	1	1.93368×10^{-2}
	6.89476×10^{-3}	7.03070×10^{-2}	6.80460×10^{-2}	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J($=10^7$erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778×10^{-7}	0.238889	9.47813×10^{-4}	0.737562	6.24150×10^{18}
	9.80665	1	2.72407×10^{-6}	2.34270	9.29487×10^{-3}	7.23301	6.12082×10^{19}
	3.6×10^6	3.67098×10^5	1	8.59999×10^5	3412.13	2.65522×10^6	2.24694×10^{25}
	4.18605	0.426858	1.16279×10^{-6}	1	3.96759×10^{-3}	3.08747	2.61272×10^{19}
	1055.06	107.586	2.93072×10^{-4}	252.042	1	778.172	6.58515×10^{21}
	1.35582	0.138255	3.76616×10^{-7}	0.323890	1.28506×10^{-3}	1	8.46233×10^{18}
	1.60218×10^{-19}	1.63377×10^{-20}	4.45050×10^{-26}	3.82743×10^{-20}	1.51857×10^{-22}	1.18171×10^{-19}	1

1 cal = 4.18605 J (計量法)

= 4.184 J (熱化学)

= 4.1855 J (15 °C)

= 4.1868 J (国際蒸気表)

仕事率　1 PS (仏馬力)

= 75 kgf·m/s

= 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270×10^{-11}
	3.7×10^{10}	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58×10^{-4}	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

(86年12月26日現在)

プラズマ・壁相互作用（ＰＳＩ）及びプラズマ対向機器（ＰＦＣ）合同研究会講演要旨集　２０００年12月１日、那珂研究所、那珂町