

2003-016



ストロンチウム-セリウム酸化物セラミックス中の  
トリチウムの存在状態およびその除去特性

2003年8月

中村 博文・西 正孝・森田 健治\*

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

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県  
那珂郡東海村）あて、お申し越し下さい。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料  
センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費  
頒布を行っております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research  
Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy  
Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2003

編集兼発行 日本原子力研究所

## ストロンチウム-セリウム酸化物セラミックス中のトリチウムの存在状態およびその除去特性

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部

中村 博文・西 正孝・森田 健治\*

(2003年7月11日受理)

核融合炉材料からのトリチウム除去回収に関する研究の一環として、核融合炉のトリチウム回収システムへの応用研究が進められているストロンチウム-セリウム(Sr-Ce)系酸化物セラミックスプロトン導電体にトリチウムを注入し、酸化物試料中のトリチウムの存在状態を等速昇温脱離法により調査した。その結果、Sr-Ce系酸化物中でのトリチウムは、主として水酸基の状態で存在しているため、その除去には1300K以上での加熱放出が必要なことを明らかにした。また、トリチウムを注入した試料を水蒸気濃度が異なる空気中に曝露し、その際のトリチウム放出量および放出化学形の水蒸気濃度依存性を測定することにより、トリチウム除去機構について検討した。その結果、空気曝露によるトリチウム除去率は小さく、そのほとんどが、試料表層のOT基と水蒸気との同位体交換反応により水状として放出されるトリチウムであることを明らかにした。また、酸化物中の溶解トリチウムと酸素欠損への酸素の引き抜き現象に起因する水蒸気曝露による水素状でのトリチウム放出もわずかではあるが確認できた。以上の結果、酸化物中におけるトリチウムの存在状態の違いによる空気曝露時のトリチウム除去機構の違いを明らかにし、トリチウム除去法の最適化のための基礎データを得た。

Chemical State of Tritium in Sr-Ce Oxide Ceramics and its Removal Characteristics

Hirofumi NAKAMURA, Masataka NISHI and Kenji MORITA\*

Department of Fusion Engineering Research  
(Tokai site)

Naka Fusion Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received July 11, 2003 )

As a part of the detritiation study from the fusion reactor materials, chemical state of tritium injected into Sr-Ce base oxide ceramic proton conductor, which is a candidate for a tritium recovery system, was investigated with thermal desorption method. The results indicated that the oxide has to be heated up over 1300 K to remove tritium due to the OT bond formation in the oxide. On the other hand, tritium removal behavior from the oxide were also investigated by exposing to humid air, and the mechanism of tritium removal from the oxide was identified by the dependency of tritium removal amount and chemical state on the humidity. The results revealed that tritium removal rate by the air exposure was low, and that almost tritium was removed as the vapor form, which was attributed to the isotope exchange reaction between the OT bond on the surface and the protium in vapor. It was also found that small amount of tritium was removed as elemental form under the humid air exposure, which could be attributed to the solute tritium in the oxide and oxygen absorption to the oxygen deficit in the oxide. As a result, the difference of the detritiation mechanism exposed to the humid air on the chemical state of tritium in the oxide was clarified, and it could be a useful basic data for the optimization of detritiation method.

Keywords: Tritium, Protonic Conductor, Ion Implantation, Thermal Desorption, Decontamination, Vapor, Isotope Exchange

---

\* Nagoya University (Leave to Meijyo University)

## 目 次

1. 序論	1
2. 実験	2
2.1. 試料	2
2.2. 実験の構成	2
2.3. トリチウムイオン注入実験	2
2.3.1. トリチウムイオン注入装置	2
2.3.2. トリチウムイオン注入	3
2.4. 空気曝露実験	3
2.4.1. 空気曝露実験装置	3
2.4.2. 空気曝露実験	3
2.5. 升温脱離実験	3
2.5.1. 升温脱離装置	3
2.5.2. 升温脱離実験	4
2.6. 残留トリチウム測定	4
3. 実験結果	4
3.1. 空気曝露実験結果	4
3.2. 升温脱離実験結果	5
3.2.1. トリチウム放出化学形	5
3.2.2. 曝露条件の違いによる升温脱離挙動の違い	6
3.3. 残留トリチウム挙動	7
4. 考察	7
4.1. 空気曝露によるトリチウム放出機構	7
4.2. 核融合材料からのトリチウム除去方法に関する課題	9
5. まとめ	10
謝辞	10
参考文献	11

## Contents

1. Introduction	1
2. Experimental	2
2.1. Specimen	2
2.2. Experimental Procedure	2
2.3. Tritium Ion Implantation Experiment	2
2.3.1. Tritium Ion Implantation Apparatus	2
2.3.2. Tritium Ion Implantation	3
2.4. Air Exposure Experiment	3
2.4.1. Air Exposure Apparatus	3
2.4.2. Air Exposure	3
2.5. Thermal Desorption	3
2.5.1. Thermal Desorption Apparatus	3
2.5.2. Thermal Desorption Experiment	4
2.6. Residual Tritium Measurement	4
3. Experimental Results	4
3.1. Results of Air Exposure	4
3.2. Results of Thermal Desorption	5
3.2.1. Chemical Form of Released Tritium	5
3.2.2. Tritium Release Behavior under the Various Moisture Concentration	6
3.3. Results of Residual Tritium Measurement	7
4. Discussions	7
4.1. Tritium Release Behavior under the Air Exposure	7
4.2. Issue for the Tritium Removal from Fusion Reactor Materials	9
5. Summary	10
Acknowledgements	10
References	11

## 1. 序論

現在開発が進められている DT 核融合炉において、燃料であるトリチウムで汚染された材料からのトリチウム除去は、施設のメンテナンスや廃棄物管理・処理の観点から重要である。特にトリチウムが直接接する真空容器内の構造機器あるいは燃料循環システムを構成するトリチウムシステムの構成材料に関しては、その汚染量、トリチウムの化学形等の汚染形態に関する知見はトリチウム除去法を開発する上において欠くことができない<sup>1)</sup>。

核融合で使用予定の材料は金属、酸化物、非酸化化合物、有機系化合物と多岐にわたっており、また、これら材料中におけるトリチウムの存在形態も様々であることが予想される。このトリチウムの存在状態の違いを知ることによって最適のトリチウム除染方法もしくは処理方法を選択することができる。

日本原子力研究所（原研）においては、核融合炉の安全評価用データベースとしての材料中トリチウム透過・滞留挙動の研究や材料からのトリチウム除去法の開発等の一環として、トリチウムイオン注入による材料中のトリチウム透過実験及びトリチウムプラズマによる材料中のトリチウム滞留実験等を実施し、プラズマ-材料相互作用に関する研究を進めてきている<sup>2-6)</sup>。その中で、金属もしくは非酸化化合物に注入したトリチウムは元素状態で存在していること<sup>3-5)</sup>、炭素材料中のトリチウムは C-T 結合を有していることを明らかにしてきた。また、酸化物中に核変換で生成したトリチウムは O-T 結合をしていることも明らかにされている<sup>7)</sup>。

今回研究対象としたストロンチウム-セリウム系酸化物セラミックスは、プロトン導電体であり、核融合炉の増殖ブランケットからのトリチウム回収系への応用に向けた基礎的な研究開発が進められているところである<sup>8)</sup>。本システムはトリチウムの酸化物内部の電気化学的透過を利用するものであり、材料中に強制的にトリチウムが注入されるため、トリチウムインペントリの増大が予測される。このような状況において、ストロンチウム-セリウム系酸化物中に残留するトリチウムの材料との化学的結合状態に関する知見は、プロトン導電体を利用したトリチウム回収システムの廃棄時やメンテナンス時におけるトリチウム回収・除去方法の選定・最適化を考える上で重要なとなる。

一方、本ストロンチウム-セリウム系酸化物セラミックスについては、基礎実験において、重水素イオン注入によって材料内深部に重水素を存在させた場合、材料表面に水蒸気を接触させると、同位体交換が大幅に促進され、内部の重水素が水蒸気中の軽水素と結合し、水素(HD)状で放出されるという現象が報告されている<sup>9-11)</sup>。本現象には、物理的には一般に信じられている材料中の水素同位体の拡散現象や同位体交換反応に関するモデルが適用できないため、独自の拡散・交換モデルが提案されつつある<sup>9-11)</sup>。また、工学的には、この現象を利用し、水蒸気に曝露するだけでストロンチウム-セリウム系酸化物セラミックス中の大部分のトリチウムを水素(HT)状で回収できる可能性が示唆され、トリチウム除染後のトリチウム処理が容易なシステムの構築も期待できる。

以上の物理的なモデルの妥当性及び工学的システム構築の可能性を検証するためには、実際にトリチウムを材料中に強制的に注入し、水蒸気との交換反応を測定し、どの程度のトリチウム除去効果が期待できるかを調査する必要がある。

このような観点から、今回ストロンチウム-セリウム酸化物セラミックス中のトリチウムの存在形態及び水蒸気雰囲気に接触した場合のトリチウム除去挙動測定実験を計画し、実施した。本報告書は、上記実験に関する結果をまとめたものである。

## 2. 実験

### 2.1. 試料

今回の実験で使用した試料はストロンチウム-セリウム系酸化物セラミックス( $\text{SrCe}_{0.95}\text{Y}_{0.05}\text{O}_{3-\delta}$ )であり、直径 15 mm、厚さ 2 mm のタブレット状の焼結体である。

### 2.2. 実験の構成

ストロンチウム-セリウム酸化物に注入されたトリチウムの水蒸気による脱離挙動を調べるために、以下に示す手順で実験を実施した(Fig.1)。

#### ①トリチウムのイオン注入

試料中へのトリチウムの強制的な注入をイオン注入法により模擬し、純トリチウムイオンを試料に照射することにより、トリチウム注入試料を製作した。

#### ②空気曝露実験

①の操作により作成したトリチウム注入試料 A~E を以下に示す空気気流中に曝した。このときに試料から放出されるトリチウム量及び化学形を一定時間毎に測定した。

A 試料: 空気曝露無し

B 試料: 数分間の湿潤空気曝露(水蒸気濃度~7600ppm)

C 試料: 24 時間の湿潤空気曝露(水蒸気濃度~7600ppm)

D 試料: 24 時間の乾燥空気曝露(水蒸気濃度<100ppm)

E 試料: 24 時間の湿潤空気曝露(水蒸気濃度~21000ppm)

#### ③昇温脱離実験

曝露実験後に試験体内に存在するトリチウムの存在状態を等速昇温脱離(TDS)法で調べた(昇温により放出されるトリチウムの化学形及び放出量の測定)。

#### ④残留トリチウム測定

昇温脱離実験後に試料中に残留しているトリチウム量を水中への浸出法により測定した。

### 2.3. トリチウムイオン注入実験

#### 2.3.1. トリチウムイオン注入装置

純トリチウムイオン注入には、原研トリチウムプロセス研究棟の純トリチウムイオンが生成可能なトリチウム透過実験装置(Tritium Permeation Apparatus: TPA)を使用した<sup>12)</sup>(Fig. 2)。

トリチウムイオン照射のための試料ホルダの概念図を Fig.3 に、また、本試料ホルダと設置された試料の写真を Fig. 4 に示す。試料の有効照射直径は 8 mm である。試料には熱電対を取り付

け、イオン注入中の試料温度を測定した。装置全体はグローブボックス内に設置されており<sup>14)</sup>、グローブボックスは窒素ガス雰囲気に維持されている。この窒素ガスの水蒸気濃度は常時 0.1ppm 以下、酸素濃度は 1000ppm 以下に制御され、イオン注入試料の取り出し時において試料が水蒸気に接することは無い構造となっている。

### 2.3.2. トリチウムイオン注入

試料へのトリチウムイオン注入は、イオンフラックス  $8.3 \times 10^{18} \text{ T}^+/\text{m}^2\text{s}$ 、イオンエネルギー 1keV、照射条件 5 時間、試料温度常温の照射条件で実施した。このイオン照射により 1 個の試料に注入されたトリチウム量は約  $5 \times 10^{18} \text{ T atoms}$  (7.4 GBq) である。

イオン注入に当たっては、A、B 及び C 試料を同時に照射し、その後、D、E の試料を A~C 試料と同一条件で照射した。トリチウムイオン注入後、A 試料は、空気気流中に曝露することなく昇温脱離実験用の加熱管に挿入し、B~E 試料は曝露容器に設置した。これら一連の作業は全て水蒸気濃度 0.1ppm 以下、酸素濃度 1000ppm 以下の窒素ガス雰囲気で実施した。

## 2.4. 空気曝露実験

### 2.4.1. 空気曝露実験装置

トリチウムイオン照射後、B~E 試料について空気曝露実験を行った。曝露用装置は、Fig.5 及び Fig.6 に示すように、ガス導入系、曝露容器及び放出トリチウム捕集系より構成される。ガス導入系は空気流通用の空気ポンプ、窒素ガス導入用の窒素ガスボンベ及び流量調節器からなる。曝露容器は、試料を格納するステンレス鋼製の容器であり、B~E 試料用に 4 個の容器を用意した。曝露容器の構造を Fig. 7 に示す。トリチウム捕集系は、水蒸気状で放出されたトリチウムを 1 段目のバブラー（1段バブラー）で捕集し、その後、水素状で放出されたトリチウムを約 500 K に加熱したポップカライト触媒充填槽で酸化させた後、2 段目のバブラー（2段バブラー）で捕集するシステムである。曝露実験中に定期的にバブラーを交換することにより、トリチウム放出量及び放出化学形の経時変化の測定が可能である。

### 2.4.2. 空気曝露実験

曝露実験は以下の手順で実施した。B 試料に関しては数分間の空気への曝露を行った。C~E 試料は、2.2.②に示した条件の  $50 \text{ cm}^3/\text{min}$  の空気気流条件下で 24 時間の曝露を実施し、定期的にバブラーを交換することにより、曝露時間によるトリチウム放出量の経時変化を測定した。

## 2.5. 升温脱離実験

### 2.5.1. 升温脱離装置

Fig. 8 に昇温脱離実験装置の系統図を示す。本装置では、石英ガラス製の加熱管を赤外線加熱

装置で加熱することにより試料の加熱を行い、最大 1473K まで加熱可能である。また、温度は、試料と接触させた熱電対により測定し、昇温脱離の放出ガス測定は四重極質量分析計(QMS)で行う。

### 2.5.2. 昇温脱離実験

昇温脱離実験は、A～E の全試料につき、以下の要領で実施した。まず、イオンポンプにより  $10^{-6}$  Pa 以下まで排気した後、昇温脱離実験を実施した。昇温速度は 0.5 K/s とし、1300 K まで加熱後、一定時間(A、B、及びC では 15 分、D、E 試料では 1 時間)保持した後、加熱を止め自然冷却させた。昇温中に試料から放出される各種ガスの放出量は QMS で測定した。測定ガス種は M/e= 4 (HT)、5 (DT)、6 (T<sub>2</sub>)、18 (H<sub>2</sub>O)、20 (HTO)、22 (T<sub>2</sub>O)とした。測定間隔は 4 秒間隔とし、1 回のスキャンの測定間隔を 2K 程度の温度変動内にした。

なお、比較のために、イオン注入された水素同位体挙動がよく知られているモリブデンについて同一条件で純トリチウムイオン照射を行った後に昇温脱離データを取得した。

### 2.6. 残留トリチウム測定

昇温脱離実験終了後、各試料中の残留トリチウム量の評価を目的として試料から水中へのトリチウム浸出量の測定を行った。本測定では、蒸留純水 20 cc を入れたガラス製バイアル瓶に試料を入れ、バイアル瓶から定期的に 0.1 cc ずつ採取して試料から純水中に浸出したトリチウム量を約 2 ヶ月間にわたって観測した。

## 3. 実験結果

### 3.1. 空気曝露実験結果

Table 1 に、B～E 試料の曝露中に放出されたトリチウム量を示す。これより、今回測定した B～E 試料全てにおいて、放出されたトリチウムは主に水として放出されていることが明らかである。また、空気中の水蒸気濃度が高い空気気流中に曝露した試料からのトリチウム放出量が多い傾向が認められる。一方、空気中に数分間の曝露しか行っていない B 試料からのトリチウム放出量が約 22MBq と他の試料からの放出量に近いことから、トリチウム放出は空気曝露初期のごく短時間に生じている可能性が示唆される。

Table 2 に、C 試料（約 7600ppm の水蒸気濃度の空気気流中への曝露試料）から水状及び水素状で放出されたトリチウム量の経時変化を示す。なお、曝露終了後に水素状で放出されたトリチウムを酸化させるための触媒充填槽をバージしたときに回収したトリチウム量もあわせて測定したが、バブラーで回収された量の 0.1% 以下であり、触媒中に捕捉されるトリチウム量はほぼ無視しうることを確認した。水状で放出されたトリチウムは 24 時間で約 64MBq であり、水素状のトリチウム放出量の約 10 倍である。また、60%以上が曝露初期の 3 時間以内に放出されている。

次に D 及び E 試料のトリチウム放出の結果を Fig.9 に示す。Fig.9(a) は、空気曝露中にバブラーで

捕集した水状及び水素状トリチウムの経時変化であり、Fig.9(b)及び(c)は、曝露中に放出されたトリチウムの積算量である。D 及び E 試料での水状トリチウムの放出は初期の 30 分で 140 MBq と 24 時間での放出量の約 55%に達している。この結果は、B、C 試料で観察された空気曝露のごく初期の段階で過半のトリチウムが放出されるという傾向と一致するものである。

また、24 時間の曝露により空気流中に放出されたトリチウムの総量と空気中水蒸気濃度の関係をまとめた結果を Fig.10 に示す。これより、空気中の水蒸気濃度と共に放出されるトリチウム量は水状、水素状共に増加していることが分かる。水状でのトリチウム放出量と水蒸気濃度との関係は、7600ppm と 21000ppm の間にはほぼ比例関係が認められるものの、低濃度領域で比例関係からのずれが観察され、低い水蒸気濃度においても比較的高いトリチウム水の放出が生じている。一方、水素状でのトリチウム放出に関しては、水状での放出と異なり、水蒸気濃度への依存性はほぼ一定(見かけ上水蒸気濃度の約 1/2 乗に比例)である。

なお、空気曝露により捕集されたトリチウム量の合計は、最も多くのトリチウムが放出された湿潤空気曝露の E 試料においても 24 時間で約 250 MBq であり、試料に注入されたトリチウム量 7.4 GBq の約 3%程度であった。

以上の結果より、試料中に打ち込まれたトリチウムは主として水状で放出され、このトリチウム放出は主として気流中の水蒸気と材料表面もしくは材料内部に存在するトリチウムとの同位体交換反応に起因していると考えるのが妥当である。また、今回の実験結果では、水蒸気曝露による水素状でのトリチウム放出量はわずかであった。従来の報告<sup>9-11)</sup>によれば、水蒸気曝露によるトリチウムの放出を促進するのは水素状でのトリチウム放出機構であり、今回観察された空気曝露によるトリチウム除去率が低い結果は、水素状放出の低さに起因していると推定される。

### 3.2 昇温脱離実験結果

昇温脱離(TDS)実験における HT、DT、T<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O、HTO、T<sub>2</sub>O の QMS 測定値の経時変化を試料・温度と共に Fig. 11~17 に示す。Fig. 11 は試料 A~E と同一条件でトリチウムイオン照射したモリブデンの昇温脱離の結果であり、Fig. 12~16 は各々試料 A~E の昇温脱離の結果である。また、Fig. 17 は確認のために加熱管に試料を入れないで行ったブランクテストの結果である。Fig.11~17 において、昇温脱離実験において DT 成分はほとんど観察されておらず、今回の実験結果では重水素成分を考慮する必要が無いことが分かる。以下に昇温脱離実験の結果をまとめる。

#### 3.2.1 トリチウム放出化学形

モリブデンに注入されたトリチウムは、Fig. 16 から明らかなように昇温脱離においては主に水素状で放出されている。このとき 2 つのトリチウム放出のピークが観察された。1 つ目のピークは 400 K 近傍に存在し、鋭い放出ピークを現している。2 つ目は、900 K 近傍に存在し、緩やかなピークである。このような低い温度でのトリチウム放出は、モリブデン中においてトリチウムが弱い結合で存在していることを反映しているものであり、トリチウムが水素状として放出されている結果と合わせて、モリブデン中のトリチウムは固溶水素として存在していることを示唆す

る結果である。これは、今まで著者らによりタンクステン等の金属材料で観察されている結果<sup>3),4)</sup>及び他研究者により報告されているモリブデンに打ち込まれた水素同位体の存在状態<sup>17,18)</sup>と一致する。

これに対し、酸化物であるストロンチウム-セリウム系酸化物に注入されたトリチウムは、Fig.12～16で見るように、モリブデンの場合に比べ、HT、T<sub>2</sub>Oの水素形でのトリチウム放出に加え、HTO、T<sub>2</sub>Oの水の化学形でのトリチウム放出が多く観察されている。試料A、C～Eでは、水素状で放出されたトリチウムは水状で放出されたトリチウムの4～6割程度である(短時間の空気に曝露した試料Bではほぼ同等)。また、ストロンチウム-セリウム系酸化物からのトリチウム放出に関する特徴として、水素状(T<sub>2</sub>、HT)での放出において、モリブデンと同様に複数の放出ピークが存在すること、また、その放出のピーク温度は、概してモリブデンで観察された放出ピーク温度よりも高く、第1ピークが約700～800Kで、第2ピークが約1000K近傍であることがあげられる。また、HTでは1300K以上の温度に存在すると考えられるピークが観察されている。一方、水状(T<sub>2</sub>O、HTO)でのトリチウム放出に関しても、複数の放出ピークが見受けられ、微量でながらかなピークが900K以下で観察された後、1100K近傍及び1300K以上の温度に存在すると考えられるピークが観察されている。以上の結果より、ストロンチウム-セリウム系酸化物中のトリチウムは、主として酸素と結合したOT基として存在していることが予想される。昇温脱離による水状トリチウムの放出ピーク温度が高い結果もこの強い結合の存在によるものと考えられる。一方、水素状でのトリチウムの放出に関しても放出ピーク温度がモリブデンに比べて高いという結果は、固溶状態のトリチウムとストロンチウム-セリウム酸化物との何らかの相互作用の存在を示唆している。

### 3.2.2 曝露条件の違いによる昇温脱離挙動の違い

空気曝露実験の結果より、空気気流中に放出されるトリチウム量は水蒸気濃度が高いほど多くなる傾向が観察され、また、そのほとんどが水状で放出されることが判明した。このときのトリチウム放出の機構は水蒸気と酸化物表面トリチウムとの同位体交換反応であることが推測される。ここで、Fig.12～16の結果より、昇温脱離実験によるトリチウム放出の化学形は、水蒸気雰囲気に曝露した時間が長ければ、水状での放出割合が高くなる傾向であることが判明している。空気曝露実験中のトリチウムの放出が、空気中の水蒸気との同位体交換反応に起因したとすれば、放出されたトリチウムの位置に軽水素が置換されているはずであり、昇温脱離による測定によって調査可能である。そこで、Fig.12～16に示す昇温脱離実験結果より得られたトリチウムの放出化学形のうち、水素状及び水状で放出されたトリチウムの化学形に占める軽水素とトリチウムとの比(H/T比)を空気曝露中の水蒸気濃度との関係についてまとめた結果がFig.18である。ここで、水蒸気濃度0.1、100、7600、及び21000ppmはそれぞれA、D、C、及びE試料を意味している。本図より、水素状で放出された場合のH/T比は水蒸気濃度に依存せずほぼ一定の値であるのに対し、水状放出分のH/T比は空気中水蒸気濃度の上昇と共に増加していることが分かる。これは、空気中の水蒸気との同位体交換反応が酸化物表面の水酸基(OT基)との交換であることを示唆している。一般に、材料表面の水酸基と気相の水蒸気との同位体交換反応は、表面の水素と気相中

の水蒸気との交換反応よりも速い反応であることが知られており、今回得られた空気曝露中のトリチウムの放出が材料表面水酸基と気相中水蒸気との同位体交換反応に起因するとの結果は、曝露実験中の空気曝露の初期に大部分のトリチウムが放出された結果と整合する。

ストロンチウム-セリウム系酸化物からのHTOとしてのトリチウム放出ピークは複数存在し、1つは800K近傍のわずかな放出ピークであり、その他は1000K近傍のピーク及び1300K近傍で鋭く立ち上がるピークである。今回の昇温脱離実験では最高温度を1300K以上に上げておらず、従って高温側のピーク温度はさらに高い温度であると推測される。一方、T<sub>2</sub>Oの放出に関しても、複数のトリチウム放出ピークの存在が確認され、それぞれのピーク温度がHTOで観察された温度より若干低い傾向が認められた。これは、ストロンチウム-セリウム酸化物中のトリチウム及び軽水素の水酸基(OT及びOH基)の拡散もしくは結合エネルギー等の同位体効果、あるいはHTOとT<sub>2</sub>Oの存在位置の違い等に起因しているものと推測される。近年の著者らによるタンゲステンやニッケルのような金属材料中のトリチウムの拡散挙動に関する研究の結果、トリチウムの拡散係数が重水素のそれよりも大きい可能性を報告しており<sup>2,15)</sup>、今回観察されたトリチウムが低い放出ピークを示す結果は、ストロンチウム-セリウム系酸化物中のトリチウムの拡散に関しても金属と同く、トリチウムの拡散が重水素より大きい可能性を示唆するものである。

### 3.3 残留トリチウム挙動

昇温脱離実験後のA、C、及びモリブデンの各試料を浸出用純水中に浸し、水中に溶出したトリチウム量を定期的に測定してまとめたのがFig.19である。本図より、昇温脱離後のモリブデンからのトリチウムの溶出はほとんど無く、1300Kまでの昇温脱離によりモリブデン中に注入したトリチウムはほとんど放出されたと推測される。一方、ストロンチウム-セリウム系酸化物の場合には、約15MBqのトリチウムが残留しており、これは、試料への注入量約7.4GBqの約0.2%である。このように1300Kまでの昇温脱離後も試料内にトリチウムが残留しているという結果と、昇温脱離実験において観察された水状トリチウムの放出ピークが1300K以上の温度にあると推測される結果より、ストロンチウム-セリウム系酸化物の場合、1300Kの加熱では完全にはトリチウムを放出しきれないことが示唆される。

## 4. 考察

### 4.1. 空気曝露によるトリチウム放出機構

空気曝露実験及び昇温脱離実験の結果より、ストロンチウム-セリウム系酸化物に注入したトリチウムの空気曝露時の放出は、水蒸気中の軽水素と材料表面のOT基との同位体交換反応であると推測した。ここで、空気曝露中の軽水蒸気とトリチウムの同位体交換反応は、



で表される。ここで、 $k_1$ は反応定数である。また、括弧内のgas、sol.はそれぞれ気相、固相内を意味する。(1)式の放出過程の模式図をFig.20(a)に示す。

ここで、(1)式の反応速度式は、

$$[HTO(gas)] = k_1 \frac{[H_2O(gas)][OT(sol.)]}{[OH(sol.)]} \quad (2)$$

$$[HTO(gas)] \propto [H_2O(gas)] \quad (3)$$

のように表され、トリチウム放出量は水蒸気濃度と比例関係にあり、水蒸気濃度が 7600ppm 以上の高水蒸気濃度条件の領域で得た実験結果と一致する。また、反応定数  $k_1$  に関しては一般に大きな反応定数を有していることが知られており<sup>16)</sup>、曝露初期に 50% 以上のトリチウムが放出された結果とも整合する。

一方、空気曝露時におけるトリチウムの水素状での放出に関しては、水に比べわずかな放出量であったものの、水蒸気濃度の約 1/2 乗に比例する結果であった。また、昇温脱離実験結果より、水蒸気濃度に対する水素状放出の H/T 比に顕著な違いが認められなかった。これらの結果を満足しうる放出機構を Fig.20(b) に示す。ここで、(b) の放出機構は、空気中の水蒸気が酸化物表面で OH 基と H 基に解離し、H 基が酸化物中の T と結合して HT として放出される機構と、もう一方の解離した OH 基が酸素欠損<sup>17)</sup>の酸化物により酸素が引き抜かれ、残った H 基が酸化物内のトリチウムとの結合により HT として放出される機構である。それぞれの放出機構は、水の解離プロセスが、



で表される。ここで、 $k_2$  は(4)式の反応定数である。また、括弧内の ads. は酸化物表面に吸着していることを意味する。

ここで、H 基に起因するトリチウム放出では、



で表さる。一方、OH 基に起因するトリチウム放出機構は、



で表され、(6)式中の吸着 H 基と T と同位体交換反応は(5)式に従う。ここで、 $k_3$  及び  $k_4$  はそれぞれ(5)、(6)式の反応定数である。

(4)～(6)式の反応速度式は、それぞれ、

$$[OH(ads)][H(ads)] = k_2[H_2O(gas)] \quad (7)$$

$$[HT(gas)] = k_3[H(ads)][T(sol)] \quad (8)$$

$$[H(ads)][O(sol)] = k_4[OH(ads)] \quad (9)$$

で表され、(7)～(9)式より、このときの反応速度式は、

$$[HT(gas)]^2 = \frac{k_2 k_3^2}{k_4} \frac{[H_2O(gas)][T(sol.)]^2}{[O(sol.)]} \quad (10)$$

で表される。また、(10)式より、HT と水蒸気濃度の関係は、

$$[HT(gas)] \propto [H_2O(gas)]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

となり、トリチウム放出量は水蒸気濃度の 1/2 乗に比例する形になる。今回測定された水蒸気トリチウム水蒸気濃度依存のべき乗が約 0.5 であるという結果は、(11)式から予測される結果に一致している。また、(5)式の反応は溶解トリチウムと軽水素との同位体交換反応に起因したトリチウム放出では無いため、水蒸気曝露によるトリチウム放出と共に水蒸気中の軽水素がトリチウムに入れ替わって酸化物内に取り込まれることがなく、Fig.18 に示した昇温脱離実験におけるトリチウムの水素状放出時の H/T 比が変わらないという結果を満足するものである。また、今回考察したトリチウム放出モデルでは、空気流中曝露における主要な放出プロセスである水状でのトリチウム放出((1)式)は、試料中の水酸基のトリチウムに起因し、また、わずかに観察された水素状の放出((5)式)は試料中の溶解状態のトリチウムに起因している。本結果は、昇温脱離実験結果から得られた試料中のトリチウムが主として水酸基として存在しており、一方、少量のトリチウムが溶解状態で存在しているとの結果(Fig.12~16)と一致するものである。

以上、水蒸気を含む空気流中でのトリチウム放出は、水形での放出では酸化物表面のトリチウム水酸基(OT)と気相中の水蒸気との同位体交換が主であることを明らかとした。一方、水蒸気曝露によるトリチウムの水素状での放出に関しては、水状での放出に比べわずかであるもののその存在が確認され、その機構として、酸化物表面で水蒸気が解離することにより生成された水酸基及び吸着水素と溶解トリチウムとの相互作用に酸化物中の酸素欠損への酸素原子の引き抜き現象を考慮することにより説明が可能であることを示した。

#### 4.2 核融合材料からのトリチウム除去方法に関する課題

以上の議論から、金属であるモリブデン中にイオンとして注入したトリチウムが固溶状態で存在しているのに対し、ストロンチウム-セリウム系酸化物中に打ち込まれたトリチウムでは、酸化物中の酸素と結合し OT 基を形成している可能性が強いことが推測される。モリブデン中のトリチウムの存在状態に関しては、今までの金属材料に対する軽水素、重水素の注入実験に関する報告例と比較してもほぼ妥当であることが分かる<sup>3,4,18,19)</sup>。一方、酸化物からの水素同位体の放出化学形に関しては、リチウム系酸化物材料への中性子照射による核反応により材料中に生成されたトリチウムの放出の化学形は水であるという報告<sup>7)</sup>があり、酸化物中におけるトリチウムは酸素と結合していることが推測できる。今回実験を行ったストロンチウム-セリウム系酸化物等のプロトン導電体に関しては、近年の研究において、水素同位体輸送には導電体内部における OH 基が主要な役割を担っていることが明らかになってきており<sup>20)</sup>、今回実験を行ったストロンチウム-セリウム系酸化物に注入されたトリチウムは主として OT 基を形成して存在している。従って、大部分のトリチウムは酸素と強く結合しているため、トリチウムを除去するためには、昇温脱離実験で認められよう 1300K 以上の加熱が必要となる。しかし、今回わずかながら観察されたように、酸化物中に溶解状態のトリチウムが存在する場合には、より低い温度での回収が可能であり、なおかつ、水蒸気曝露によっても水素状で放出されることが推測される。従って、酸化物中のトリチウムの存在状態を溶解状態に制御できれば、トリチウムを水素の形で回収できること

になり、トリチウム回収を行う上でコスト的にも安全上の観点からも魅力的である。

核融合炉で使用される酸化物材料は、トリチウム回収システムのストロンチウム-セリウム系酸化物の他、絶縁材や計測用の窓材等としてアルミナ( $Al_2O_3$ )、石英( $SiO_2$ )、サファイア( $Al_2O_3$ )等が想定される。これらトリチウムで汚染した酸化物材料の効率的かつ安全なトリチウム除染を考えていく上で、酸化物中のトリチウムの存在状態を把握すること、もしくは、その存在状態を制御する手法の志向は、今後の重要な課題の1つであると考えられる。

## 5. まとめ

核融合炉材料からのトリチウム除去回収に関する研究の一環として、核融合開発分野でトリチウム回収システムへの応用研究が進められているストロンチウム-セリウム酸化物セラミックスプロトン導電体にトリチウムを注入し、試料中におけるトリチウムの存在状態及び空気気流中に曝露した場合のトリチウム除去挙動について、それぞれ、等速昇温脱離法と空気気流中トリチウム捕集法により調べた。

等速昇温脱離法によるトリチウムの存在状態測定では、注入されたトリチウムは、その多くが酸素と結合した水酸基の状態で強い結合を有して存在していることを明らかとし、試料からのトリチウムの全量を除去するには、1300K以上の加熱が必要であることを示した。一方、空気気流中に曝露した場合のトリチウム除去挙動に関しては、水蒸気濃度が異なる空気気流中に24時間の曝露を行い、その時のトリチウム除去特性および放出トリチウムの化学形の測定を行った。この結果、最も高いトリチウム除去率を示した水蒸気濃度21000ppmの場合でも、試料中トリチウムの数%程度しか除去されず、そのほとんどが、試料表層のOT基と空気中の水蒸気との同位体交換反応により水状として放出されるトリチウムであることを明らかにした。また、酸化物中の溶解トリチウムと酸素欠損への酸素の引き抜き現象に起因すると推測される水蒸気曝露下での水素状でのトリチウム放出もわずかながら確認された。以上の結果、酸化物中における存在状態の違いによる空気曝露時のトリチウム除去機構の違いを明らかにし、トリチウム除去法の最適化のための基礎データを得た。

## 謝 辞

本研究を行う上で、日頃より激励いただいております関昌弘核融合工学部長、辻博史次長に感謝いたします。関省吾研究主幹、高津英幸次長には日頃からの激励に加え、本論文に関する貴重な助言をいただきました。深く感謝致します。本論文の閲読を引き受けて頂き、貴重な助言を頂きました榎枝幹主任研究員に厚く感謝致します。また、本研究を行う上でご協力頂きました林巧主任研究員をはじめとするトリチウム工学研究室の皆様に感謝いたします。

## 参考文献

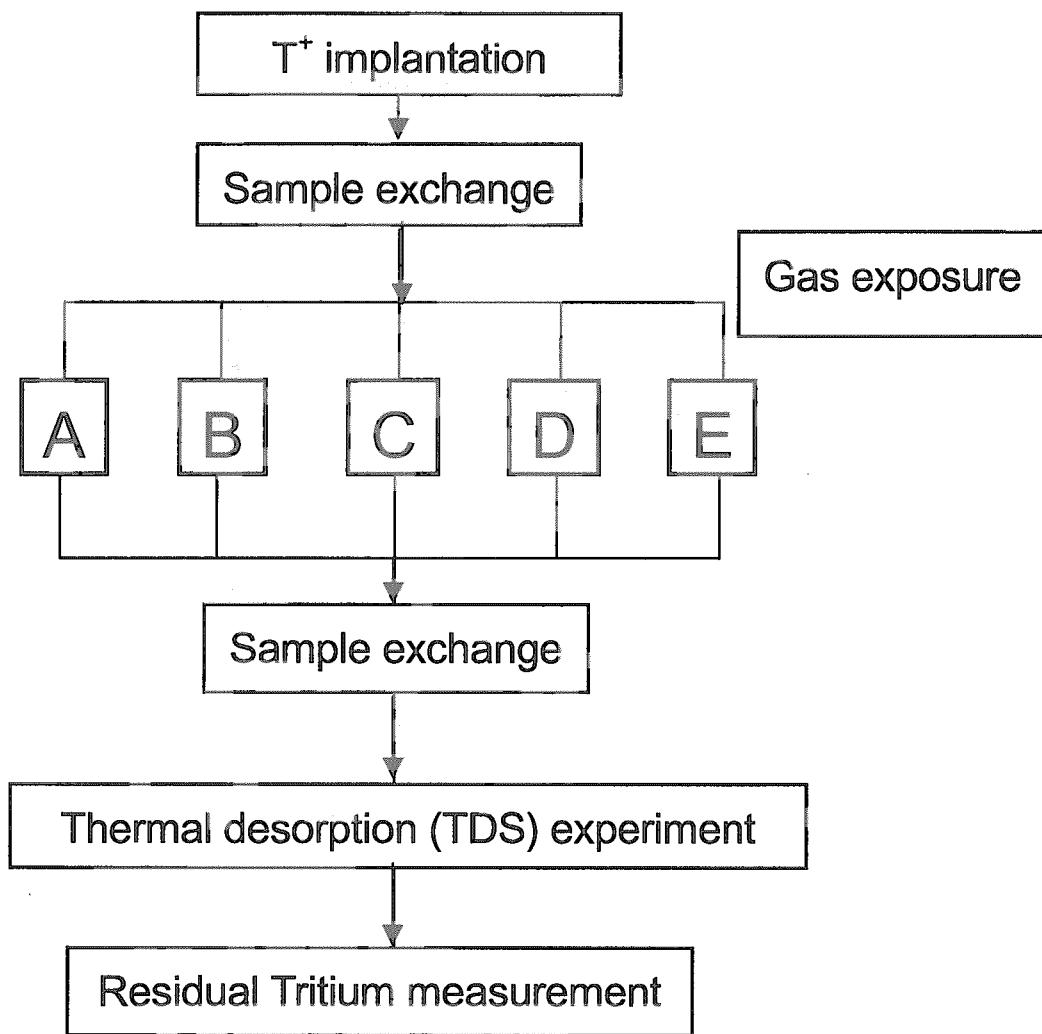
- 1) Kalinin G., Barabash V., Fabritsiev S., Kawamura H., Mazul I., Ulrickson M., Wu C. and Zinkle S.: Fusion Eng. Des. 55 231 (2001)
- 2) Nakamura, H., Hayashi, T., Kakuta, Suzuki, T. and Nishi, M.: J. Nucl. Mater. 297, 285-291 (2001).
- 3) Nakamura, H., O'hira, S., Nishi, M., Venhaus, T., Causey, R., et al.: Proc. 18th IEEE/NPSS SOFE99, pp271 (2000)
- 4) O'hira, S., Steiner, A., Nakamura, H., Causey, R. et al.: J. Nucl. Mater., 258-263, 990 (1998).
- 5) Tadokoro, T., O'hira, S., Nishi, M. and Isobe K.: J. Nucl. Mater., 258-263 1092 (1988).
- 6) Iguchi, K., Morimoto, Y., Sugiyama, Y., Akahori, S., Okuno, K., et al.: Fusion Technol., 39, 905 (2001).
- 7) Kudo, H., Okuno K. and O'hira S.: J. Nucl. Mater., 155-157 524 (1988).
- 8) Tsuchiya, B., Iizuka, E., Soda, K., Morita, K. and Iwahara, H.: J. Nucl. Mater., 258-263 555 (1988).
- 9) Hayashi, T., Horioka, T., Iizuka, E., Soda, K. and Morita, K.: Application of Accelerators in Research and Industry, edited by Duggan, J. L. and Morgan, I. L., pp529 (1999).
- 10) Iizuka, E., Horikawa, T., Tsuchiya, B., Soda, Kazuo, Morita, K. et al.: JAERI-Conf 98-006 pp108 (1998).
- 11) Kakuta, T., Konishi, S., Kawamura, Y., Suzuki, T. and Nishi, M.: Fusion Technol., 39, 1083 (2001).
- 12) Okuno, K., O'hira, S., Yoshida, H., Naruse, Y., et al.: Fusion Technol. 14 713 (1988).
- 13) Isoya A.: Helva. Phys. Acta. 59, 632 (1986).
- 14) Naruse, Y., Matsuda, Y. and Tanaka, K.: Fusion Eng. Des., 12 293 (1990).
- 15) H. Nakamura, W. Shu, T. Hayashi and M. Nishi, J. Nucl. Mater., 313-316, 675-678 (2003).
- 16) 日本化学会編: 化学便覧第2版 p48(1975).
- 17) 山村博, 岩原弘育: 材料開発における結晶格子欠陥とその応用, アイピーシー (2002)
- 18) Okada, M., Sato, R., Yamaguchi, K. and Yamawaki, M.: J. Nucl. Mater., 248 72 (1997).
- 19) Anderl, R. A., Pawelko, R. J. and Schetz, S. T.: J. Nucl. Mater., 290-293 38 (2001).
- 20) Glerup M., Poulsen F. W. and Berg R. W.: Solid State Ionics 148 83 (2002).

Table 1 Results of total tritium release amount by the gas flow exposure

Sample	HTO	HT	total
B	-	-	$2.2 \times 10^7$
C	$6.4 \times 10^7$	$6.1 \times 10^6$	$7.0 \times 10^7$
D	$3.6 \times 10^7$	$5.7 \times 10^5$	$3.6 \times 10^7$
E	$2.5 \times 10^8$	$1.2 \times 10^7$	$2.6 \times 10^8$

Table 2 Result of tritium release by the air exposure (Sample C)

time	Chemical form		Sample C (7600ppm vapor Air)
	HTO (Bq)	HT (Bq)	
0-3 hrs	$4.30 \times 10^7$	$1.29 \times 10^6$	
3-6 hrs	$8.10 \times 10^6$	$3.60 \times 10^6$	
6-12 hrs	$5.26 \times 10^6$	$9.14 \times 10^5$	
12-24 hrs	$7.81 \times 10^6$	$2.56 \times 10^5$	
Sub total	$6.42 \times 10^7$	$6.06 \times 10^6$	
Total	$7.03 \times 10^7$		



- A: No exposure
- B: short time exposure to air  
(~7600ppm vapor)
- C: 24 hr exposure to air  
(~7600ppm vapor)
- D: 24 hr exposure dry air  
(<100ppm vapor)
- E: 24 hr exposure to wet air  
(21000ppm vapor)

Fig.1. Experimental procedure of the tritium exchange reaction with vapor

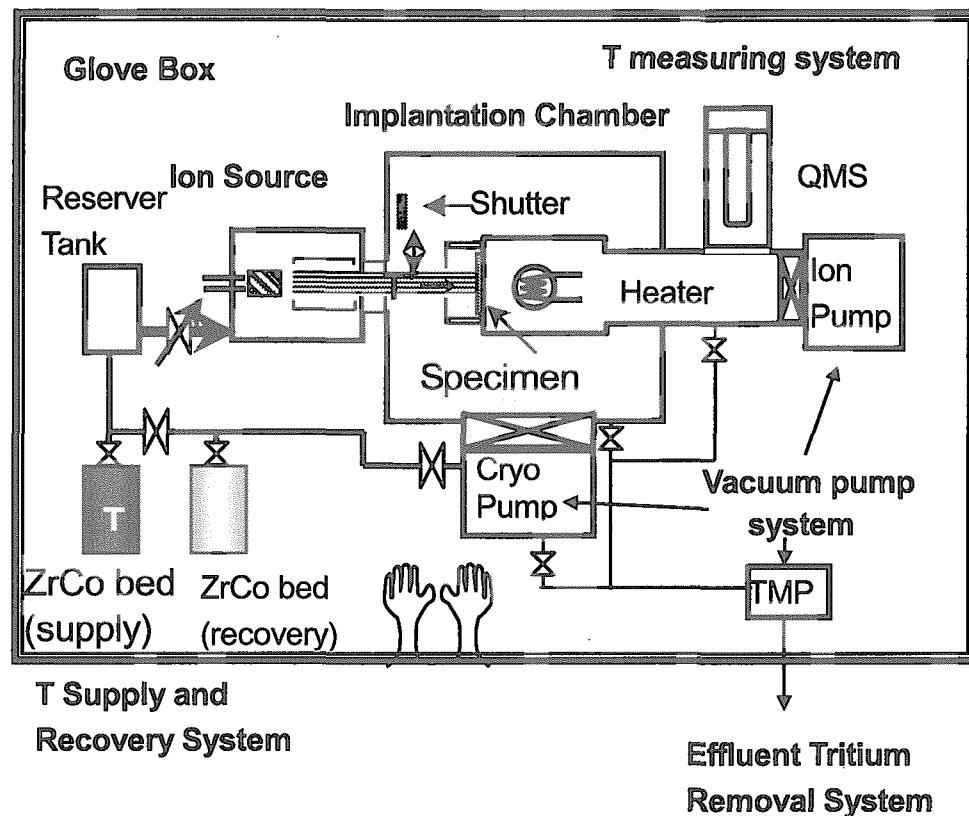


Fig.2. Conceptual drawing of Tritium Permeation Apparatus (TPA)

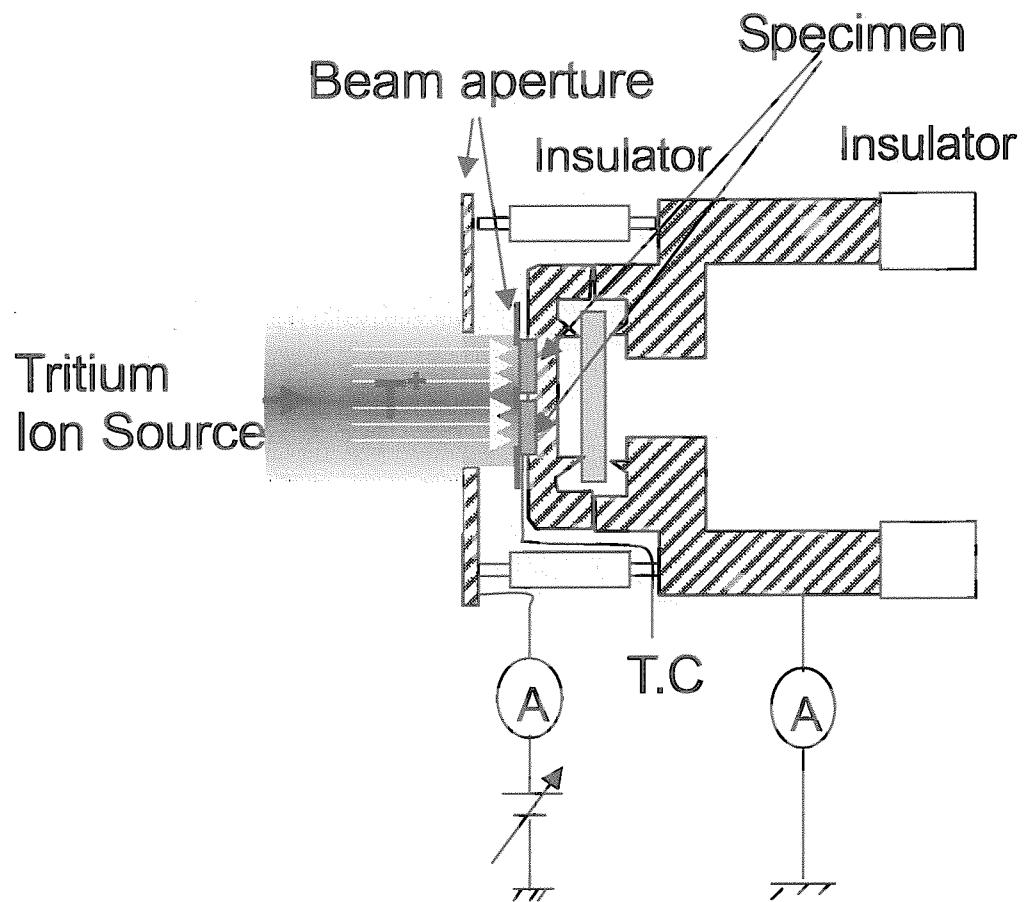


Fig. 3. Sample holder for the tritium ion implantation

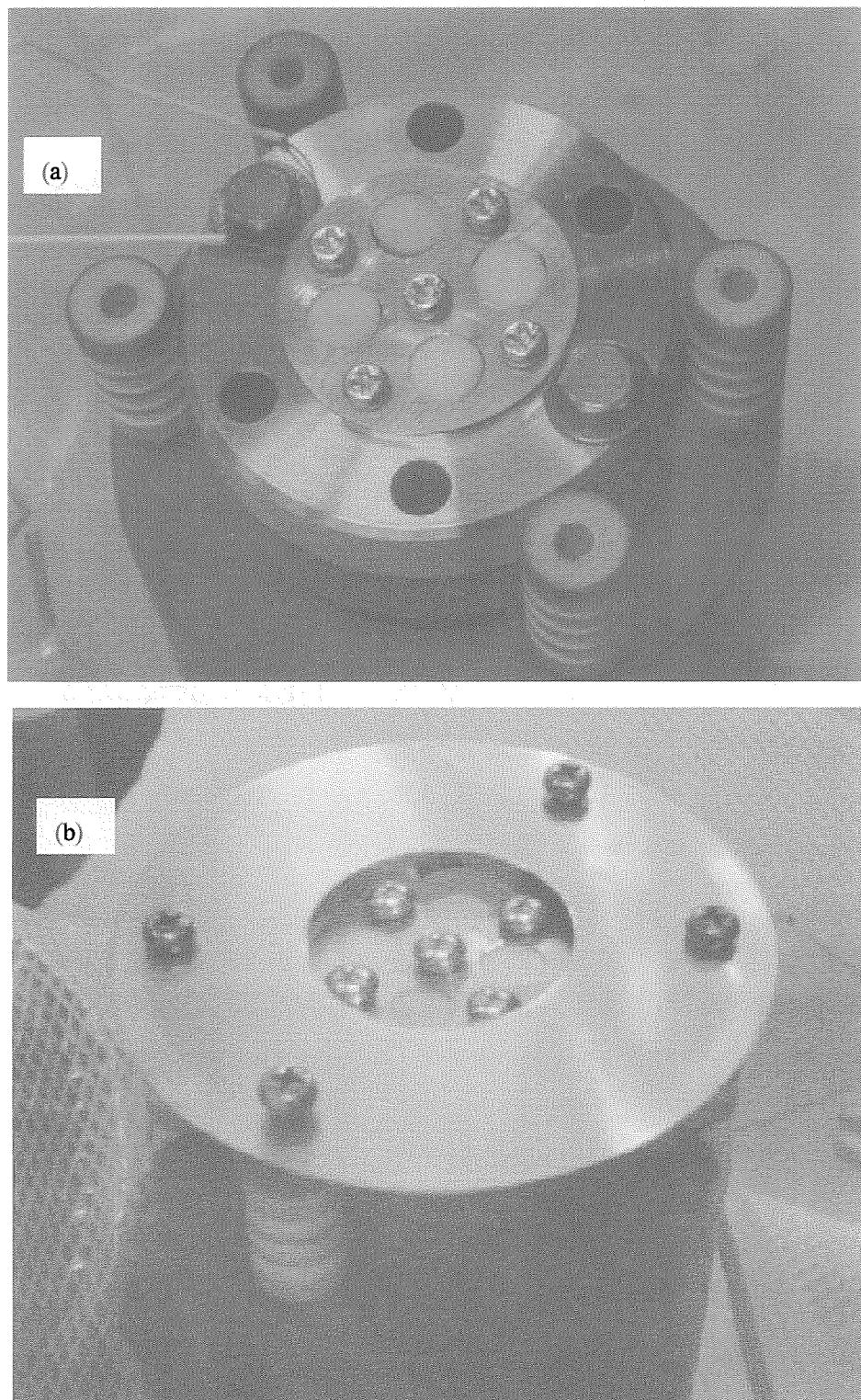


Fig. 4. Photographs of the sample holder for the tritium ion implantation.  
Four samples are installed on the sample holder  
(a) Sample holder without a beam aperture, (b) View with a beam aperture

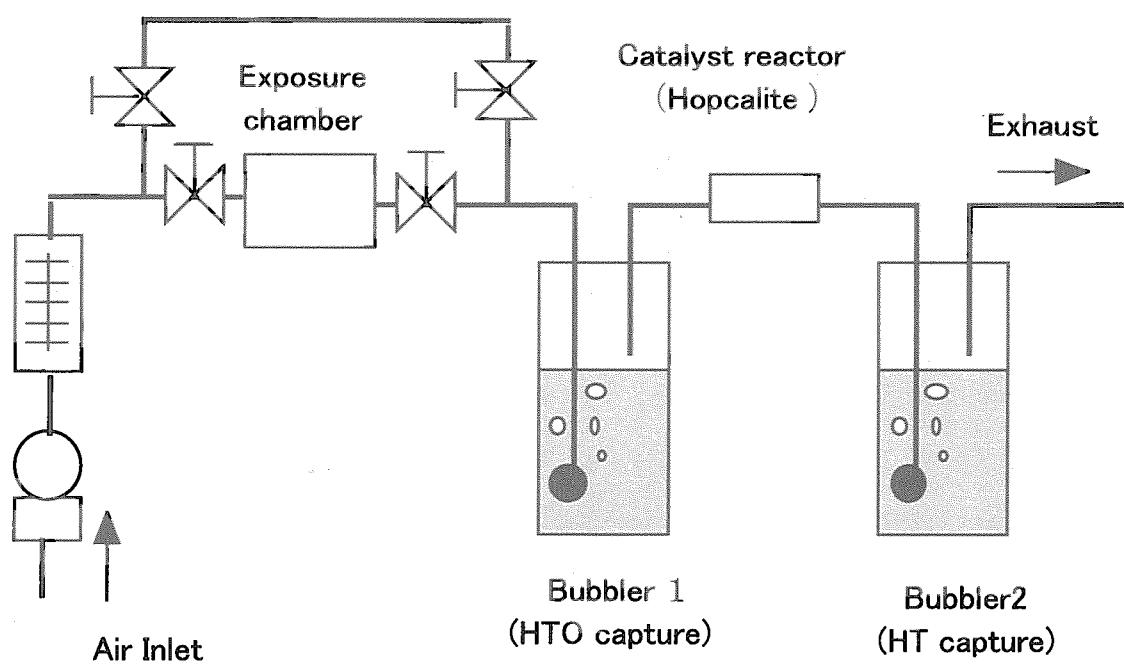


Fig. 5. Flow diagram of the apparatus for air exposure

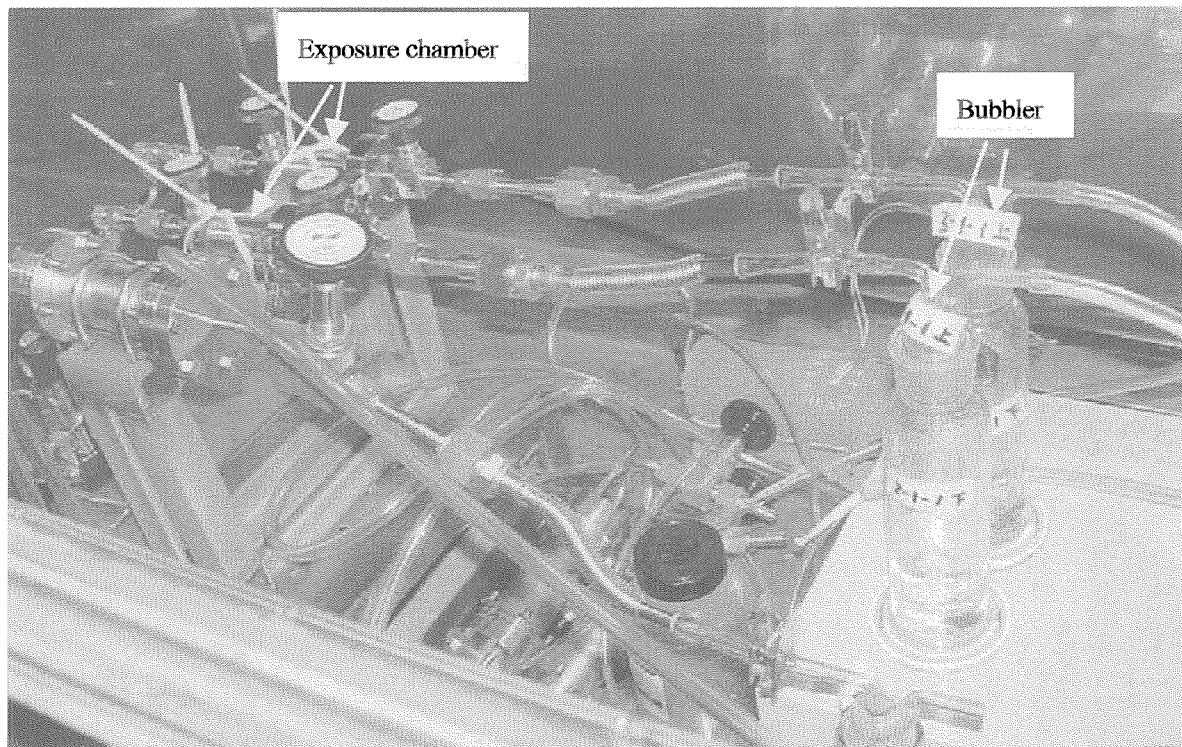


Fig. 6. Photograph of the apparatus for air exposure

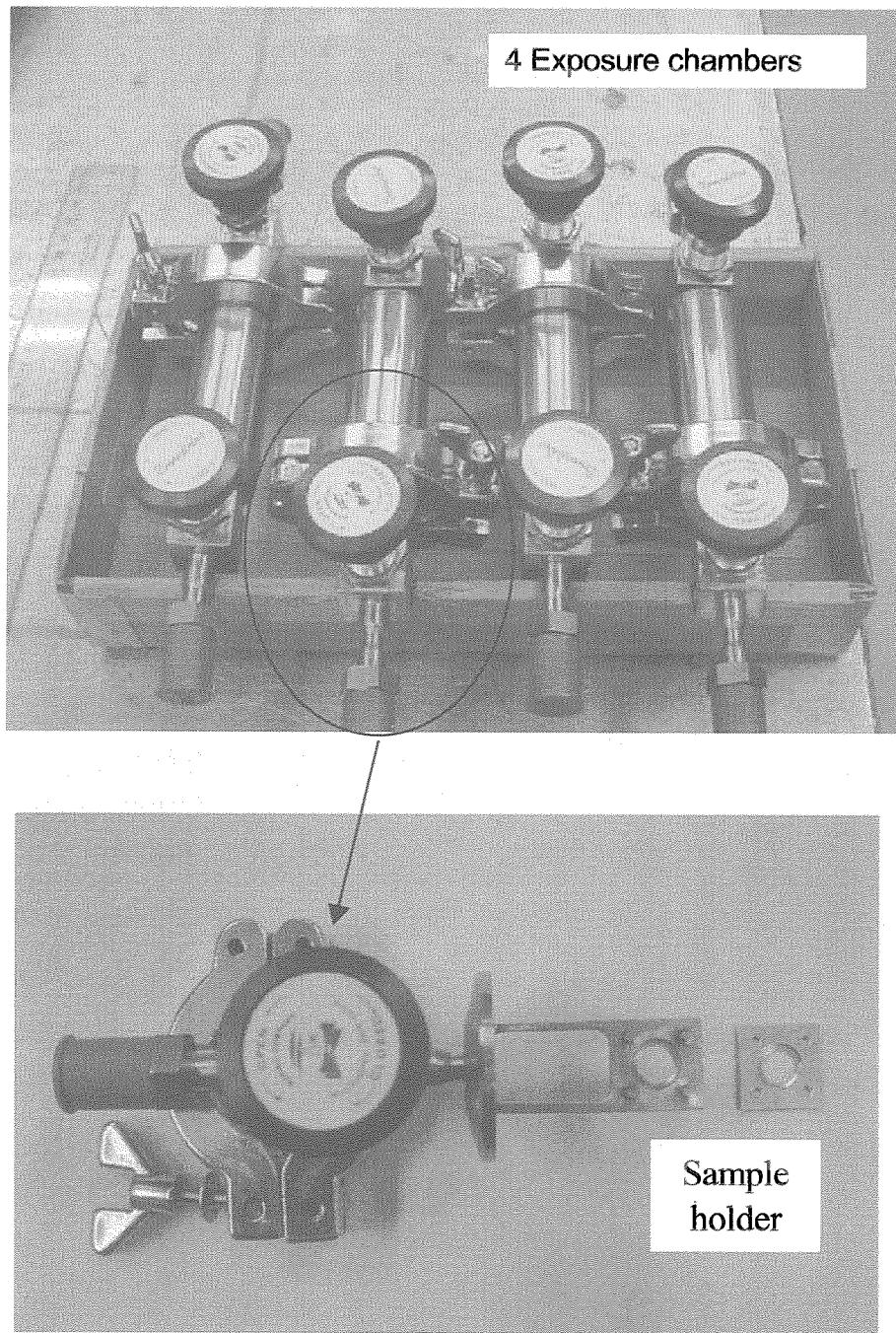


Fig. 7. Photographs of Exposure chamber for air exposure (upper photograph) and a sample holder (lower photograph)

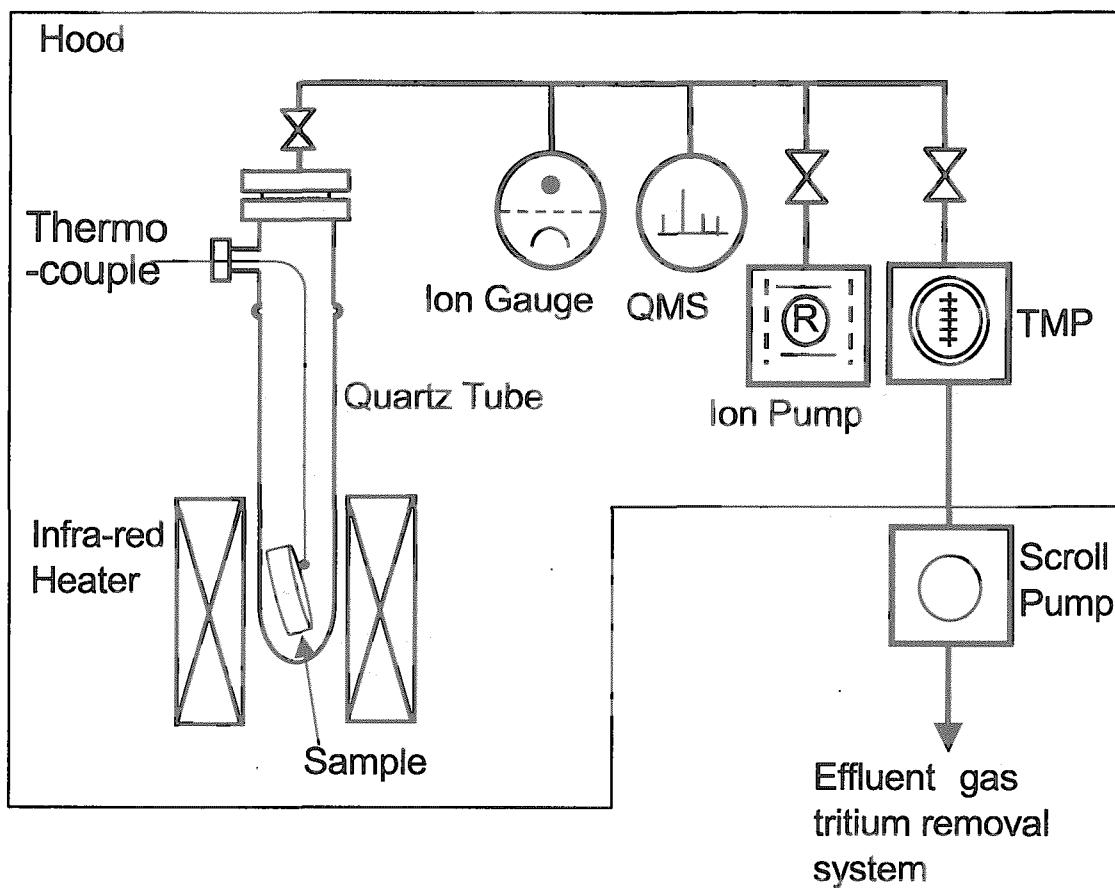


Fig.8. Flow diagram of the thermal desorption (TDS) experimental apparatus

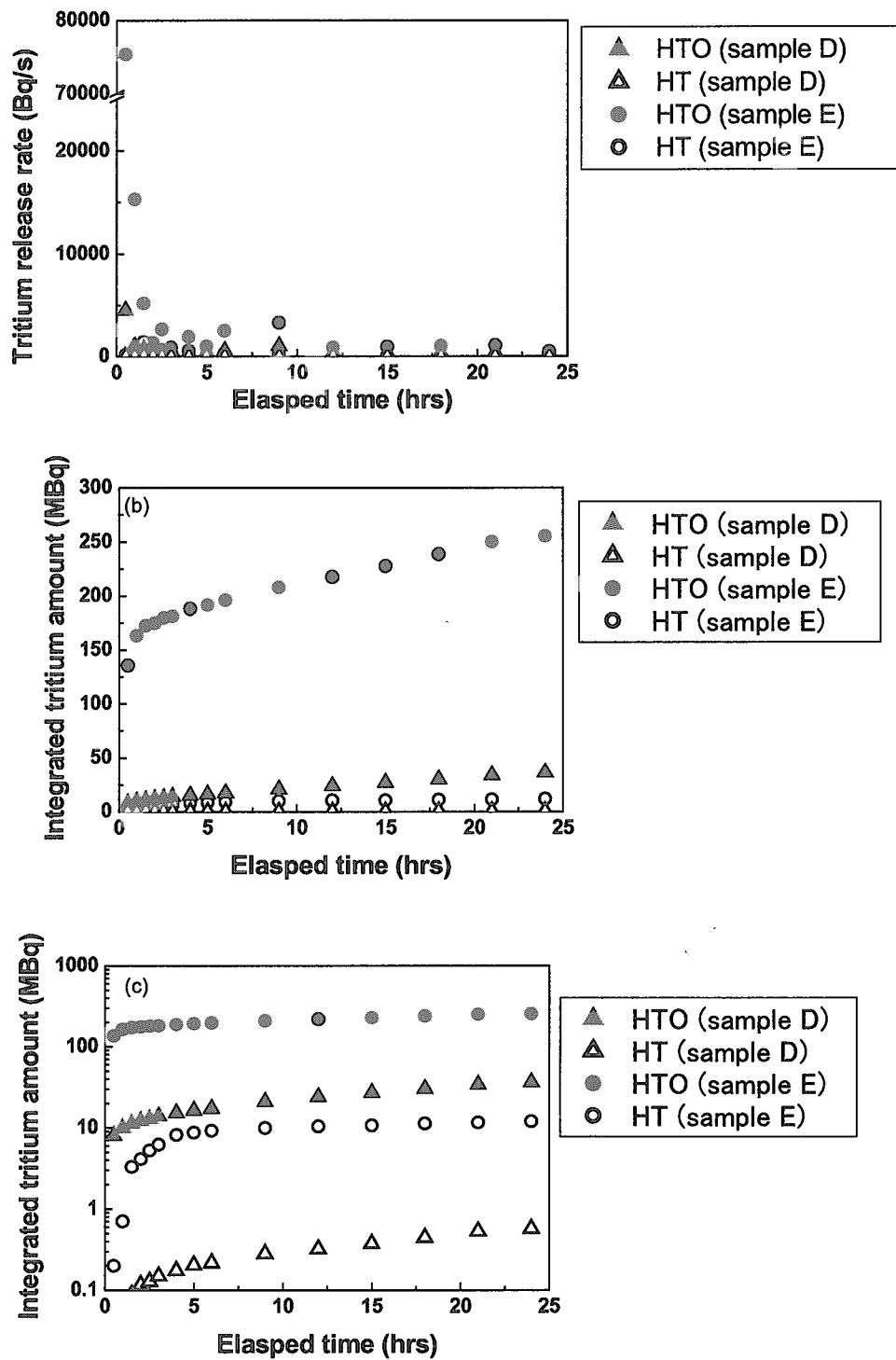


Fig. 9. Tritium release behavior during humid and dry air exposure

- (a) Tritium amount collected by bubbler
- (b) Integrated tritium amount (linear scale)
- (c) Integrated tritium amount (log scale)

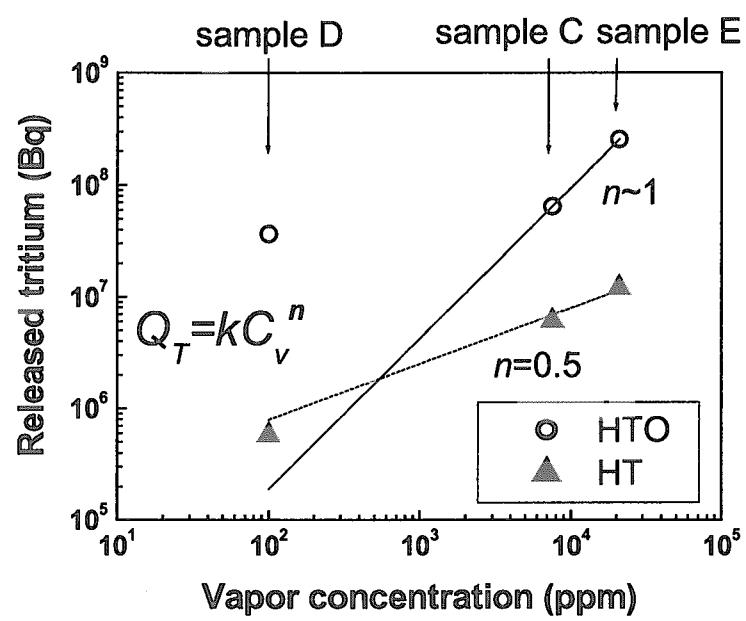


Fig. 10. Vapor concentration dependence of released tritium from  $T^+$  implanted Sr-Ce oxide by air exposure  
 $Q_T$ : Released tritium amount,  $C_v$ : Vapor concentration,  $k$ : Constant

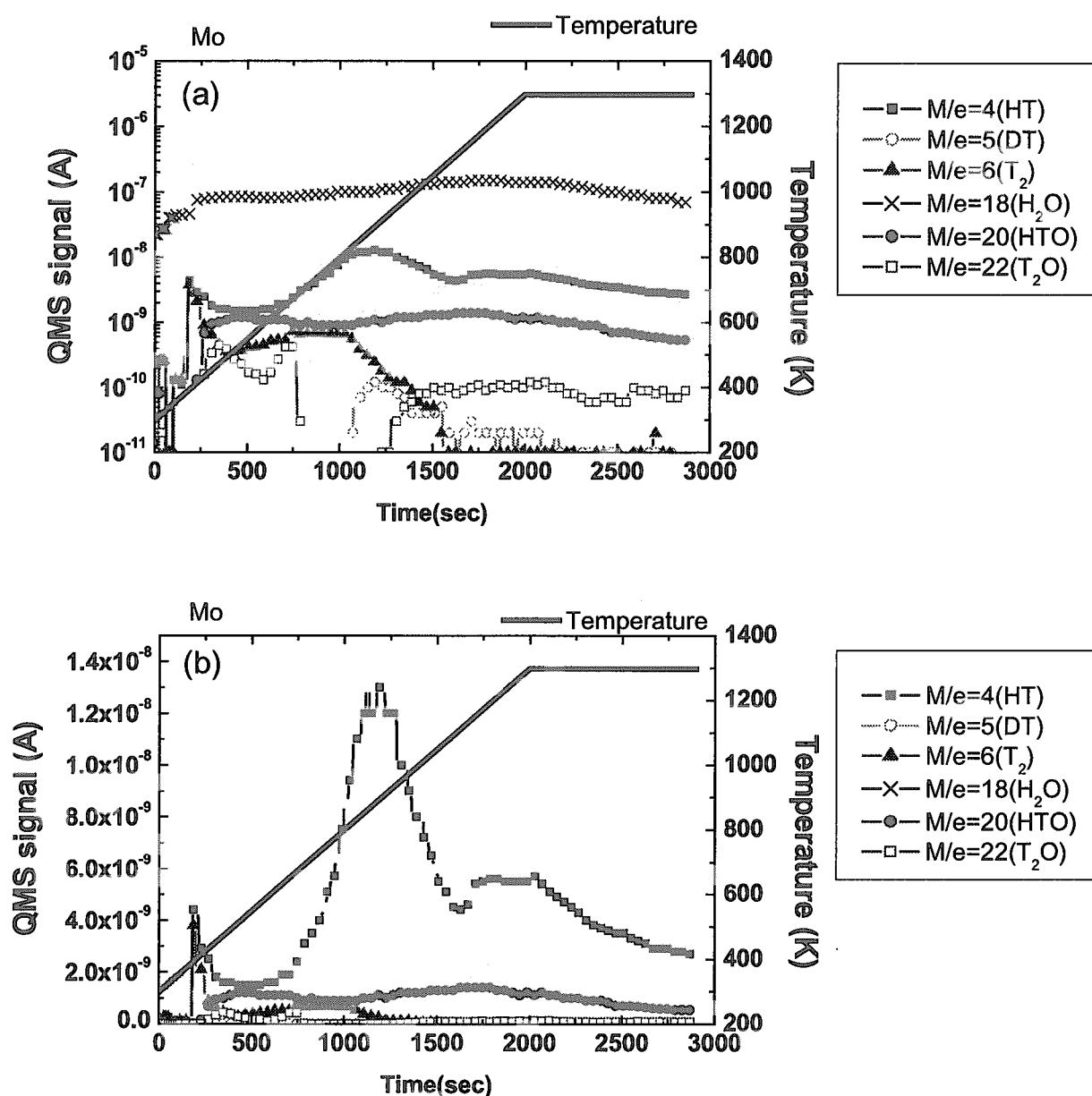


Fig. 11. Results of the TDS of Mo  
(TDS of Mo after  $T^+$  implanted sample)  
(a) log scale, (b) linear scale

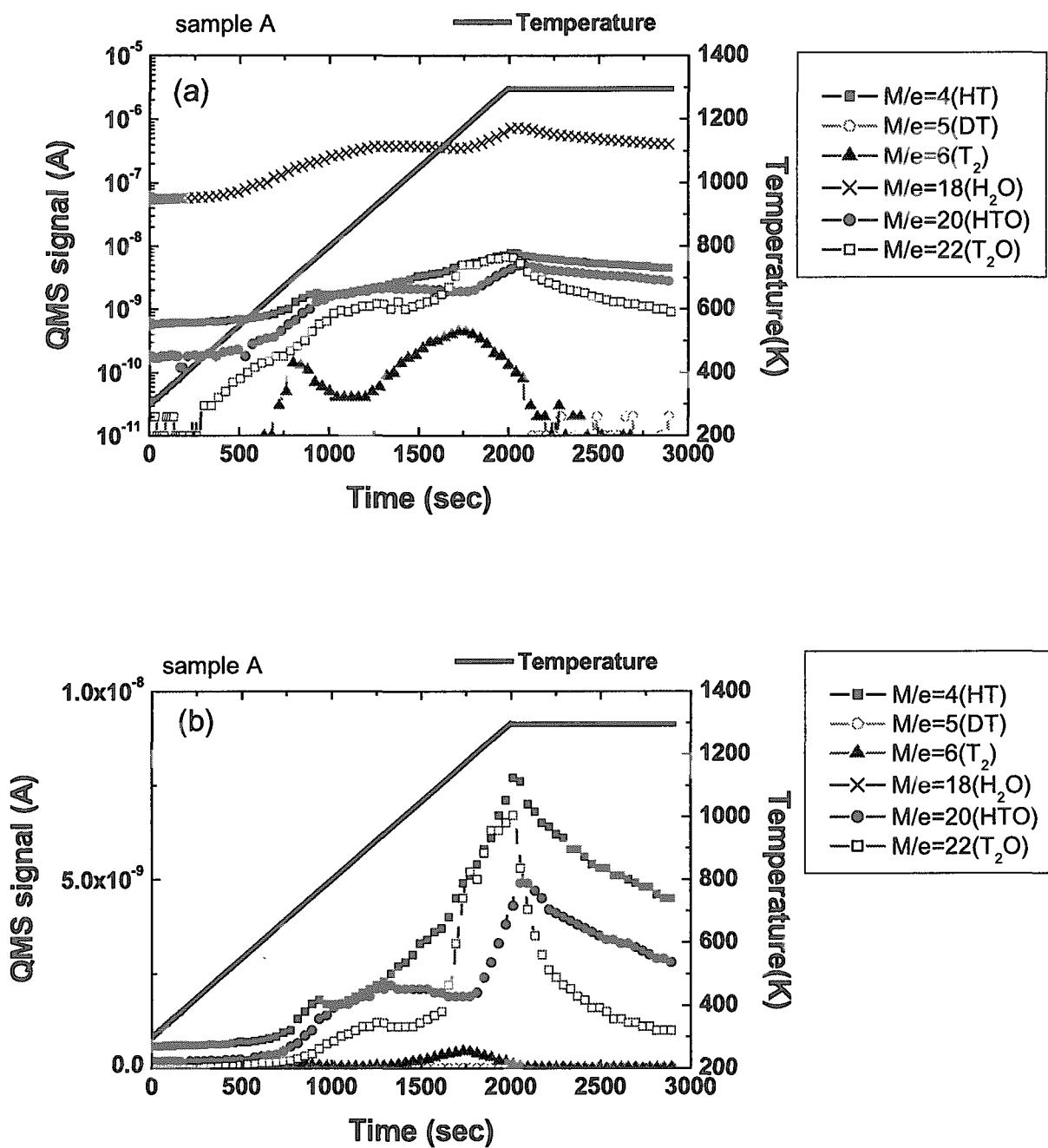


Fig. 12. Results of the TDS of sample A  
(TDS without air exposure after  $T^+$  implantation)  
(a) log scale, (b) linear scale

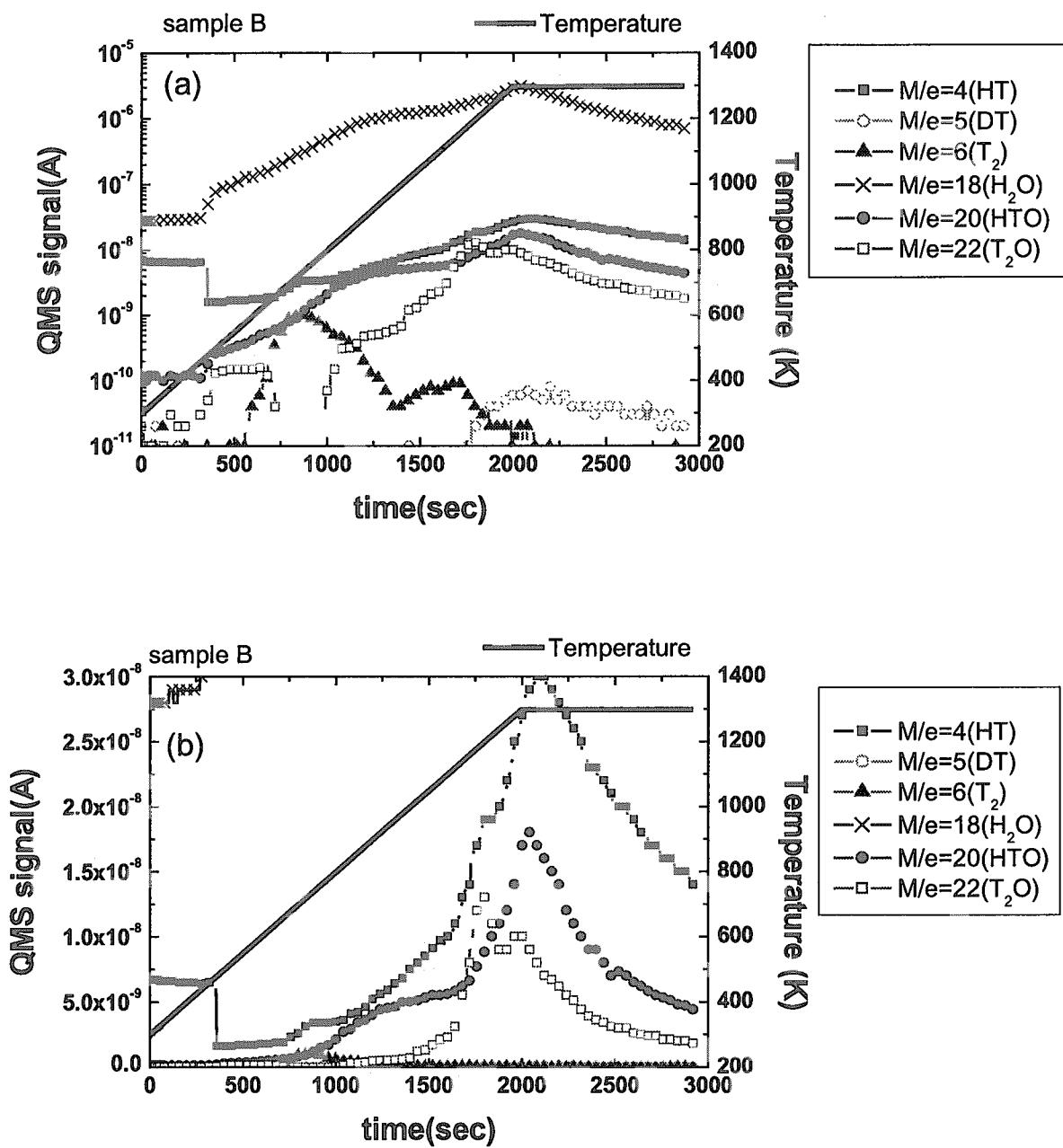


Fig. 13. Results of the TDS of sample B  
(TDS after short time air exposure of  $\text{T}^+$  implanted sample)  
(a) log scale, (b) linear scale

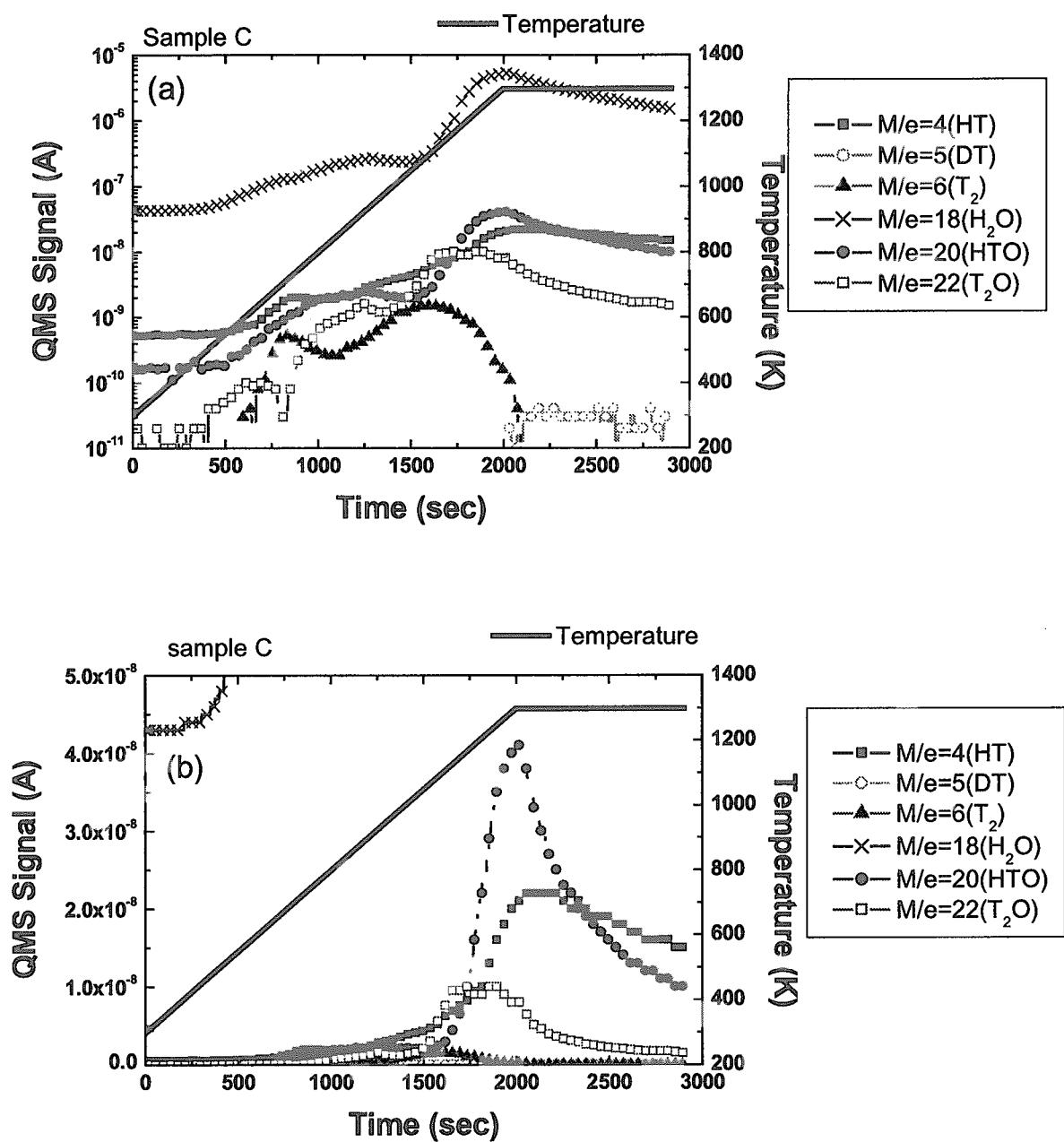


Fig. 14. Results of the TDS of sample C  
(TDS after 24 hr air exposure (7600ppm) of  $T^+$  implanted sample)  
(a) log scale, (b) linear scale

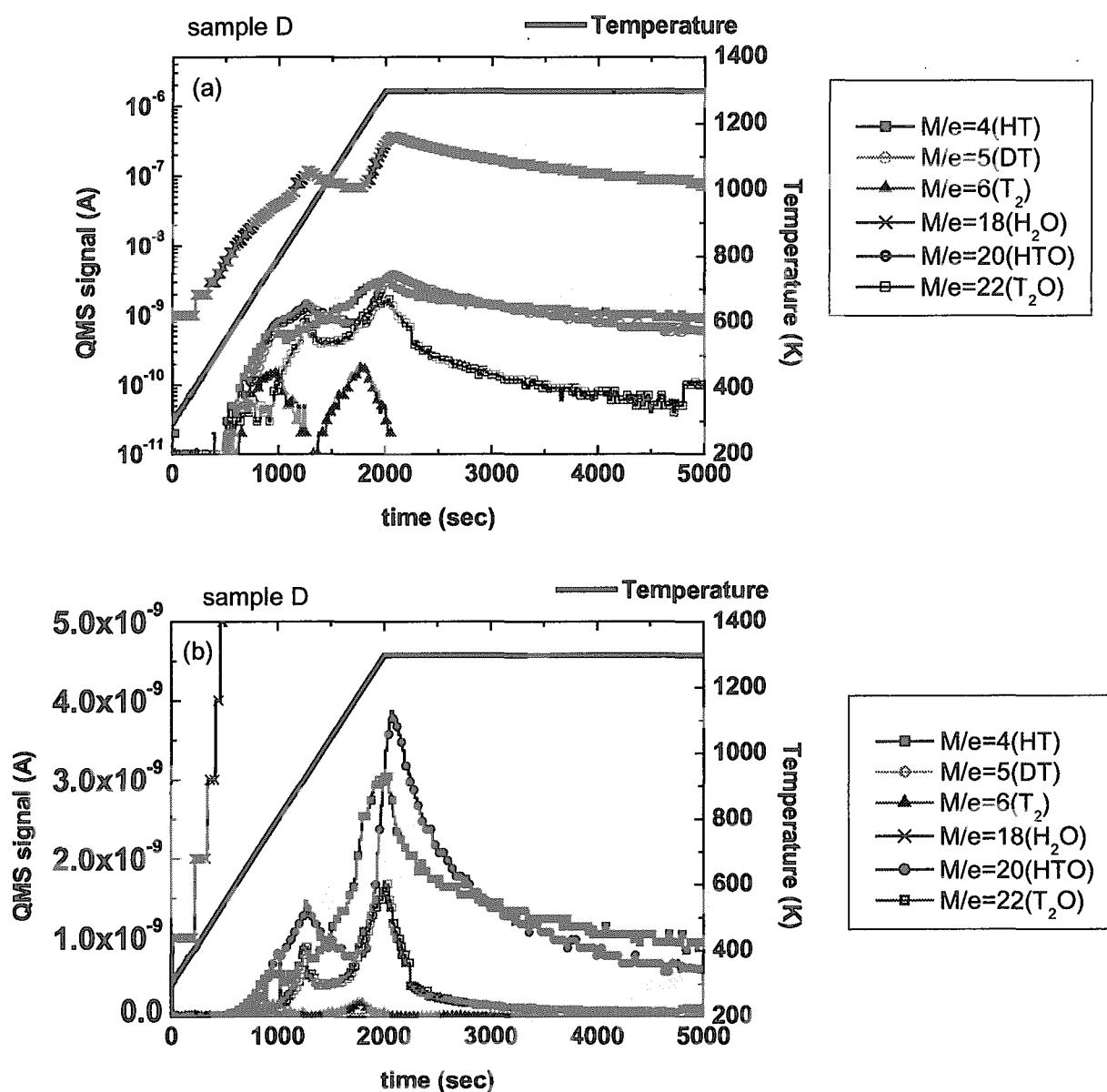


Fig. 15. Results of the TDS of sample D  
(TDS after 24 hr dry air exposure (~100ppm) of  $T^+$  implanted sample)  
(a) log scale, (b) linear scale

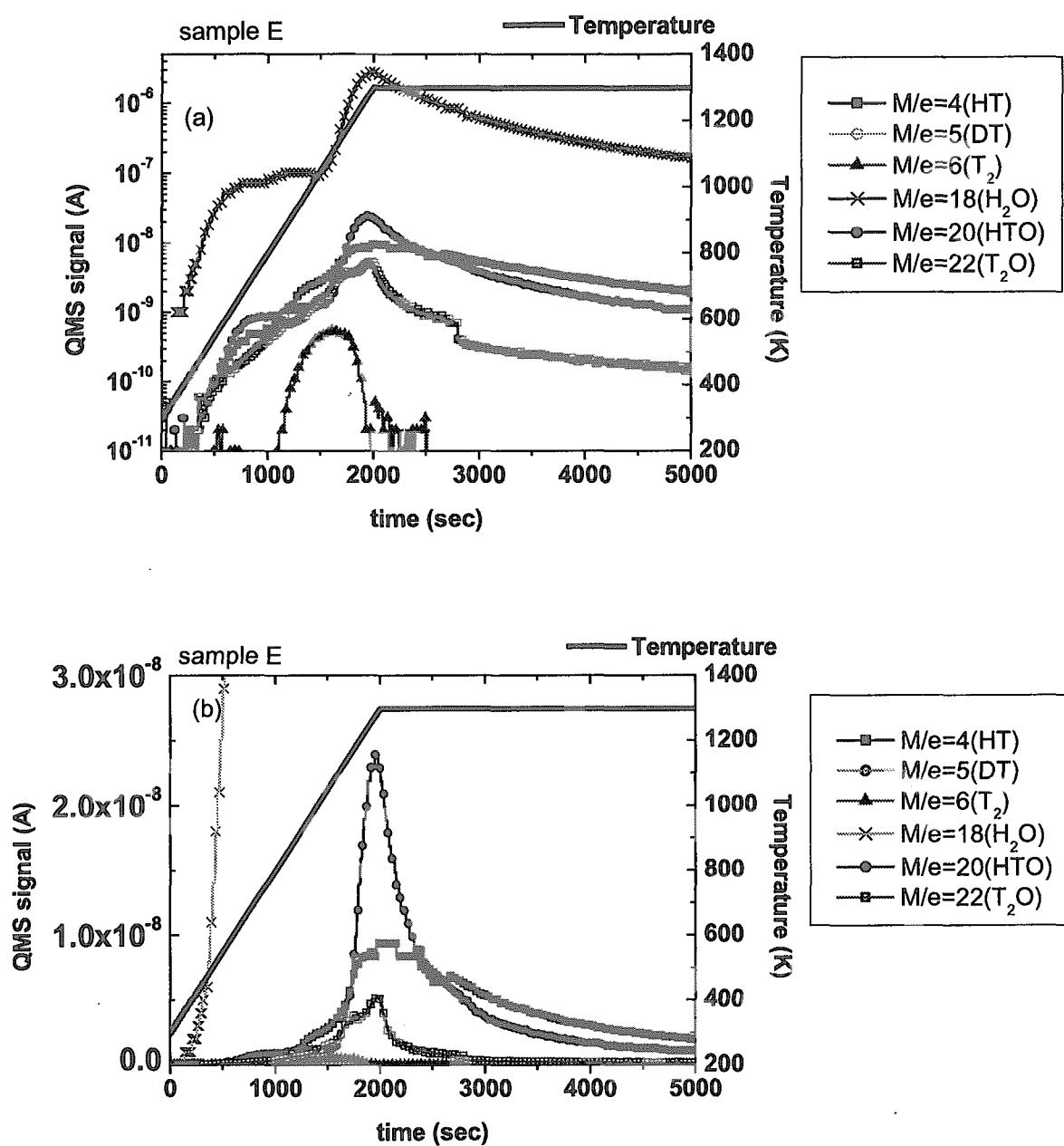


Fig. 16. Results of the TDS of sample E  
(TDS after 24 hr wet air exposure (2100ppm) of  $T^+$  implanted sample)  
(a) log scale, (b) linear scale

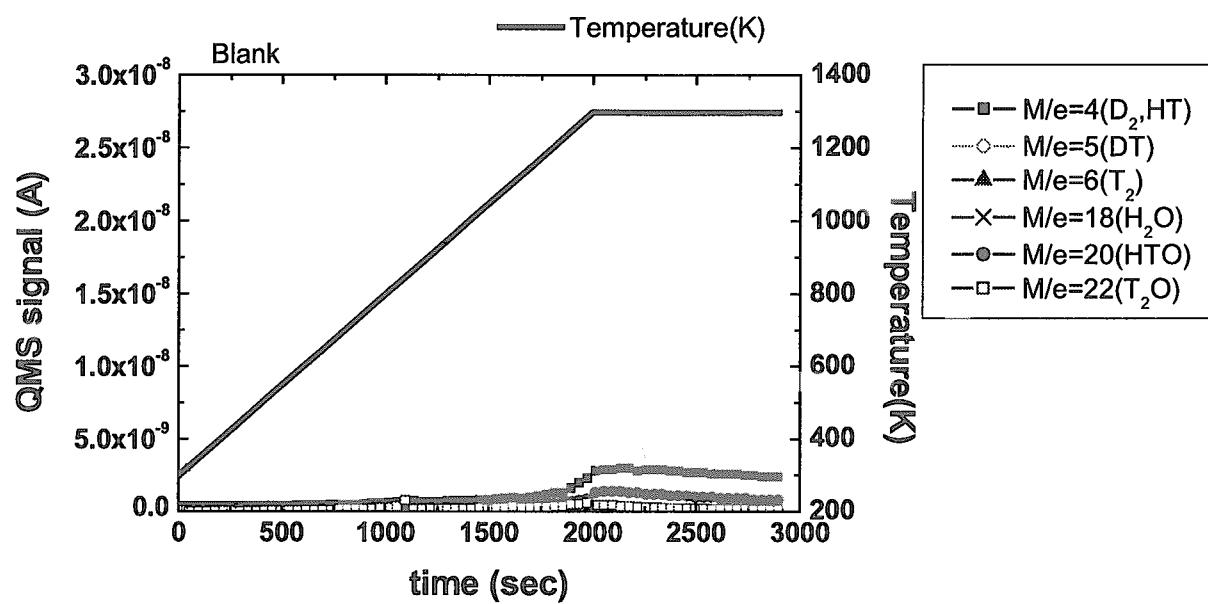


Fig. 17. Results of the TDS of blank test

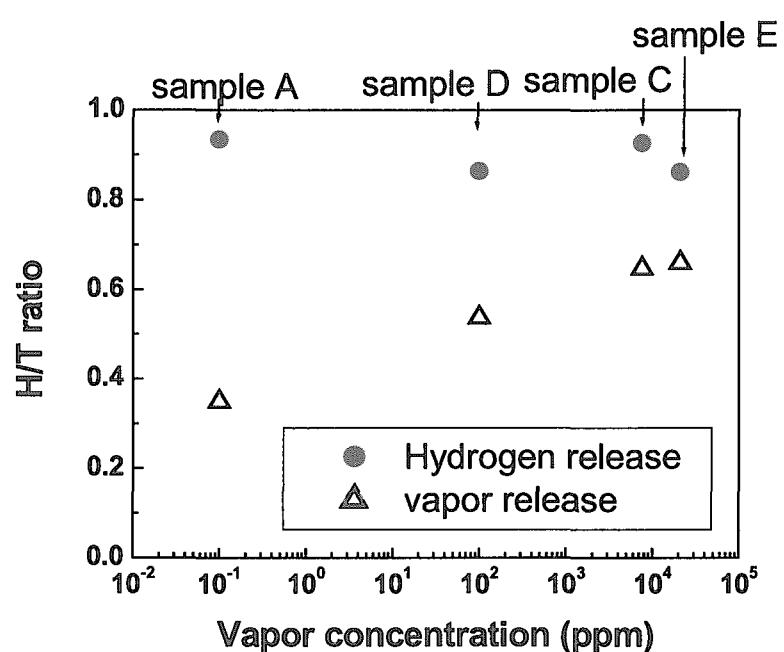


Fig. 18. Vapor concentration dependence of H/T ratio of hydrogen and vapor released by the TDS

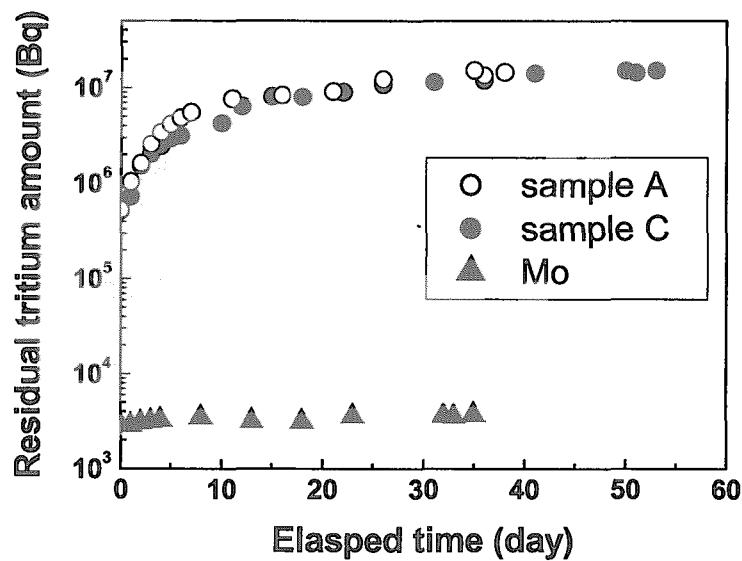


Fig. 19. Results of the residual tritium measurement for Sr-Ce oxide and Mo samples after the TDS experiment

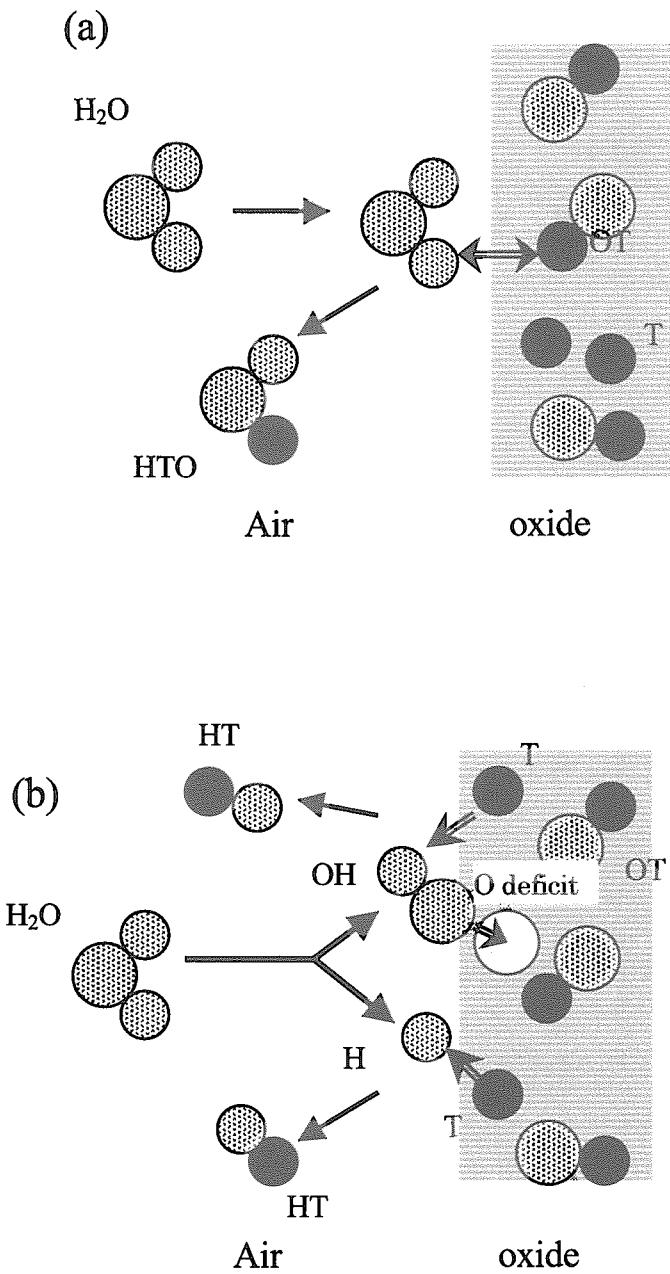


Fig. 20. Tritium release mechanism by isotope exchange reaction by the vapor  
(a) Mechanism for vapor release, (b) Mechanism for hydrogen release

# 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 <sup>-1</sup>
圧力、応力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
エネルギー、仕事、熱量	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
工率、放射束	ジュール	J	N·m
電気量、電荷	ワット	W	J/s
電位、電圧、起電力	クロントン	C	A·s
静電容量	ボルト	V	W/A
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
磁束密度	ウェーバー	Wb	V·s
インダクタンス	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
セルシウス温度	ヘンリイ	H	Wb/A
光束度	セルシウス度	°C	
照度	ルーメン	lm	cd·sr
放射能	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
吸収線量	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
線量当量	グレイ	Gy	J/kg
	シーベルト	Sv	J/kg

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

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

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

(注)

- 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、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 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。
- 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。
- 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。

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	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

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

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

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

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

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

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

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

## 換算表

力	N(=10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(N\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ポアズ)}(\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)}(\text{cm}^2/\text{s})$$

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

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)	
								= 4.184 J(熱化学)	
	1	0.101972	$2.77778 \times 10^{-7}$	0.238889	$9.47813 \times 10^{-4}$	0.737562	$6.24150 \times 10^{18}$		
	9.80665	1	$2.72407 \times 10^{-6}$	2.34270	$9.29487 \times 10^{-3}$	7.23301	$6.12082 \times 10^{19}$	= 4.1855 J(15 °C)	
	$3.6 \times 10^6$	$3.67098 \times 10^5$	1	$8.59999 \times 10^5$	3412.13	$2.65522 \times 10^6$	$2.24694 \times 10^{25}$	= 4.1868 J(国際蒸気表)	
	4.18605	0.426858	$1.16279 \times 10^{-6}$	1	$3.96759 \times 10^{-3}$	3.08747	$2.61272 \times 10^{19}$	仕事率 1 PS(仏馬力)	
	1055.06	107.586	$2.93072 \times 10^{-4}$	252.042	1	778.172	$6.58515 \times 10^{21}$	= 75 kgf·m/s	
	1.35582	0.138255	$3.76616 \times 10^{-7}$	0.323890	$1.28506 \times 10^{-3}$	1	$8.46233 \times 10^{18}$	= 735.499 W	
	$1.60218 \times 10^{-19}$	$1.63377 \times 10^{-20}$	$4.45050 \times 10^{-26}$	$3.82743 \times 10^{-20}$	$1.51857 \times 10^{-22}$	$1.18171 \times 10^{-19}$	1		

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
	1	$2.70270 \times 10^{-11}$		1	0.01
	$3.7 \times 10^{10}$	1			

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	$2.58 \times 10^{-4}$	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

(86年12月26日現在)

ストロンチウム-セリウム酸化物セラミックス中のトリチウムの存在状態およびその除去特性

