

修士学位論文
超高真空下における陽電子の蓄積
多価イオン冷却、反水素生成に向けて

平成 15 年度
理学系研究科物理学専攻
井上 正人

目次

第1章	序	3
1.1	陽電子の蓄積および本研究の背景	3
1.1.1	陽電子の蓄積	3
1.1.2	多価イオン冷却	5
1.1.3	反水素生成	8
1.2	本研究の目的	9
第2章	陽電子蓄積装置	11
2.1	Multi-Ring Trap	11
2.2	再減速板ホルダーおよび Faraday Cup	13
2.2.1	再減速板ホルダー	13
2.2.2	Faraday Cup および蛍光膜	13
2.3	低速陽電子源	15
第3章	超高真空下における陽電子の蓄積法	18
3.1	電子プラズマの形成	19
3.1.1	電子プラズマの形成法	19
3.1.2	蓄積された電子数の測定	19
3.1.3	ポテンシャル井戸の深さおよび電子ビーム入射時間 と蓄積電子数の関係	22
3.2	陽電子の蓄積	23
3.2.1	低速陽電子源からの陽電子の輸送	23
3.2.2	陽電子の蓄積方法	24
3.2.3	蓄積陽電子数および入射陽電子数の測定方法	26
3.2.4	電子プラズマによる陽電子の減速	28
3.2.5	陽電子蓄積における再減速板電位の最適化	31
3.2.6	陽電子ビーム径	32
3.2.7	陽電子蓄積における電子プラズマの安定性およびイ オンが与える効果	33

第 4 章	タングステン再減速板	37
4.1	再減速板の選定	37
4.1.1	陽電子の金属固体中の振る舞い	37
4.1.2	陽電子の再放出	38
4.1.3	再減速板の選定	38
4.2	タングステン再減速板の処理	39
4.2.1	現在取り付けられているタングステン再減速板に施 された処理	39
4.2.2	電解研磨	40
4.2.3	加熱処理	45
第 5 章	再減速板交換前後の陽電子蓄積効率の比較	60
5.1	実験条件	60
5.2	実験結果および考察	61
5.2.1	新旧再減速板交換前後の陽電子蓄積実験の結果 . .	61
5.2.2	最適化された再減速板電位と電子プラズマ空間電位 の関係	61
5.2.3	最適化された再減速板電位と陽電子蓄積効率の関係	61
5.2.4	再減速板の陽電子再放出エネルギー分布および陽電 子再放出率	65
5.2.5	陽電子ビーム入射位置の最適化	67
5.2.6	まとめ	67

第1章 序

1.1 陽電子の蓄積および本研究の背景

1.1.1 陽電子の蓄積

陽電子 (positron, e^+) の蓄積技術は、様々な研究への応用が期待できる興味深いテーマである。以下に例を挙げる。1. 蓄積された陽電子を短時間の内に固体表面に照射し、短パルス高密度のポジトロニウムを生成することができる。これはポジトロニウムのレーザー冷却などの興味深い研究を可能にする [1][2]。2. 陽電子プラズマと電子プラズマを混合し、質量が同じ粒子からなる中性プラズマ (電子 - 陽電子プラズマ) を生成して、基礎プラズマ物理学の実験的研究を可能にする [3]。3. 蓄積された陽電子を多価イオンの冷却材として用いることで、冷たい多価イオンビームを生成し、多価イオンのポテンシャルエネルギーによる相互作用の研究を可能にする (詳細は節 1.1.2 で述べる) [4]。4. 陽電子と反陽子から反水素を生成し、分光実験を行うことで、CPT 不変性の検証を可能にする (詳細は節 1.1.3 に述べる) [5][6]。

ここに挙げた陽電子蓄積技術の応用例では、どれも超高真空下で実験することが重要である。これまでに、超高真空下で陽電子蓄積が行われた例は、(1) resistive damping による方法 [7] と (2) 高励起状態のポジトロニウムを解離する方法 [8] がある。それぞれの陽電子捕獲率は $3 \times 10^{-2} e^+ / s / mCi$ と $1 \times 10 e^+ / s / mCi$ である。単位 $e^+ / s / mCi$ は、単位時間あたりの陽電子蓄積数を β^+ (陽電子) 線源の強度 mCi で規格化したものである。なお、超高真空条件を緩和すると、 N_2 ガスをバッファとして用いることができ [9] [10]、捕獲率は $1 \times 10^4 e^+ / s / mCi$ を達成している。これは、(1) と比べ 6 桁、(2) と比べても 3 桁高いが、装置真空度が 10^{-6} Torr と悪くなってしまう。

我々のグループは、多価イオン冷却および反水素生成を行うプロジェ

クトを進めている。このプロジェクトに向け、超高真空下でかつ高い効率で陽電子を蓄積するための、高密度電子プラズマを冷却材として用いる陽電子蓄積法を開発している [11][12]。

陽電子蓄積実験に用いる装置の全体図を図 1.1 に示す。これは、実験で用いる陽電子を供給する低速陽電子源 (e^+ Source)、電子を供給する電子銃 (Electron Gun)、陽電子および電子を閉じ込めて蓄積するトラップ装置 (Trap) そして陽電子を運ぶビームライン (Beam Line) から成る。

低速陽電子源から放出された陽電子はビームラインを介してトラップ装置内に導入される。電子はトラップ装置上流にある電子銃からトラップ内に入射する。陽電子および電子を閉じ込めて蓄積するには、図 1.2 に示すような Multi-Ring Trap (MRT, 多電極型ペニングトラップ) と呼ばれる装置を使う。MRT は、20 個以上の筒型電極から構成されており、ソレノイド磁場と合わせて用いることで、荷電粒子を軸方向には電場により、動径方向には磁場によって閉じ込める。

陽電子の蓄積は、図 1.3 および図 1.4 に示すような、以下の手順で行われる。

1. 電子プラズマの形成

- (a) 図 1.3 に示すように、トラップ内に電子ビームを入射させ、電子トラップ (ET) に電子を閉じ込めて、電子プラズマを形成する¹。
- (b) 電子ビームの入射によって、トラップ内残留ガスがイオン化される。そのイオンを陽電子トラップ (PT) に閉じ込める。

2. 陽電子の蓄積

- (a) 図 1.1 に示した低速陽電子源 ($^{22}\text{Na}\beta^+$ 線源および固体 Ne 減速材から成る) から陽電子ビームをトラップに輸送する。
- (b) 図 1.4 に示すように、陽電子を再減速板 (ここで、「再」減速板としているのは、上記 2.(a) で固体 Ne 減速材によって減速された陽電子を、再び減速させているからである。再減速の必要性については節 3.2.1 で述べる。) に入射し、エネルギー幅の小さい低速陽電子として真空中に再放出させる。

¹本研究において、ET に蓄積される電子集団は、非中性プラズマである条件 (デバイ長) \ll (電子集団の大きさ) を満たしている。

- (c) 再放出された陽電子は電子プラズマに入射し、クーロン散乱により減速され、充分減速された一部の陽電子は再減速板への再入射を逃れる。
- (d) 再減速板への再入射を逃れた陽電子は、トラップ装置内を往復運動し、PT 内に閉じ込められているイオンとの衝突によりさらに磁場軸方向のエネルギーを失って、PT 内に閉じ込められる。

この方法では、実験的には 2002 年に $360 e^+ / s / mCi$ を達成した [12]。これは、上記の「高励起状態のポジトリウムを解離する方法」の 30 倍以上の値である。

以下で、蓄積陽電子を利用した多価イオン冷却と反陽子生成について述べる。

1.1.2 多価イオン冷却

多価イオンを用いた衝突実験を考える。衝突実験には、大電流のイオンビームが得られる「ECR イオン源」がよく用いられる。これにより作られるイオンは、数 10eV 程度のエネルギー幅をもつ。よって、単色ビームとして扱えるのは、衝突エネルギーが数 10eV に比べて充分大きい場合である。一方、ポテンシャルエネルギーによる相互作用の研究を行うには、衝突エネルギーを数 eV 程度に下げ、運動エネルギーの影響を充分抑えてやることが重要である。しかし、そのような低速かつ単色な多価イオンビームはまだ作られておらず、ポテンシャルエネルギーによる相互作用の研究は充分に行われていない。

そこで、低速かつ単色な多価イオンビーム ($\sim eV$) を生成するために、ECR イオン源から供給される多価イオンを陽電子によって冷やし [4]、低速多価イオンビームとして引き出す。この多価イオンの陽電子冷却は次のように行われる。

1. 陽電子 ($10^6 - 10^8$ 個) を一様高磁場 (5T) 中のトラップ装置に閉じ込める。陽電子は質量が軽いため、シンクロトロン放射 (時定数 0.1sec) によって環境温度 (10 - 300K) にまで冷える。
2. 冷たい陽電子が閉じ込められたトラップ装置に、多価イオンを入射し閉じ込める。

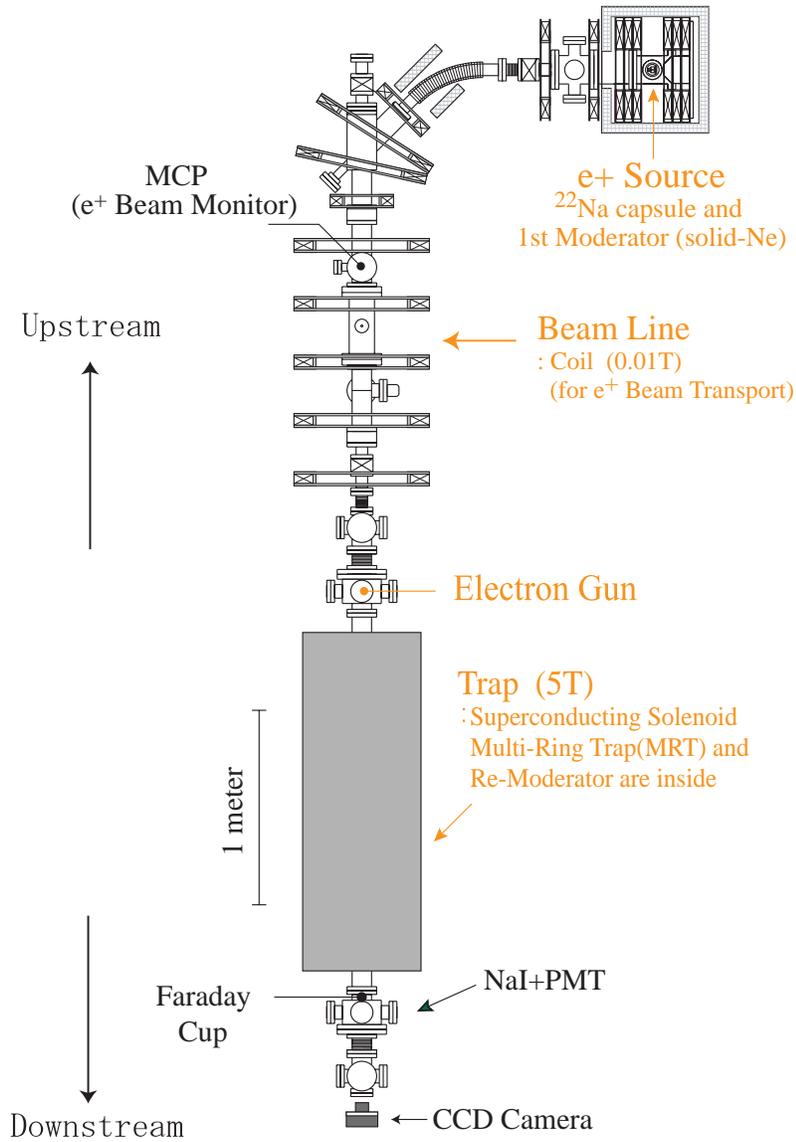


図 1.1: 陽電子蓄積実験に用いられる装置の全体図。低速陽電子源 (e^+ Source)、電子銃 (Electron Gun)、トラップ装置 (Trap) そしてビームライン (Beam Line) から成る。低速陽電子源はビームラインを介してトラップ内に導入される。

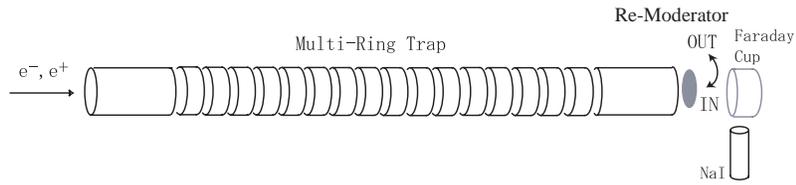


図 1.2: Multi-Ring Trap (MRT) の模式図。

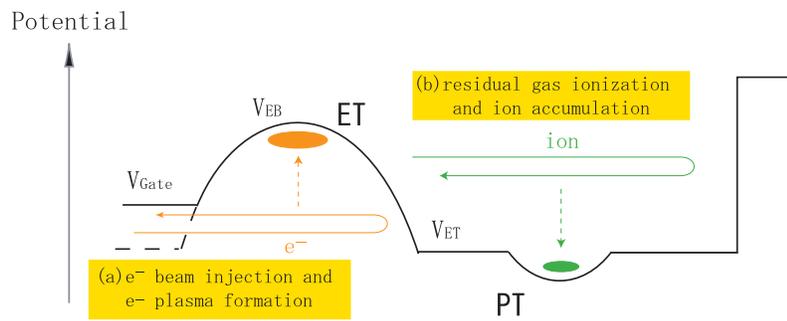


図 1.3: 電子プラズマの形成に用いられるトラップ装置の中心軸上静電ポテンシャル配置。

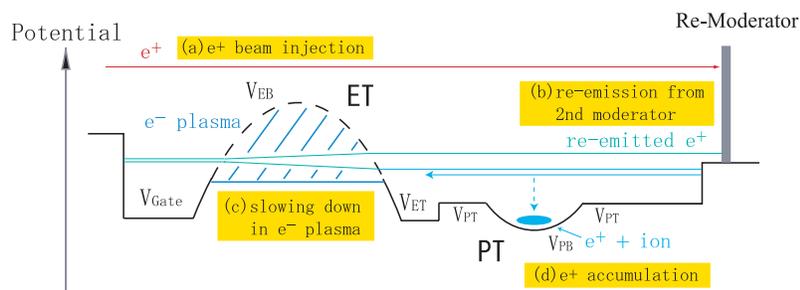


図 1.4: 電子プラズマを用いた陽電子蓄積に用いられるトラップ装置の中心軸上静電ポテンシャル配置。

3. 多価イオンは冷たい陽電子と衝突することにより、その運動エネルギーを陽電子に移行し、冷却される。
4. 陽電子は、イオンとの衝突によって温度が上昇するが、シンクロトロン放射によって再び冷え、最終的に陽電子も多価イオンも環境温度にまで冷える。

以上のような冷却法に用いられる冷却材として、同じくシンクロトロン放射で冷える電子を用いることが考えられる。しかし、その場合、多価イオンが冷えるに従いイオン - 電子間の再結合確率が大きくなるので、冷却中にイオンの価数が低下してしまう。よって、冷却材としては、イオンとの再結合を起こさない陽電子が望ましい。

すでに、冷やされた多価イオンを低速ビームとしてトラップから引きだし輸送するためのレンズ配置は、最適化済みである [13]。

1.1.3 反水素生成

反水素は陽電子と反陽子 (\bar{p}) からなる原子である。これは、高分解能レーザー分光による CPT 不変性の検証、反物質に作用する重力の観測、また陽電子プラズマと反陽子プラズマによる反水素生成過程などに興味を持たれている系である [5][6]。1996 年に CERN (欧州合同素粒子原子核研究機構) において、また 1998 年には Fermilab において、反水素が生成されたと報告されている [14][15] が、生成された反水素が高エネルギー ($2-5\text{GeV}/c$) であったため、上記のような興味深い研究を行うのは困難であった。

現在、CERN に設置されている AD (反陽子減速器) から反陽子ビームが供給されており、そこで反水素生成実験が行われている。2002 年に ATHENA グループと ATRAP グループが、それぞれ「冷たい」反水素の生成に成功した [5][6]。反水素を生成させるには、図 1.5 に示すようなポテンシャル (Nested Trap) を形成させ、陽電子と反陽子を同じトラップ装置に閉じ込める。シンクロトロン放射によって環境温度程度 (4 - 15K) に冷えた陽電子は、クーロン散乱により反陽子を冷やしていく [16]。やがて陽電子と反陽子の相対速度が充分小さくなると、反水素生成過程である radiative recombination および three body recombination [17] の起きる確率が高くなり [16]、反水素が生成し始める。

反水素生成確率は、トラップされている陽電子の数が多ければ多いほど

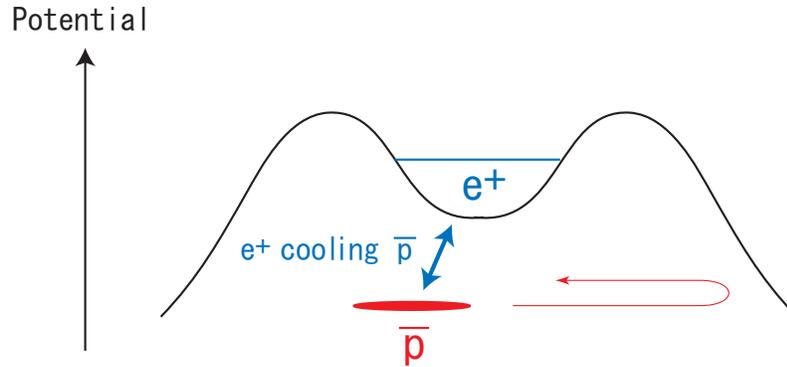


図 1.5: Nested Trap。陽電子と反陽子を同じトラップ装置に閉じ込める。

高くなる。よって、陽電子の蓄積効率を上げることは、反水素生成にとって鍵となる。CERN で反水素生成実験を行っている各グループ (ATHENA、ATRAP) が採用している陽電子蓄積法は、次のとおりである。

1. ATHENA

N_2 ガスをバッファとし (節 1.1.1 参照) 1.5×10^8 個の陽電子を捕獲して、それを超高真空下のトラップに輸送する (捕獲した陽電子の 50 % が輸送される) [5]。

2. ATRAP

高励起状態のポジトロニウムを解離し (節 1.1.1 参照) 1.7×10^6 個の陽電子を直接超高真空下で蓄積する [6]。

である。ATHENA は、蓄積効率の高い「 N_2 ガスバッファを用いて陽電子を蓄積する方法」をとっているが、節 1.1.1 で述べたように、超高真空が得られないという問題がある。それを解決するために、反陽子蓄積、反水素蓄合成用のトラップを超高真空下に用意し、陽電子を輸送している。

1.2 本研究の目的

節 1.1 で述べたように、我々は、超高真空下で高い陽電子蓄積効率を達成するため、高密度電子プラズマを陽電子の冷却材として用いる陽電子蓄積法を開発している。現在、この陽電子蓄積の各段階における効率は次のとおりである。

- A. β^+ (陽電子) 線源から放出した陽電子を、固体 Ne 減速材により低速陽電子ビームに変換する： $\sim 0.2\%$
- B. トラップへ陽電子ビームを輸送する： $\sim 50\%$
- C. トラップに入射した陽電子を蓄積する： $\sim 0.4\%$

本研究では、特に C. における陽電子蓄積効率の改善を目指し、トラップ装置内に取り付けられている再減速板の陽電子再放出率に注目した。現在取り付けられている再減速板よりも適切な処理を施した再減速板を新しく用意し交換することで、陽電子再放出率の向上が見込めるからである。

再減速板の陽電子再放出率を向上させることで、陽電子蓄積効率の改善を行なうことが本研究の目的である。

第2章 陽電子蓄積装置

この章では、節 1.1.1 で述べた陽電子蓄積に関する装置について説明する。

2.1 Multi-Ring Trap

本研究では、大量の荷電粒子を安定にトラップすることを想定している。そこで、荷電粒子トラップ装置として Multi-Ring Trap (MRT) を採用した [18]。

MRT は複数の同軸円筒電極から成っており、各電極にトラップの中心から距離の二乗に比例したバイアス静電圧をかけることによって、図 2.1 に示すようなハーモニックポテンシャルをトラップ装置中心軸付近に形成させることができる。また、超伝導ソレノイドを用い、トラップ内に一様静磁場をかけることができる。これらによって、荷電粒子の軸方向および動径方向運動を制限し、閉じ込めの安定性を保証している。また、バイアスをかける円筒電極の個数を増やすことで、トラップ領域を大きくし、多量の荷電粒子を閉じ込めることができる。

本研究で用いる MRT の模式図および写真を図 2.2 に示す。MRT は 23 個の同軸円筒電極から成っている。各電極の内径は 38mm で長さが 20mm であり、3mm 間隔で配置されている。各電極は電氣的に絶縁されており、それぞれ独立に電位を与えることができる。この MRT を超伝導ソレノイド中に設置し、MRT 内に 5T の一様静磁場をかける。

ここで、トラップ装置の模式図および外観を図 2.3 および図 2.4 に示す。

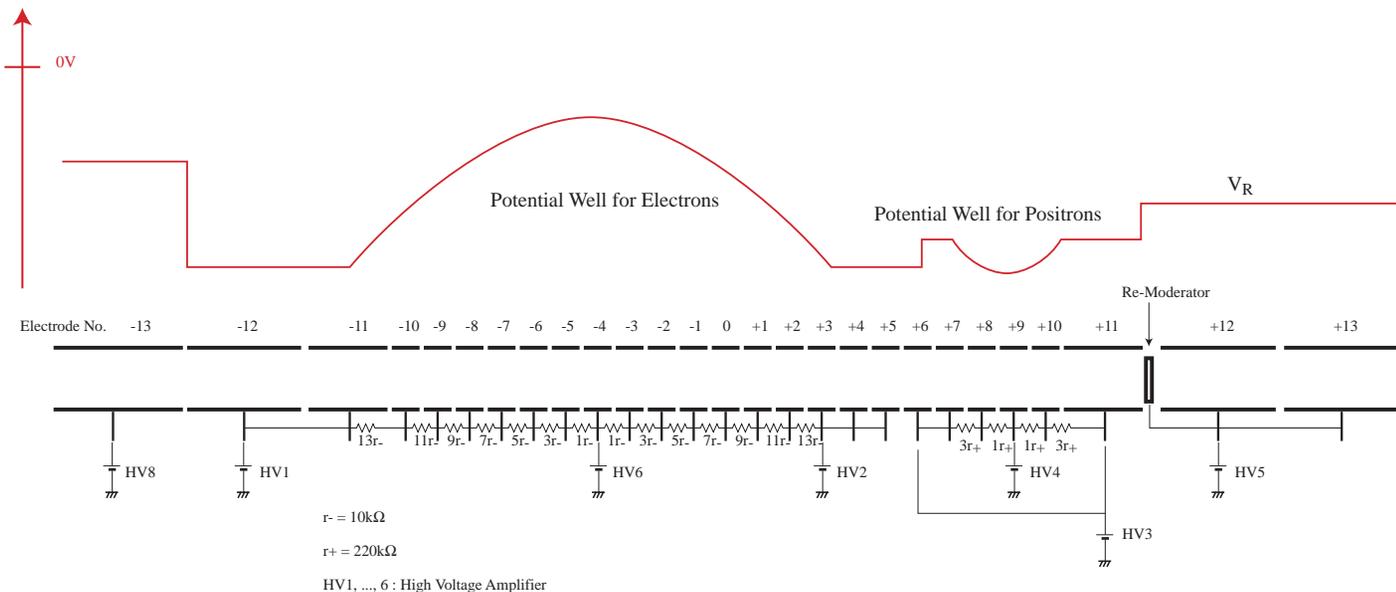


図 2.1: 電子・陽電子蓄積実験におけるポテンシャル配置および抵抗ネットワーク (典型例)

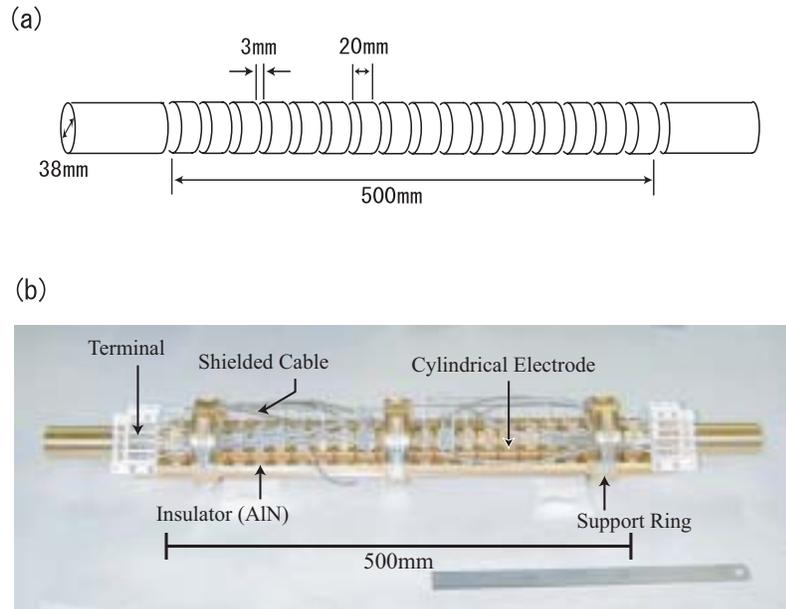


図 2.2: 同軸円筒電極群 MRT。(a) 模式図 (b) 写真。

2.2 再減速板ホルダーおよび Faraday Cup

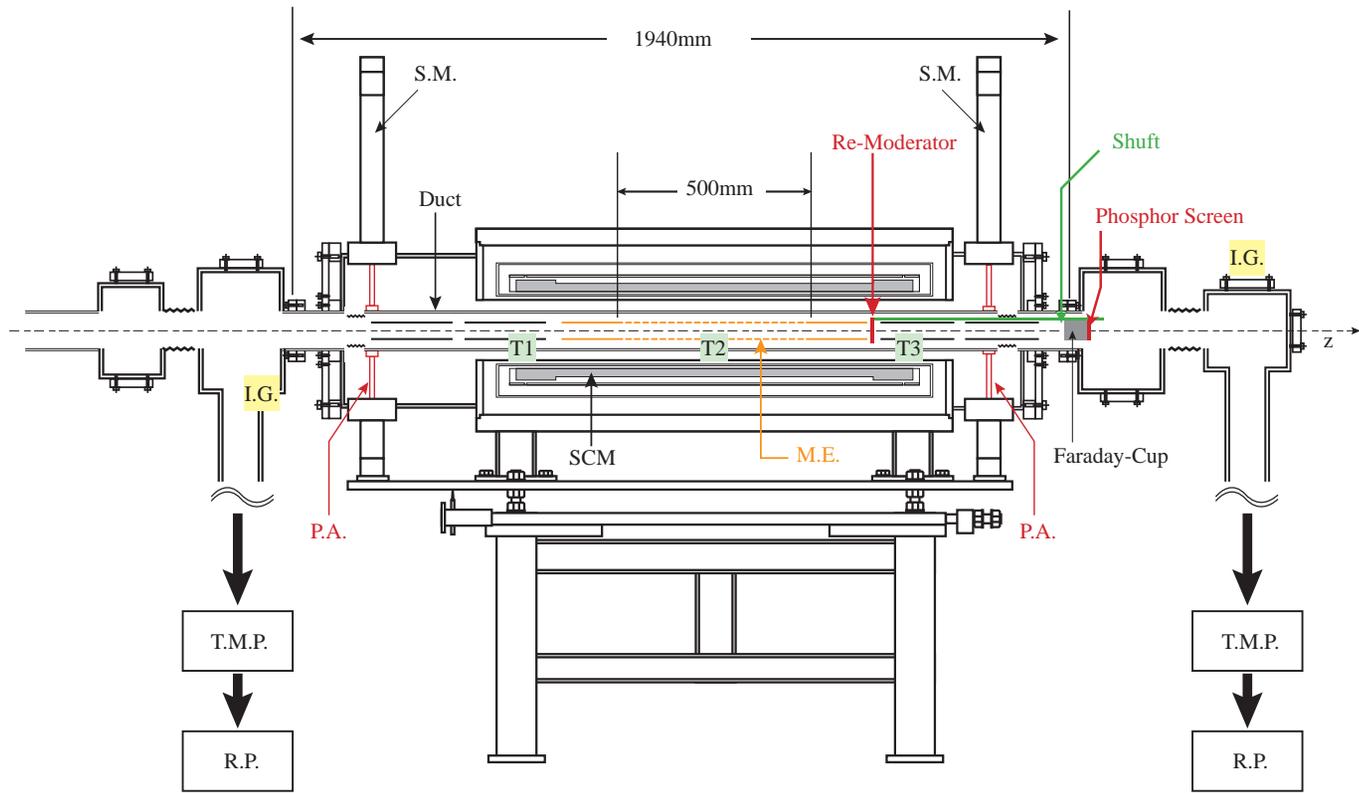
2.2.1 再減速板ホルダー

再減速板およびそれを支えるホルダーは、図 2.3 に示すように、MRT の下流側に設置されていて、付近の磁場は 5T である。このホルダーには駆動装置が備えてあり、陽電子蓄積時には MRT 軸上に配置し (IN)、MRT 下流に電子や陽電子を引き出すときには軸上から外す (OUT) ことができる。再減速板ホルダーの模式図および写真を図 2.5 に示す。

2.2.2 Faraday Cup および蛍光膜

Faraday Cup は、図 2.3 に示すように、MRT 下流 (常温部分) に設置されていて、付近の磁場は ~ 0.05 T である。Faraday Cup に陽電子をぶつけて対消滅させ、生成する γ 線をカウントすることにより、陽電子数測定に使用できる。また、Faraday Cup の底には直径 26mm の蛍光塗料を塗布し、電子プラズマ径を直接観測するのに用いられている。Faraday Cup 設置付近の様子を図 2.6 に示す。

図 2.3: トラップ装置の断面図。



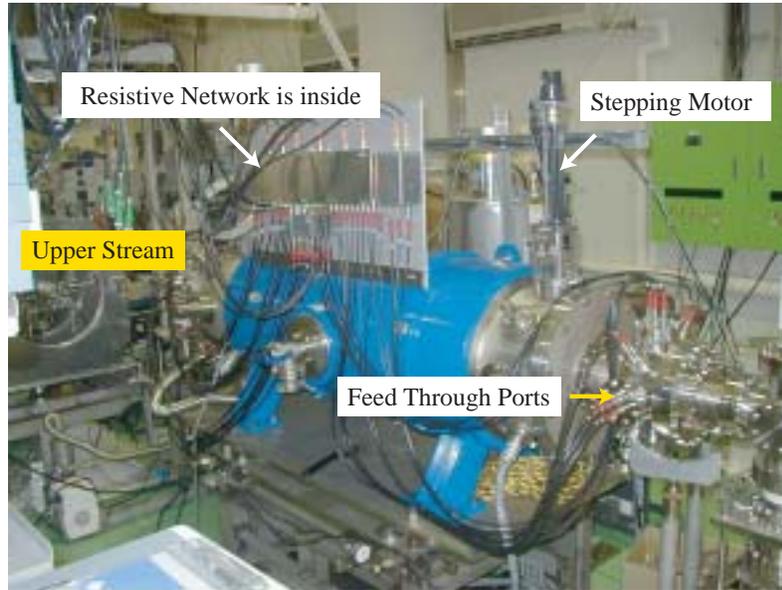
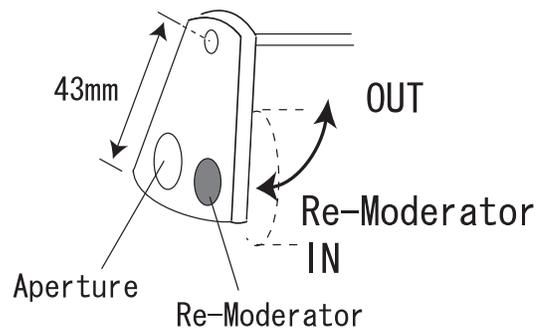


図 2.4: トラップ装置の外観。

2.3 低速陽電子源

低速陽電子源 [11] は、図 1.1 に示したように、MRT に接続されている
ビームライン上流に設置されている。低速陽電子源は、 β^+ 線源の ^{22}Na
(2003 年 11 月現在、17 mCi) と一次減速材である固体 Ne から構成され
ている。ここで生成された陽電子ビームはビームラインによって MRT に
輸送される (詳細は節 3.2.1 で述べる)。

(a)



(b)

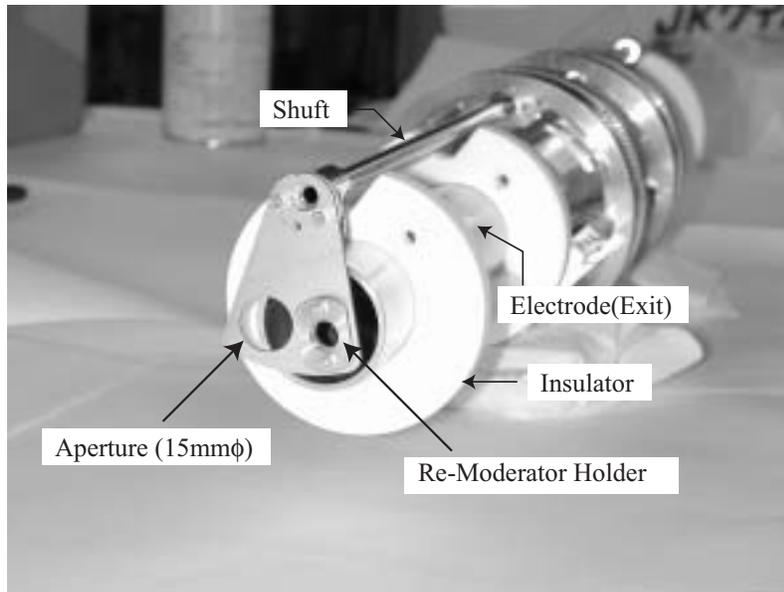


図 2.5: 再減速板ホルダー。(a) 模式図 (b) 写真。

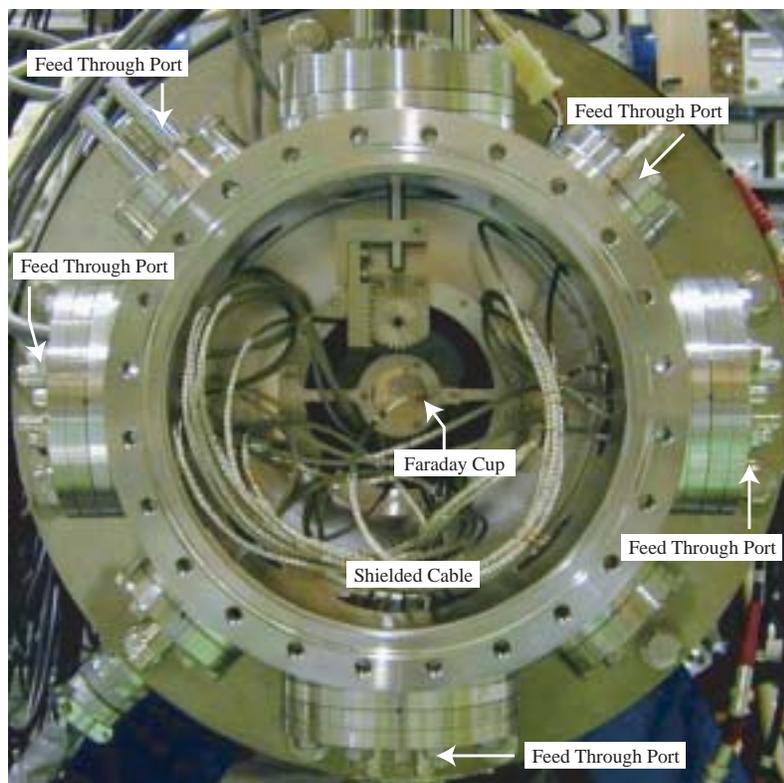


図 2.6: Faraday Cup 設置付近。トラップ装置内部を下流からみた様子である。

第3章 超高真空下における陽電子の蓄積法

超高真空下における陽電子蓄積は、節 1.1.1 で述べたように、次の手順で行う。

1. 電子プラズマの生成。
 - (a) トラップ内に電子ビームを入射させ、電子トラップ (ET) に電子を閉じ込めて、電子プラズマを形成させる。
 - (b) 電子ビーム入射の際、トラップ内の残留ガスがイオン化される。生成されたイオンは陽電子トラップ (PT) に閉じ込められる。
2. 陽電子の蓄積。
 - (a) 低速陽電子源にて生成された陽電子ビームをトラップ装置に輸送する。
 - (b) 陽電子は再減速板に入射し、エネルギーのそろった低速陽電子として真空中に再放出される。
 - (c) 再放出した陽電子は電子プラズマに入射し、クーロン散乱により減速され、充分減速された一部の陽電子は再減速板への再入射できず、電子プラズマと再減速板の間を往復運動する。
 - (d) 電子プラズマと再減速板の間を往復運動している陽電子は、イオンとの衝突によりさらに磁場軸方向の運動量を失い、PT 内に閉じ込められる。

3.1 電子プラズマの形成

電子プラズマは冷たい陽電子を生成するのに欠かせない「冷却材」である。ここでは、電子プラズマの形成および蓄積について説明する。

3.1.1 電子プラズマの形成法

電子プラズマの形成は、図 3.1 に示すように、以下の手順で行う。

1. 電子トラップ (ET) の上流側の電位 (V_{Gate}) を上げ、電子ビームが入射できるよう入口をつくる。そこに MRT 上流側に設置されている電子銃 (カソード電位 $V_{Cathode} = -1040$ V) から電子ビームを入射させ、電子プラズマを形成させる。このとき、残留ガスのイオン化も起きる。生成されたイオンは、陽電子トラップ (PT) に捕まる。
2. 適当な時間電子ビームを入射させたら、 V_{Gate} を元にもどし、ET 内への電子ビームの流入を遮断する。ET 内に形成された電子プラズマは、ET に閉じ込められる。

ET 内に入射する電子ビームの流入量は、電子ビーム引きだし電極電位 V_{Grid} および V_{Gate} により調節する (電子ビーム放出時の電子銃カソード電位 $V_{Cathode} = -1040$ V は固定)。図 3.2 に電子銃の模式図を示す。

3.1.2 蓄積された電子数の測定

ET 内に閉じ込められた電子の数を測定するには、図 3.3 にあるように、ET の下流側の縁 V_{ET} を開けることで蓄積された電子を引き出し、再減速板に入射させ、その電流値を測ることにより行う。測定回路を図 3.4 に示す。

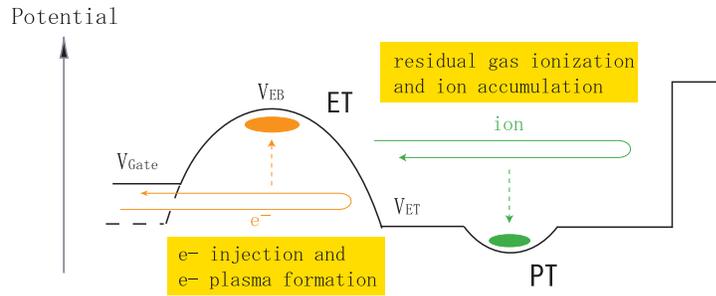
再減速板に到達した電子の電流 (dQ/dt 、 Q は到達総電気量) は、負荷抵抗 R_L により電圧 $V(t)$ に変換される。よって、時間 t で積分すれば

$$Q = \frac{1}{R_L} \int V(t) dt \quad (3.1)$$

となり、結局、蓄積総電子数 N_{e^-} は

$$N_{e^-} = \frac{Q}{e} = \frac{1}{eR_L} \int V(t) dt \quad (3.2)$$

(1) e^- Beam Injection



(2) e^- Plasma confinement

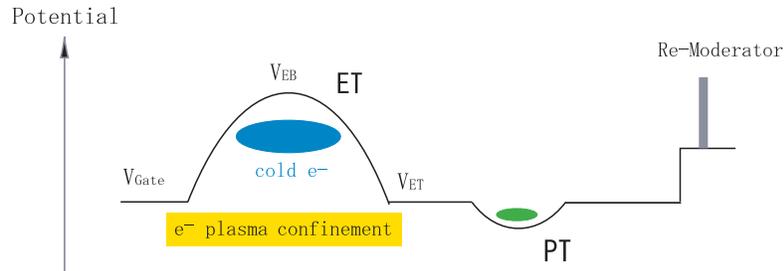


図 3.1: 電子蓄積実験のトラップ装置中心軸上ポテンシャル配置。(1) 電子ビーム入射と電子プラズマ形成。ETの上流側の縁 V_{Gate} を開け、ET内に電子を入射させ、電子プラズマを形成させる。このとき、残留ガスのイオン化も起きる。イオンはPT内に閉じ込められる。(2) 電子の閉じ込め。適当な時間、電子を流入させたら、 V_{Gate} を閉めて電子プラズマを閉じ込める。

Cathode

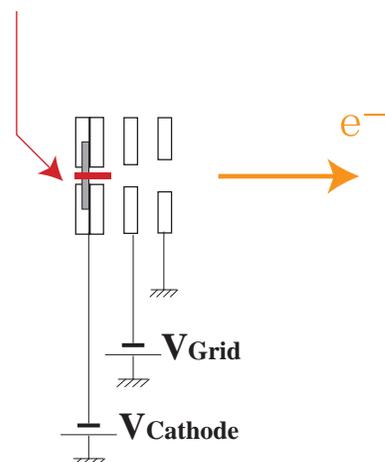


図 3.2: 電子銃の模式図。

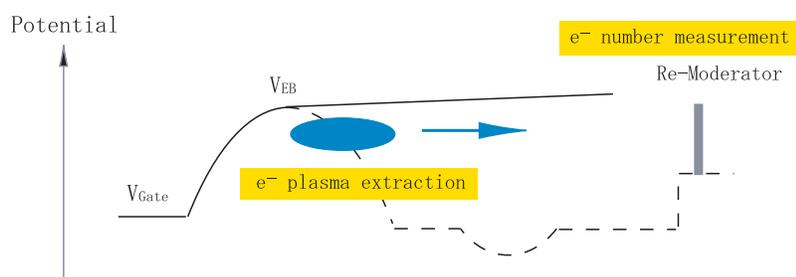


図 3.3: 電子プラズマ構成電子数の測定。ET の下流側の縁 V_{ET} を開け、蓄積された電子を下流側に引き出す。それを再減速板で受け止め、電子数を求めることができる。

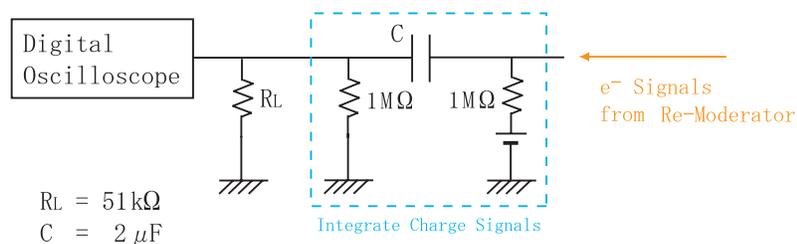


図 3.4: 蓄積電子数の測定回路。

から求めることができる。 e は電気素量である。本研究では $R_L = 51 \text{ k}\Omega$ と設定しているため、 $1 \mu\text{Vs} = 1.2 \times 10^8 \text{ electrons}$ の関係が成立する。

3.1.3 ポテンシャル井戸の深さおよび電子ビーム入射時間と蓄積電子数の関係

電子トラップ ET の深さ $V_{e\text{-well}} = 450\text{V}$ 、 600V 、 700V 、 850V 、 1000V の場合それぞれについて、電子ビーム入射時間と蓄積される電子数との関係を調べた。 $V_{e\text{-well}}$ は $V_{e\text{-well}} \equiv V_{EB} - V_{ET}$ で定義される。ここで、 V_{EB} は ET の底の電位である。 $V_{e\text{-well}}$ は V_{EB} を変化させることで調節した。実験結果を図 3.5 に示す。横軸にトラップ装置への電子ビーム入射時間を取り、縦軸に蓄積総電子数をとった。この実験では入射電子ビーム電流 $I_{e\text{-in}} = 2 \sim 3 \mu\text{A}$ とした。

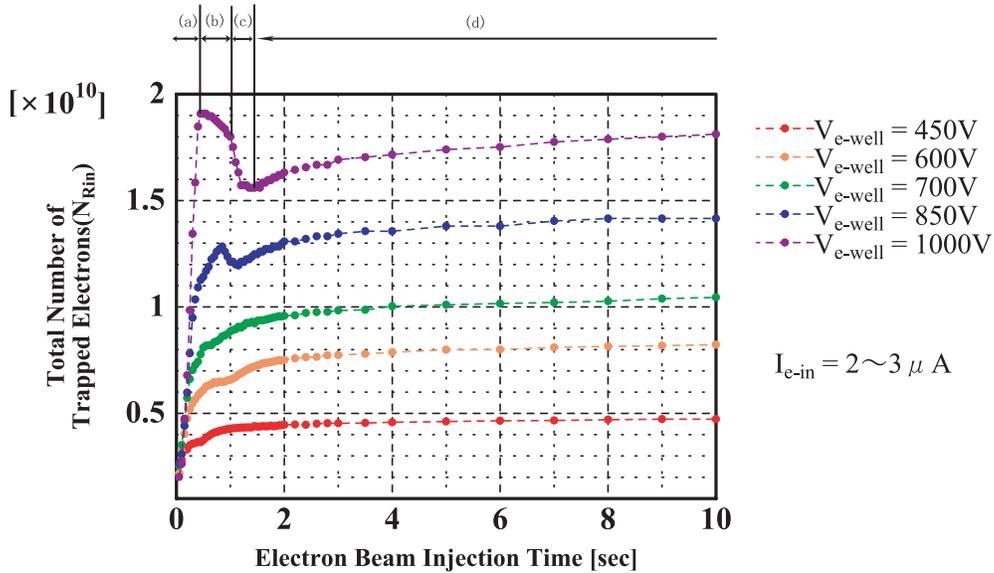


図 3.5: 電子トラップ (ET) の深さおよび電子ビーム入射時間と蓄積電子数の関係。

図 3.5 を見ると、電子ビームの入射時間 $t_{e\text{-in}}$ に対して、蓄積電子数のプロットは 4 つの領域に分類できることが分かる。まず電子ビームが ET 内に流入するにつれ蓄積電子数が急激に増加する領域 (a) がある。しかし、ある時間電子が流入すると、蓄積電子数はある数で頭打ちになり、わ

ずかに減少 ($V_{e^- \text{ well}}$ が大きい場合) もしくは横ばい ($V_{e^- \text{ well}}$ が小さい場合) になる領域 (b) に入る。続いて、急激な勾配をもって減少する領域 (c) になる ($V_{e^- \text{ well}}$ が大きい場合)。その領域をこえると、わずかに蓄積電子が増加していくものの急激な変化は見られない安定な領域 (d) に入る (入射時間 3 秒以上)。よって、電子ビームの入射時間を 3 秒以上に設定すれば、ET の深さ $V_{e^- \text{ well}}$ を変化させることにより蓄積電子数を安定に制御できると期待される。

電子蓄積時の実験パラメータの 1 例を表 3.1 に示す。

磁場強度	5T
トラップ領域温度	10K
電子入射時のポテンシャル	
V_{Gate}	-1035V
V_{EB}	-200V
V_{ET}	-1200V
電子蓄積時のポテンシャル	
$V_{Gate} = V_{ET}$	-1200V
V_{EB}	-200V
$V_{e^- \text{ well}} = V_{ET} - V_{EB}$	1000V
$V_{Cathode}$	-1040V
V_{Grid}	-1037V
$I_{e^- \text{ in}}$	$2\mu\text{A}$

表 3.1: 電子蓄積実験のパラメータの 1 例。

3.2 陽電子の蓄積

3.2.1 低速陽電子源からの陽電子の輸送

低速陽電子源は、図 1.1 で示したように、MRT に接続しているビームライン上流に設置されている。低速陽電子源は、 β^+ 線源の ^{22}Na と一次減速材である固体 Ne から成る。

低速陽電子源で生成された陽電子ビーム ($\sim 1\text{eV}$) は、輸送磁場 0.01T のビームラインによって、5T 磁場中の MRT に送られる。陽電子が断熱的に輸送されるならば、輸送中は断熱不変量である陽電子の磁気モーメ

ント $\mu = \frac{1}{2}mv_{\perp}^2/B$ は一定である。ここで、 m は陽電子の質量、 v_{\perp} は陽電子の速度の磁束密度 B に垂直な成分である。陽電子がビームラインから MRT に入射する際、 B は 500 倍に増加するので、 μ が一定であるためには $E_{\perp} = \frac{1}{2}mv_{\perp}^2$ も 500 倍に増加しなければならない。陽電子は、MRT に入射する前 E_{\perp} は $\sim 1\text{eV}$ であることが知られているため、運動エネルギーが保存されることを考えると、陽電子を MRT 内に供給させるには $\sim 1\text{keV}$ まで加速させてやらなければならない [11]。このとき、実際は、MRT に入射する陽電子のうち $\sim 50\%$ が MRT 内に流入する。これは MRT 内に入射した陽電子の磁場軸方向エネルギーが $0 \sim 1\text{keV}$ 程に広がってしまうことを意味している。

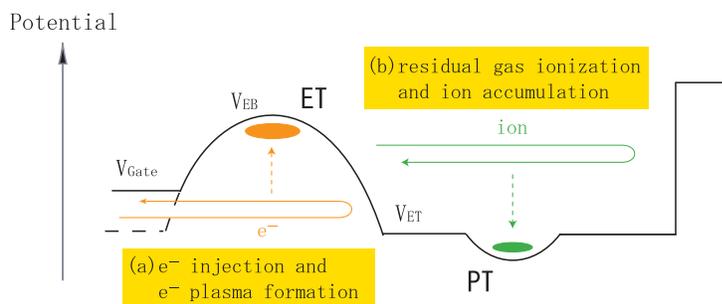
陽電子蓄積を効率良く行うには、陽電子の磁場軸方向エネルギー広がりをできるだけ小さくすることが求められる。そこで、トラップ内 5T 領域に再減速板を用意し、エネルギー広がり小さい陽電子ビームを得る。本研究ではタングステン結晶の陽電子再放出過程を利用し、それを再減速板として用いる。

3.2.2 陽電子の蓄積方法

陽電子の蓄積は、図 3.6 に示すように、以下の方法で行う。

1. 電子プラズマの生成 (節 3.1)。
2. 陽電子蓄積。
 - (a) MRT を経由して、陽電子ビームを再減速板に入射する。
 - (b) 再減速板に入射した陽電子は、再減速板とほぼ垂直な方向に、エネルギー幅の狭い低速の陽電子ビームとして再放出される。
 - (c) 再放出された陽電子は、電子プラズマに入射し、電子との衝突を経てそのエネルギーを低下させていく。
 - (d) 充分減速された陽電子は、再び再減速板に到達することなく、トラップ装置内を往復運動する。その間に、PT に蓄積されているイオンとの衝突によってエネルギーを失い、PT 内に捕獲され、さらにシンクロトロン放射によって冷却される。

(1) e^- Plasma Formation



(2) e^+ Accumulation

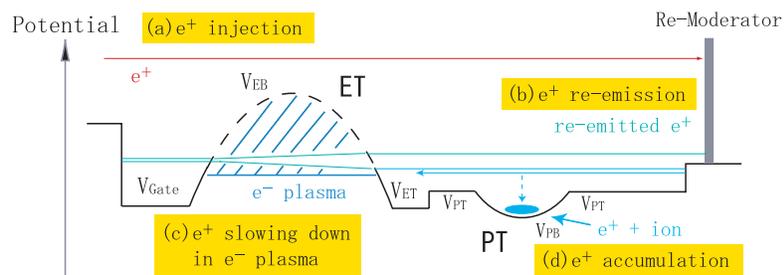


図 3.6: 陽電子蓄積実験のトラップ装置中心軸上ポテンシャル配置。(1) 電子プラズマの形成 (節 3.1)。(2) 陽電子蓄積。陽電子は再減速板、電子プラズマによる減速を経て、またイオンとの衝突により減速されPTに捕まる。捕まった陽電子は、シンクロトロン放射により冷えていく。

3.2.3 蓄積陽電子数および入射陽電子数の測定方法

蓄積陽電子数 N_T の測定

蓄積された陽電子の個数は次のようにして求める。まず、再減速板を OUT にしておく。MRT 下流に陽電子を引き出し、MRT 下流出口の引き込みバイアス $V_{CF} = -3 \text{ kV}$ がかけてある Faraday Cup に入射させる（このときの PT - Faraday Cup 間の輸送効率は、0.61 である）。陽電子は Faraday Cup で対消滅するが、そのとき放出される消滅 γ 線を図 3.7 で示すような測定系でカウントし、蓄積された陽電子数を測定する。

蓄積された陽電子を MRT 下流へ引き出すには、PT の底 (V_{PB}) を MRT 出口のポテンシャルより上げてやれば良い。このときの「 V_{PB} 上昇速度」が、陽電子の引き出し速度を決める。 V_{PB} は高電圧電源 HV4 によってバイアスがかけられているが、時定数回路 (R-C 回路) を用い、その時定数 τ を変化させることで V_{PB} 上昇速度をゆるやかにできる。そうすることによって、陽電子が Faraday Cup に引き出される時間幅を長くとり、陽電子の消滅 γ 線を Pile Up することなくカウントする。

MRT 内に入射した陽電子数 N_B の測定

入射陽電子数の測定は、陽電子蓄積とは独立に行っている。再減速板を OUT にした状態で陽電子ビームを MRT 内に入射させる（ただし、他の条件は陽電子蓄積時と同様である。すなわち、ET および PT の両ポテンシャル井戸をつくり、ET に電子プラズマを形成させる。そこに、再減速板を OUT にした状態で、陽電子ビームをトラップに入射させる。）。このとき、電子プラズマを通り抜け Faraday Cup に到達した陽電子ビームの消滅 γ 線を測定することで N_B を求める。

陽電子の蓄積効率

MRT における陽電子蓄積効率 η を

$$\eta = \frac{N_T}{N_B} \quad (3.3)$$

で定義する。ここで、 N_T は PT 内に蓄積された全陽電子数、 N_B は MRT 内に入射した全陽電子数である。

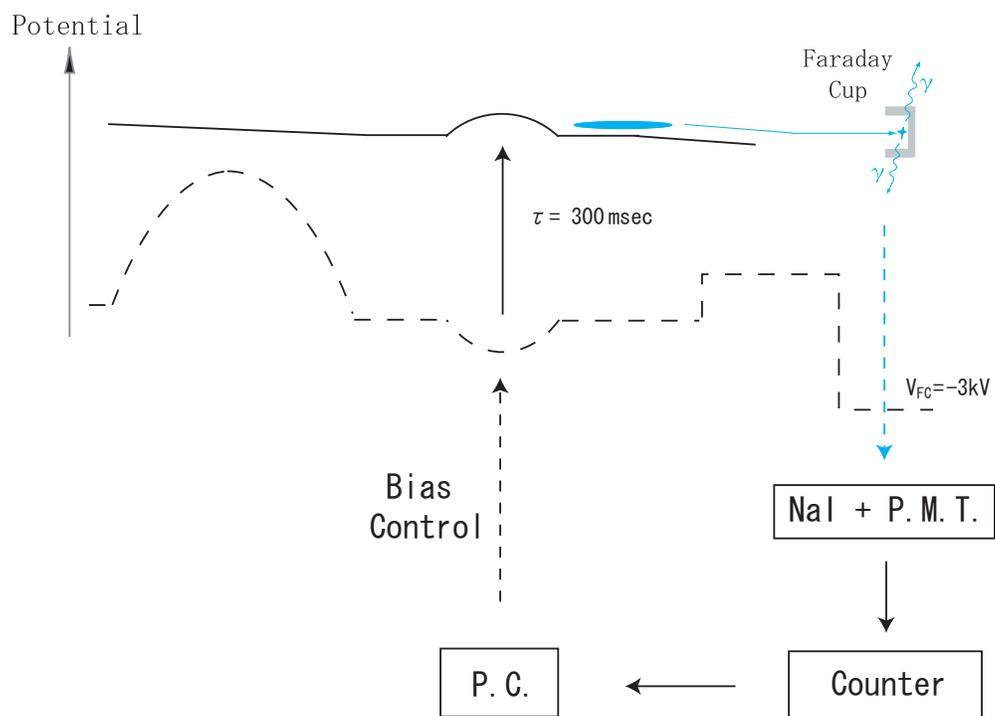


図 3.7: 陽電子数測定系。

3.2.4 電子プラズマによる陽電子の減速

再減速板から再放出された陽電子が、再び再減速板に衝突し対消滅しないためには、電子プラズマによって充分減速されることが必要である。

図 3.8 に、電子プラズマ中を飛行する陽電子のエネルギー損失と陽電子が電子プラズマ中を通過する距離 L との関係、および $S \equiv n_{e^-} L$ (n_{e^-} は電子プラズマの密度) との関係を示す。

これは、次のようなモデルにより計算している。電子と陽電子の二体衝突によるクーロン散乱のみ考える。ただし、電子の速度はボルツマン分布に従っているとす。また、衝突パラメータに関する積分はデバイ長まで行なう。エネルギー損失は、衝突後の磁場軸方向エネルギーの減少を平均したものによって与えられる [19]。

図 3.8 (a) は、電子プラズマ中で磁場軸方向エネルギーを失って電子温度程度にまで減速されるまでの、陽電子の飛行距離を表す。各ラインが縦軸と交わる点は電子プラズマ中への陽電子の入射エネルギー K_{e^+} を表し、横軸と交わる点は電子プラズマ中で陽電子がほぼ熱化されるまでの飛行距離を表す。図 3.8 (b) は横軸を $S \equiv n_{e^-} L$ にとった図である。ここで、 n_{e^-} は電子プラズマ密度、 L は電子プラズマ中での陽電子の飛行距離である。

K_{e^+} は次のように表される。

$$K_{e^+} = e(V_R - V_{e^-}) + E_R \quad (3.4)$$

ここで、 V_R は再減速板電位、 V_{e^-} は電子プラズマ内部の空間電位、 E_R は陽電子が減速材から放出されるとき運動エネルギーである。減速材がタンゲステンの場合、 E_R は $0 \sim 3 \text{ eV}$ 程度の分布を持っていることが知られている [20] [21]。 K_{e^+} は V_R に依存するため、 V_R は陽電子の電子プラズマ中での減速ひいては陽電子の蓄積に大きく影響を与える。図 3.9 は、再減速板からの再放出陽電子が電子プラズマに入射し、ET 上流のポテンシャルに跳ね返されて戻ってくる状況を、 V_R と V_{e^-} の大小関係で場合分けした図である。(a) $V_R < V_{e^-}$ のとき、再放出陽電子は電子プラズマに入射できずに再減速板に再入射、もしくは入射できたとしても $V_R < V_{e^-}$ であるために再び再減速板に入射してしまう。よって、対消滅してしまい蓄積されない。逆に V_R が非常に大きいとき、つまり (c) $V_R \gg V_{e^-}$ のときは K_{e^+} が大きくなり、陽電子は電子プラズマ中で充分減速されない。このとき、陽電子の電子プラズマ中での磁場軸方向エネルギー損失 δE は E_R より小さくなり、陽電子は再減速板に再入射してしまう。よって、対

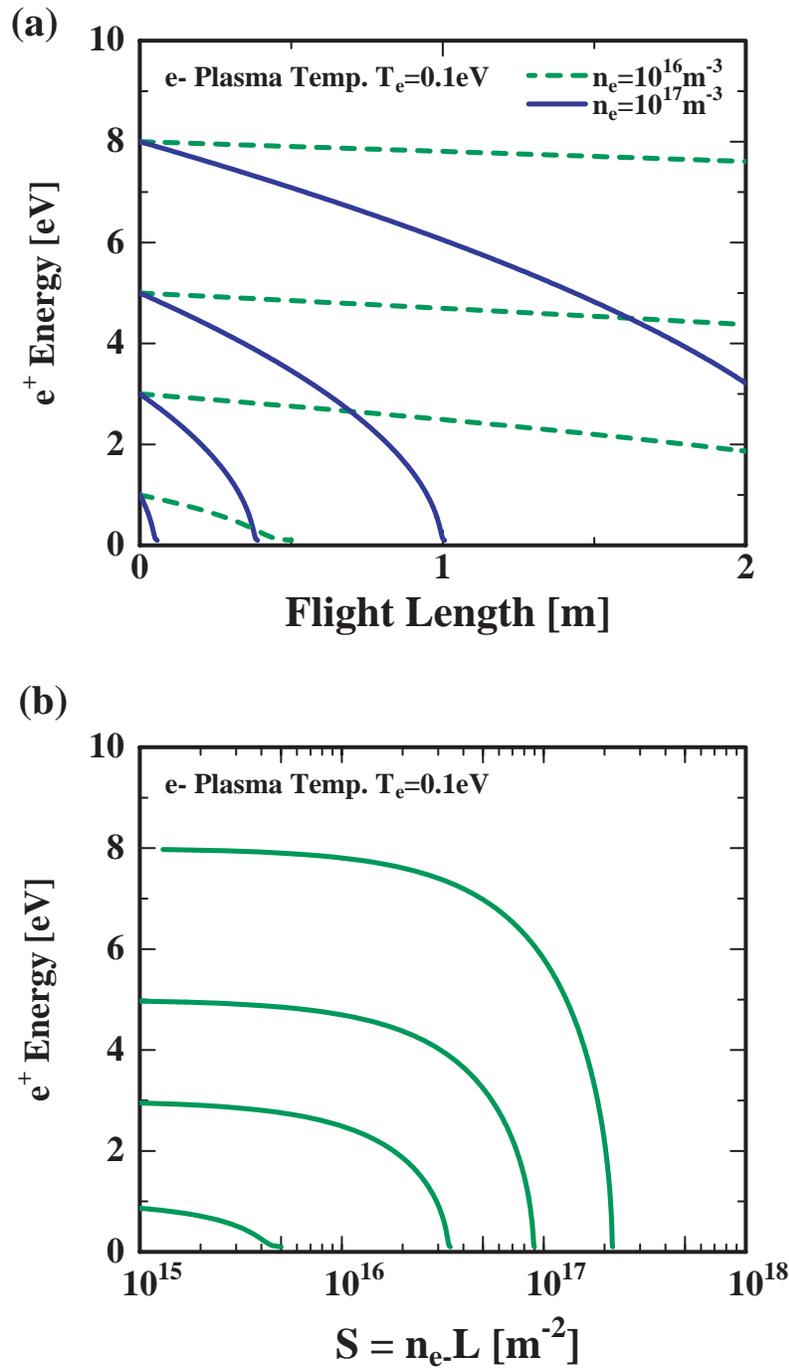


図 3.8: 電子プラズマ中を飛行する陽電子のエネルギー損失と陽電子が電子プラズマ中を通過する距離 L との関係、および $S \equiv n_e \cdot L$ (n_e は電子プラズマの密度) との関係。

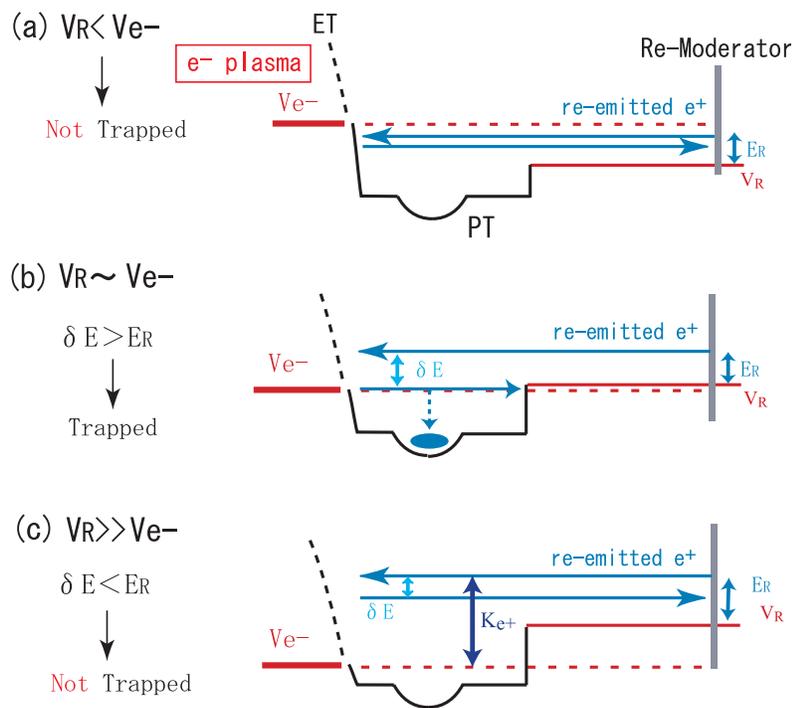


図 3.9: 再放出陽電子の電子プラズマへの入射。

消滅して蓄積されない。もしも、 V_R が V_{e+} に比べ、小さくもなく大きくなりすぎてもいけないとき、すなわち (b) $V_R \sim V_{e+}$ であるときは、陽電子は電子プラズマに入射した K_{e+} が小さいため充分減速される。このとき、 $\delta E > E_R$ となり、陽電子は再減速板に再入射せずに陽電子トラップ PT に蓄積される。よって、陽電子を蓄積するには V_R を調節し、

$$V_R \sim V_{e-} \quad (3.5)$$

とすれば良いと考えられる。このとき、式 3.4 より $K_{e+} \sim E_R$ 、つまり陽電子は再放出エネルギーを持って電子プラズマに入射する。

ここで、例として $V_R \sim V_{e-}$ となり $K_{e+} \sim E_R \sim 3 \text{ eV}$ となる場合を考える。この陽電子が、電子プラズマに入射し充分減速されるには、図 3.8(b) より $S \sim 2 \times 10^{16} \text{ m}^{-2}$ 必要である。よって、陽電子が電子プラズマを一往復する間に充分減速されるには、電子プラズマの柱密度 $\sigma_P = n_{e-} L_{e-} = n_{e-} L/2 = S/2 \sim 1 \times 10^{16} \text{ m}^{-2}$ であればよい。ここで、 L_{e-} は電子プラズマの長さである。

3.2.5 陽電子蓄積における再減速板電位の最適化

本研究では、節 3.2.4 で述べたように、電子プラズマへの陽電子入射エネルギー K_{e+} を最小にすることが陽電子蓄積効率 η を上げる重要な因子のひとつである。 K_{e+} は再減速板電位 V_R を変化させることで調節できる。すなわち、 V_R を変化させながら陽電子蓄積効率 η を測定することで、 η の最大値 η_{Max} を見出すことができる。このとき、 $V_R \sim V_{e-}$ であると考えられる。

例として節 3.2.7 の図 3.10(1) を挙げる。効率 η は $V_R = -1000 \text{ V}$ 付近で鋭く立ち上がり、 $V_R = -985 \text{ V}$ 付近で最大値をとって、そこから高電位になるにつれ裾を引きながら減少していく様子が見られる。これは節 3.2.4 の図 3.9 に対応させて解釈することができる。すなわち、 $V_R \sim -1000 \text{ V}$ 以下の $\eta \sim 0$ となる領域は図 3.9(a)、 $V_R \sim -985 \text{ V}$ における η が最大値となる付近は図 3.9(b)、 $V_R \sim -985 \text{ V}$ 以上の η が減少していく領域は図 3.9(c) にそれぞれ対応していると考えられる。

ここで、陽電子蓄積の実験パラメータの 1 例を表 3.2 に挙げる。

磁場強度	5T
トラップ領域温度	10K
電子蓄積時のポテンシャル	
$V_{Gate} = V_{ET}$	-1200V
V_{EB}	-200V
$V_{e^-well} = V_{EB} - V_{ET}$	1000V
陽電子蓄積時のポテンシャル	
V_{PT}	$V_R - 50V$
V_{PB}	$V_R - 100V$
$V_{e^+well} = V_{PT} - V_{PB}$	50V

表 3.2: 陽電子蓄積実験のパラメータの1例。PTの深さ V_{e^+well} はPTの縁 V_{PT} と底 V_{PB} の差で与えられる。 V_R は再減速板電位である。

3.2.6 陽電子ビーム径

陽電子が効率良く電子プラズマで冷却されるためには、再減速板からの再放出陽電子がなるべく多く電子プラズマに入射することが求められる。一方、電子プラズマは動径方向にポテンシャルが異なるため、電子プラズマに入射する陽電子ビーム径が大きいと各陽電子の感じるポテンシャルに幅がでてきてしまい、陽電子蓄積効率 η が落ちると考えられる。よって、入射陽電子ビーム径は電子プラズマに比べ、十分に小さいことが望ましい。

再減速板からの再放出陽電子の角度広がりが小さい(タングステンの場合 ~ 10 度 [22]) ことを考えると、MRT 入射時の陽電子ビーム径 r_{e^+} が電子プラズマ径 r_{e^-} (本研究では ~ 1 mm) より小さければ、電子プラズマに入射する再放出陽電子ビーム径も r_{e^-} より小さいことが期待できる。つまり、

$$r_{e^+} \ll r_{e^-} \quad (3.6)$$

であればよい。

図 1.1 に示したように、低速陽電子源 - MRT 間の陽電子ビームラインには MCP (ビームラインへの出し入れが可能) が取り付けられており、陽電子ビーム径をモニターできる。MCP が取り付けられている位置での輸送磁場は 0.01 T であり、MRT 内では磁場 5 T であるので、MCP 位置での陽電子ビーム径 r_{e^+MCP} と MRT 内での陽電子ビーム径 r_{e^+} には次の

関係が成り立つ。

$$r_{e+} = r_{e+MCP} \times \sqrt{\frac{0.01}{5}} \quad (3.7)$$

MCP で観測された陽電子ビームは、楕円形をしており、 $2 \times$ (長径) は 5 mm 程度なので、MRT 内では 0.2 mm 程度と見積もられる。

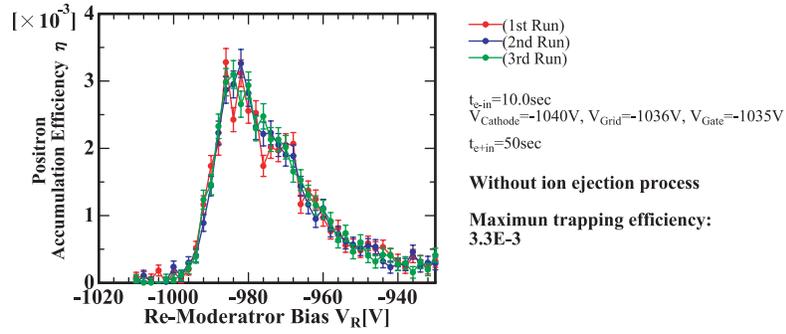
3.2.7 陽電子蓄積における電子プラズマの安定性およびイオンが与える効果

前節では、暗に「冷却材」である電子プラズマの状態（径方向広がりなど）が安定であるとして、再減速板電位 V_R と陽電子蓄積効率 η の関係を論じた。しかし、電子プラズマは単なる冷却材ではなく、電荷をもった冷却材である。電子プラズマの状態は、 V_R と η の関係に大きな影響をおよぼす。

節 3.1.3 において、ET 内への電子ビーム入射時間 t_{e-in} と蓄積電子数 N_{e-} の関係について議論した。ここでは、 N_{e-} のプロットは t_{e-in} に関してある「構造」を持っていること（図 3.5 において述べたいくつかの「領域」が存在するということが示された。この構造の変化が電子プラズマの状態の変化に対応していると考え、図 3.5 における領域 (b)（ここでは $t_{e-in} = 700$ msec と設定した）の電子プラズマを用いた場合、および領域 (d)（ここでは $t_{e-in} = 10$ sec と設定した）の電子プラズマを用いた場合、以上二つの場合についてそれぞれ、再減速板電位 V_R と陽電子蓄積効率 η の関係を測定した。図 3.10 (1) は図 3.5 における領域 (d) の電子プラズマを用いた場合の実験結果で、(2) は図 3.5 における領域 (b) の電子プラズマを用いた場合の実験結果である。ET の深さ $V_{e-well} = 1000$ V とした。

図 3.10 (1) と (2) を比べると、(1) は V_R に対して η のピークが見られるのに対し、(2) では η のピークを見つけられない。また、(1) は各測定 (RUN1~3) おいて測定結果のばらつきが小さいように見えるが、(2) は測定結果のばらつきが大きいように見える。これは、領域 (b) で形成された電子プラズマは「不安定」な状態にあり、その密度分布が時間的に変化していることを示唆している。電子プラズマの密度分布は陽電子の減速効果に直接影響を与えるので、陽電子蓄積効率 η にも当然影響を与える。その密度分布が時間的に変化すると、それに合わせて電子プラズマの空間電位も変化するため、陽電子蓄積最適条件を与える再減

(1)



(2)

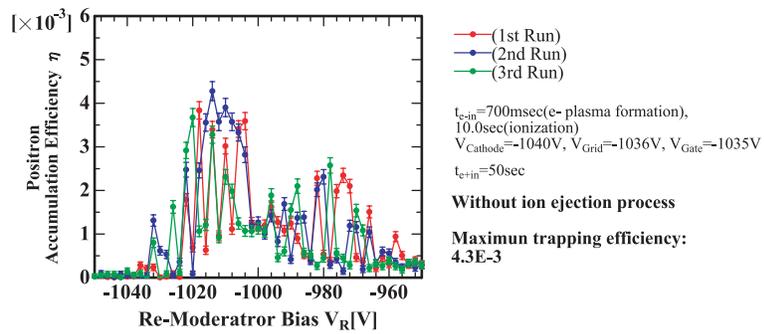


図 3.10: 電子プラズマの状態と陽電子蓄積効率 η の関係。

速板電位も変化せざるを得ないと考えられる。一方、領域 (d) で形成された電子プラズマは「安定」な状態にあり、その密度分布も時間的に、より定常的であると考えられる。

次に、PT 内の閉じ込められたイオンが η にどのような影響を与えるかを述べる。このイオンは、電子プラズマの形成時に MRT に入射する電子ビームによって、残留ガスがイオン化したものである。電子ビームを $t_{e-in} = 10 \text{ sec}$ 入射した場合、 $\sim 5 \times 10^7 e$ の電気量が PT 内に存在することが検出された。

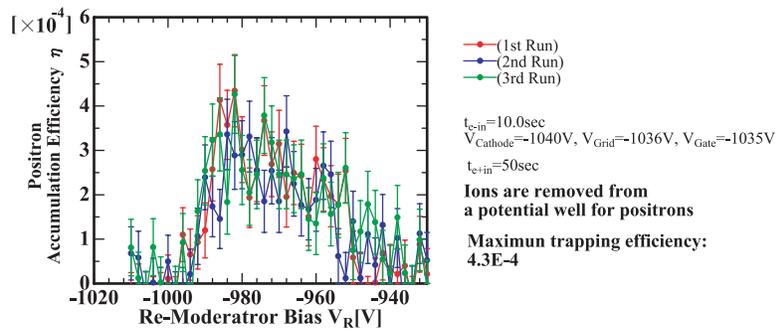
先に示した図 3.10 は、単に電子プラズマの状態が η に与える影響を見るため、PT に閉じ込められるイオンの量を (1) と (2) で同じにした。それを実現するために、(2) の実験を行なう際は電子プラズマ形成とは別に電子ビームを 10sec 入射させ、(1) と同量のイオンが PT 内に蓄積するようにした。

次に、イオンが PT に存在しない場合の η を調べる。ここでは、電子ビームを 700msec 入射させた場合に PT に閉じ込められるイオンの量を、電子ビーム 10sec 入射の際に PT に閉じ込められるイオンの量より充分小さいとし、「イオン無し」と呼ぶことにする。図 3.10 を得たときのように、図 3.5 の領域 (d) と (b) で形成される電子プラズマを用いて、それぞれの η を測定した。実験結果を図 3.11 に示す。図 3.5 の領域 (d) の電子プラズマを用いた場合が (1) で、領域 (b) の電子プラズマを用いた場合が (2) の結果である。領域 (d) の電子プラズマを用い、かつ PT に「イオン無し」の状況をつくるには次のようにする。電子ビームを 10sec 入射し電子プラズマを形成する。そこで、いったん陽電子蓄積を行う前に PT の底を上げ、溜まったイオンをはきだす。そして、改めて陽電子蓄積を行う。

図 3.10 と図 3.11 を比べると、前者の方が後者よりも、 ~ 10 倍 η が高いことが分かる。イオンが陽電子蓄積に与える影響の詳細は不明だが、陽電子 - イオン間の衝突が陽電子を冷やす手助けをしていると考えられる。

以上の結果から、再減速板電位 V_R を変化させ陽電子蓄積効率 η を測定する実験を行う場合、図 3.5 の領域 (d) ($t_{e-in} = 10 \text{ s}$) で形成される電子プラズマを用いると良いことが分かった。

(1)



(2)

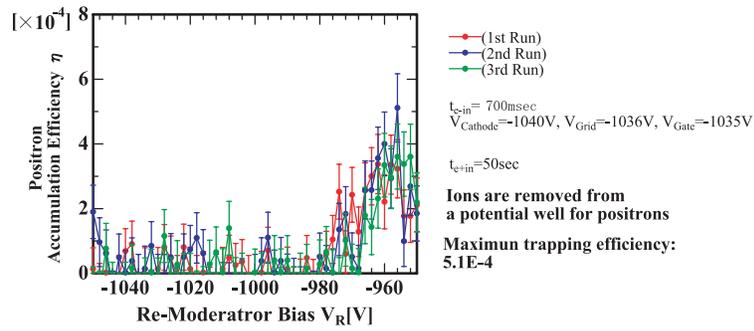


図 3.11: 電子プラズマの状態と陽電子蓄積効率 η の関係 (イオン無し)。

第4章 タングステン再減速板

MRT 内に陽電子を効率良く蓄積するには、放出される陽電子のエネルギー幅が狭く、陽電子再放出率の高い再減速板を用いることが重要である。適切な処理を施した再減速板を新しく用意し、今までの再減速板と交換することで、より高い陽電子再放出率そして陽電子蓄積効率を目指した。この章では、新しく取り付ける再減速板に施した処理を中心に述べる。

4.1 再減速板の選定

本研究では、超高真空下での陽電子蓄積を想定している。よって、MRT 内ではガスによる減速は行えない。また、再放出陽電子のエネルギー幅が広い希ガス結晶 (10 eV 程度) は好ましくない。ここでは、再減速板候補として金属固体に絞って、再減速板の選定を進めるとする。

4.1.1 陽電子の金属固体中の振る舞い

入射エネルギー ~ 1 keV の陽電子が金属固体内に入射する場合を考える。表面で対消滅や散乱により反射されずに金属内に入り込んだ陽電子は、主に電子との非弾性散乱およびプラズモン励起によりフェルミエネルギー E_f 付近まで減速される (入射時から $\sim 10^{-13}$ sec)。やがて E_f より充分低いエネルギーまで減速されると、続いてフォノン散乱による減速が優勢となり、ついには熱化 (陽電子のエネルギー $E_{e^+} \sim \frac{3}{2}k_B T$) される (入射時から $\sim 10^{-12}$ sec)。ここで、 k_B はボルツマン定数、 T は環境 (金属) 温度である。

熱化された陽電子は金属中を拡散するが、その中で格子欠陥に捕まえられたりせずに再び入射表面に戻ってくる陽電子がいる。この陽電子は表面状態に捕まえられるものや、また金属内に戻ってしまうものもあるが、

真空中に低速陽電子として放出される（再放出過程）ものが存在する。

4.1.2 陽電子の再放出

金属内で熱化された陽電子が表面に拡散してきた場合の、陽電子と金属表面の相互作用を考える [23]。

金属内の正イオンをジェリウム・バックグラウンドで近似すると、正イオンは金属表面を境に密度分布が切断されるのに対し、金属の電子は真空中に染み出す。このため、表面に電氣的二重層が生じ、双極子障壁 D が現れる。 D は、負の電荷を持つ電子に対しては金属内に閉じ込める作用をするが、正の電荷を持つ陽電子に対しては金属の外に押し出す作用をする。

固体中の陽電子には、電子との相互作用によるエネルギーの低下分 $E_c (< 0)$ とイオン格子中を運動することからくるゼロ点エネルギー $E_0 (> 0)$ の和で定義される化学ポテンシャル μ_+ が与えられる。

もしも、陽電子を金属の外に押し出す作用 D が化学ポテンシャル ϕ_+ に打ち勝つ場合は、陽電子の仕事関数 $\phi_+ = -D - \mu_+$ が負になる。このとき、表面に達した熱化した陽電子の中で、エネルギー $|\phi_+|$ を持った再放出陽電子として真空中に放出されるものが現れる。

4.1.3 再減速板の選定

ある金属が、陽電子ビームの減速板として優れたものであるには、「固体内に入射した陽電子が、拡散によって再び表面に達した場合に真空中に放出される確率」（これを Y_0 とする）が高くなければならない。また、本研究ではトラップ装置と再減速板に処理を行なう装置とは別になっているため、処理を施した再減速板をトラップ装置に取り付ける際には、再減速板をいったん大気にさらさなければならない。よって、大気に対する安定性も重要である。

ここで、いくつかの金属について、その仕事関数 ϕ_+ と Y_0 のリストを表 4.1 を挙げる [24]。

表 4.1 を見ると銅およびタングステンが Y_0 が高く、減速板に向いていることが分かる。しかし、銅は大気に対して非常に活性であり変質してしまうため、本研究では再減速板として用いることはできない。一方、タングstenは大気に数時間さらしても陽電子減速効率が劣化しない [25]。

Material	ϕ_+ [eV]	Y_0 [%]
Al(100)	-0.16	20
Al(110)		9
Cu(110)	-0.13	
Cu(110)+S	-0.4	
Cu(111)	-0.33	28
Cu(111)+S	-0.87	55
Pt(100)	-1.9	14
W(100)	-3.0	
W(110)	-3.0	33
W(110)+O	-4.1	

表 4.1: いくつかの金属における ϕ_+ と Y_0 。

よって、本研究に用いる再減速板としては、タングステンが向いていると分かる。

本研究では、陽電子蓄積装置に新しく取り付ける再減速板（新再減速板と呼ぶことにする）として W(110) 結晶（径 10mm、厚さ 0.5mm、純度 99.999+%）を用意した。

4.2 タングステン再減速板の処理

4.2.1 現在取り付けられているタングステン再減速板に施された処理

現在取り付けられている再減速板（旧再減速板と呼ぶことにする）には、タングステン結晶 W(100) が用いられている。このタングステン結晶は片面研磨されており、それは機械研磨によるものである。施された処理は ~ 1900 までの加熱のみである。

機械研磨による結晶表面付近の不純物およびタングステン固有の不純物炭素・格子欠陥は、陽電子再放出率悪化の原因となる [24][26][27]。旧再減速板に施された処理では、以上のような因子を取り除くには不十分であるばかりでなく、上記加熱処理によってタングステン固有の不純物炭素が表

面に堆積し陽電子再放出率の悪化を招いてしまうと考えられる [26][27]。

本研究で新しく用意したタングステン再減速板（新再減速板と呼ぶことにする）には、以上の陽電子再放出率悪化の原因を取り除くため、電解研磨および加熱処理を行なった。以下、これらの処理について説明する。

4.2.2 電解研磨

本研究で用意したタングステン結晶は、製造元では表面の平滑化処理として機械研磨（ダイヤモンドおよびアルミナの研磨材により仕上げられている）しかされていない。機械研磨で処理された表面は、塑性変形による変質層（Beilby 層）が生じ、また研磨材が表面に入り込むため、その表面は内部に比べ不純物が多いものとなる。さらに、機械的な研磨には表面の平滑化に限界があり（所有している W(110) は、製造元で最小 $0.5\mu\text{m}$ の研磨材により処理されている）相応の凹凸は免れない。試料表面のモデルとして理想的平滑表面を考えるかぎり、表面の粗度を最小に抑えることは重要な前処理である。

これらを解決するため、機械研磨の後工程として電解研磨を行うことにした。電解研磨を施すことにより、表面の変質層が溶けて除去され、また凹凸の凸部をより多く溶かす性質（この機構については後述する）によって、凹凸のある表面を原子的平滑面に近づけることができる。

電解研磨では、研磨する試料を陽極にし、研磨液に不溶性の金属を陰極にして電気分解を行う。陽極では、その構成原子がイオン化され研磨液に溶け出し、電子を陰極に供給する。陰極では、受け取った電子を研磨液中の正イオンに与え、それが陰極に析出または気体となって大気に放出される。

凹凸のうち凸部をより選択的に溶解する要因として、電流の先端効果と濃度分極効果が挙げられる [28]。電流の先端効果は、物質の尖った部分でより電流密度が大きくなるというもので、これは研磨液の有無に関係なく起こる効果である。それに伴い、物質の尖った部分、ここでは凸部に相当する部分の電流密度が増加するため、電気分解が局部的に促進されて選択的に凸部が溶解する。濃度分極は次のように説明できる。図 4.1 は、電解研磨中の陽極表面状態を模式的に表したものである。図 4.1 で示すように、溶け出した陽極金属イオンが研磨液中の様々なイオンと錯イオ

ンをつくり、その飽和溶液が粘着層となって試料表面に付着する。この粘着層は凹部に厚くたまり、凸部では層が薄くなるため、凹凸部に抵抗差が生じる。この抵抗差によって、凹部の溶解が抑制され、凸部では溶解が促進される。

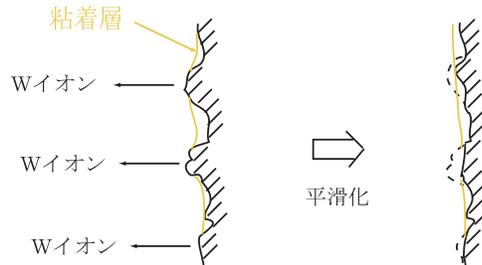


図 4.1: 電解研磨における陽極表面

実際に、電解研磨を行うときは、まず研磨の最適条件を見出す必要がある。図 4.2 は、電解研磨における電極電圧と電極電流の関係を模式的に表したものである。図中の A - B 間および C - D 間は、電極電圧に対し電極電流は比例関係にある。しかし、B - C 間では電極電圧に対し電極電流は比例関係にあるものの、A - B 間および C - D 間に比べ、曲線の勾配が小さくなる。電解研磨における最適条件とは、この C - B 間の領域であり、「プラトー」と呼ばれる [29]。この領域では電極電圧を大きくしていても、電極電流の増加が抑えられる。これは、前述した凹部に抵抗をもった粘着層がたまる現象によって、浴抵抗が増大しているためであり、このとき凸部の選択的溶解が起きている。

さて、今回タングステン結晶を電解研磨する際に用意した道具および装置を図 4.3 に示す。研磨液には、水酸化ナトリウム溶液を選んだ [28]。また、タングステン結晶を研磨液中で支えるものとして、図 4.4 で示す耐食性の高いタンタル [30] で作製したホルダーを用いた。

図 4.3 に示した研磨装置を用い、まず研磨の最適条件を見つけるために電極電圧 V_{EP} に対する電極電流 I_{EP} を測定した。結果を図 4.5 に示す。この結果から、プラトー領域 (2.0V から 3.5V の領域) にある電極電圧として $V_{EP} = 2.5V$ ($I_{EP} = 0.07A$) を選び、約 3 分間研磨した。電解研磨

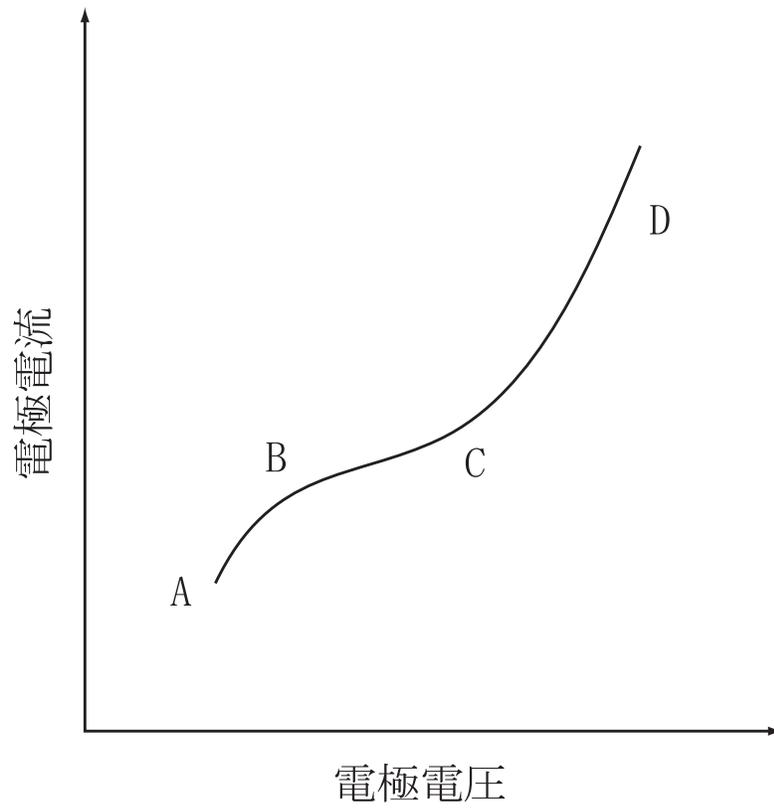


図 4.2: 電解研磨における電極電圧 - 電流曲線の模式図。図中の B-C 領域がプラトー領域と呼ばれるものである。この領域では、凸部の選択的溶解が促進され、表面の平滑化が起きている。

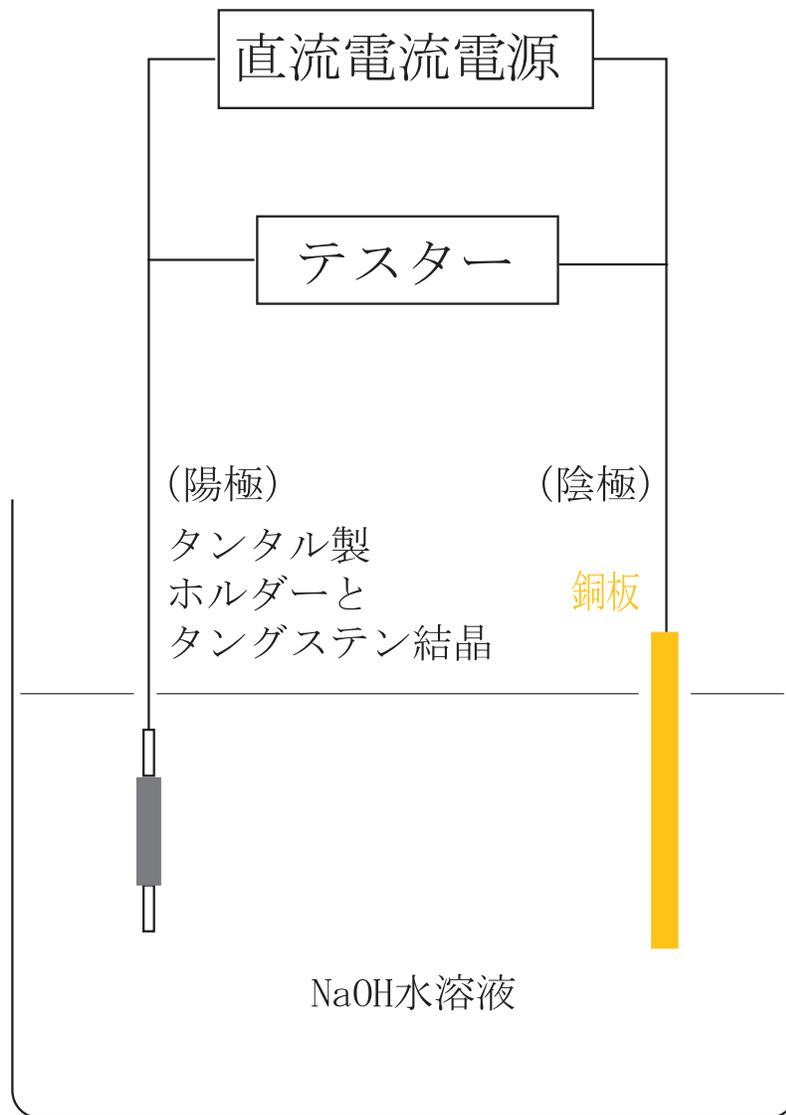


図 4.3: 電解研磨装置の模式図

(1) タンタル製ホルダー



(2) タングステン結晶を取り付けた



図 4.4: タンタル製ホルダー。(1) タンタル製ホルダーにタンタル製導線が巻きつけてある。(2) ホルダーにタングステン結晶を取り付けた。

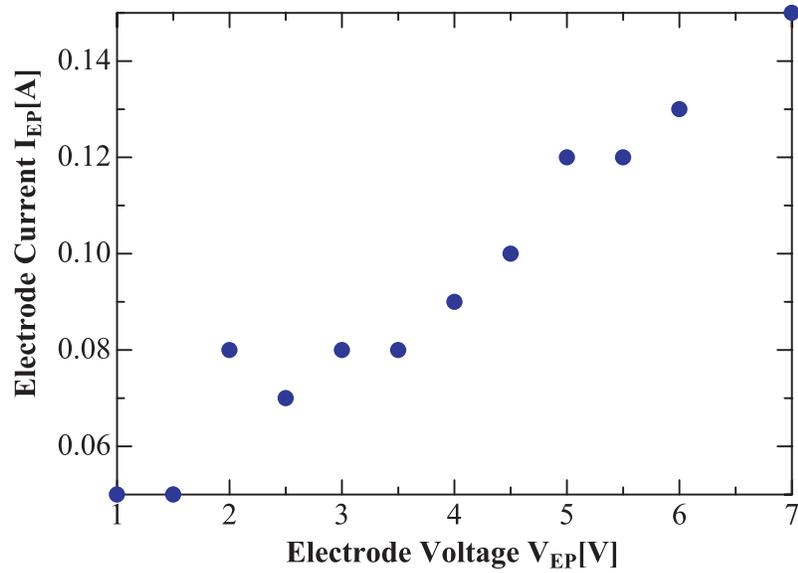


図 4.5: 電極電圧 V_{EP} と電極電流 I_{EP} の関係

されたタングステン結晶を図 4.6 および図 4.7 に示す。製造元により機械研磨された面（ここでは「表」と呼ぶことにする）の電解研磨前後の写真が図 4.6 であり、機械研磨されていない面（「裏」と呼ぶ）の電解研磨前後の写真が図 4.7 である。

タングステン結晶の「表」に関しては、どちらがより平滑であるか肉眼で見分けることはできない。しかし、「裏」を見てみると、電解研磨前では見られなかった表面の光沢が、電解研磨後では見られるようになった。つまり、タングステン結晶が研磨され、より平滑になったと思われる。ここでは、「表」に関してもこの研磨が行われたと期待する。

4.2.3 加熱処理

目的および必要とされる条件

高い陽電子再放出率を得るには、減速材表面および表面付近の不純物を取り除かなければならない [26] [27]。平滑化のための機械的研磨による変質層・不純物の付着は、節 4.2.2 において述べた処理によって取り除くことができるが、その際副産物として酸化膜が結晶表面に付着してしまう [28]。この酸化膜を取り除くため、また、結晶固有の表面付近の不

純物・格子欠陥を取り除くため、加熱処理を行うことにする。それには千数百 以上の加熱が必要である [21][23][26]。

実際に千数百 以上の加熱を行う場合、次のような汚染が表面に起きる [23]。

1. 温度上昇することによって、結晶表面へ結晶固有の不純物が拡散し、堆積する。
2. 結晶表面にくっついてきた吸着物が活性になったことによって、結晶と反応し、結晶表面に化合物をつくり、表面に付着する。

2. は十分に真空度が良くなるまで脱ガス (のための加熱) を行うことによって取り除くことができると考えられる。除去するのに困難な汚染は 1. である。タングステン結晶固有の不純物で主なものは炭素で、これは取り除くことが最も困難な元素として知られており、単純な高温加熱 (2000) では除去は難しい [27]。そこで、この不純物炭素を取り除くために、酸素気体中でタングステン結晶を加熱する方法がとられている [20][21][22][26][27][31][32]。酸素雰囲気中で熱することで、炭素が CO となって表面から解離するのである [27]。

以上を考えると、不純物および格子欠陥の少ない結晶を得るために必要な条件は次のようなことである。

- タングステン結晶を高温 (千数百 以上) に加熱できること。
- 酸素気体を導入できて、酸素雰囲気中でタングステン結晶を加熱できること。

加熱処理装置

これらの条件に満たすために、図 4.8 に示す装置 (ヒーティング・チェンバー) を設計・製作した。

ヒーティング・チェンバーには、上部のフランジにタングステン結晶を支えるホルダーが設けられていて、それに対峙するように電子照射加熱用フィラメントが取り付けられている。このフィラメントは、タングステンのメッシュ (100mesh/inch, メッシュの線径 $20\mu\text{m}$) を四角に形を整えて張り作製したもので、十分な量の熱電子が取れるようにしている。ホルダーは、タングステンおよびタンタルで作られており、タングステン製メッシュ (30mesh/inch, メッシュの線径 $50\mu\text{m}$) で作製したポケット

が取り付けられている。このポケットに減速材となるタングステン結晶を格納し、チェンバー内の真空中で支持する。ホルダーおよび電子照射加熱用フィラメントの写真を図 4.9 および 4.10 に示す。

加熱処理の際は、メッシュ状フィラメントに数 A の直流電流を流し加熱させ、熱電子を放出させる。そこで、図 4.11 に示すように、タングステン結晶とメッシュ状フィラメントとの間に高電圧 V (電流 I) をかけ、電子衝撃によりタングステン結晶を加熱する。また、熱せられたタングステン結晶からの放射による熱の散逸を防ぐため、図 4.8 に示したように、タングステン結晶を取り囲むようにサーマル・シールドを取り付けた。このサーマル・シールドは、熱の散逸を効率良く防ぐため三重構造になっている。シールドの材質は、試料が 2000 程度の高温になっても耐えられるように、一番内側 (タングステン結晶に最も近いシールド) がタングステンで二番目がニッケルそして三番目が SUS になっている。

タングステン結晶の温度を測定するため、外からサーマル・シールドの内側をのぞける穴を開けた。これによって、ヒーティング・チェンバーに設けられている窓から、サーマル・シールドの穴を通してタングステン結晶を観察することができる。加熱されたタングステン結晶の温度は、光高温計により窓からのぞいて測定する。サーマル・シールドの模式図および外観を図 4.12 に示す。

酸素雰囲気中でタングステン結晶を加熱できるように、酸素導入系を図 4.13 のように構成した。

ヒーティング・チェンバーおよび酸素導入系の外観を図 4.14 に示した。

供給電力とタングステン結晶温度の関係

この加熱処理装置の特性を調べるため、ヒーティング・チェンバーに供給する電力 $P = VI$ とタングステン結晶の温度 T_W の関係をプロットした。結果を図 4.15 に示す。

図 4.15 中の黒点が本実験で加熱処理したタングステン結晶を光高温計で測定した読みである。この値に分光放射率¹ ε_λ を用いて補正したものが赤点となる。補正式は式 4.1 で与えられる [33]。

$$\frac{1}{T_B} - \frac{1}{T} = -\frac{\lambda}{c_2} \ln \varepsilon_\lambda \quad (4.1)$$

ここで、 T_B [K] は光高温計の読み、 T [K] は試料の真の温度、 λ は試料が

¹ある特定の波長 λ での放射エネルギーに関して定義された放射率

らの放射のうち光高温計で測定する光の波長で $0.65 \mu\text{m}$ 、 c_2 はプランクの第 2 定数で $1.44 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ である。ここでは $\varepsilon_\lambda = 0.45$ とした [33]。緑点は、今まで取り付けられていた再減速板（旧再減速板）のタングステン結晶を、3年前に加熱処理したときのデータである。赤点と緑点とで供給電力 P に対してタングステン結晶の温度 T_W が異なるのは、加熱処理の際に用いたサーマル・シールドが異なるためだと考えられる。旧減速材を加熱処理したときは、タングステン結晶の背後（電子照射フィラメント側を前面とする）に一枚壁（タングステン）を立て、これをサーマル・シールドとしていたのに対し、今回用いたものはタングステン結晶を取り囲むような配置となっている。このタングステン結晶からのぞむサーマル・シールドの立体角の違い、およびサーマル・シールドが一重か三重かの違いが放射による熱の散逸量の違いになり、温度上昇の違いになったと考えられる。

加熱処理

まず、高温処理（千数百）を良い真空中（ 10^9 Torr 台）で行うことができるように、フィラメントとタングステン結晶およびその周辺の脱ガスを行なった。脱ガスのための加熱により、表面の酸化物は除去されたと期待できるが、タングステン結晶内の不純物炭素が表面に偏析すると考えられる。続いて、タングステン表面および表面付近の不純物炭素を除去するため、酸素を導入し加熱した。また、酸素雰囲気中で加熱する際にタングステン表面に生ずる酸化物を除去するため、酸素排気後に短時間加熱（フラッシュ）を行なった。

タングステンの場合、不純物炭素のタングステン内部から表面への偏析は、タングステン温度が $1200 \sim 1700$ 程度の温度領域で顕著になり、温度が低いほど偏析は多くなる [32]。よって、表面付近の不純物炭素を取り除くのは、 1700 より低い温度で行うのが望ましい [32]。また、導入する酸素の圧力は $\sim 10^6$ Torr あれば、数分間加熱することにより、表面の不純物炭素を解離できると考えられる [20][23][32]。

表面に付着した酸化物は、タングステン結晶を 1500 程度に短時間加熱することにより、除去されると期待できる [23][26][31]。しかし、この酸化物を完全に除去することは困難であり、 1900 の加熱でも、表面には 10% の酸化物が除去されずに残る [32]。ただし、表面の酸化物は陽電子再放出を考えた場合、必ずしも悪影響を与えるものではない。厚い

酸化膜が表面に付着すると陽電子の再放出率が著しく悪化することが報告されている [26][27] が、いったん酸素雰囲気中で加熱処理された表面では、その後高温加熱処理が施されても陽電子再放出率の悪化が防げることが分かっている [27]。

以上を考え、次に示す手順で加熱処理（模式図を図 4.16 に示す）を行った。

1. 酸素を $\sim 1 \times 10^{-6}$ Torr 導入する。
2. タングステン結晶を ~ 1400 で加熱する。この状態を 1 分間以上保持した後、加熱をやめる。
3. 酸素を排気する。
4. タングステン結晶を加熱し、 ~ 1700 まで達したところで加熱をやめる（フラッシュ）。

これを 1 サイクルと定義し、3 サイクル行なった。このヒーティング・サイクルでは、1. ~ 3. の処理でタングステン結晶表面付近の不純物炭素を取り除き、そのとき付着する酸化物を 4. の処理で除去している。通常、このサイクルを繰り返すことで、徐々に表面付近の不純物濃度は減少していくことが期待できる [23]。

3 サイクル行なったところで、最後に 2200 を超える温度でフラッシュした（このとき、真空度は 10^{-7} Torr 台まで上昇）。これは、タングステン結晶の格子欠陥除去を狙ったものである。 2000 を超える温度で加熱することにより、陽電子の再放出率の向上が望める [34]。

(1) 電解研磨前 (表)



(2) 電解研磨後 (表)



図 4.6: 電解研磨前後のタングステン結晶 (表)。

(1) 電解研磨前 (裏)



(2) 電解研磨後 (裏)



図 4.7: 電解研磨前後のタングステン結晶 (裏)。

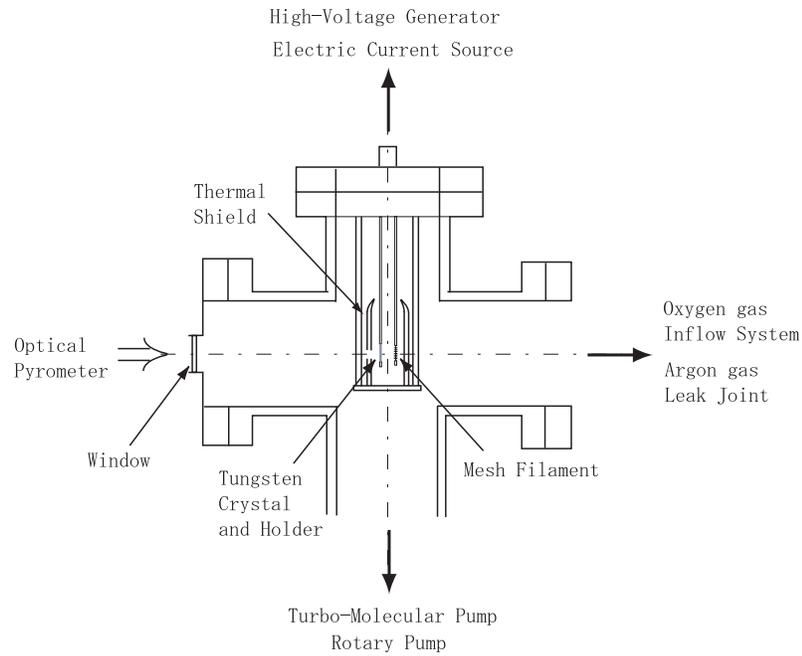


図 4.8: ヒーティング・チェンバーの断面図 (模式図)。タングステン結晶およびメッシュ状フィラメントはサーマル・シールドに囲まれていて、タングステン結晶からの放射熱の散逸を防ぐ。サーマル・シールドには穴が開けられていて、ヒーティング・チェンバーの窓から光高温計で中をのぞくことにより、タングステン結晶の温度を測定する。

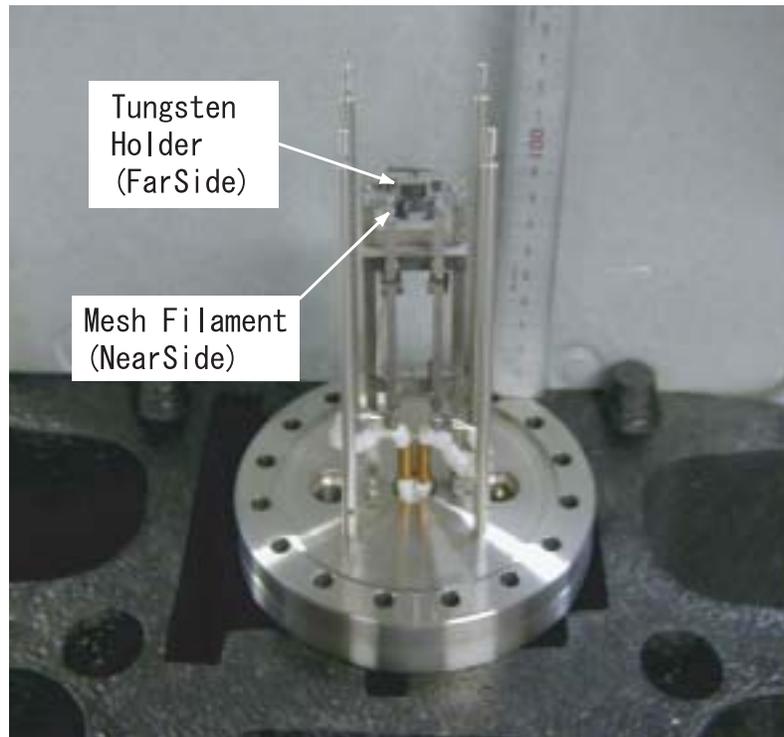


図 4.9: ヒーティング・チェンバーの電子照射部 (正面)。手前側にあるメッシュ状フィラメントを通電加熱し、熱電子を放出させる。そこで、向こう側にあるタングステン結晶を支えるホルダー (写真ではテスト用のタングステン結晶が入っている) とフィラメントとの間にバイアス電圧をかけ、タングステン結晶を電子衝撃により加熱する。

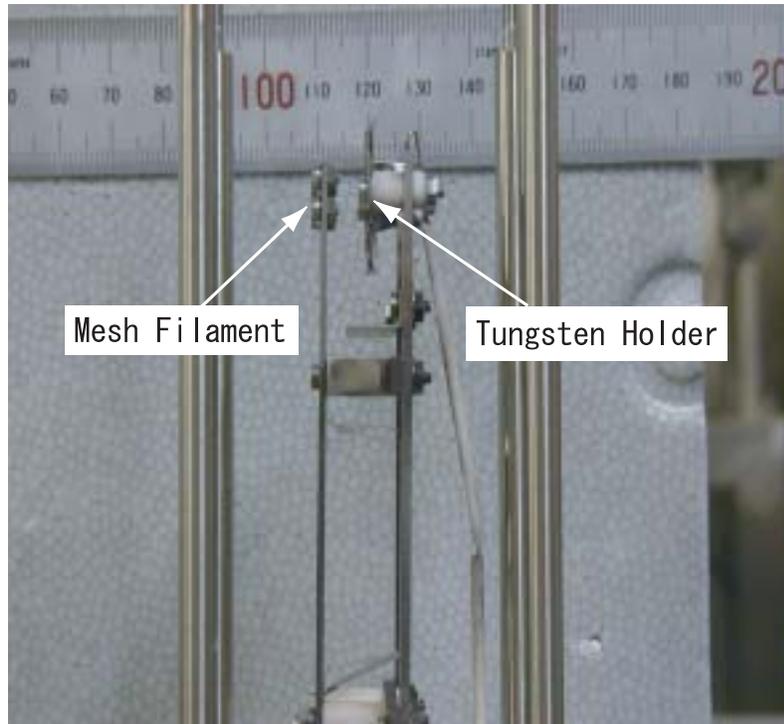


図 4.10: ヒーティング・チェンバーの電子照射部 (側面)。メッシュ状フィラメントを通電加熱して熱電子を放出させる。そこで、タングステン結晶とメッシュ状フィラメントの間にバイアス電圧をかけることにより、電子衝撃でタングステン結晶を加熱する。

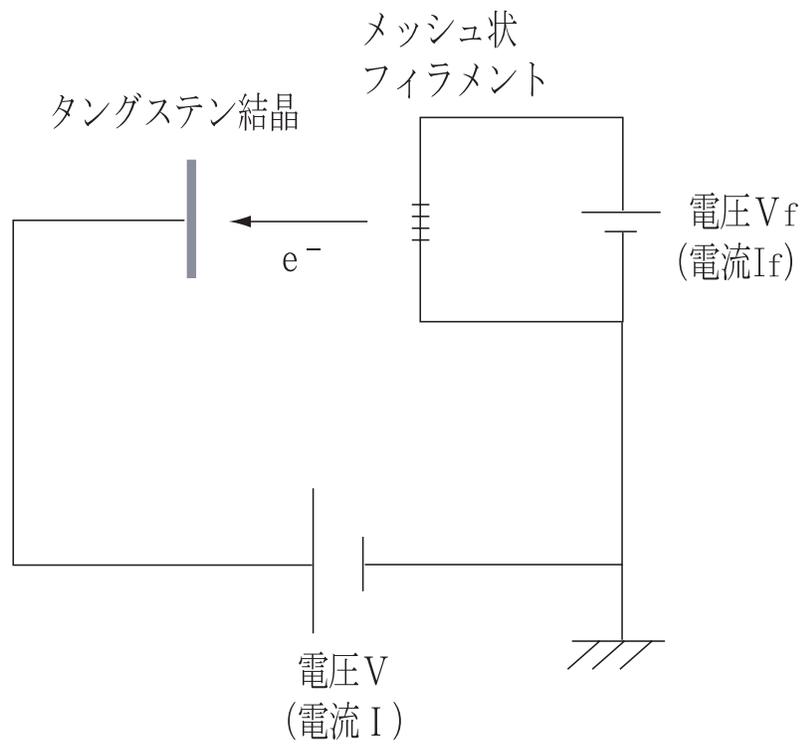
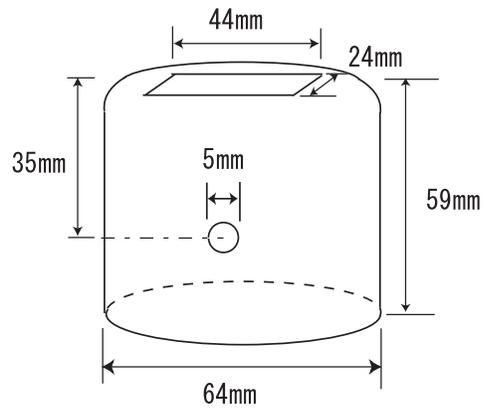


図 4.11: 電子照射部の回路

(a)



(b)

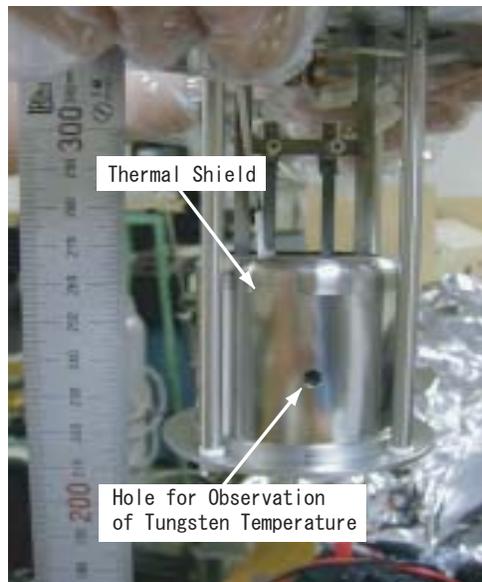
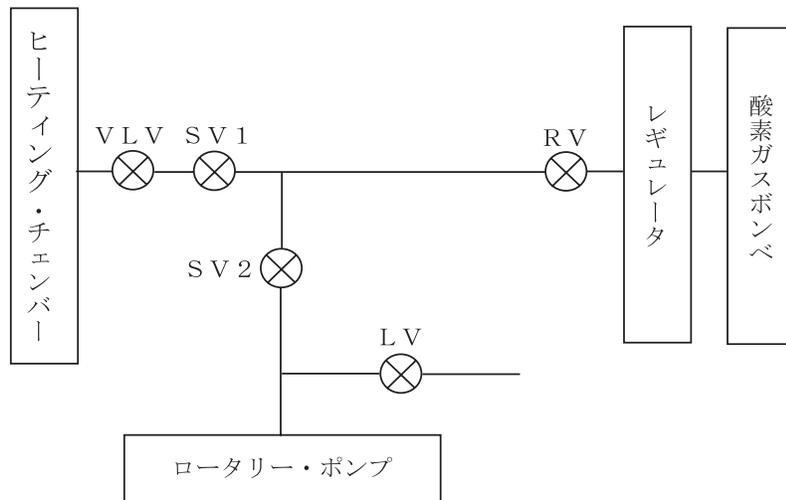


図 4.12: ヒーティング・チェンバーに取り付けられたサーマル・シールド (図 4.9 や 4.10 とは、フランジの向きが上下逆さまになっている) (a) 模式図 (b) 写真



VL V : バリアブル・リーク・バルブ
 SV 1 ~ 2 : ストップ・バルブ
 LV : リーク・バルブ
 RV : レギュレータ・バルブ

図 4.13: 酸素導入系。レギュレータおよびVL Vにより、ヒータリング・チェンバー内に導入する酸素ガスの圧力を調整する。下部のロータリー・ポンプは導入系を酸素でパージするときに用いる。

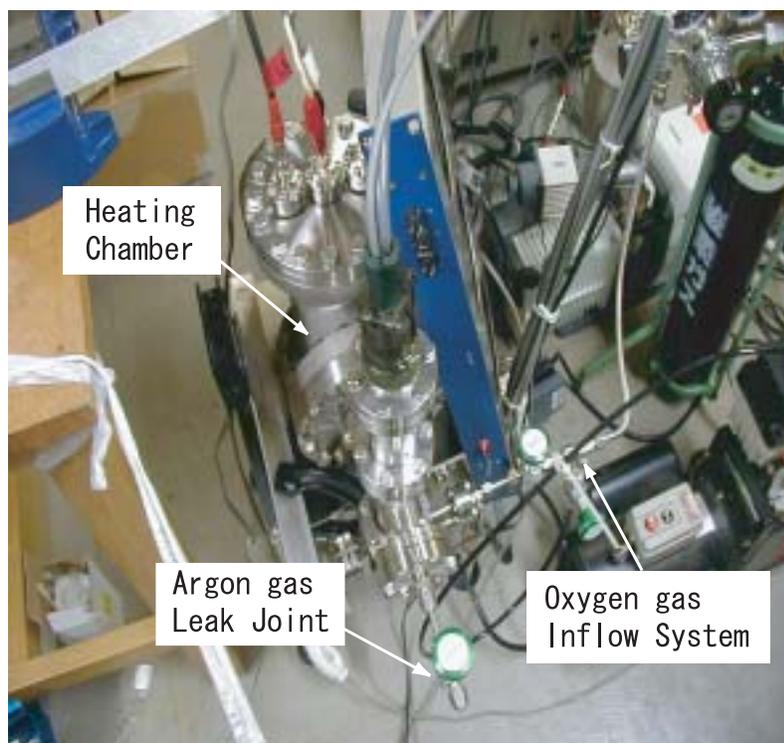


図 4.14: ヒーティング装置の外観。ヒーティング・チェンバー（タンゲステン結晶および電子照射のためのタンゲステン・メッシュ状フィラメントが取り付けられている）、酸素導入系およびチェンバーをアルゴンでリークするための接続部から構成されている。

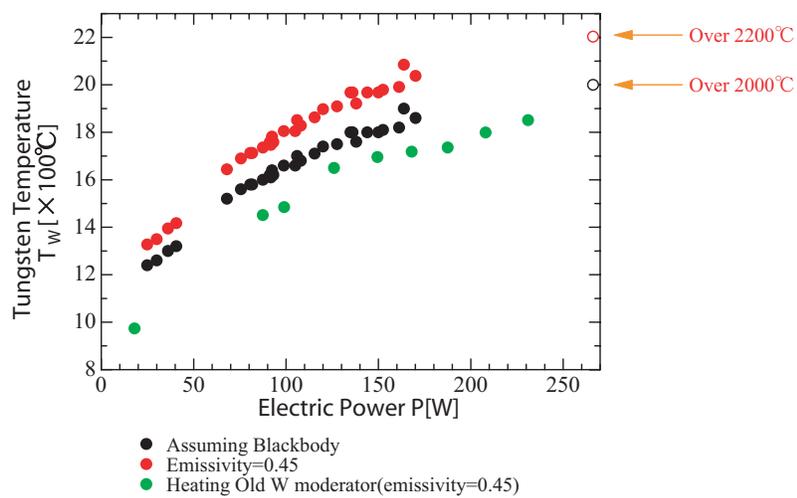


図 4.15: 供給電力 P とタンゲステン結晶温度 T_W の関係。

Heating Cycle (1 Cycle)

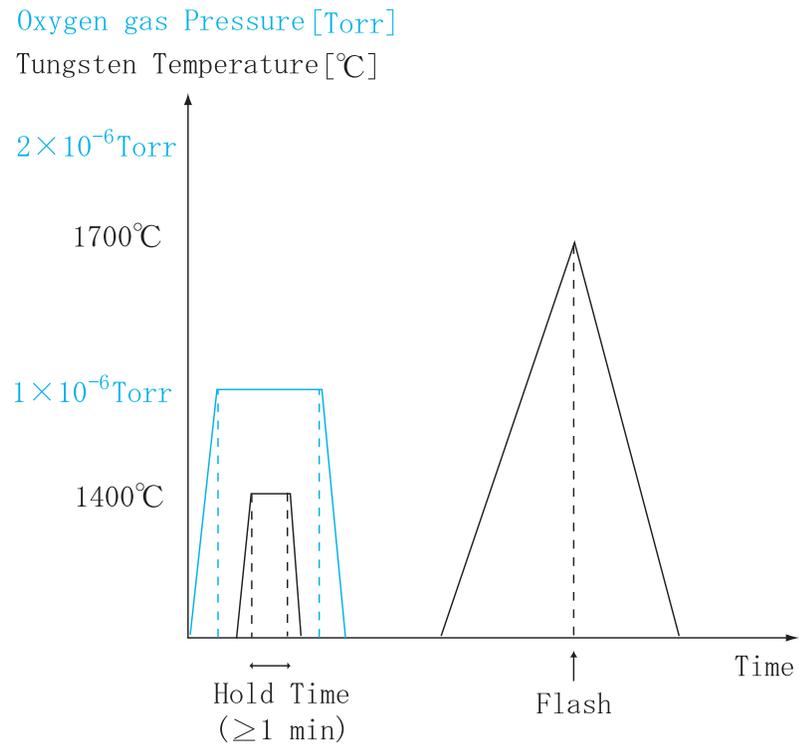


図 4.16: ヒーティング・サイクル (1 サイクル) の模式図。

第5章 再減速板交換前後の陽電子蓄積効率の比較

高い陽電子蓄積効率を得るためには、高い再放出率を持った再減速板を使用することが重要である。この章では、今まで取り付けられていた再減速板 W(100) (旧再減速板) と第4章で述べた処理を施した再減速板 W(110) (新再減速板) とで陽電子蓄積実験を行いその効率を比較する。

5.1 実験条件

新旧再減速板交換前後の陽電子蓄積効率 η の比較は、新旧再減速板のそれぞれに対して、再減速板電位 V_R の値を変化させながら η を測定することで行う。この測定を、いくつかの電子プラズマ電子数 N_{e-} の値において行った。 N_{e-} の調節は、節 3.1.3 で述べたように、ET の深さ V_{e-well} を変化させることで行なう。電子プラズマは、トラップ内に電子ビームを入射する時間に対して蓄積電子数がほぼ変わらない領域、図 3.5 の領域 (d) で形成される電子プラズマを使用する。節 3.2.7 で述べたように、この領域の電子プラズマを用いた陽電子蓄積実験の結果には再現性がある。

電子プラズマ形成時の入射電子ビーム電流 I_{e-in} は $\sim 2.5 \mu A$ となるように V_{Grid} を調節した。ここでの電子ビーム引き出し電極電位 V_{Grid} の値は、図 3.5 の結果を得たときの実験パラメータを参考に選んでいる。また、電子ビーム入射時間 t_{e-in} は 10 sec とした。トラップに入射する電子ビームが、トラップ内の残留ガスをイオン化し、そのイオンは陽電子トラップ用ポテンシャル井戸 (PT) に溜まるが、 I_{e-in} と t_{e-in} の値を固定することで、PT 内に溜まるイオンは各測定において同程度になると考えられる。

また、陽電子蓄積時の陽電子ビーム入射時間 t_{e+in} は 50 sec とした。

5.2 実験結果および考察

5.2.1 新旧再減速板交換前後の陽電子蓄積実験の結果

図 5.1 から図 5.5 に、 $V_{e-well} = 1000\text{V}(N_{e^-} = 1.8 \times 10^{10})$, $850\text{V}(N_{e^-} = 1.4 \times 10^{10})$, $700\text{V}(N_{e^-} = 1.0 \times 10^{10})$, $600\text{V}(N_{e^-} = 8.2 \times 10^9)$, $450\text{V}(N_{e^-} = 4.7 \times 10^9)$ における新旧再減速板を用いた陽電子蓄積実験の結果を示す。各 V_{e-well} に対する電子プラズマ構成電子数 N_{e^-} は、新旧再減速板の交換前後で同じ値であった。以下、添え字 New および Old は、それぞれ新再減速板および旧再減速板に関する量であることを表す。

図 5.1 から図 5.5 を見ると、 N_{e^-} が多い場合、すなわち図 5.1 と図 5.2 の場合では、 $\eta^{New} > \eta^{Old}$ となっていることが分かる。しかし、 N_{e^-} が少ない場合、すなわち図 5.4 や図 5.5 の場合では、 $\eta^{New} \sim \eta^{Old}$ となっていることが分かる。

以下、これらの実験結果について考察する。

5.2.2 最適化された再減速板電位と電子プラズマ空間電位の関係

図 5.6 は、節 5.2.1 の各陽電子蓄積実験における電子プラズマ構成電子数 N_{e^-} を横軸にとり、陽電子蓄積効率 η が最大値 η_{Max} をとったときの再減速板電位 V_{RMax} と電子トラップ (ET) の底の電位 V_{EB} との差 $V_{RMax} - V_{EB}$ を縦軸にとった図である。

電子プラズマ構成電子数 N_{e^-} の各値に対して、 $V_{RMax} - V_{EB}$ が、新旧再減速板においてほぼ同じであることが分かる。これは、再減速板交換前後において、形成される電子プラズマの空間電位と電子数の関係がほぼ保たれたことを表している。また、 N_{e^-} が増加するにつれて、 $|V_{RMax} - V_{EB}|$ も増加している。これは、電子プラズマの構成電子数である N_{e^-} が増加することで、電子プラズマ内の空間電位が大きくなるからである。

5.2.3 最適化された再減速板電位と陽電子蓄積効率の関係

図 5.7 は、節 5.2.1 の各陽電子蓄積実験における N_{e^-} を横軸にとり、陽電子蓄積効率の最大値 η_{Max} を縦軸にとった図である。

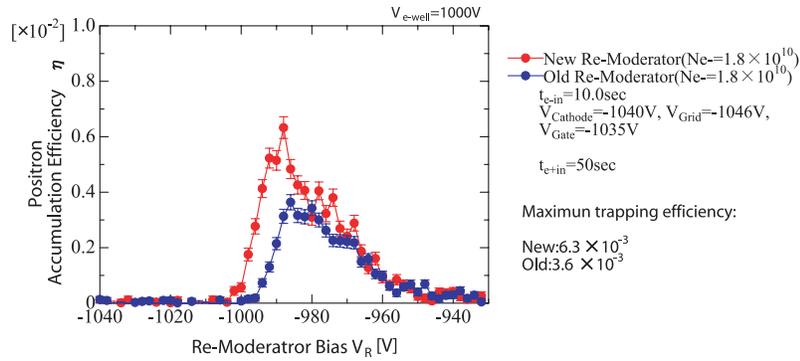


図 5.1: 新旧再減速板における陽電子蓄積効率 η の比較 (ET の深さ $V_{e-well} = 1000$ V、電子プラズマの構成電子数 $N_{e-} = 1.8 \times 10^{10}$)

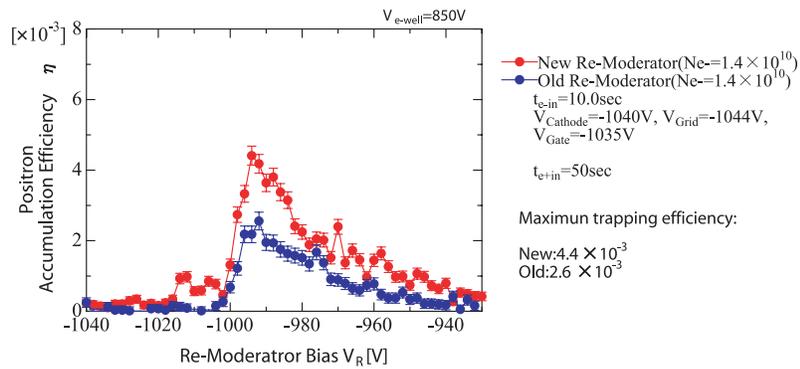


図 5.2: 新旧再減速板における陽電子蓄積効率 η の比較 (ET の深さ $V_{e-well} = 850$ V、電子プラズマの構成電子数 $N_{e-} = 1.4 \times 10^{10}$)

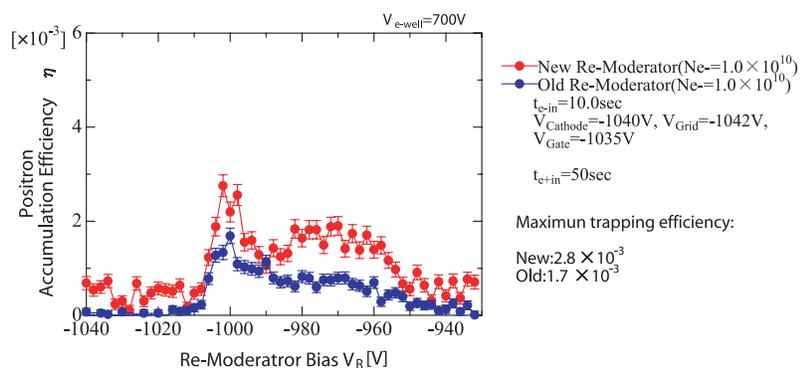


図 5.3: 新旧再減速板における陽電子蓄積効率 η の比較 (ET の深さ $V_{e-well} = 700 \text{ V}$ 、電子プラズマの構成電子数 $N_{e^-} = 1.0 \times 10^{10}$)

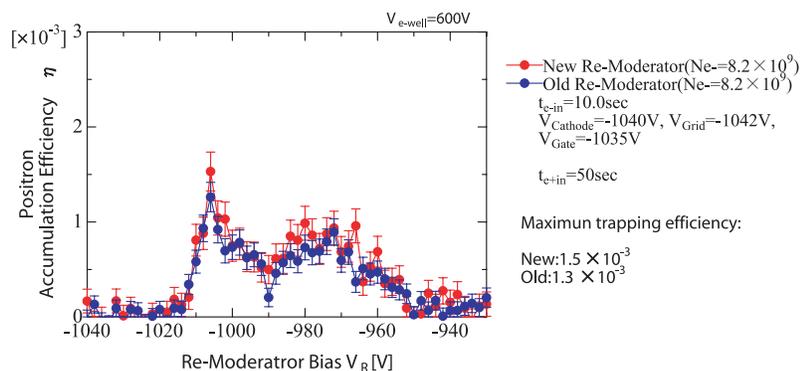


図 5.4: 新旧再減速板における陽電子蓄積効率 η の比較 (ET の深さ $V_{e-well} = 600 \text{ V}$ 、電子プラズマの構成電子数 $N_{e^-} = 8.2 \times 10^9$)

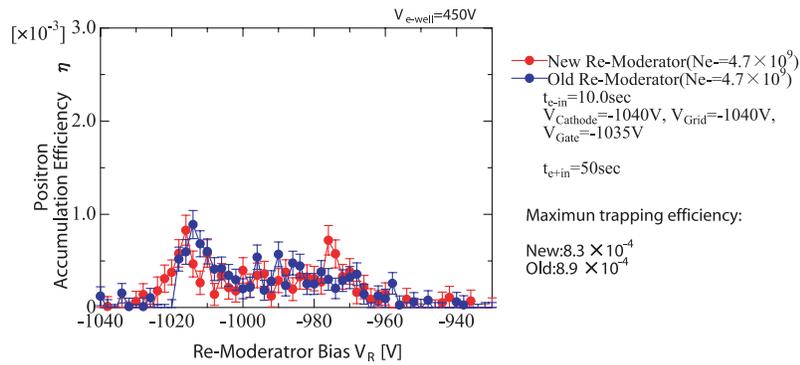


図 5.5: 新旧再減速板における陽電子蓄積効率 η の比較 (ET の深さ $V_{e-well} = 450 \text{ V}$ 、電子プラズマの構成電子数 $N_{e^-} = 4.7 \times 10^9$)

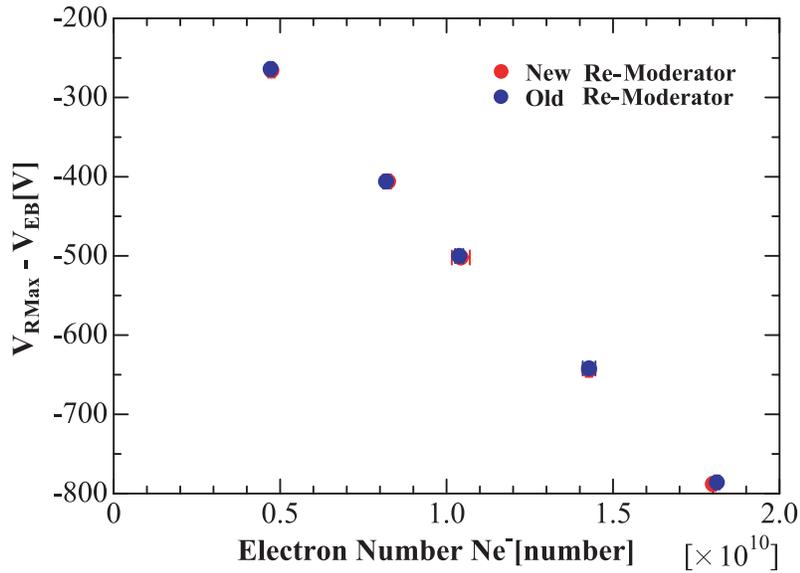


図 5.6: 電子プラズマの構成電子数 N_{e^-} (横軸) と再減速板 - ET の底間電位差 $V_{RMmax} - V_{EB}$ (縦軸) の関係。

図を見ると、 N_{e^-} が小さい ($N_{e^-} = 4.7 \times 10^9$) 場合には、 η_{Max}^{New} と η_{Max}^{Old} で変化はないが、 $N_{e^-} = 8.2 \times 10^{10}$ の場合で $\eta_{Max}^{New} > \eta_{Max}^{Old}$ となり始め、 $N_{e^-} = 1.0 \times 10^{10}$ では 1.6 倍、 $N_{e^-} = 1.4 \times 10^{10}$ 以上では 1.7 倍 η_{Max}^{New} が η_{Max}^{Old} よりも増加していることが分かる。今回の実験では、陽電子蓄積効率の最大値は、新再減速板を用い $N_{e^-} = 1.8 \times 10^{10}$ とした場合で、0.6 % であった。

本研究における N_{e^-} の範囲では、 N_{e^-} の増加に対して η_{Max} の増加が頭打ちになっていない。よって、 N_{e^-} をさらに増加させることで、 η のさらなる向上が期待できる。

5.2.4 再減速板の陽電子再放出エネルギー分布および陽電子再放出率

図 5.7 をもとに、新旧再減速板の陽電子再放出エネルギー分布および陽電子再放出率について考察する。

ここで、電子プラズマは一様な電子密度を持つ直径 1.1mm の円柱形をしていると仮定する¹。このとき、電子プラズマの柱密度 σ_P は、

$$\sigma_P = \frac{N_{e^-}}{\pi r_{e^-}^2} \quad (5.1)$$

で求められる。ここで、 r_{e^-} は電子プラズマの半径である。

節 5.2.1 における各陽電子蓄積実験 (図 5.1 から図 5.5) の電子プラズマについて、陽電子が電子プラズマを一往復する際のエネルギー損失 δE の最大値 δE_{Max} を計算する。ここでは、便宜的に陽電子の電子プラズマ中での阻止能として

$$-\frac{dE}{dz} = \frac{\alpha n_{e^-} [\text{cm}^{-3}]}{E [\text{eV}]} \quad (E \gg k_B T_{e^-}) \quad (5.2)$$

を用いる [12]。ここで、 E は陽電子の電子プラズマ中での運動エネルギー、 z は陽電子の進行距離、 n_{e^-} は電子プラズマ密度、 $\alpha \sim 1.5 \times 10^{-12} \text{ eV}^2 \text{ cm}^2$ は係数、 k_B はボルツマン定数、 T_{e^-} は電子プラズマの温度である。式 5.2 のモデルは、節 3.2.4 の図 3.8 を得た計算モデルにおいて $E \gg k_B T_{e^-}$ という

¹我々が行った過去の研究により、陽電子蓄積実験で用いる電子プラズマは長さ $\sim 35 \text{ cm}$ 、径 $\sim 1.1 \text{ mm}$ の非常に細長いプラズマであることが分かっているが、その正確な形状はよく分かっていない。ここでは、定性的な議論を行うため、プラズマの形状を円柱と仮定した。

制限を与えたものである。ここでは、電子プラズマは充分冷たい（環境温度まで冷えているとすれば、 $T_{e-} \sim 10 \text{ K}$ すなわち $k_B T_{e-} \sim 8.6 \times 10^{-4} \text{ eV}$ ）とする。

式 5.2 を積分し、陽電子が電子プラズマ中を一往復する場合を考えると、 $\delta E = K_{e+} - E$ は

$$\delta E = K_{e+} - \sqrt{K_{e+}^2 - 2\alpha S} \quad (5.3)$$

で与えられる。ここで、 K_{e+} は陽電子の電子プラズマへの入射エネルギー、 S は節 3.2.4 で述べた量で $S = 2\sigma_P$ である。式 5.3 より、 δE_{Max} は $K_{e+} = \sqrt{2\alpha S}$ となる場合であり、 $\delta E_{Max} = \sqrt{2\alpha S}$ となる。式 5.1 を用いて δE_{Max} が計算できる。計算結果を表 5.1 に示す。

N_{e-}	$\delta E_{Max}[\text{eV}]$
4.7×10^9	1.7
8.2×10^9	2.3
1.0×10^{10}	2.5
1.4×10^{10}	3.0
1.8×10^{10}	3.4

表 5.1: N_{e-} に対する δE_{Max} の計算値

節 3.2.4 で述べたように、再減速板からの再放出陽電子のうち $E_R < \delta E$ である陽電子のみがトラップされる。ここでは、 η が最大値 η_{Max} をとるときを考えているので、 $V_R \sim V_{e-}$ と考えられる。よって、 $K_{e+} \sim E_R$ であり、各陽電子蓄積実験でトラップされる再放出陽電子は $E_R < \delta E_{Max}$ の再放出エネルギーを持つ陽電子である。例えば、 $N_{e-} = 1.0 \times 10^{10}$ を持つ電子プラズマを用いた陽電子蓄積実験では、 $E_R < \delta E_{Max} = 2.5 \text{ eV}$ の再放出陽電子がトラップされる。一方、 $N_{e-} = 1.4 \times 10^{10}$ の場合は、 $E_R < 3.0 \text{ eV}$ の再放出陽電子がトラップされる。よって、これらの陽電子蓄積効率 η_{Max} の差 $D\eta_{Max}$ は、 $2.5 \text{ eV} < E_R < 3.0 \text{ eV}$ を持つ再放出陽電子の再放出率 $Y_R(E_R)$ に対応する。この関係をまとめたものを図 5.8 に示す。図 5.8(a) は、各電子プラズマについて δE_{Max} の領域 $D\delta E_{Max}$ に対する $D\eta_{Max}$ の値を表にしたものである。図 5.8(b) は、図 5.8(a) をもとに $D\eta_{Max}/D\delta E_{Max}$ をプロットしたもので、陽電子再放出エネルギー分布に対応する。図 5.8(b) を見ると、 E_R の小さいところでは新旧再減速板で

Y_R に変化は見られないが、 E_R が大きいところでは新再減速板の方が旧再減速板よりも Y_R が大きくなっていることが分かる。

この結果は、高温処理（ ~ 2000 ）されたタンゲステン結晶における陽電子再放出エネルギー分布は、高エネルギー側に集中するという他の実験結果 [21][27] と一致する。

5.2.5 陽電子ビーム入射位置の最適化

陽電子蓄積効率に影響を与える要因の一つとして、トラップ装置に対する陽電子ビームの入射位置が考えられる。入射位置によって、陽電子が感じる電子プラズマのポテンシャルや陽電子の電子プラズマ中での飛行距離が変化するからである。

そこで、前節までの陽電子蓄積実験を行った後、新再減速板を用いて、トラップ装置に対する陽電子ビーム入射位置の最適化を次のように行った。

1. トラップ装置上流にあるディフレクターにより、入射陽電子ビームの進行方向を変化させる。
2. 進行方向が変化した陽電子ビームを用いて、陽電子蓄積実験を行い蓄積効率を測定する。
3. 陽電子ビームの進行方向の変化に対する陽電子蓄積効率の変化を調べ、蓄積効率の最大値を求める。蓄積効率が最大値をとったとき、陽電子ビームの入射位置は最適化されている。

入射陽電子ビーム位置を最適化した場合の陽電子蓄積実験の結果を図 5.9 に示す。ここでは、電子トラップ ET の深さ $V_{e\text{-well}} = 1000$ V（電子プラズマの構成電子数 $N_{e^-} = 1.8 \times 10^{10}$ ）と設定した。このとき、陽電子蓄積効率は最大で $\sim 0.7\%$ であった。入射陽電子ビーム位置を最適化する前の実験結果（図 5.1）に比べると、陽電子蓄積効率の最大値が約 1.2 倍になったことが分かる。

5.2.6 まとめ

再減速板を新再減速板に交換したことで、陽電子蓄積効率 η が旧再減速板に比べ、最高で 1.7 倍になった。また、新再減速板は、旧再減速板に

比べ、陽電子の再放出エネルギー分布が高い方に集中していると推定された。これは、他の実験結果と矛盾しないものである。

さらに、トラップ装置への陽電子ビーム入射位置を最適化することにより、陽電子蓄積効率 0.7 % を達成した。

今後、電子トラップ ET をさらに深くし、より高密度の電子プラズマを形成させたい。そうすることで、高エネルギー側の再放出陽電子を充分減速し、より高い陽電子蓄積効率を達成したいと考えている。

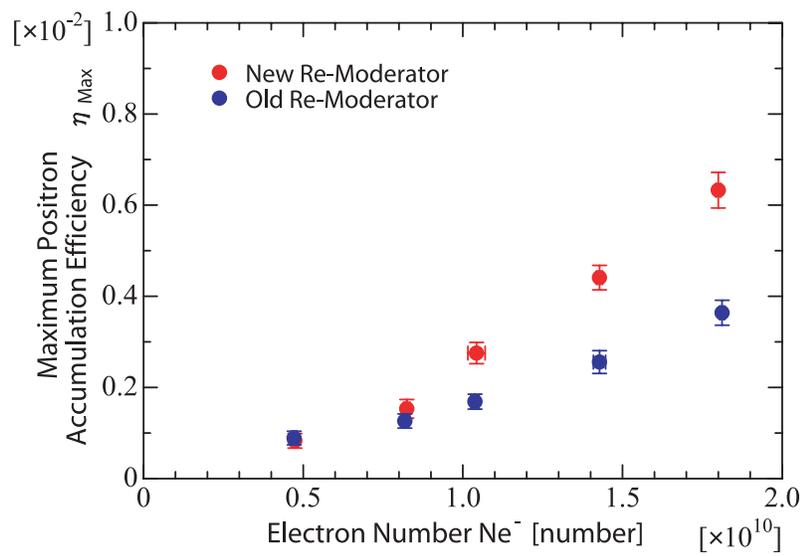


図 5.7: 電子プラズマの構成電子数 N_{e^-} と陽電子蓄積効率の最大値 η_{Max} の関係。

(a)

δE_{Max} [eV]	$D\eta_{\text{Max}} [\times 10^{-3}]$	
	Old	New
0		
↙	1.1	1.0
1.7		
↙	0.5	0.9
2.3		
↙	0.5	1.9
2.5		
↙	1.1	2.1
3.0		
↙	1.3	2.4
3.4		

(b)

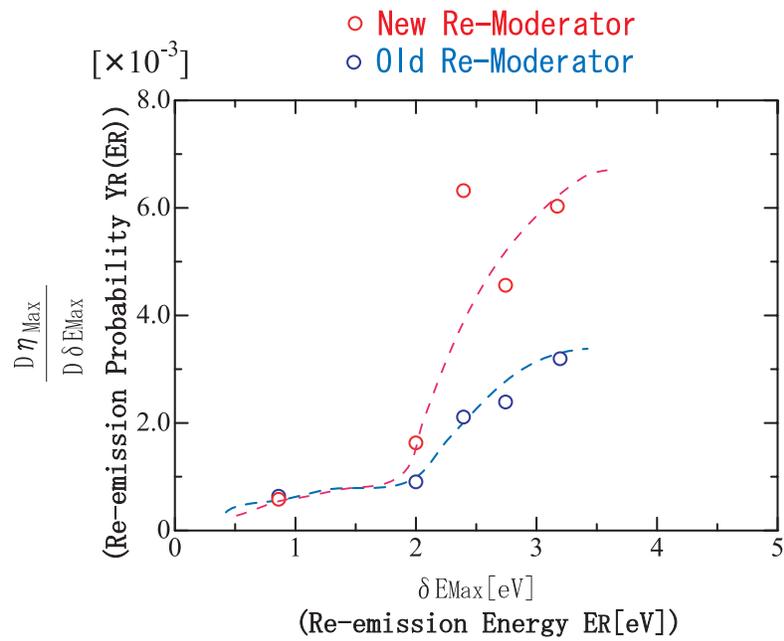


図 5.8: 新旧再減速板の陽電子再放出エネルギー分布。(a) 各 δE_{Max} の領域に対する $D\eta_{\text{Max}}$ (b) 陽電子再放出エネルギー分布。

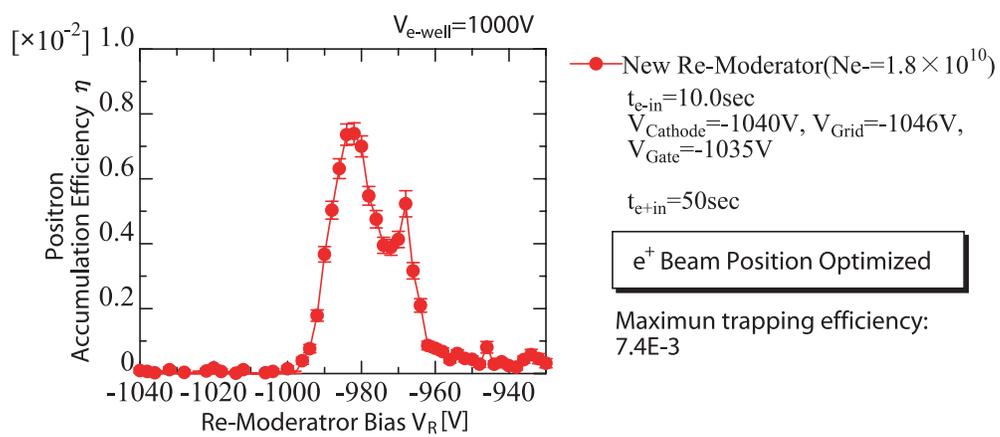


図 5.9: 入射陽電子ビーム位置を最適化した場合の陽電子蓄積実験の結果。ここでは新再減速板を用いている。ET の深さ $V_{e\text{-well}} = 1000\text{V}$ 、電子プラズマの構成電子数 $N_{e^-} = 1.8 \times 10^{10}$ である。

謝辞

本研究を行うに当たり、指導教官の山崎泰規教授には適切な助言を頂きました。先生のご指導があったおかげで本論文をまとめることができました。また、小牧研一郎教授にも指導教官と変わらぬご指導を頂きました。鳥居寛之助手、畠山温助手からも大変参考になる助言を頂きました。

小島隆夫博士、大島永康博士には実験の基礎からお教え頂き感謝しています。毛利明博京都大学名誉教授にも様々な助言を頂きました。また、学生の共同実験者である新垣恵さんには多大な協力をして頂きました。

研究室の皆様にも本研究を進めるに当たって多くの助言を頂きました。特に黒田直史さんには適切な助言を頂きました。その他多くの皆様のご協力があったおかげで、本論文をここにまとめることができました。深く感謝いたします。

関連図書

- [1] A.P.Mills Jr.,Nucl.Instr. and Meth. in Phys. Res. B **192**,107(2002)
- [2] S.Chu *et al.*,Phys.Rev.Lett. **48**, 1333(1982)
- [3] R.G.Greaves *et al.*, Phys.Rev.Lett. **75**,3846(1995)
- [4] T.M.Kojima *et al.*, RIKEN Review **31**,70(2000)
- [5] M.Amoretti *et al.*,Nature **419**, 456(2002);advance online publication, 18 September 2002(doi:10.1038/nature01096)
- [6] G.Gabrielse *et al.*,Phys.Rev.Lett. **89**, 213401 on line(2002)
- [7] L.H.Haarsma *et al.*,Phys.Rev.Lett. **75**, 806(1995)
- [8] J.Estrada *et al.*,Phys.Rev.Lett. **84**, 859(2000)
- [9] C.M.Surko *et al.*,Phys.Rev.Lett. **62**, 901(1989)
- [10] C.M.Surko *et al.*,"Proc. of Con. on Nonneutral plasmas",AIP Conf.Pro. No.498,3(1999)
- [11] N.Oshima *et al.*, RIKEN Review **31**,65(2000)
- [12] N.Oshima *et al.*,submitted for PRL
- [13] M.Niigaki *et al.*,22nd ICPEAC abst., P.689(2001)
- [14] G.Baur *et al.*,Phys.Lett. B **368**, 251(1996)
- [15] G.Blanford *et al.*,Phys.Rev.Lett. **80**, 3037(1998)
- [16] G.Gabrielse *et al.*, Phys.Lett. B **507**,1(2001)

- [17] G.Gabrielse *et al.* (ATRAP),Proposal, CERN SPSLC,SPSC 97-8/P306(1997)
- [18] A.Mohri *et al.*,Jpn.J.Appl.Phys. **37**, 664(1998)
- [19] D.V.Sivukhin,Rev.of Plasma Physics **4**, 93(1966)
- [20] R.Suzuki *et al.*, Appl.Surf.Sci. **149**,66(1999)
- [21] D.M.Chen *et al.*,Phys.Rev.B **31**, 4123(1985)
- [22] D.A.Fischer *et al.*,Phys.Rev. **B 33**, 4479(1986)
- [23] 小間篤 他編,「表面物性工学ハンドブック」,丸善株式会社(1987)
- [24] P.J.Schultz and K.G.Lynn, Rev.Mod.Phys. **60**,701(1988)
- [25] E.Gramsch *et al.*,Appl.Phys.Lett. **51**, 1862(1987)
- [26] R.Suzuki *et al.*,Jpn.J.Appl.Phys. **37**,4636(1998)
- [27] 鈴木良一 他,電子技術総合研究所彙報 第63巻,第11号,15頁
- [28] 金属表面技術協会,「金属表面技術便覧(改訂新版)」,日刊工業新聞社(2版 1977年発行)
- [29] 上田良二 編,「実験物理学講座 23 電子顕微鏡」,共立出版株式会社(1982)
- [30] 日本化学会 編,「第4版 実験化学講座 13 表面・界面」,丸善株式会社(1993)
- [31] A.Vehanen *et al.*,Appl.Phys.A **32**, 163(1983)
- [32] R.W.Joyner *et al.*,Surface Sci. **39**, 445(1973)
- [33] 下山宏,表面科学 **20**,3,210(1999)
- [34] K.H.Lee *et al.*,phys.stat.sol.(a)**157**, 93(1996)