



JAEA-Technology

2007-055

## JT-60U 用 LHRF アンテナ保護装置の改良

Improvement of the Protection Devices for JT-60U LHRF Antenna System

鈴木 貞明 関 正美 篠崎 信一 佐藤 文明  
平内 慎一 石井 和宏\* 長谷川 浩一 森山 伸一

Sadaaki SUZUKI, Masami SEKI, Shinichi SHINOZAKI, Fumiaki SATO  
Shinichi HIRANAI, Kazuhiro ISHII\*, Koichi HASEGAWA and Shinichi MORIYAMA

核融合研究開発部門  
高周波加熱システム開発グループ

RF Heating Group  
Fusion Research and Development Directorate

September 2007

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ（<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>）  
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター\*では実費による複写頒布を行つております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4  
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

\* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,  
Japan Atomic Energy Agency  
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920

© Japan Atomic Energy Agency, 2007

## JT-60U 用 LHRF アンテナ保護装置の改良

日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門

トカマクシステム技術開発ユニット

鈴木 貞明、関 正美<sup>+1</sup>、篠崎 信一、佐藤 文明※、平内 慎一  
石井 和宏\*、長谷川 浩一、森山 伸一

(2007 年 6 月 18 日 受理)

JT-60U 高周波加熱装置のひとつである低域混成波（LHRF）加熱装置では、過大なプラズマからの熱負荷によるダメージを避けるために、アンテナ先端部に炭素製グリルを取り付けた新たな取り組みでプラズマ実験が行われている。しかし、プラズマ実験後の観察では、一部に放電痕が見つかったために、アーク検出器及び可視画像検出の高性能化による保護インターロックの強化に取り組んだ。アーク検出器では、光検出の応答速度及び分解能を高めるために增幅回路の改良を行った。また、可視画像検出では、PC 画像処理を導入しプラズマによる発光と放電光を区別して on-off 制御する機能を新たに追加した。

本報告書は、LHRF 加熱装置における保護インターロックシステムの改良についてまとめたものである。

---

那珂核融合研究所（駐在）：〒311-0193 茨城県那珂市向山 801-1

+1 先進プラズマ研究開発ユニット

※ 出向職員

\* 原子力エンジニアリング(株)

## **Improvement of the Protection Devices for JT-60U LHRF Antenna System**

Sadaaki SUZUKI, Masami SEKI<sup>+1</sup>, Shinichi SHINOZAKI, Fumiaki SATO<sup>※</sup>, Shinichi HIRANAI,  
Kazuhiro ISHII\*, Koichi HASEGAWA and Shinichi MORIYAMA

Division of Tokamak System Technology,  
Fusion Research and Development Directorate,  
Japan Atomic Energy Agency  
Naka-shi, Ibaraki-ken

(Received June 18, 2007)

In the experiments featuring lower hybrid range of frequency (LHRF) system in JT-60U, carbon grills were attached to the plasma-facing part of the antenna in order to avoid the damage by the excessive heat load from the plasma. However some electric discharge traces were found there in the observation after the experiments. To avoid such discharges, improvements of the arc detector and the protection interlock by visible picture detection were tackled. In the arc detector, the amplification circuit was improved in order to obtain shorter response time and higher resolution of optical detection. Moreover, in visible picture detection, a new function of RF-on/off control utilizing PC image processing was added to distinguish the light of the arc from one of the plasma.

This report summarizes improvement of the protection interlock device in a LHRF heating system.

Keywords: JT-60U, LHRF, Antenna, Protection Interlock, Arc Detector, Visible Picture Detection

---

+1 Division of Advanced Plasma Research

※ Research Staff on Loan

\* Nuclear Engineering Co., Ltd.

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. LHRF 加熱装置の概要と LHRF アンテナの構造 .....	2
3. アンテナ保護装置の目的と問題点 .....	4
3.1 新しい保護装置の必要性 .....	4
3.2 アーク検出器によるアンテナ先端部損傷の抑制 .....	4
3.3 アーク検出器の動作不良 .....	9
4. 保護装置の改良 .....	14
4.1 アーク検出器の改善 .....	14
4.2 可視画像による保護の追加 .....	17
5. まとめ .....	23
謝辞 .....	24
参考文献 .....	24
付録 1 可視画像検出の画像処理フロー .....	25
付録 2 可視画像検出ソフトウェアの表示説明 .....	26

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Overview of LHRF system and structure of the LHRF antenna .....	2
3. Purpose and problem of an antenna protection device .....	4
3.1 Necessity for a new protection device .....	4
3.2 Suppression of damages around the LHRF antenna mouth by an arc detector .....	4
3.3 Mis-works of an arc detector .....	9
4. Improvement of the protection devices .....	14
4.1 Grade up of an arc detector .....	14
4.2 Installation of a new protection device .....	17
5. Summary .....	23
Acknowledgements .....	24
References .....	24
Appendix 1 Image processing flow of visible picture detection .....	25
Appendix 2 Explanation of visible picture detection software .....	26

## 1. はじめに

JT-60U 用の低域混成波 (LHRF) 加熱装置は<sup>[1,2]</sup>、2GHz 帯において数 MW – 10 秒の大電力高周波をプラズマへ入射することができ、トカマクの定常運転化の研究で世界を先導する成果を挙げている<sup>[3,4]</sup>。特に、プラズマの電流分布を制御することでプラズマの安定性を改善し、実時間での制御にも成功している<sup>[5]</sup>。そして LHRF 加熱装置の心臓部であるアンテナは、プラズマの分布制御を左右する。

この LHRF アンテナは、プラズマ内に低域混成波を励起してプラズマ電流を駆動する装置であり、最重要機器である。このアンテナ先端部は、高温のプラズマから近い位置にあるために常にプラズマからの熱にさらされ、さらに高周波放電による熱負荷の影響も受ける。このために過大な熱負荷による先端部の溶融が原因でアンテナ性能の劣化が問題となってきた<sup>[5,6]</sup>。このために、現在プラズマ対向用 LH アンテナの開発が行われている<sup>[6,7]</sup>。JT-60U では、アンテナ先端部に高耐熱性材料（炭素材）を用いたグリルを製作し、取り付け、実験を行ってきた。その後の実験運転休止期間中に、アンテナ先端部の点検を実施したところ、炭素製グリルそのものには大きな損傷は無かったが、炭素製グリルを取り付けるためのステンレス製ベース部に溶融が見られた。その原因を調査したところ、先端部付近での放電をきっかけとして発生する高周波放電のアーク光を検出し、高周波の入射を中断してアンテナを保護する「アーク検出器」が正常に動作しなかつたことが主な原因であることが分かった。この対策として、アーク検出器の応答速度及び分解能の改良及び可視画像による保護システムの導入を行った。

本報告では、JT-60U 用 LHRF アンテナ保護装置の改良について述べる。第 2 章では LHRF 加熱装置の概要とアンテナの構造を、第 3 章ではアンテナ保護装置の目的と問題点を記述する。そして、第 4 章では保護装置の改良を述べ、第 5 章でまとめを行う。

## 2. LHRF 加熱装置の概要と LHRF アンテナの構造

LHRF 加熱装置の基本的仕様を表.1 に、装置の構成を図.1 に示す。主な設備として、電源設備、高周波設備及び制御設備から構成されている。さらに高周波設備は、励振増幅系、大電力増幅系、伝送系及び結合系（アンテナ）から構成されている。励振増幅系では、発振器から出力された数 mW の高周波は、固体アンプで数 W に増幅され、さらに大電力増幅系では進行波管で～50W 程度、そして大電力増幅の心臓部であるクライストロンで最大 1MW まで増幅される。1MW まで増幅された高周波を約 100m の導波管にて伝送し、アンテナからプラズマに入射される。この時伝送される高周波電力の設定は、クライストロン近傍に設置されている電力測定器（検波器）で電力を計測し、設定された電力になるようフィードバック制御を行なっている。

アンテナ先端部は、グリル状の多導波管束で構成されている。そして隣り合う導波管内の高周波の位相を変えることにより、アンテナからプラズマへ入射される高周波の屈折率に関するパワースペクトルを制御することができる。これによりプラズマ加熱や電流駆動の最適化を図っている。

アンテナの概観を図.2 に示す。大口径のアンテナには、4 列 4 行の合計 16 本のステンレス製導波管から電力が供給され、大電力入射が可能である。この導波管では、高周波損失を低減するために銅メッキが施されている。高周波電力は、空気封入の導波管と JT-60U 真空容器の真空とを仕切っているセラミックス製真空窓を通り、標準導波管に伝送される。そして、オーバーサイズテーパー管を通り、電力 12 分岐モジュールを経てグリル状のアンテナからプラズマへ入射される。このオーバーサイズテーパー管により構造を簡素化し、伝送系の本数を削減している。高温のプラズマからアンテナ先端部を保護するために、先端部の側面にはタイル状の炭素製ガードリミタを取り付けている。また、JT-60 真空容器とアンテナの取り合いにベローズを用いてアンテナとプラズマとの距離を調整可能とし、プラズマとの結合状態を制御している。

表.1 LHRF 加熱装置の基本的仕様

### ＜基本的仕様＞

- |                          |                     |
|--------------------------|---------------------|
| ・動作周波数 : 1.74 ~ 2.23 GHz | ・発振時間幅 : 10 秒       |
| ・発振出力 : ~ 10 MW          | ・大電力クライストロン数 : 16 本 |
| ・プラズマ入射パワー : 6 MW        | ・アンテナ : 多分岐型        |

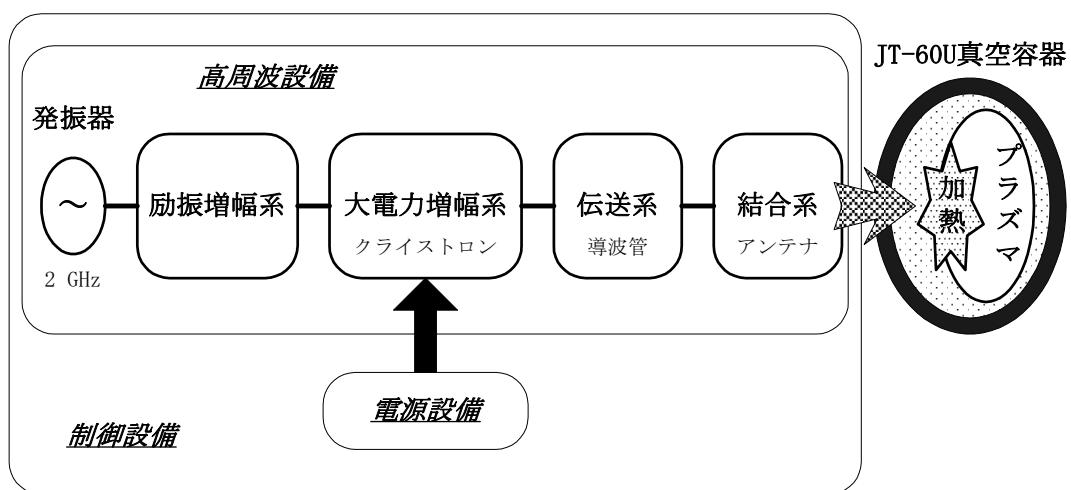


図.1 LHRF 加熱装置の構成

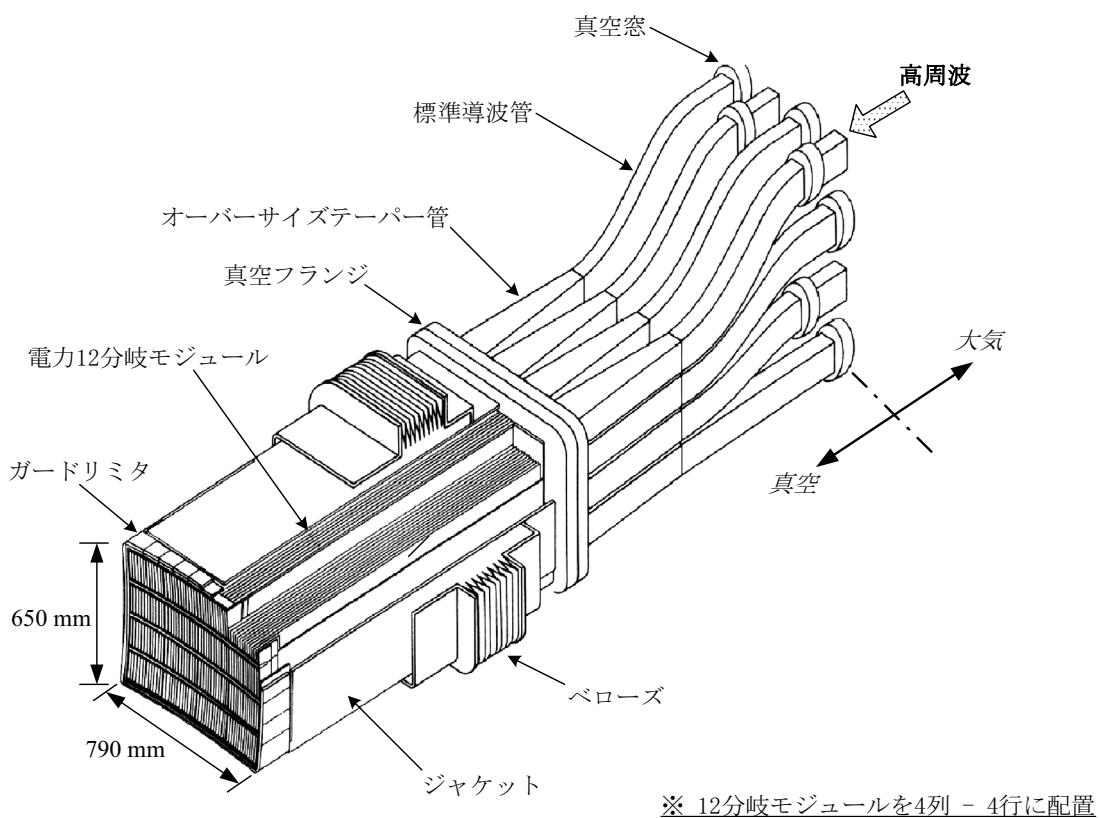


図.2 LHRF アンテナの概観

### 3. アンテナ保護装置の目的と問題点

#### 3.1 新しい保護装置の必要性

高周波加熱装置では、伝送系やアンテナ内において放電が発生した場合、高周波源へ戻ってくる反射波をモニターし、入射を中断する機能がある。しかし、LHRF 加熱装置のアンテナは多分岐（マルチジャンクション）型を採用しているため、反射波が戻りにくい構造である。また放電によって高周波のエネルギーが吸収されてしまうと高周波源への反射波は小さくなるため、反射波を検知するのが難しくなる。このために放電光を高い分解能で検知して高周波の入射を中断できるアーケ検出器を世界で初めて持たせることにした。

#### 3.2 アーク検出器によるアンテナ先端部損傷の抑制

アンテナ先端部は、プラズマに近接しており、大きな熱入力を受ける可能性がある。また、プラズマが放電の種となり、アンテナ先端部の電界強度が高い部分で放電することがある。ステンレス製アンテナ先端部は、使用により図.3 のように溶融や変形を受け、金属不純物がプラズマ中に混入し悪影響を及ぼすこともあった。そこで、運転休止期においてアンテナ先端部の補修を実施してきたが、入射電力が年々減少する傾向にあった。

真空窓における放電を検知して、大電力高周波の入射を止める「真空窓アーケ検出器システム」が、建設当時より導入され正常に動作していた。この真空窓アーケ検出器のシステムを流用し、アンテナ先端部における高周波放電を抑制し、入射性能を維持するために先端部アーケセンサーによる保護装置を導入した。しかし、真空窓アーケ検出器においては、インターロック信号が出力されると、直ちに入射が中止されて RF のシーケンスは終了する設計であった。アンテナ先端部付近での放電を検知した際、すぐに入射を停止してしまうとエージングが進まないため、ある程度は放電させてエージングを進めることとし、具体的には入射を中断(100ms)させ、そしてまた再開される設計に改良した。ある列の先端部アーケ検出器が動作しても、全列の入射が中断するようになっている。また、プラズマの発光に過剰に反応しないように、クライストロンへの電圧印加中信号である「レギュレーター チューブ (RT) on」信号と AND をとり、入射中のみに動作させるような機能を持たせた新たな試みである。これを「先端アーケ検出器システム」と呼ぶ。そのシステム概要を図.4 に、真空窓用と先端用アーケ検出器のインターロック動作を図.5 に示す。この機能によりステンレス製のアンテナ先端部での高周波放電による溶融を低減させることに成功した。

アーケ検出器システムの信号系統は、真空窓及び先端部のアーケセンサーは、基本的に各列に光センサーが取り付けられており独立している。しかし、8 列の先端部アーケセンサー用の光ケーブルが図.6 のように断線しているため、7 列と 8 列の光センサーからの信号を「光合成器」を用いて、本体室 (P-18) の RF 架台にて合成されている。

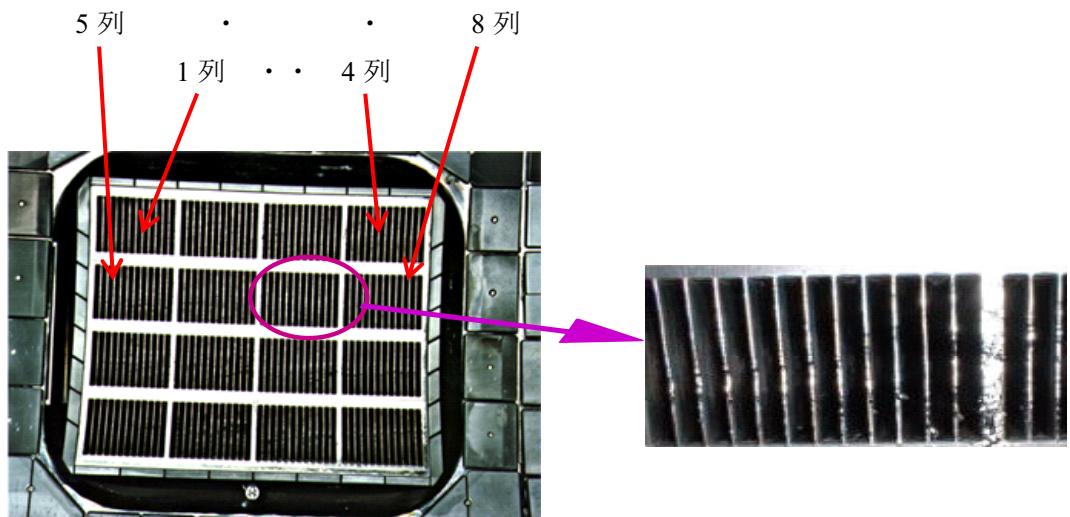


図.3 LHRF アンテナ (左 ; 全体写真、右 ; 7 列拡大写真)

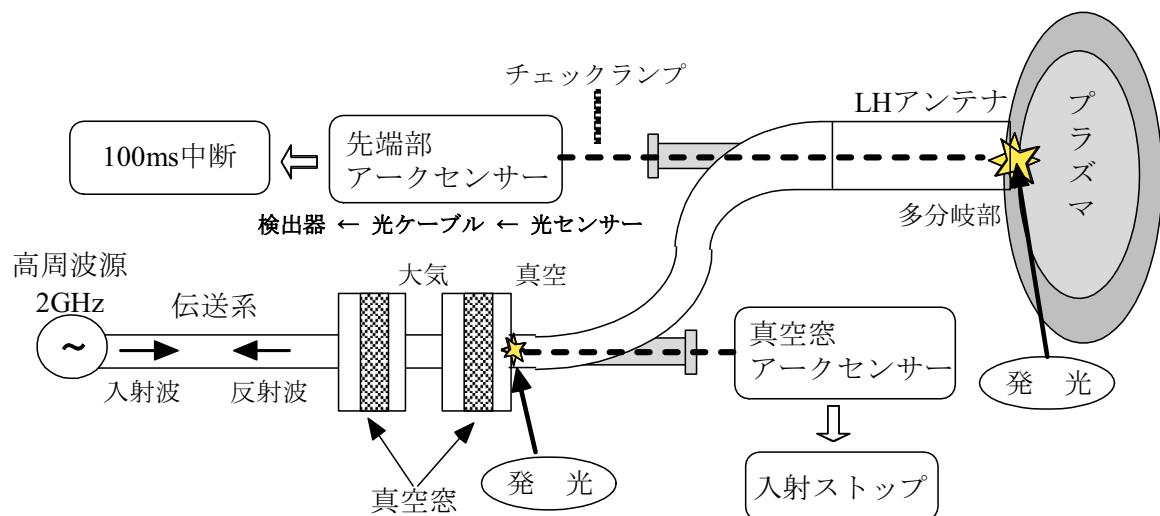


図.4 先端アーカンセンサーの概要

This is a blank page.

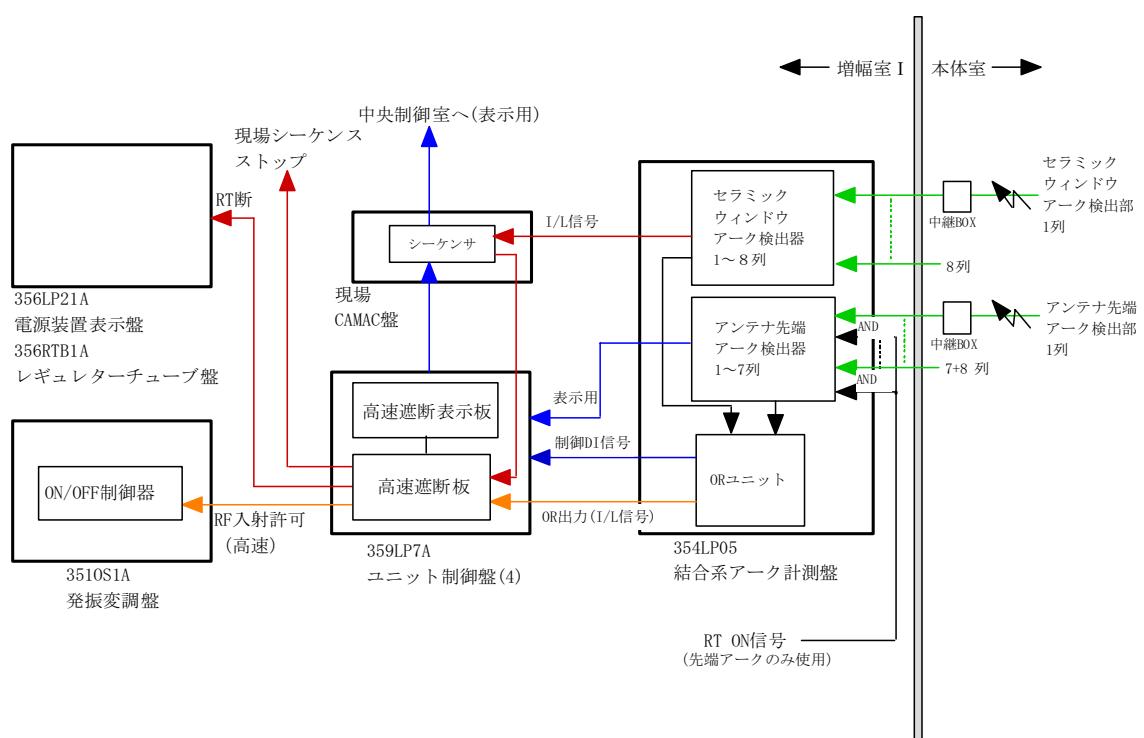


図.5 アーク検出器システムのインターロック動作

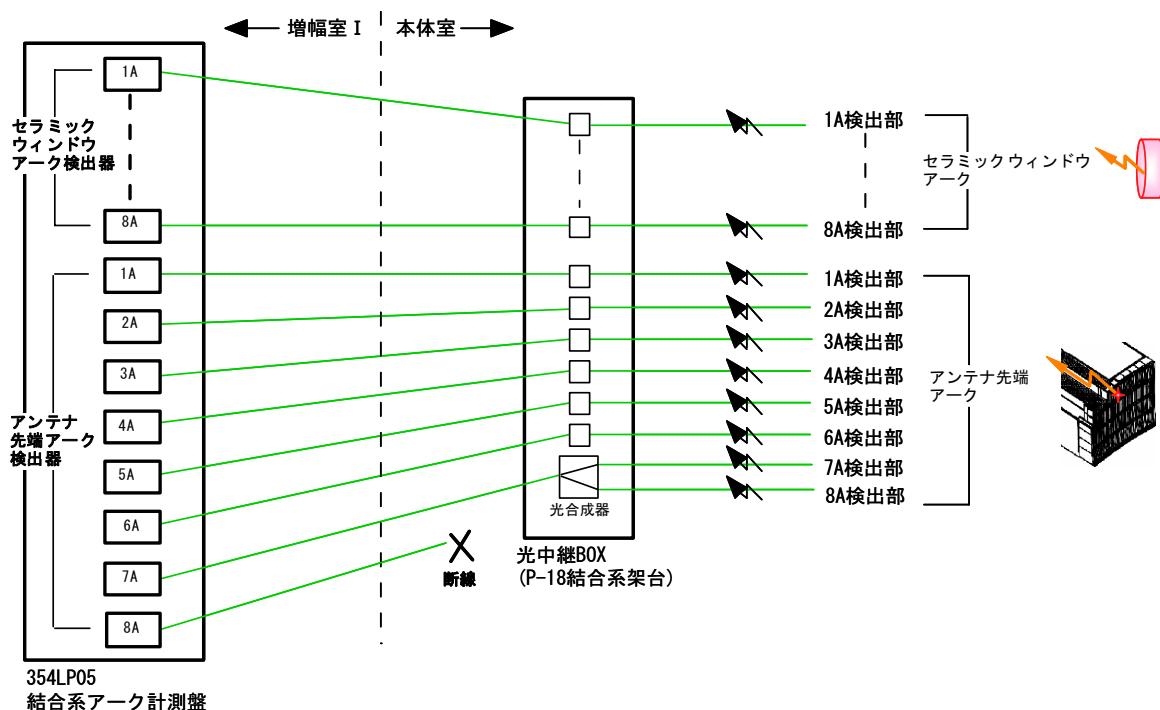


図.6 アーク検出器システムの信号系統

This is a blank page.

### 3.3 アーク検出器の動作不良

3.2 で説明した保護装置を使用するだけでなく、アンテナ先端部そのものの耐熱化を狙って炭素製グリルを導入・取り付けを行い、入射性能の維持と入射電力量の増大を目指して運転を行ってきた。入射電力は～1.6MW 程度であったが、入射電力量は従来の 11MJ を超えて～16MJ へと増大させることができた。また、炭素製グリルを用いた世界初の LH 電流駆動にも成功し、アンテナとしての性能を実証することができた。その後、アンテナ先端部を観察したところ、炭素製グリルそのものには大きな損傷はなかったが、炭素製グリルを取り付けるためのステンレス製ベース部に溶融が見られた。特に 7 列及び 8 列において、大きな損傷があった。その損傷は、ベース部の仕切り板の中央部が特に酷く、高周波電界強度の高い場所に一致する。また、グリルとベース間の電気接触を改善する目的で挿入していた銅製の接触子も、仕切り板の中央部分が損失していた。

これら損傷の原因は、先端部付近での放電をきっかけとして発生した高周波放電をアーク検出器が検知できず、正常に保護できなかつたことであると考えられる。プラズマが当たっての熱負荷であれば、仕切り板中央だけに溶融が集中しないと考えられるし、さらに炭素製グリルにも損傷があるはずである。伝送路途中にて集中的に溶融があるということは、高周波のパワーがそこで消費されていることを示し、しかも持続しているのである。また、損傷の大きい 7 ～8 列については、特有の理由があるはずである。

LHRF アンテナ先端部に炭素製グリルを導入してからの先端部及び真空窓でのアーク検出器の保護動作回数を図.7-1 に示す。比較のために炭素製グリル導入前の動作回数も図.7-2 に示す。図.8 には、正常な先端部アーク信号による保護動作例を示しており、4 列先端部の光信号がスパイク状に出て、しきい値を超えるとインターロック信号が出され 100ms 間入射が中断されている。放電が治まり、真空が回復したあとに再度入射が行われる。通常は、このような小放電を起こさせ、耐電力を向上させていく。図.7-1 から、損傷のあった 6～7 列先端部のアーク動作回数が少ないので分かる。なお、7 列と 8 列の先端部アーク信号は合成されており、8 列における動作回数は示されていない。これらのことから、保護機能であるアーク検出器が正常に動作すれば、損傷を抑えることができたのではないかと推測される。

そこで、先端アーク検出回路の健全性を確認するために、真空容器内から光源（蛍光灯及び懐中電灯）を用いて LH アンテナ先端から光を入れて、各列の信号レベルの測定を行った。測定した結果、7 列と 8 列において検出した信号レベルが他の列と比較して小さくなっている、実験運転中はしきい値に達せず、アークのインターロック信号として検出できなかつた可能性がある。また、6 列の保護動作状況を調べてみると、2004 年 8 月下旬より保護動作が行われていなかつた可能性が高い。典型的な例として、図.9 に示す。先端部アーク信号は検出しているのにもかかわらず、インターロック信号が出力されておらず、入射が中断されていないのが判る。このため、6 列のベース部の溶融が起きたと思われる。この原因を調査したところ、トリガ信号「RT on」のケーブルが 6 列用先端部アーク検出器部で接触不良を起こしていたために、保護動作が行われなかつたことが判った。

次に、7～8 列における光合成器の有／無での信号レベルを比較した。この結果、7 列において光センサーに直接弱い光源を当てたところ、合成器を用いると信号レベルが約 1/4 程度に減

This is a blank page.

衰していることが判明した。すなわち、7列と8列には光合成器の影響で光信号の減衰が大きく、アンテナ先端において高周波放電の信号を検知しにくくさせていたことが考えられる。

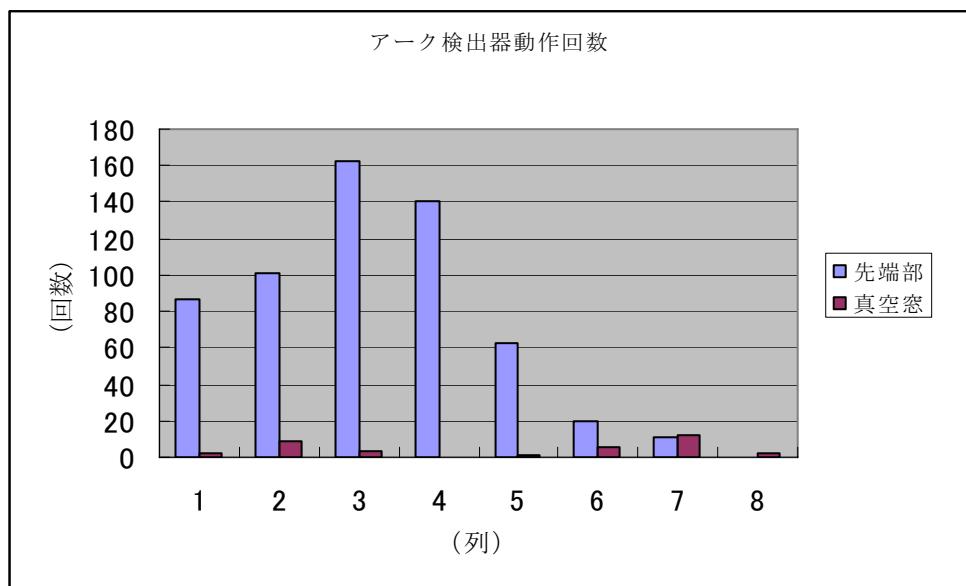


図.7-1 LH-A 系アーク検出器の保護動作回数（炭素製グリル導入後）

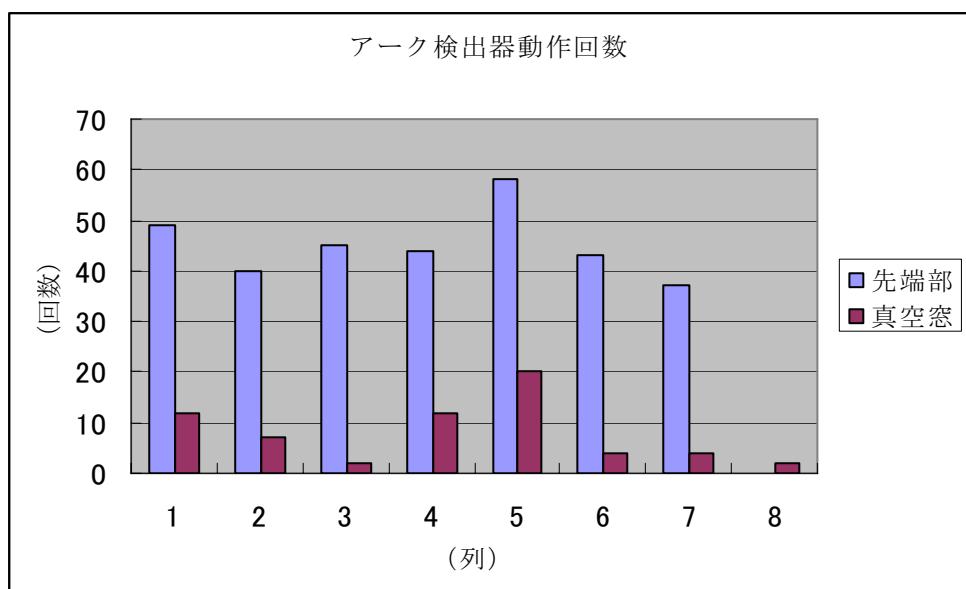


図.7-2 LH-A 系アーク検出器の保護動作回数（炭素製グリル導入前）

This is a blank page.

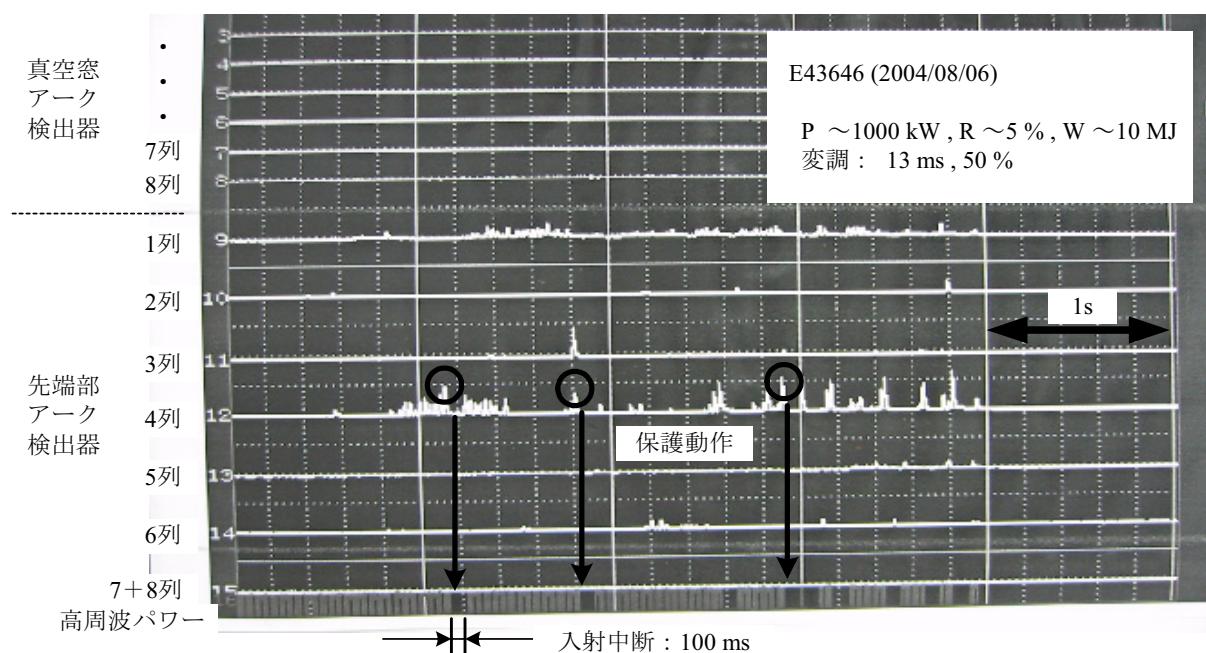


図.8 先端部アーク信号による保護動作例

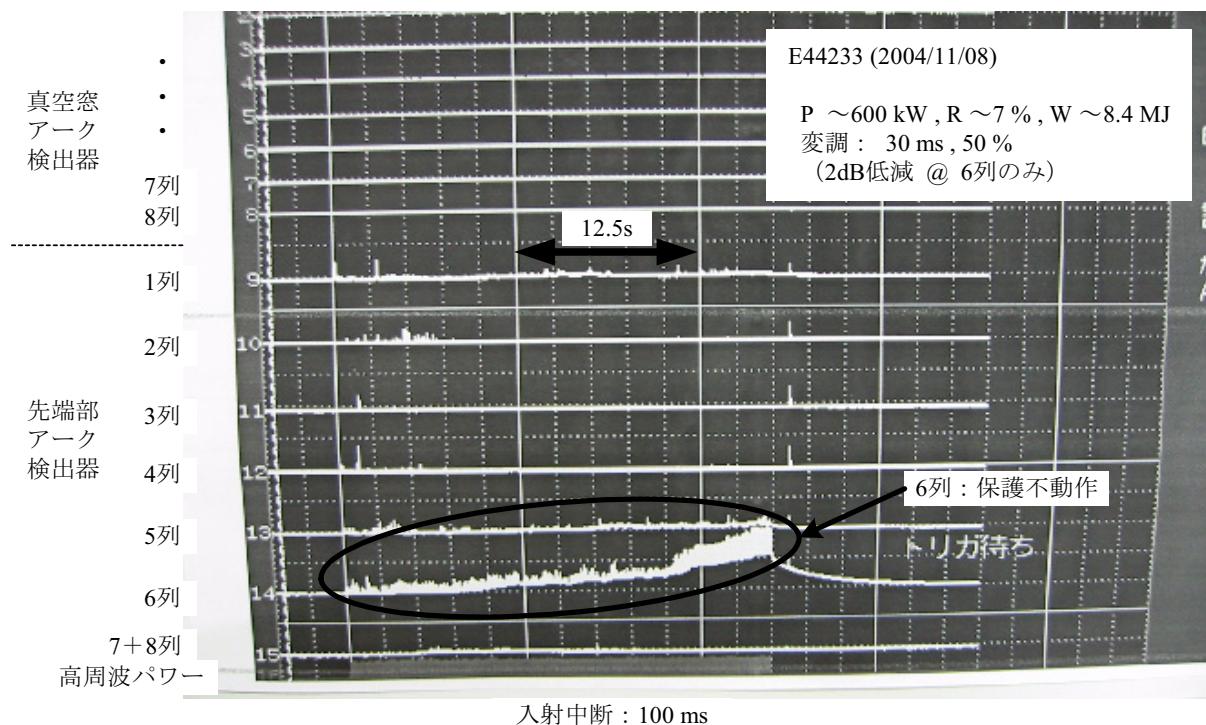


図.9 6列における光信号

## 4. 保護装置の改良

### 4.1 アーク検出器の改善

3.3 で述べたようにアーク検出器の一部において動作不良等があった。そこで、今後の実験運転を効率よく行い、アンテナ先端部の損傷を抑え保護性能を向上させるために、以下のような問題点について改善を行った。

8列の先端部アーク検出器用光ケーブルが断線しているため、7列用と8列用の光センサーからの信号を「光合成器」を用いて合成して対処している。この光合成器の影響で、光量の減衰が大きく、信号が受けにくいという問題点がある。また、アンテナ先端部から光を当て、アーク検出器で信号強度を調べた結果、8列では光の当て方によって光の信号強度に大きな差が現れた。これは、12分岐モジュールなどに何らかの変形があると思われ、放電光を受けにくくなっている可能性がある。さらに、アーク検出器を動作させるためのタイミング信号(RT on)が6列のみ接触不良を起こしていたのにもかかわらず、異常に気付かず運転を行ったという問題点があった。これらの問題点に対して、アーク検出器が正常に動作すれば、アンテナのダメージを抑えることができると推測されるため、まずアーク検出器の配線チェックを行った。そして、日常的にアーク検出器の健全性を確認するためのチェックランプのホルダー形状を、光の届きやすいものに改良し、装置の健全性を確保できるようにした。そのチェックランプホルダーの改良点を図.10に示す。

次の問題点として、アーク検出器の応答速度（アークセンサー検出素子で光を受光し、インターロック信号を出力するまでの時間）が充分でないことが考えられる。これは増幅回路において、入力信号の直流成分を除去するハイパスフィルターによって時定数が遅くなるためであり、信号の直流成分のみを後段で引き算する方式に変更して、ハイパスフィルターを取り外し、約400倍程度の高速化を図った。また、本来とは異なる極性のパルスが出力されてしまい、光が発生した直後の信号を検出できなかった問題への対応として、最初のパルスとその後の信号を絶対値回路で極性を揃える工夫を行った。一方、プラズマの発光とアークが発生する光の区別ができなかつたため、インターロックのしきい値が高かったことも考えられる。背景のプラズマによる発光とアークが発生する光を区別するため、プラズマが発生する光の信号を引き算する回路を追加した。さらに、適切なしきい値を設定できるようにした。このアーク検出回路の変更点を図.11に示す。但し、このアーク検出器の応答速度を最適化にするための改良は、1列分の検出回路のみを行い、調査を行っている。その調査結果を踏まえて、他の列にも導入を行う。また、プラズマが発生する光の信号を引き算する回路についても、この方法が有効であるかどうか十分に調整、調査を行う。

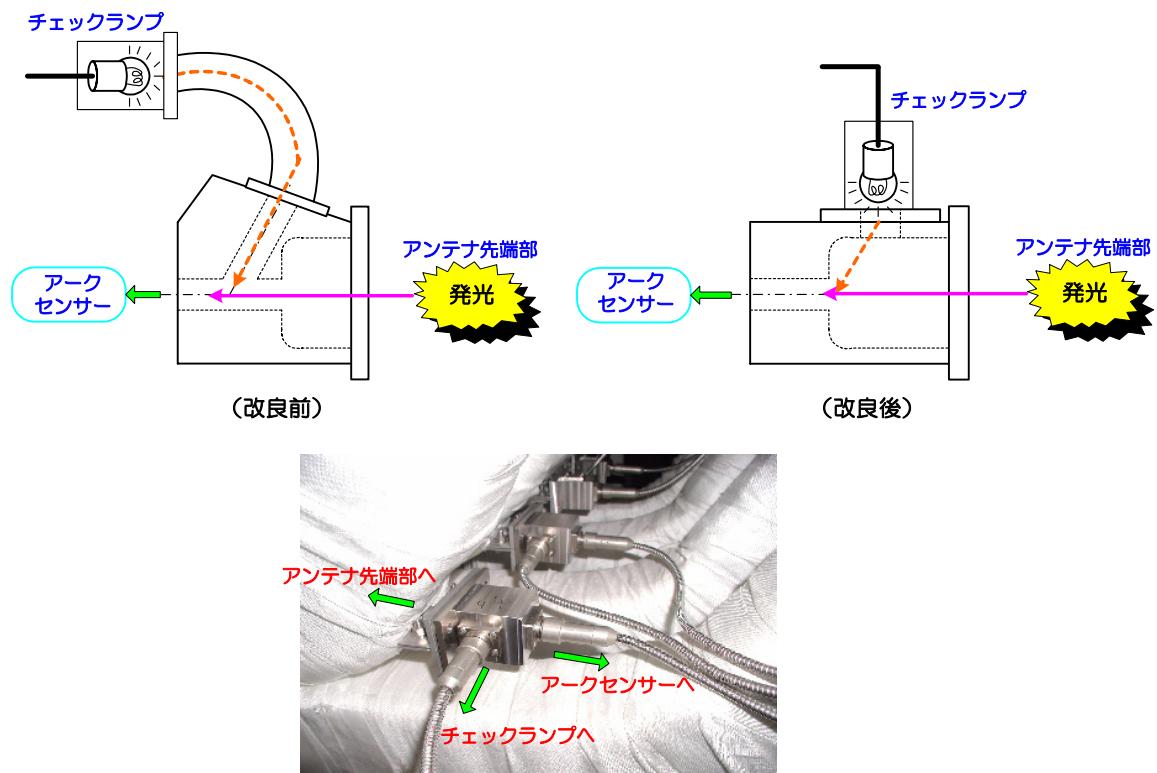
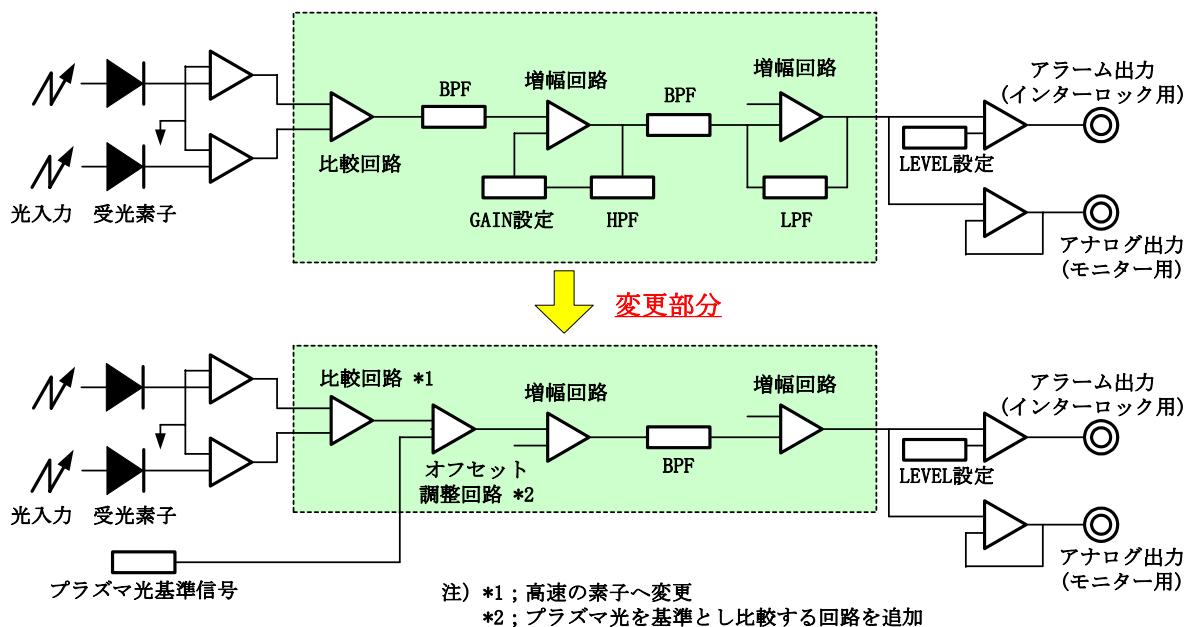


図.10 チェックランプホルダー（下段；改良後の取付写真）



This is a blank page.

#### 4.2 可視画像による保護の追加

可視画像による保護システムは、LH アンテナ先端部を監視している可視カメラの映像を記録するだけであったが、今回画像入力ボードによってパソコンコンピューター（PC）に取り込み、そのキャプチャされた画像の中の指定した範囲で放電光の強度（画像信号の濃度分布変化）を検出処理し、ある一定の数値（面積値の上限しきい値）を超えた際に保護動作（デジタル信号出力）させ、LHRF の入射を停止させる機能を持たせるように改良した。ここでのポイントは、アンテナの放電かプラズマの発光かを区別して保護動作をするところである。この可視画像による保護システムの構成を図.12 に、ソフトウェア画面のイメージを図.13 に示す。また、画像処理手順とソフトウェア仕様説明は付録に示す。

今まで運転員が可視カメラ映像の発光強度及び赤外カメラ映像の温度上昇を確認しながら、その人の判断で入射を中断させていたのに対し、このシステムによって自動化ができ、さらに保護を迅速にすることができます。また、ソフトウェアやパソコンコンピューターは汎用品を使用しているため、比較的低コストで機能を実現することができた。なお、アンテナへの過大な高周波放電による熱負荷の問題は、同様な装置について共通であり、他の装置でもこのシステムを比較的容易に導入することが可能である。

運用上の注意として、放電光の検出範囲や面積値の上限しきい値などを、JT-60U での実験運転を進めながら最適値を見出して設定する必要があることがある。しかし現状では、信号レベルの強度が上がる箇所を確認することはできたが、正確な LH アンテナの輪部が把握できていなかったため、発光場所がどの列なのかが同定できなかった。今後、LH アンテナ先端部の正確な位置を確認する方法を工夫するとともに、信号レベルや検出範囲の調整を行っていく必要がある。

This is a blank page.

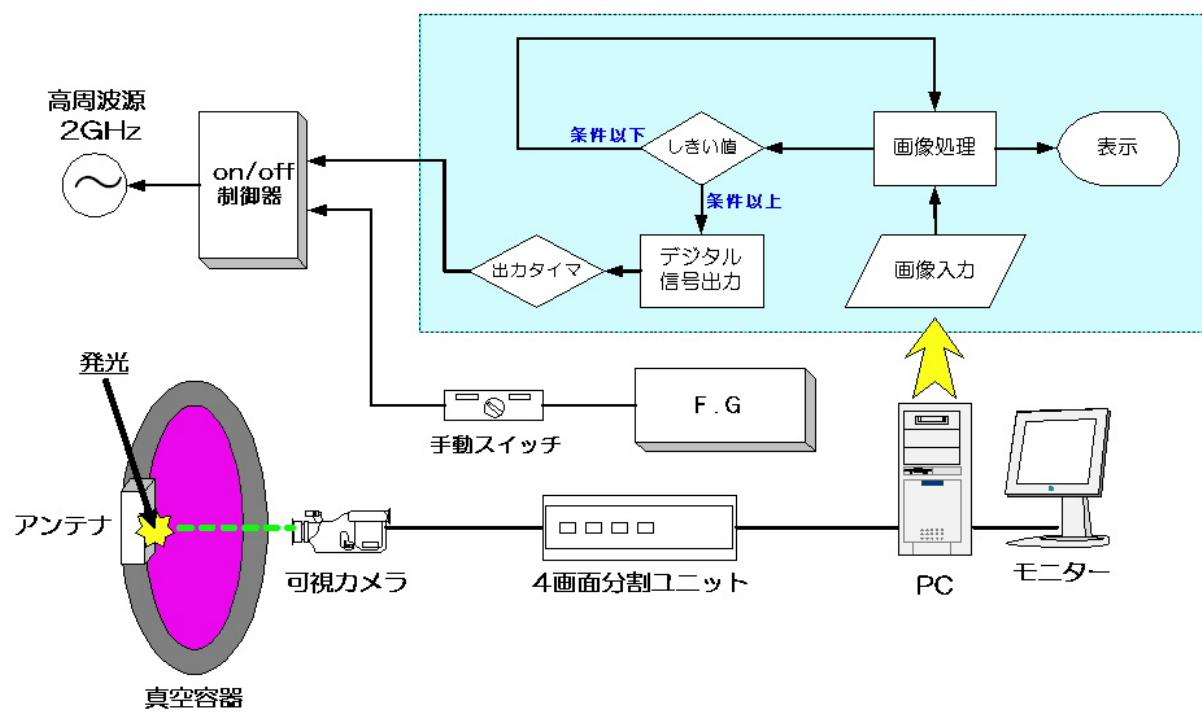


図.12 可視画像による保護システムの構成

This is a blank page.



図.13 ソフトウェア画面のイメージ  
(4分割画面左下の映像がアンテナ先端部をモニターしている可視画像)

This is a blank page.

## 5. まとめ

LHRF アンテナ先端部における放電損傷を抑制するために保護インターロックシステムの改良を行った。一つはアーク検出器であり、もう一つは可視画像検出の改良である。アーク検出器では、光検出の応答速度及び分解能強化のために増幅回路の改良を行った。応答速度を早めるために時定数が遅くなる原因であるハイパスフィルターに代わり、入力信号の直流成分を後段で引き算する方式を採用した。これにより約 400 倍程度、応答速度が早くなる。また、プラズマによる発光とアークによる発光を区別できるように差分機能を持つ新たな回路を追加した。これにより、プラズマあるいはアークによる発光を識別し、正常なインターロック動作が期待される。また可視画像検出では、PC で画像処理を行い、発光の強度により保護インターロックを起動させる機能を追加した。この発光強度は、プラズマと放電による発光を区別できとともに、発光強度のある一定のしきい値を設定して保護インターロックを起動することができ、RF エージングの自動化にも今後期待される機能である。

## 謝 辞

本報告書をまとめるに当たり、終始ご協力いただいた高周波加熱システム開発グループ員の方々に深く感謝致します。また、有益な助言及び御指導いただいた藤井常幸高周波加熱システム開発グループリーダーに感謝致します。

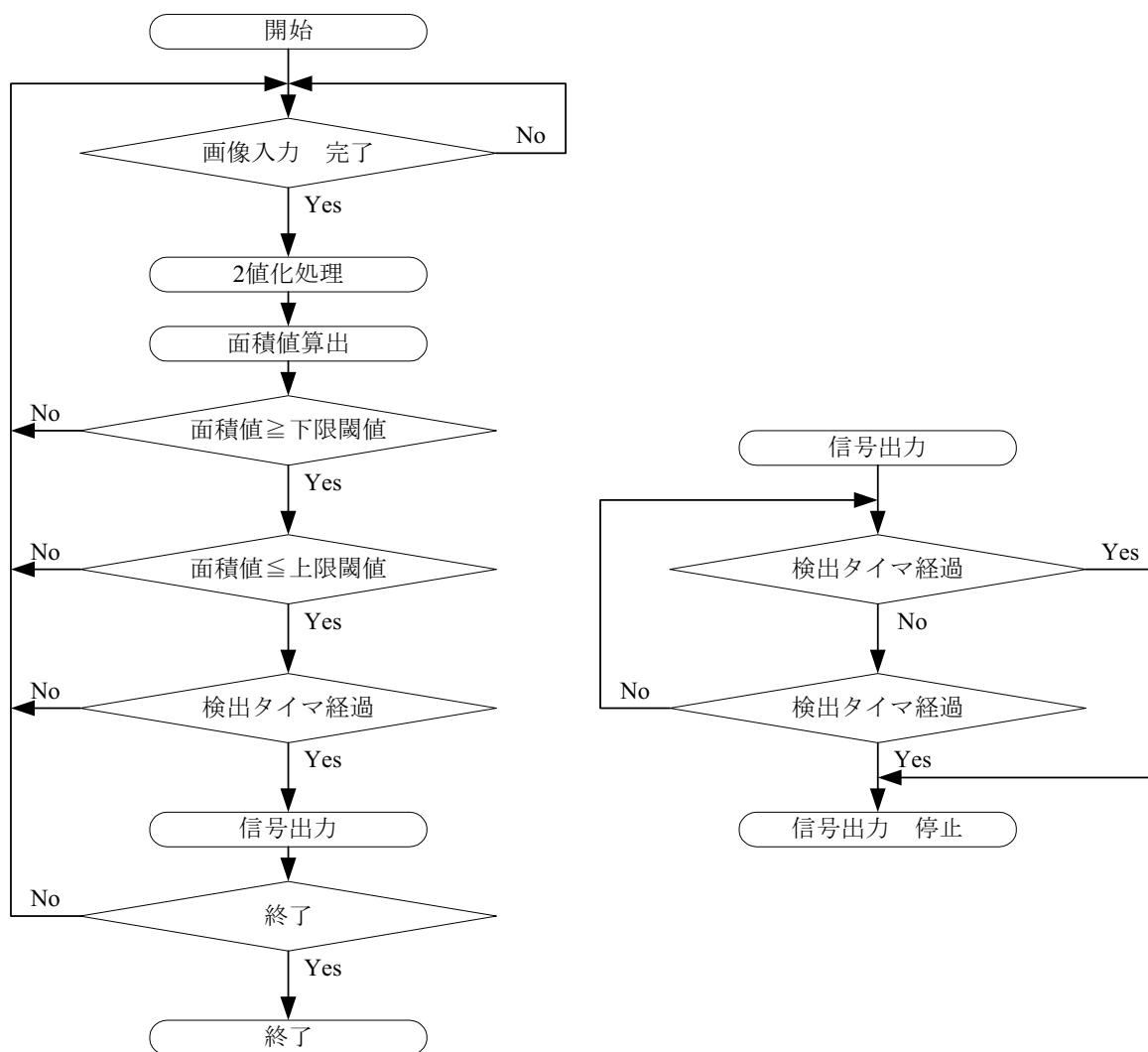
## 参考文献

- 1) K.Uehara, Y.Ikeda, M.Saigusa, K.Sakamoto et.al., Plasma coupling test of the RF heating system in JT-60, Fusion Engineering and Design 19(1992)29-40
- 2) M.Seki, Y.Ikeda, S.Maebara et.al., Development and Operating of the lower hybrid range of frequency system on JT-60U, Fusion Science and Technology Vol.42, Sep./Nov.2002
- 3) Y.Ikeda, O.Naito, T.Kondou et.al., High Power Lower Hybrid Current Drive Experiments in JT-60U, Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, 1994, IAEA-CN-60/A-3-I-1.
- 4) S.Ide, O.Naito, T.Oikawa et.al., LHCD Current Profile Control Experiments Towards Steady State Improved Confinement on JT-60U, Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, 1998, IAEA-CN-69/CD1/4.
- 5) T.Suzuki, S.Ide, T.Fujita, T.Oikawa, M.Ishikawa et.al., Off-axis Current Drive and Current Profile Control in JT-60U, 21th IAEA Fusion Energy Conference EX/6-4, Oct. 2006
- 6) M.Seki, S.Maebara and T.Fujii, R&D of the heat-resistant LH antenna, Fusion Engineering and Design 56-57(2001)581-585
- 7) S.Maebara, M.Goniche, F.Kazarian et.al., Development of cold isostatic pressing graphite module for a heat-resistant lower hybrid current drive antenna, Review of Scientific Instrument 76, 053501(2005).

## 付 錄

## 1. 可視画像による保護システムの発光検出処理（画像処理）

以下の処理手順により、発光を検出する。



付図.1 画像処理フロー

## 2. 可視画像による保護システムソフトウェアの表示説明

ソフトウェア画面の表示、操作ボタン及び動作パラメータの内容を下記に示す。

付表.1 ソフトウェア仕様説明 (1/2)

画像入力	映像をキャプチャし、1フレーム ( $640 \times 480$ ) のモノクロ画像を入力。
2値化	1フレーム内の指定エリアを上下限閾値にて2値化。
面積値算出	2値化後の画像から白色の有効画素数をカウント。
面積値判定	「下限閾値 $\leq$ 面積カウント値 $\leq$ 上限閾値」の範囲を判定。
信号出力	検出タイマ以上、面積値判定が連続成立した場合は、信号出力。 (信号出力の解除は、出力タイマ又は「出力停止」ボタンで行う。)
<表示>	
面積値	アークの発光検出処理にて算出した面積値を表示。
X座標	アークの発光検出処理にて算出した面積の重心点のX座標を表示。
Y座標	アークの発光検出処理にて算出した面積の重心点のY座標を表示。
濃度分布	表示画面の濃度分布を表示。 ※ 本表示は、“テスト”ボタンによる1回検出処理実行時または“終了”ボタンによる連続検出処理の終了時に表示。(連続検出処理中の表示更新は行わない。)
検出結果	表示画面の検出結果を、下限閾値以下の場合は黄色で、上限閾値以上の場合は赤で表示。
信号出力	検出処理の結果、デジタル信号出力時に赤で表示。
状態表示	ソフトウェアの実行状態を表し、検出処理中は“計測中”、検出処理停止中は“停止中”を表示。
<操作ボタン>	
開始	アークの発光検出処理を、“停止”ボタンがクリックされるまで連続実行する。
停止	アークの発光検出処理を、終了する。
テスト	アークの発光検出処理を、1回のみ実行する。 (本ボタン操作は、“開始”ボタンによるアーク発光検出処理の連続実行時は操作できない。)
パラメータ	動作パラメータのパラメータ入力モード時、及びパラメータ入力モード終了時に操作する。 (本ボタン操作は、“開始”ボタンによるアーク発光検出処理の連続実行時は操作できない。)
出力停止	デジタル信号出力時、本ボタンのクリックにより信号出力を停止する。

付表.1 ソフトウェア仕様説明 (2/2)

<動作パラメータ>	
<p>※ 設定は、“パラメータ”ボタンのクリックによるパラメータ入力モード時に設定可能である。(パラメータ入力モード時以外は、各パラメータはグレー表示となり変更できない。)</p>	
検出範囲	検出対象エリアを、対角座標にて設定する。 キャプチャ画面エリアをマウスでドラッグすることにより、座標を設定することも可能である。ドラッグしている範囲は、黄色の四角形にて表示される。マウスで設定した対角座標は、自動的に検出範囲テキストボックスに設定される。
2値化条件	濃度分布の上限値、下限値を設定する。 上限値～下限値の範囲が“白”、それ以外が“黒”と判断される。
検出条件 (面積値)	面積値の上限閾値、下限閾値を設定する。 検出した面積値が上限閾値～下限閾値の範囲にある場合、“検出中”と判断する。
検出タイマ	検出条件の監視タイマを設定する。 タイマ間の処理中、検出条件が成立した場合に信号出力を行なう。 (検出タイマは、検出処理サイクル毎のタイマ監視となる。タイマは10msec 単位で設定可能であるが、サイクル周期によって検出が1処理サイクル後になる場合がある。)
出力タイマ	信号出力を“ON”とする秒数を設定する。
表示許可	キャプチャ画面への“検出範囲”及び“重心点”表示の「許可」、「禁止」を設定する。
画像モード	キャプチャ画面の“画像モード”を、“GRAY 画像”あるいは“2値化画像”かの選択を行う。
テスト時画像保存	“テスト”ボタンによる1回検出処理時に、本チェックボックスがチェックされている場合、“ファイルの保存”ダイアログボックスが表示されキャプチャ画像を BMP ファイルに保存することが可能となる。

This is a blank page.

# 国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	$m^2$
体積	立方メートル	$m^3$
速度	メートル毎秒	$m/s$
加速度	メートル毎秒毎秒	$m/s^2$
密度(質量密度)	キログラム毎立方メートル	$kg/m^3$
質量体積(比体積)	立法メートル毎キログラム	$m^3/kg$
電流密度	アンペア毎平方メートル	$A/m^2$
磁界の強さ	アンペア毎メートル	$A/m$
(物質量の)濃度	モル毎立方メートル	$mol/m^3$
輝度	カンデラ毎平方メートル	$cd/m^2$
屈折率	(数の)1	1

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(a)</sup>	rad	$m \cdot m^{-1}=1^{(b)}$
立体角	ステラジアン <sup>(a)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	$m^2 \cdot m^{-2}=1^{(b)}$
周波数	ヘルツ	Hz	$s^{-1}$
力	ニュートン	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
圧力、応力	パスカル	Pa	$N/m^2$
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	$N \cdot m$
功率、放射束	ワット	W	$J/s$
電荷、電気量	クーロン	C	$s \cdot A$
電位差(電圧)、起電力	ボルト	V	$W/A$
静電容量	フアラード	F	$C/V$
電気抵抗	オーム	$\Omega$	$m^2 \cdot kg \cdot s^4 \cdot A^2$
コンダクタンス	ジemens	S	$V/A$
磁束密度	テスラ	T	$A/V$
インダクタンス	ヘンリー	H	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^2$
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(d)</sup>	°C	$Wb/m^2$
光束度	ルーメン	lm	$Wb/A$
(放射性核種の)放射能吸収線量、質量エネルギー分与、カーマ線量当量、周辺線量当量、方向性線量当量、個々人線量当量、組織線量当量	ベクレル	Bq	$cd \cdot sr^{(c)}$
	グレイ	Gy	$lm/m^2$
			$m^2 \cdot m^{-4} \cdot cd=m^{-2} \cdot cd$
			$s^{-1}$
			$J/kg$
			$m^2 \cdot s^{-2}$
			$J/kg$
			$m^2 \cdot s^{-2}$

(a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもつた量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。

(b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。

(c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa·s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N·m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
表面張力	ニュートン每メートル	N/m	$kg \cdot s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s <sup>2</sup>	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}=s^{-2}$
熱流密度、放射照度	ワット每平方メートル	W/m <sup>2</sup>	$kg \cdot s^{-3}$
熱容量、エントロピー	ジユール毎ケルビン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量熱容量(比熱容量)	ジユール毎キログラム	J/(kg·K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エントロピー	モル毎ケルビン	J/(mol·K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エネルギー(比エネルギー)	ジユール毎キログラム	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
熱伝導率	ワット每メートル毎ケルビン	W/(m·K)	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジユール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト每メートル	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘電率	ファラード每メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー每メートル	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
モルエネルギー	ジユール毎モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モルエントロピー	ジユール毎モル每ケルモル	J/(mol·K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
モル熱容量	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	Gy	$m^2 \cdot s^{-3}$
吸収線量率	グレイ每秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット每平方メートル	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット每平方メートル每ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> ·sr)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3}=kg \cdot s^{-3}$

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
$10^{24}$	ヨタ	Y	$10^{-1}$	デシ	d
$10^{21}$	ゼタ	Z	$10^{-2}$	センチ	c
$10^{18}$	エクサ	E	$10^{-3}$	ミリ	m
$10^{15}$	ペタ	P	$10^{-6}$	マイクロ	μ
$10^{12}$	テラ	T	$10^{-9}$	ナノ	n
$10^9$	ギガ	G	$10^{-12}$	ピコ	p
$10^6$	メガ	M	$10^{-15}$	フェムト	f
$10^3$	キロ	k	$10^{-18}$	アト	a
$10^2$	ヘクタ	h	$10^{-21}$	ゼット	z
$10^1$	デカ	da	$10^{-24}$	ヨクト	y

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	$1^\circ=(\pi/180) \text{ rad}$
分	'	$1'=(1/60)^\circ=(\pi/10800) \text{ rad}$
秒	"	$1''=(1/60)'=(\pi/648000) \text{ rad}$
リットル	L	$1L=1 \text{ dm}^3=10^{-3} \text{ m}^3$
トン	t	$1t=10^3 \text{ kg}$
ネーベル	Np	$1Np=1$
ベル	B	$1B=(1/2) \ln 10 (Np)$

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ポルト	eV	$1eV=1.60217733(49) \times 10^{-19} \text{ J}$
統一原子質量単位	u	$1u=1.6605402(10) \times 10^{-27} \text{ kg}$
天文単位	ua	$1ua=1.49597870691(30) \times 10^{11} \text{ m}$

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	里	1 海里=1852m
ノット	ト	1 ノット=1 海里每時=(1852/3600)m/s
アード	ル	$1a=1 \text{ dam}^2=10^2 \text{ m}^2$
ヘクタール	ha	$1ha=1 \text{ hm}^2=10^4 \text{ m}^2$
バル	bar	$1 \text{ bar}=0.1 \text{ MPa}=100 \text{ kPa}=1000 \text{ hPa}=10^5 \text{ Pa}$
オンストローム	Å	$1 \text{ Å}=0.1 \text{ nm}=10^{-10} \text{ m}$
ペー	ン	$1b=100 \text{ fm}^2=10^{-28} \text{ m}^2$

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	$1 \text{ erg}=10^{-7} \text{ J}$
ダイニン	dyn	$1 \text{ dyn}=10^{-5} \text{ N}$
ボアズ	P	$1 P=1 \text{ dyn} \cdot s/cm^2=0.1 \text{ Pa} \cdot s$
ストーカス	St	$1 St=1cm^2/s=10^4 \text{ m}^2/s$
ガウス	G	$1 G=10^{-4} \text{ T}$
エルステッド	Oe	$1 Oe=(1000/4\pi) \text{ A/m}$
マクスウェル	Mx	$1 Mx=10^{-8} \text{ Wb}$
スチール	sb	$1 sb=1cd/cm^2=10^4 \text{ cd/m}^2$
ホルト	ph	$1 ph=10^4 \text{ lx}$
ガル	Gal	$1 Gal=1 \text{ cm/s}=10^{-2} \text{ m/s}$

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	$1 Ci=3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$
レントゲン	R	$1 R=2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$
ラド	rad	$1 rad=1 \text{ cGy}=10^{-2} \text{ Gy}$
レム	rem	$1 rem=1 \text{ cSv}=10^{-2} \text{ Sv}$
X線単位		$1X \text{ unit}=1.002 \times 10^{-4} \text{ nm}$
ガンマ	γ	$1 \gamma=1 \text{ nT}=10^{-9} \text{ T}$
ジャンスキ	Jy	$1 Jy=10^{-26} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$
フェルミ	fm	$1 fermi=1 \text{ fm}=10^{-15} \text{ m}$
メートル系カラット		$1 \text{ metric carat}=200 \text{ mg}=2 \times 10^{-4} \text{ kg}$
トル	Torr	$1 \text{ Torr}=(101.325/760) \text{ Pa}$
標準大気圧	atm	$1 \text{ atm}=101.325 \text{ Pa}$
力口リ	cal	$1 \text{ cal}=4.184 \text{ J}$
ミクロ	μ	$1 \mu \text{m}=10^{-6} \text{ m}$

**R100**

古紙配合率100%  
白色度70%の再生紙を使用しています