プラズマ波動加熱用アンテナとその電磁界解析

沢谷 邦男, 安達 三郎

(東北大学工学部)

(1987年5月6日受理)

Antennas for RF Plasma Heating and the Electromagnetic Field Analysis

Kunio Sawaya and Saburo Adachi

(Received May 6, 1987)

Abstract

The models and the methods to analyze the electromagnetic field radiated mainly from the ICRF antennas are reviewed. The features of some typical antennas currently used and proposed for the ICRF plasma heating are also illustrated. The impedance characteristics of basic antennas obtained by the 2-dimensional finite element method analysis are shown and compared each other. The Faraday shield effects on the half turn loop antenna and the cutoff waveguide aperture antenna are discussed to indicate that the near field distribution and aperture field distribution are significantly altered by the presence of the Faraday shield.

Keywords :

ICRF antenna, rf plasma heating, finite element method, faraday shield effect, loop antenna, cutoff waveguide, aperture antenna, near field, aperture field,

1. まえがき

プラズマの2次加熱法としての高周波加熱・電流駆動には、ICRF帯加熱、速波電流駆動、LHRH帯加熱・電流駆動およびECH帯加熱・電流駆動があり、主たる加熱手段になろうとしている¹⁾。この中で、イオンサイクロトロン周波数帯を用いたICRF加熱は、(1)大電力の高周波源が現在の技術で比較的容易に得られる、(2)高密度プラズマの場合にも使える、(3)イオン加熱と電子加熱を条件によって選択できる、などの特長を有しており、主加熱法として現在最も期待されている²⁾。

一方、ICRF加熱の欠点としては、使用周波数が低く、アンテナやプラズマのサイズが波長に比べて十分な大きさを持たないことが挙げられる。この結果、アンテナの入力インピーダンスの抵抗分がリアクタンス分に比べてかなり小さく、整合条件が厳しくなり、効率の低下と注入電力の制限という実際的な問題を生ずる。

また、光線追跡のような幾何光学的手法を使うことができず、アンテナとプラズマの結合の解析が複雑になるという解析上の問題点もはらんでいる。さらに、後者の問題点に関連して、アンテナ近傍の電磁界やアンテナ周辺に設けられるファラデーシールドの効果などが必ずしも明確にされているとは言い難い。

以上のように、ICRF加熱はその効果が期待されている反面、解析すべき問題と電磁界解析上の困難さを多くはらんでいる。そこで、本稿ではICRF加熱に焦点を絞り、各種アンテナとそれらの電磁界解析に関する現状について解説することにする。

2. ICRF 加熱における電磁界の解析法

ICRF帯の周波数領域では、波長に比べて小さいスケールでプラズマのパラメータが変化するので、幾何光学的な解析が困難であり、またアンテナの存在を考慮した解析が不可欠である。従って、不均質プラズマとアンテナ、さらにはアンテナ周辺に設けられるファラデーシールドをどのように電磁界解析に組み入れるかが問題となる。

以下に代表的な解析モデルについて簡単に述べる。

2.1 不均質プラズマのモデル化

核融合プラズマではプラズマ容器の壁からある距離の範囲は真空であり、そこから徐々にプラズマ密度が増大している。また、プラズマ密度の不均質の他に静磁界の不均質がある。このような不均質プラズマの取り扱い方として、従来

- (1) 真空領域と表面インピーダンスを持つ損失性導体とみなす方法³⁾
- (2) 真空領域と均質プラズマとみなす方法⁴⁾
- (3) 不均質プラズマとみなす方法(均質多層分割法⁵⁾, 有限要素法⁵⁻⁷⁾, Runge-Kutta-Gill法^{8, 9)})

が用いられてきた。また、不均質の種類としては、

- (1) 円筒状またはスラブ状の1次元的不均質⁵⁻⁷⁾
- (2) 非円形ドカマクのような2次元的不均質⁵⁾
- (3) 静電界方向にも不均質である3次元的不均質

としての取り扱いがある。さらに、プラズマの性質として、

- (1) 冷プラズマモデル(衝突の項を導入することにより電力吸収を表現)
- (2) 熱効果を巨視的に考慮した流体モデル
- (3) 熱効果を微視的に考慮した運動論的モデル

がある。

このように多くの不均質プラズマモデルがあり、解析上の容易さからは簡単なモデルが望ましいが、対象とするプラズマに対してどのモデルを採用すべきかは必ずしも明確でない。Fukuyama et. al.⁵⁾は1次元的不均質(スラブモデル)と2次元的不均質のモデルに対してそれぞれ均質多層分割法と有限要素法を使っ

で解析した結果を比較し、プラズマへの電力吸収が強く、また短波長の波動への変換が弱い場合には両者がよく一致することを示した。また、冷プラズマモデルと運動論のモデルによる解析結果も比較しており、入力インピーダンスについては両者がほぼ一致することを示している。今後、これと同様な検討が数多くなされ、各モデルの適用限界を明確にすることが重要である。

2.2 アンテナの電流分布

従来の解析においては、アンテナの電流分布について、これを比較的単純な既知の分布として取り扱っている場合が多かった。例えばアンテナの電流分布を一樣としたり、トロイダル方向とポロイダル方向に周期的に変化する分布を仮定するなど、電流分布を既知としている場合が多い⁵⁻⁷⁾。最近電流分布を未知として、変分法に基づきこれを求める方法が核融合プラズマの研究でも取り入れられるようになってきた^{8, 9)}。電流分布はアンテナ特性を決定する最も基本的な要因のひとつであり、今後解析が高度化するのに伴って、電流分布を未知とした解析の必要性が益々高まっていくものと予想される。

2.3 ファラデーシールドの取り扱い

アンテナの周辺に設けられるファラデーシールドの取り扱いとしては、無限周期構造のシールドの内部表面と外部表面の磁界の比（磁界の透過係数）を用いる方法がある^{10, 11)}。また、ファラデーシールドを設けることによりアンテナ導体に垂直な電界成分が励振されないとする扱いもある^{8, 9)}。後者の扱いは、アンテナ導体に平行な電界成分（横波を使ったICRF加熱ではポロイダル成分）がシールドの内外で連続であるのに対して、垂直な電界成分（トロイダル成分）はシールド面上で零という境界条件（これを異方性境界条件と呼ぶことにする）を用いたことに相当する。前者の扱いの妥当性については、疑問の余地があるが、後者については後で述べるように埋め込み型スロット列アンテナの場合にその妥当性を示すことができる。

3. 各種ICRF加熱用アンテナ

3.1 半ターンループアンテナ

横波を励振するために、従来からトロイダル静磁界に垂直に置かれた半ターンループアンテナが広く用いられてきた。その典型的な構造を図1に示す¹¹⁾。給電同軸ケーブルの中心導体に接続されたアンテナ導体の先端は、戻り線またはプラズマ容器を通して同軸ケーブルの外導体に接続されている。

半ターンループアンテナの長所としては、

- (1) 先端が短絡されているので、ダイポールなどの開放型アンテナと比べてアンテナと戻り線の間の電圧が大きくなること。
- (2) ファラデーシールドを設けることにより、後で述べるように近傍電界の望ましい成分だけを一樣に近い分布で得ることができること。

などが挙げられる。

一方、短所としては、

- (1) アンテナ長が自由空間波長に比べて短く、かつアンテナ導体と戻り線の距離が小さい場合には、アンテナ電流の寄与と戻り線電流の寄与（イメージのアンテナの寄与）が相殺する関係にあることから、放射される電力がアンテナ近傍に蓄えられる磁気エネルギーに比べてかなり小さいこと。
- (2) アンテナが真空容器の内部に突き出しているため、プラズマからの高速粒子がアンテナやファラデーシールドを叩いて、不純物を発生しやすいこと。

が挙げられる。(1)により入力インピーダンスの抵抗分がリアクタンス分に比べてかなり小さくなり、その結果外部に整合回路を設ける必要が生じ、給電回路を複雑なものにする。また、アンテナと整合回路の間の同軸管内に大きな定在波が生じ、アンテナ導入端子や同軸管内で絶縁破壊を生ずる恐れがある。

(1)の対策として、アンテナと戻り線間の距離をできるだけ大きくすると共に、プラズマとの距離を小さくしてプラズマとの結合を良くすることが考えられる。

このためには、戻り線をなくして真空容器を戻り線とすればよい。

(2)の問題点については、アンテナとプラズマを離すことにより改善できそうであるが、これは(1)の対策と矛盾することになる。

半ターンループアンテナを用いた従来の加熱実験から1個のアンテナで扱える電力は、主に上記(1)の問題点から400～700 kWが限界と言われている¹³⁾。また、(2)も重大な問題であることから、実験装置の大型化と高周波の大電力化に伴って、いわゆるキャビティ開口アンテナあるいはリミッタ壁付アンテナへの移行が最近の流れとなっている。以下、これについて述べる。

3.2 キャビティ開口アンテナ

キャビティ開口アンテナはキャビティ内に放射素子を設け、キャビティの開口から電磁波を放射させるものであり、開口部には半ターンループアンテナと同様にファラデーシールド（ファラデースクリーン）が設けられる。

図2に基本的なキャビティ開口アンテナの構造を示す。図2(a)は最も基本的な構造であり¹⁴⁾、(b)は横幅に比べて縦幅が小さく、何段か積み重ねて用いる^{15, 16)}。(c)は放射素子を折り返して長くし、アンテナのイ

図1. 半ターンループアンテナの構造¹¹⁾。

(1: 中心導体, 2: 戻り線, 3, 7: 支持物, 4, 5: ファラデーシールド, 6: 同軸ケーブル, 8: 短絡板)。

インピーダンスを高くしようとするものである¹⁷⁾。(d)は(c)を共相および逆相給電可能としたものである⁹⁾。ところで、これらのアンテナのキャビティ幅を自由空間波長の1/2以上にできれば問題はないが、大型の装置であっても、ポートの制限などから通常カットオフキャビティとなる。従って、プラズマと放射素子が離れる効果と、放射素子がカットオフキャビティ内に置かれる効果が重なり、ループアンテナに比べてプラズマへの結合が相当弱まる恐れがある。なお、キャビティがカットオフになるのを避けるために導波管内部に誘電体を充填する方法も考えられている¹⁸⁾。

このような埋め込み型アンテナと、従来用いられてきたループアンテナの特性を比較するために、有限要素法を用いて2次元解析を行った結果が報告されている⁷⁾。図3にその解析モデルを示す。ここでプラズマとしては、重水素プラズマを仮定し、その密度分布を2乗分布としている。このプラズマを冷磁化プラズマ

図3. 板状アンテナの解析モデルとプラズマの密度分布 (重水素プラズマ, $B_0 = 4\text{ T}$, 周波数: 63.7 MHz , $x_3 = 25\text{ cm}$, $x_4 = 30\text{ cm}$, $w = 6\text{ cm}$, $W = 156\text{ cm}$).

図2. 基本的なキャビティ開口アンテナの構造

図4. プラズマ密度に対する単位長さ当りのインピーダンスの変化($x_2 = 5\text{ cm}$, $s = 2\text{ cm}$).

として扱い、波の吸収効果をイオンの衝突 ν_i を仮定することにより考慮している。中心密度 N_0 を $0 \sim 15 \times 10^{19}/\text{m}^3$ に変化させた場合の単位長さ当りのインピーダンス (Ω/m) を図4に示す。破線は Adam⁴⁾ による値である。有限要素法による計算では、衝突の大きさ $Z_i = \nu_i / \omega$ を変化させている。プラズマの存在により若干のリアクタンスの低下がみられる。ただし、Adamによる結果では10%程度のリアクタンスの低下であるのに対し、有限要素法によるリアクタンスの低下は4~5%程度である。これはAdamによる計算ではプラズマの分布を平均化してステップ状分布にしているため、有限要素法における2乗分布の結果よりもプラズマの効果が強く出ているためと考えられる。抵抗分については、ある程度まで密度が高くなると飽和する傾向がみられる。有限要素法の結果において、衝突が少ないときに振動しているのは、波が減衰しきらずに反射波と干渉しているためである。

表1は図5に示される各種アンテナの2次元モデルを上述の方法を使って解析し、単位長さ当りのインピーダンスをまとめたものである⁷⁾。また、整合がとりにくく絶縁破壊の起きやすさを示す目安として X/R の値も示してある。なお、整合のとりにくさを表わすより実際的な定数として、規格化電圧 $\bar{v} = X/\sqrt{R_0 R}$ が提案されて

図5. 各種変形アンテナの構造

表1. 各種変形アンテナの単位長さ当りのインピーダンス

 $(N_0 = 4 \times 10^{19} / \text{m}^3, Z_i = 2).$

	キャビティの深さ d(cm)	Reactance R (Ω/m)	Resistance X (Ω/m)	X/R
TYPE 1	-----	93.9	4.34	21.6
TYPE 2	3	91.1	2.64	34.5
TYPE 3	3	91.3	2.79	32.7
	7	133.6	6.37	21.7
TYPE 4	3	91.8	1.39	66.2
	7	123.6	2.63	46.9
	11	139.1	3.45	40.4
TYPE 5	3	140.2	11.19	12.5
	7	151.6	13.38	11.3
	11	152.9	13.65	11.2

いる¹⁹⁾。ここで、 R_0 は給電線路の特性インピーダンスである。これは、アンテナを整合回路によって整合させた場合の給電電圧が、 $X=0$ 、 $R=R_0$ のときの何倍になるかを表わす定数であり、通常そうであるように $R \ll X$ であるとしている。ただし表1では、簡単に X/R の値で評価してある。

Type 1は通常の半ターンループアンテナに相当し、Type2はこれにリミッタ壁が設けてある。リミッタ壁を設けることにより抵抗分が61%に小さくなり、 X/R の値は1.6倍にもなる。Type3はType2のリミッタにフランジを取り付けたものであり、Type2とはほぼ同じ特性が得られる。ただし、キャビティ部を深くすることにより、Type1と同程度の X/R となる。埋め込み型のType3では放射素子がプラズマから離れ、かつキャビティ部がカットオフとなるため、キャビティの深さ $d=3\text{ cm}$ において、Type1に比べて抵抗が32%に落ち込み、 X/R は3倍にもなる。キャビティを深くすることによりこの値をある程度改善できるものの、Type1を上まわるには到らない。また、図2(a),(b)の構造に対しては空気または誘電体を負荷とした3次元解析も行われており^{14, 15)}、上記のプラズマを考慮した2次元解析との結果と定性的に一致した結果が得られている。この解析によれば、アンテナの特性を改善するためにはキャビティの幅を可能な限り大きくすると共に、その深さをある程度以上にとることが重要である。また、表1にも表われているようにプラズマと放射素子の距離を小さくできるか否かも重要である。例えば、JETのICRFアンテナにおいて、図2(d)のアンテナ⁹⁾およびこれと同様の寸法でリミッタ壁がない場合⁸⁾の3次元解析によれば、両者のインピーダンス特性はほぼ等しいという結論が得られている⁹⁾。これはリミッタ壁を設けることにより抵抗分が下がるという上述の結論と一見矛盾するようである。しかしながらリミッタ壁がある場合の計算では、ない場合に比べてプラズマと放射素子の距離を2/5にしていることに注意すべきである。

このようにキャビティ開口アンテナはインピーダンス整合の点で不利になる可能性をもっているが、キャビティ内になんらかの工夫を加えることが可能であることから、整合機能を持たせたアンテナが提案されている。例えば図2(a)において放射素子になるべくプラズマに近づけて結合を強くしたUスロットアンテナ²⁰⁾および、このアンテナの変形として、キャビティ内に誘電体を充填して、導波キャビティとすることをねらったもの、Uスロットアンテナに整合機能を持たせた構造、が提案されている²¹⁾。また、開口部の内側に3枚の導体板を設け、外側の2枚の板を動かして整合機能をもたせたカットオフキャビティアンテナ³⁾、放射素子の後方に導体の羽根を2枚設けて、これらを回転させることにより整合をとるもの²²⁾、放射素子の付近に可変リアクタンス付ポストを設けたポスト装荷キャビティアンテナ²³⁾なども提案されている。

これらキャビティ開口アンテナのはかに、伝送系としてT型リッジ導波管を半分にした構造を用いたリッジ導波管スロット結合器が提案されている²⁴⁾。

4. ICRF 加熱用アンテナにおけるファラデーシールドの効果

4. 1 半ターンループアンテナ

3. 1節で述べたループアンテナには静電シールド(ファラデーシールド)が設けられるのが普通である。

ファラデーシールドの効果として従来次のことが言われていた¹²⁾。

- (1) 高速粒子からアンテナ導体を保護する。
- (2) アンテナに垂直な電界成分を遮蔽する。
- (3) 準静電界成分を遮蔽し、いわゆる電磁界成分だけを透過させる。

Fortgang and Hwang¹²⁾は空気を負荷としてインピーダンスおよび近傍の電位と磁界の分布を測定した。このなかで、電位分布から電界を求めた結果(2)の効果が、また磁界分布がシールドの有無に関係しないことから(3)の効果が、それぞれ確認されたと結論づけている。また、図6の簡単化されたモデルを使った精密な解析も行われ、インピーダンス及び近傍電界が求められている²⁵⁾。この解析ではプラズマの存在を考慮していないが、このことは近傍界の議論を行う上であまり問題にはならないと考えられる。また、モデルは簡略化されているが、アンテナの電流分布を未知として、ガラーキン法(変分法と等価)²⁶⁾を適用しており、かなり精度の良い解析であるといえる。この計算結果によれば、上記(2)、(3)の効果のほかに

- (4) 電界のアンテナ軸方向成分を、ファラデーシールドを設けない場合、給電点近傍だけに大きなピークを持つ分布から、アンテナ全体にわたるなめらかな分布に変える。

効果があることが示された。図7(a)~(c)に近傍の電界強度分布を示す。これらの図に上記(2)、(4)の効果がそれぞれ表われているのが分る。また、(3)の効果は図8に現れている。即ち、全電界 E を

$$E = E_r + E_s \quad (1)$$

と分けて考える。ここで、

$$E_r = k^2 \Pi, \quad E_s = \nabla \nabla \cdot \Pi \quad (2)$$

であり、 Π はヘルツベクトル、 E_s は準静電界成分を表わす。図8には全電界 E および、全電界から準静電界成分 E_s を除いた成分 E_r の y 成分が示されている。両者はほぼ一致し、ファラデーシールドには(3)の準静電界成分を遮蔽する効果があることが確認された。さらに、図9に示されるように、シールド導体は等間隔に設けるのが良いという結論も得られている²⁵⁾。

図6. 半ターンループアンテナの解析モデル²⁵⁾。

図 7. ループアンテナ近傍の電界強度分布 (給電点電圧: 1 V)。

図8. 全電界 E の y 成分および全電界から準静電界を除いた E_r の y 成分の分布 (給電点電圧: 1 V)。

(a) ファラデーシールドの本数

(b) 電界強度分布

図9. ファラデーシールドの本数を変えたときの電界の y 成分 (給電点電圧: 1 V)。

インピーダンスに及ぼすファラデーシールドの影響としては、

(5) アンテナ電流分布の位相定数を増加させる。ことが挙げられる^{12, 25, 27)}。これは、アンテナ長が自由空間波長に比べて十分短い場合には、抵抗分とリアクタンス分の増加をもたらす。

ファラデーシールドの効果を定量化する量として、2節でも述べたように磁界の透過係数、即ち無限周期構造のシールドの内部表面と外部表面の磁界の比を用いた検討がなされている^{10, 11, 22)}。有限の長さのアンテナに対してこの透過係数を用いることの妥当性については疑問がある。

4.2 埋め込み型アンテナ

埋め込み型アンテナの開口部付近に設けられるファラデーシールドの効果は、ループアンテナにおけるそれとはほぼ同じであると考えられる。ここでは図10に示される埋め込み型スロット列アンテナを例にとり、ファラデーシールドの効果について述べる¹⁴⁾。この構造に対して変分法(ガラーキン法)を適用し、

図10. 埋め込み型スロット列アンテナの構造 (I: スロット部の数)。

図11. 埋め込み型スロット列アンテナの開孔電界分布 (給電点電圧: 1 V, λ : 真空波長)。

シールドのスロット開口部の電界分布を求めた結果を図11に示す。 E_y (実線)はそれぞれのスロット上で y に対し正弦状に変化している。同図の点線はスロット幅に亘る E_y の平均値 E_y^{av} を示している。アンテナ開口部(スロット部)からスロットの幅程度以上離れた位置では、4.1節の半ターンループアンテナの場合と同様に正弦状に変化する成分は消えていくものと考えられるので、平均値 E_y^{av} にほぼ比例した電界が得られるものと考えられる。シールドなしの場合の開孔電界分布は周波数に対してはほぼ不変であり、また s/a が小さく b/a が大きいたときには、給電点付近の電界だけが極端に大きくなるという傾向がみられる(図12)²⁸⁾。これに対してフェラデーシールドを設けることにより、ループアンテナの場合と同様に電界分布が導波管開口全体にわた

図12. 埋め込み型アンテナ(シールド無し)の開孔電界分布 (給電点電圧: 1 V, λ : 真空波長)。

均一に近い状態となる。

次に、2節で述べた異方性境界条件を適用した結果を述べる²⁹⁾。この場合、異方性境界条件は開口上で $E_z = 0$ 、 $E_y = \text{連続}$ という条件になる。この条件を適用して、開口電界 E_y を求めた結果が図11に示されている。シールドなしの場合と他の2つの場合とは明らかに異なっている。また、スロット6個と12個の場合の平均電界 E_y^{av} は異方性境界条件の結果に比例したものとなっている。図13には入力アドミタンス特性も示されており、同様に異方性境界条件の結果とシールド付の結果はよく一致していることが分る。以上のことから異方性境界条件の妥当性が示された。

5. むすび

本解説ではプラズマの波動加熱のうち、ICRF加熱に的を絞って、電磁界解析法およびそこで用いられるモデルの概要について述べた。また、従来用いられてきたものを含め、提案されている各種アンテナとその特徴を述べた。最後にループアンテナと埋め込み型アンテナを例として、ICRFアンテナに用いられるフェラデーシールドの効果について述べた。

最近の電子計算機の進歩と数値計算法の発展に伴って、今後、より実際に近い解析が可能になるが、これに伴って、各種のモデル、解析法の適用限界をより明確にしていくことが益々重要になるものと考えられる。

最後に、本稿をまとめるに当り論文をご紹介頂くなど情報をお寄せ下さった多くの方々に深謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 田中茂利, 黒田 勉, 小田島和男: 核融合研究 51 (1984) 265.
- 2) 小田島和男: 昭60電気・情報関連学会連大賞 4-9 (1985).
- 3) F. W. Perkins and R. F. Kluge: IEEE Trans. Plasma Sci. PS-12 (1984) 161.
- 4) J. Adam: Euratom-CEA, FC-1004 (1979).
- 5) A. Fukuyama, K. Itoh, and S.-I. Itoh: Computer Phys. Rep. 4 (1986) 137.
- 6) K. Yamanaka and R. Sugihara: Japan J. Appl. Phys. 23 (1984) 1348.
- 7) 野島昭彦, 沢谷邦男, 安達三郎: 電子通信学会技術研究報告 A・P86-39 (1986).

図13. 埋め込み型スロット列アンテナの入力アドミタンス (λ : 真空波長)。

- 8) K. Theilhaber and J. Jacquinot : Nucl. Fusion **24** (1984) 541.
- 9) K. Theilhaber : Nucl. Fusion **24** (1984) 1383.
- 10) D. W. Faulconer : J. Appl. Phys. **54** (1983) 3810.
- 11) L. Bral and G. V. Oost : IEEE Trans. Plasma Sci. **PS-11** (1983) 251.
- 12) C. M. Fortgang and D. Q. Hwang : IEEE Trans. Plasma Sci. **PS-13** (1985) 569.
- 13) 永島 孝, 松田慎三郎 : 電気学会雑誌 **103** (1983) 321.
- 14) K. Sawaya, and S. Adachi : U. R. S. I. Int. Symp. Electromagnetic Theory (1986) 725.
- 15) H. Arai and N. Goto : IEEE Trans. Plasma Sci. **PS-13** (1985) 135.
- 16) 新井宏之, 後藤尚久 : 核融合研究 **52** (1984) 355.
- 17) R. R. Weynants : *Proc. Fourth Int. Symp. Heating in Toroidal Plasmas*, Rome (1984).
- 18) N. T. Lam, J. L. Lee, J. Scarer, and R. J. Vernon : IEEE Trans. Plasma Sci. **PS-14** (1986) 271.
- 19) 藤田孝夫, 安達三郎, 猪狩和久 : 電子通信学会技術研究報告 A・P84-18 (1984).
- 20) A. M. Messiaen and R. R. Weynants : Plasma Phys. Controlled Fusion **26** (1984) 525.
- 21) J. H. Mullen and J. W. Davis : IEEE Trans. Plasma Sci. **PS-12** (1984) 79.
- 22) D. R. Baker F. P. Blau, T. Hino, and P. B. Parks : IEEE Trans. Plasma Sci. **PS-14** (1986) 53.
- 23) 徳丸, 岸野齊, 金基采 : 電子通信学会光・電波全国大会 (1986) 1-96.
- 24) H. Arai and N. Goto : IEEE Trans. Plasma Sci. **PS-13** (1985) 582.
- 25) Y. Sato, K. Sawaya, and S. Adachi : J. Int. Conf. Antennas, Nice (1986) 463.
- 26) R. Mittra ed. : “*Computer Techniques for Electromagnetics*”, Pergamon (1973) 16.
- 27) 稲垣直樹 : 電子通信学会光・電波全国大会 1-69 (1986).
- 28) K. Sawaya and S. Adachi : Space Solar Power Review **6** (1986) 199.
- 29) 沢谷邦男, 安達三郎 : 電気学会電磁界理論研 EMT-85-54 (1985).