

JT-60Uにおける炭素製先端部を用いた LHアンテナのパワー入射実績

Power Injection Performance of the LH Antenna
Tipped with Carbon Grills in JT-60U

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

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

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

July 2007

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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っ
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

JT-60U における炭素製先端部を用いた LH アンテナのパワー入射実績

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

石井 和宏^{※1}・関 正美・篠崎 信一・長谷川 浩一・平内 慎一

鈴木 貞明・佐藤 文明^{※1}・森山 伸一・横倉 賢治

(2007 年 3 月 15 日受理)

JT-60U の LH アンテナは、効率的に高周波 (RF) をプラズマへ入力するために、プラズマと近い位置に設置され、常にプラズマと相互作用している。そのため、ステンレス鋼製の LH アンテナ先端の開口部は、プラズマからの過大な熱負荷による損傷や RF 放電による損傷が発生し、問題となっていた。その対策として LH アンテナ先端部に耐熱性に優れた炭素製グリルを取付けることにより、先端部の損傷を軽減できる耐熱化 LH アンテナを開発し、プラズマへのパワー入射実験を世界で初めて行った。

炭素製グリルからの放出ガスによる RF 放電が懸念されたので、初期の RF コンディショニングは慎重に行い、十分な脱ガスを実施した。その結果、RF 電力として 16MJ の入射エネルギーの達成に成功した。また、電流駆動用 LH アンテナとして要求される、十分に高いプラズマ電流駆動性能 (約 1.6×10^{19} A/W/m²) を持つことを実証した。

那珂核融合研究所 (駐在) : 〒311-0193 茨城県那珂市向山801-1

※ 1 業務協力員

Power Injection Performance of the LH Antenna Tipped with Carbon Grills in JT-60U

Kazuhiro ISHII^{※1}, Masami SEKI, Shinichi SHINOZAKI, Koichi HASEGAWA,
Shinichi HIRANAI, Sadaaki SUZUKI, Fumiaki SATO^{※1}
Shinichi MORIYAMA and Kenji YOKOKURA

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

(Received March 15 , 2007)

The lower hybrid (LH) antenna in JT-60U has interaction with plasmas because it should be close to them in order to inject effectively radio frequency (RF) power into them. As a result, it has been a serious problem that the antenna mouth made of stainless steels was damaged due to excessive heat loads of plasmas and RF breakdowns. To solve the problem, a heat-resistant LH antenna was developed tipping carbon grills with fairly high heat resistance on the antenna mouth, and therefore reduction in damages on the mouth was expected. Power injection into plasmas was firstly performed with the heat-resistant antenna.

RF conditioning was done carefully in the initial phase because RF breakdown due to outgassing from the grills might be occurred. After sufficient degassing was done through RF conditioning, RF power of about 1.6 MW x 10 sec injection was successfully injected to plasmas. Moreover it was demonstrated that it had comparably high plasma current drive capability (about 1.6×10^{19} A/W/m²), required as a current drive LH antenna.

Keywords: JT-60U, LH antenna, Carbon Grills, Current Drive

※1 Cooperative Staff

目次

1. はじめに	1
2. JT-60U 用 LH アンテナ	2
2. 1 RF パワー入射の制限	2
2. 2 入射性能回復のための補修	2
3. 炭素製グリルを用いた耐熱化 LH アンテナの導入	4
3. 1 耐熱化 LH アンテナの設計概要	4
3. 2 耐熱化 LH アンテナ先端部の製作	4
4. RF パワー入射実績	8
4. 1 プラズマへの入射実績	8
4. 2 パワー入射後の LH アンテナ先端部の観察	9
4. 3 LH アンテナ先端部の補修	14
5. まとめ	16
謝辞	16
参考文献	16
付録	17

Contents

1. Introduction	1
2. The LH antenna for JT-60U	2
2.1 Limitation of the RF injection power	2
2.2 Repair for recovering the injection performance	2
3. Installation of the heat-resistant LH antenna tipped with carbon grills	4
3.1 Outline of heat-resistant LH antenna design	4
3.2 Construction of the heat-resistant LH antenna	4
4. RF power injection performance	8
4.1 Injection performance into plasmas	8
4.2 Observation of the tip LH antenna after power injection	9
4.3 Repair of the tip LH antenna	14
5. Summary	16
Acknowledgement	16
References	16
Appendix	17

1. はじめに

LH アンテナは、数 GHz 帯の大電力高周波をプラズマに入射し、プラズマ内に低域混成波 (LHRF) を励起してプラズマ電流を駆動する LHRF 装置の中心機器である。LHRF 装置のもっとも重要な開発要素である LH アンテナにおいて、多分岐型の採用や各部寸法等の最適化によって高性能化開発を行ってきた。このように開発した LH アンテナは、約 7MW の大電力の入射を達成し、世界最高の 3.6MA のプラズマ電流の駆動に成功している¹⁾。

しかし LH アンテナは、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ている。JT-60U の LH アンテナは、過大熱負荷によるアンテナ先端部の溶融に起因するアンテナの性能劣化が問題になっていた、しかもこの問題は、世界中の LH アンテナに共通の問題であり、安定に大電力の入射ができ、性能の維持が容易で、プラズマに悪影響を及ぼさない LH アンテナの開発が必要であった。そこで、その解決するアイデアとして、耐熱負荷性能の高い炭素材を使用したアンテナの開発を行った^{2) 3)}。すなわち、高耐熱性材料の炭素材を用いたアンテナ先端部 (炭素製グリル) と、それを取付けるためのステンレス製のベース部を製作し LH アンテナ先端部への取付けを行った。JT-60U において世界で初めて、炭素材を用いた耐熱化 LH アンテナを構築した⁴⁾。

本論文では、JT-60U における炭素製先端部を用いた LH アンテナの運転実績について述べる。第 2 章ではそれまでの JT-60U 用 LH アンテナの問題点を、第 3 章では炭素製グリルを用いた耐熱化アンテナの導入を記述する。第 4 章ではその運転実績を述べ、第 5 章でまとめを行う。

2. JT-60U 用 LH アンテナ

2. 1 RF パワー入射の制限

LH アンテナの損傷原因としては、プラズマからの熱負荷やアンテナ先端部での高周波（RF）放電が考えられる。運転時にはアンテナ先端部をプラズマと～10 cmの距離にまで近づけるため、アンテナへの熱負荷は大きくなり、過大な熱負荷を受けた LH アンテナ先端部は、図 2-1 に示すように溶融し損傷をする。特に、中性粒子加熱装置（NBI）による大電力プラズマ加熱時に発生する高速イオンの過大な熱負荷によって、LH アンテナはダメージを受けることがある。LH アンテナの熱負荷を軽減するためプラズマとの距離を大きく離すと熱負荷は軽減されるが、高周波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離せるわけではない。プラズマの状況に合わせてその結合距離は JT-60U では 8～12 cm である。

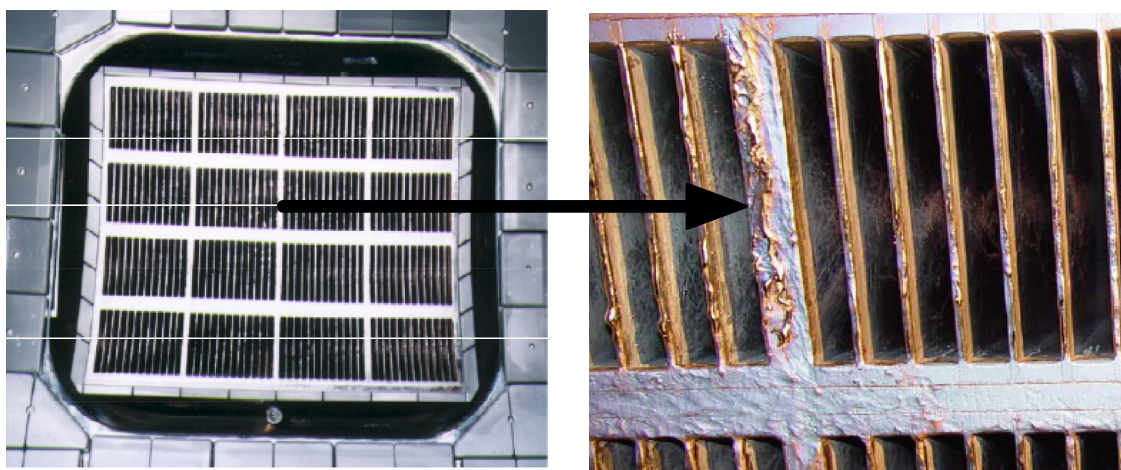


図 2-1 LH アンテナの損傷状態

2. 2 入射性能回復のための補修

JT-60U に LH アンテナを導入以来、図 2-2 に示すように JT-60U 真空容器内に入り、ほぼ 1 年に 1 回の実験休止期間に入射性能を維持する目的で、溶融した先端部を成形する補修作業を行ってきた。



図 2-2 LH アンテナ先端部の補修

補修内容は、まず溶融した2～3 mm径の小玉状に固着した金属を、ハンドグラインダーでおおまかに除去する。次に細部をヤスリでならし、サンドペーパーで表面仕上げを手作業で行う。仕切り板(厚み2.5mm)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、電界集中による放電を防止している。アンテナ先端部の損傷は年々進展していた。図2-3で示すように、特に電界強度が強い中央部分で、仕切り板が大きくえぐられ、3～5 mmに達していた。

溶接肉盛りも行って修復してきたが、性能維持には限界があり、入射パワーの低下が問題になっていた。そこで抜本的な対策として、新規に耐熱性材料である炭素材で数cm厚のグリルを製作し、これをLHアンテナ先端部に取り付けることにした。炭素材でLHアンテナを構築するという今までに例が無い挑戦的な試みである。

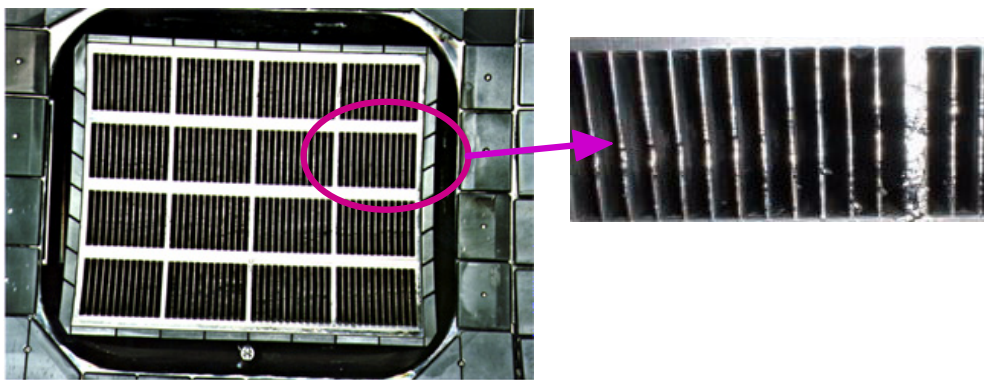


図2-3 LHアンテナの損傷の進行

3. 炭素製グリルを用いた耐熱化 LH アンテナの導入

3. 1 耐熱化 LH アンテナの設計概要

JT-60U の LH アンテナは、熔融や高周波放電の対策を長年にわたって行ってきた。そして性能維持を消極的に行うだけでなく、耐熱性に優れた炭素材で LH アンテナ先端部を構築することにした。過大な熱負荷は主に LH アンテナ先端部に集中しており、入射性能だけではなく、熔融した LH アンテナ先端部材料が電離してイオンとなってプラズマに混入して悪影響を与える。そのため耐熱化により入射性能を向上させ、またプラズマに悪影響を与えないものとしなければならない。さらに、入射パルス幅を従来の 10 秒をはるかに超えて 30 秒程度に伸ばしうることが期待される。そこで、耐熱化アンテナに要求する性能をまとめると、以下のようになる。

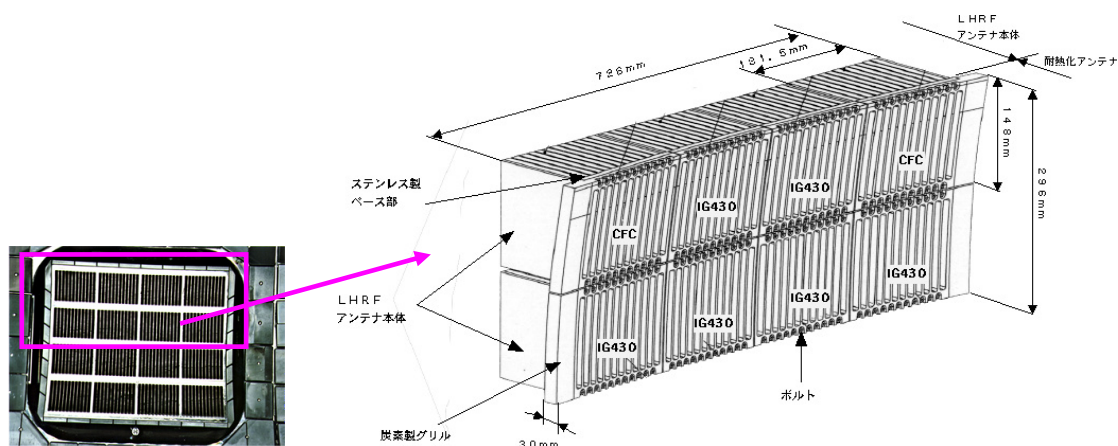
- (1) 電流駆動性能が優れていること（指向性が高く、プラズマ電流と平行な方向に光速の 70%程度の速度を持った高周波を入射できること）
- (2) 耐熱性に優れていること（高融点で、熱伝導に優れていること）
- (3) プラズマに混入しても悪影響が小さいこと（材料の原子番号が小さいこと）

(1)についてはJT-60Uで開発された多分岐型のLHアンテナの構造を採用することで対応することが出来る。(2)と(3)については、LH アンテナ先端に耐熱性に優れた低原子番号の炭素材で製作したアンテナ先端部を取付けて対応する。耐熱性に優れた炭素製の先端部を設けることにより、プラズマからの熱負荷の影響（熔融や変形等の損傷）を最小限に抑え、損傷により引き起こされやすくなる高周波放電による耐電界性能の低下を防止し、入射パワーの劣化の軽減を期待できる。さらに、ステンレス鋼の熱伝導率（約 16W/m/K）に比べて炭素材の熱伝導率（100W/m/K）は数倍高く、加えて熔融の原因である過大な熱負荷は局所的であるため、30 秒程度のパルスに十分に耐えるものと予想される。

また、取付けはネジによって行い、もしも先端部がダメージを受けた場合には容易に交換が可能とし、性能が維持しやすい交換型とした。

3. 2 耐熱化 LH アンテナ先端部の製作

耐熱化 LH アンテナは、炭素製のグリルとステンレス製のベース部から構成されている。図 3-1 に JT-60U 耐熱化アンテナの外形図を示す。入射しようとする高周波とプラズマとの結合が良い、4 行 4 列の LH アンテナ先端上側 2 段に、ベース部と炭素製グリルを接続した。耐熱化 LH アンテナ先端部は、大電力高周波を入射するプラズマに合わせた曲面の形状であり、既設 LH アンテナ先端部と形状は同じである。



既設 LH アンテナ先端部

図 3-1 耐熱化 LH アンテナの外形図

耐熱化 LH アンテナは8ブロックから構成されるが、1ブロックの構成は図 3-2 示すように、ステンレス製のベース部、銅製の接触子、炭素製グリルから構成されている。既設 LH アンテナ先端部に、ステンレス製のベース部を溶接で取付け、ネジを使って炭素製グリルを取付ける構造となっている。

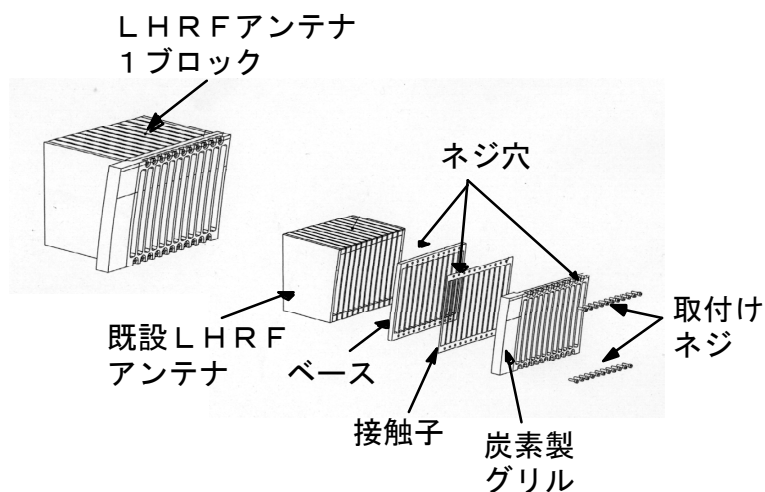


図 3-2 耐熱化アンテナ 1 ブロック

今回製作した「炭素製グリル」には、2 種類の炭素材を使っている。特に高熱負荷がかかる可能性が高い左右上角 2 か所には図 3-3-a に示す炭素繊維材(CFC)を使用した。それ以外の場所には図 3-3-b に示す等方性黒鉛(IGF430)を使用した。製作された炭素製グリルは～15mm であるが、3 次元の形状をしているため板厚約 50mm 厚の炭素材から削り出す必要があった。さらに、グリル部分の幅が 4mm、グリルの間が 10.5mm と非常に狭く、高度な加工技術が要求された。

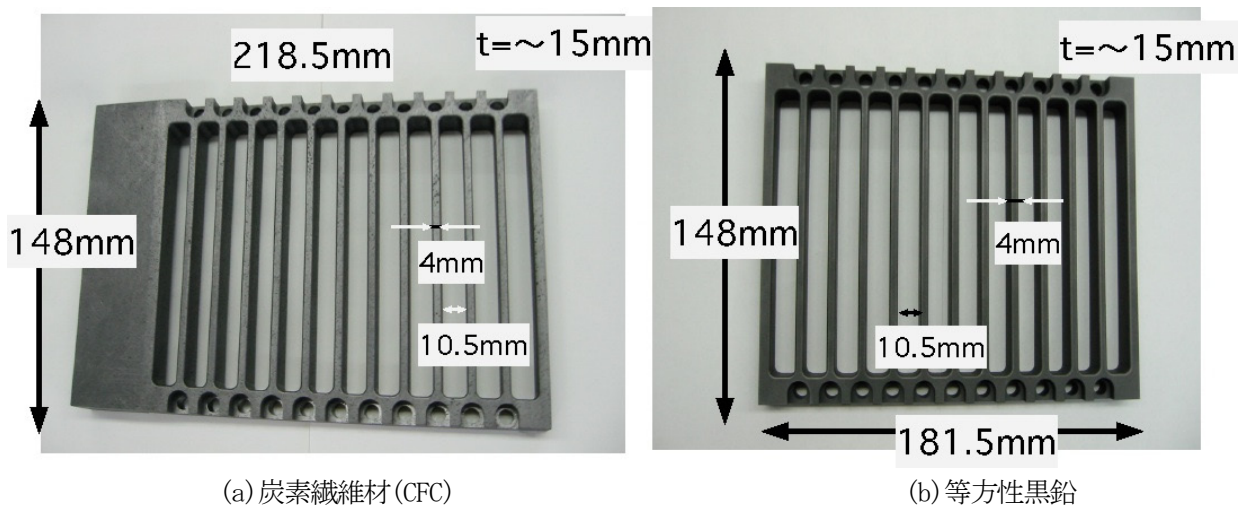


図 3-3 炭素製グリル

図 3-4 に示す「ベース部」はステンレス製で、既設 LH アンテナに炭素製グリルを取付けるためのものである。ベース部を取付ける理由は、アンテナ先端部は損傷し変形しており、多少の補修を行っても炭素製グリルを直接取付けするために十分な面精度が得られないこと、メンテナンス性や修理のしやすさを向上させるため、ボルトによる脱着式の取付け方式を可能とするためである。ベース部には炭素製グリルを取付けるために、ネジ穴加工が施してある。

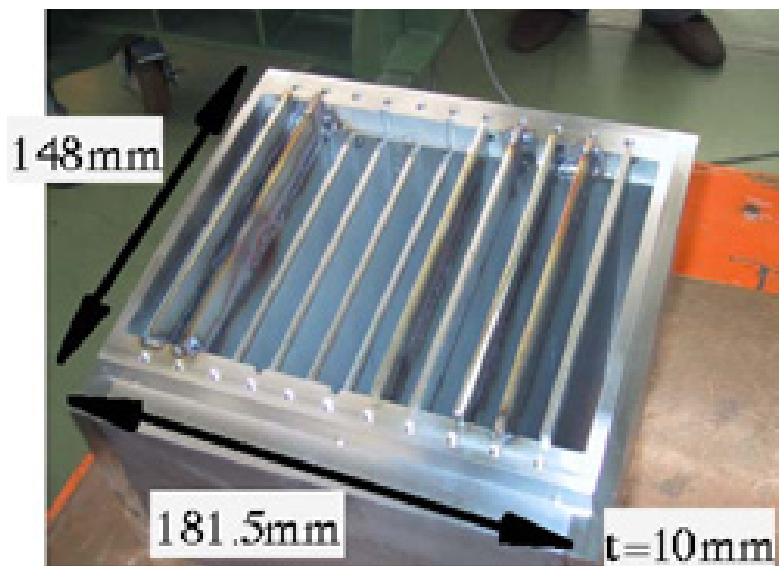


図 3-4 ステンレス製のベース部

ステンレス製のベース部と炭素製の先端グリルの間には、図 3-5 で示すような銅製のエンボス（密度 20 個/cm² 直径:1mm 高さ:0.2mm の丸い凹凸を表面につける）加工を施した電気接触子を挟みこんだ。これはステンレス製のベース部と炭素製の先端グリルとの電氣的接触を改善するためである。

これら構成部品の先端部への取付け作業は付録に示す。

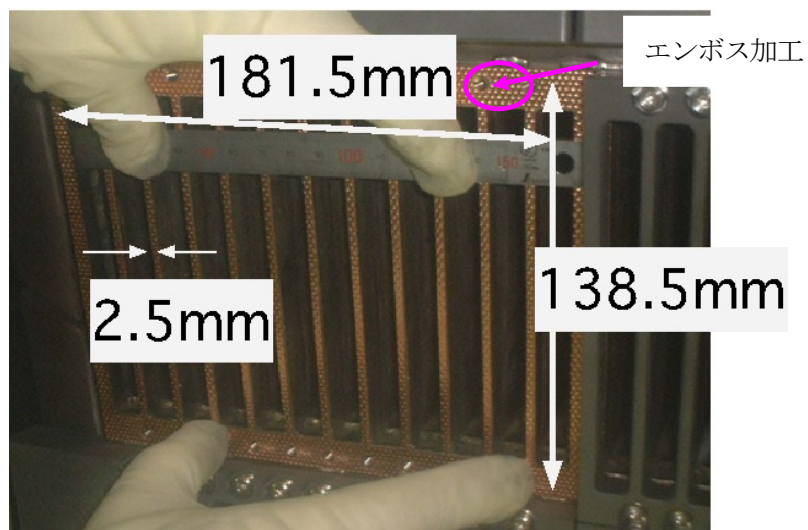


図 3-5 銅製の電気接触子

4. RF パワー入射実績

4. 1 プラズマへの入射実績

新規に取付けた耐熱化アンテナの健全性を見るために、プラズマ入射に先立って JT-60U 真空容器内への高周波入射を行った。炭素製グリルからのガス放出やベースと炭素製グリル間の電気接触を懸念して、耐熱化アンテナ全体で数 10 kW-2ms 程度から始めた。ややガス放出は多いように思われたが、RF 放電によりパワーが制限されるなどの大きな問題もなく、MW レベルの入射を実現できた。次に耐熱化アンテナを用いて電流駆動性能が可能かどうかを見極めることを目指して、プラズマへの実際の入射を始めた。入射パワーやパルス幅を徐々に増加させるコンディショニング運転によって、炭素製グリルの耐電圧を向上させることから行い、さらに脱ガスを実施して行くこととした。この様な運転では、プラズマとの結合を良くして(反射パワーを下げて)、アンテナ内に発生する高周波の電圧を下げ、不必要な放電をさせない条件を作ることも重要である。

まず、400kW 程度の入射パワーからコンディショニングを開始し、初期にはプラズマにガスや不純物を混入させるケースが繰り返された。そこで、放電を防ぐ目的で、パワー変調(高周波パワーの短時間での入/切を繰り返す)運転にて脱ガスを行うこととした。また、プラズマとの結合特性が良くしようと、LH アンテナ先端部を JT-60U 真空容器の第一壁より 10mm ほど RF ポート内へ引き込んだ状態から 5mm だけ挿入し、結合の改善を図った。その結果、900kW-23 秒(パワー変調を行っているので実効的な入射時間は約 18.1 秒)、入射エネルギー~16MJ (図 4-1) の入射を達成した。ステンレス製 LH アンテナの入射実績(入射パワー~2MW、入射エネルギー11MJ)と比較すると、入射パワーはやや低い物の入射エネルギーは 1.5 倍と大きく上回った。

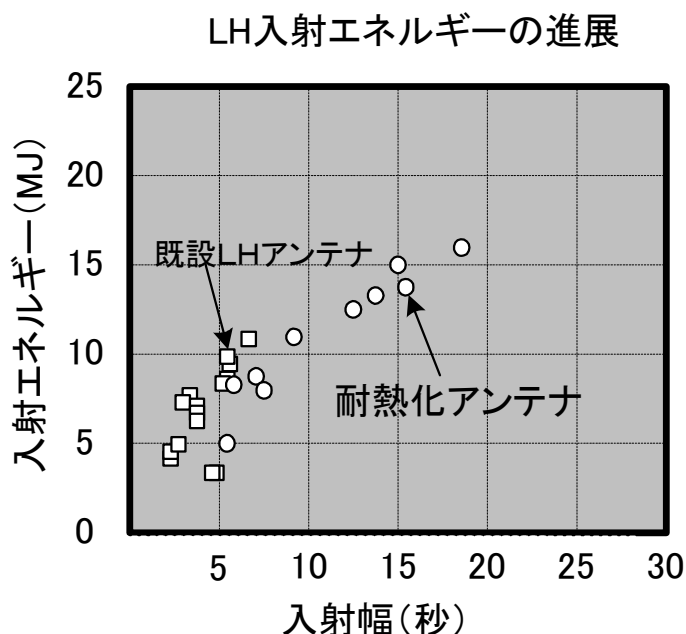


図 4-1 入射実績

炭素製グリルを用いた、耐熱化アンテナの電流駆動の一例を図 4-2 に示す。初期的なコンディショニングの段階において、比較的高い約 $1.6 \times 10^{19} \text{ A/W/m}^2$ の電流駆動を実現している。この値はステンレス製アンテナで得られる平均的な電流駆動性能に相当する。世界で初めての炭素製グリルを用いて、LH アンテナとしての十分な性能を示すことが出来た⁴⁾。

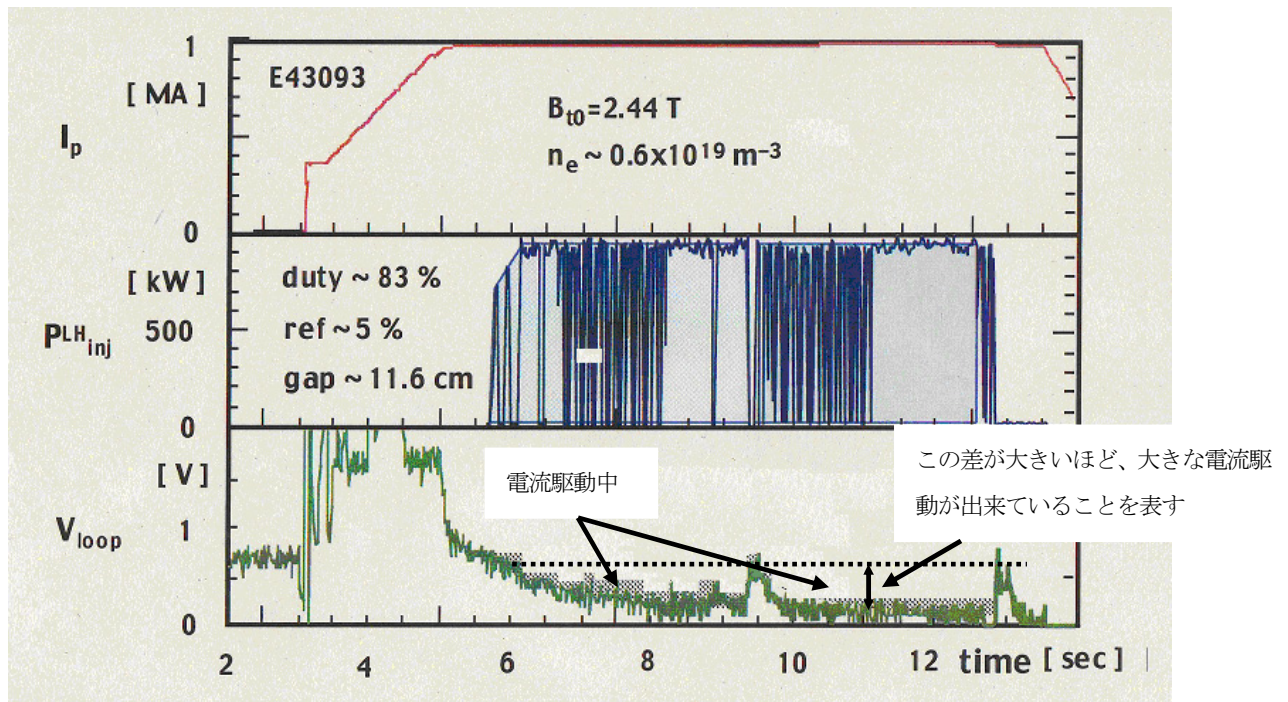


図 4-2 LH アンテナによる電流駆動の一例

4. 2 パワー入射後の LH アンテナ先端部の観察

1 年間の実験運転の終了後に、JT-60U 真空容器内部に入り LH アンテナ先端部の経過観察を行った。(図 4-3)。以下に耐熱化 LH アンテナ先端部の各状態を述べる。



図 4-3 運転終了直後の耐熱化アンテナ

1 列のアンテナ先端部の外観を図 4-4 に示す。1 列は炭素繊維材(CFC)を使用し、ガードリミタの役割も兼ねている。1 列の炭素製グリルの表面は綺麗である。昇華や欠損は見られない (図 4-4-a)。ステンレス製のベース部分では一部に溶融が見られる。銅製の電気接触子は、フレームの部分は残っているが、仕切り板部分は無くなっている (図 4-4-b)。改善が必要である。やはり、固定しておかないと放電の原因にもなる。また完全な接触も得られないと思われる。



(a) 炭素製グリル表面



(b) ベース部と電気接触子

図 4-4 1 列アンテナ先端部

2 列のアンテナ先端部を図 4-5 に示す。2 列の炭素製グリルは等方性黒鉛製である。炭素製グリルの表面は綺麗である。昇華や欠損は見られない (図 4-5-a)。ベース部も溶融は見られない。銅製の電気接触子はフレームの部分は残っているが、仕切り板部分は無くなっている (図 4-5-b)。改善が必要である。



(a) 炭素製グリル表面



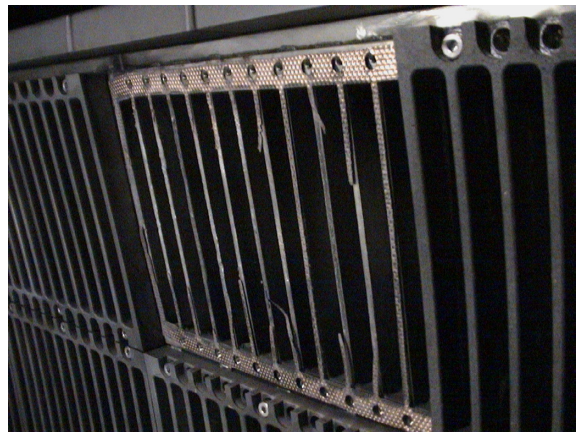
(b) ベース部と電気接触子

図 4-5 2 列アンテナ先端部

3 列のアンテナ先端部を図 4-6 に示す。3 列の炭素製グリルは等方性黒鉛製である。炭素製グリルの表面は綺麗である。昇華や欠損は見られない (図 4-6-a)。ベース部は溶融もなく綺麗である。銅製の電気接触子はフレームの部分は残っているが、仕切り板部分は無くなっている (図 4-6-b)。



(a) 炭素製グリル表面



(b) ベース部と電気接触子

図 4-6 3 列アンテナ先端部

4 列のアンテナ先端部を図 4-7 に示す。4 列はは 1 ブロック同様に炭素繊維材(CFC)を使用し、ガードリミタの役割も兼ねている。炭素製グリルの表面は綺麗である。昇華や欠損は見られない(図 4-7-a)。ベース部は仕切り板中央部で、熔融したように見える。電気接触子はフレームの部分に残っているが、仕切り板部分は無くなっている(図 4-7-b)。



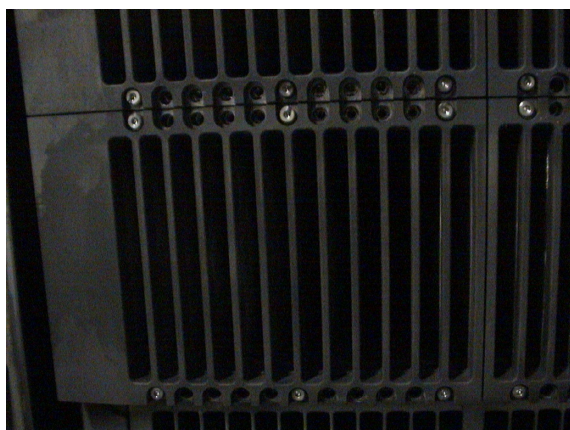
(a) 炭素製グリル表面



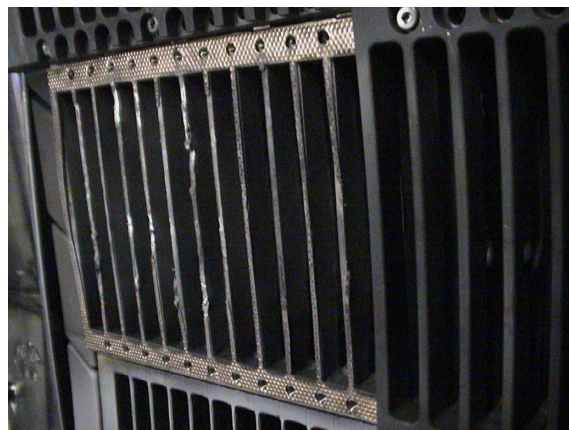
(b) ベース部と電気接触子

図 4-7 4 列アンテナ先端部

5 列アンテナ先端部を図 4-8 に示す。5 列は等方性黒鉛製であるが、ガードリミタの役割も兼ねている。炭素製グリルの表面は綺麗である。昇華や欠損は見られない(図 4-8-a)。ベース部の一部に熔融が見られるが、飛散はしていない。電気接触子はフレームの部分に残っているが、仕切り板部分は無くなっている(図 4-8-b)



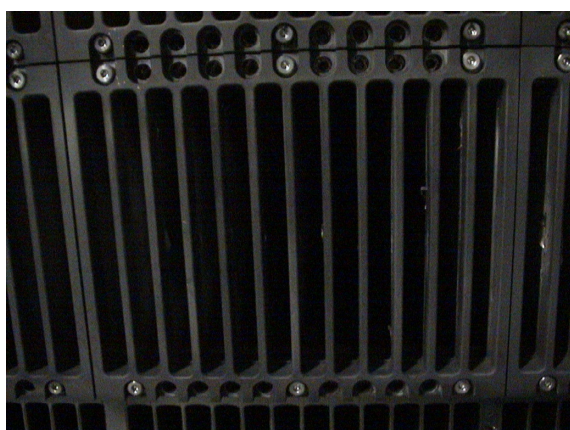
(a) 炭素製グリル表面



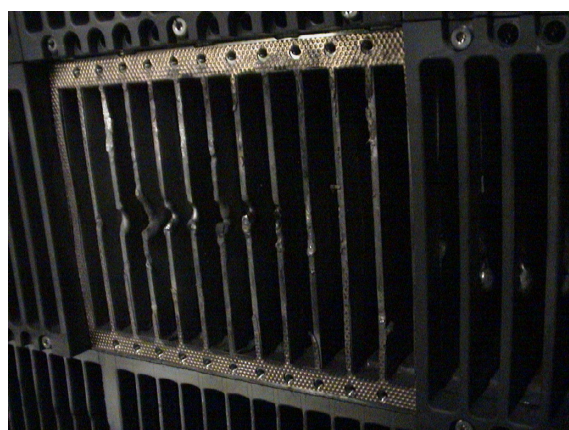
(b) ベース部と電気接触子

図 4-8 5 列アンテナ先端部

6 列のアンテナ先端部を図 4-9 に示す。6 列は等方性黒鉛製である。炭素製グリルの表面は綺麗である。昇華や欠損は見られない (図 4-9-a)。ベース部は中央部付近で溶融が見られ、えぐられたようにアンテナ奥方向に 1~2cm 溶融しているが、溶融物の飛散は見られない。電気接触子はフレームの場所に残っているが、仕切り板部分は無くなっている (4-9-b)。



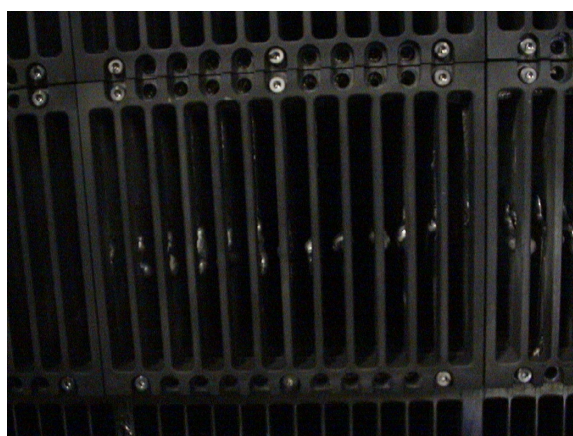
(a) 炭素製グリル表面



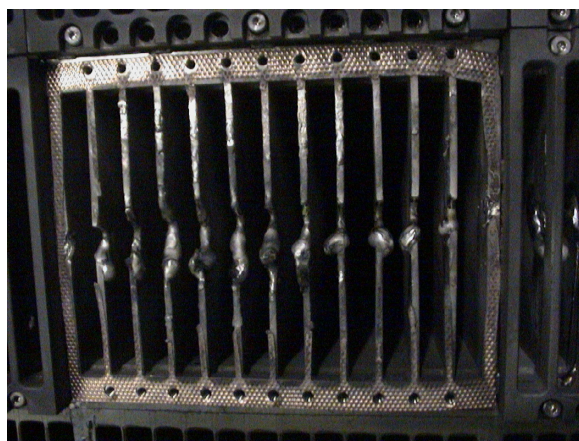
(b) ベース部と電気接触子

図 4-9 6 列アンテナ先端部

7 列のアンテナ先端部を図 4-10 に示す。7 列は等方性黒鉛製である。炭素製グリルの表面は綺麗である。昇華や欠損は見られない (図 4-10-a)。しかしステンレス製ベース部の中央付近 (電界強度が高い場所) において、激しい溶融が見られる。溶融したステンレスはその場で固まりのようになっている。溶融はしているが、飛散はしていない。一度溶融したことで、それが引金となってさらに溶融が進んだと思われる。本来であれば、LHRF 装置には LH アンテナ先端部付近で高周波放電が発光した場合、高周波の入射を一時的に中断し、高周波放電による高熱負荷から LH アンテナを保護する装置があり、このようなダメージとはならないはずであった。銅製の電気接触子はフレームの部分に残っているが、仕切り板部分は無くなっている (図 4-10-b)。



(a) 炭素製グリル表面



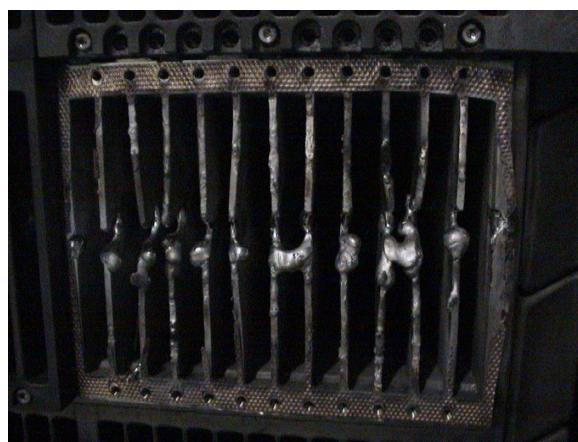
(b) ベース部と電気接触子

図 4-10 7 列アンテナ先端部

8 列のアンテナ先端部を図 4-11 に示す。8 列はは等方性黒鉛製である。またガードリミタの役割も兼ねている。炭素製グリルの表面は綺麗である（図 4-11-a）。ステンレス製ベース部の中央付近（電界強度が高い場所）において、顕著な溶融が見られる（図 4-11-b）。8 列の仕切り板は過大な熱負荷が中央部に集中したため大きく湾曲し一部には亀裂も見られる。溶融したステンレスはその場で固まりのようになっている。溶融はしているが、周辺に飛散はしていない。電気接触子はフレームの部分に残っているが、仕切り板部分の多くは無くなっている。



(a) 炭素製グリル表面



(b) ベース部と電気接触子

図 4-11 8 列アンテナ先端部

1 列から 8 列までの銅製の電気接触子の多くは損失している。その理由は次のように考えている。ベース部の仕切り板は高周波放電やプラズマからの入熱で伸びようとする。しかし、ベース部は上下が固定されているために仕切り板は湾曲せざるおえない。一方、電気接触子は仕切り板に引きずられるが、必ずしも同じようには変形せず、一部がむき出しになって放電したと推測される。

また、炭素製グリルがほとんど損傷を受けなかった理由は以下のように考えられる。炭素製グリルはベース部とネジ止めされているが、炭素製グリルの仕切り板とベース部の仕切り板部分は炭素材と

ステンレス鋼の熱膨張率の相違を考慮して、アンテナ奥方向に垂直な面で（従って、グリルとベース部・仕切り板が接触する面は同一平面になるように仕上げている）スライドするように設計しているので、炭素製グリルの仕切りはベース部の仕切り板からの垂直方向の応力を受けないようになっている。また、熔融、湾曲の原因である過大な熱入力の原因は入射しようとしていた高周波パワーであると考えられるため、ベース部の仕切り板での高周波放電にそのパワーの多くが消費され、その結果、炭素製グリルでは過大な熱入力が無かったと思われる。そのため、ステンレス製ベース部の多数の仕切り板では湾曲等の変形が発生したが、炭素製グリルの仕切り板では湾曲が発生しなかったと推測される。

一方、7列及び8列のベース部の仕切り板で特に著しい熔融が発生したのは、アンテナ先端部の損傷を防ぐために放電光を検知して高周波の入射を止めるアンテナ先端部保護回路が調整不良等で正常に機能しなかったためであることが、運転後に判明した。

4. 3 LH アンテナ先端部の補修

約1年間の運転でLHアンテナ先端部がダメージを受けたのでダメージ対策を行った（図4-12）。最初に炭素製グリルを外した。次にステンレス製のベース部と、炭素製グリルの間に挟めている銅製の電気接触子を剥がした。電気接触子は場所によっては、ベース部に溶着しており剥がすのが非常に困難であった（図4-13）。ベース部の仕切り板は、場所によっては10mm程度アンテナ奥方向に熔融しており、そのような仕切り板には、ステンレスのあて板を製作し、継ぎ足し溶接により修復を行った。軽度な熔融の仕切り板には、肉盛り溶接を行って修復を行った（図4-14）。そして、継ぎ足しや肉盛り溶接を行った仕切り板は、小型サンダーやリューターを使用して滑らかに仕上げた。修復するとき特に注意したのは、仕切り板の板厚より削らないように注意をした。なお7列および8列のベース部については、仕切り板の溶着部を除去したのみで修復は行っていない。そしてベース部のみで、次回から1～6列の運転を行うことにした。

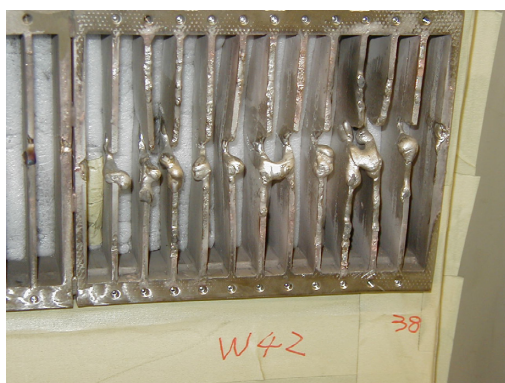


図 4-12 ダメージを受けたベース部



図 4-13 熔融部の除去

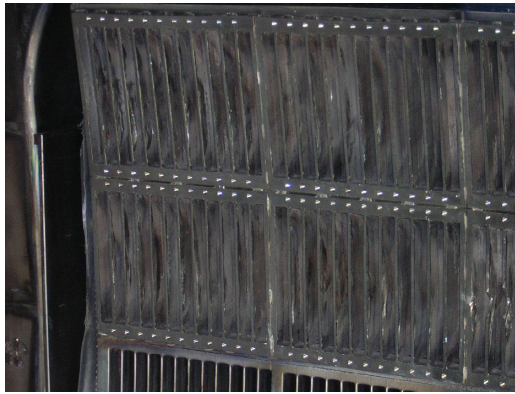


図 4-14 補修終了

また LH アンテナの側面や上下には、炭素製のガードリミタが必要であるが（図 4-15）既設の LH アンテナにベース部のみを取付けた状態に合う、ガードリミタも新規に製作し取付けた。

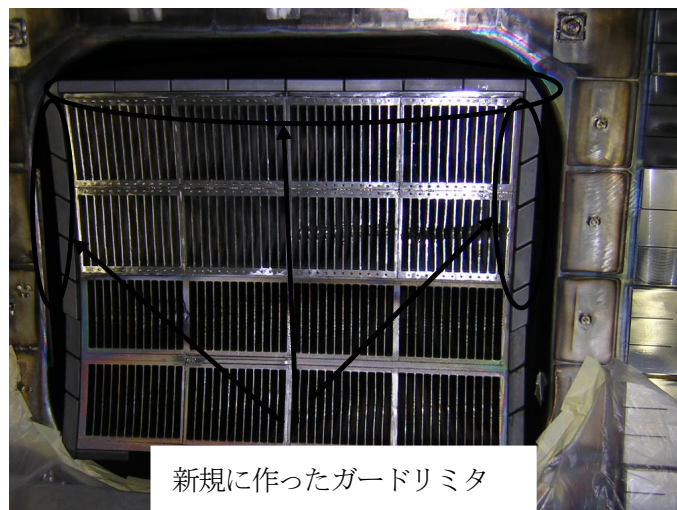


図 4-15 ガードリミタの変更

5. まとめ

LH アンテナの先端部は、プラズマからの熱・高速イオン・高周波放電により熔融し、入射性能の劣化や溶けた先端部材料(主にステンレス鋼)がプラズマへ混入し悪影響を及ぼすなどの問題があった。そこで、LH アンテナ先端部に耐熱性に優れた炭素製グリルを取付けた、耐熱化アンテナを JT-60U に導入した。

炭素製グリルを先端部に取付けた耐熱化アンテナで、JT-60U プラズマへ大電力の高周波の入射を実施し、従来を上回る入射エネルギー16MJ を達成した。また、電流駆動特性は $1.6 \times 10^{19} \text{A/w/m}^2$ と十分高く、従来のステンレス鋼製アンテナと同程度であり、炭素材で作られた耐熱化アンテナが十分な流駆動の性能を持つことを世界で初めて確認した。

一方、約1年間の運転後に外観観察を行ったところ、電気接触子付近で高周波放電によるダメージがあった。特に放電検知回路の調整が不十分であった7列と8列のベース部の損傷が酷く、ステンレス鋼製のベース部は過大な熱入力により湾曲した。今後は、炭素製グリルと電気接触子の密着を上げることや、電気接触子の材質や構造を変更する等の改良を検討中しており、開発研究を引き続き進めている。

謝辞

JT-60U における炭素製先端部を用いた LH アンテナの運転実績をまとめるにあたり、終始ご協力をいただいた高周波加熱システム開発グループの方々、また住友重機(会社)の方々に感謝いたします。また終始御助言、御指導を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いたします。

参考文献

- 1) M. Seki, et al., Development and operation of the LHRF system on JT-60U, Fusion.Sci.Tech, **42** (2002) 452-466.
- 2) M. Seki, et al., R&D of the heat-resistant LH antenna, Fusion Eng. Design, **56-57** (2001) 581-585.
- 3) S.Maebara et.al., Development of cold isostatic pressing graphite module for a heat-resistant lower hybrid current drive antenna, Review of Sic.Inst, **76** (2005)053501-1-053501-7.
- 4) M. Seki, et al., Performance of LH antenna with carbon grill in JT-60U, Fusion Eng. Design, **74** (2005) 273-277.

付録

1. 耐熱化アンテナの取付け作業

既設の LH アンテナにステンレス製のベース部や炭素製グリルを取付けるための条件は非常に厳しい。すなわち、アンテナ先端部は JT-60U 真空容器内部にあり、構造上損傷したアンテナ先端部だけを取外して持ち出して加工することができない。さらに放射線管理区域内にあり、また JT-60U の性能を決定する重要部の真空容器内で作業をしなければならない。したがって補修作業時にできる削りクズなど飛散しないように細心の注意が必要である。

本作業の手順や注意事項を以下に説明する。耐熱化 LH アンテナを取付けるのは、図 1 に示すうち、既設 LH アンテナの上部 2 段の 8 ブロックである。

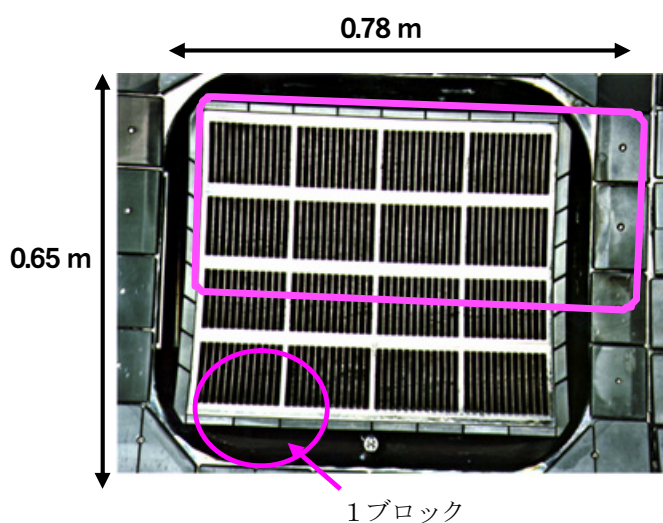


図 1 LH アンテナ先端

(1) 既設 LH アンテナ先端部の修繕作業

まず、LH アンテナ周辺の第一壁タイルの取外しを行い、その後、図 2 に示すように、8 ブロック周囲のガードリミタの取外しを行った。ガードリミタは、プラズマからの熱負荷を受け、LH アンテナを保護する炭素材である。耐熱化アンテナの取付け作業の支障になるので一時的に取外すものである。

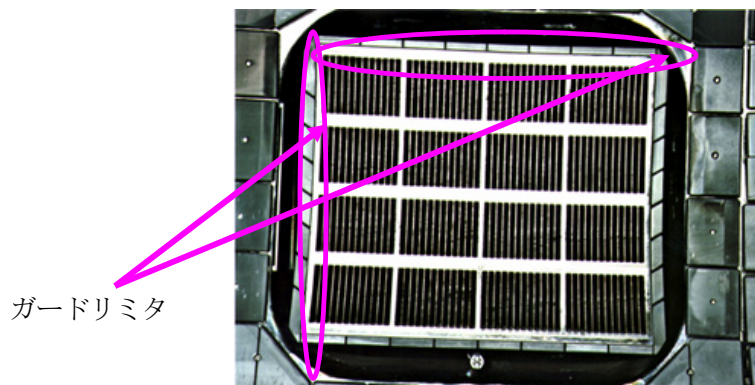


図 2 ガードリミタの取外し

既設 LH アンテナ先端部の切削時に、切り粉等が仕切り板奥へ侵入しないように、既設 LH アンテナの仕切り板間に発泡スチロールを挿入した（図 3）。

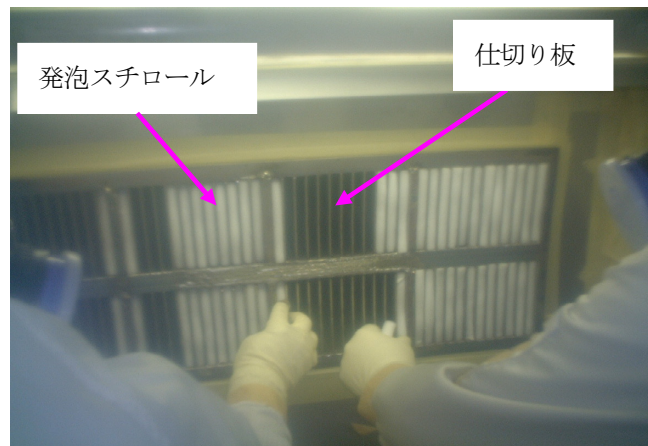


図 3 発泡スチロールの挿入

さらに、図 4 のようにブレードホースも挿入し確実にふさいだ。



図 4 ブレードホースの挿入

次に、アンテナ先端部へ図 5 に示すような（高さ 0.75m、幅 1.0m、奥行き 0.3m）の亚克力製グローブボックスの設置を行った。JT-60U 真空容器へ、LH アンテナ先端部の切り粉などが飛散させずに、作業するためである。切り粉等吸引用掃除機を接続し、作業内容に応じて随時設置（切削時）／取外し（溶接時等）を行った。



図5 グローブボックスの設置

ベース部を取付けるために図6のようにグローブボックス内で、LHアンテナ先端部の補修を行った。最初は、グラインダー等を使い、先端部を荒く削り。さらに、図7のようにリユーター(図7-a)や鉄ヤスリ(図7-b)を使いアンテナ先端の仕切り板を修正した。

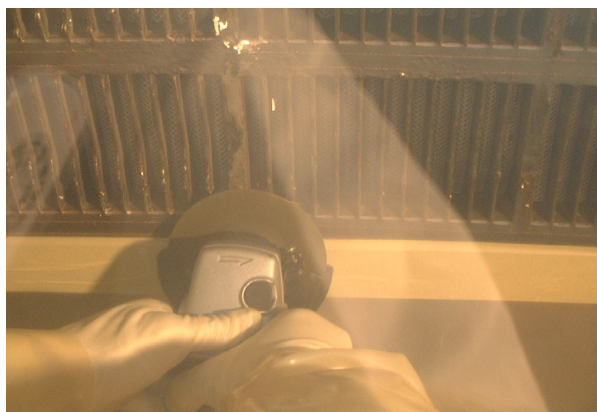


図6 荒削り 1



(a)



(b)

図7 荒削り 2

溶融した小玉の除去や形状の修正を行った後、本仕上げ作業のために、アンテナ先端部に肉盛り溶接をした。溶接時アンテナ先端部の変形を防ぐために、冷却の用の銅板を仕切り板間に挿入をした(図8)。銅板を仕切り板間に挿入することによって、約1時間で冷却が行えるようになり、溶接の待ち時間を短縮することができた。

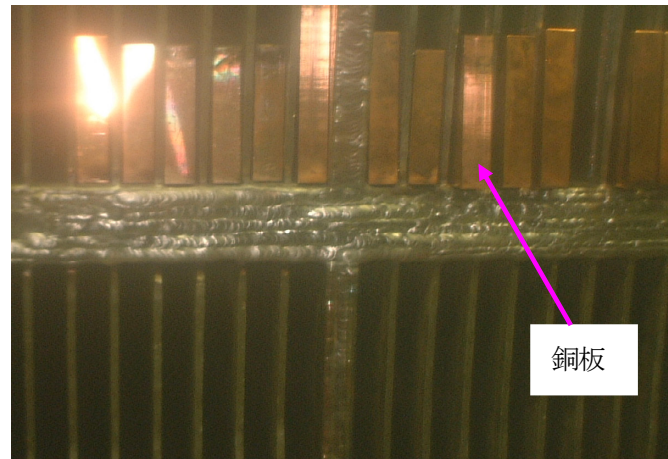


図8 肉盛り溶接

図9に示すように、グラインダーで既設 LH アンテナ先端の粗仕上げを行った。

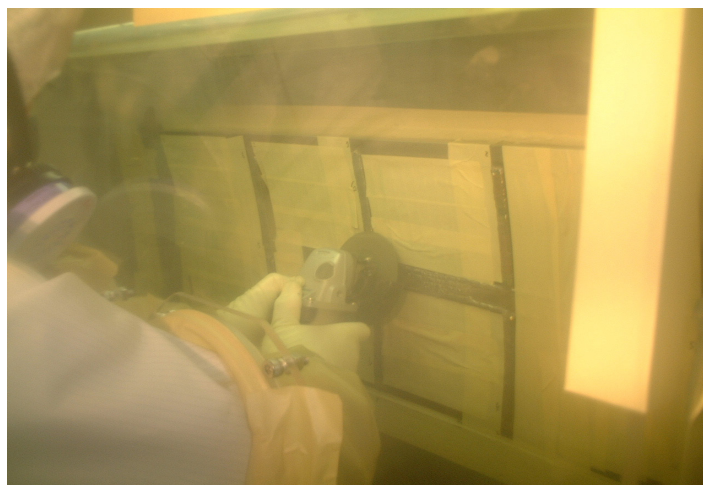


図9 粗仕上げ

粗仕上げが終了後に、図10で示すような専用のアクリル製のRゲージを使用し、LH アンテナ先端部が、初期の曲面になっているかを確認した。

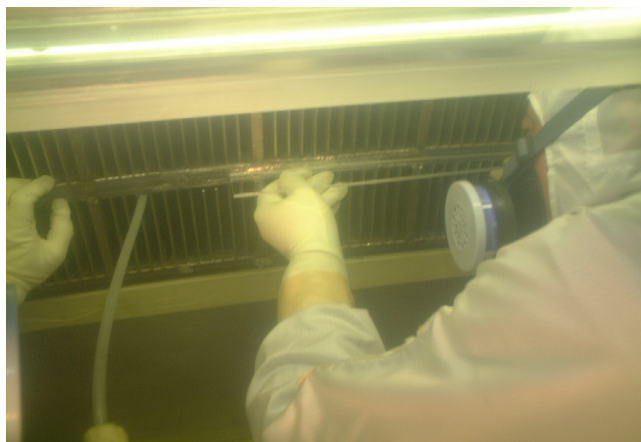


図 10 形状確認

最後に、図 11 に示すように、既設 LH アンテナ先端部へステンレス製のベース部を当てながら確認作業を行った。



図 11 新規ベース部の合わせ確認

そして、図 12 に示すように、電動ヤスリ等にて端面の最終仕上げ作業を行った。



図 12 端面の最終仕上げ

以上により既設 LH アンテナ先端部の修繕が終了した（図 13）。

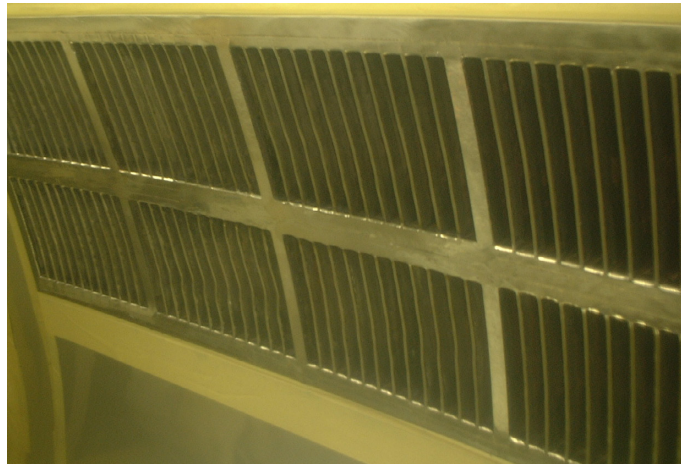


図 13 仕上げの完了

(2) ベース部の取付け作業

ベース部はステンレス製のフレームと仕切り板から成る。フレームには炭素製グリル取付け用のネジ穴があり仕切り板を差込むための溝が設けてある。仕切り板は、最初フリーな状態であり、大きめに作られている。

既設 LH アンテナ先端部の修繕の終了後に、既設 LH アンテナの仕切り板へ、溶接して接続する新規の仕切り板を当てながら仕切り板をケガキ、仕切り板の形状の調整を行った（図 14）。既設 LH アンテナの仕切り板が溶接などにより変形しており一枚一枚の形状に差が有るためである。



図 14 仕切り板の調整

次に新規フレームに差込みながら、仕切り板同士を合わせてベース側の仕切り板の再調整を行った（図 15）。

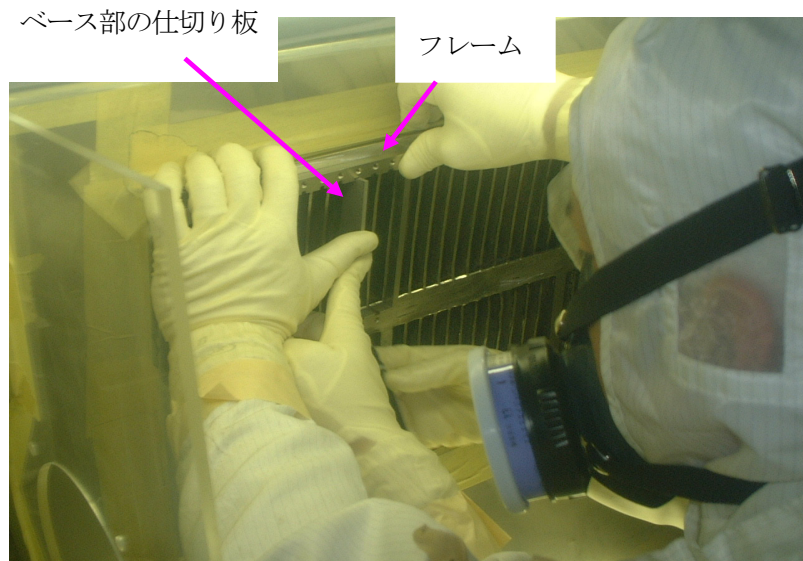


図 15 仕切り板の調整

仮溶接時に新規フレームがゆがまないように、フレーム間の隙間に図 16 のような 1.2mm 程度の板の取付けを行った。

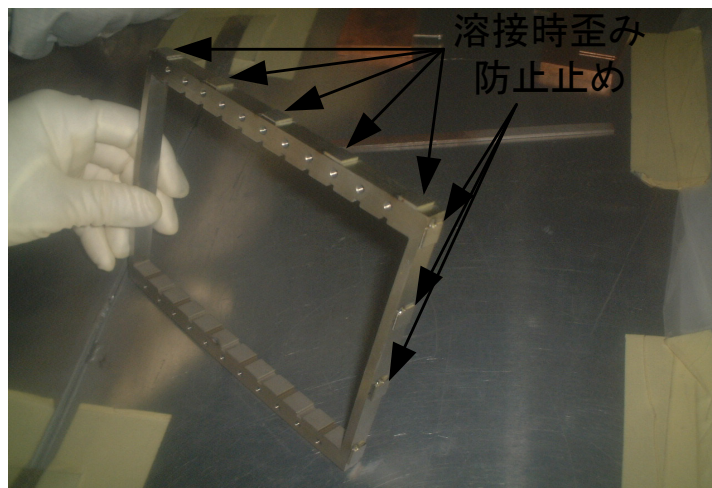


図 16 ゆがみ防止

仕切り板の溶接には図 17 のような特殊な細いトーチを使い、せまい仕切り板のすき間幅(1.2 cm)から、グリルの内部(奥行き 1.5 cm)の溶接部まで完全に溶接できるようにした。なお模擬のベース部を使用しトーチの選択や溶接条件出しを行った。図 18 のように、溶接はグリルの仕切り板の内面を全周にわたってすき間なく溶接をした。これは、高周波特性が変化しないようにするためである。ステンレスの酸化防止として、ガス(アルゴンガス)の流量を多くすることにより、酸化の防止をしている。



図 17 特殊な細いトーチ

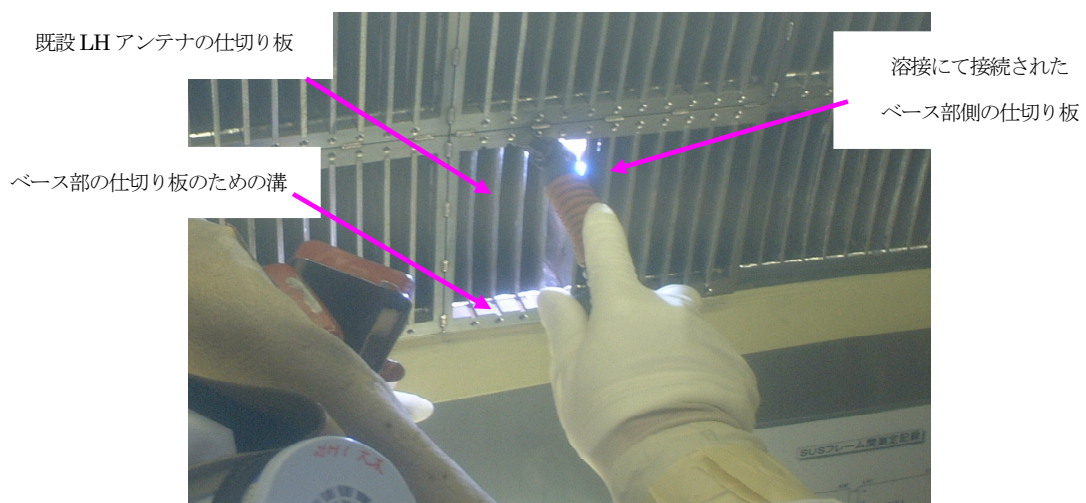


図 18 ベース部の溶接

仕切り板とフレームの本溶接作業時に、ゆがみ防止のために、銅板の差込み(図 19-a)を行った。さらに銅製のクサビ(図 19-b)も刺し込んでゆがまないようにした。



(a)



(b)

図 19 ベース部及び仕切り板本溶接のゆがみ防止策

ベース部側の仕切り板とフレームの溶接が完了後、仕切り板を削るために、既設 LH アンテナ先端作業と同様に、仕切り板間に発砲スチロールを挿入した（図 20）。

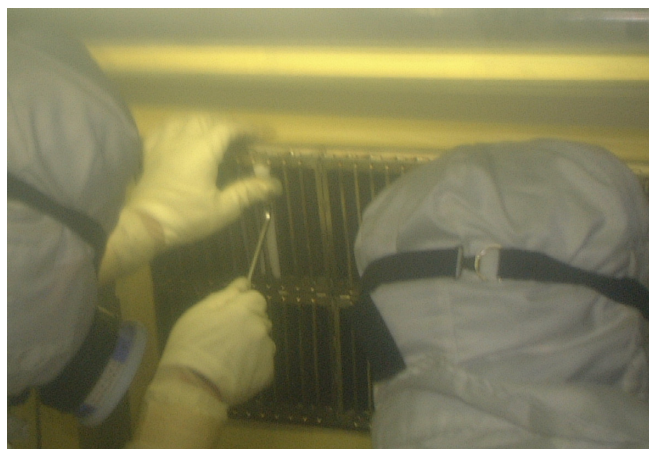


図 20 発泡スチロールの挿入

また、ベースフレームのボルト穴に不純物が混入しないように、図 21 に示すようなネジの取付けを行った。



図 21 ネジの取付け

ベース部の仕切り板の形状は、調整をしたもののやや長めにしておき、本溶接後にわずかに出ている仕切り板の先端部を、グラインダーで面出しを行った。(図 22)



図 22 仕切り板切断

グラインダーである程度削ったら、図 23 のようにすり合わせ作業を行い、面制度を改善させた。



図 23 検査材（新明丹）によるすりあわせ作業

フラットな面に仕上がったベース部表面を図 24 に示す。



図 24 ベース部仕上げの完了

(3) 炭素製グリルの取付け

最後に炭素製グリルの取付けを行う。ステンレス製のベース部と炭素製グリルの間には、図 3-5 で示すような銅製のエンボス加工を施した電気接触子を挟み込んだ。これはステンレス製のベース部との電氣的接触の改善のためである。挟み込む際に注意したのは、グリルの仕切り板部からはみ出さないように取付けることである。はみ出してしまうと、電界がそこに集中して放電の原因となるからである。

炭素製グリルは、メンテナンス性や修理のしやすさを向上させるため、22 個のボルトによる脱着式を採用した。固定したボルトが運転中の電磁力や真空容器の振動の影響で回らないように、図 25 のような廻り止めで固定もしている。この廻り止めも、先端グリルからツメ部分がはみ出さないように注意をした。



図 25 廻り止め取付け

ベース部へ炭素製グリルをネジで取付ける作業では、 $1\text{ kg} \cdot \text{cm}$ で1回、 $2\text{ kg} \cdot \text{cm}$ で2回と、トルク管理を行いながら割らないように慎重に締めつけを行った（図 26）。



図 26 ボルトの本締め

廻り止めをラジオペンチでツメを曲げて固定する（図 27-a）。このときに、ツメが炭素グリルよりプラズマ側に出ないように注意をした（図 27-b）。



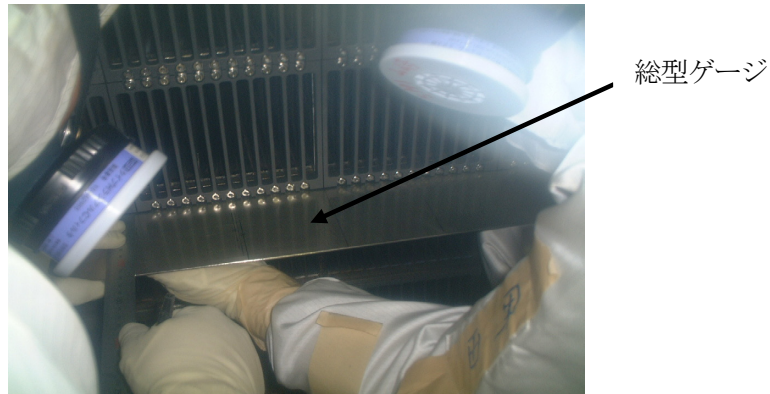
(a)



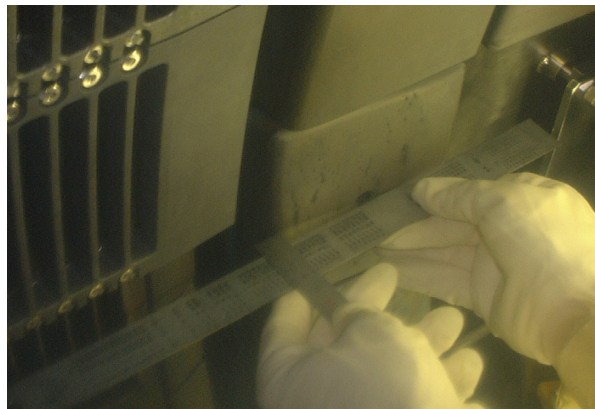
(b)

図 27 廻り止め固定

炭素製グリルの取付けが正常かどうか総型ゲージを用いて、隣り合うカーボン板表面の段差が $\leq 0.3\text{mm}$ 以下であることを確認した (図 28-a)。そして、総型ゲージを用いて、アンテナ先端部と JT-60U 真空容器の第 1 壁との位置関係を測定した (図 28-b)。



(a)



(b)

図 28 寸法測定

既設 LH アンテナ先端部へ耐熱化アンテナ (ベース部+炭素製グリル) が設計通りに、取付けられたことと、新規に作成したガードリミタを上部に取付けたことを (両サイドは炭素製グリルが兼ねている) 確認し、図 29 に示すように取付けは完了した。なお LH アンテナ先端部の形状は、既設 LH アンテナ先端部と同形状である。

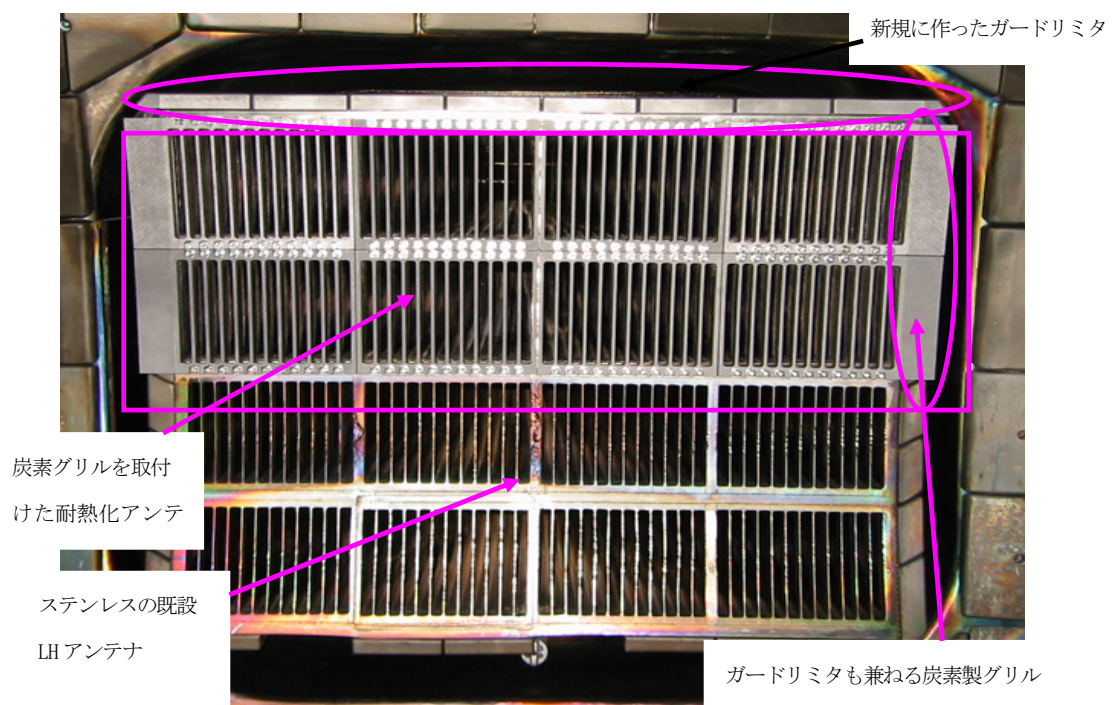


図 29 耐熱化アンテナの取付け完了

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
物質の量	モル	mol
光の度	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
波数	毎メートル	m ⁻¹
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 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	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

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	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad		m・m ⁻¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
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	m ⁻¹ ・kg・s ⁻²
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg・s ⁻²
工率，放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg・s ⁻³
電荷，電気量	クーロン	C		s・A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg・s ⁻³ ・A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² ・kg・s ⁻³ ・A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
磁束	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg・s ⁻² ・A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度 ^(d)	セルシウス度	°C		K
光の度	ルーメン	lm	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
照射度	ルクス	lx	lm/m ²	m ² ・m ⁻² ・cd=m ⁻² ・cd
（放射性核種の）放射能	ベクレル	Bq		s ⁻¹
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，個人線量当量，組織線量当量	グレイ	Gy	J/kg	m ² ・s ⁻²
	シーベルト	Sv	J/kg	m ² ・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った性質をもっ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
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa・s
表面張力	ニュートンメートル	N・m
角速度	ニュートン毎メートル	N/m
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s
熱流密度，放射照度	ワット毎平方メートル	rad/s ²
熱容量，エントロピー	ジュール毎ケルビン	W/m ²
質量熱容量（比熱容量），質量エントロピー	ジュール毎キログラム	kg・s ⁻³
質量エネルギー（比エネルギー）	ジュール毎キログラム	J/K
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	m ² ・kg・s ⁻² ・K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/(kg・K)
電界の強さ	ボルト毎メートル	J/kg
体積電荷	クーロン毎立方メートル	W/(m・K)
電気変位	クーロン毎平方メートル	m・kg・s ⁻³ ・K ⁻¹
誘電率	ファラド毎メートル	J/m ³
透磁率	ヘンリー毎メートル	V/m
モルエネルギー	ジュール毎モル	C/m ³
モルエントロピー	ジュール毎モル毎ケルビン	m ⁻³ ・s・A
モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	m ⁻² ・s・A
照射線量（X線及びγ線）	クーロン毎キログラム	m ⁻³ ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
吸収線量率	グレイ毎秒	m・kg・s ⁻² ・A ⁻²
放射強度	ワット毎平方メートル	m ² ・kg・s ⁻² ・mol ⁻¹
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	J/(mol・K)

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	1 h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1° =(π/180) rad
分	′	1′ =(1/60)° =(π/10800) rad
秒	″	1″ =(1/60)′ =(π/648000) rad
リットル	l、L	1 l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1 Np=1
ベル	B	1 B=(1/2) ln10 (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
電子ボルト	eV	1 eV=1.60217733 (49) ×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1 u=1.6605402 (10) ×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1 ua=1.49597870691 (30) ×10 ¹¹ 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		1 海里=1852m
ノット		1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600) m/s
アール	a	1 a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=10 ⁻¹⁰ m
バール	b	1 b=100 fm ² =10 ⁻²⁸ 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 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm ² =0.1 Pa・s
ストークス	St	1 St =1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G =10 ⁻⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe =(1000/4π) A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx =10 ⁻⁸ Wb
スチル	sb	1 sb =1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal =1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

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
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位		1X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ	fm	1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 metric carat = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	
マイクロン	μ	1 μ =1μm=10 ⁻⁶ m

