

JAERI-Tech
2003-079



JP0350708



JT-60U LHRF 加熱装置のアンテナ先端部の損傷対策

2003年10月

石井 和宏・関 正美・下野 貢・寺門 正之
五十嵐 浩一・高橋 正己

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

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

This report is issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2003

編集兼発行 日本原子力研究所

J T - 6 0 U L H R F 加熱装置のアンテナ先端部の損傷対策

日本原子力研究所那珂研究所核融合装置試験部

石井 和宏*・関 正美・下野 貢・寺門 正之

五十嵐 浩一*・高橋 正己*

(2003年 8月29日受理)

J T - 6 0 Uでは、定常化運転を目指した開発研究の一つとして、低域混成波帯（L H R F）の高周波を用いた電流駆動の研究を行なっている。その研究において、装置技術的課題は、L H R F 加熱装置の重要な機器である大電力L H R F アンテナの開発である。

L H R F アンテナは、効率的に高周波をプラズマに入射するために、プラズマから近い位置に置かれている。そのためL H R F アンテナは常にプラズマからの熱にさらされ、また大電力高周波の入射が要請されるため、先端部におけるプラズマからの熱負荷による溶融や高周波放電による溶融・変形が問題となっていた。その結果、プラズマへの入射パワーは徐々に減少してきた。この対策として、L H R F アンテナのエージングを行なって、耐高周波電界性能の向上を図った。また、赤外線カメラによるL H R F アンテナの温度監視、L H R F アンテナ位置の調整、入射パワーを断続的に変調する電流駆動法の開発、そしてアークセンサによる高周波放電を検知して、L H R F アンテナ先端部の損傷を防止する保護対策を実施してきた。

Measures against the Damage of the Antenna Mouth of JT-60U LHRF System

Kazuhiro ISHII*, Masami SEKI, Mitsugu SHIMONO, Masayuki TERAKADO,
Koichi IGARASHI*and Masami TAKAHASHI*

Department of Fusion Facilities
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received August 29, 2003)

In JT-60U, the study of current drive by radio-frequency (RF) waves in lower hybrid range of frequency (LHRF) has been done as one of research and development works aiming at steady state operation of tokamaks. The main subject of hardware and technology development in this study is to develop a high power LHRF antenna, the main component of the system.

The LHRF antenna is set closely to plasma to efficiently inject RF power into it. The LHRF antenna normally receives heat loads from the plasma, and it is required to inject high RF power. Then, it has become a problem that the antenna mouth was melted by excessive heat loads from plasma or it was melted and deformed by RF discharges. As a counter measurement against this, the LHRF antenna has been conditioned to improve its stand-off voltage capability. Furthermore, by monitoring the temperature of the LHRF antenna, adjusting its position, developing a injection method of power modulation even for current drive, and setting an arc sensor which picks up the RF discharge, the damage of the antenna mouth has been suppressed.

Keywords: JT-60U,LHRF,Antenna

* Cooperative Staff

目次

1. はじめに.....	1
2. JT-60U LHRF 加熱装置.....	2
2. 1 LHRF 加熱装置の構成.....	2
2. 2 LHRF アンテナの特徴.....	5
3. LHRF 加熱装置の運転.....	6
3. 1 LHRF 入射システムの概要.....	6
3. 2 LHRF アンテナのエージング	7
4. LHRF アンテナの損傷からの保護.....	8
4. 1 LHRF アンテナ先端部の損傷.....	8
4. 2 LHRF アンテナ先端部の補修.....	10
4. 3 LHRF アンテナ先端部の損傷防止対策	10
5. まとめ.....	16
謝辞.....	17
参考文献.....	17
付録.....	18

Contents

1. Introduction	1
2. JT-60U LHRF Heating System	2
2.1 Outline of the LHRF Heating System	2
2.2 Features of the LHRF Antenna	5
3. Operation of the LHRF Heating System	6
3.1 Overview of the LHRF Injection Control System	6
3.2 Aging of the LHRF Antenna	7
4. Protection against the Damage of the LHRF Antenna	8
4.1 Damage of the LHRF Antenna Mouth	8
4.2 Repair of the LHRF Antenna Mouth	10
4.3 Protections against the Damage of the LHRF Antenna Mouth	10
5. Concluding Remarks	16
Acknowledgements	17
Reference	17
Appendix	18

1. はじめに

J T - 6 0 Uにおいて高周波による定常化運転の研究をひとつとして、大電力L H R F 加熱装置の開発研究を行なってきた。そのもつとも重要な開発要素であるL H R F アンテナについては、多分岐型マルチジャンクション方式による高性能化開発を行なった¹⁾。そして開発したアンテナをJ T - 6 0 Uに取付けた結果、7 MWの大電力入射を達成するとともに従来の最高値を1.8倍上回る3.6 MAの電流駆動に成功した²⁾。しかし、L H R F アンテナは、高温のプラズマから近い位置にあるために、プラズマからの熱負荷^{3) 4)}によるアンテナ先端部の溶融をおこした。またアンテナ内でも放電が発生し、アンテナ先端部が溶融、変形した。このような溶融によるアンテナ先端部の損傷により、入射パワーは減少してきた。その対策としていくつかのL H R F アンテナの保護対策を行なってきた。

本論分ではL H R F 加熱装置のアンテナの保護対策について述べる。第2章では、J T - 6 0 U L H R F 加熱装置の概要を記述し、第3章ではL H R F 加熱装置の運転について記述する。第4章ではプラズマからの熱負荷及びアンテナ先端部での放電による、L H R F アンテナ先端の損傷例や損傷対策を記述する。第5章では、まとめを行なう。

2. JT-60U LHRF 加熱装置

2.1 LHRF 加熱装置の構成

図2-1にJT-60UにおけるLHRF加熱装置のブロック構成図を示す。JT-60U LHRF加熱装置は、装置全体を統括し運転を制御する「制御設備」や、直流の高電圧を発生させる「電源設備」、そして大電力高周波をプラズマへ入射するための「高周波設備」から構成されている。

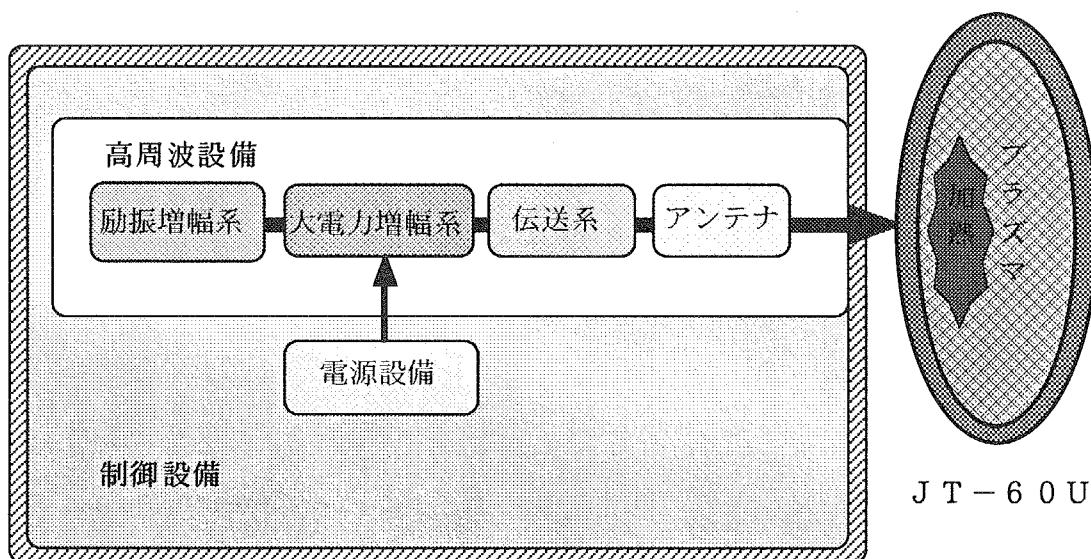


図2-1 LHRF加熱装置のブロック構成図

高周波設備とはLHRF加熱装置の性能を決定する重要な設備である。図2-2にLHRF加熱装置の高周波設備の概略図を示す。LHRF加熱装置の高周波設備は、励振系(図2-3)、大電力増幅系(図2-4)、伝送系およびアンテナから構成されている。発振器から出力された数mWの高周波は、励振系の固体アンプで数Wに増幅され、さらに大電力増幅系では進行波管(TWT)で~100W程度、そして大電力増幅の心臓部であるクライストロン(図2-5)で、最大1MW(1MW×8系統有るので、最大8MW)まで増幅される。クライストロンは、全長約3m、重量約800kgの巨大な金属製真空管である。現在使用されているクライストロンは、核融合用に開発された世界最大のものである。1MWまで増幅された高周波を約100mの導波管(図2-6)にて伝送し、LHRFアンテナからプラズマに入射する。クライストロンの近くに設置された電力測定器でパワーを測定し、設定さ

れたパワーになるようにフィードバック制御を行なっている。L H R F 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。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できる。これによりプラズマ加熱の最適化を図ることができる。

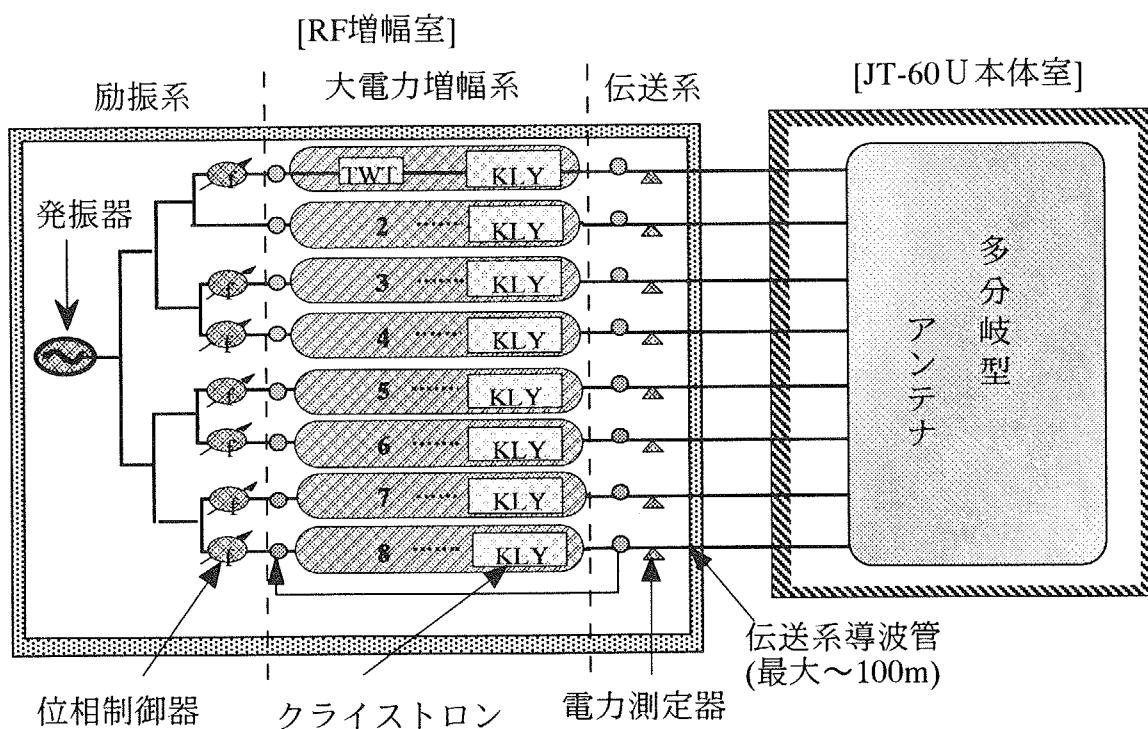


図 2－2 L H R F 加熱装置の高周波設備の概略図

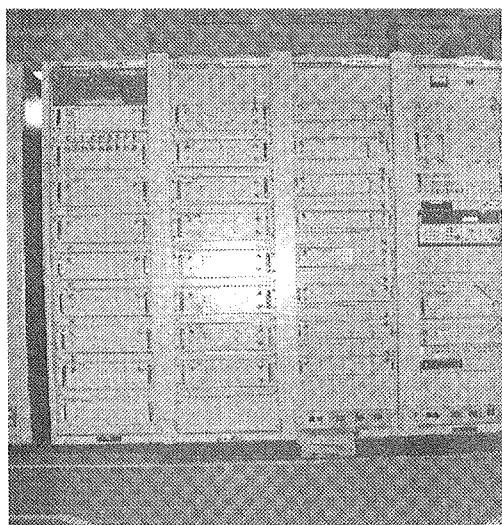


図2-3 励振系

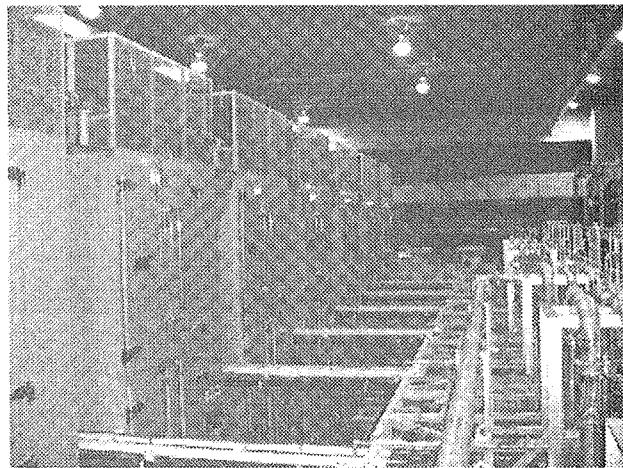


図2-4 大電力増幅系

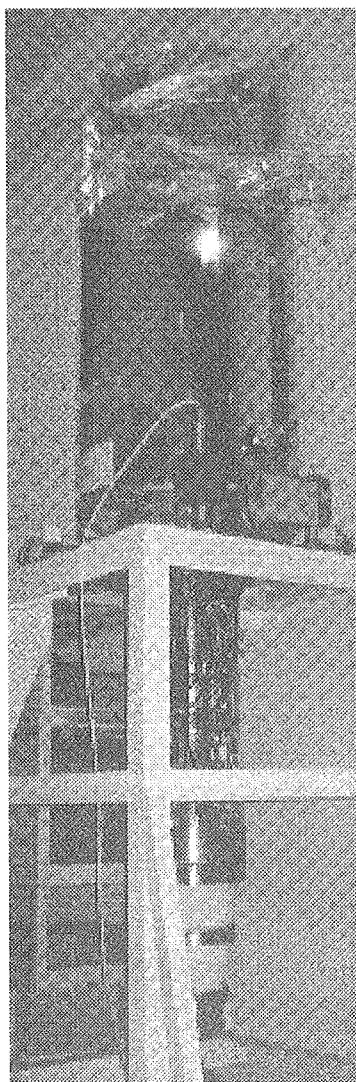


図2-5 クライストロン

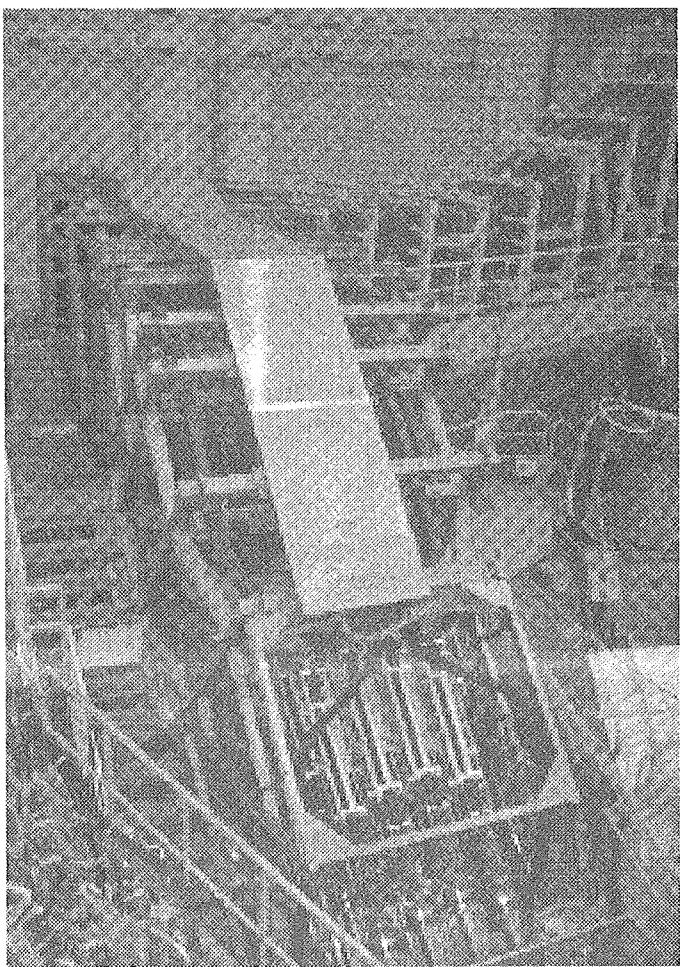


図2-6 伝送系導波管

2. 2 L H R F アンテナの特徴

L H R F アンテナとは、大電力高周波をプラズマへ入射する装置である。図 2-7 に J T - 60 U の P - 18 水平ポートに取付けられた L H R F アンテナの外形図を示す。P - 18 L H R F アンテナは 4 列 4 行の合計 16 本の導波管からなる。P - 18 L H R F アンテナを構成する導波管の材質はステンレスであり、高周波損失を低減するために、高周波が通過する表面に銅メッキを施している。高温のプラズマから保護するために、先端部には炭素製のガードリミッタをタイル状に取付けている。高周波電力は、大気と真空とを分ける真空窓を通り、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プラズマへ入射される。J T - 60 U 真空容器と L H R F アンテナの取合いにペローズを使うことにより、L H R F アンテナの前後方向の移動が可能である。L H R F アンテナとプラズマとの距離を変えて、プラズマとの結合状態を制御する。

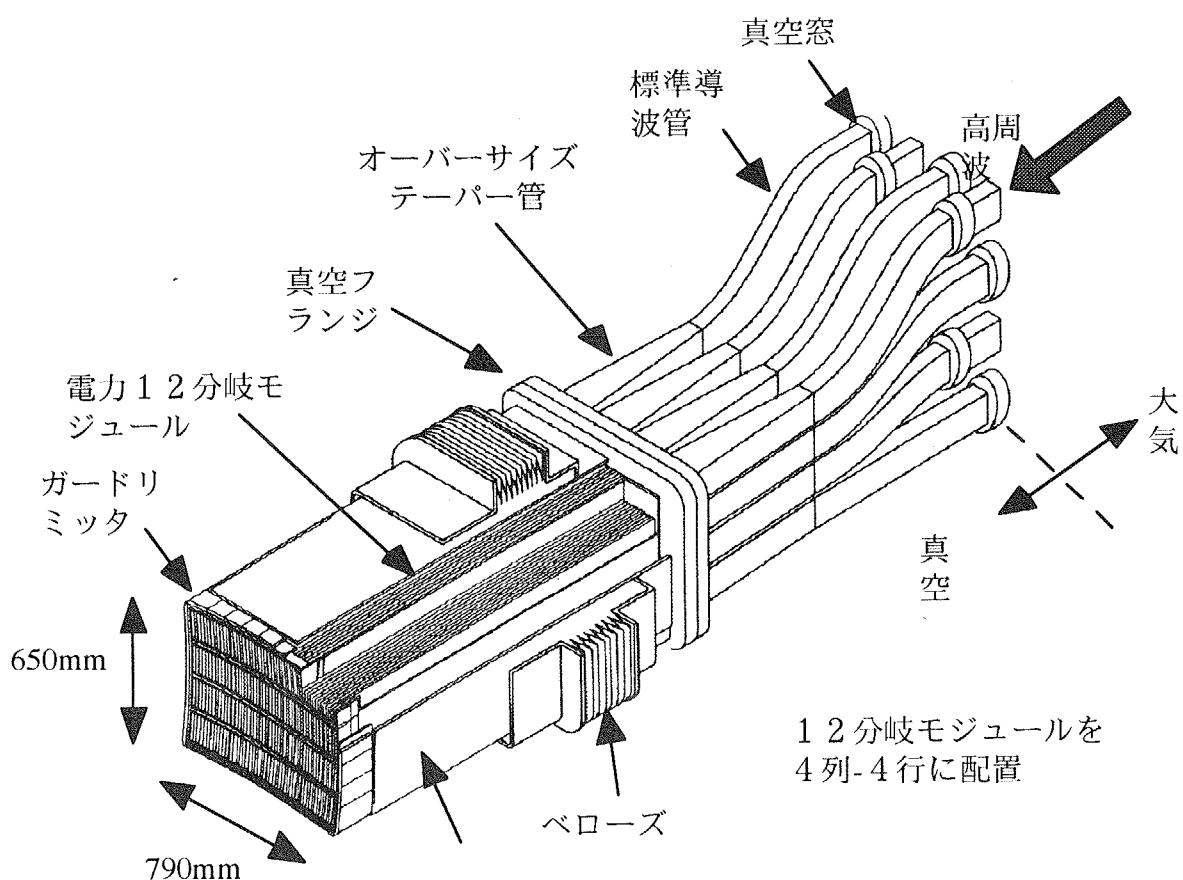


図 2-7 P - 18 L H R F アンテナの外形図

3. LHF 加熱装置の運転

LHF 加熱装置は、入射実験に先立ち LHF アンテナのエージングを行なう必要がある。これは高周波放電の原因となる、微細な突起物や表面に吸着しているガスを、パワーを低い値から徐々に増加させたり間欠的に入射することなどにより取り除く。これにより、LHF アンテナの耐高周波電界性能を上げることができる。エージングは、できるだけ多くの高周波電力をプラズマへ入射することを目的とした調整運転である。

3. 1 LHF 入射システムの概要

LHF の制御システムは、信号変換器、タイミング制御板、真空入射制御パソコンから構成されている（付録 1, 2 参照）。LHF アンテナのエージングを行うには、真空入射制御 PC にて各種パラメーターの設定をする必要がある。パラメーター設定画面を図 3-1 に示す。まず初めに入射形態の選択を行なう。これはプラズマ入射か真空入射かの選択である。次に入射パワーの設定を行ない、さらにパルス幅の設定を行なう。LHF アンテナのエージングの初期には、LHF アンテナ先端部での放電が頻発するので、パルス幅と入射パワーを徐々に増やすことが重要である。またパワー変調を併用することにより、放電を抑えてエージングができるようになる。

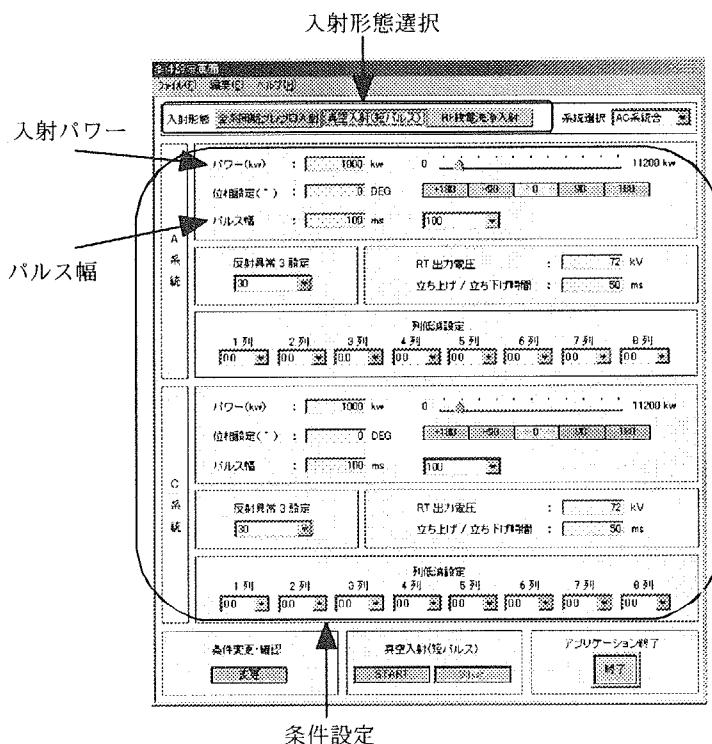


図 3-1 パラメーター設定画面

図3-2にパワー変調のシステムを示す。パワー変調の設定はファンクションジェネレーターを使用し、エージング中は必ずオシロスコープでパワーのon/offを確認する。パワー変調の時間設定は2～100msの範囲で行なう。付録3にLHF装置の運転方法を示す。

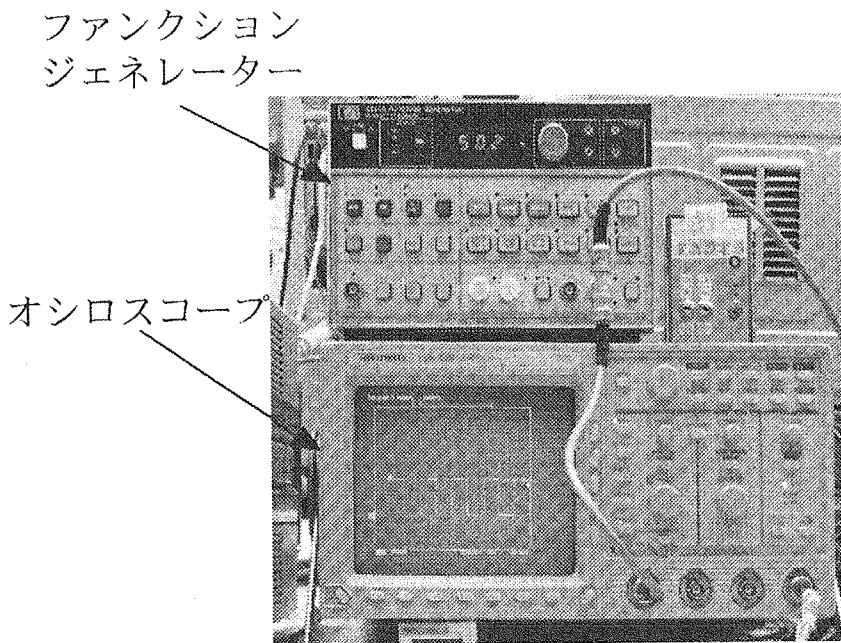


図3-2 パワー変調システム

3.2 LHFアンテナのエージング

エージングを進める方法で、これまでの経験から以下の方法が良いことが明らかになった。まずアンテナのダメージを避けて、短パルス(50～100ms)で高周波をアンテナから真空容器に入射していく。最初、パルス幅は短くして、パワーを高めていく(アンテナを構成する導波管内の電圧を高くすることに対応する)。高周波の伝送波形から、アンテナ内で放電が発生していないようであれば、パワーを増加させていく。放電が多発するようであれば、パワーを下げて、安定にパワーが伝送できるまで繰り返し同じパワーで入射をする。JT-60U真空容器への入射エネルギーが～2MJを超えないようにして、パワーを高め(1本のクライストロン当たり最大750kW程度)、次にパルス幅を伸ばして行く。なお、放電が顕著であれば、パワーを間欠的に制御する(パワーをon/offする)パワー変調を適用する。パワーのon/offはon時間が5msでデューティー50%から始めて、10ms程度まで伸ばしていく。このパワー変調は、放電を避けて、短時間でパワーを高める有効な方法である。図3-3に入射パワーの波形例を示す。(a)のエージング前の

状態では放電を起こしている。また入射パワーは乱れている。(b) のエージング後では、放電を起こさず入射され、パワーも安定に出力されている。このようなエージングを行なって、最大 8 MW の入射実績がある。しかし平成 10 年度に L H R F 加熱装置の一部が、電子サイクロトロン (E C) 加熱装置へと改造されたため、現在の入射レベルは 3 ~ 5 MW 程度である。

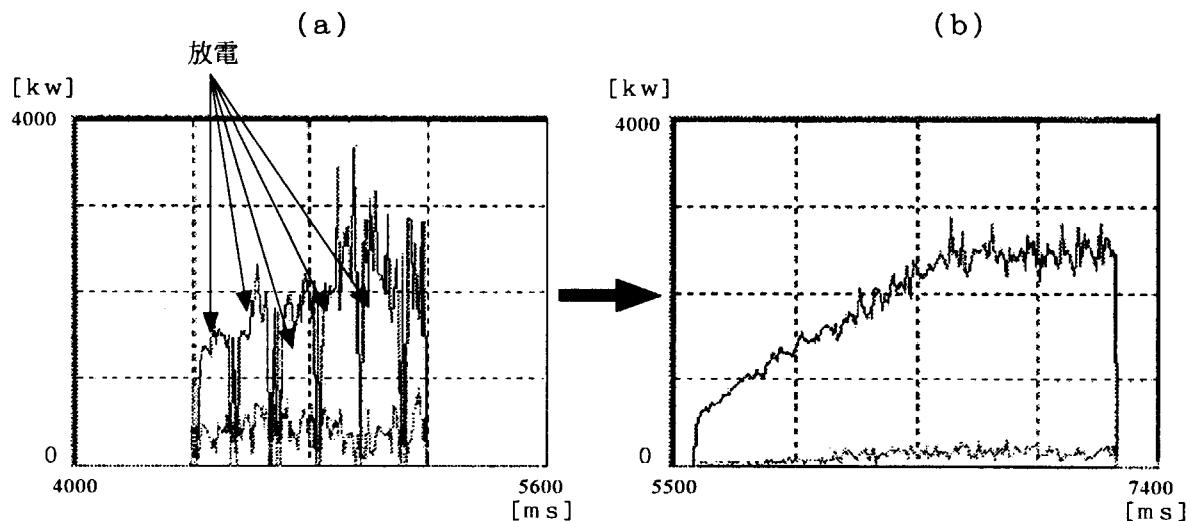


図 3-3 エージング前 (a) とエージング後 (b) の波形

4. L H R F アンテナの損傷からの保護

4. 1 L H R F アンテナ先端部の損傷

L H R F アンテナの使用環境は極めて厳しい。すなわち、プラズマに大電力高周波を入射するため、アンテナはプラズマに近接しており、高温のプラズマから多大な熱入力を被る可能性がある。また、プラズマは放電の種として作用し、大電力高周波の電界強度は充分に高いため、先端部の電界強度が高い部分で放電することが容易に想定される。現在使用している L H R F アンテナは平成 5 年度までに J T - 6 0 U に据え付け、すでに 10 年以上も運転している。各年度の定期点検時には、実際、L H R F アンテナの先端部にはかなりの激しい損傷が見られる。図 4-1 に L H R F アンテナ先端部の損傷を示す。先に記述した使用環境から、損傷の原因は、プラズマからの熱負荷、アンテナ先端部の高電界強度部分での放電であると推定される。

プラズマからの熱負荷は L H R F アンテナとプラズマとの距離で変化する。L H R F アンテナは通常 10 cm 程度プラズマとの距離をとって運転している。入射効率を上げようと (高

周波とプラズマの結合を良くし、反射を少なくしようと）すると、プラズマに近づけなければならず、プラズマからの熱負荷が大きくなる。一方、熱負荷を軽減するためにプラズマとの距離を大きくすると入射効率が低下する（反射が大きくなる）。したがって、損傷を抑えるために、L H R F アンテナとプラズマとの距離をいくらでも離せるわけではない。むしろ、熱負荷の被った状態で運転しなければならない。放電に関しても、大電力高周波入射を行う限り、回避することは困難である。そのために、アンテナ先端部の損傷をいかに小さくするかは、世界的にも共通認識された L H R F アンテナの最重要課題である。

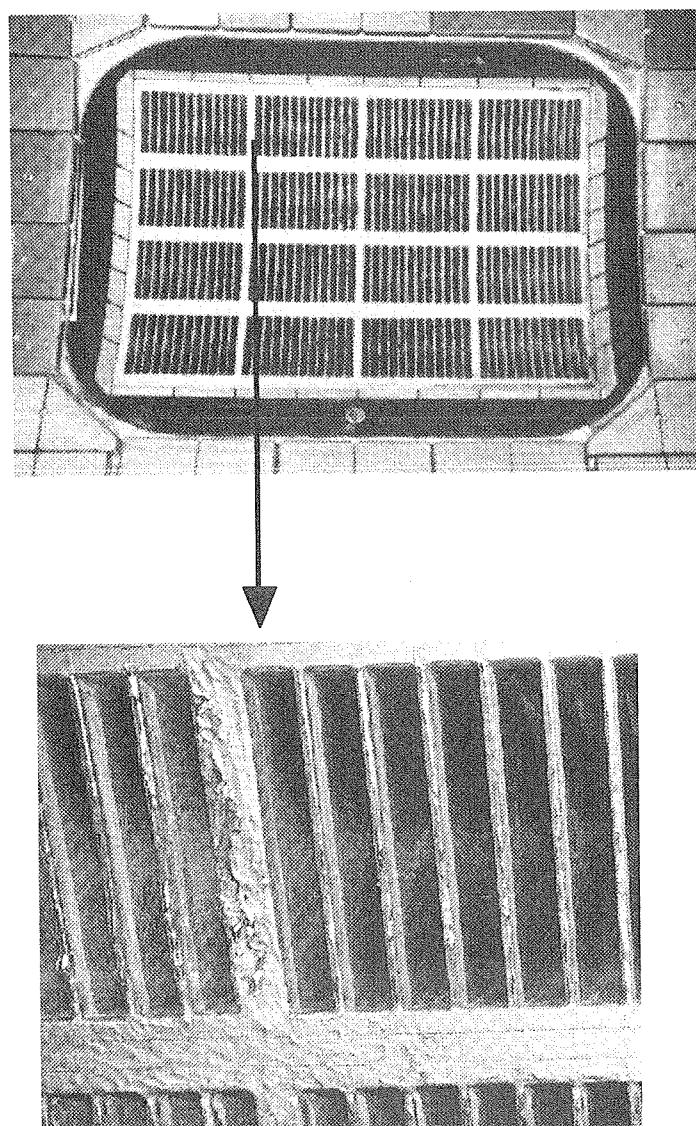


図 4-1 L H R F アンテナの損傷例

4. 2 LHFアンテナ先端部の補修

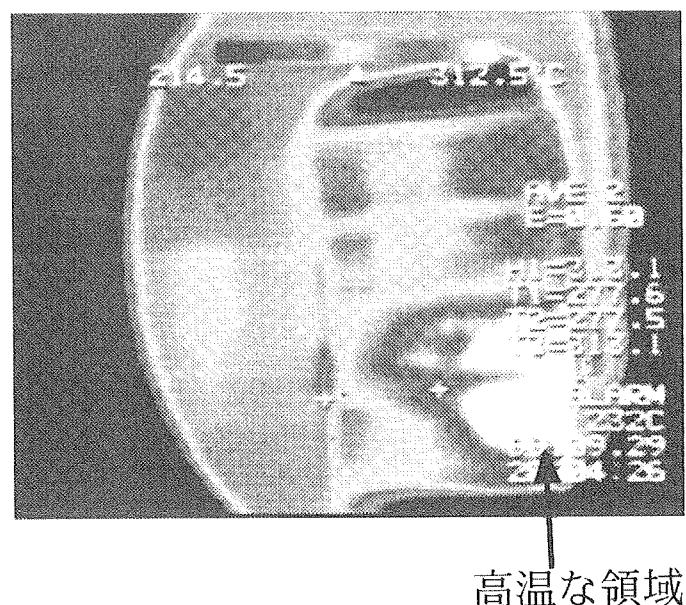
LHFランチャー先端部は、プラズマと面するためプラズマからの熱負荷により溶融する場合がある。そのため、JT-60U真空容器内に入り、溶融した先端部を成形し修復をしてきた。補修作業の方法は、始めにハンドグラインダーで溶融して小玉状に固着した物をおおまかに除去する。次に細部をヤスリでならし、サウンドペーパーで表面仕上げを行なう。これらは手作業で行なっている。しきり板の端部は、0.2~0.5 mm程度の丸みをつけ、角張った部分をなくし、電界集中を防止する。これは放電が発生しにくくするために行なう。平成13年度、平成14年度とこの2年間でアンテナ先端部の損傷は急速に進展している。電界強度が強い部分でしきり板が大きくえぐられ、そのえぐれ度は3~5 mmに達している。従来の補修作業は限界に近づきつつある。

4. 3 LHFアンテナ先端部の損傷防止対策

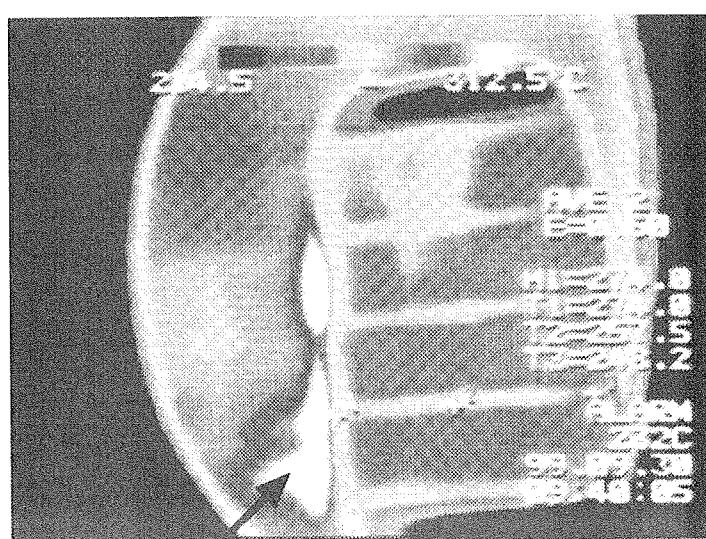
LHFアンテナ先端部の損傷を抑えるために、以下のような損傷防止対策を行なっている。

4. 3. 1 LHFアンテナ位置の調整による熱負荷軽減

LHFアンテナを前後に動かすことで、LHFアンテナ先端部を熱負荷から保護できる。図4-2に赤外線カメラで測定されたLHFアンテナの温度上昇がLHFアンテナの位置により変化することを示す。(a)のようにプラズマをJT-60第一壁から5 mmだけ離した場合、LHFアンテナ先端部では温度上昇が観測される。一方、(b)のように30 mm離した場合はLHFアンテナ先端部は温度上昇は見られない。LHFアンテナ位置を最適化することにより、熱負荷の軽減とプラズマとの結合がある程度両立できる。なおLHFアンテナの移動幅は、最大±50ミリでミリ単位での駆動が可能である。



(a) 第1壁～アンテナの位置 5 mm



高温な領域

(b) 第1壁～アンテナの位置 30 mm

図4-2 L H R F アンテナ位置による温度変化

4. 3. 2 溫度計測システムの概要

赤外線を用いた温度計測システムは図4-3に示すように、LHFアンテナ先端部を見る能够るように据付けなければならない。しかし、アンテナ先端部を直視的にみるとJT-60Uのプラズマから放射される中性子のために赤外線カメラが駄目になってしまふ。そこで、中性子に照射されないようにミラーを用いて光軸をコ字形にしている。さらに中性子シールドとして51mm厚のポリエチレンでカメラ本体を被っている。また赤外線カメラは、JT-60Uのトロイダル磁場コイルの近くに設置しなければならないため、磁気シールドが必要となる。磁気シールドとして16mm厚の鉄で覆っている。このシステムを用いて、LHFアンテナ先端部の温度分布を計測しながら、LHFアンテナの位置を変えることによってLHFアンテナの損傷を低減できるようになった。

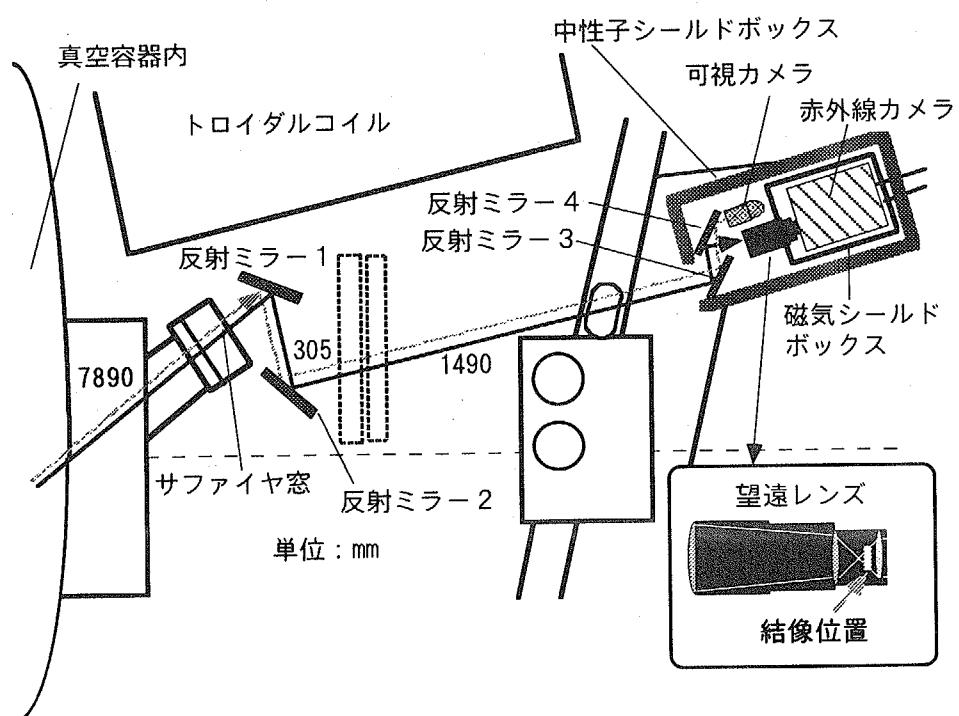
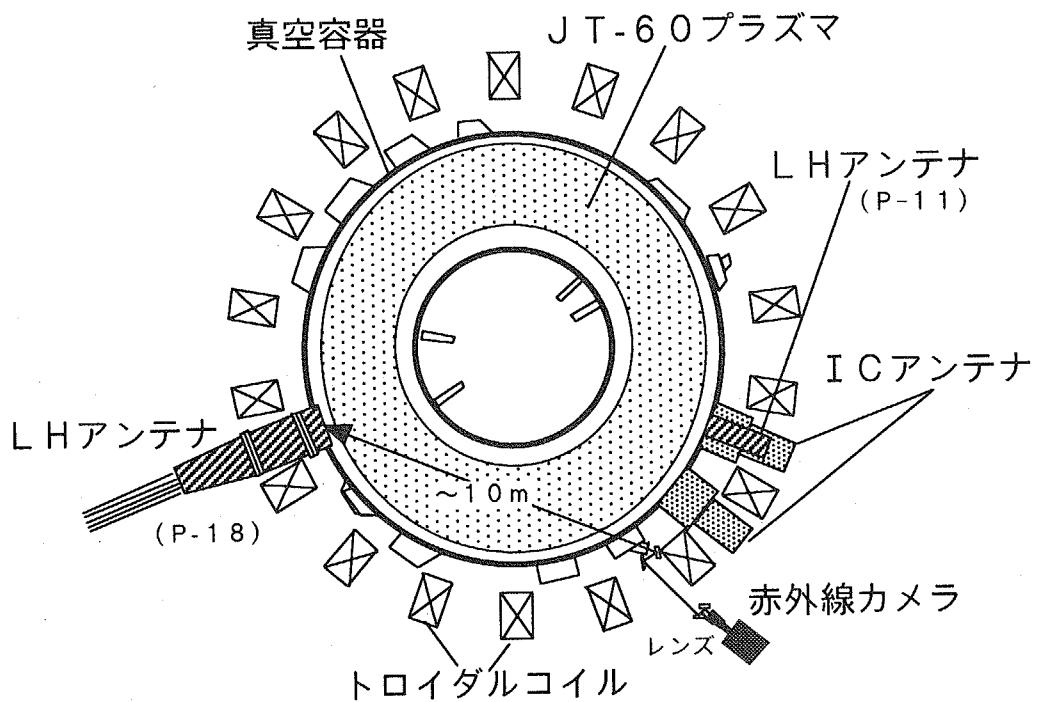


図4-3 赤外線モニタシステム

4. 3. 3 パワー変調での電流駆動法による放電対策

パワー変調（高周波パワーを入／切）することで、LH RFアンテナ先端部での高周波放電を抑えながら電流駆動が可能である。なぜなら高周波放電が発生しても入射の休止時間中に放電が収まるからである。よって、放電による過大な熱負荷には至らない。一方電流駆動を担う電子は、高周波パワーが入射されない時間が短時間であれば大きくその駆動効率が低下しない。従って、入／切時間で平均された高周波パワーで決まる電流が駆動される。図4-4にパワー変調中の入射波形図で示すように、パワー変調を利用して高周波放電を避けることができる。プラズマの条件は、プラズマ電流(I_p)が1.2 MA、トロイダル磁場(B_t)が3 Tである。図のようにLH RF入射がパワー変調中でも電流駆動が可能である。

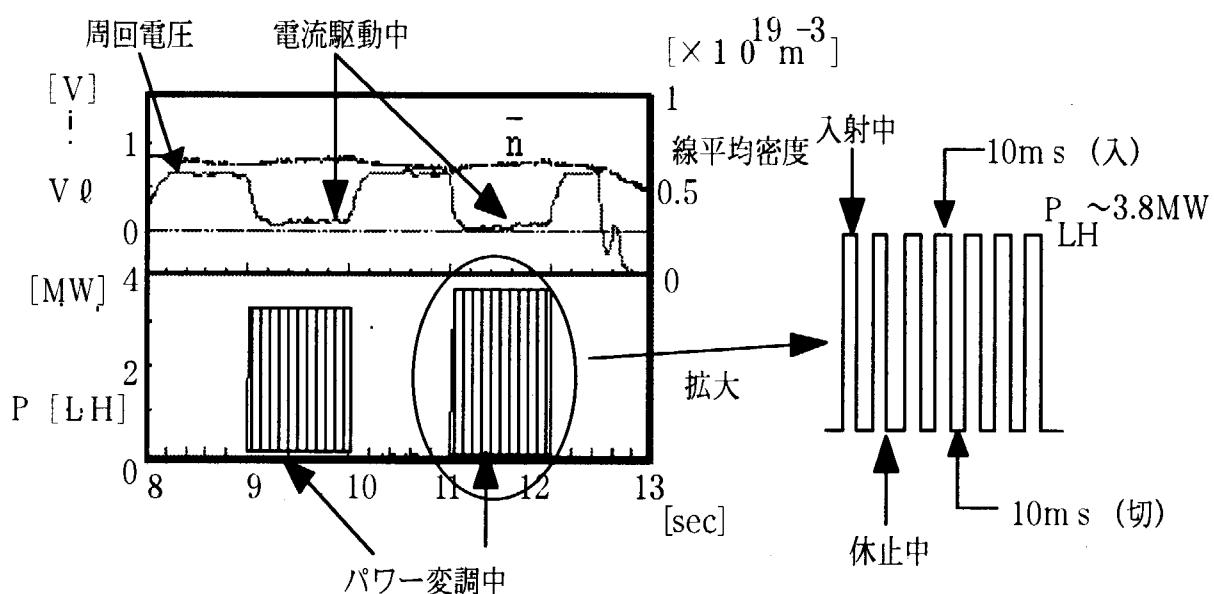


図4-4 パワー変調での入射波形図

4. 3. 4 アークセンサによる保護

高周波入射中にLH RFアンテナ先端部で強い放電（以下アーク）が発生することがある。この時にLH RFアンテナ先端部の温度が局所的に上昇し、LH RFアンテナ先端部が溶融する。アークは高周波の入射を続ける間は持続するため、入射を続けるとアンテナ先端部の溶融は致命的な損傷にまでいたる。このためアーク発生時には直ちに高周波の入射を停止する必要がある。

LH RFアンテナ先端部で発生した高周波放電の放電光を、LH RFアンテナ先端部ア-

クセンサによって検出し、瞬時に入射を停止することができる（ $\leq 10\text{ ms}$ 以内）アークセンサ保護システム（図4-5）を開発し実用化している。LHFアンテナ先端部での放電を検出すると 100 ms 間高周波を遮断する。さらに放電が引き続き発生した場合は、再び 100 ms 高周波を遮断するようになっている。このシステムによって、放電による熱負荷からLHFアンテナ先端部をかなり保護することが可能となった。

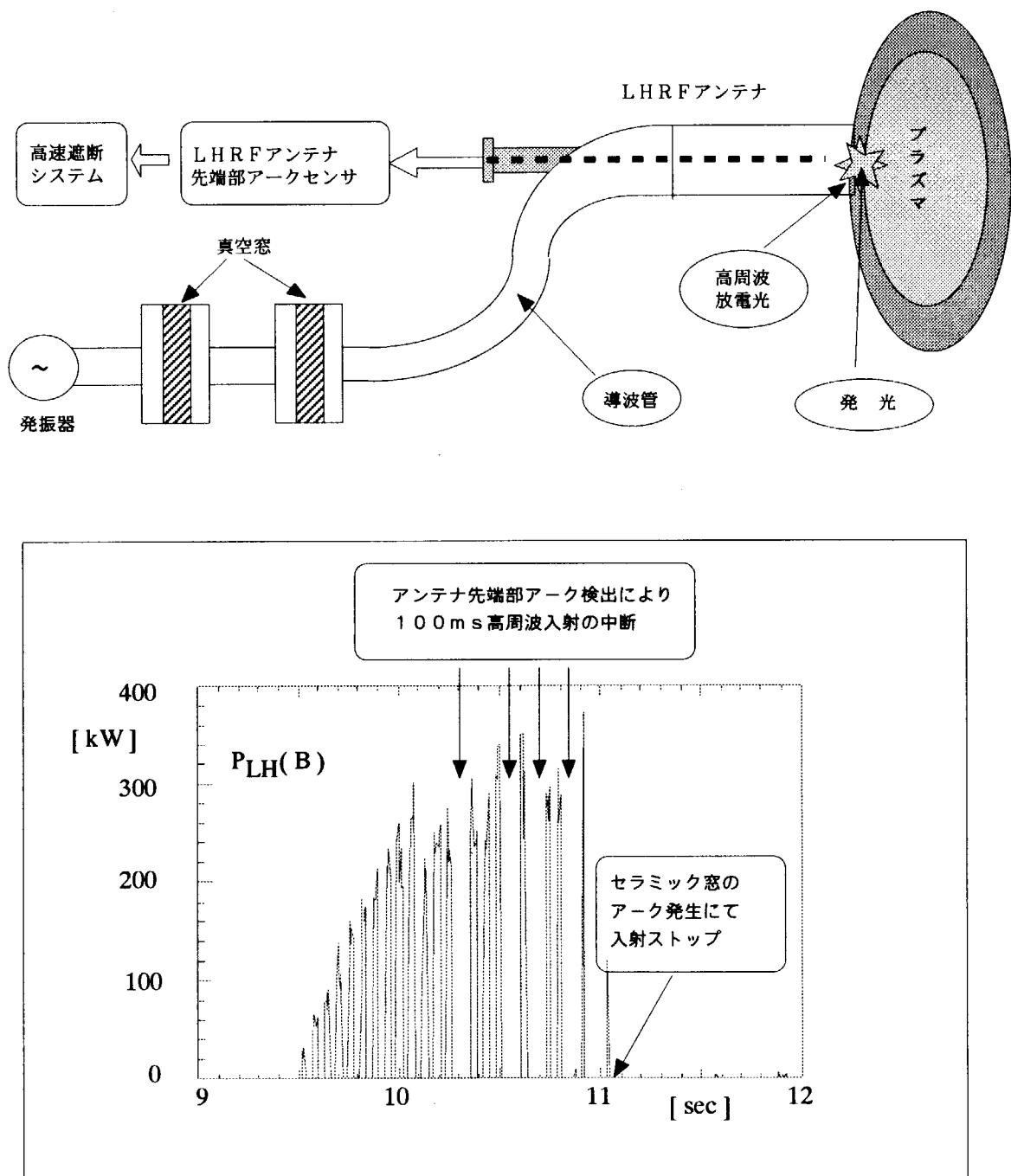


図4-5 アークセンサ保護システムと保護動作例

アーク検出信号の流れを図4-6に示す。光ファイバーで受光されたアーク光は、アーク計測盤アーク検出器に入力される。プラズマの光と区別するため高周波入射中にアーク検出器に一定以上の強度の光入力があると、アーク計測盤はORユニットから入射停止信号を出力するように設計した。

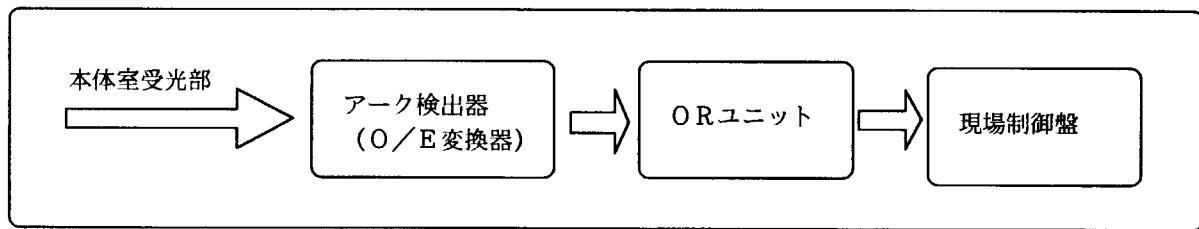


図4-6 アーク信号の流れ

5.まとめ

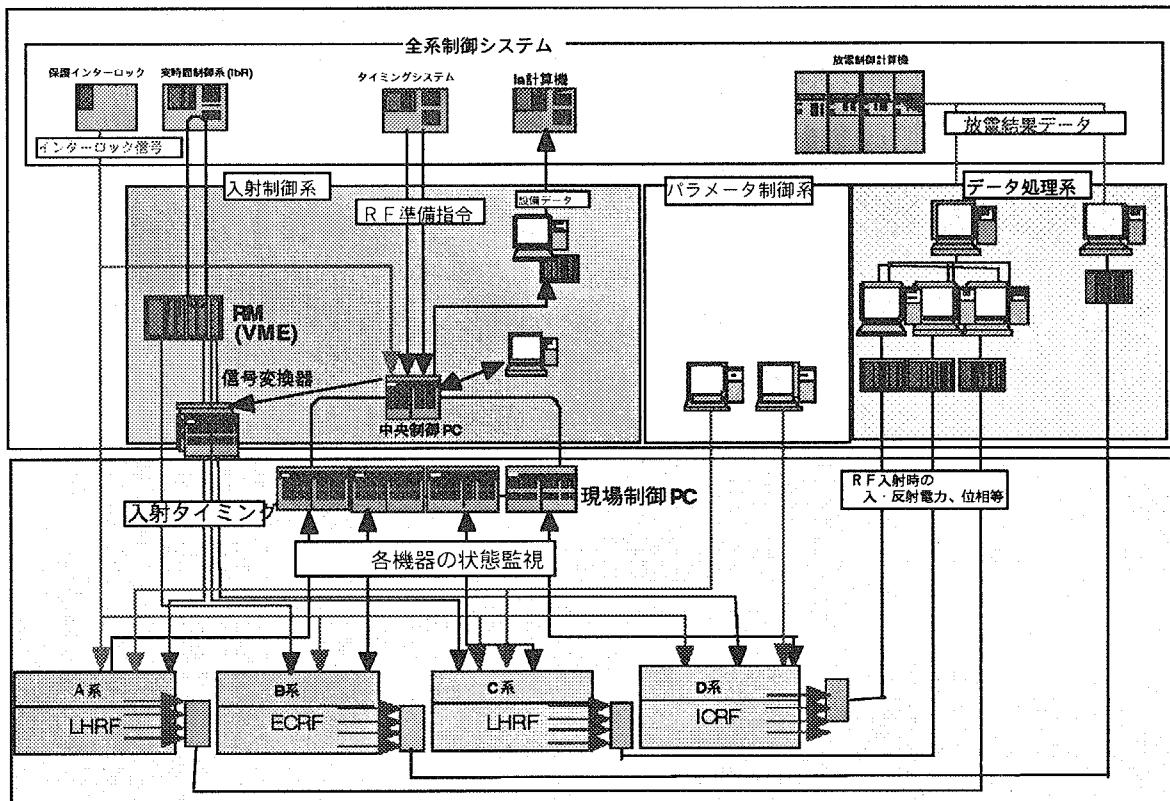
現在使用のLHFアンテナは平成5年度までに据付けされ、約10年以上にわたり運転してきた。運転中には、LHFアンテナへの過大な熱負荷を経験しLHFアンテナ先端部は相当の損傷を受けた。各年度の運転終了後に、先端部の補修を行なっているが耐高周波電界性能が劣化して、LHF入射パワーは徐々に減少してきた。アンテナ先端部の損傷はLHF加熱装置においては世界的に共通確認されている問題である。損傷防止対策として、LHFアンテナ位置の調整、赤外線カメラでの監視、パワー変調による電流駆動、アークセンサーによるパワー入射制御等を実現し、LHFアンテナの保護を行なってきた。さらに、今後は耐熱性に優れた炭素製のアンテナ先端部を開発し、JT-60UのLHFアンテナへの実用化を目指す。

謝辞

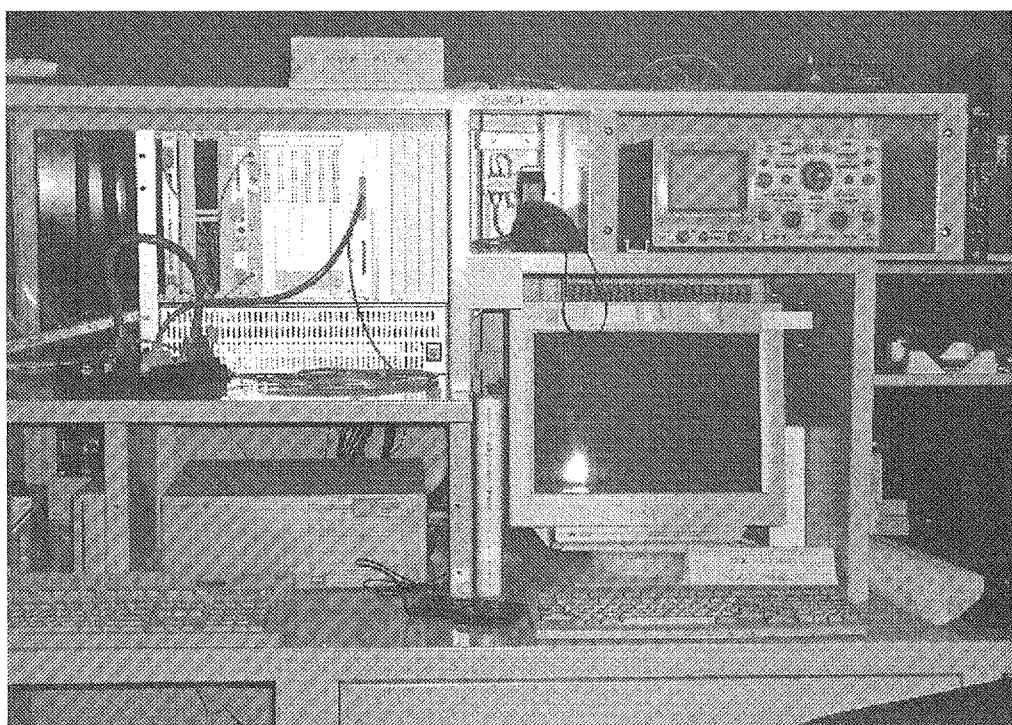
L H R F の運転及び保護システムをまとめるにあたり、終始御協力いただいたR F 装置試験室員の皆さまならびに有益な助言をいただいた藤井常幸R F 装置試験室室長に感謝いたします。

参考文献

- 1) Y. Ikeda, et al., Development and Operation of JT-60 LHRF Launchers, Plasma Devices and Operations ,Vol. 1, 155-181 (1991).
- 2) M.Seki, et al., Development and operation of the lower hybrid range of frequency system on JT-60U. FUSION SCIENCE AND TECHNOLOGY Vol.42 452 (2002).
- 3) Y. Ikeda, et al., Plasma-launcher interaction during lower hybrid current drive and heating on JT-60, Journal of Nuclear Materials Vol. 176&177, 306-310 (1990).
- 4) O. Naito, et al., Launcher heat load on high power LHCD experiments in JT-60U. Journal of Nuclear Materials Vol. 220-222, 425-428 (1990).
- 5) 篠崎信一 : JAERI-Tech 2003-032, “JT-60U高周波加熱装置制御システムの改良” (2003).

付録1 制御システム図⁵⁾

付録2 制御システム（タイミング制御板）



付録3 L H R F 加熱装置の運転方法

1. 立上げ（真空入射）

1. 1 準備

- ・計測系（オシロ、赤外カメラ、可視かめら、ビデオ等）の確認・・・・班員へ。
- ・アークセンサー（c/w, 先端部）の確認 ・・・・・・・・班員へ。
- ・パワー調整（手動ストップ）の電源ONと動作の確認。
- ・パワーが測れているか、オシロをチェック。

1. 2 真空入射エージング

A系：周波数=2 G H z, 位相差=0～360°, 設定パワー=800 kW, 設定パルス幅=30 m s からスタート。

- ・L H R F アンテナ位置 L H R F ポート方向へ5 mm の位置。
- ・反射異常3のレベル 100kW
- ・入射時間 1500kW - 1s (最大で) 徐々に伸ばす。
- ・入射パワー 3000kW - 100m s (最高で) だんだんに高くする。
- ・位相0°～360°の中をいくつか選択(例えば、0°・90°・180° 270°)

C系：周波数=2 G H z, 位相差=0～360°、設定パワー=800 kW, 設定パルス幅50 m s からスタート

- ・LHFアンテナ位置 LHFポート方向へ5mmの位置。
- ・反射異常3のレベル 100kW
- ・入射時間 1400kW - 1s (最大で) 徐々に伸ばす。
- ・入射パワー 2500kW - 50ms (最高で) だんだんに高くする。
- ・位相0° ~ 360°の中をいくつか選択(例えば、0°・90°・180° 270°)

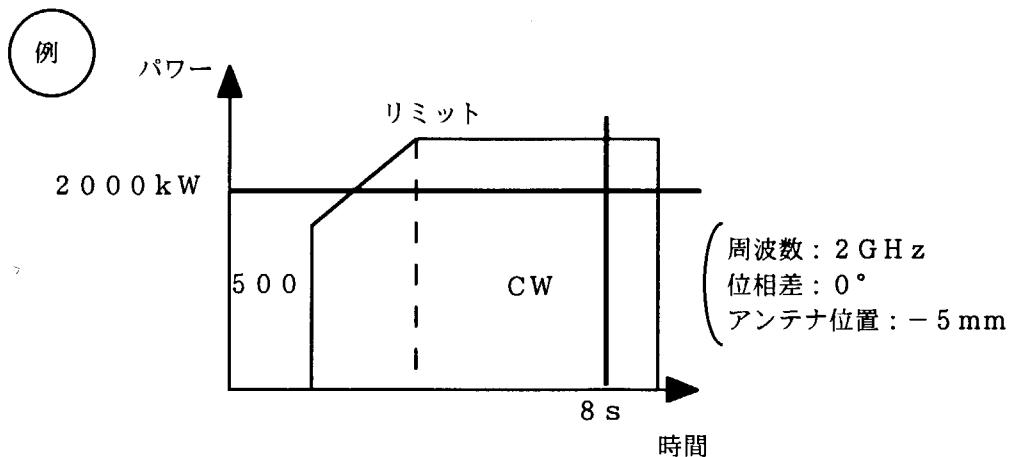
1. 3 注意

- ・JT-60U真空容器の大気ペント後や日々の運転では、最初パワー変調を用いてエージングを行なう。
- ・パワー変調(2ms-デューティー50%)で、パワーを高くする。100msで2000kW以上へ。
- ・パルス幅を500ms程度へ伸ばし、パワー変調のパルス幅も~100msへ長くしていく。
- ・ただし、一度エージングできていれば、プラズマショット前に1000kW-100msを数ショット入射すれば良い。

2. プラズマ入射

2. 1 LHF側にて設定するパラメーター

- ・周波数：固定、入射パワーの上限(プレプロは全系制御設備にて設定)、パルス幅・エネルギーの上限・位相(プレプロは全系制御設備にて設定)、タイミング(プレプロは全系制御設備にて設定)、パワー変調あるいは連続(CW)、アンテナ位置。

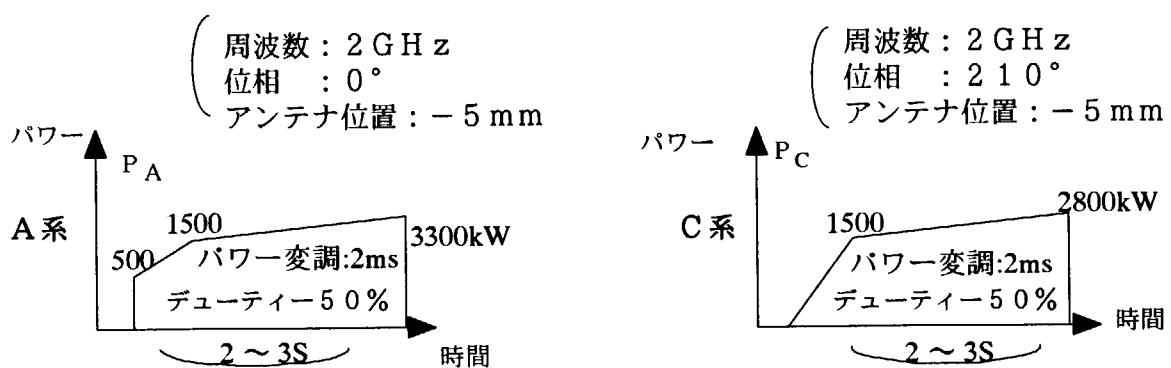


収集するデータ。

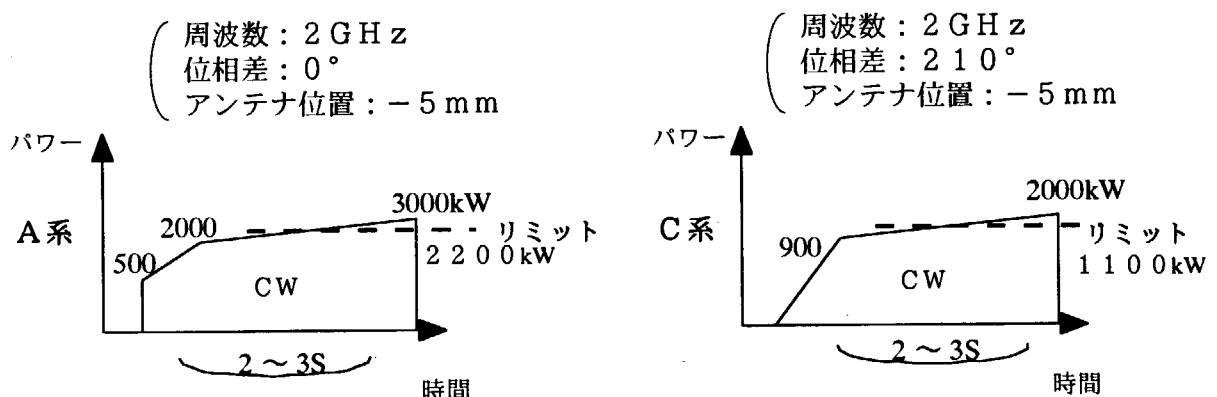
- ・ショトサマリ（入射波・反射波）

2. 2 エージング

- ・ひさびさのRF入射時はパワー変調入射を行なう。



- ・前日にプラズマ入射を行なっている場合は連続(CW)入射からでよい。



2. 3実験

プラズマ	最大設定パワー・入射時間		アンテナ位置		予想反射率	
	A系	C系	A系	C系	A系	C系
正シア プラズマ	~2500kW × 3s	~1800kW × 3s	- 5 mm	- 5 mm	~ 5 %	~ 20 %
負シア プラズマ	~2000kW × 3s	~1300kW × 3s	- 11 mm	- 13 mm	~ 5 %	~ 23 %
大体積 プラズマ	—	—	≥ - 30 mm	≥ - 30 mm	×	×

3. 運転上の注意

- 実験を行うショット間において真空入射を行ない L H R F アンテナや、クライストロンの状態を準備しておくこと。
 - A系 周波数: 2GHz, 位相差: 0°, 入射設定: 1000kw × 100ms CW (位相は順次変える)
 - C系 同上
- CW入射の時 (特に負シアプラズマ時) は、L H R F アンテナ先端部での放電が発生しやすいので、可視カメラや赤外カメラで監視を行う。異常な放電と思われる場合にはパワー変調器に付いている「手動R F入射切り」スイッチを押す (押している間だけRFは「切」となる)
- 真空窓でのアーク放電が多発あるいは連続した場合は、パワー変調入射を行う。
- アンテナ先端でのアーク放電が多発した場合は
 - プラズマの位置の確認 (接触)。
 - 入射パワーのダウン (-300kW)。
- 反射異常3が多発した場合
 - プラズマ位置のチェック (離れすぎていないか?)。
 - I/Lレベルを上げる。
 - 発生する列のパワーを下げる (-2 dB)
- クライストロンのパワーが出ない場合は
 - チューナーの再設定。
 - S Gの確認を行う。

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/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·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トントン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

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

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

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10^{18}	エクサ	E
10^{15}	ペタ	P
10^{12}	テラ	T
10^9	ギガ	G
10^6	メガ	M
10^3	キロ	k
10^2	ヘクト	h
10^1	デカ	da
10^{-1}	デシ	d
10^{-2}	センチ	c
10^{-3}	ミリ	m
10^{-6}	マイクロ	μ
10^{-9}	ナノ	n
10^{-12}	ピコ	p
10^{-15}	フェムト	f
10^{-18}	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1 eVおよび1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC関係理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バーン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラッド	rad
レム	rem

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

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

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

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

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

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

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

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

換算表

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

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

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad	照射線量	C/kg	R	線量当量	Sv	rem
	1	2.70270×10^{-11}		1	100		1	3876		100	
	3.7×10^{10}	1		0.01	1		2.58×10^{-4}	1		0.01	1

(86年12月26日現在)

R100
古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています