

# 卒業論文

マイクロ波照射された太陽電池セル表面における放電現象の地上試験

指導教員：趙 孟佑 教授

提出日：平成 17 年 2 月 21 日

九州工業大学工学部電気工学科電気コース

学籍番号：01106042

氏名：加世堂 康平

## 目次

### 第1章 序論

- 1.1 はじめに
- 1.2 SSPS
- 1.3 研究目的

### 第2章 マルチパクタ放電

- 2.1 マルチパクタ放電
  - 2.1.1 二表面間マルチパクタ放電
  - 2.1.2 単一表面上マルチパクタ放電

### 第3章 実験装置

- 3.1 マイクロ波発生装置
  - 3.1.1 マイクロ波発振器
  - 3.1.2 マイクロ波伝送
  - 3.1.3 電力分割器
  - 3.1.4 サーキュレータ
  - 3.1.5 方向性結合器
  - 3.1.6 検波器
- 3.2 電磁ホーン
- 3.3 真空チャンバー
- 3.4 電磁波のシールド
  - 3.4.1 チャンバー内部のシールド
  - 3.4.2 アルミ箔によるシールド
  - 3.4.3 銅板によるシールド

### 第4章 実験方法及び結果

- 4.1 マイクロ波照射確認実験
  - 4.1.1 マイクロ波発振確認実験装置
  - 4.1.2 マイクロ波発振確認実験結果
- 4.2 アンテナによる電界強度測定
  - 4.2.1 自作アンテナによる電界強度測定
  - 4.2.2 電界分布測定結果
  - 4.2.3 ダイポールアンテナによる電界強度測定
- 4.3 太陽電池セルへのマイクロ波照射実験
  - 4.3.1 セルの垂直配置照射実験
  - 4.3.2 発光開始電力
  - 4.3.3 発光画像

- 4.3.4 放電箇所顕微鏡観測
- 4.3.5 圧力波形の変化
- 4.3.6 APD 波形
- 4.3.7 セルの水平配置照射実験
- 4.3.8 セルの配置と電界方向
- 4.3.9 マルチパクダ放電発生 of 電界強度の見積もり

## 第5章 結論

- 5.1 総括
- 5.2 今後の課題

参考文献

付録

謝辞

## 第一章 序論

### 1.1 はじめに

近年、世界の人口は急速に増加し、そのほとんどが開発途上国で起きている。これらの国の住民は当然のことだが産業国のような豊かなエネルギーのもとでの生活を求めるようになる。この要求に伴いエネルギー需要が急速に増加するだろうといわれている。また日本では1次エネルギーの約50%を石油にたよっている。しかもそのほとんどを外国からの輸入に頼っている。そのためこれらの国々が日本と同じ量の石油を使うようになると日本はエネルギーの確保が困難になっていくことが予想されエネルギー安定供給の確保が21世紀における日本の課題である。

図 1.1 人口増加とエネルギー需要

Fig 1.1 A population increase and demand for energy(\*1)

### 1.2 SSPS

この深刻なエネルギー問題に対しては核融合の研究、あるいは自然エネルギーの開発として環境負荷の少ないソーラーエネルギーなど様々なアプローチが検討されている。特に1968年にグレーザーが発表した宇宙太陽発電（SSPS: Space Solar Power System）は宇宙空間に巨大な太陽電池およびマイクロ波送電システムを一体化した衛星を浮かべ、太陽光発電をして地上に電波でエネルギーを送る原理で、以下のようなメリットがある。

- 1) 昼夜天候を問わず発電が可能。
- 2) 地上に比べ平均5～10倍の太陽光強度で発電ができる。
- 3) 核融合発電とは違い原理が実証されている。

現在検討されているSSPSの構造は太陽電池、マイクロ波発振回路および送電アンテナが一体化されたものが考えられ、2020～30年の商用化を目標としている。最終的には1GWもの莫大なエネルギーを送電できるシステムが想定されている。

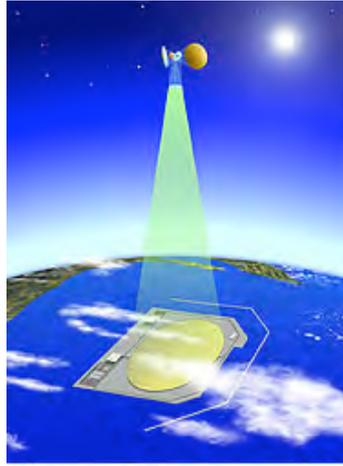


図 1.2 マイクロ波SSPS

Fig 1.2 Microwave space solar power system (\*2)

### 1. 3 研究目的

真空中ではマイクロ波を用いる機器ではよくマルチバクタ放電という現象が観測される。この現象は最悪の場合、機器表面、内部の浸食につながる。その原理については次章で詳細に述べるが、マイクロ波と金属や誘電体表面との相互作用により表面が浸食される現象である。前述のSSPSでは莫大なエネルギーのマイクロ波を送電するため、その一部が太陽電池表面側に回折した場合、深刻な破壊を引き起こすことが懸念されている。宇宙用太陽電池セルはサブストレート上に接着剤で貼り付けられ、セルとセルはインターコネクタと呼ばれる導体によって連結されている。また、セルの表面にはカバーガラスが貼り付けられている。

このように太陽電池は金属と誘電体でできており、そこにマイクロ波が照射された場合マルチバクタ放電が起こるのではないかと考えられる。マルチバクタ放電が太陽電池表面で起きると発電電力の低下へつながり、最悪の場合発電できなくなることも考えられる。しかしながら過去に実験による検証はほとんどなく、基礎的な実験がSSPS成立のためには必要不可欠である。

そこで本研究では真空環境下で太陽電池とマイクロ波との相互作用を調べるための装置を構築し、マイクロ波強度に対する現象を調べる。またマルチバクタ放電の有無を調べ、代表的な放射レベルについても実験的に検証する。

## 第二章 マルチパクタ放電

### 2.1 マルチパクタ放電

マルチパクタ放電はマイクロ波に起因する多くのデバイスではしばしば観測される現象で、本研究では太陽電池セルやカバーガラスの損傷を引き起こし、発電電力の低下へ繋がると考えらる。マルチパクタ放電という現象には単一表面上におけるものと二表面間におけるものとの二種類が考えられる。ここではまず一般的によく知られている二表面間におけるマルチパクタ放電についての原理を説明し、次に単一表面上におけるマルチパクタ放電の原理について説明する。

#### 2.1.1 二表面間マルチパクタ放電 (\*3)

二表面間のマルチパクタ放電は RF を扱う際に見られる特有の放電である。図 2.1-1 に示すような高周波電界のかかる金属ギャップである二極間を考える。図で電極 B が+のある時刻  $t_1$  に何らかの原因で電極 A を出た電子が、時刻  $t_2$  に対向する電極 B に衝突するとする。この衝突により電極 B からは二次電子が放出される。もしこの時電場が反転していれば、放出された電子は逆方向に加速されて電極 A に衝突し二次電子を放出する。二次電子放出係数が 1 以上であればこの仮定が繰り返し起こり放電が増大し持続する。これが二表面間のマルチパクタ放電である。

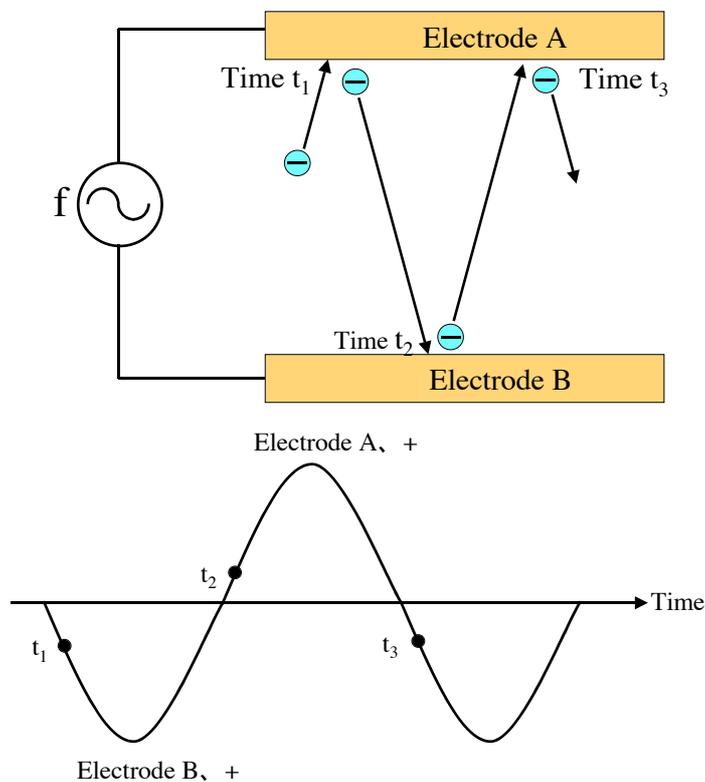


図 2.1-1 二表面間マルチパクタ放電モデル図

Fig.2.1-1 Model of a two surface multipactor discharge

#### 2.1.2 単一表面上マルチパクタ放電 (\*4)

2表面間マルチパクタ放電は金属ギャップを考えたが、単一表面上マルチパクタ放電は誘電体表面上を考える。誘電体表面上に表面と直交する向きに直流電界  $E_{dc}$  と、表面と平行する向きに交流電界  $E_{rf}$  を考える。この様子を図 2.1.2 に示す。

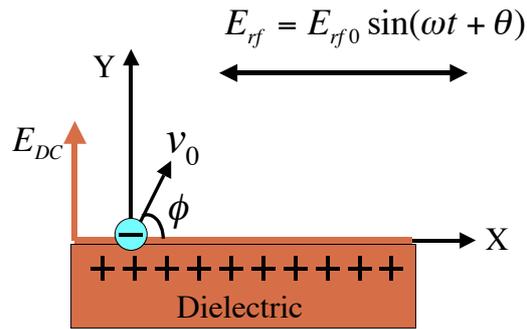


Fig 2.1-2 Model of a single surface multipactor discharge

図 2.1-2 単一表面上マルチパクタ放電図

この誘電体表面上から電子が任意の速度  $v_0$  を持ち、角度  $\phi$  で放出したとする。このとき電子は、誘電体表面と平行する向きにかかる大きさ  $E_{rf0}$  周波数  $\omega$  の RF 電場  $E_{rf}$  により X 軸に沿って平行移動したものととしてエネルギーを受けとる。DC 電場  $E_{dc}$  は電子に対してエネルギーは与えず、単にその軌道を誘電体表面にぶつかるように曲げる。そのため電子は初めに誘電体表面を飛び出した時より大きなエネルギーをもって誘電体表面に再び衝突する。このとき、衝突による 2 次電子放出係数が 1 を超えていれば電子の放出と衝突が繰り返し起こり、単一表面上マルチパクタ放電となる。

### 第三章 実験装置

#### 3. 1 マイクロ波発生装置

##### 3.1.1 マイクロ波発振器

マイクロ波発振器を図3.1-1に示す。



Power supply unit

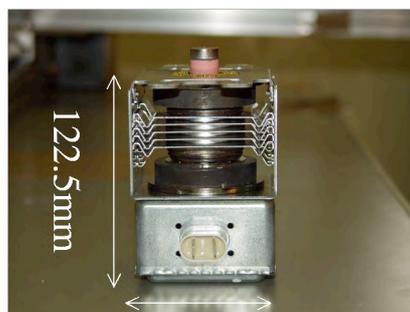


Oscillation unit

図3.1-1 マイクロ波発振器

Fig3.1-1 Microwave generator

マイクロ波発振器はマイクロ電子株式会社製 MMG-604V型、発振周波数 $5.8\text{GHz} \pm 15\text{MHz}$ であり、公称で0~400Wまでを連続可変で出力する事が出来る。マイクロ波発振器は発振部と電源パネルの2つに分かれており、それぞれは高圧ケーブルと制御ケーブルで接続されている。電源パネルは入力電源として三相交流200Vで動作する。出力調整は電源パネル上にあるPower Controlつまみにより行う。このPower Controlつまみはマグネトロン発振管のアノードに流れる電流を調整することでマイクロ波出力をコントロールする。また電源パネルにはこのアノード電流をモニターするための電流計とBNC端子があり、後で述べるがこのBNC端子によりマイクロ波出力を計測している。発振部の中の発振管には松下電子応用機器株式会社製 連続波マグネトロン発振管（固定周波数、磁界内蔵、プローブ出力型）が使用されている。この発振管の外観を図3.1-2に示す



71.6mm

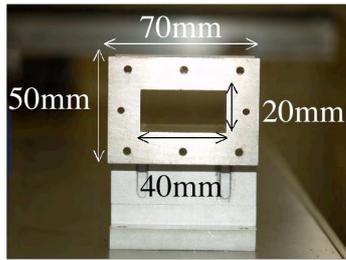
The front

図3.1-2 マグネトロン発振管

Fig3.1-2 Magnetron oscillation tube

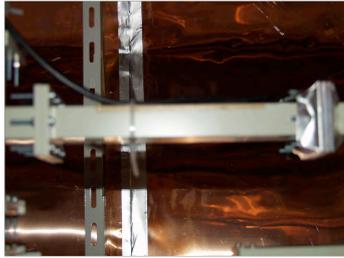
##### 3.1.2 マイクロ波伝送

発振部で発生したマイクロ波を効率良く伝送するために導波管を使用した。直線導波管、L型のEベン  
ト導波管の2種類使用し、その外観を図3.1-3に示す。マイクロ電子株式会社製 直線導波管、Eベン  
ト導波管共に口径はWRJ-6である。

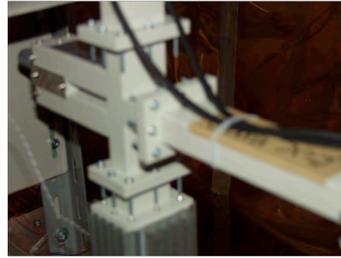


Caliber standard  
WRJ-6; 20mm×40mm

Cross section



The side



The joint part

図 3.1-3導波管  
Fig Waveguide

### 3.1.3電力分割器（ダミーロード付き）

マイクロ電子株式会社製 電力分割器 許容電力:400W 最大減衰率:20dBの外観を図3.1-4に示す。電力分割器は導波管内を伝送されているマイクロ波出力を調整するためのもので、導波管を2つに分岐し片方を無反射終端器に送り熱として消費することができる。減衰率の調整は電力分割器本体にあるマイクロメータで行う。

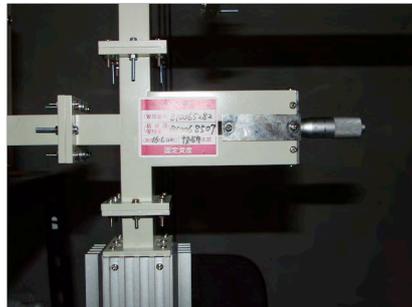


図 3.1-4 電力分割器  
Fig 3.1-4 Power Divider

### 3.1.4サーキュレーター

マイクロ電子株式会社製 サーキュレーター アイソレーション:20dB 挿入損失:0.2dB以下 を図3.1-5に示す。サーキュレーターは負荷より反射してきたマイクロ波から発振部を保護するためのものである。



図3.1-5 サーキュレーター  
Fig Circulator

### 3.1.5方向性結合器

マイクロ電子株式会社製 方向性結合器 出力接検：同軸管WX-20Dを図3.1-6に示す。方向性結合器は導波管中を伝搬しているマイクロ波の入射波、反射波の一部分をそれぞれ検出し、同軸コネクタに出力する。この出力端子により導波管内を伝搬しているマイクロ波電力を次に述べる検波器により測定する事が出来る。



図 3.1-6方向性結合器  
Fig 3.1-6Directionality coupler

### 3.1.6検波器

マイクロ電子株式会社製 検波器 を図3.1-7に示す。方向性結合器の同軸コネクタから出力したマイクロ波電力をダイオードで整流し電流値として電流計に表示される。表示した電流値はマイクロ波電力値へ換算することができる。



図 3.1-7 検波器  
Fig 3.1-7 Detector

### 3. 2 電磁ホーン

マイクロ波は伝送線路の形状により種々の電磁界分布をとりながら伝搬して行く。この分布はモードと呼ばれている。モードは導波管径とその遮断周波数により優勢モードが存在する。マイクロ波発生装置から出力するマイクロ波は方形導波管WRJ-6によって伝搬されてくる。この場合の優勢モードはTE<sub>10</sub>モードである。このときの導波管の電磁界分布を図3.2-1に示す。また真空チャンバーは円筒形であり、円形導波管とみなした。円形導波管での優勢モードはTE<sub>11</sub>モードである。この電磁界分布を図3.2-2に示す。

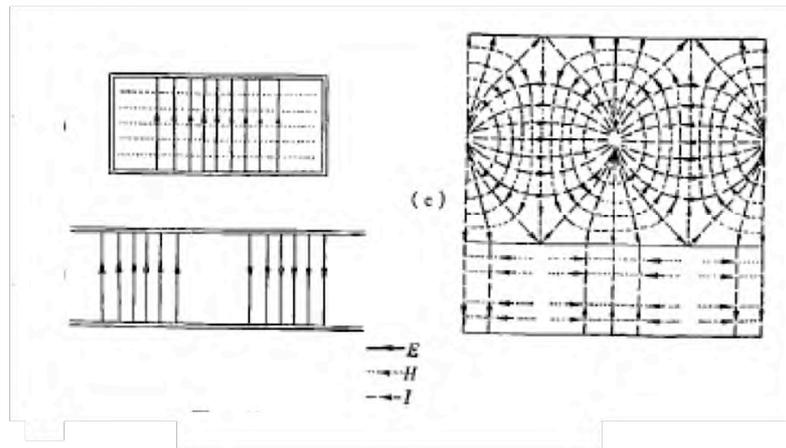


図3.2-1 TE<sub>10</sub>モード

Fig TE<sub>10</sub> mode

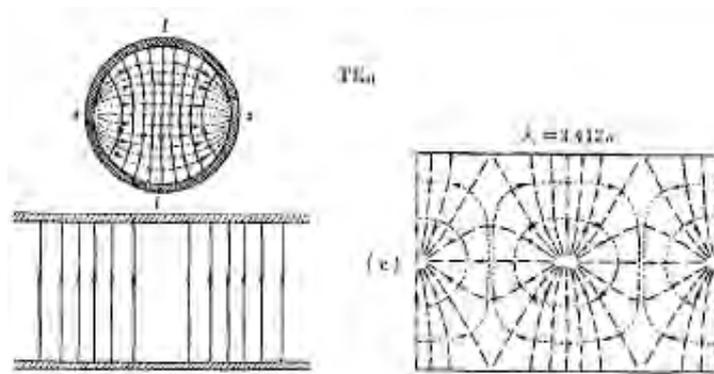


図3.2-2 TE<sub>11</sub>モード

Fig 3.2-2 TE<sub>11</sub>mode (\*5)

伝送線路の断面形状が変形する点ではモードの結合が起こりそれまで伝搬してきた電力が損失として減少する。この損失を減らすには導波管形状を徐々に変形していかなければならない。そこで、方形導波管WRJ-6の形状から円形の真空チャンバーのマイクロ波投入用窓の形状へと徐々に変形していくように設計した電磁ホーンを作成した。電磁ホーンを図3.2-3に示す。電磁ホーンの高さは500mm、直径150mmである。今回使用するマイクロ波は5.8GHz帯であり、真空での波長は51.7mmである。電磁ホーンの高さを500mmとしたのは約10波長分でモード変換を行い、損失を減少させる目的からである。

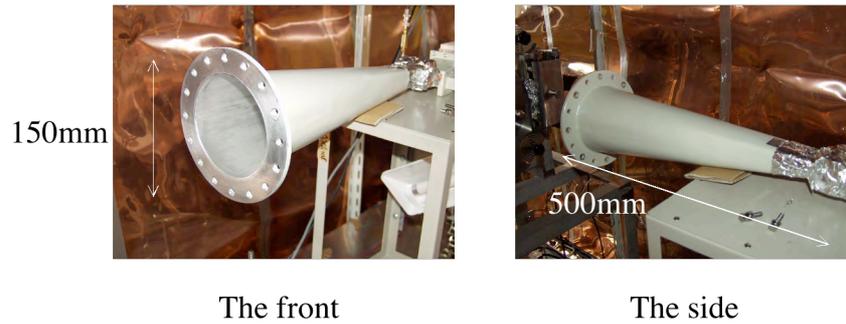


図3.2-3 電磁ホーン

Fig3.2-3 Electromagnetic horn

またこの電磁ホーンと真空チャンバーは正確に固定されなければならない。そこで真空チャンバーの前面窓フランジと電磁ホーン先端の両方の同じ位置に8つの穴を空け、そこをボルトにより直接固定するという方法を取った。チャンバーとの接合時の様子を図3.2-4に示す。



At installation

図 3.2-4 ホーン-チャンバー接続時の様子  
Fig 3.2-4 Connection of horn and chamber

### 3.3 真空チャンバー

宇宙環境を模擬した真空チャンバーを図3.3-1に示す。

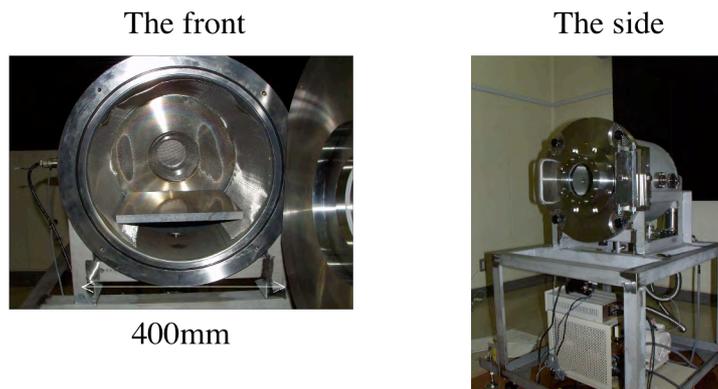


図3.3-1 真空チャンバー

Fig 3.3-1 Vacuum chamber

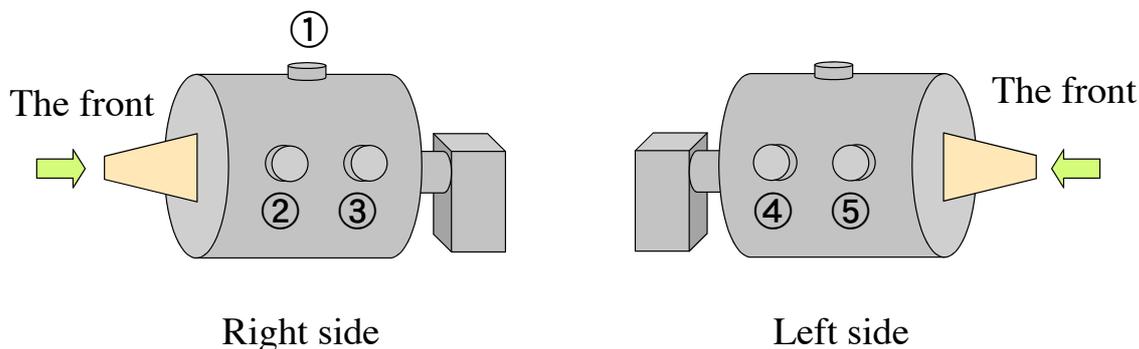
真空チャンバーは直径400mm、奥行き400mmである。真空チャンバーには粗引き用ロータリーポンプ ULVAC製：GVD-100、ターボ分子ポンプ ULVAC製：UTM-150があり、 $10^{-5}$ ~ $10^{-3}$ Pa程度の真空度で実験を行う事ができる。

### 3. 4電磁波のシールド

マイクロ波を取り扱う際に最も重要なことはマイクロ波の漏れを防ぐことである。マイクロ波の被曝は、異常出産、白内障、中枢神経障害、頭痛、がん等を引き起こすと言われている。総務省が定める環境基準によると、本研究で取り扱う周波数5.8GHzを含む1GHz～300GHzに関しては10W/m<sup>2</sup>以下としてある。そこで本実験装置でもこの基準以下に抑えることを行った。

#### 3.4.1チェンバー内部のシールド

発振されたマイクロ波は電磁ホーンを伝わってチャンバー全面のガラス窓を通過し真空チャンバー内部へ伝搬する。チャンバー内壁の多くの部分は金属製であり、マイクロ波の多くはそこで反射する。しかしチャンバー側面または上部にある5つのフランジからはマイクロ波がリークする。このフランジの位置を図3.4.1-1に示す。



図

3.4.1-1 フランジの位置

Fig 3.4.1-1 Position of flange

また、実験中は真空度を保つためにターボ分子ポンプを可動した状態で行い、ターボ分子ポンプに直接マイクロ波が入射する恐れがある。そこで図3.4.1-2に示すようにチャンバー内面とゲートバルブ直前を円柱状に加工したステンレスのメッシュで覆った。使用したメッシュの編み目はマイクロ波を遮断できる1/4波長以下である。またメッシュを挿入したことによる真空度への影響はみられなかった。

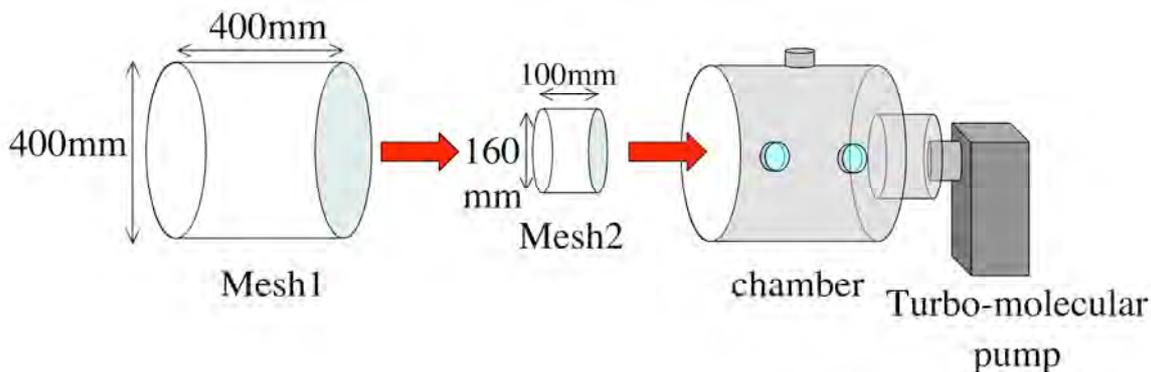


図 3.4.1-2 チャンバー内部のシールド

Fig3.4.1-2 Shield in chamber

このときのチャンバー内部の様子を図3.4.1-3に示す。



図 3.4.1-3 メッシュでシールドしたチャンバー内部

Fig 3.4.1-3 Inside of chamber shielded with mesh

このメッシュによるシールドの効果を試験した。マイクロ波のリーク値の測定はリークディテクター（マイクロ電子製）を用いた。このリークディテクターは最大 $20\text{W}/\text{m}^2$ と最大 $50\text{W}/\text{m}^2$ という2種類の測定レンジでリークの測定が可能である。この外観を図3.4.1-4に示す。



図 3.4.1-4リークディテクター

Fig 3.4.1-4 Leak detector

試験条件は真空度 $4 \times 10^{-4}\text{Pa}$ であり、チャンバー内部へ入射したマイクロ波出力の計算値は $25\text{W}$ である。この時のマイクロ波のリーク箇所とリーク測定結果を図3.4.1-5に示す。

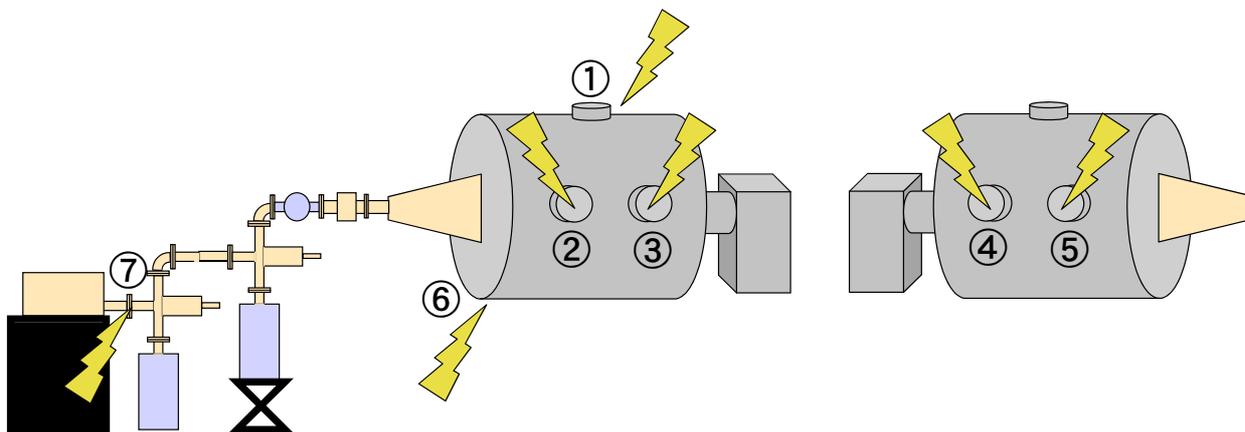


図 3.4.1-5 リーク箇所

Fig 3.4.1-5 Leak part

leak part	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
max leak value [W/m <sup>2</sup> ]	70	50	50	10	10	20	20

表 3.4.1-6 リーク測定値

Table 3.4.1-6 Leakage measurements

マイクロ波のリークはチャンバーの5つのフランジからだけではなく、チャンバーの扉、発振部—導波管の接合部からもリークしていることが判明した。このリーク値は基準値を大きく上回っておりさらに抑える必要がある。

### 3.4.2アルミ箔によるシールド

マイクロ波関連の機器を取り扱う企業のWebページ等ではマイクロ波のリークはアルミ箔では防ぐことは出来ないと記載してある事が多いが、リーク箇所を全てアルミ箔で覆って見ることにした。この時の様子を図3.4.2-1に示す。

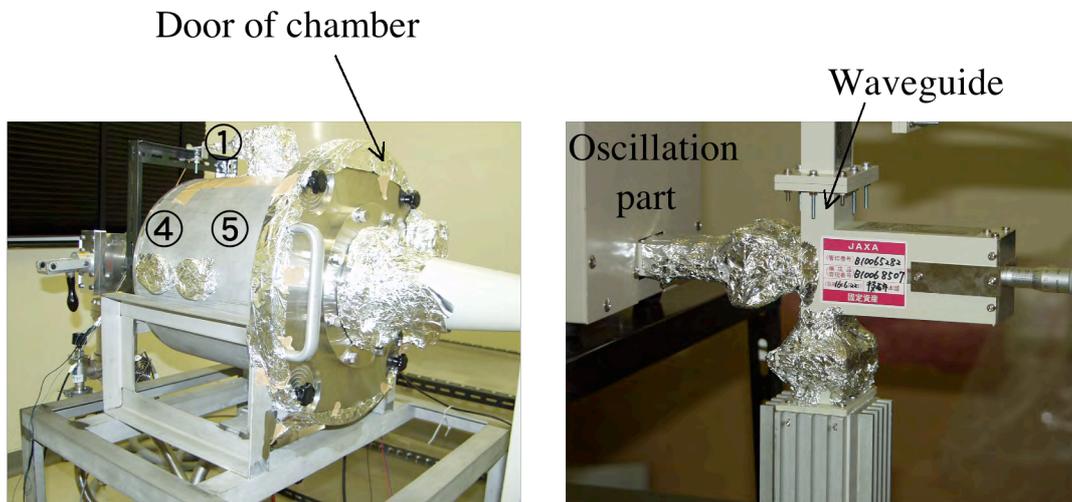


図 3.4.2-1 アルミ箔によるシールド

Fig 3.4.2-1 Shield with aluminum foil

このアルミ箔によるシールドの効果を試験した。試験条件は真空度が $4 \times 10^{-4}$ Pa、チャンバー内部へ入射したマイクロ波出力の計算は25Wである。このときのリーク箇所とリーク測定結果を図3.4.2-2及び表3.4.2-3に示す。

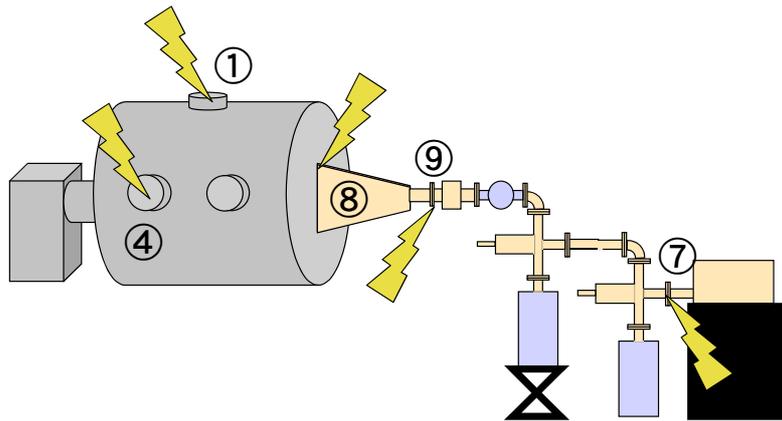


図 3.4.2-2 リーク箇所

Fig 3.4.2-2 Leak part

leak part	①	④	⑦	⑧	⑨
max leak value[W/m <sup>2</sup> ]	40	20	30	40	20

表3.4.2-3 リーク測定値

Table 3.4.2-3 Leakage measurements

アルミ箔によるシールド効果はリークを防いでいる箇所もあるが逆に増加している箇所もあり、効果が疑わしい。また新しく電磁ホーンの根元と先の2箇所からのリークが確認された。これらのリーク値はやはり基準値を上回っているため更なる対策が必要である。

### 3.4.3銅板によるシールド

メッシュやアルミ箔によってチャンバーやマイクロ波発生装置自体からのリークを基準値以下に抑えることはできなかった。そこでマイクロ波発生装置及び真空チャンバー全体からのリーク値が実験者の立っている地点では基準値以下に抑えられ、かつマイクロ波発振中は真空チャンバー及び発生装置に近寄らなければ安全であるとの観点からリーク対策を行った。そこで真空チャンバーとマイクロ波発生装置全体を銅板で覆ったシールドルームを作成した。このシールドルームの構造は、装置全体が収まる大きさの骨組みをアングルにより製作し、その上から銅板を被せ、床面からも銅板で覆うという直方体の箱である。図3.4.3-1この骨組みの寸法を示す。

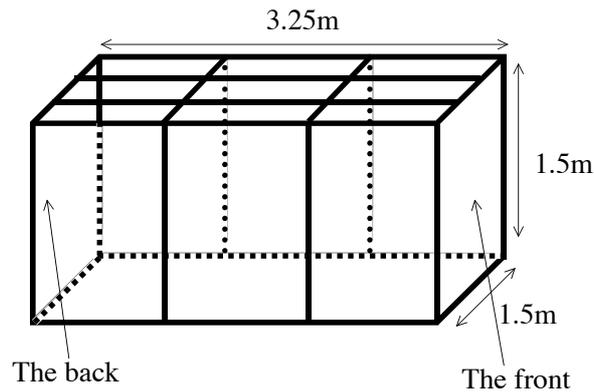


図 3.4.3-1 シールドルームの寸法

Fig 3.4.3-1 Size of Shield room

この骨組みのサイズをもった広さの銅板は入手困難なため、0.45m×4.5mの銅板をハンダと金属テープで繋ぎあわせて一枚の広い銅板とした。また、図3.4.3-1にある前面は実験者側から装置の状態が観測できるようメッシュで覆い、可動式にしたことでシールドルームの出入り口となる。シールドルーム内にはリークしてきたマイクロ波を吸収する吸収体が存在しないため背面は何も覆っていない。作成したシールドルームの外観を図3.4.3-2に示す。

The outside



The inside



図 3.4.3-2 シールドルーム外観

Fig 3.4.3-2 Externals of shield room

このシールドルームによる効果の試験を行った。試験は実際の照射実験を想定し、安定して出力可能なマイクロ波出力の最大値250Wで行った。リーク箇所とそのときのリーク値を図3.4.3-3に示す。

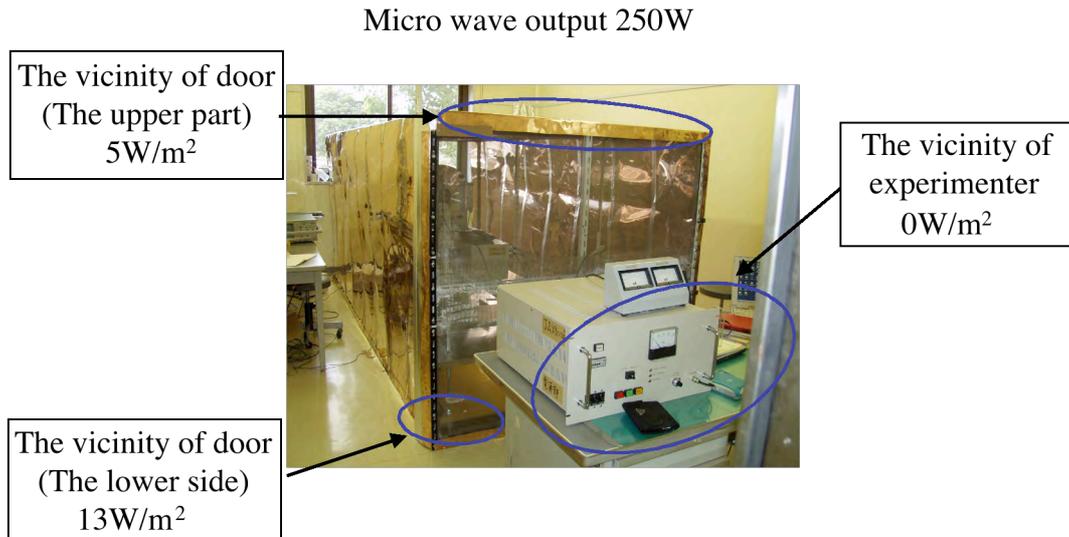


図 3.4.3-3 リーク測定結果

Fig 3.4.3-3 Leak measurement result

この測定結果から実験者付近ではマイクロ波のリークは観測されず、安全であることがわかる。しかしシールドルームのドア付近は基準値を多少上回っている。これはドアの開閉を行うための多少の隙間があるためである。実験中にはこのドア付近に実験者が近づく恐れがあるため、さらにこの箇所のリークを防ぐ必要がある。そこでこの箇所をアルミ箔で覆った。この様子とシールド効果試験結果を図3.4.3-4に示す。

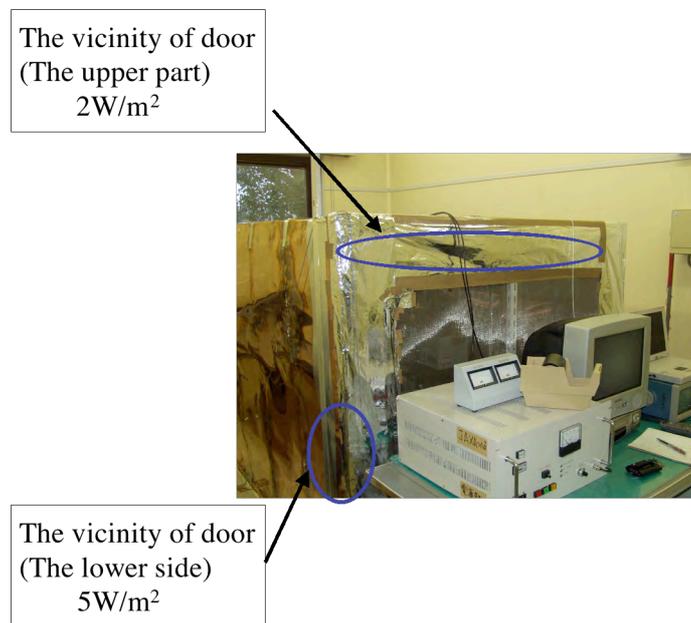


図 3.4.3-4 アルミ箔で覆った後のシールドルームとリーク測定結果

Fig 3.4.3-4 After shield room covers with the aluminum foil and leak measurement result

シールドルームをアルミ箔で覆った後はドア付近での最大リーク値が基準値以下の  $5\text{W}/\text{m}^2$  まで抑えることができている。これにより次から述べる実験は安全に行うことが可能である。

## 第四章 実験方法及び結果

### 4.1 マイクロ波照射確認実験

#### 4.1.1 マイクロ波発振確認実験装置

真空チャンバー内にマイクロ波を投入する前の予備実験として、マイクロ波発生装置から実際にマイクロ波が発振していることの確認を行う必要がある。マイクロ波発振確認実験装置を図4.1-1示す。



図4.1-1 マイクロ波発振確認実験装置外観

Fig4.1-1 Micro wave oscillation confirmation experiment device externals

また、このマイクロ波発振確認装置の配置図を図4.1-2に示す

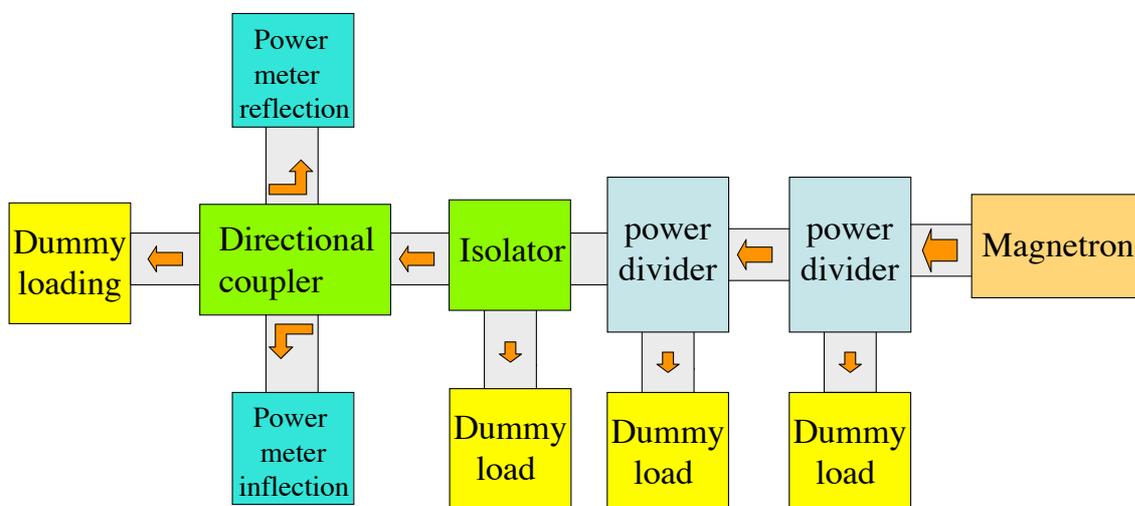


図4.1-2 マイクロ波発振確認実験装置配置図

Fig4.1-2 System diagram of microwave oscillation system

発振部から出力したマイクロ波は2台の電力分割器により減衰される。減衰したマイクロ波は方向性結合器にある検波器で最終的な出力値を測定して、無反射終端器へ入り熱として消費される。マイクロ波の発振は検波器に表示される電流値により確認する。電流値と出力電力値は図4.1-3に示す校正された換算表より求まる。

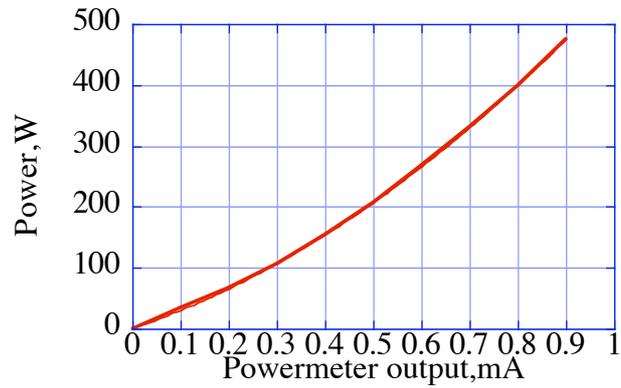


図 4.1-3 パワーモニタ出力とマイクロ波出力の換算表

Fig 4.1-3 Conversion table of power meter output vs microwave power

#### 4.1.2 マイクロ波発振確認実験結果

前にも述べたがマイクロ波の出力調整は電源パネルのダイヤルの調整で行う。マイクロ波の発振確認の測定結果を公称値と共に図 4.1-4 に示す。

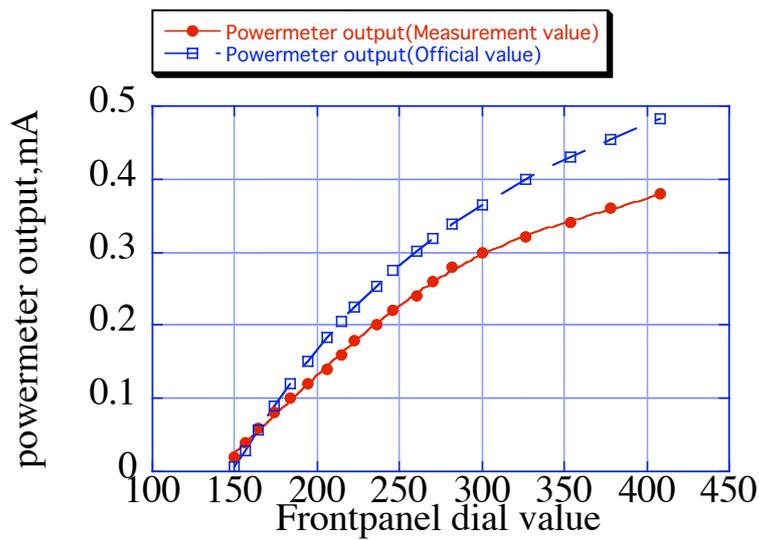


図 4.1-4 パワーメーター測定値及び公称値

Fig 4.1-4 Measurement of power meter value and Official value

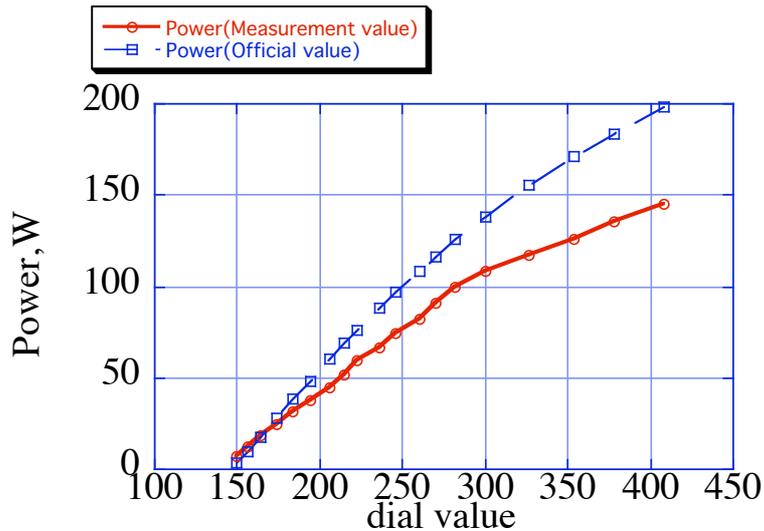


図 4.1-5 マイクロ波出力測定値及び公称値

Fig 4.1-5 Micro wave output measurements and official value

図 4.1-4 より図 4.1-3 を用いて出力電力値に換算したものを図 4.1-5 に示す。この装置の最大出力は 400W であるが、400W 出力するとマグネトロン発振管のアノードに流れるアノード電流が過電流となり電源パネルの安全装置が働き出力が遮断されるため実際には定格の半分程度しか出すことが出来ない。そのため測定は 200W までで行った。これによりマイクロ波が 150W 程度は発振されていることがわかる。また、図 4.1-4 及び図 4.1-5 ではダイヤル値を基準に測定を行った。しかしダイヤル値とマイクロ波出力の関係はアノード電極の温度の影響により常に一定ではない。それが公称値とマイクロ波出力とのずれの原因である。これ以降はパワーモニター出力と図 4.1-3 を使い、マイクロ波出力への換算を行った。

## 4.2 アンテナによる電界強度測定

### 4.2.1 自作アンテナによる電界強度測定

発振部より出力されたマイクロ波は電磁ホーンによりモード変換され真空チャンバーへ入射する。この時の実験装置の外観を図4.2-1に示す。

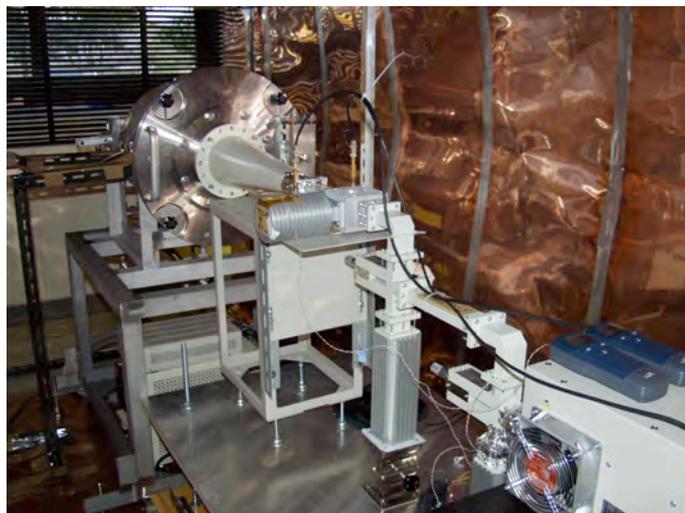


図4.2-1 真空中マイクロ波照射実験装置外観図

Fig 4.2-1 The micro wave irradiation experiment in the vacuum device externals chart

真空チャンバーは金属製でありマイクロ波は反射を繰り返し電磁界の分布は乱れ、入射波と反射波が重なり合った定在波になっている。後で示すが太陽電池セル表面でマルチパクター放電を起こすためにはチャンバー内で定在波の電界強度の最も強い場所に配置すべきであり、チャンバー内で定在波の分布がどのようなになっているのかを三次元的に測定する必要がある。そこでセミフレキシブルの同軸ケーブルで自作のアンテナを作成し、これをスペクトラムアナライザー（ADVANTEST製、R3162、MAX30dBm,DC0V,入力インピーダンス50Ω,9KHz-8GHz）に接続することにより電界強度測定を行った。セミフレキシブルケーブルを使用したのはチャンバー内部で折り曲げて使用できるため三次元的に測定を行うのに都合が良いからである。作成したアンテナを図4.2-2.1に示す。アンテナ係数は測定していないがマイクロ波を拾うアンテナの芯線部分の長さは、真空中の5.8GHzマイクロ波の波長の四分の一とした。また、スペクトラムアナライザーとアンテナの間には図4.2-2.2に示すような6dBと20dBの固定減衰器を挿入した。

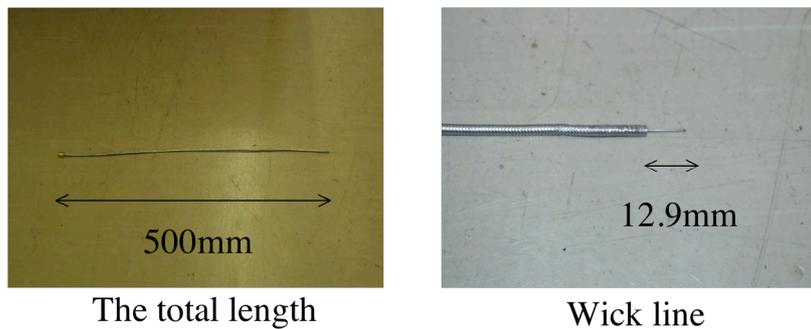


図4.2-2.1 自作アンテナ  
Fig4.2-2.1 Self-made antenna

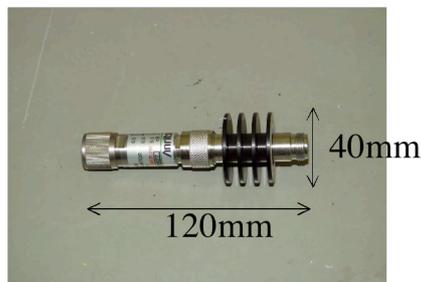


図 4.2-2.2 アッテネータ  
Fig 4.2-2.2 Attenuator

電界分布を測定するにあたり真空チェンバーの軸は図4.2-3のようにチャンバーの中心を原点として設定した。

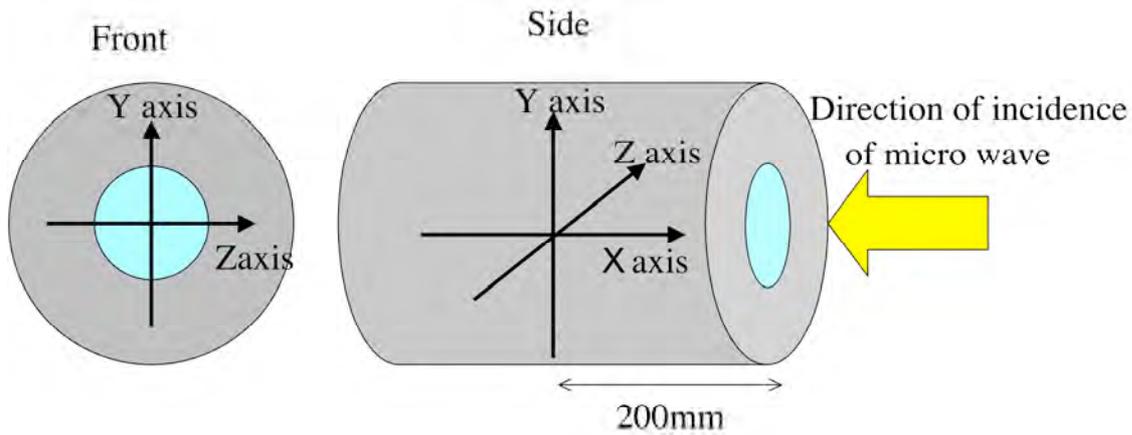


図4.2-3 チャンバーの軸設定

Fig 4.2-3 Axial setting of chamber

アンテナを三次元的に可動させるために真空チャンバー外部でX-Zステージに固定し、Y軸方向にはアンテナ自体の重みで弛むのでアルミアングルでガイドを付けて固定した。これを図4.2-4に示す。



図 4.2-4 電界分布測定装置

Fig 4.2-4 Electric field distribution weighing device

アンテナは真空チャンバー側面にある窓フランジから挿入するため、X軸方向には10mm刻みで30mmだけ可動し、Z軸方向には40mm刻みで±160mm可動する。Y軸方向にはチャンバーの壁があるため100mm刻みで±100mm、30mm以上X軸方向に可動する際にはアンテナ自身を折り曲げて測定を行う。

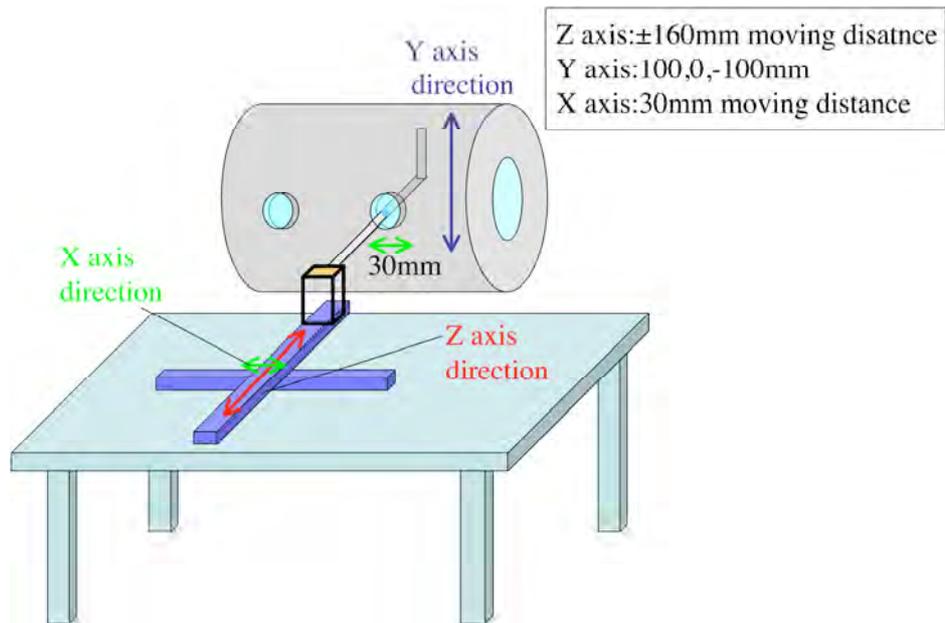


図 4.2-5 X-Zステージ可動範囲  
Fig 4.2-5 X-Z stage movable range

#### 4.2.2電界分布測定結果

チャンパー内部の電界分布測定はスペクトラムアナライザのaverage機能を使い行った。この機能は測定点の電界を100回平均した値を示す。また測定方法はX軸、Y軸、Z軸のうちX軸とY軸の2軸は固定しておき、Z軸のみ40mm刻みで可動して行った。こうすることで、Z軸と平行な線の分布が分かる。この線分布測定を10回行き来して行った。測定結果をY=0,100,-100のそれぞれについての平均と最大値、最小値を示す。

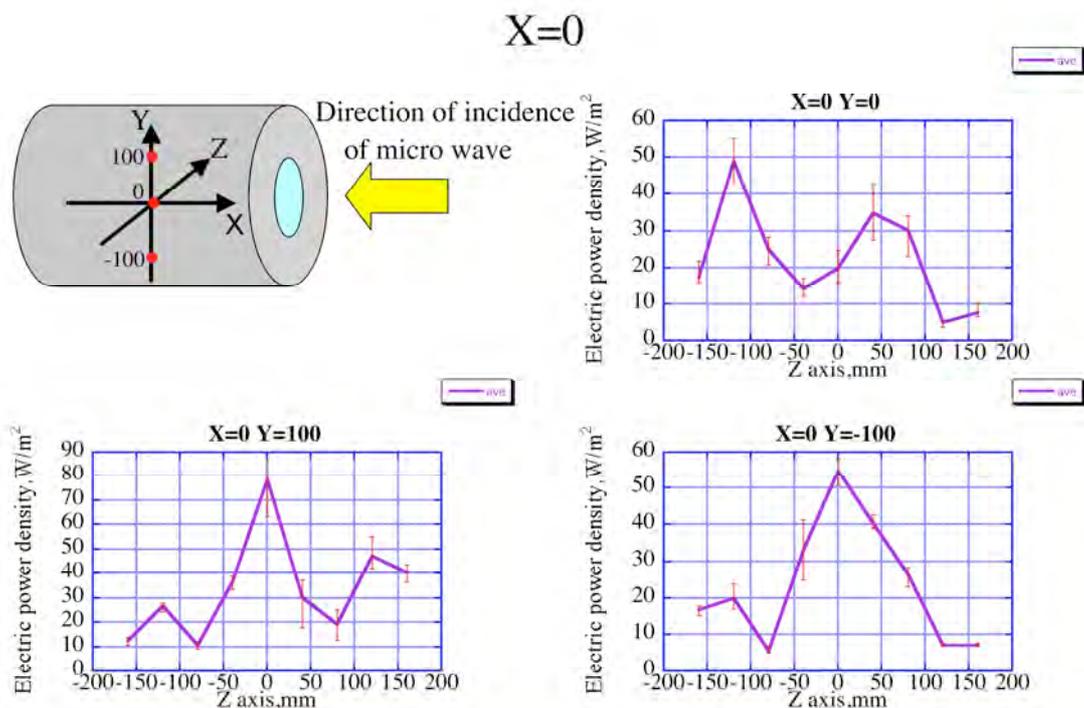


図 4.2.2-1 電界分布測定結果1 (X=0)

Fig 4.2.2-1 Electric field distribution measurement result 1 (X=0)

X=10,20

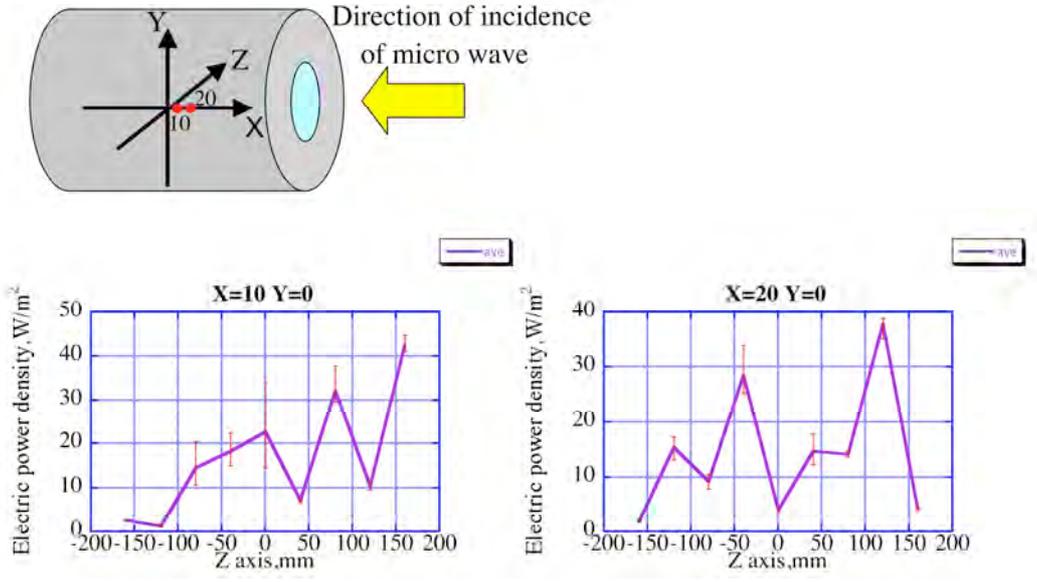


図 4.2.2-2 電界分布測定結果 2 (X=1,X=2)

Fig 4.2.2-2 Electric field distribution measurement result 2(X=10,X=20)

X=30

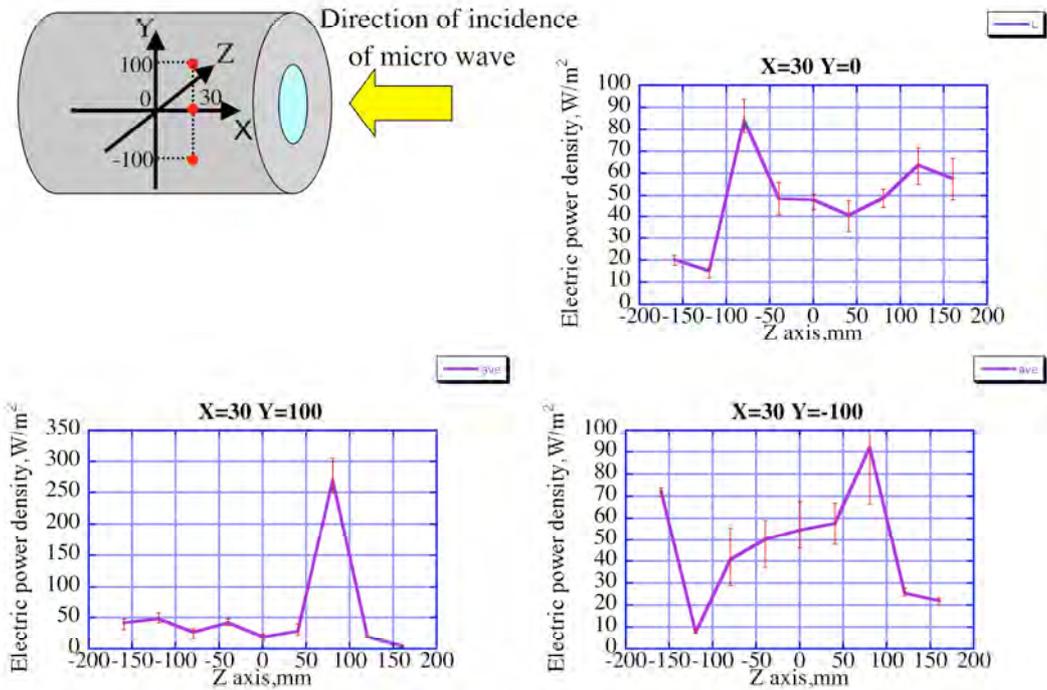


図 4.2.2-3 電界分布測定結果3 (X=30)

Fig 4.2.2-3 Electric field distribution measurement result 3(X=30)

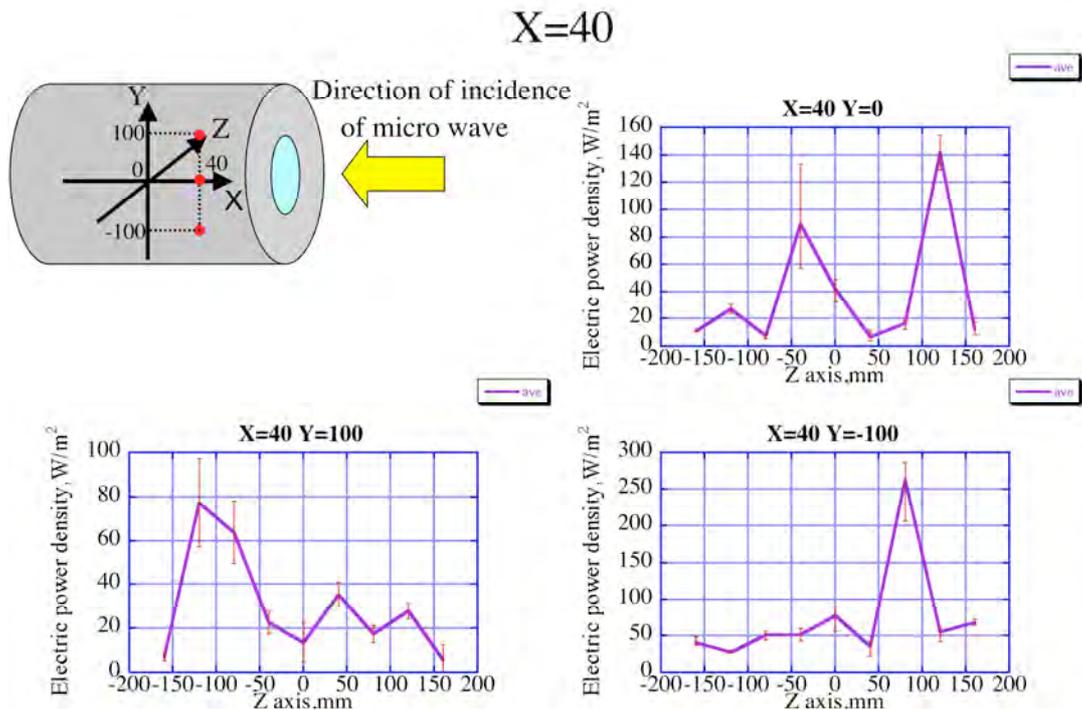


図 4.2.2-4 電界分布測定結果4 (X=40)

Fig 4.2.2-4 Electric field distribution measurement result 4(X=40)

これよりチャンパー内部の相対的電界強度の分布が分かった。また最も強度の大きな点は  $(X,Y,Z)=(3,10,8)$ 、2番目に大きな点は  $(X,Y,Z)=(4,-10,8)$  であるということが測定結果から言える。

#### 4.2.3 ダイポールアンテナによる電界強度測定

4.2.1項で述べた自作のアンテナによる電界強度測定はアンテナ係数がわかっていないので測定結果はチャンパー内部の電界分布の相対的強度測定である。そこでアンテナ係数が付属しており、校正されているダイポールアンテナにより電界強度の絶対値を測定しなくてはならない。それを4.2.2項の測定結果に換算してチャンパー内部の絶対的電界強度をえることができる。測定に使用したアンテナ(アンリツ社製、MA5612C5)を図4.2.3-1に示す。

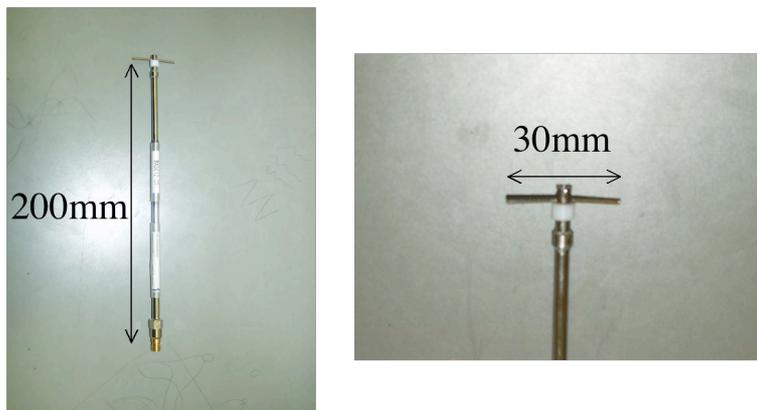


図 4.2.3-1 ダイポールアンテナ

Fif4.2.3-1 Dipole antenna

このダイポールアンテナは長さが200mmあり、チャンパーの中では自由に移動させることが出来ない。そこで測定は4.2.2項の結果より最も強度が大きいと分かった  $(X,Y,Z)=(3,10,8)$  の点のみ行った。この

点の電界強度を基準にして4.2.2項の測定結果を換算して、縦軸を電界強度で表し、三次元でプロットしたものを次に示す。Y=100の面及びY=-100の面に関してはX=20,30の測定を行わなかったため0としている。

Y=100の面の電界分布を図4.2.3-2示す。

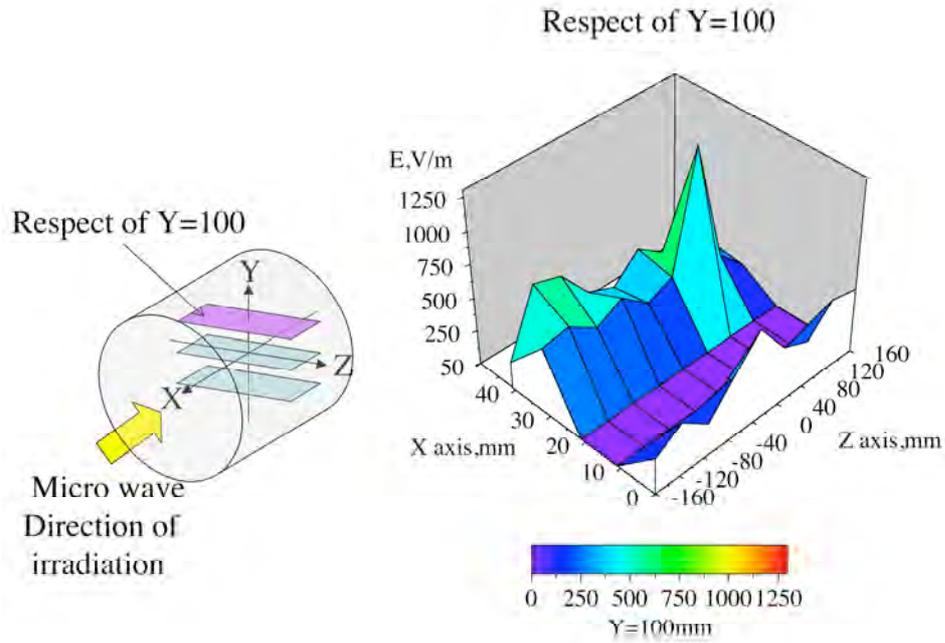


図 4.2.3-1 電界分布の三次元プロット (Y=100)

Fig 4.2.3-1 Three-dimensional plot of electric field distribution (Y=100)

次に $Y=0$ のときを図4.2.3-3示す。

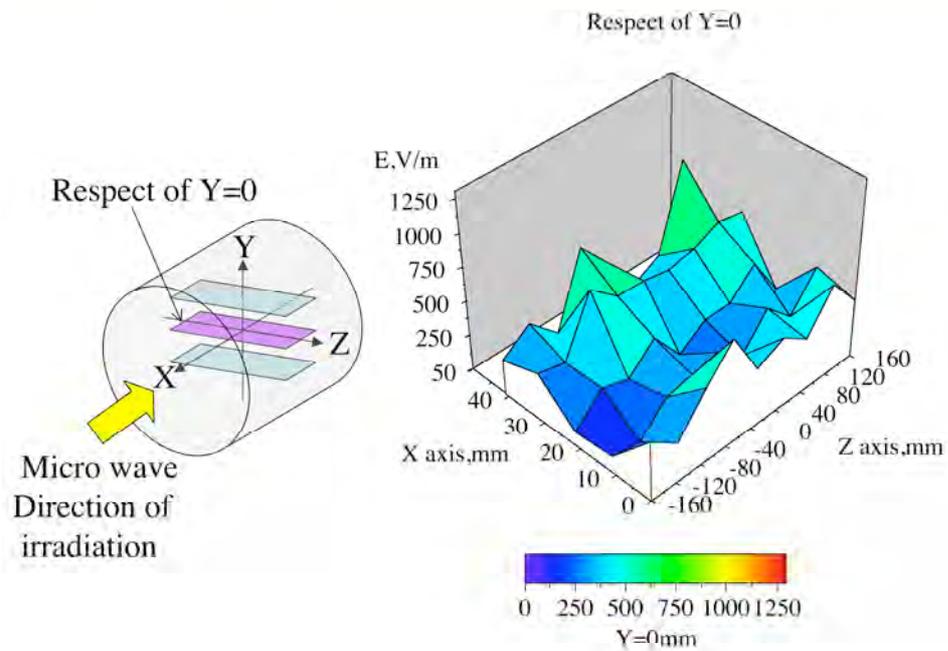


図 4.2.3-3 電界分布の三次元プロット (Y=0)

Fig 4.2.3-3 Three-dimensional plot of electric field distribution (Y=0)

次に $Y=-100$ のときを図4.2.3-4示す。

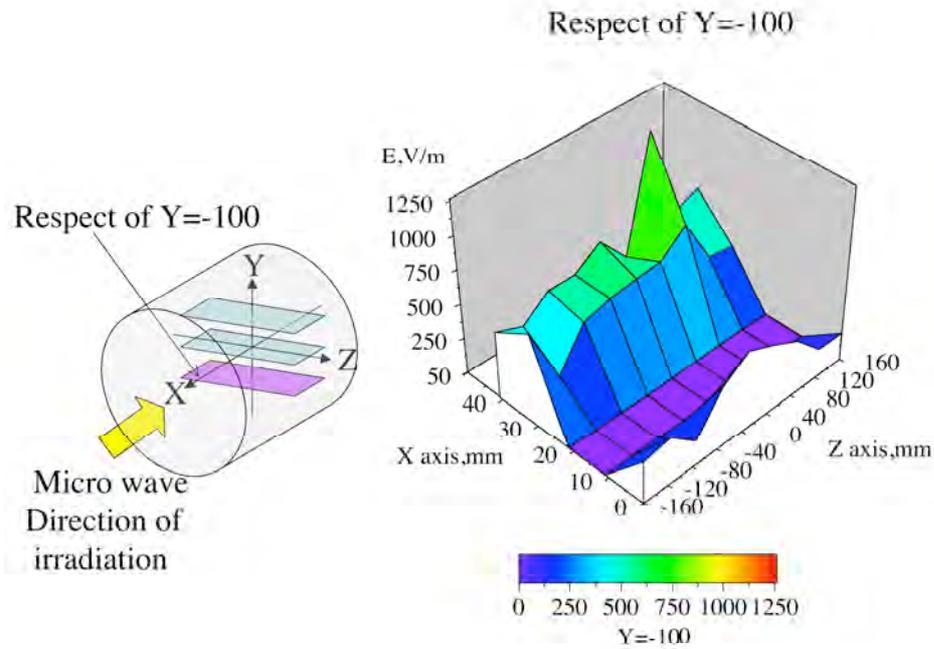


図 4.2.3-4 電界分布の三次元プロット ( $Y=-100$ )  
Fig 4.2.3-4 Three-dimensional plot of electric field distribution ( $Y=-100$ )

## 4.3 太陽電池セルへのマイクロ波照射実験

### 4.3.1 セルの垂直配置照射実験

前項でチャンパー内部の電界分布が測定できたので、その点に太陽電池セルを配置してマイクロ波照射を行う。セルの配置に関しては様々な置き方が可能であるが、この節ではセルを地面と垂直に置き、かつセル表面をマイクロ波の入射する方向へ向けた場合を述べる。使用した太陽電池セルは宇宙実験衛星SFU(Space Flyer Unit)での二元高電圧アレイ実験(2D/HVSA)の地上試験用に製作されたSFUクーポンである。この節では4枚のSFUクーポンを使用して試験をおこなっている。それぞれを区別するためにSFU-A, SFU-B, SFU-C, SFU-Dと呼ぶことにする。SFUクーポンの外観と断面図を図4.3.1-1及び図4.3.1-2に示す。SFUクーポンはアルミ枠にカプトンが張られた基板の上に6枚の太陽電池セルが直列に貼付けられている。それぞれのセルはインターコネクターで繋がっている。

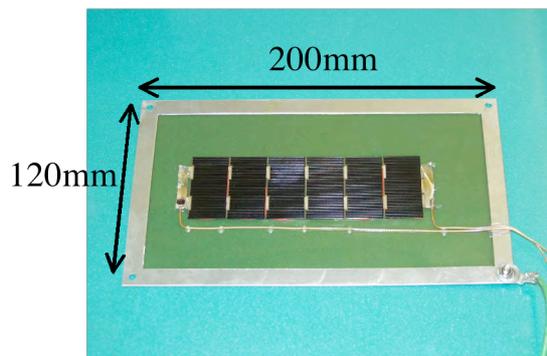


図 4.3.1-1 SFUクーポン

Fig 4.3.1-1 SFU coupon

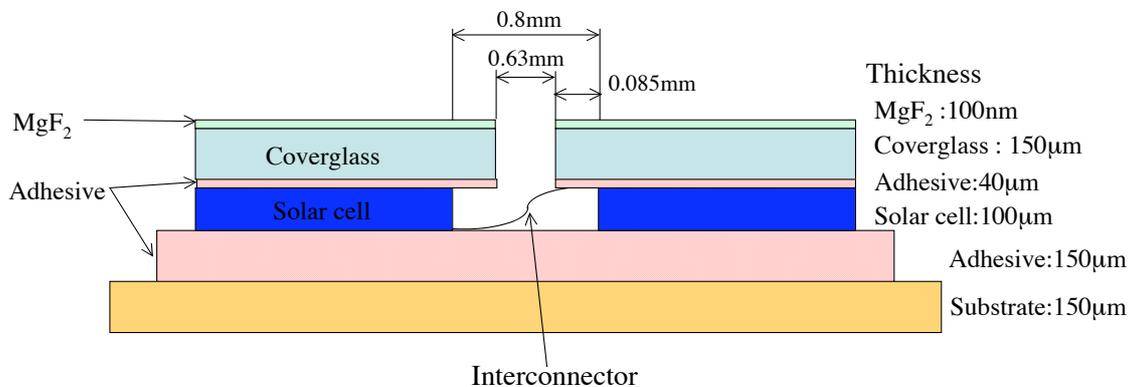


図 4.3.1-2 SFUクーポンの断面図

Fig 4.3.1-2 Cross section of SFU coupon

一般的には宇宙機の太陽電池を模擬する場合、クーポンに外部回路やバイアス電源等を接続して実験を行うが、今回の実験ではマイクロ波照射された太陽電池で何が起こるのを見ることが目的であるので、クーポンはセルと基板共に接地して、接地線に流れる電流(ブローオフ電流と称する)をAC電流プローブで測定している。またSFU-Aではマイクロ波の影響で撮影可能か不明であるが試しにCCDカメラをチャンパー内部に入れてある。SFU-B以降ではチャンパー外部から撮影している。アバランシェフォトダイオード(浜松ホトニクス製)をチャンパー側面窓に設置した。実験配置図を図4.3.1-3に示す。

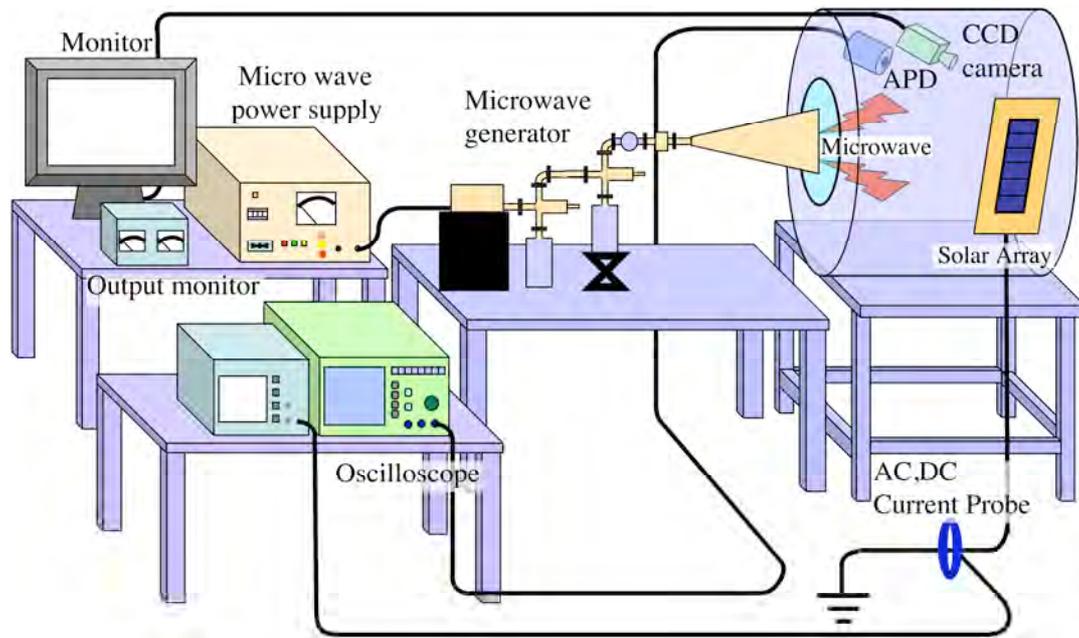


図 4.3.1-3 実験装置配置図

Fig 4.3.1-3 Experimental device setup

以上のような実験環境で試験を行った。次からはそれぞれの条件項目における4枚のクーポンの試験結果と比較及び考察を述べる。

### 4.3.2発光開始電力

上の実験環境で4枚のSFUクーポンにマイクロ波照射を行ったところ、4枚全てで発光が確認された。まず4枚のクーポンのチャンパー内部での配置を図4.3.2-1に示す。

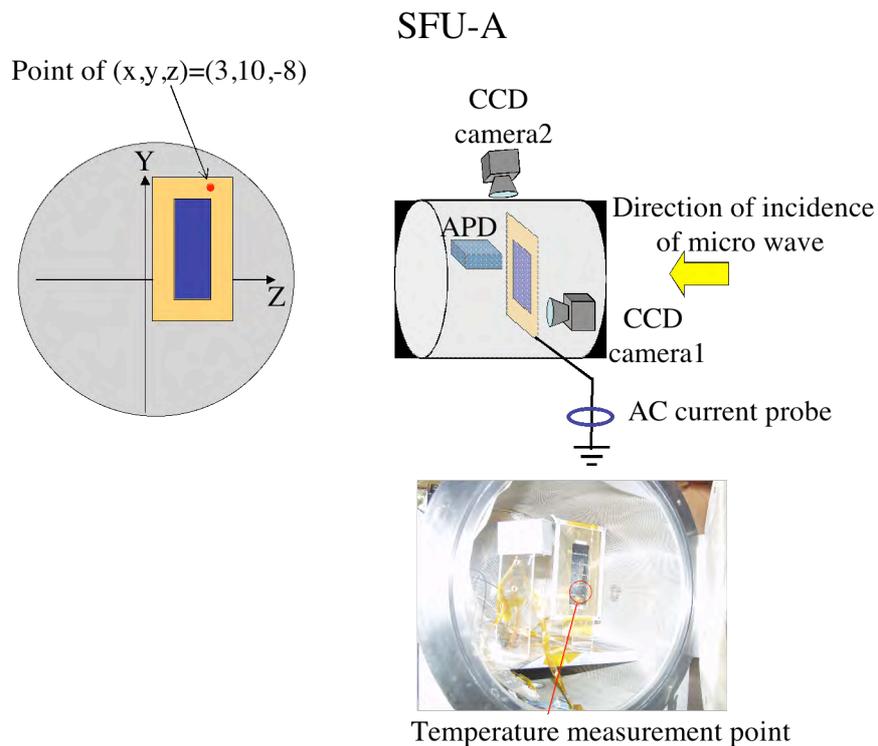


図 4.3.2-1真空チャンパーの内部と実験回路図

Fig 4.3.2-1 Inner structure of vacuum chamber and experiment circuit chart

SFU-Aクーポン照射実験では初めチャンパー内部にCCDカメラ1を投入した状態で行っていたが、やはりマイクロ波の影響により途中で撮影できなくなった。そのためCCDカメラ1が壊れて以降はチャンパー上部窓より撮影を行った。またこのクーポンに関してのみ電界強度測定の結果が最も大きい点よりY軸方向に関して10mm下に配置してある。

### SFU-B,SFU-C,SFU-D

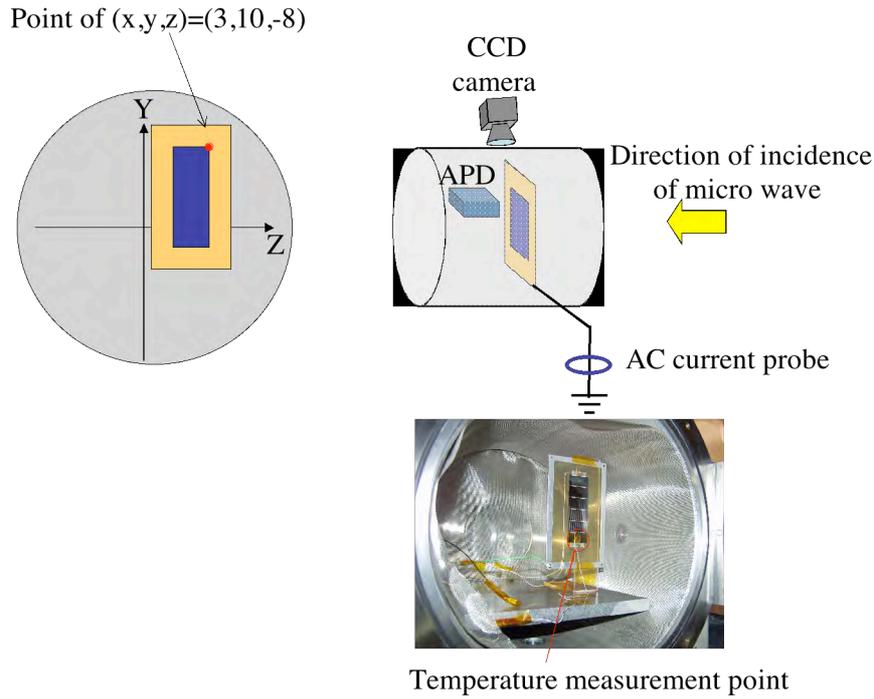


図 4.3.2-2真空チャンバーの内部と実験回路図

Fig 4.3.2-2 inner structure of vacuum chamber and experiment circuit char

それぞれのセルのマイクロ波照射前の表面温度と真空度を図4.3.2-3に示す。

before irradiation

Coupon name	SFU-A	SFU-B	SFU-C	SFU-D
Temperature [°C]	20.8	18	30.6	20.7
Vacuum level [Pa]	$4 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-4}$	$4 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$

表 4.3.2-3 温度と真空度 (マイクロ波照射前)

Table 4.3.2-3 Temperature and vacuum levels(Before irradiating the micro wave.)

以上のような試験条件で照射を開始したのであるが、ここで述べているマイクロ波の発光電力値とはそれぞれのセルにおいて1度目の発光を映像により確認した時点のマイクロ波電力値であり、発光以前の照射時間、つまり発光するまでにセルに与えたエネルギー及び圧力の変化による影響は考えていない。また SFU-A については1度目の発光の際、CCD カメラをチャンバー内へ投入していたためノイズがひどく発光が確認出来たのはかなり強く発光し始めた時点からである。試験結果を図 4.3.2-4 に示す。

Coupon name	SFU-A	SFU-B	SFU-C	SFU-D
Microwave power [W]	110	67	130	150

図 4.3.2-4 マイクロ波による発光を最初に確認した時の電力値

Fig 4.3.2-4 Electric power value when luminescence because of micro wave is confirmed first

この測定結果より 100W 程度の範囲にばらつきがあるが、発光開始するマイクロ波電力のしきい値といえるものが 60W から 150W の間付近にあるのではないかと考えられる。しかしそれを結論付けるためには今後さらに多くのデータを蓄積していかなければならない。

### 4.3.3 発光画像

この節ではマイクロ波による放電の発光画像を比較する。初めに SFU-A についてであるが、上でも述べたように、放電画像にはかなりのノイズが含まれている。発光を確認したのはマイクロ波照射開始から 36 秒後で、マイクロ波出力 110W のときである。その発光は連続的で、グロー放電のような発光である。発光開始から 12 秒間多少の揺らぎはあったが途中で点滅したりすることはなかった。12 秒後それまで連続的に発光していた光は突然きえた。その後マイクロ波出力 140W に上昇させると別の箇所が発光しはじめた。この発光も連続的でグロー放電のようであった。この時の発光画像を図 4.3.3-1 に示す。

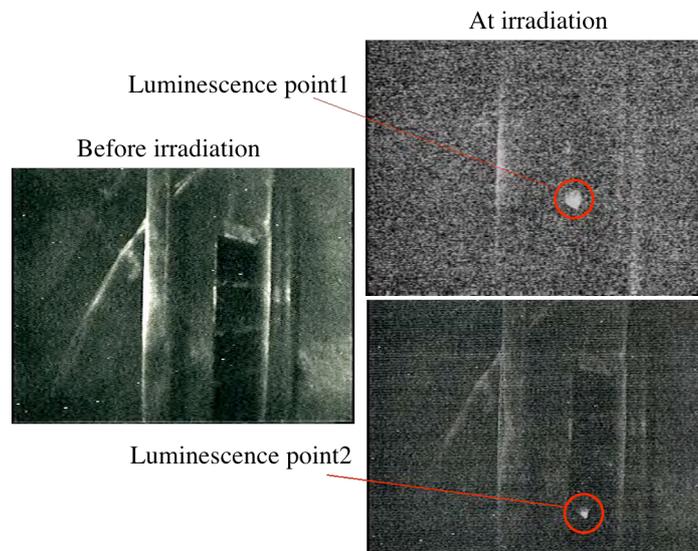


図 4.3.3-1 発光画像 1.1 (SFU-A)

FIG 4.3.3-1 Luminescence image 1.1(SFU-A)

放電が発生している箇所は2番目と3番目のインターコネクターである  
 CCDカメラの故障後、別のカメラでチャンバー上部から撮影して、実験を続けた。マイクロ波出力90W  
 のとき連続的な弱い発光を確認した。このときマイクロ波出力をゼロにすると発光は消えた。再び出

力100Wに戻すと連続的な弱い発光をはじめ、出力135Wでの強い発光へ移行した。またこの強い発光は発光途中で位置を変化させた。この時の発光画像を図4.3.3-2に示す。

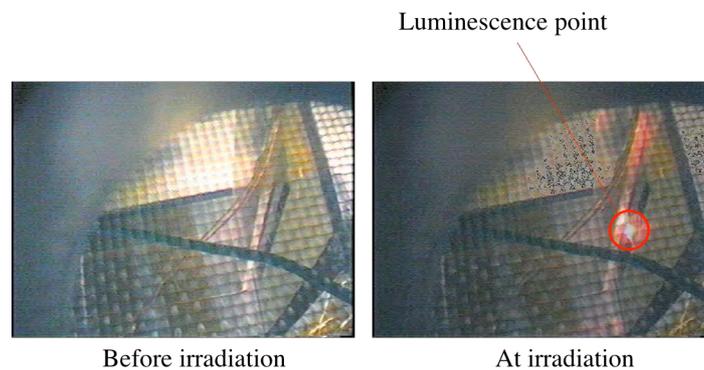


図 4.3.3-2 発光画像 1.2(SFU-A)  
FIG 4.3.3-2 Luminescence image1.2(SFU-A)

この発光は3番目のインターコネクターで起きている。

次にSFU-Bの発光画像について述べる。この時の発光はマイクロ波出力67Wの時に確認された。初めはトリガー放電のようなパルス発光があり、その2秒後もう一度同様にトリガー放電のようなパルス発光がおり、続いてこのすぐ後から連続的な発光へ移行した。この連続的な発光は次第に強くなっていった。そしてマイクロ波出力を止めるまでの11秒間続いた。この時の最も強い発光画像を図4.3.3-3に示す。

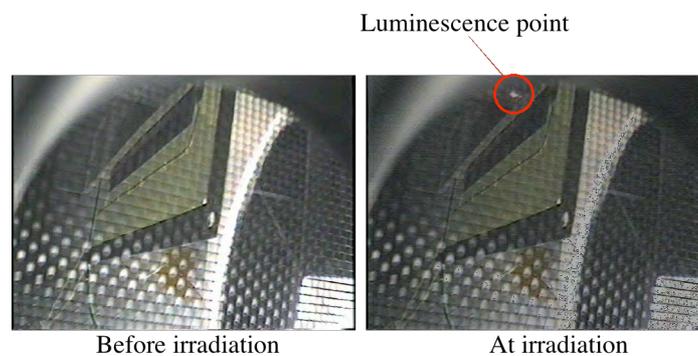


図 4.3.3-3 発光画像 2(SFU-B)  
FIG 4.3.3-3 Luminescence image2(SFU-B)

画像から放電が発生している箇所は2番目のインターコネクターである。

次にSFU-Cの発光画像について述べる。はじめ130Wのときに弱い連続的な発光が確認され、その数後別の箇所ではマイクロ波出力150Wのときにトリガー放電のようなパルス発光が確認され、一旦出力を落とし、再び照射を開始すると、その箇所ではマイクロ波出力50W程度で発光をはじめ、発光に強弱はあるが連続的な発光が確認された。これは20秒間続いて消えた。この時の発光を図4.3.3-4に示す。

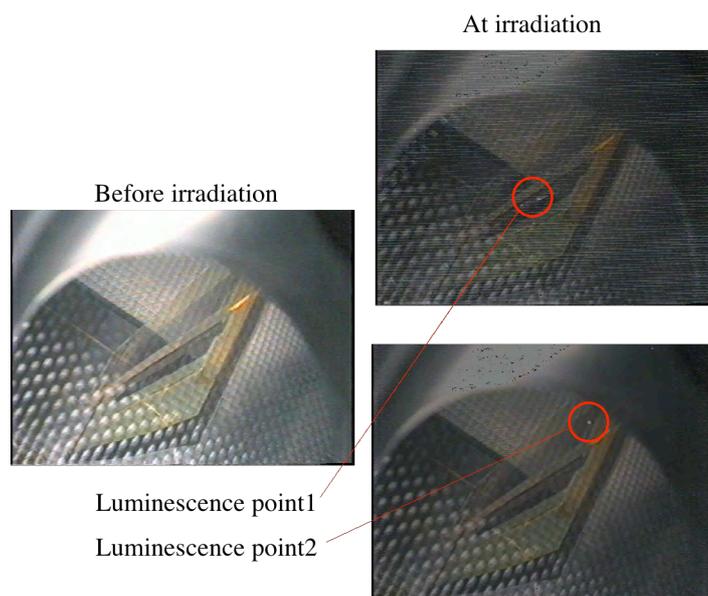


图 4.3.3-4 发光画像 3(SFU-C)  
FIG 4.3.3-4 Luminescence image3(SFU-C)

次に SFU-D について述べる。マイクロ波出力が 150W に到達した時点でトリガ放電のような短い発光があり、その後すぐに連続的な強い発光へ移行していった。この連続的な発光は狭い範囲であるが、2 箇所をわたって同時に発光しているようである。またこれまでの発光と違い発光の色が何色か変化しながら発光箇所も同時に変化して行くように見えた。パルス発光、連続発光の 2 箇所の発光画像を図 4.3.3-5 に示す。

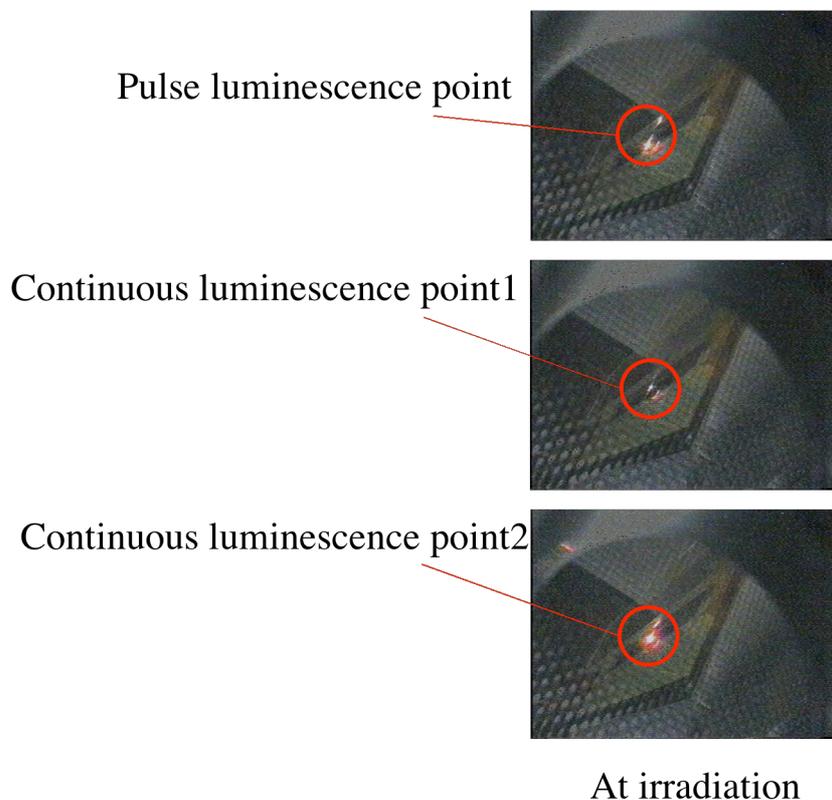


図 4.3.3-5 発光画像 4(SFU-D)

FIG 4.3.3-5 Luminescence image 4(SFU-D)

これら 4 枚のクーポンの発光画像より、SFU-A をのぞいた発光に関して、発光は初めにパルス的な発光が発生し、その数秒経過したのち連続的な発光が発生している。SFU-A に関してはノイズが大きいため発光を観測した以前に同様なパルス発光があったことも考えられる。これまでの 4 枚のクーポンのチャンパー内部での位置とそれぞれの放電発生箇所を下にまとめて示す。ポイント (3,10,8) はチャンパー内部の同じ位置を示している。縦方向の距離だけ見ると、SFU-B と SFU-C では 2 番目のインターコネクターの位置 (41mm) で 3 回放電が発生している。SFU-A と SFU-D では 3 番目のインターコネクターの位置 (62mm±10mm) で放電が発生している。これを見ると放電が発生しやすい場所はインターコネクターであるが、その位置は局所的ではなくある程度の幅の範囲内 (ポイント (3,10,8) から縦 41mm~72mm、横 40mm) にあるインターコネクターであると言える。

Coupon name	SFU-A	SFU-B	SFU-C	SFU-D
Luminescence part	The second and third inter connector	The second inter connector	The second inter connector	The third inter connector

表 4.3.3-6 放電発生箇所

Table 4.3.3-6 Electrical discharge generation part

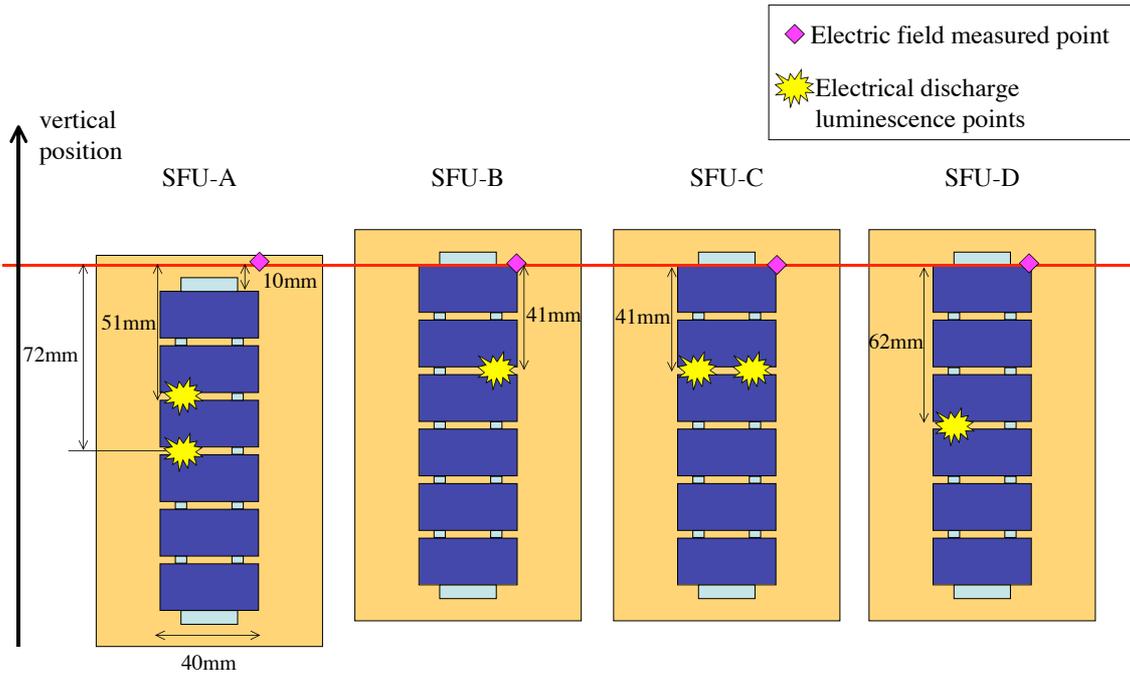


図 4.3.3-7 セルの位置と放電発生箇所

Fig 4.3.3-7 Position and electrical discharge generation part of cell

これらの放電発生箇所は電界強度測定では観測していない点であるため電界強度は分からない。今後はより詳細なチャンパー内の電界分布を測定する必要がある。

#### 4.3.4 放電箇所顕微鏡観測

この節では放電が発生した箇所の試験前後の顕微鏡写真の比較を行う。SFU-A の試験前後の拡大写真を図 4.3.4-1 に示す。

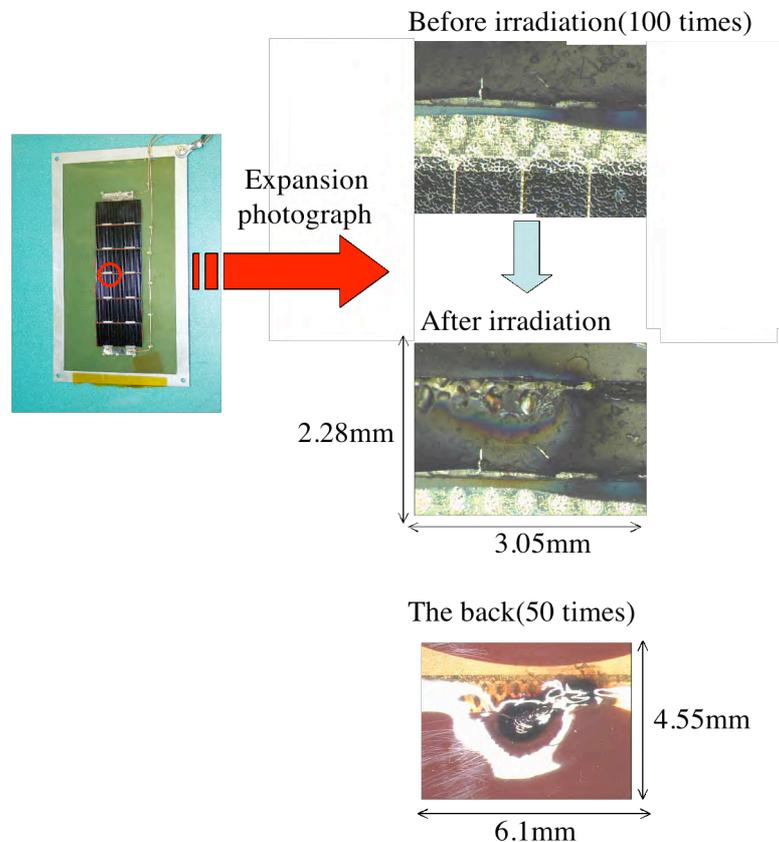


図 4.3.4-1放電箇所拡大写真(SFU-A)

Fig 4.3.4-1 Electrical discharge part expansion photograph1(SFU-A)

前節で画像により放電が確認された箇所は2番目と3番目のインターコネクターであった。しかし2番目のインターコネクターには放電痕を確認できなかった。上の放電痕は3番目の左のインターコネクターである。倍率100倍の写真は照射前の上部分が多少切れているが、照射後と比較すると明らかに、熱が加わったと見られる痕がある。しかし放電痕はインターコネクター表面にあるだけで、インターコネクターの形状等の大きな損傷には至っていない。次に50倍の拡大写真はこのインターコネクターの裏面である。照射前の拡大写真がないが、インターコネクター下面の接着剤と基板のカプトンが黒く焦げているのが分かる。これはカメラ交換後のマイクロ波照射の際に出来たものと思われる。その理由として、放電画像1.2では発光位置が移動していたが、この放電痕が発光画像同様2箇所にわたって焦げていることから分かる。

次に SFU-B に関して述べる。放電画像から放電は 2 番目のインターコネクターで起きている。拡大写真からもそれが確認できる。図 4.3.4-2 に放電痕の拡大写真を示す。

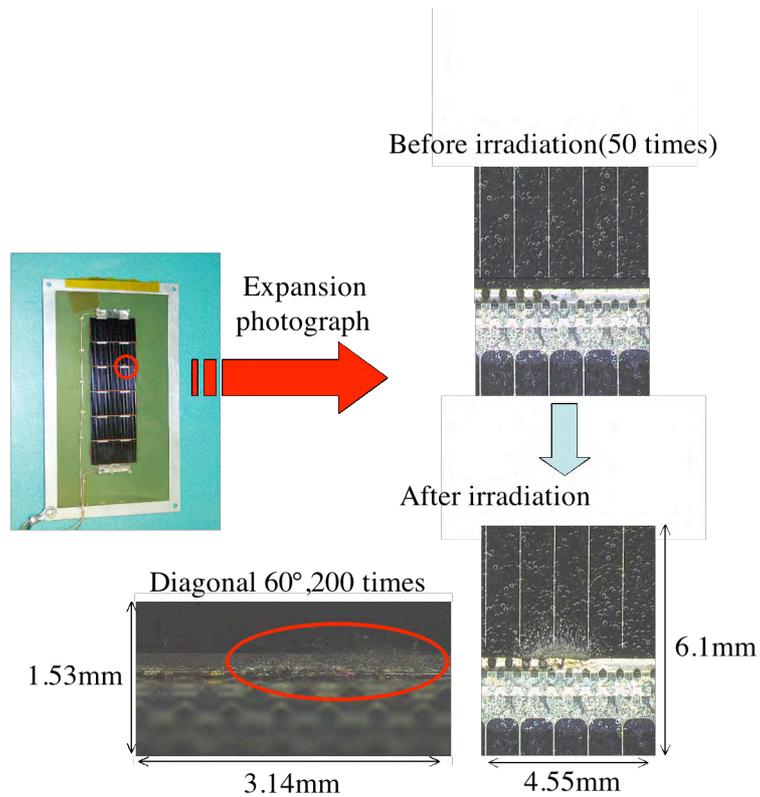


図 4.3.4-2 放電箇所拡大写真2(SFU-B)

Fig 4.3.4-2 Electrical discharge part expansion photograph2(SFU-B)

この放電痕は太陽電池セルの P 電極側のインターコネクター(写真上側)が激しく損傷している。P 電極はセルの下側であり、放電により 200 倍、斜め 60° の拡大写真でも分かるようにカバーガラスの下でセル自体にまで損傷が広がっている。

次に SFU-C に関して述べる。放電画像から放電は 2 番目のインターコネクター左右両方で起きている。拡大写真からもそれが確認できる。図 4.3.4-3 にまず右側のインターコネクターの放電痕の拡大写真を示す。

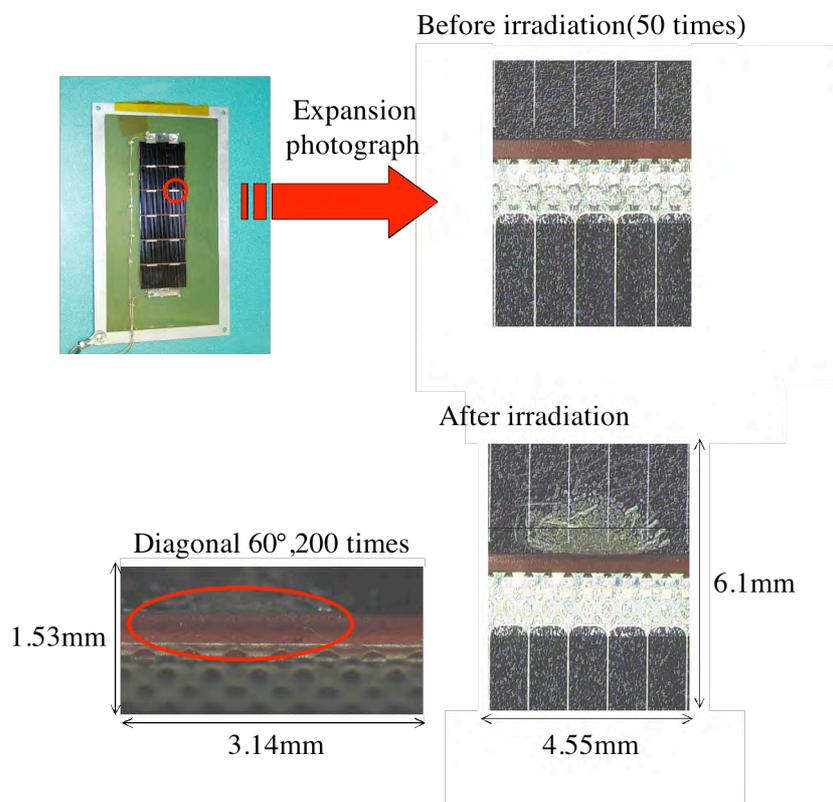


図 4.3.4-3 放電箇所拡大写真3.1(SFU-C)

Fig 4.3.4-3 Electrical discharge part expansion photograph 3.1(SFU-C)

このセルはインターコネクターが RTV でコーティングされていたにもかかわらずその上から放電が発生している。放電痕は SFU-B で起きた放電痕と類似していて、カバーガラス表面には損傷はなく、カバーガラスとセルの間での損傷が激しいことから、これも P 電極側のインターコネクターで発生しているように見える。

図 4.3.4-4 及び図 4.3.4-5 に左側のインターコネクター放電痕の拡大写真を示す。この箇所は表面だけでなく裏面にも損傷が確認された。

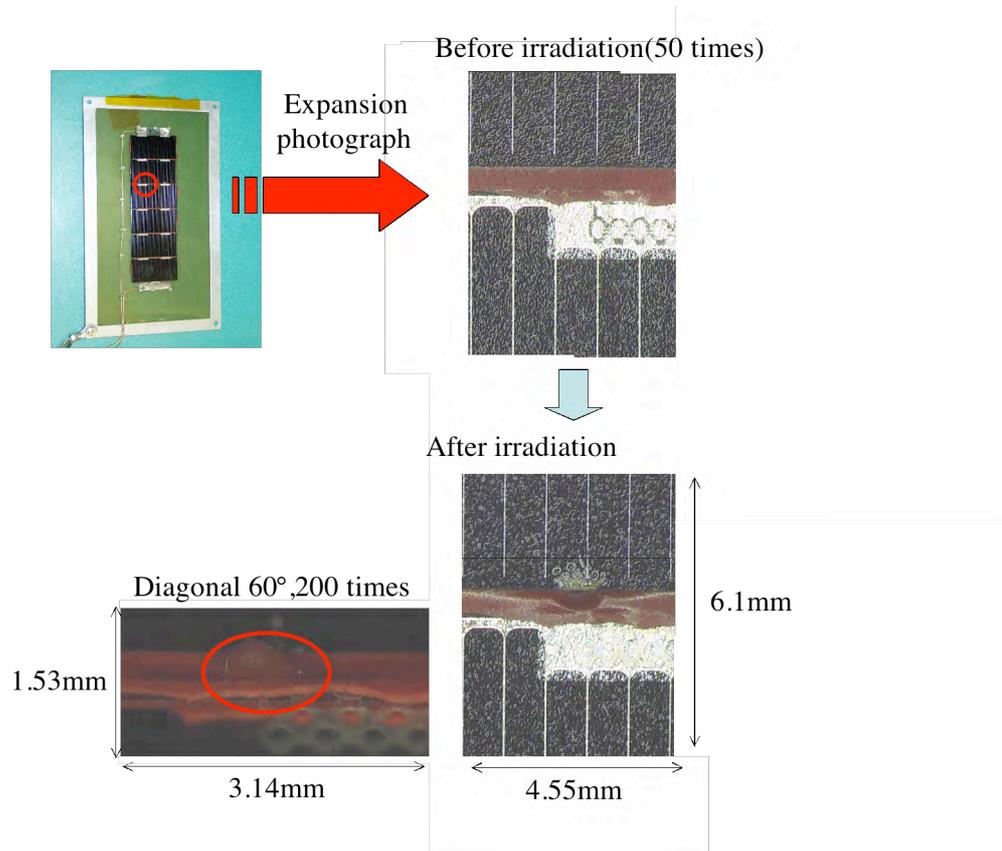


図 4.3.4-4 放電箇所拡大写真3.2(SFU-C)

Fig 4.3.4-4 Electrical discharge part expansion photograph 3.2(SFU-C)

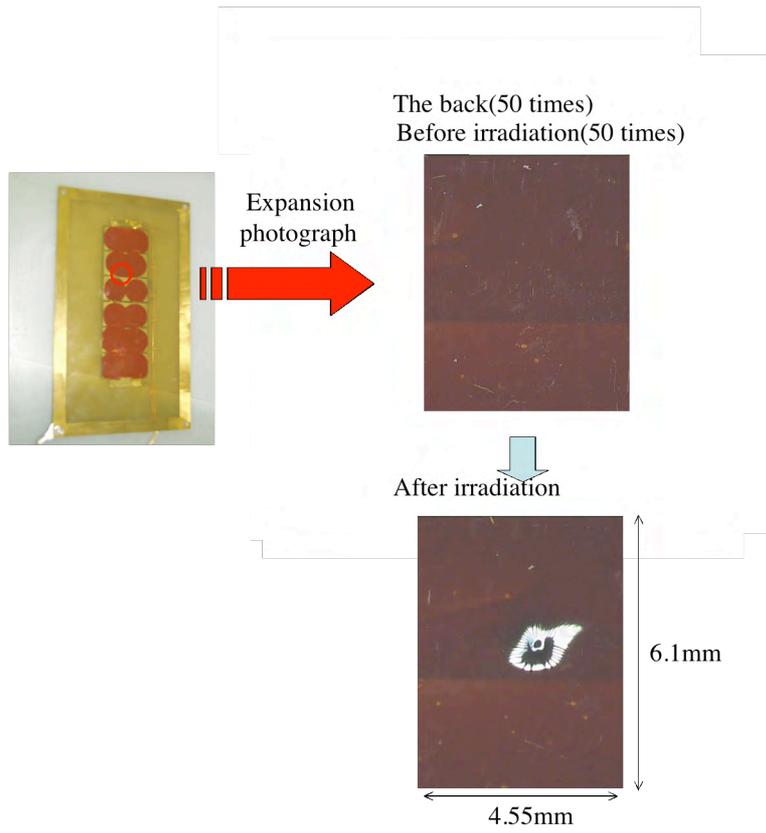


図 4.3.4-5 放電箇所拡大写真3.3(SFU-C)

Fig 4.3.4-5 Electrical discharge part expansion photograph 3.3(SFU-C)

次に SFU-D に関して述べる。放電画像から放電は 3 番目のインターコネクターで起きている。拡大写真からもそれが確認できる。図 4.3.4-6 に放電痕の拡大写真を示す。この放電痕も P 電極側にあるインターコネクターで発生している。

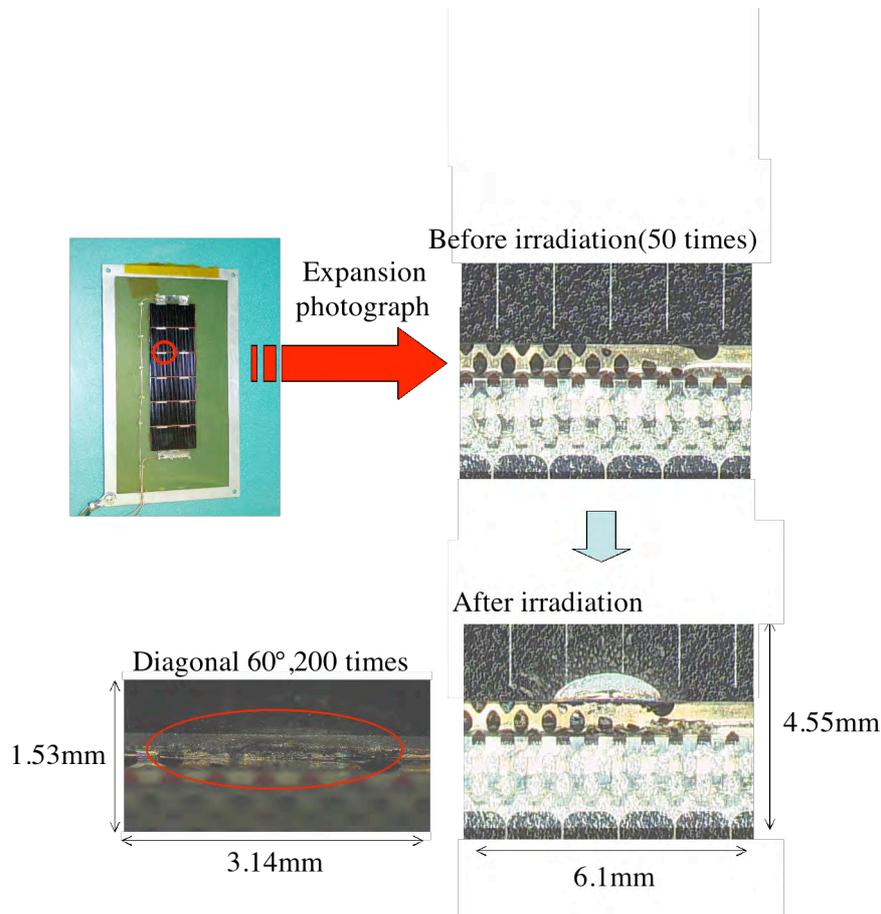


図 4.3.4-6 放電箇所拡大写真4(SFU-D)

Fig 4.3.4-6 Electrical discharge part expansion photograph 4(SFU-D)

顕微鏡観測についてまとめる。今回の放電はすべてインターコネクターで発生している。また放電痕は SFU-A を除くとすべて同様に P 電極側のインターコネクターの上であり、そこからカバーガラスの下面のセルにまで損傷が達している。SFU-A に関してはセルを配置した位置が他の 3 枚よりも 10mm 下に配置している。この違いにより放電痕が異なるのではないかと考えられる。つまりセルを同じ位置に配置してマイクロ波照射を行った SFU-A を除く 3 枚のセルに関しては放電の発生機構が同様であり、よく再現すると言える。しかしその発生機構がマルチパクタ放電であるか、高周波放電であるのかはわかっていない。今後この発生機構を解明するために太陽電池セルを使用して試験を行うのではなく、より単純化した試供体を製作して発生機構の解明を行う必要がある。

### 4.3.5 圧力波形の変化

圧力変化は放電に関わる重要なパラメータの一つである。放電が発生したときの圧力変化と発生しなかったときの圧力と出力の関係を図 4.3.5-1 にそれぞれ示す。

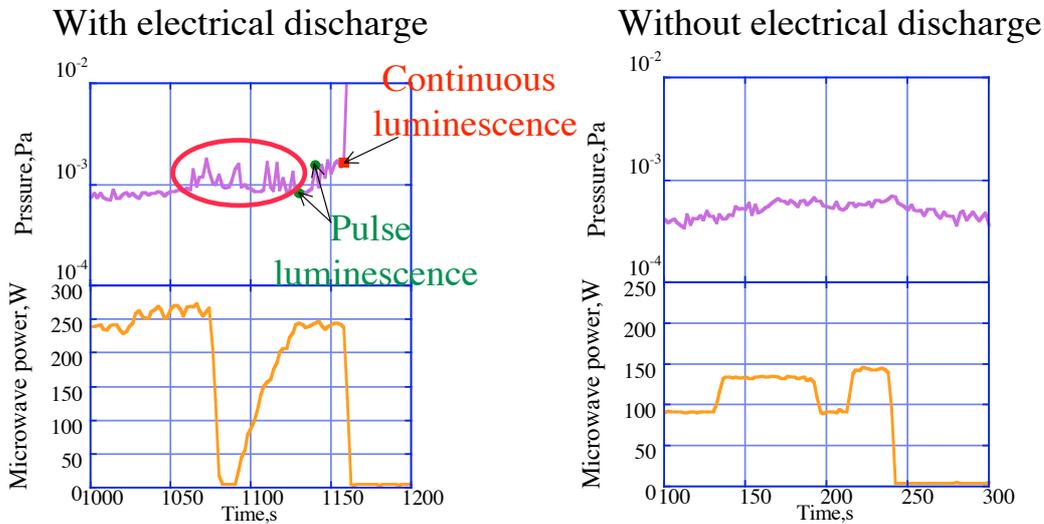


図 4.3.5-1 放電発生の有無による圧力と出力の関係の違い

Fig 4.3.5-1 Difference of relation between pressure and output by presence of electrical discharge

右のグラフの放電が発生していないとき出力は与えられているが圧力上昇が  $10^{-3}$ Pa 台から変化していないのがわかる。左のグラフの放電が発生した時は  $10^{-3}$ Pa 付近でふらついており、パルス発光の直前には何度か急激な圧力上昇が確認できる。またその後の連続発光では一気に  $10^{-3}$ Pa 台から  $10^{-2}$ Pa 台への圧力上昇が確認できる。セルや基板またそれらをつなぐケーブル等がマイクロ波を照射されると、温度上昇によりガス放出を起こす。セルの発光点は 2 番目又は 3 番目のインターコネクターの 2 箇所偏っている。このため、この付近の物質 (RTV 等) からガスが発生し、このガスがインターコネクターに集中し、局所的な圧力の急上昇から放電を引き起こしたかも知れない。一度放電が発生するとさらに新しくプラズマが生成され、電子がマイクロ波エネルギーを吸収して連続的な発光にいたるのではないかと考えられる。これより放電発生条件としてチャンバーの雰囲気圧力  $10^{-3}$ Pa のしきい値があるのではないかと考えられる。

### 4.3.6 APD 波形

今回アバランシェフォトダイオード (APD) により放電による発光確認を行った。しかし CCD カメラと同様に APD 波形にはマイクロ波によるノイズが激しく含まれている。まず APD の受光部を黒いシートにより覆い、光が入らないようにした状態で測定を行った。この時の波形を 50W、200W とそれぞれ図 4.3.6-1 に示す。

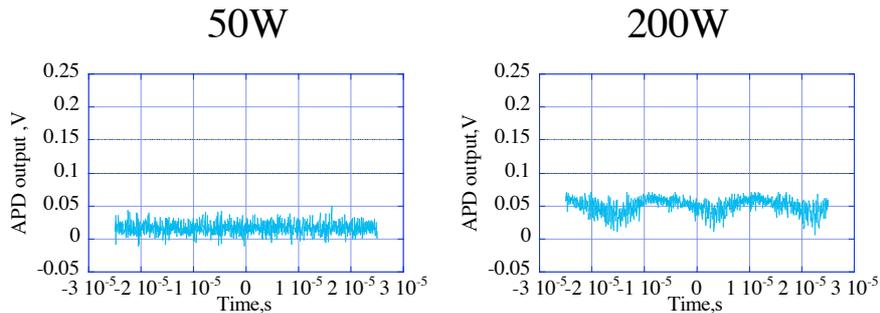


図 4.3.6-1 APD 出力波形 1(暗状態)

FIG 4.3.6-1 APD output wave form1

マイクロ波の出力に比例して、DC 成分 AC 成分両方にノイズが含まれている。特に AC 成分のノイズは周波数 50kHz 程度である。

図 4.3.6-2 にマイクロ波照射しているが、発光していないときの APD の出力波形を示す。

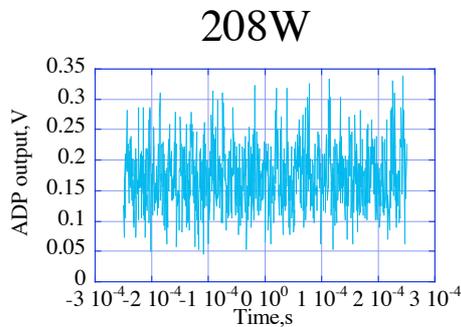


図 4.3.6-2 APD 出力波形 2

Fig 4.3.6-2 APD output wave form2

このように DC 成分が全体的に増加している。AC,DC のどちらか成分のみがマイクロ波の出力値に比例して増加していくのではない。

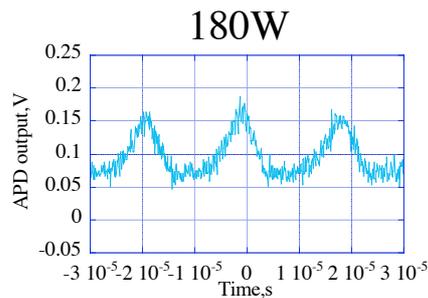


図 4.3.6-3 APD 出力波形 3

Fig 4.3.6-3 APD output wave form3

図 4.3.6-3 は発光しているときの波形である。この波形を見ると、一見周期的に発光しているように見えるが、この周期は図 4.3.1.5-1 で示したように光を遮断した時に見られたノイズによるものと同じである。また振幅のピーク値を見ても図 4.3.1.5-2 に示した発光していないときのノイズによる波形のピーク値を下回っている。このように波形からはどの部分が発光によるものでどの部分がノイズによるものであるのか判断できなかった。このため 4.1.1 項で示したようなパルス発光のような弱い発光による APD 信号は取得できなかった。また連続的な発光に対しても測定時間幅が短すぎるため取得できていない。今回使用した APD は温度補償回路、増幅回路内蔵である。その回路をマイクロ波の

ノイズが通ったため正しく出力できなかったのではないかとと思われる。マイクロ波によるノイズの中でどのように信号測定をしていくかは今後の大きな課題である。

#### 4.3.7 セルの水平配置照射実験

4.2.2 項で測定した電界分布のうち 2 番目に電界強度の大きな点を中心としてセルを図 4.3.7-1 のように地面と平行に配置して試験を行った。

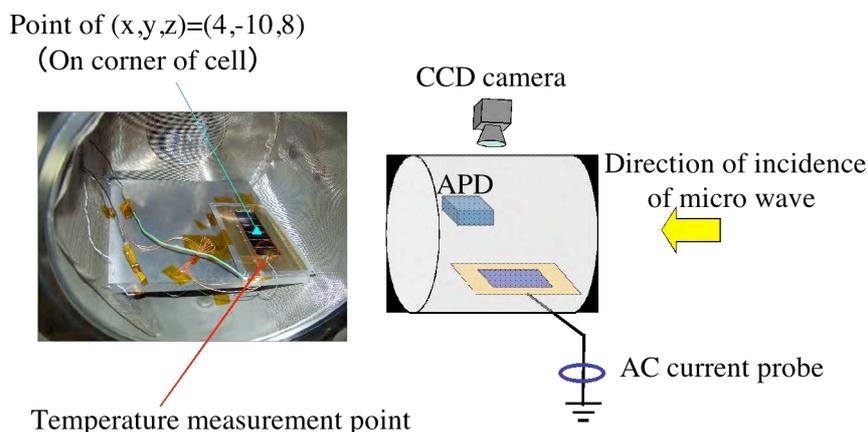


図 4.3.7-1 真空チャンバー内部と実験回路図

Fig 4.3.7-1 Inner structure of vacuum chamber and experiment circuit chart

試験は同じクーポンを用いて 2 回行った。このときの照射前の条件を表 4.3.7-2 に示す。

Before irradiation			
	Coupon name	Temperature [°C]	Vacuum level[Pa]
Test1	SFU-E	23.7	$1.5 \times 10^{-4}$
Test2	SFU-E	22.2	$2.2 \times 10^{-4}$

表 4.3.7-2 温度と真空度 (マイクロ波照射前)

Fig 4.3.7-2 Temperature and vacuum levels (Before irradiating)

試験 1 では照射時間 4 分 14 秒、10W 刻みで 160W まで照射した。この時発光は確認できなかった。照射後の圧力は  $9.66 \times 10^{-4}$  Pa まで上昇していた。照射試験 2 では照射時間 8 分 25 秒、200W まで照射をおこなった。しかしこのときも発光は確認できなかった。照射後の圧力は  $1 \times 10^{-3}$  Pa, セル表面温度は 68.5 度であった。試験回数が少ないが、セルを水平に配置した場合マイクロ波を照射しても放電は発生しなかった。

#### 4.3.8 セルの配置と電界方向

セルを水平に配置する場合と垂直に配置する場合の電界方向との関係を述べる。まずチャンバー内部では図 3.2-2 で示したような  $TE_{11}$  モードで電界は分布していると仮定する。つまり電界はチャンバー内部では地面と垂直方向であると考えられる。この様子を図 4.3.8-1 に示す。

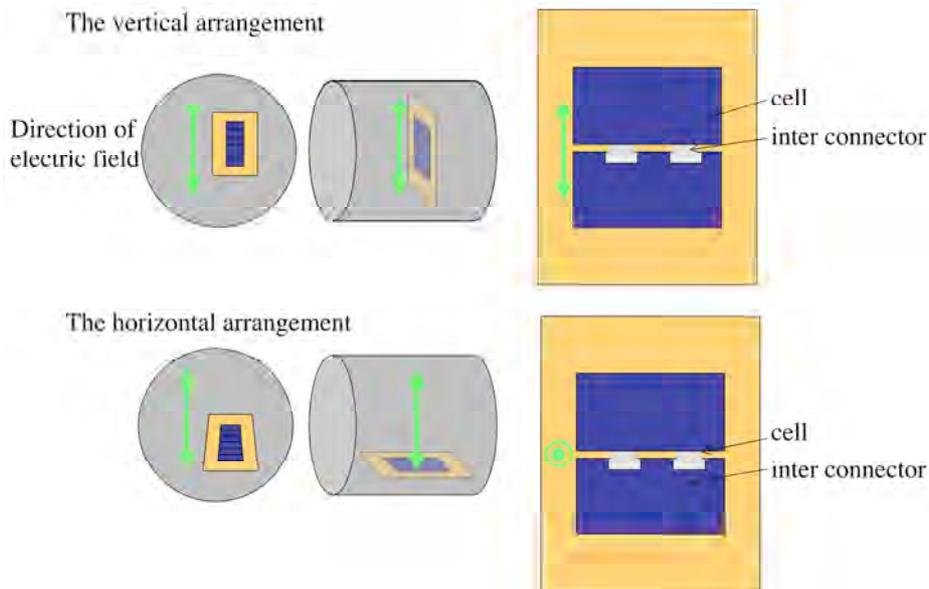


図 4.3.8-1 セルの配置と電界方向の関係

Fig4.3.8-1 Relation between arrangement and direction of electric field of cell

これよりセルの配置仕方によりインターコネクターにかかる電界方向に違いがある。放電が発生する  
 かないかはこの違いによると考えられる。

#### 4.3.9 マルチパクタ放電発生時の電界強度の見積もり

本研究では、マイクロ波照射された太陽電池セル表面でマルチパクタ放電が発生の可能性の検証が目的である。そのためここではマルチパクタ放電が発生するためにはどの程度の電界強度が必要であるか知ることは非常に重要である。そこでこの必要電界強度を理論的に計算し、実験で放電が発生した時の電界強度との比較を行う。

単一表面でマルチパクタ放電が発生するためには、2次電子を1個以上放出するのに十分なエネルギーを電子がマイクロ波電界から半周期中に得る必要がある。

電子の運動方程式より

$$m \frac{dv}{dt} = eE \sin(\omega t)$$

$$v = \frac{eE}{m\omega} \cos(\omega t)$$

$$v_{\max} = \frac{eE}{m\omega}$$

この時衝突エネルギーが2次電子放出係数1以上であるためのエネルギーを超えていなくてはならず、これを50eVと仮定すると

$$E_{\text{impact}} = \frac{1}{2} m (v_{\max})^2 [\text{kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^2] > 50 [\text{eV}]$$

$$E^2 > 7.56 \times 10^{11} [\text{V} / \text{m}]$$

$$E > 8.69 \times 10^5 [\text{V} / \text{m}]$$

である。

実験装置で最大出力のときの電界強度は

$$E = 1.28 \times 10^3 [\text{V/m}]$$

である。理論値から実験値は2桁以上も低い。

また、2表面間のマルチパクタ放電であると考えた場合、発生箇所をセル-インターコネクター間と仮定し、その距離は図 4.3-2 から 0.4mm であるので、参考文献 3 より最小電界は

$$E = \frac{m\omega^2 d}{e} \frac{1}{\sqrt{4 + \pi^2}}$$

であるので、

$$E = 8.11 \times 10^5 [\text{V/m}]$$

である。この場合も理論値より実験値は2桁低い。しかし実際に放電は発生した。これより考えられることは2点あり、発生した放電がマルチパクタ放電ではなく別の発生機構による放電である。または、放電発生箇所での電界強度が測定点よりも極端に大きく、マルチパクタ放電発生の要電界強度を上回っていることである。マルチパクタ放電以外の要因であるかを確認するには放電発生に関わるパラメータを少なくして試験を行うことが挙げられる。マルチパクタ放電であるかを確認するには放電発生箇所のそばに短いアンテナとなるものを置きスペクトラムアナライザーに接続し、そのプラズマの発する電磁波の周波数を測定することが挙げられる。これはその中心周波数が 5GHz 付近であればマルチパクタ放電であり、MHz 帯を含む広帯域であれば高周波放電であるからである。

## 第5章 結論

### 5.1 総括

本研究では真空中でマイクロ波照射された太陽電池アレイ表面の放電現象を確認する実験の装置開発から行った。真空中のセルへマイクロ波を照射するためにまずマイクロ波を真空チャンバー内部へ入射させることから始めた。これは独自で考案した電磁ホーンを使うことにより達成できた。真空チャンバーにマイクロ波を入射させてからはマイクロ波のリーク対策を行った。測定機器に関してはノイズによりデータ取得が困難であり今後検討して行かなければならない。またセルへの照射実験するためにチャンバー内部の電界強度を測定したところマルチパクター放電発生の理論値からは2桁も足りず、放電しないのではないかと思われた。しかしそのような低い電界強度の中で実際にマイクロ波照射を開始すると簡単に放電が発生してしまうことが判明した。

これらの実験結果から、マイクロ波照射された太陽電池表面の放電現象の発生にはいくつかの条件があることがわかった。それはP電極側のインターコネクターに偏って放電は発生し、その発生箇所はインターコネクターであればどのインターコネクターでも発生するという訳ではなく、照射したクーボンの特定の箇所（上から2～3番目のインターコネクター）に限られており、マイクロ波のチャンバー内での電界強度分布に関係していると思われる。観測された放電現象には大きく分けて2種類あり、パルス的な放電と連続的な放電があった。また放電発生にはマイクロ波に対するセルの向きが重要であり、放電が発生する向きと発生しない向きがあることがわかった。また放電が発生するにはチャンバー内雰囲気圧力が $10^{-3}$ Paを超えなければならないということがわかった。

### 5.2 今後の課題

今回の実験はマイクロ波照射された太陽電池表面で放電が発生するという現象を確認しただけである。この放電がマルチパクター放電であるのか、高周波放電であるのかなど放電発生のメカニズムは解明されていない。今後の課題としてこの放電現象の発生メカニズムの解明のため、より単純化したクーボンで実験を行うこと、またクーボン表面の状態が放電発生に関連しているかを調べること、クーボンの配置と放電発生との関連について調べることなどが挙げられる。また今回は真空中で実験を行ったがより実際に近い状態を模擬するためにはプラズマ環境下で同様の実験を行う必要がある。更にSSPSを運用する前段階の確認として、実際のSSPSで使用が予定されているパッチアンテナの現物にマイクロ波を照射し、放電が発生するかを調べる。また実際の衛星で観測されている表面帯電によって発生するトリガ放電がマイクロ波のエネルギーを吸収して成長するのかどうかを調べることなどが挙げられる。

## 付録1 マグネトロンによるマイクロ波発生

マグネトロンは陰極であるフィラメントを中心にして、陽極である空洞共振器が同心円上に配置されている2極管構造である。陰極と陽極の間の空間は作用空間と呼ばれている。マグネトロンの内部構造を図1-1に示す。

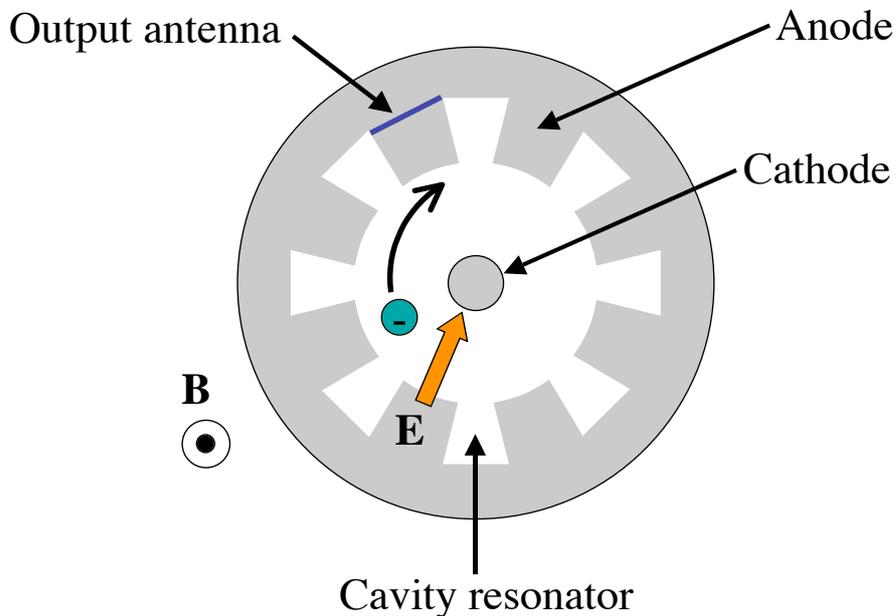


図1-1 マ

グネトロンの構造

Fig1-1 Structure of magnetron

まず陽極、陰極間には高電圧を印加することにより陽極から陰極方向へ静電界Eが発生する。また陰極であるフィラメントは加熱されることで熱電子放出を起こして電子を放出する。そこに2極の軸方向から磁石により外部磁界Bを印加するとフィラメントから放出された電子は $E \times B$ ドリフトにより作用空間内を図3.1-1のように回転運動する。また、共振器内に電磁界が存在する場合の電気力線を図1-2に示す。

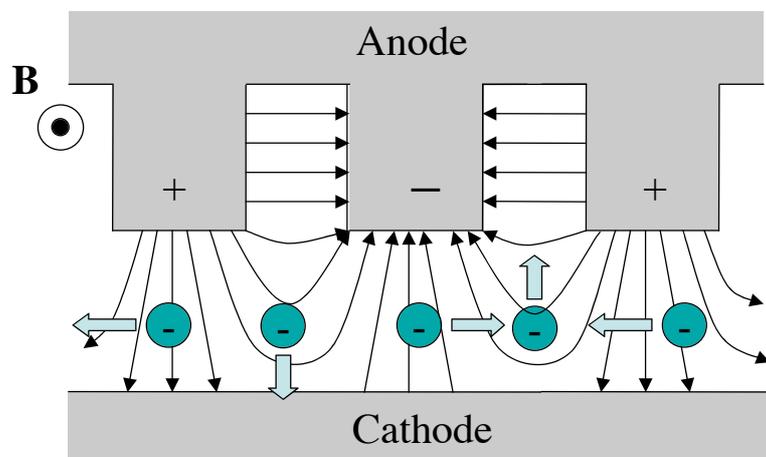


図1-2 高周波電界と電子の動き

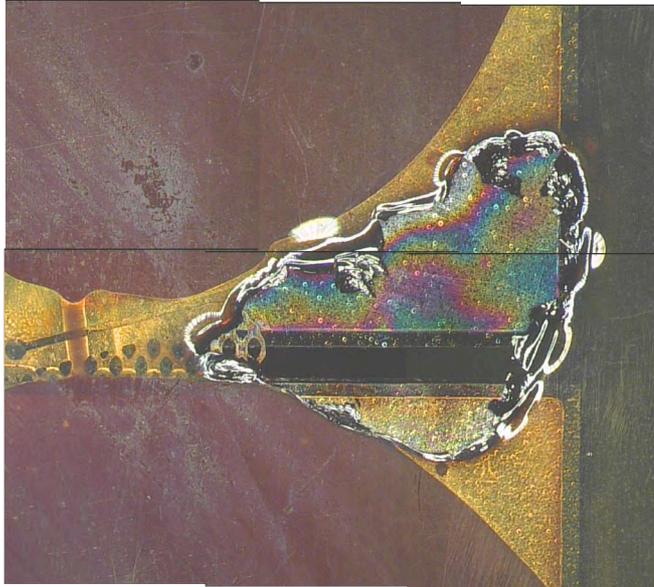
Fig1-2 High frequency electric field and Movement of electron

ここでは印加電圧による電界は無視してある。このとき電子は位置によって異なった動きをする。陽極片付近では電界は半径方向が強いので、電子は円周方向にドリフトする。その結果電子はこの部分に集まることになる。これを集群作用と呼ぶ。空洞共振器の入り口付近では、電界は円周方向が強くなり、そのため電子は陰極または陽極方向にドリフトする。陽極方向にドリフトする場合、電子はポテンシャルの低い方向へ移動するが直交場の中ではドリフト速度は一定のため、電子はエネルギーを失う。その結果印加電界から電子を介して電磁界へエネルギーが移る。一方陰極方向へドリフトする場合、電子はポテンシャルの高い方向へ移動するが速度は保たれるので、電子はエネルギーを得る。そのため電磁界から電子へエネルギーが移る。このような行程によりマグネトロンからマイクロ波が出力する。

## 付録 2

SFU-D に関しては 5 番目のインターコネクターの裏面で下に示すような放電痕が確認された。これは基盤であるカプトンが放電の加熱により焼失している。

# SFU-D



付録 3

二表面間マルチパクタ放電発生のための必要電界  
電子の運動方程式

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = -eE \cos(\omega t + \phi) \quad (1)$$

$$(E \geq 0)$$

電子の初速度 0 の初期条件より

$$z(0) = 0, \left( \frac{dz}{dt} \right) = 0 \quad (2)$$

で解くと

$$v(t) = -\frac{eE}{m\omega} \{ \sin(\omega t + \phi) - \sin \phi \} \quad (3)$$

$$z(t) = \frac{eE}{m\omega^2} \{ \cos(\omega t + \phi) + \omega t \sin \phi - \cos \phi \} \quad (4)$$

位相条件を考える。

ここで電子は 1 周期内で表面に戻ると仮定する。

放出点で(2)の初期条件の電子が (1) に従って加速されるには、

$$\frac{\pi}{2} \leq \phi \leq \frac{3\pi}{2}$$

でなくてはならない。

また電子放出の電極と対向する電極に電子が到達する時刻に、マイクロ波の位相が  $\pi$  だけ変化していると、対向する電極で発生した二次電子は逆方向へ加速されて、元の電極に一周期遅れて到達する。二次電子の初速度を 0 と仮定すると

$$\omega t = \pi \quad z(t) = d \quad (6)$$

のときマルチパクタ放電が発生する。

(4)と(6)より

$$E(\phi) = \frac{m\omega^2 d}{e} \frac{1}{\pi \sin \phi - 2 \cos \phi} \quad (7)$$

となる。

この電界の最小値を求める。

(7) 式の独立変数  $\phi$  について

$$\frac{d}{d\phi} (\pi \sin \phi - 2 \cos \phi) = \pi \cos \phi + 2 \sin \phi = 0 \quad (11)$$

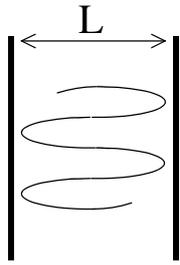
$$\tan \phi = -\frac{\pi}{2}, \quad \phi = 2.13771$$

よって

$$E(\phi)_{\min} = \frac{m\omega^2 d}{e} \frac{1}{\sqrt{4 + \pi^2}}$$

となる。

付録 4  
高周波放電



イオンの移動度  $\mu_i$

イオンの動く距離  $x = \frac{\mu_i E}{\omega} \sin \omega t$

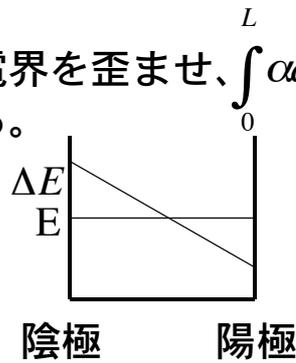
限界  $L = \frac{2\mu_i E}{\omega}$

fが増加すると電極間に補足されるイオンの数は増加

暗流の状態では正の空間電荷が電界を歪ませ、 $\int_0^L \alpha dx$  も大きくなり、火花を起こしやすくなる。

$$\alpha = \log\left(\frac{1}{r} + 1\right)$$

電子についても同様



## 参考文献

- \*1 小林 徹、 “実用化検討-USEF の活動状況”、 第5回 宇宙太陽発電システム (SPS) シンポジウム講演要旨集 神大会館六甲ホール November 7-8 2002
- \*2 JAXA、 宇宙エネルギー利用システム パンフレット
- \*3 福本 貞義、 “マルチパクターリングによる 20MeV リニアック入射端 DT のコンディショニングの可能性”、 Accelerator Study Note(ASN)-413 Jan 18 1998
- \*4 R.A.Kishek and Y.Y.Lau “Multipactor Discharge on a Dielectric”  
PHYSICAL REVIEW LETTERS VOLUME 80,NUMBER 1 , 5 JAN 1998
- \*5 杉浦 寅彦、石井 順也、弓場 芳治、阿座上 孝共著 “マイクロ波工学”、朝倉書店
- \*6 武田 進著、“気体放電の基礎” 東京電機大学出版局 1993
- \*7 大森 俊一、横島一郎、中根 央共著 “高周波・マイクロ波測定、コロナ社、1997
- \*8 R.Bryan ” Solar Power ? OK, But Why Capture It In Space?”  
SPS’ 97 Energy and Space for Humanity ,August 24-28,1997  
Montreal ,Canada
- \*R.B.Anderson,W.D.Getty,M.L.Brake,Y.Y.Lau,R.M.Gilgenbach,andA.Valfells  
“Multipactor experiment on dielectric surface ” REVIEW OF SCIENTIFIC  
INSTRUMENTS, VOLUME 72,NUMBER 7 JULY 2001

## 謝辞

本研究の機会を与えていただき、さらに本研究の遂行並びに本論文の作成にあたりご指導を頂きました九州工業大学工学部教授、趙孟佑先生に心から感謝すると共に厚く御礼申し上げます。また、本研究の一部は宇宙航空研究開発機構共同研究『宇宙環境への高電圧バス技術の適用性の研究』の一環としておこなわれた。また九州工業大学産学官連携研究員細田聡史氏、金正浩氏、JAXA 高度ミッション研究センター主任開発部員 久田安正氏、マイクロ電子株式会社代表取締役 大友司郎氏に感謝します。最後に、種々の御協力を頂きました九州工業大学電気工学科趙研究室の同諸君に感謝致します。