

JAERI-Tech
98-006

JAERI-Tech--98-006



JP9806010



JT-60 I CRF アンテナの健全性と
表面温度計測の開発

1998年3月

平内慎一・横倉賢治・森山伸一・佐藤臣夫・石井和宏・藤井常幸

29-33

①

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。
入手の問い合わせは、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、お申し越してください。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おこなっております。

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, 1998

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 日立高速印刷株式会社

JT-60ICRF アンテナの健全性と表面温度計測の開発

日本原子力研究所那珂研究所核融合装置試験部

平内 慎一・横倉 賢治・森山 伸一

佐藤 臣夫・石井 和宏・藤井 常幸⁺

(1998年2月12日受理)

JT-60におけるイオンサイクロトロン周波数帯 (ICRF) 加熱では、2基のアンテナを用いてプラズマに100MHz帯の大電力高周波を結合させ、共鳴するイオンを加速することでプラズマ加熱を行う。アンテナは、高温のプラズマから近い位置に設置されるため、非常に過酷な条件下に置かれている。そのため ICRF アンテナでは、プラズマ粒子の衝突によると思われる表面の溶融が問題になっており、その原因解明が重要な課題となっている。この損傷の原因、機構を明らかにし、熱負荷の小さい運転条件を追究し、アンテナの健全性維持を目的で、赤外線熱画像装置を用いた「ICRF アンテナ表面温度計測装置」を開発した。これを利用し、温度計測を行い損傷を最小限に抑える運転が可能になってきた。

The Healthiness of JT-60 ICRF Antenna and
Development of its Temperature Measurement Device

Shinichi HIRANAI, Kenji YOKOKURA, Shinichi MORIYAMA,
Tomio SATO, Kazuhiro ISHII and Tsuneyuki FUJII*

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

(Received February 12, 1998)

Ion Cyclotron Range of Frequency (ICRF) heating system in JT-60 employs two antennas to couple RF power in the range of 100 MHz to the plasma. The antennas are installed in the vacuum vessel of JT-60, facing to the high temperature plasma. Due to the severe heat load from the plasma, parts of the antenna surface are suffering from melt. It is important to investigate the mechanism of the heat load and the melting. "Temperature measurement for ICRF antenna surface" employing an infrared thermographic camera has been developed, in order to investigate the heat load to the antenna and to maintain the antenna available. We have succeeded in minimizing the malting damage of the antenna surface using the temperature measurement device.

Keywords: JT-60, ICRF Heating System, Antenna, Temperature Measurement Device

* Office of Planning

目 次

1. はじめに	1
2. JT-60ICRF加熱装置	1
2.1 ICRF加熱装置の概要	1
2.2 ICRFアンテナの概要	2
3. ICRFアンテナ（ファラデーシールド）の損傷	2
3.1 ファラデーシールド損傷の評価	3
3.2 ICRFアンテナの結合特性	4
3.3 ファラデーシールドの損傷対策	6
4. ICRFアンテナ表面温度計測の開発	6
4.1 ICRFアンテナ表面温度計測装置	6
4.2 赤外線熱画像装置	7
4.3 光学系	7
4.4 シールドボックス	8
5. ICRFアンテナ表面温度計測	8
5.1 温度計測	8
5.2 計測成果	9
6. まとめ	10
謝 辞	10
参考文献	11

Contents

1 .	Introduction	1
2 .	JT-60 ICRF Heating System	1
2.1	Outline of the ICRF Heating System	1
2.2	ICRF Antenna	2
3 .	Damage on Feed through of the Antenna	2
3.1	Analysis of the Damage	3
3.2	Antenna Coupling Property	4
3.3	Protections for the Faraday Shield from the Heat Load	6
4 .	Development of "Temperature Measurement for ICRF Antenna Surface"	6
4.1	Outline of the Temperature Measurement Device	6
4.2	Infrared Thermographic Camera	7
4.3	Optical Geometry	7
4.4	Shield Box	8
5 .	Antenna Temperature Measurement	8
5.1	Results of the Measurement	8
5.2	Application of the Measurement	9
6 .	Concluding Remarks	10
	Acknowledgment	10
	References	11

1. はじめに

臨界プラズマ実験装置 J T - 6 0 では、効率の良い核融合反応に必要な、高温高密度プラズマを生成するために、高周波加熱装置及び、中性粒子入射加熱装置を用いている。イオンサイクロトロン周波数帯 (I C R F) の高周波を使用した高周波加熱装置は、効果的に効率良くプラズマ加熱する装置である。 I C R F 加熱では、2基のアンテナを用いてプラズマに 1 0 0 MHz 帯の大電力高周波を結合させ、共鳴するイオンを加速することでプラズマ加熱を行う。

アンテナは、高温のプラズマから近い位置に設置されるため、プラズマからの粒子や熱にさらされる非常に過酷な条件下に置かれる。実際、 J T - 6 0 I C R F 加熱装置のアンテナでは、粒子の衝突によると思われる表面の溶融が問題になっており、その原因解明が重要な課題となっている。損傷の原因、機構を明らかにし、熱負荷の小さい運転条件を追究し、アンテナの健全性を維持する目的で、赤外線熱画像装置を用いた「 I C R F アンテナ表面温度計測装置」を開発した。

2. J T - 6 0 I C R F 加熱装置¹⁾

2. 1 I C R F 加熱装置の概要

第 1 図に J T - 6 0 における I C R F 加熱装置の概念図を示す。図に示すように、 I C R F 加熱装置は主に、電源設備、励振増幅系、大電力増幅系、伝送系、結合系、制御設備、冷却設備で構成されており、その他に、 N 2 ガス加熱冷却設備、 S F 6 絶縁ガス循環設備、ダミー負荷設備、差動真空排気設備がある。

第 2 図に I C R F 加熱装置の高周波系概略図を示す。 I C R F 加熱装置^{2,3)}は、 J T - 6 0 の水平ポートに 2 基のアンテナを備えている。高周波系は、アンテナ・結合系、伝送系、大電力増幅系及び、励振増幅系から成り、結合系、伝送系、大

電力増幅系は、8系列から構成される。1基のアンテナには、4系列の高周波系によって、高周波電力が供給され、各系列の高周波電力及び位相差は、フィードバック制御によって、調整される。大電力増幅系は、4段増幅によって最大8 MWの高周波電力を発生し、結合系における大電力移相器及びスタブ整合器を介して大電力高周波をアンテナに供給する。

2. 2 ICRFアンテナの概要

第3図にICRFアンテナの鳥瞰図を示す。ICRFアンテナは、2段2列の位相制御型ループアンテナである。アンテナ導体、同軸管、ファラデーシールド、アンテナケーシング、フィードスルー等で構成される。真空窓であるフィードスルーは、安全のため各系列毎に2段になっている。通常は、アンテナ側の第1段フィードスルーの伝送系側までSF₆絶縁ガスを循環させているが、第1段フィードスルーが損傷し、真空リークが発生した場合でも第1段と第2段のフィードスルーの間を差動真空排気して実験を継続出来る構造としている。

アンテナの役割は、アンテナ導体に高周波電流を流すことによって、プラズマに高周波電力を効率良く結合させることである。アンテナ導体前面に取り付けられた複数のパイプは、ファラデーシールドと呼ばれ、外径15mmのインコネルパイプに銅メッキを施した構造で、中空部には冷却のためのN₂ガスを流している。このファラデーシールドは、プラズマ粒子からアンテナ導体を守ること、プラズマ加熱に有害な高周波電界を打ち消すことの2つの目的から取り付けられている。

3. ICRFアンテナ（ファラデーシールド）の損傷

アンテナ導体前面に取付けられたファラデーシールドはプラズマから数cmの位置にあり、プラズマからの粒子によって損傷する問題が生じている。

損傷する原因として、ICRFで加速されたイオンのうち、閉じ込めの良くない一部のイオンがファラデーシールドに衝突することが考えられている。ICRFアンテナは、トロイダルコイル間の磁場がやや弱くなっている場所に設置されているため、アンテナがプラズマ表面に近すぎるとイオンが衝突しやすく、熱流束が増加する。しかし、大きく離れると、ICRFの高周波電力がプラズマに結合しにくくなるので、アンテナとプラズマの距離を、いくらでも大きく出来るわけではない。したがって大電力ICRF加熱をアンテナとプラズマ表面が近い条件で行うと、このイオンの衝突によってファラデーシールドの温度が上昇して溶融に至る。

第4図にICRFアンテナの損傷状態を示す。溶融の大きいのは、ファラデーシールドのごく限られた部分であり、その位置は2基のアンテナともプラズマ側から見て右下の部分に局在している。

3. 1 ファラデーシールド損傷の評価

(a) ファラデーシールドへの熱流束

ファラデーシールドの溶融部分の体積、インコネルの融点等から熱流束の大きさを見積もった。

$$\begin{aligned} \text{溶融部分の体積} &: 1.6 \text{ cm} \times 2.0 \text{ cm} \times 0.1 \text{ cm} \times 4 \text{ 本} = 1.3 \text{ cm}^3 \\ &= 1.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \end{aligned}$$

1秒間、断熱加熱されたと仮定する。

$$Q = \Delta T \{ (4.19 \cdot c \cdot \gamma \cdot V) / t \} \dots (3-1)$$

Q : 入熱 [kW]、 ΔT : 温度上昇 [°C]、t : 入熱時間 [sec]、

c : 比熱 [kcal/kg·°C]、 γ : 比重 [kg/m³]、V : 体積 [m³]

ファラデーシールド（インコネル）の融点：約 1400℃、
アンテナ定常温度：約 300℃

各値を（3-1）式に代入する。

$$Q = (1400 - 300) \times \frac{4.19 \times 0.098 \times 8440 \times 1.3 \times 10^{-6}}{1} = 4.9 \text{ [kW]}$$

熱流束は、約 5kWと推測される。これは、アンテナを用いてプラズマに結合する高周波電力に比べると 1 / 1000 程度であるが、断熱的、局所的に熱が集中するため、溶融に至ったと考えられる。

（b）ファラデーシールド損傷位置に関する考察

第5図にアンテナの損傷位置関係図を示す。損傷箇所が局在している理由については、以下の可能性が考えられる。

プラズマ中の荷電粒子^{4,5)}は、磁力線に巻付いて運動しているが、磁場が均一でない場合、磁力線と磁場強度Bの変化方向 ∇B の両方に垂直な方向に、その旋回中心がドリフトする（ ∇B ドリフト）。ICRFアンテナは、2つのトロイダルコイルの間にあるため、 ∇B は、トロイダルコイル間の磁場減少効果を含めて考える必要がある。ICRFアンテナ前面におけるイオンの ∇B ドリフトの方向を考えると、図に示すように斜下向きになる。したがって、ファラデーシールド損傷の大きい位置が水平面より下で、向かって右側に局在することになる。

3.2 ICRFアンテナの結合特性

アンテナの過大熱流束による損傷を避けるためには、プラズマからの熱負荷を小さくすれば良いので、アンテナとプラズマ表面との距離を大きくすれば良い。しかし、この距離を大きくすると、高周波電力がプラズマに結合しにくくなる

いう問題がある。

プラズマとの結合の良否を評価する量として、アンテナ結合抵抗 R_c が用いられている。

$$R_c = 2 P (Z_0 / V_{max})^2 \dots (3-2)$$

Z_0 : 伝送ラインの特性インピーダンス (= 50 Ω)、

V_{max} : 伝送ライン上の定在波の最大電圧、

P : 結合電力

R_c が高い程効率良くプラズマ中に波を励起出来る。 R_c が低い場合は、 V_{max} が高くなりアンテナを含む伝送ラインの耐電圧で入射電力が制限される。

第6図にICRFアンテナ結合抵抗の測定値を示す。縦軸に結合抵抗、横軸にアンテナとプラズマ表面の距離を示す。アンテナとプラズマ表面の距離が短い程アンテナの結合抵抗が高くなるのが分かる。

(3-2) 式を変換した次式により、ある結合抵抗の値に対する結合可能最大電力が求められる。

$$P = R_c \cdot V_{max}^2 / 2 Z_0^2 \dots (3-3)$$

第7図にICRF入射電力の限界をグラフに示す。縦軸に結合可能電力、横軸にアンテナとプラズマ表面の距離を示す。アンテナとプラズマ表面の距離が、10 cm以上の場合でも大電力高周波の結合は可能であるが、結合可能な最大電力は距離により限界が生じてくる。

3. 3 ファラデーシールドの損傷対策

損傷部分をさらなる熱負荷から守るため、保護板、保護リングの取付を行った。

第8図に保護板、保護リングの取付図を示す。取付けた保護板、保護リング自体が溶融することによって、ファラデーシールドにおける損傷の進行を防ぐことが出来た。

第9図に保護板、保護リングの損傷状態を示す。溶融した部分は、マイクログラインダーを用いて突起等を取り除き補修しているが、保護板、保護リングの溶融は運転を重ねるごとに進行し、保護の効果が徐々に小さくなって行くことが予想される。又、保護板、保護リングの交換又は追加は、溶接作業を伴うため、ファラデーシールドの損傷を進行させることにもなりかねない。このように、保護板、保護リングによる保護には限界があり、熱負荷自体を低く抑えて運転することが必要である。そこで、アンテナ表面の温度を直視できる計測装置を開発し、アンテナ表面、特にファラデーシールドの温度監視をしながら運転する対策をとることにした。

4. ICRFアンテナ表面温度計測の開発

4. 1 ICRFアンテナ表面温度計測装置

第10、11図にICRFアンテナ表面温度計測装置の概要を示す。アンテナ表面温度計測装置は、光学系と赤外線熱画像装置本体及びシールドボックスから構成される。

JT-60の監視窓からアンテナまでの6m、赤外線熱画像装置から監視窓までの2mと距離があるため、光学系を介してアンテナ温度を赤外線熱画像装置に取り込んでいる。中央制御室から赤外線熱画像装置を制御し、CRTでの監視、ビデオシステムで画像を自動録画する。総合性能は、以下の通りである。

・総合性能

温度測定範囲：300℃～1500℃

測定距離：約7～8m

測定視野範囲：縦2,200mm×横2,500mm 以上

制御：中央制御室より遠隔制御が可能

4.2 赤外線熱画像装置

赤外線熱画像装置は、日本アビオニクス製で単体性能は、以下の通りである。

・単体性能

視野範囲：縦13.5°×横18°

瞬時視野角：3 mrad

測定距離：30cm～∞

電源：AC100V

使用環境条件：温度：0～40℃

：湿度：90%以下

：振動：1G、10～150Hz

：衝撃：5G、30msec

4.3 光学系

光学系は、2枚のレンズと、3枚の反射ミラーで構成されている。レンズとミラーは、赤外線熱画像装置とJT-60監視窓の間に設置し、ICRFアンテナから放射される赤外線を赤外線熱画像装置に集光させる。又、アンテナ部の視野を赤外線熱画像装置の視野範囲内に変換する。材質は、レンズは光学シリコンを使用し、反射ミラーは、光学ガラスの全反射ミラーと、監視窓手前は、石英のハーフミラーを使用している。

4. 4 シールドボックス

アンテナ表面温度計測装置の設備環境には、JT-60での強磁場や、プラズマからのX線、中性子の影響があり、赤外線熱画像装置の電子回路等に異常が発生する恐れがある。これらの問題を解決するため、シールドボックスを開発した。

第12図にシールドボックスの構造図を示す。シールドボックスは、磁力線、中性子、X線を減衰させるシールド材を重ね合わせる構造としている。耐磁気用の電磁軟鉄、耐放射線用の鉛、耐中性子用のポリエチレン、その他に機械的強度を高めるための、ステンレスも重ね合わせてある。総重量は、170kgであり、赤外線熱画像装置は、シールドボックスに収納し、中性子が直接赤外線熱画像装置に入射しないよう工夫を施した。また、運転中はJT-60の強力な磁場で、シールドボックス全体に力を受けるので固定を強固にしてある。

5. ICRFアンテナ表面温度計測

5. 1 温度計測

開発した本計測装置を用いてICRFアンテナのファラデーシールド部の温度変化を観測した。アンテナの温度上昇が大きいのは、JT-60のプラズマに対し大電力、長パルスの高周波を入射した時で且つ、アンテナとプラズマ表面が接近したときである。このような場合、最もアンテナにとって過酷な条件となる。ここでは、アンテナに損傷の生じる熱負荷条件と許容できる熱負荷条件の2通りの実例を示す。

第13図にICRFの高周波を入射した時のアンテナ温度の時間経過を示す。プラズマ条件は、プラズマ電流2MA、トロイダル磁場3.97Tである。実際には、各時刻におけるアンテナ表面温度分布の計測結果(第14-1、-2図)における損傷の大きい位置から読み取った温度の変化をプロットした。

縦軸にアンテナ温度と I C R F 電力を、横軸に時間を示す。時間軸は、プラズマ着火を 0 としており、I C R F は、9 sec から入射している。I C R F のパルス幅 1.5 sec と 1.0 sec の場合を示す。それぞれ、アンテナとプラズマ表面距離は、8 cm と 14 cm である。I C R F の高周波電力はそれぞれ 4.1 MW、3.8 MW である。

I C R F の高周波を入射するとアンテナ温度は、急激に上昇し、入射終了後徐々に降下する。アンテナとプラズマ表面の距離が短く、更に、大電力、長パルスである程そのアンテナ温度は、ファラデーシールドの融点に近づく。アンテナ表面温度の計測値を常に観測し、融点に達しない範囲内でアンテナとプラズマ表面の距離、入射電力、パルス幅を決めれば損傷を最小限に抑えた運転を行うことができる。

5. 2 計測成果

アンテナとプラズマ表面の距離及び高周波電力とパルス幅によりアンテナの上昇温度が変化する。数多くのデータ収集を行うことにより、アンテナの損傷を防止できるアンテナとプラズマ表面の距離と高周波電力の関係が整理されてきた。アンテナの損傷を防止するための最も良い方法は、プラズマ表面とアンテナの距離を大きく離すことであるが、実際の運転では高周波電力がプラズマに結合しにくくなるため、あまり大きく距離をとれない。このため現在、本装置を活用して、より最適な条件（高周波電力、パルス幅とアンテナとプラズマ表面距離）を見いだす実験運転を実施している。本アンテナ温度計測装置の開発によりアンテナの損傷を最小限に抑え、且つ、大電力の入射が可能な運転条件が見いだされつつあるのが現状である。

6. まとめ

I C R F アンテナ表面温度計測装置の開発により、アンテナとプラズマ表面距離の最適化、つまり高周波電力の結合が良く且つ熱負荷の少ないアンテナの運転条件が見いだされてきた。その結果、アンテナの損傷が最小限に抑える運転が可能になりつつある。

今後の課題としては、アンテナ先端の温度上昇により溶融する前にアンテナを保護するインターロック設備の開発、アンテナ先端ファラデーシールドの保護板、保護リング部の改良等がある。更に、継続してアンテナに損傷を与えない、より最適なプラズマ条件の追究と検討及びデータ収集を実施していく予定である。

謝 辞

本開発の考案、システム設計製作、計測に至るまで、R F 装置試験室員他多くの方々の貴重な技術力と援助を得ました。厚くお礼申し上げます。

本開発に当たり、終始御指導、御配慮頂きました核融合装置試験部船橋昭昌部長、同部清水正亜次長、R F 装置試験室山本巧室長に厚くお礼申し上げます。

参考文献

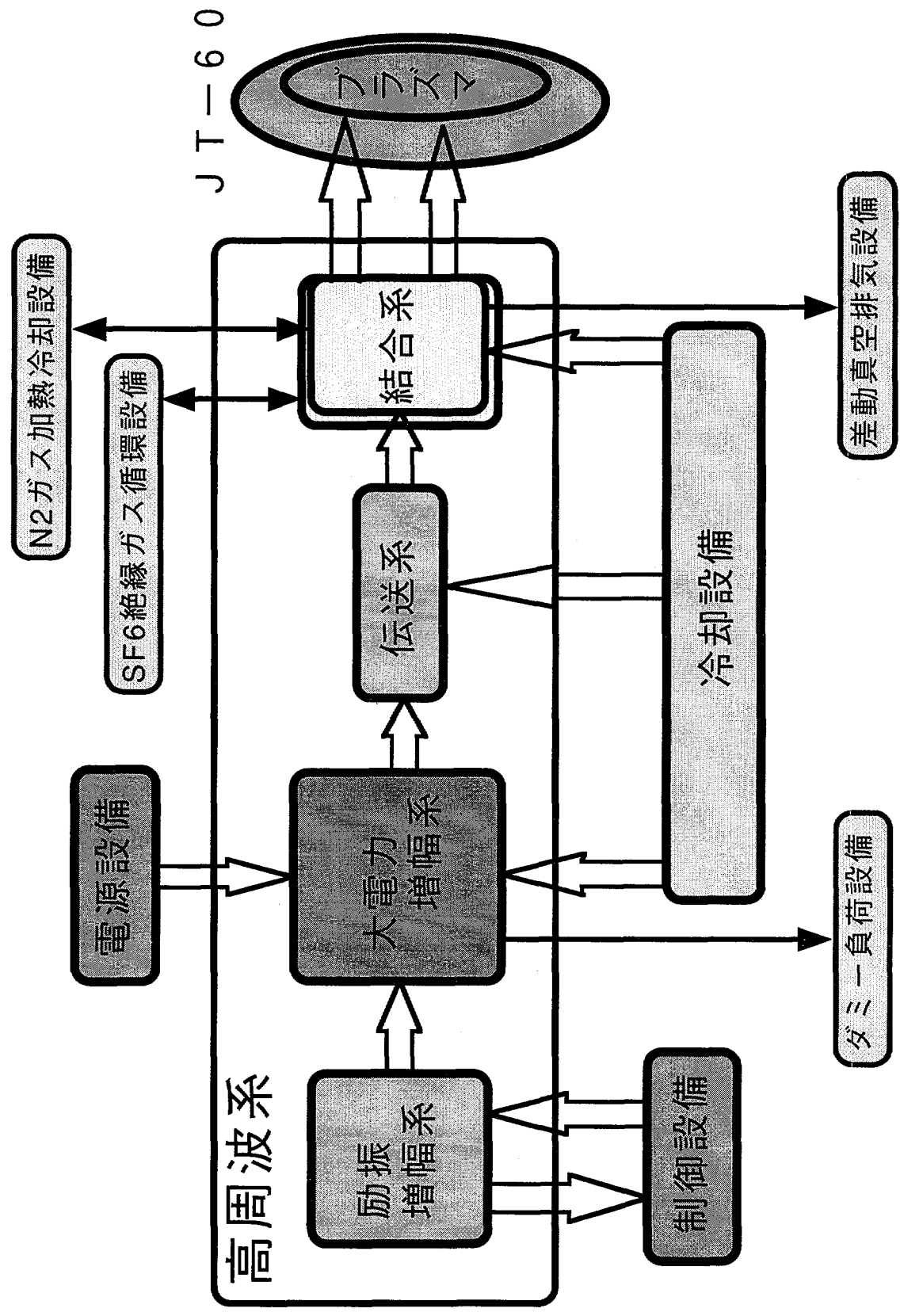
1) 横倉賢治、森山伸一、寺門正之：JAERI-Tech,97-044(1997)

2) T.Fujii,N.Kobayashi,S.Moriyama,et al.Upgrade of
JT-60 ICRF Heating System,Proc.16th Symp.
on Fusion Technology,(London),2 1171-1175(1990)

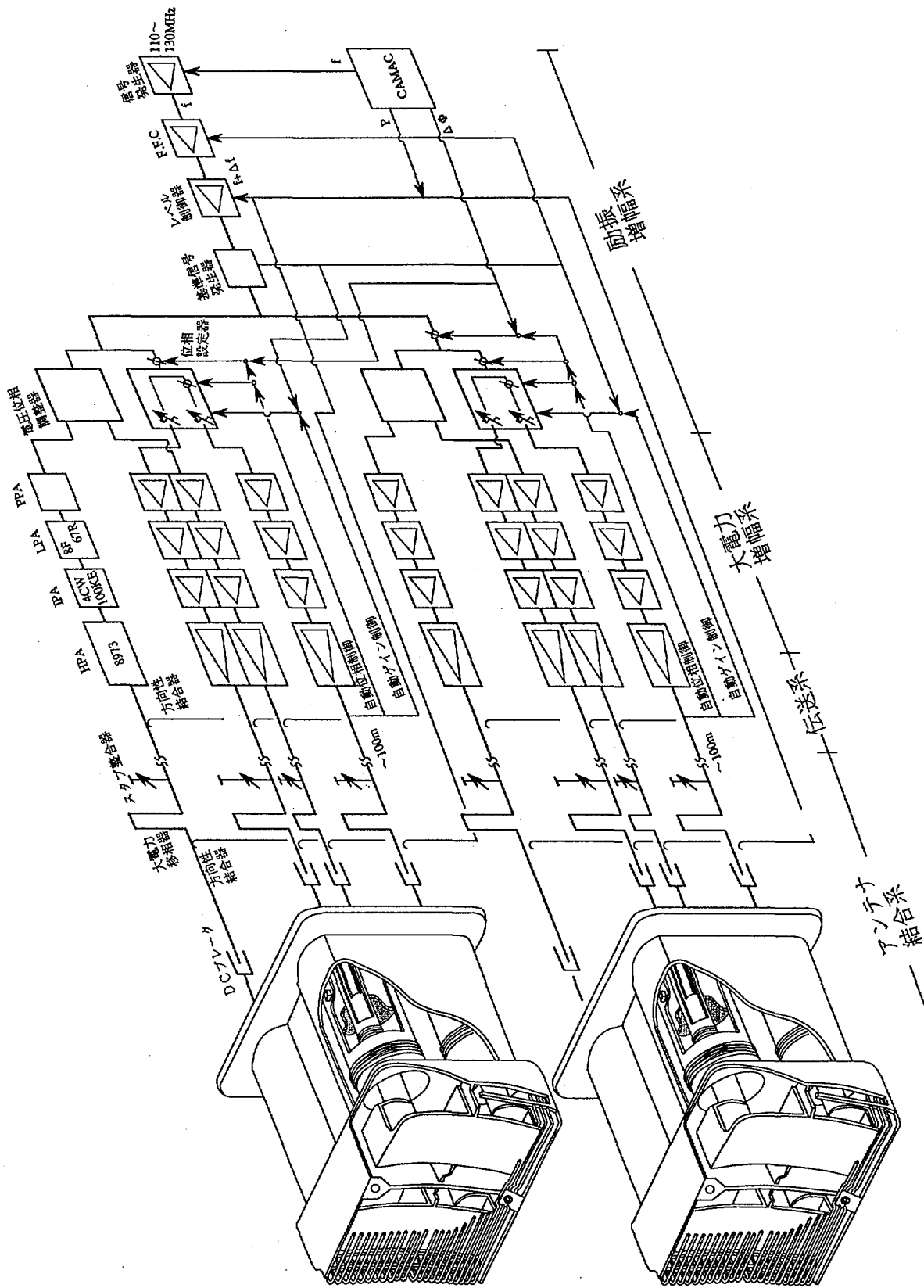
3) S.Moriyama,T.Fujii,M.Saigusa,K.Anno,K.Yokokura,et
al.Proc.17th Symp.on Fusion Technology,(Rome),
584-588(1992)

4) 水野幸雄著：プラズマ物理学．第2章荷電粒子の運動
P17～41

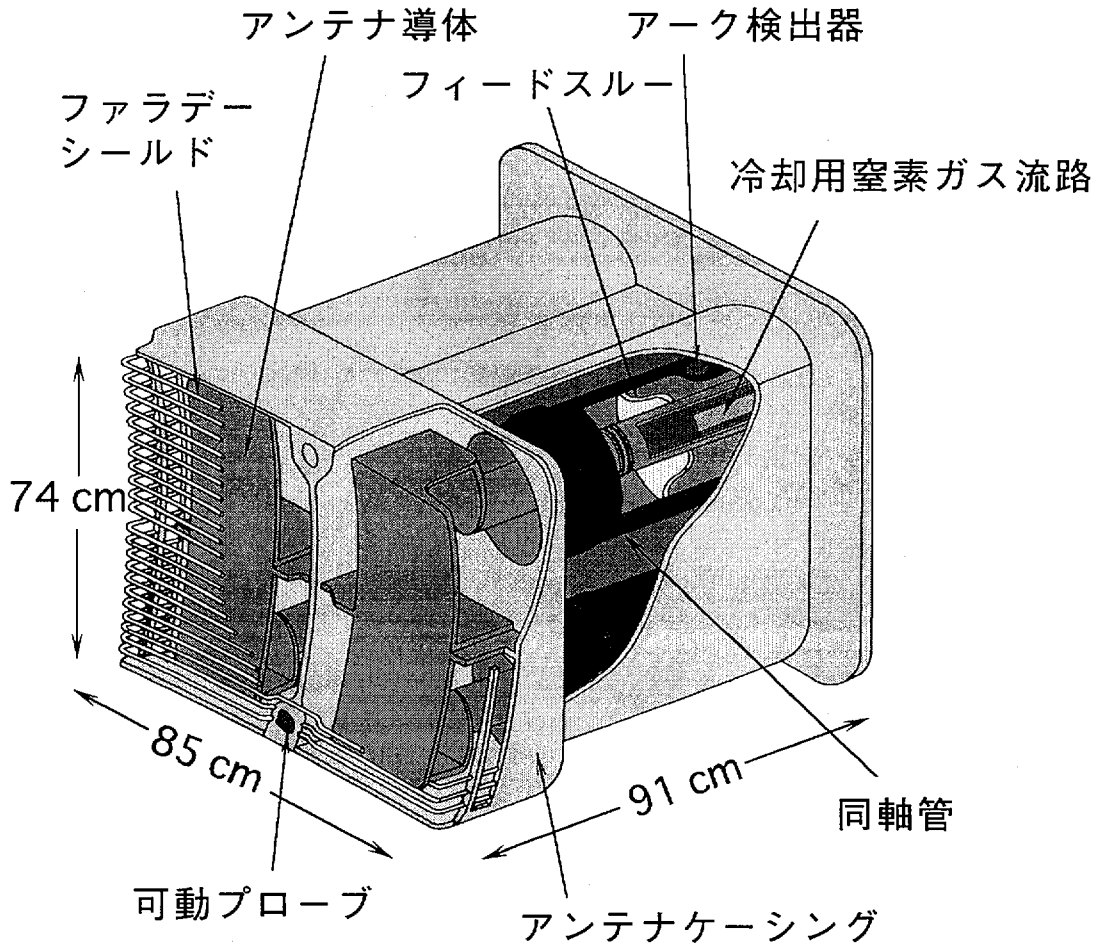
5) Francis F.Chen：Introduction to Plasuma Physics
内田岱二郎訳：プラズマ物理入門．第2章粒子の運動
P17～42



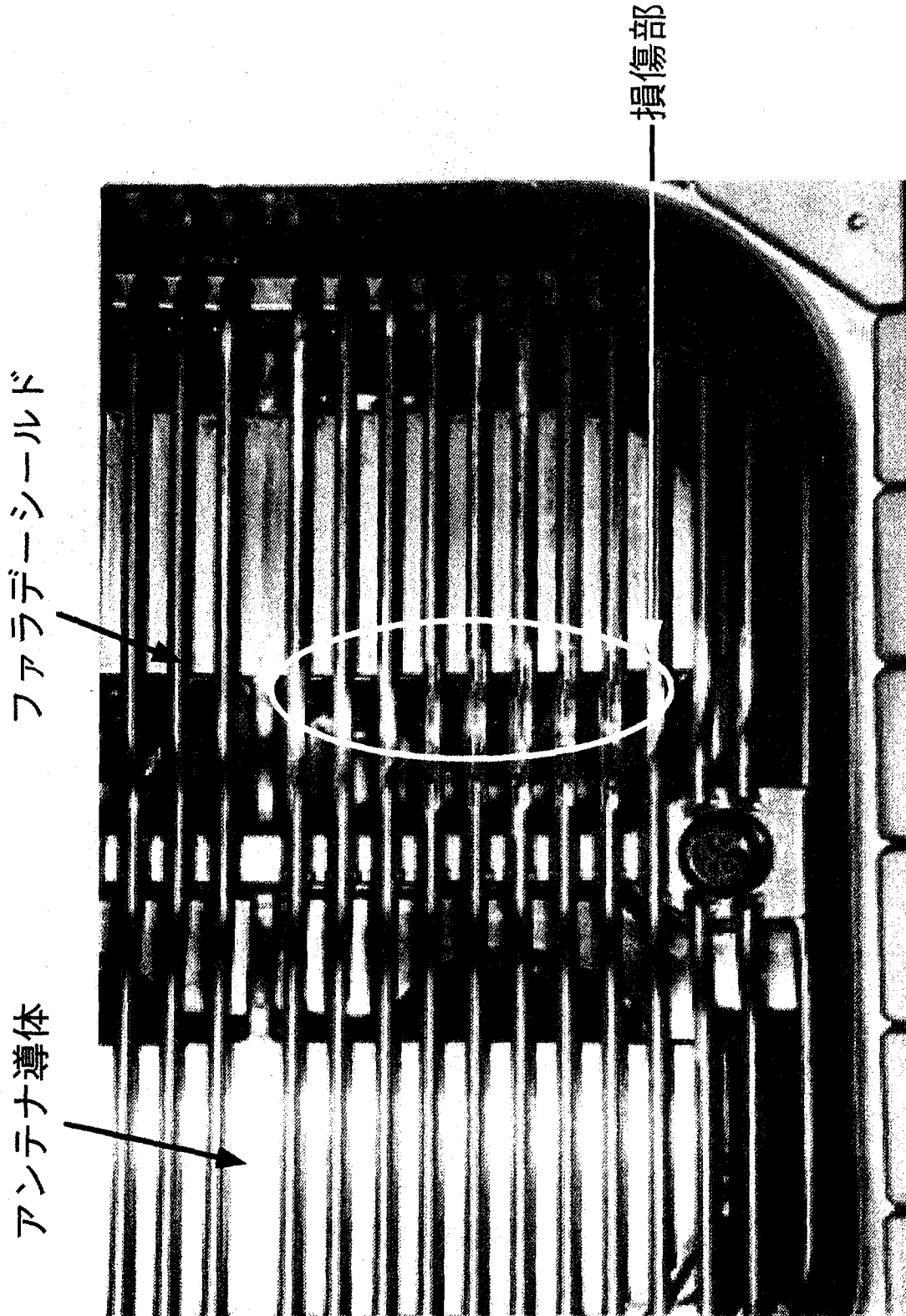
第1図 高周波加熱装置の概念図



第2図 ICRF加熱装置の概略図

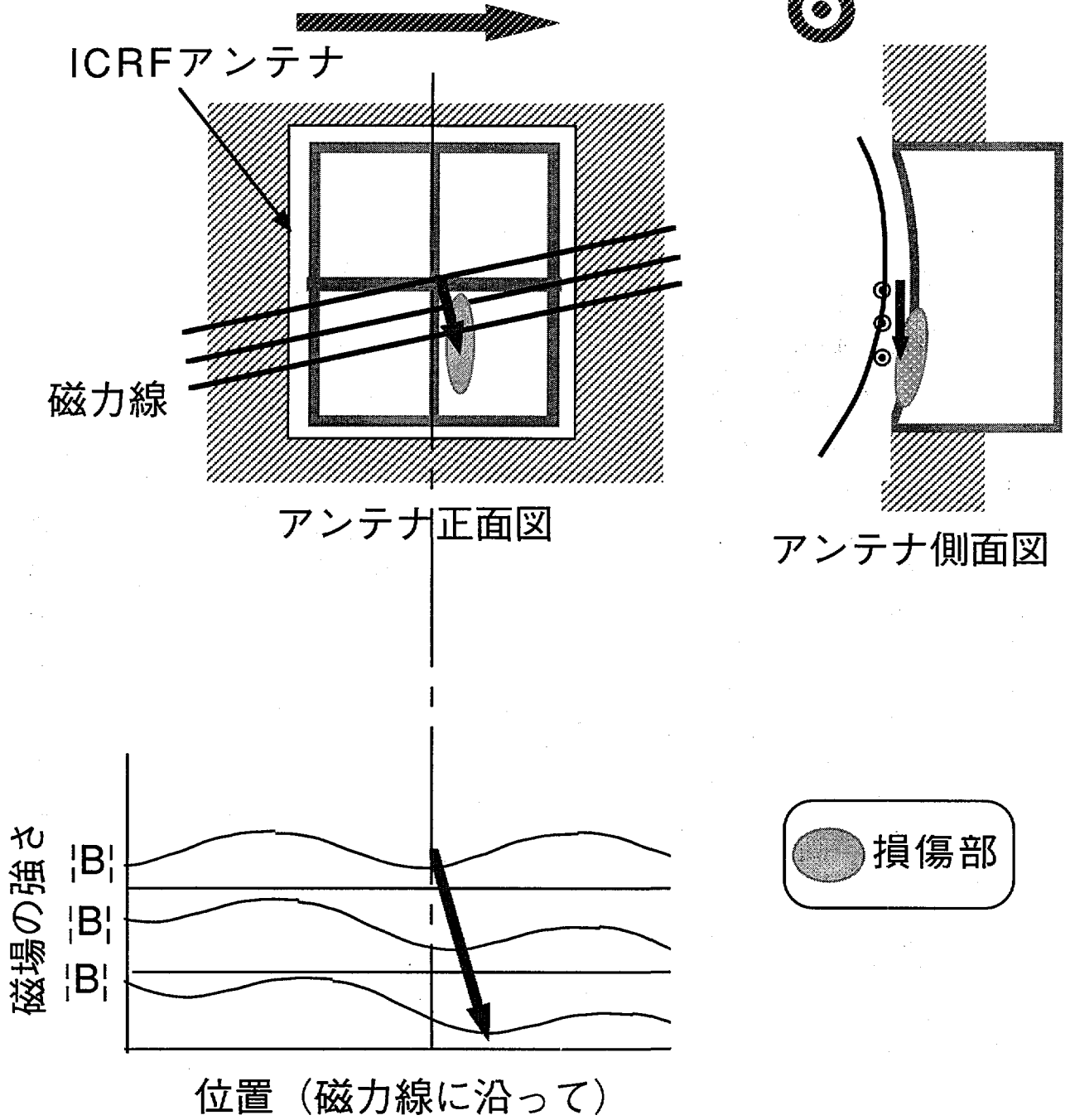


第3図 ICRFアンテナの鳥瞰図

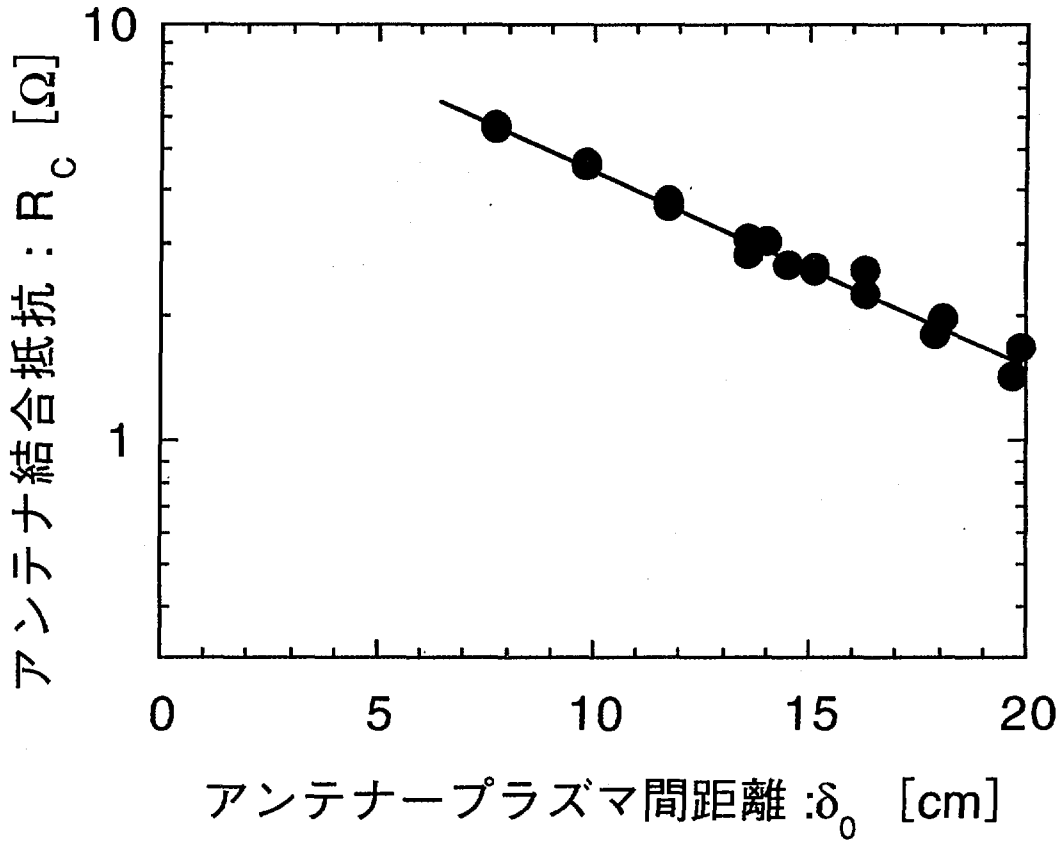


第4図 ICRFアンテナの損傷状態

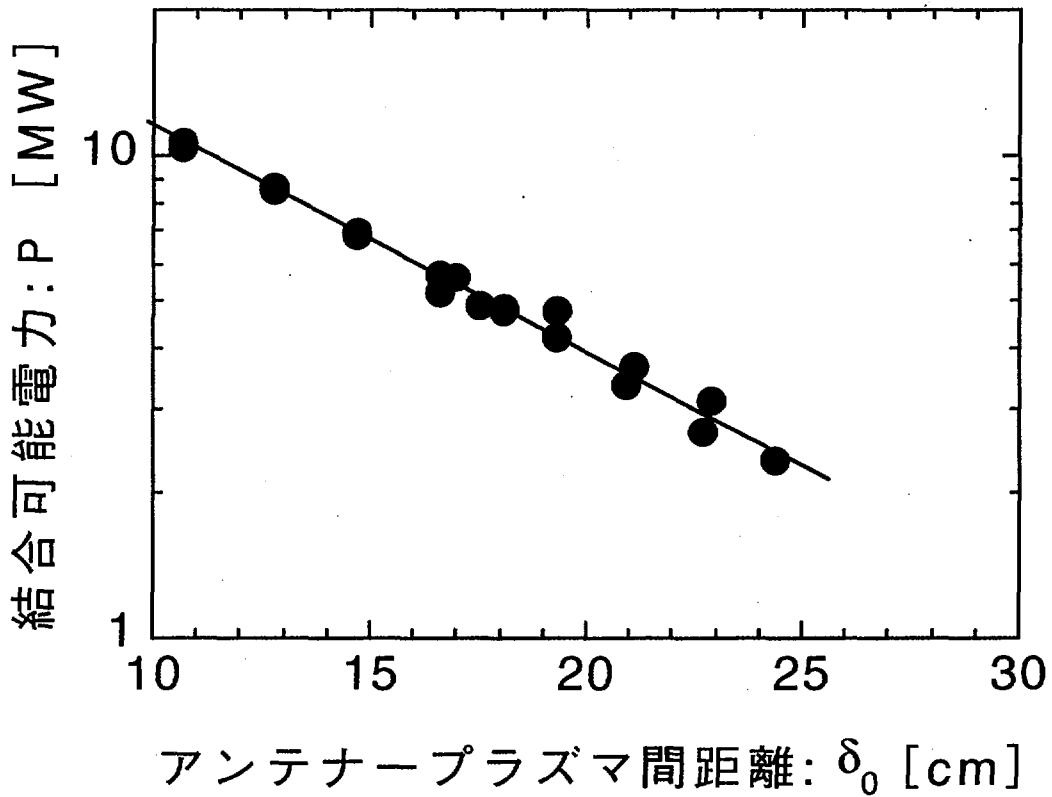
トロイダル磁場及びプラズマ電流



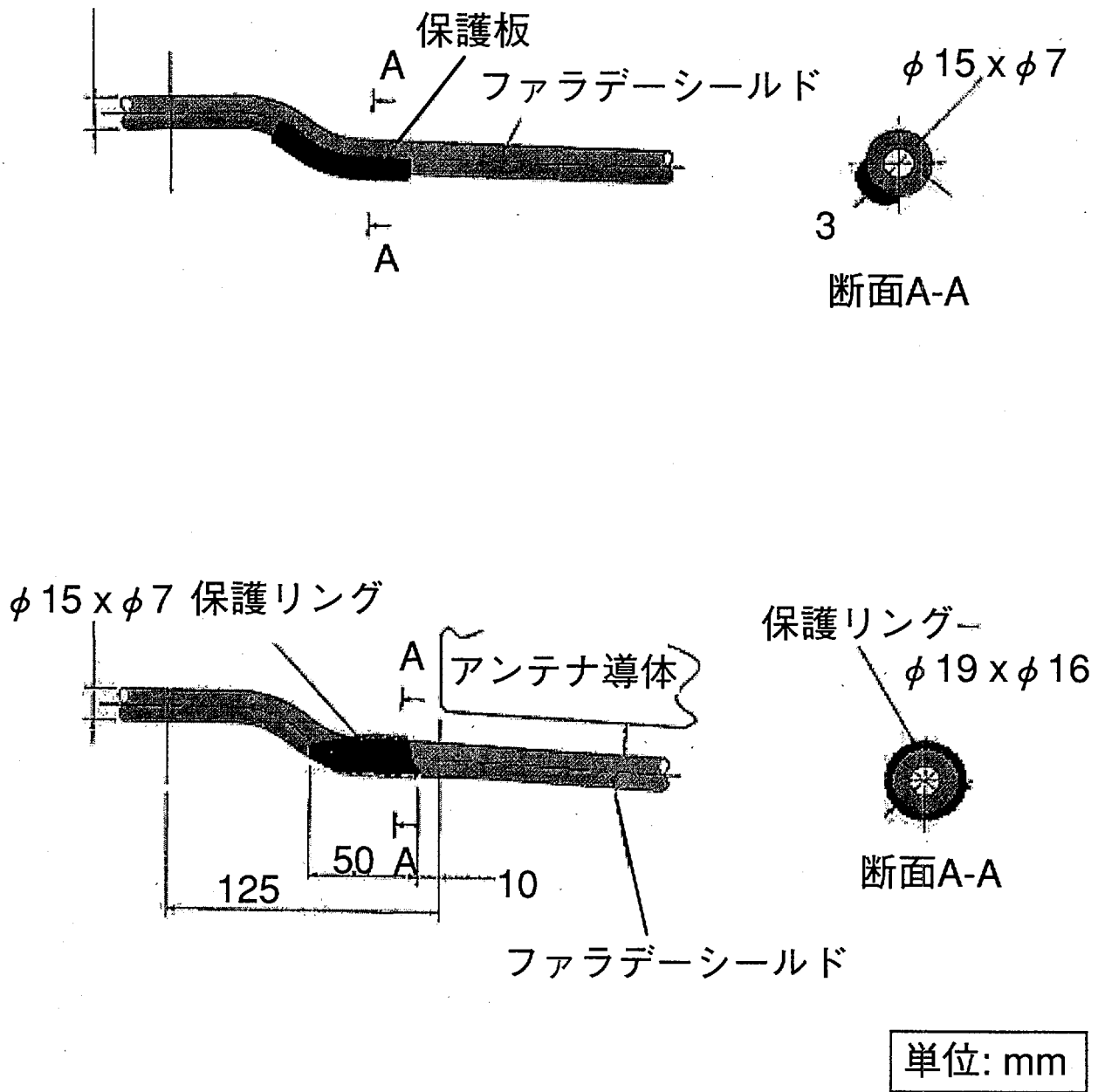
第5図 アンテナ損傷位置関係図



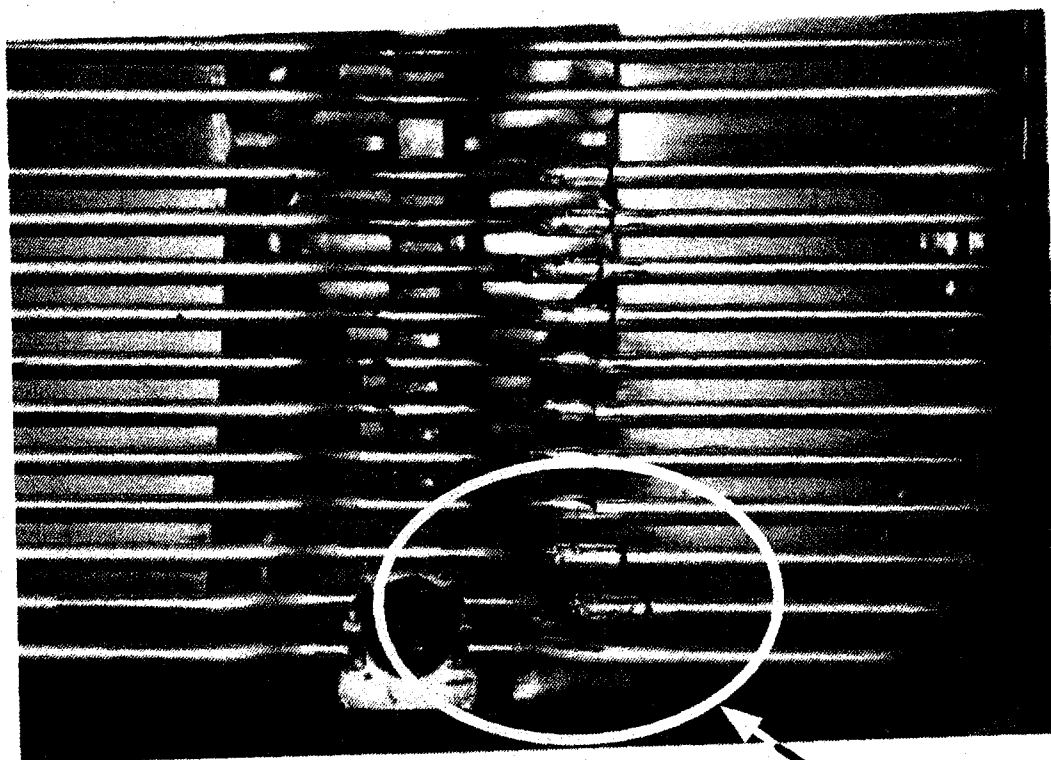
第6図 ICRFアンテナ結合特性



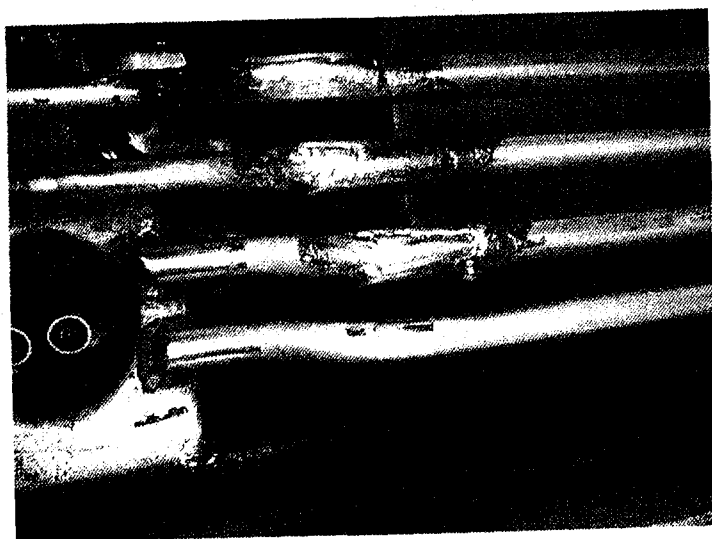
第7図 ICRF入射電力の限界



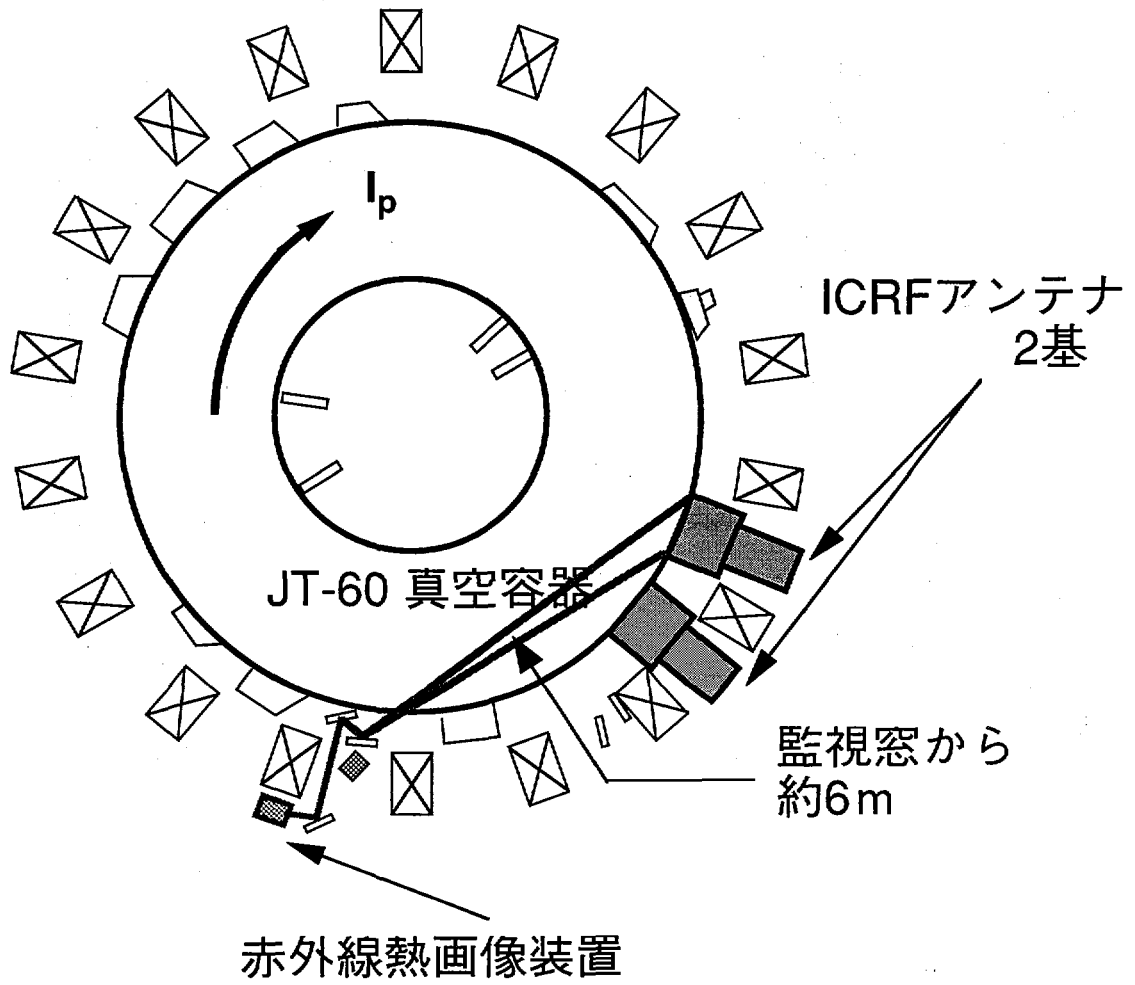
第8図 保護板、保護リングの取付図



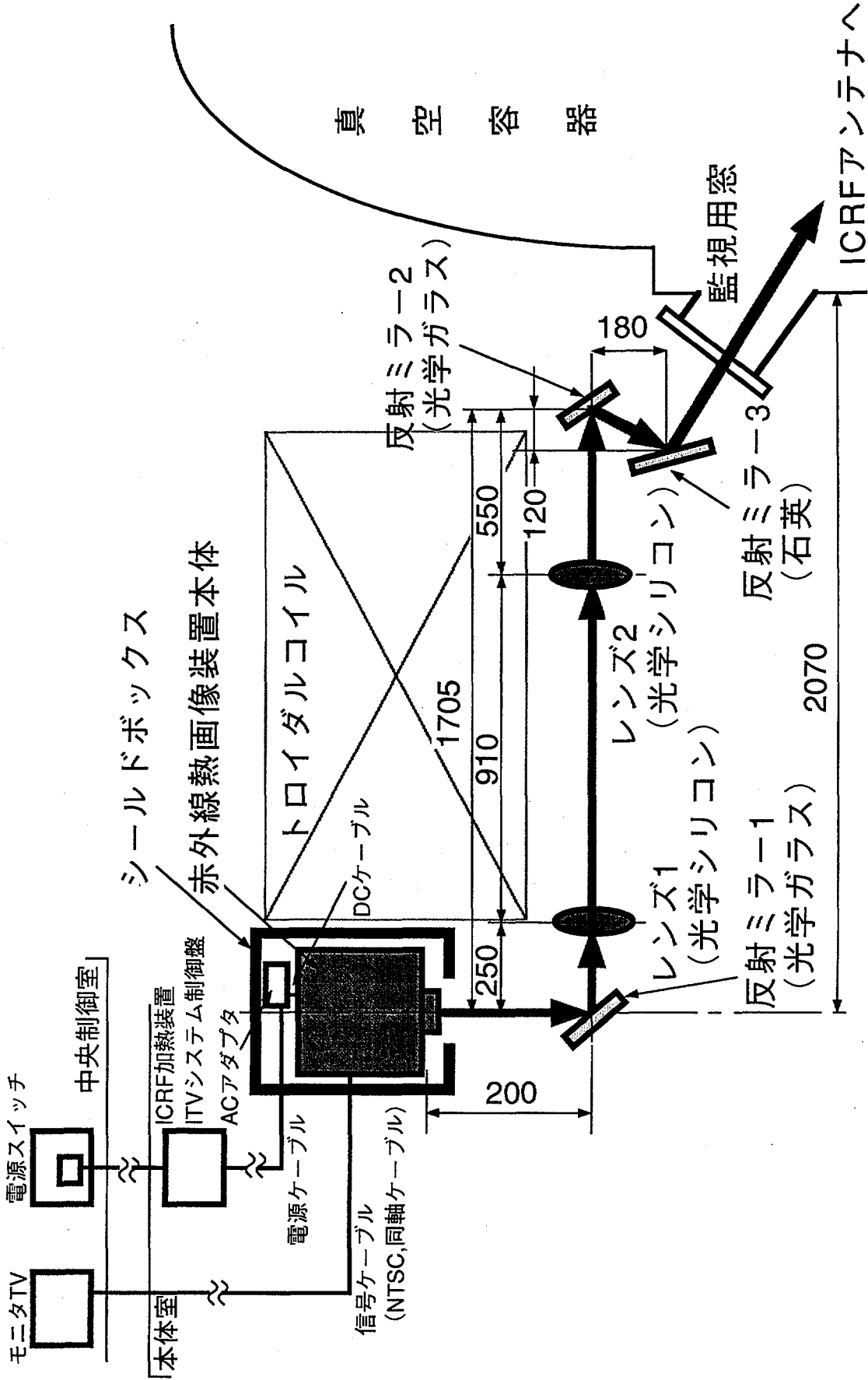
拡大



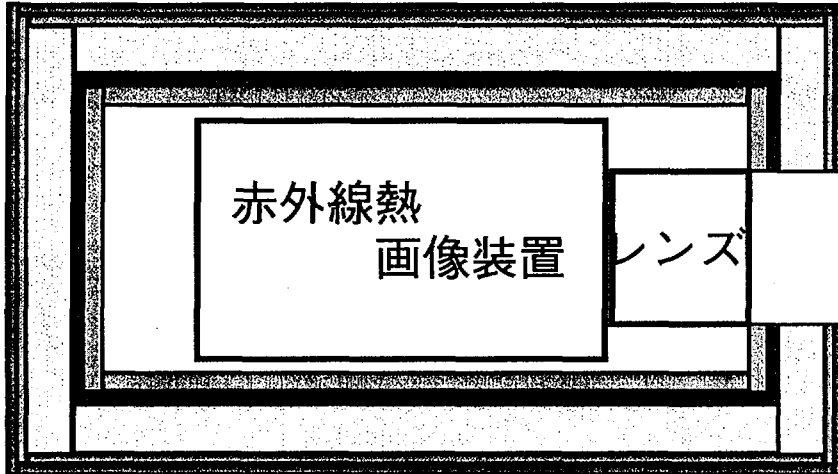
第9図 保護板、保護リングの損傷状態



第10図 ICRFアンテナ温度計測装置光路図

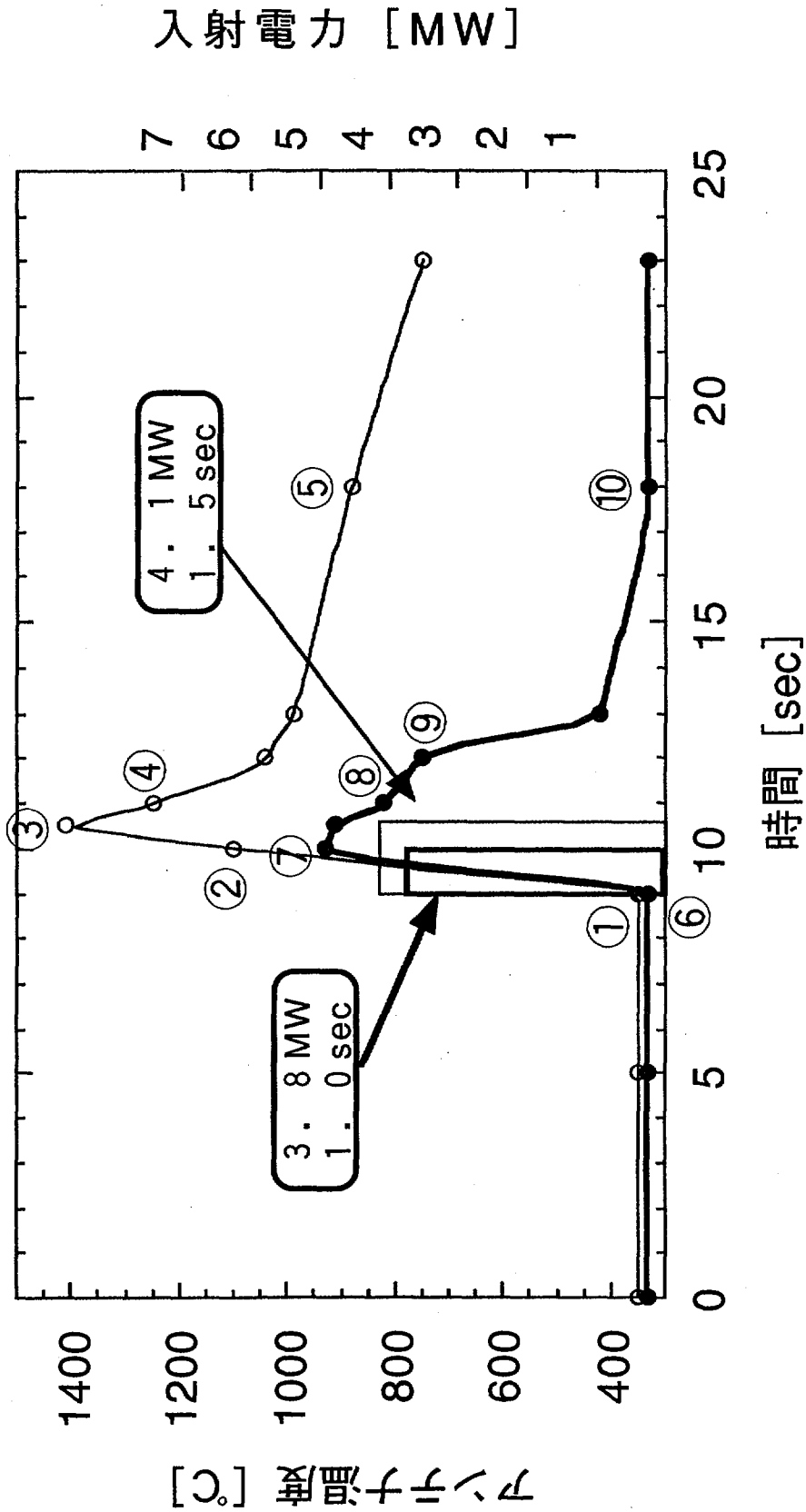


第111図 ICRFアンテナ表面温度計測装置配置図



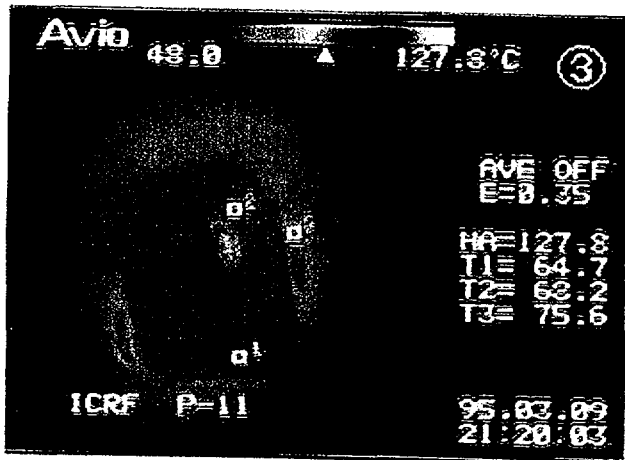
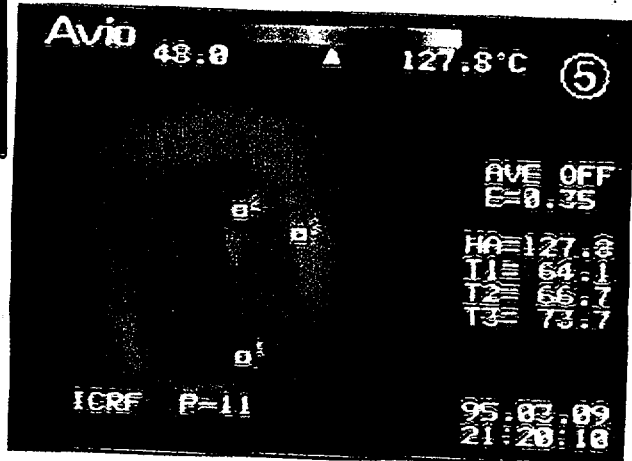
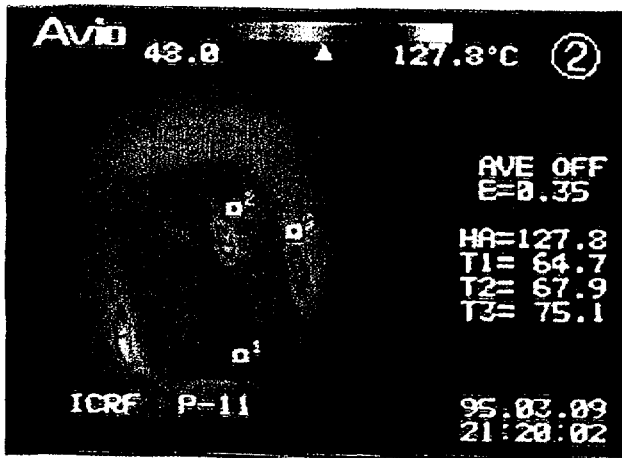
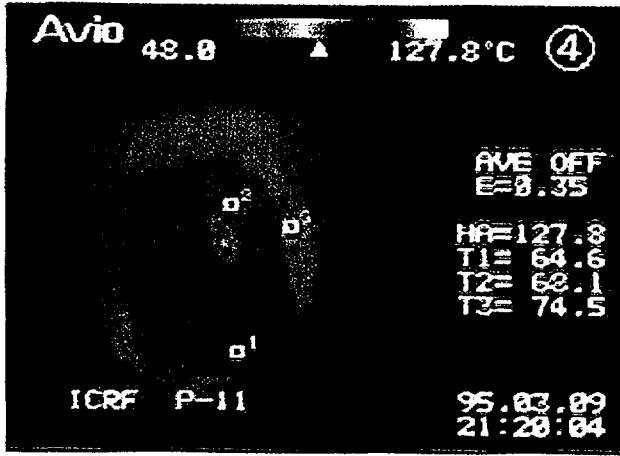
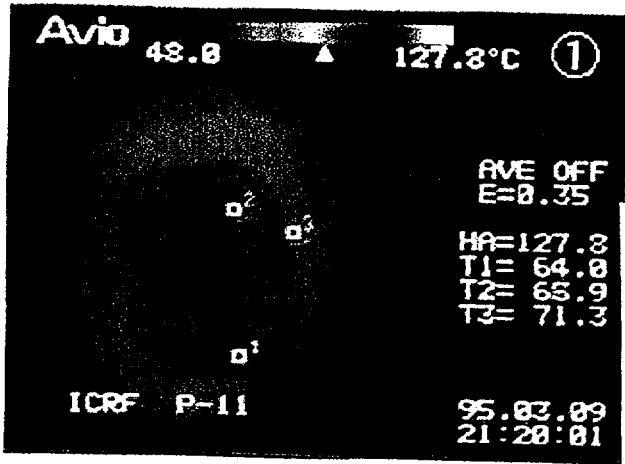
	板厚寸法 (mm)	重量 (kg)	比重	用途
ステンレス	5	35.6	7.8	強度
電磁軟鉄	5	34.2	7.9	耐磁気
ポリエチレン	25	16.8	0.9	耐中性子
鉛	6	41.0	11.3	耐放射線
電磁軟鉄	10	43.1	7.9	耐磁気
外径寸法		総重量		
縦	262	170		
横	412			
長さ	532			

第12図 シールドボックスの構造図



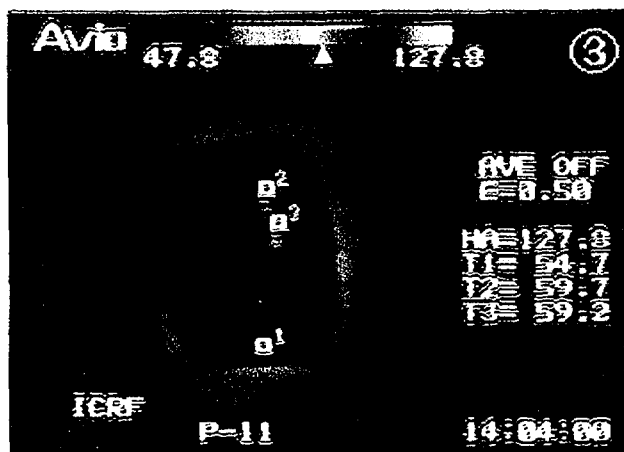
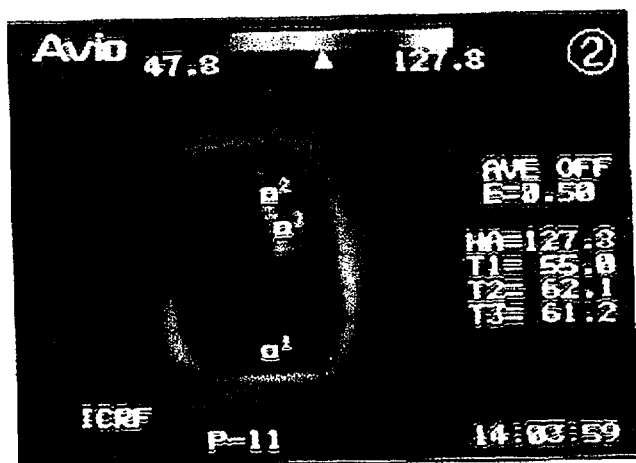
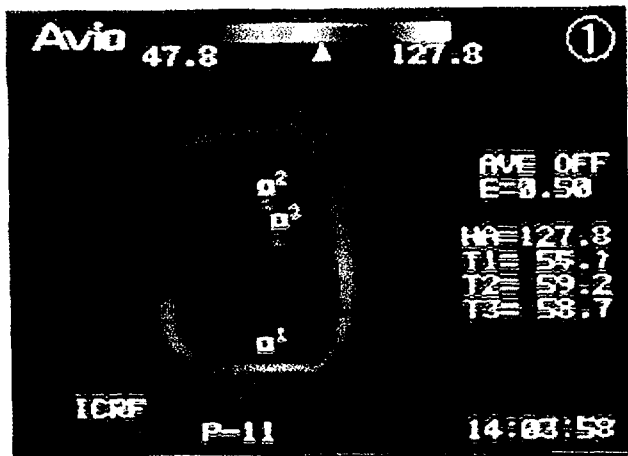
第13図 ICRFアンテナ温度の時間経過

NEXT PAGE(S)
left BLANK



第14-1図 ICRFアンテナ温度計測データ

NEXT PAGE(S)
left BLANK



第14-2図 ICRFアンテナ温度計測データ

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
工率, 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	ジーメンズ	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	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

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	b
バール	bar
ガロン	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
1 b = 100 fm² = 10⁻²⁸ m²
1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²
1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

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, ヘクト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 閣僚理事会指令では 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。

換算表

力	N (=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg (Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	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) = 4.184 J (熱化学) = 4.1855 J (15 °C) = 4.1868 J (国際蒸気表)
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸	
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹	
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵	
	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 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1	

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

U-160-CRFEアンテナの健全性と表面温度計測の開発