

解 説

トリチウムによる二次電子増倍管および 質量分析計の機能障害とその回復

渡 辺 国 昭・市 村 憲 司・松 山 政 夫

富山大学トリチウム科学センター
〒930 富山市五福3190

Impairment of Secondary Electron Multiplier and Mass Spectrometer by Tritium and Recovery from Tritium Contamination

Kuniaki WATANABE, Kenji ICHIMURA,
and Masao MATSUYAMA

Tritium Research Center, Toyama University,
Gofuku 3190, Toyama 930, Japan
(Received December 25, 1985)

Abstract

In D-T fusion experiments, secondary electron multipliers will be widely used as detectors for plasma diagnostics and mass spectrometers for fuel analysis and vacuum measurement. However, as significant impairment of the multiplier performance is predicted owing to the β -rays from tritium adsorbed on the detector surface (contamination), in-situ decontamination techniques are, therefore, required. On reviewing the contamination effect on the performance of the secondary electron multipliers and decontamination techniques, it is indicated that the adsorption of tritiated water vapor is more serious than tritium gas. In principle, the tritium contamination could be removed by vacuum heating but it is a time consuming technique. Since photon irradiation is more effective in the decontamination than vacuum heating, it is proposed as an in-situ decontamination method. It is pointed out, however, that more extensive studies are required to understand the decontamination process by photon irradiation, and to develop contamination free detector and/or signal discrimination techniques.

1 はじめに

D-T核融合反応実験においては、近い将来 $10^6\sim 10^8$ Ciにも及ぶトリチウムが使用される。¹⁾このためには、大量トリチウムの安全取り扱い技術の確立が必要不可欠である。この観点から、我国においても無担体トリチウムガスを用いた様々な実験研究が行なわれており、現在では一度に数十～百Ci程度のトリチウムを使用することも稀ではない。今後、トリチウム研究の進展とともにその使用量も増え、トリチウム安全取り扱い技術も向上するものと考えられる。さらにそれらの実績をもとに、核融合反応実験で必要とされる大量のトリチウムの安全取り扱いに関して、我国独自の技術を確認できるものと期待されるが、その際、トリチウムの計測—分析法の確立も重要な課題となっている。トリチウム計測の観点からは、核融合反応実験装置は(1)貯蔵—供給系、(2)反応容器系、(3)回収—分離系、(4)真空排気系、(5)環境系に大別できるが、対象となるトリチウム濃度は 1 Ci/cm^3 ²⁾から環境レベル(1 pCi/cm^3)の広い範囲にわたるので、各系に適した計測法を確認する必要がある。

トリチウムの計測においては様々な動作原理に基づく検出器が利用されるが、中でも二次電子増倍管の用途は広い。すなわち、二次電子増倍管は核融合炉の燃料となる D_2-T_2 混合ガス中のトリチウムの分圧測定、不純物分析ならびに真空計測に必須の質量分析計の検出器として用いられるのみならず、それ自体でもトリチウムガス圧の測定あるいは固体表面に吸着したトリチウムの定量にも利用できる。さらに、炉心におけるプラズマ診断に際しては、イオン温度、 α 粒子計測ならびに不純物分析に不可欠の検出器である。このように、二次電子増倍管は様々な目的で核融合反応実験装置に装着されるが、いずれの場合にも検出器はトリチウムと直接接するので、その表面に吸着したトリチウムからの β -線放出が重要な問題となる。

例えば、Malinowski²⁾は、チャンネルトロン(Galileo, 4501)および14段ダイノードタイプCu-Be管(Dumont, SPM3)のノイズレベルがトリチウムガス接触により増加することを報告している。この報告に基づき、プラズマ診断システムのトリチウム対策が考えられている。しかしながら、大気中あるいは酸素・水の残留する系では、トリチウムはHTOあるいは T_2O として存在する方が安定であり、たとえ実験装置にトリチウムガスのみを導入したとしても、一部は必ずトリチウム水となる。したがって、装置に残留するトリチウムは主として水あるいは水酸基の化学形で装置器壁表面に吸着したものであり、また、それらの吸着性はトリチウムガスよりも強いことを考慮すると、トリチウムガスのみならずトリチウム水による汚染評価が不可欠となる。さらに、単なる汚染評価にとどまらず、汚染の除去が二次電子増倍管使用上の重大な課題となる。

この観点から、筆者らはチャンネルタイプの全セラミックス製増倍管(セラトロン、村田製作所)およびダイノードタイプCu-Be管を装備した質量分析計(MSQ-150A, UL VAC)を用い、トリチウムガス(HTまたは T_2)およびトリチウム水(HTO)の吸着—

脱離に伴うノイズレベルの変動と除染方法を検討してきた^{3,4)}。本稿では、これらの結果を中心に、二次電子増倍管および質量分析計のトリチウム汚染とその除染方法について述べる。

2 トリチウムガスおよびトリチウム水の吸着影響

2-1 トリチウムガス

セラトロン (EMS-1081B) を装着したステンレス鋼製オイルフリーの超高真空装置に、Fig.1のような様式でトリチウムガス(HT)を導入一排出し、セラトロンの計数率変化を調べた³⁾。トリチウムガスを排気すると、質量分析計 (VG, MM6) の指示値(HT分圧)は零点に戻るが、セラトロンの計数率は零点には戻らず、導入一排出を繰り返すごとに増加する。この現象は導入一排出を繰り返すごとにセラトロン表面に吸着したトリチウムの量が増加してゆくことを示している。他方、質量分析計では Faraday Cup を検出器として用いており、この測定条件では、吸着影響はほとんどない。

Fig. 2 は上記の測定結果をまとめたものでセラトロンの計数率と質量分析計で測定したトリチウムの分圧

$$P_{T_2} = P_{T_2}^{obs} + \frac{1}{2} P_{HT}$$

との関係を示している。図中の直線部分は気相トリチウムガスからのβ線が計測されることに対応するが、1st RUNの場合には 10^{-7} Torr 以下で、この直線からのずれがみられた。Fig. 1 の様式で約 10^{-5} Torr までトリチウムの導入一排出を繰り返したのち、超高真空下に一晚放置しておく、セラトロンの計数率は約 10^3 cps まで増加し、この状態では 10^{-6} Torr 以下では直線性を示さない(2nd RUN)。

直線からのずれは主として器壁表面に吸着したトリチウムによるものであり、これはトリチウムの接触量とともに増加する。すなわち、セラトロンのノイズレベルが増加する。

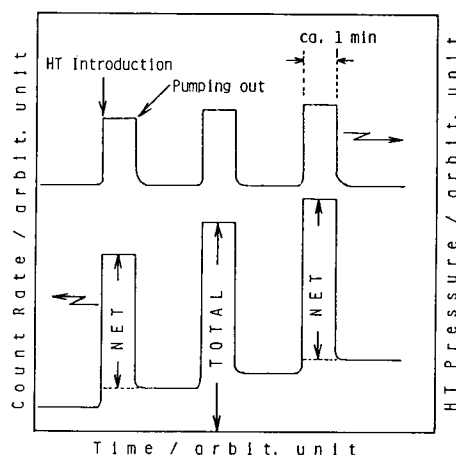


Fig. 1. Changes in the count rate and the pressure with HT introduction/pumping-out cycle³⁾.

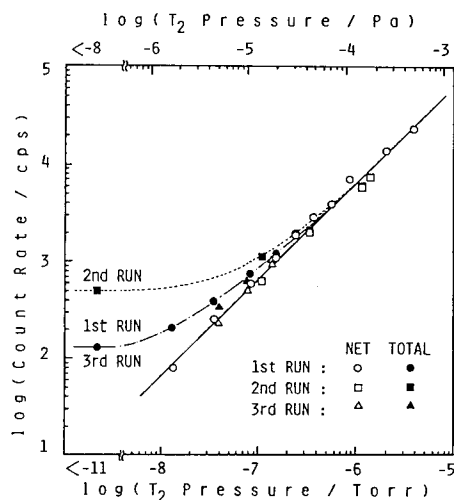


Fig. 2. Changes in the count rate of Ceretron with tritium pressure³⁾.

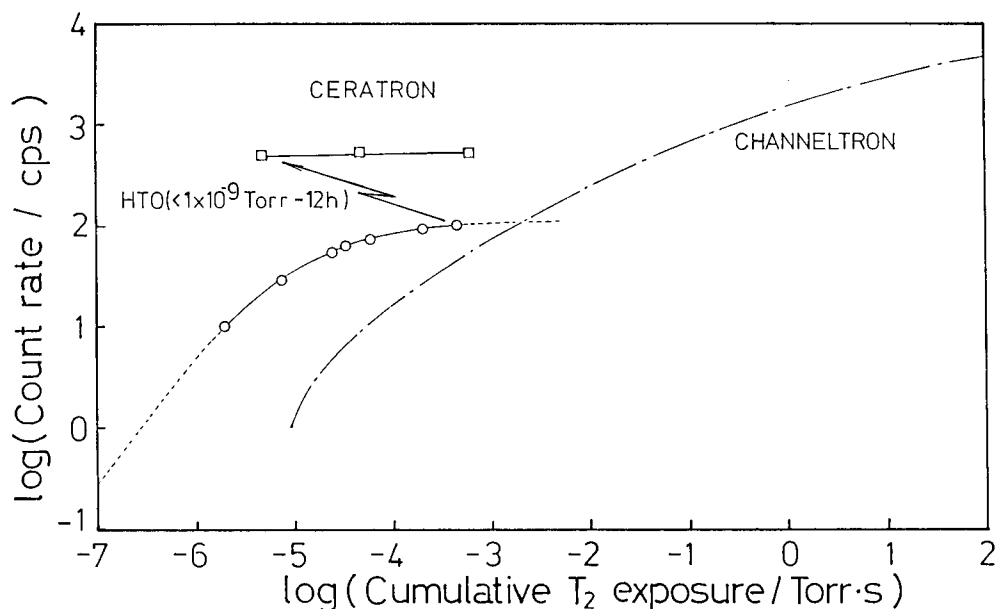


Fig. 3. Changes in the residual noise level after exposure of Ceratron and Channeltron to tritium with cumulative tritium exposure^{2,3)}.

ノイズレベルとトリチウムガスの接触量との関係は、Fig. 3 のようになる。トリチウムガスとの接触によりセラトロン（Ceratron）のノイズレベルは当初急激に増加するが、徐々に定常値に近づき、 10^{-4} Torr·s 以上では一定（約 10^2 cps）となる。ここで、系内を排気しつつ12時間放置したところ、ノイズレベルは約5倍に増加した。このとき、排気当初において系内には約 1×10^{-9} Torr の HTO が残留しており、12時間放置でのノイズレベルの増加は HTO の吸着に起因するものと考えられる。ノイズレベルが約 5×10^2 cps に達した段階で新たにトリチウムガスの導入—排出を繰り返しても、その影響はもはやほとんど認められなくなる。これらの現象は、トリチウム水蒸気の影響がトリチウムガスよりも著しく大きいことを示唆している。

セラトロン（Ceratron）の結果を、Malinowski によるチャンネルトロン（Channeltron）の結果²⁾と比較してみると、セラトロンはより小さな接触量でノイズが急増するが、その飽和値はチャンネルトロンよりも約1桁低いように見える。他方、Fig. 2の直線部分より求めた気相トリチウムガスに対するセラトロン（Ceratron）の感度は、

$$R[\text{cps}] = 6.3 \times 10^9 \cdot P[\text{Torr}]$$

で、Malinowski が求めたチャンネルトロン（Channeltron）の感度

$$R[\text{cps}] = 6.2 \times 10^9 \cdot P[\text{Torr}]$$

にほぼ等しい。したがって、Fig. 3 にみられるセラトロンとチャンネルトロン（Channeltron）のノイズレ

ベル変化の相違は、実験条件等の差異によるものではなく、両者の材質の相違に基づくものであると考えられる。因みに、チャンネルトロンは鉛ガラスを熱処理したもので、表面に PbOx を析出したものといわれている。他方、セラトロンは Zn および Ti の複合酸化物の焼結体である³⁾。

セラトロン素材に対する水素吸着データはみあたらないが、その一成分である ZnO については Kokes らの報告^{5,6)}がある。それによれば、ZnO 表面での水素の吸着には、室温で

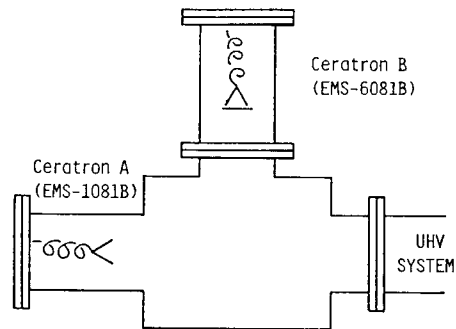
- (1) 速い吸着過程 : 可逆的吸着—脱離
- (2) 遅い吸着過程 : 不可逆的吸着—脱離

がある。また、酸化物表面には吸着酸素種も存在し、吸着水素はこの酸素種との反応により吸着水あるいは表面水素基となる^{7,8)}。同様のことは、セラトロン表面でも起き得る。たとえば、セラトロンの素材料ディスクに T₂ ガスを接触させその後昇温すると、吸着トリチウム水の95%以上がトリチウム水の化学形で脱離する⁹⁾。この現象は、上記の説と矛盾しない。他方、チャンネルトロンはもとより鉛ガラスあるいは PbOx 表面での水素吸着データはみあたらないが、吸着挙動はセラトロンあるいは ZnO のそれとは異なり、両者の汚染のされかたも異なったものとなると考えられる。

以上のことより、二次電子増倍管へのトリチウムガスの吸着、すなわち、二次電子増倍管の汚染においては、不可逆吸着に関する平衡および速度論的データを蓄積することが今後の課題である。さらに、表面反応等で生ずるトリチウム水の吸着—脱離の研究も重要である。

2-2 トリチウム水蒸気

セラトロン EMS-1081B, および真空容器壁の見込み角を小さくするためにそのコーン部に Au 板を被せた EMS-6081B を Fig. 4 のように装着し、トリチウム水蒸気の影響を調べた³⁾。なお、両セラトロンは支持方法が異なるだけで、印加電圧—利得特性は同じである。



室温で 1×10^{-9} Torr 以下で24時間排気したのち、 20pCi/cm^3 のトリチウム水を含む空気と12時間接触させた。このときのトリチウム水分圧は、約 1×10^{-8} Torr に相当する。室温で排気したのちのセラトロンのノイズレベルは、EMS-1081B では 6.5×10^5 cps, 6081B では 8.0×10^4 cps であり、計数限界 ($\sim 10^6$ cps) に近い。また、EMS-6081B のコーン部を覆った Au 板表面のトリチウム吸着量は、 2π -ガスフローカウンターで測定したところ、表裏ともに 3.0×10^4 cps であった。

EMS-1081B と 6081B では計数率が約1桁異なっているが、これは前者がステンレス鋼製真空容器壁を直接見込んでいるのに対し、後者は Au 板で覆われているために真空容器壁に吸着したトリチウムの影響がないためである。また、後者における Au 板の寄与を差し引くと、セラトロン表面に吸着したトリチウムによるノイズレベルは 5×10^4 cps と見積られる。この結果を、Fig.3 と比較すると、トリチウム水蒸気の接触量が約 4×10^{-4} Torr·s であるにもかかわらず、ノイズレベルの増加はトリチウムガスの場合の $10^2 \sim 10^3$ 倍も大きい。すなわち、トリチウム水蒸気はトリチウムガスに比較して極めて吸着し易く、著しいノイズレベルの増加をもたらす。これは、水素ガスと水蒸気の吸着性の差異に起因するものである。セラトロン素材への水蒸気の吸着に関するデータはないが、その成分酸化物である ZnO あるいは TiO_2 については、森本らの報告¹⁰⁾がある。これによれば、400℃以上の真空加熱処理後では、単分子膜吸着量 (V_m) は両者とも約 6×10^{14} 個/cm² である。また、水蒸気圧 1 Torr における平衡吸着量として約 15×10^{14} 個/cm² の値が報告されている。これに対して、先に述べた ZnO 上への水素吸着では、水素圧 1 Torr における可逆吸着量は約 3×10^{12} 個/cm² である^{5,6)}。この水蒸気吸着データからの外挿値および上記のセラトロントリチウム水系で得られた結果を考え合わせると、差動排気によりトリチウム水蒸気の分圧を 1×10^{-9} Torr 以下に抑えても、セラトロンの汚染は深刻な問題となるものと予想される。この問題は、ガラス素材からなるチャンネルトロンあるいは Cu-Be 管についても同様であると考えられる。さらに、上記の結果から、増倍管自身のみならず容器壁へのトリチウム水吸着の影響は、化学的に不活性な Au 板でも大きく、無視できないことが知られる。

3 除去対策

3-1 熱的除去

Fig.5は、トリチウムガスを吸着 (47Torr, $17CiT_2/mol$ He, 室温, 10日間) させたセラトロンの素材ディスク (10mm直径×2mm) を図に示した各温度で6時間ヘリウム気流中で加熱したのちに、表面に残存するトリチウム量を 2π -ガスフローカウンターで測定したものである⁹⁾。He 気流中で 500℃で加熱すれば、ほぼ完全に吸着トリチウムを除去できることを示している。

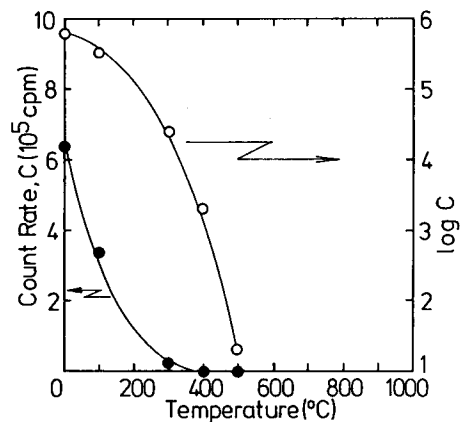


Fig. 5. Decrease in the amount of adsorbed tritium on Ceratron disc with the heat treatment in He flow⁹⁾.

Table 1. Summary of the decontamination examination by the heat treatments³⁾.

	A(EMS-1081B)	B(EMS-6031B)
Evacuation (20°C, 24h)	6.6×10^5 cps	8.0×10^4 cps
Vacuum heating (300°C, 24h)	6.6×10^5	3.7×10^4
D ₂ Exposure (300°C, 12h; 44×10^{-6} Torr)	6.6×10^5	4.6×10^4
CO Exposure (300°C, 12h; 1×10^{-6} Torr)	6.2×10^5	3.0×10^4
*During the CO exposure (at 300°C)	1.8×10^4	1.9×10^2

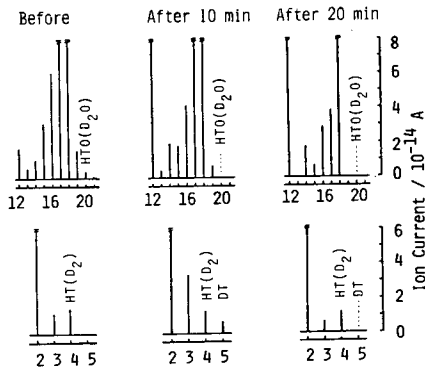


Fig. 6. Changes in the mass spectra before and during heat treatment of contaminated Ceratron in CO atmosphere.

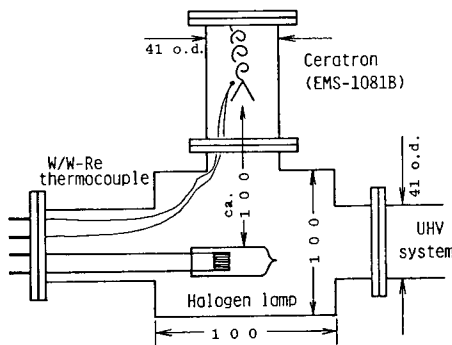


Fig. 7. Set-up of Ceratron and halogen lamp for decontamination examination by photon irradiation in vacuo³⁾. Dimension of the numbers inset is in [mm].

一方、セラトロンをトリチウム水蒸気に接触 (20pCi/cm^3 空気, 室温, 12時間; Fig.4) させ、これを真空中で加熱排気しても、上記のような除染効果はほとんどない³⁾。すなわち、Table 1に示すように、室温あるいは300°Cでの真空排気はもとより、D₂ (4×10^{-6} Torr) あるいはCO (1×10^{-6} Torr) 雰囲気中での真空加熱処理によっても、処理後の室温におけるセラトロンの計数率はほとんど処理前の値と変わらない。同様の現象は、チャンネルトロンに対しても認められている²⁾。

しかし、この表中に示すように、例えば、CO導入下300°Cにおいては部分的な除染効果が認められている。このときの系内の残留気体を質量分析した結果、HTOが水性ガス反応



によりHTとして一部除去されていることが知られた (Fig.6)。これらの結果から、加熱中には明らかにセラトロンおよび真空容器壁からトリチウムが脱離するが、脱離したトリチウムは系内の加熱されていない室温部分に吸着し、加熱処理後の放冷時に再びセラトロンおよびその容器壁に吸着するものと考えられる。したがって、真空加熱法では、系全体の均一なベーキングアウトが必要不可欠である。

3-2 光照射除染

次に加熱によらない除染方法として、光照射除染を検討した³⁾。Fig.7は使用した装置図であり、光照射用光源として真空中で使用できるハロゲンランプを装着した。このランプは、200nm以上の光を放出し、強度が最大となる波長は約700nmである。

セラトロン (EMS-1081B) を 8pCi/cm^3 のトリチウム水蒸気を含む空気と12時間接触させ、室温で排気したのちの計数率は $1.4 \times 10^4\text{cps}$ であった。次いで、光照射による計数率変化をマルチチャンネルアナライザーにより測定した。Fig.8に示すように、接触—排気直後の計数率は上記と同様に $1.4 \times 10^4\text{cps}$ であったが、照射後15および30分後の計測では各々50および5cpsとノイズレベルが減少した。さらに、50分以後では1cps以下となったがパルス波高分析は困難であった。この結果は、光照射により効率良くトリチウムが除去されることを示している。また、パルス波高分析スペクトルのプロフィールが変わらないことより、光照射しても計数特性に変化のないことも知られた。すなわち、セラトロンおよび真空容器壁を光照射することにより、吸着トリチウムを in-situ に除去できる。この現象は、金属および半導体酸化物などにおいて見出されていると同様な光脱離あるいは光触媒作用に基づくものと考えられる¹¹⁾。光除染効果とその機構の詳細は今後の検討課題であるが、光照射中すなわち除染中でも計測可能であることは注目に値する。

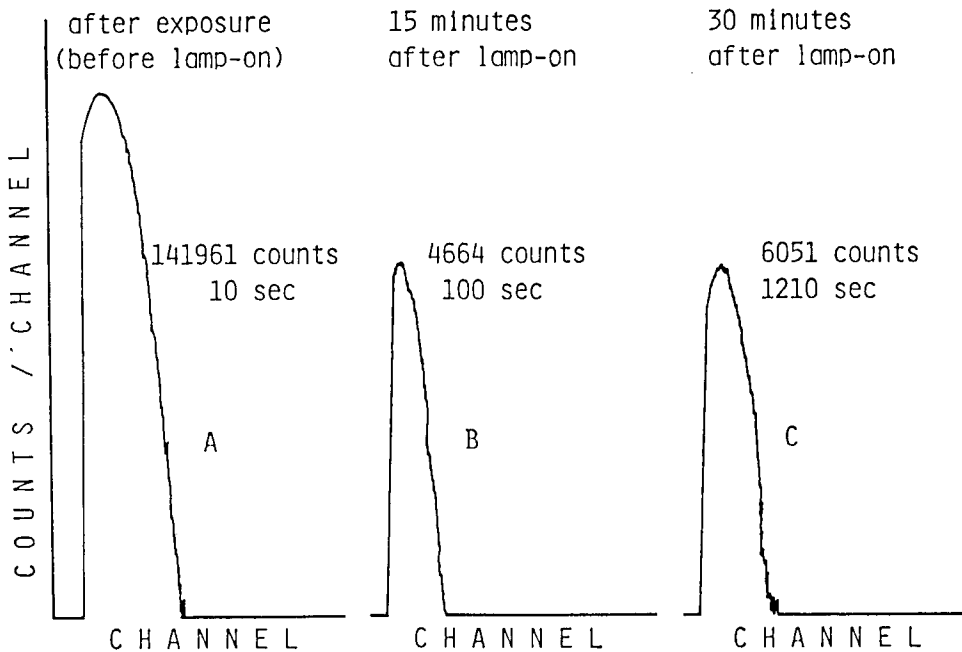


Fig. 8. Pulse height distributions of Ceratron signal from contaminating tritium before (A) and during (B and C) photon irradiation and changes in the count rate⁹⁾.

4 質量分析計によるトリチウム計測とそのトリチウム汚染

D_2 と T_2 よりなる燃料ガスの各成分の分圧測定ならびにその不純物分析には、二次電子増倍管を装着した質量分析計が用いられる。質量分析計は、また、水素同位体とヘリウムよりなるプラズマ排ガスの分析には不可欠のものである。この際、共存する分子種各々

Table 2. Ion species, having similar M/e, and required resolutions¹²⁾.

M/e	Ion Species	Required Resolution
2	D ⁺ , H ₂ ⁺	M/ΔM(D-H ₂)=1302
3	³ He ⁺ , T ⁺ , HD ⁺ , H ₃ ⁺	M/ΔM(³ He-HD)=512
4	⁴ He ⁺ , HT ⁺ , D ₂ ⁺ , H ₂ D ⁺	M/ΔM(⁴ He-HT)=189
		M/ΔM(HT-D ₂)=930
5	DT ⁺ , H ₂ T ⁺ , D ₂ H ⁺	M/ΔM(DT-D ₂ H)=856
6	T ₂ ⁺ , D ₃ ⁺	M/ΔM(T ₂ -D ₃)=591

を分離するために要求される分解能は、Table 2 のようであり、Ellefson ら¹²⁾ によれば分解能 (M/ΔM) が700程度の質量分析計では、HT-D₂、およびHD-³He の分離は十分ではない (Fig.9)。今後、さらに分解能を向上させることが要求されるが、この種の測定ではS/N比が決定的に重要な因子であるため、

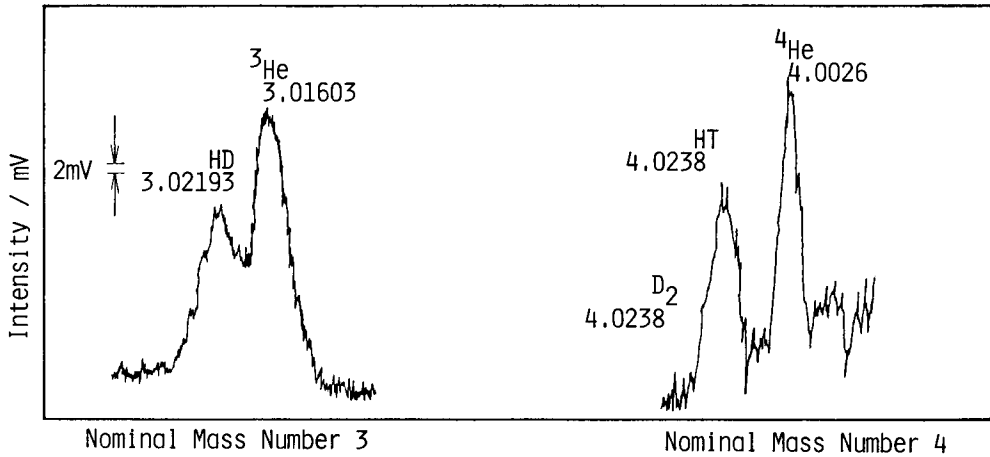


Fig. 9. Mass analyzed spectra of ³He-HD and D₂-HT-⁴He mixture gases measured with high resolution mass spectrometer¹²⁾.

先に述べたようなトリチウム雰囲気下での障害とその対策が要求される。この観点から、本節では質量分析計のトリチウム汚染の実態とその防止対策について述べる。

17段Cu-Be増倍管付き四重極型質量分析計 (MSQ-150A, ULVAC) を装着したオイルフリー超高真空装置に、トリチウムガス (HTおよびT₂) をFig.10の様式で導入-排出すると、二種類のトリチウム効果が現われる。その一つは電氣的零点が見掛け上正にシフトする (ノイズレベルの増加) ことであり、もう一つはノイズ中の増加である。これらのノイズとトリチウムガス圧の関係は、Fig.11のようになり、両ノイズは圧力に比例して

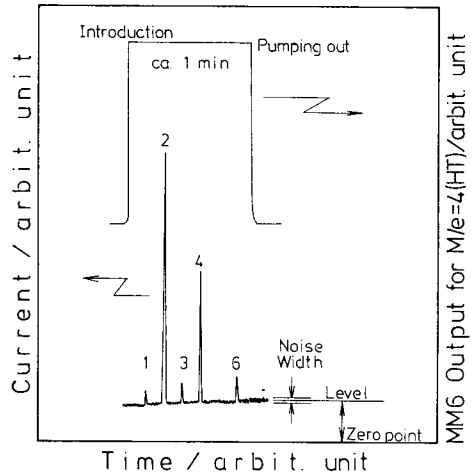


Fig. 10. Schematic diagram of the changes in the mass spectra with tritium introduction : Both noise level and width increase with tritium introduction⁴⁾.

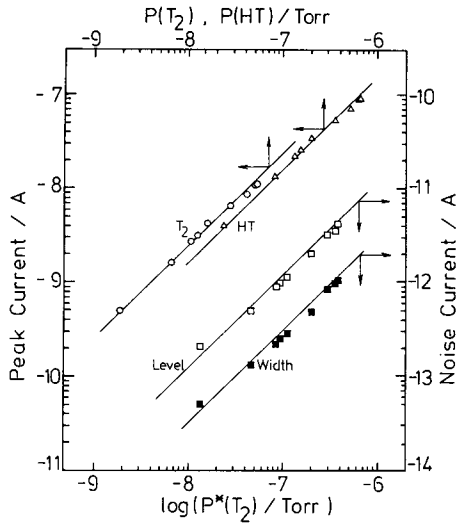


Fig. 11. Variations of the peak current, noise level, and noise width tritium pressure.

増加する。この結果は、たとえばトリチウムガス圧が 1×10^{-5} Torr の場合、ノイズレベルおよびノイズ巾は各々 1×10^{-9} A および 3×10^{-10} A となり、 1×10^{-8} Torr 以下の不純物あるいは同位体分析に重大な障害となることを示している。

また、トリチウムガスを真空排気した後においても、ノイズレベルおよびノイズ巾は初期値に戻らず、残留ノイズレベルおよび残留ノイズ巾が認められ、分析性能を低下させる。この様子を示したものが Fig. 12 であり、トリチウムガスとの接触量の増加に伴ないノイズ

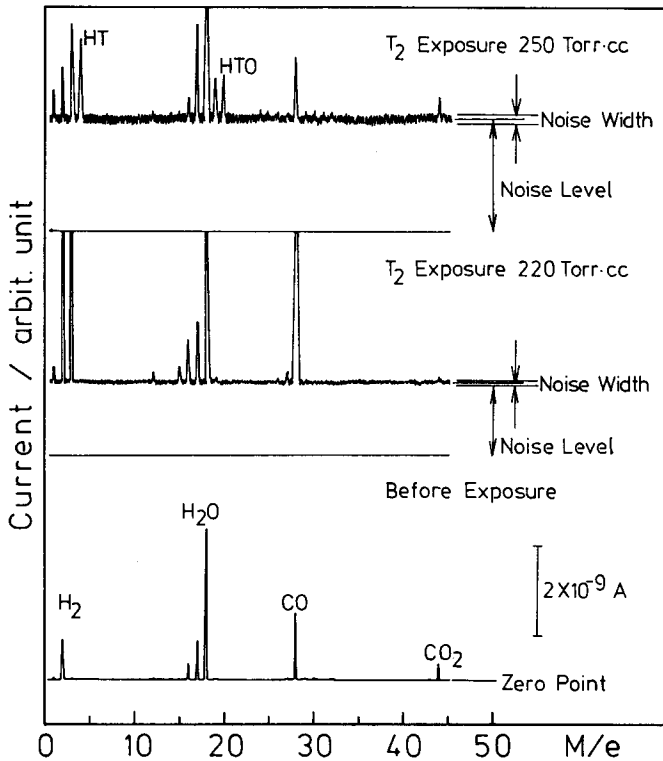


Fig. 12. Changes in the mass spectra for the residual gas in vacuum system with tritium exposures amounting to 220 and 250 Torr·cm³: the residual noise (level and width) increases with tritium exposure⁴⁾:

レベルおよび巾が増大している。このとき、残留気体中には、HTの他にHTOが検出され、先に述べたようにトリチウム水の生成・吸着による影響が大きいことが知られる。250 Torr·cm³のトリチウムガスとの接触したのちの残留ノイズレベルおよび巾は、各々 2.5×10^{-9} および 2×10^{-10} A である。ノイズレベルは電氣的に零点補正できるが、ノイズ巾は電氣的補償が困難であり除染が不可欠となる。

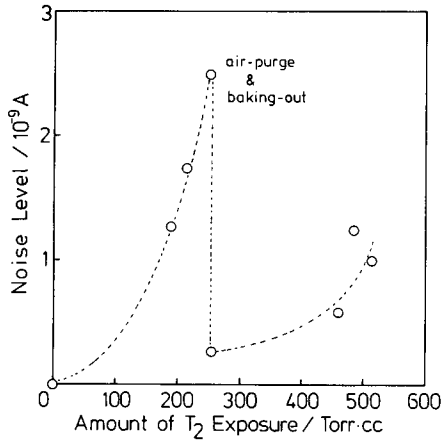


Fig. 13. Changes in the residual noise level with tritium exposure and effect of heating in air⁴⁾.

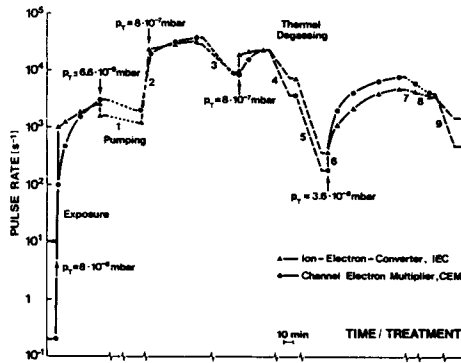


Fig. 14. Changes in noise level of SEMs with tritium exposure and thermal degassing¹³⁾

残留ノイズレベルとトリチウムガス接触量との関係を Fig. 13 に示すが、ノイズレベルは接触量の増加とともに急激に増大する。このノイズは250 Torr·cm³のトリチウムガスと接触させたのちに、300℃で12時間真空排気してもほとんど変わらず、真空加熱による除染効果は認められなかった。同様の現象は、Malinowski によっても認められている。この原因は、前節で述べたように、質量分析計の真空加熱時に、そこから脱離したトリチウムが系内の室温になっている部分に吸着し、この吸着トリチウムが質量分析計の放冷中に再吸着してくるためである。Hofer らは、真空装置全体を 150℃ で均一に真空加熱すれば、ノイズレベルは加熱前の約百分の1に低下することを報告している (Fig. 14)¹³⁾。

他方、真空加熱に代わり、1気圧の空気流通下で300℃、6時間の加熱すると、ノイズレベルは約1桁低下する (Fig. 13)。この現象は質量分析計から脱離したトリチウムが空気流に沿って系外に排気されたためと理解できる。上の結果からすると、加熱により原理的には質量分析計を除染できるが、この方法は煩雑すぎることから現実には採用し難い。

したがって、より有効な除染方法あるいは汚染対策を確立する必要がある。

汚染対策の一つとして、Hofer からのイオン-電子変換型検出器 (Fig. 15)¹⁴⁾ があるが、

† 脚 注

先に述べた質量分析計 (VG, MM6) はファラデーカップを検出器としており、ノイズレベルはほぼ飽和した定常値 ($\sim 10^{-14}$ A) である。 $10^{-8} \sim 10^{-6}$ Torr の範囲の分圧測定においては、約 $10^{-13} \sim 10^{-12}$ A のイオン電流を検出している。

検出器およびその容器壁へのトリチウム吸着の影響は考慮されていないので、その有効性には若干の疑問がある。

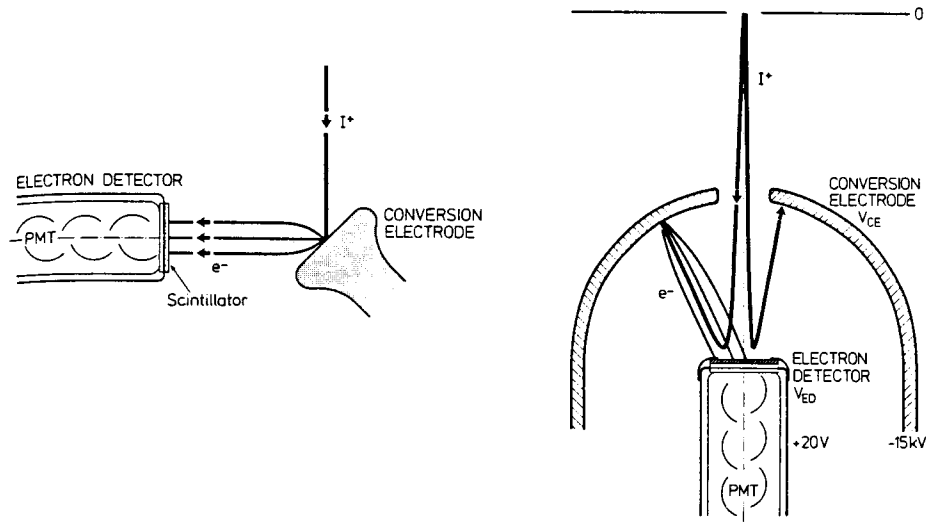


Fig. 14 Schematic diagram of ion-electron converter for detection of positive ions¹³⁾.

他方、加熱脱ガス法に代わる有効な除染法あるいは汚染防止対策として光照射が考えられる。この方法はセラトロンについては有効であることが実証されているが、Cu-Be 増倍管でもその表面は酸化層であり、セラトロン同様の半導体的性質を持っている。したがって、Cu-Be管についてもセラトロンと同様の光照射除染を期待できる。質量分析計は複雑な内部構造をもつため、この点はまだ実証されていないが、たとえば Fig. 16 のように光源-光路を確保することにより、in-situ でかつ有効な除染効果および汚染防止効果が得られるものと考えられる。

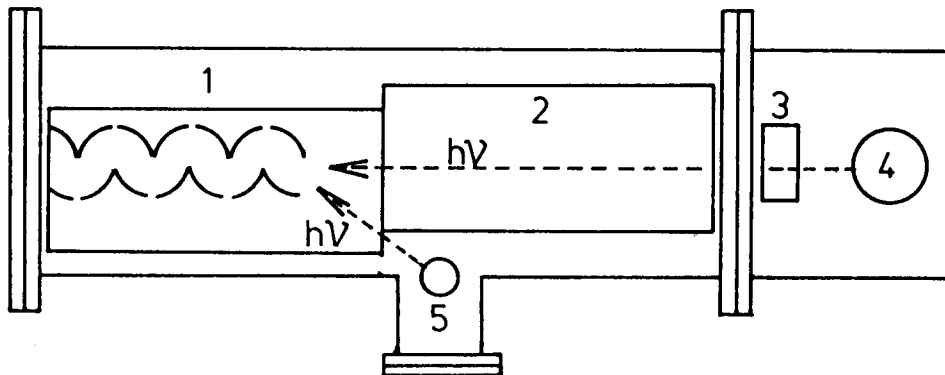


Fig. 16. Photon source set-up for in-situ decontamination of quadrupole mass spectrometer.
1. Secondary Electron Multiplier, 2. Quadrupole Analyzer, 3. Ionization Cell, 4. and 5. Photon Source

5 ま と め

D-T核融合反応実験においては、二次電子増倍管はプラズマ診断からトリチウム計測に至るまで幅広く利用されるが、その際トリチウムによる汚染の影響が重大な問題となる。二次電子増倍管を検出器とする質量分析計でも本質的には同じ問題が生ずる。本稿では、筆者らの測定結果を中心に、汚染の問題とその対策に関する研究の現状を紹介した。

トリチウムによる二次電子増倍管あるいは質量分析計の汚染は、それらの性能に対して極めて重大な障害となる。この汚染は、基本的には加熱脱ガス法により除去できるが、この方法は極めて煩雑で現実には適用し難い。光照射除去法は現状では最も有望であるように思えるが、これが最善というわけではなく、より有効な方法の探索が必要であろう。そのためには、材料表面でのトリチウムの吸着性の低い二次電子増倍管材料ならびに関連容器等の材料の開発も必要になるものと思われる。さらに、ノイズ発生機構を詳細に検討し、信号弁別の可能性を追求することも必要である。核融合研究の進展に伴ない、この問題は一層重要なものとなりつつあり、早急に in-situ でかつ信頼性の高い除染方法あるいは汚染対策の確立が望まれる。

文 献

- 1) 河村和考, フィジクス, **3**(1982) 262.
- 2) M. E. Malinowski, J. Nucl. Mater., **93/94**(1980) 96.
- 3) K. Ichimura, K. Watanabe, K. Nishizawa, and J. Fujita, Nucl. Instr. Methods Phys. Res., **226** (1984) 470.
- 4) K. Ichimura, N. Inoue, K. Ashida, M. Matsuyama, H. Miyake, and K. Watanabe, RADIOISOTOPES, **34** (1985) 83.
- 5) A. L. Dent and R. J. Kokes, J. Phys. Chem., **73** (1969) 3772, 3781.
- 6) R. J. Kokes, A. L. Dent, C. C. Chang, and L. T. Dixton, J. Amer. Chem. Soc., **93**(1972)4429.
- 7) M. Iwamoto, Y. Yoda, N. Yamazoe, and T. Seiyama, Bull. Chem. Soc. Jpn., **51**(1987) 2765.
- 8) T. Okuhara, T. Kondo, and K. Tanaka, J. Phys. Chem., **81**(1977) 808.
- 9) K. Ichimura, M. Matsuyama, and K. Watanabe, J. Nucl. Sci. Technol., **21**(1984) 56.
- 10) T. Morimoto, M. Nagao, and F. Tokuda, Bull. Chem. Soc. Jpn., **41**(1968) 1533.
- 11) For example, R. Gormer, Topics in Applied Phys., vol. **4**(Springer-Verlag ; Berlin, Heidelberg, New York, 1975).
- 12) R. E. Ellefson, W. E. Moddeman, and H. F. Dylla, J. Vac. Sci. Technol., **18**(1981) 1062.
- 13) J. von Seggern, S. Berger, M. Edwerg, and W. O. Hofer, J. Vac. Sci. Technol., **A2**(1984)1516.
- 14) W. O. Hofer and J. von Seggern, J. Nucl. Mater., **128/129**(1984) 943.