

JAERI-M
84-191

JT-60 ICRF 加熱用ループ型アンテナの
結合計算

(臨界プラズマ試験装置設計報告・143)

1984年10月

池田 佳隆・木村 晴行・藤井 常幸・三枝 幹雄
今井 剛・坂本 慶司・上原 和也・永島 孝

JAERI-M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。

入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11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。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1984

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-60 ICRF 加熱用ループ型アンテナの結合計算
(臨界プラズマ試験装置設計報告・143)

日本原子力研究所東海研究所大型トカマク開発部
池田 佳隆・木村 晴行・藤井 常幸⁺・三枝 幹雄⁺
今井 剛⁺・坂本 慶司⁺・上原 和也・永島 孝⁺

(1984年 9月25日受理)

JT-60 の高周波加熱の 1 つである ICRF 加熱に用いるループ型アンテナの結合計算の結果を示す。

このループ型アンテナの特徴は、トロイダル、ポロイダル両方向に位相制御可能な 2 × 2 ループアンテナアレイの構造を有することである。

この結合計算により、十分な結合効率を有するアンテナ構造寸法を得た。また位相制御の放射スペクトラムに及ぼす効果を調べるとともに、結合効率へのプラズマ密度の依存性も検討した。

⁺ 核融合研究部

Coupling calculations of the ICRF loop antenna for JT-60

Yoshitaka IKEDA, Haruyuki KIMURA, Tsuneyuki FUJII⁺,
Mikio SAIGUSA⁺, Tsuyoshi IMAI⁺, Keiji SAKAMOTO⁺,
Kazuya UEHARA and Takashi NAGASHIMA⁺,

Department of Large Tokamak Development,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received September 25, 1984)

Coupling calculations of the ICRF loop antenna for JT-60 are made. The feature of this antenna is 2×2 phased loop antenna array which has phasing control system in toroidal, poloidal directions.

In these calculations, an optimum size of the antenna structure is obtained. The phasing control effects on radiation spectrum is studied, and also the plasma density dependencies on coupling efficiency are discussed.

Keywords: ICRF Loop Antenna, JT-60, 2×2 Phased Loop Antenna
Array Phasing Control System

⁺ Department of Thermonuclear Fusion Research

目 次

1. 序 論	1
2. 計算モデルと計算方法	1
2.1 計算モデル	1
2.2 計算方法	2
2.3 評価方法	4
3. 計算結果及び考察	5
3.1 アンテナ構造	5
3.2 位相制御	6
3.3 プラズマパラメータ	7
3.4 計算モデルの限界	7
4. 結 論	8
謝 辞	8
参考文献	9

Contents

1. Introduction	1
2. Calculation model and method	1
2.1 Calculation model	1
2.2 Calculation method	2
2.3 Estimation method	4
3. Results and discussion	5
3.1 Antenna structure	5
3.2 Phasing control	6
3.3 Plasma parameters	7
3.4 Limit of this calculation	7
4. Conclusion	8
Acknowledgement	8
References	9

1. 序 論

JT-60 では、追加熱の1つとして、高周波加熱を行う。この高周波加熱には、2GHz帯のローワハイブリッド波帯(LHRF)加熱と、120MHz帯の第2高調波共鳴を用いたイオン・サイクロトロン周波数(ICRF)加熱を準備している。特に、ICRF加熱は、近年目ざましい成果を、日、米、仏などの中型トカマク装置で上げており、^[1~3] JT-60を臨界条件まで立上げるための役割は、非常に重要と考えられている。

さて、ICRF加熱が、うまくいくためには、アンテナからプラズマへ効率良く高周波を結合させるとともに、プラズマ中へ入射された波が効率良く熱に変換されなければならない。この点ループ型アンテナは、現在の所、最も実績があり、JT-60においても、この型のアンテナを採用する予定である。しかし、JT-60においては、アンテナ長に比べ、波長が比較的短い点で従来のループ型アンテナとは、大きく異なる。また、現在ICRF加熱では、不純物発生が問題となっているが、この対策法の1つとして、アンテナからの放射スペクトル制御が考えられる。この点から、JT-60では、従来と異なり、トロイダル、ポロイダル両方向に位相制御が可能な、2×2ループアンテナアレイを用いることを検討している。

今回は、この2×2ループアンテナの最適構造を、プラズマとの結合という点から求めるとともに、位相制御の効果や、プラズマパラメータの影響について調べた。次章では、計算モデルと計算方法、3章では、計算結果と考察、4章で結論について述べる。

2. 計算モデルと計算方法

2.1 計算モデル

a 2×2ループアンテナアレイ

JT-60 ICRF加熱用アンテナは、同じくLHRF加熱用等波管ランチャー^[4]と同じく、RFポートから、半径方向に挿入される。これには、アンテナ破損時に、速やかに修理ができるとともに、アンテナ-プラズマ間距離の調整が可能である利点を有する。しかしながら、RFポートの内寸法は52cm×37cmであり必然的にアンテナ長、巾や電力給電線の選択に対して制限が加えられる。特に、給電線に関しては、耐電圧、発熱等から、径が大きく、かつ本数を増すことが望ましいのであるが、上記の寸法条件より、決定される。

なお、給電線の本数を増すことは、独立した位相制御可能なアンテナの数も増すことができる。このことは、従来からの1ループ型アンテナでは不可能だった、最適放射スペクトラムの制御や、ICRFによる電流駆動の可能性を有しており、非常に魅力的である。

JT-60においては、これらのことを考慮し、トロイダル、ポロイダル両方向に各2ケづつ計4ケの、独立位相制御可能な、2×2ループアンテナアレイを採用する予定である。(Fig.

1. 序 論

JT-60 では、追加熱の1つとして、高周波加熱を行う。この高周波加熱には、2GHz帯のローワハイブリッド波帯(LHRF)加熱と、120MHz帯の第2高調波共鳴を用いたイオン・サイクロトロン周波数(ICRF)加熱を準備している。特に、ICRF加熱は、近年目ざましい成果を、日、米、仏などの中型トカマク装置で上げており、JT-60を臨界条件まで立上げるための役割は、非常に重要と考えられている。^[1~3]

さて、ICRF加熱が、うまくいくためには、アンテナからプラズマへ効率良く高周波を結合させるとともに、プラズマ中へ入射された波が効率良く熱に変換されなければならない。この点ループ型アンテナは、現在の所、最も実績があり、JT-60においても、この型のアンテナを採用する予定である。しかし、JT-60においては、アンテナ長に比べ、波長が比較的短い点で従来のループ型アンテナとは、大きく異なる。また、現在ICRF加熱では、不純物発生が問題となっているが、この対策法の1つとして、アンテナからの放射スペクトル制御が考えられる。この点から、JT-60では、従来と異なり、トロイダル、ポロイダル両方向に位相制御が可能な、2×2ループアンテナアレイを用いることを検討している。

今回は、この2×2ループアンテナの最適構造を、プラズマとの結合という点から求めるとともに、位相制御の効果や、プラズマパラメータの影響について調べた。次章では、計算モデルと計算方法、3章では、計算結果と考察、4章で結論について述べる。

2. 計算モデルと計算方法

2.1 計算モデル

a 2×2ループアンテナアレイ

JT-60 ICRF加熱用アンテナは、同じくLHRF加熱用等波管ランチャー^[4]と同じく、RFポートから、半径方向に挿入される。これには、アンテナ破損時に、速やかに修理ができるとともに、アンテナ-プラズマ間距離の調整が可能である利点を有する。しかしながら、RFポートの内寸法は52cm×37cmであり必然的にアンテナ長、巾や電力給電線の選択に対して制限が加えられる。特に、給電線に関しては、耐電圧、発熱等から、径が大きく、かつ本数を増すことが望ましいのであるが、上記の寸法条件より、決定される。

なお、給電線の本数を増すことは、独立した位相制御可能なアンテナの数も増すことができる。このことは、従来からの1ループ型アンテナでは不可能だった、最適放射スペクトラムの制御や、ICRFによる電流駆動の可能性を有しており、非常に魅力的である。

JT-60においては、これらのことを考慮し、トロイダル、ポロイダル両方向に各2ケずつ計4ケの、独立位相制御可能な、2×2ループアンテナアレイを採用する予定である。(Fig.

1)。今回の計算では、プラズマとのカップリングに関して、ファラディシールド-コイル間距離、コイル-リターン間距離、フィード部の位置等の構造上の最適化を行うとともに、(アンテナ長、巾の全体枠は、JT-60 RFポート寸法により、制限される)、トロイダル、ポロイダル各方向の位相制御の効果、プラズマパラメータの依存性について調べた。

b モデル

計算としては、Fig. 2に示すように、アンテナのフィード部も考慮した3次元モデル^[5]で行う。ただし、ファラディシールドは、トロイダル方向に一様とし、プラズマは、一次元スラブモデルを仮定する。またプラズマの密度分布 $n_e(r)$ は、

$$n_e(r) = n_{\infty} \left\{ 1 - \frac{1}{1+\Delta_n} \left(\frac{r}{a} \right)^m \right\} \quad 0 < r \leq a,$$

$$n_e(r) = \frac{1}{1+\Delta_n} n_{\infty} e\left(-\frac{r-a}{\lambda_n}\right) \quad a < r \leq b,$$

$$n_e(r) = 0 \quad b < r.$$

ここで、 a 、 b は、それぞれプラズマ中心からリミッター及びファラディシールドまでの距離。 n_{∞} は、プラズマ中心での密度である。またトロイダル、ポロイダル磁場は、

$$B_t = \frac{B_0}{1 + \frac{r \cos \theta}{R}},$$

$$B_p = \frac{r}{R} \frac{B_t}{q},$$

で与える。ここで q は、2乗分布とした。

なお、プラズマ中の波は、熱効果を入れないコールドプラズマモデルを用いるとともに、プラズマ中へ入射した波は、プラズマ表面からある所まで入ると、無反射となり、完全吸収となるとして(single pass model)計算を行う。

2.2 計算方法

計算では、領域を、I；リターン-コイル、II；コイル-ファラディシールド、III；プラズマと3つに分けるとともに、プラズマ層は、X方向(半径方向)に多層分割する。各領域では、密度を一様とし電磁界をY、Z方向(ポロイダル、トロイダル方向)にフーリエ変換して求め、各層間での入射、反射波の係数を、各層間での境界条件から成り立つ連立一次方程式を解くことにより求める。

まず、領域I、IIでは、真空中であり、マックスウェルの式から、

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0$$

が成立する。今、簡単のため、1ループ型アンテナを考えると、アンテナ電流 \mathbf{j} は、

$$\begin{aligned} \mathbf{j} &= (J_x, J_y, 0) \\ J_x &= J(z) [\delta(y) - \delta(y - 2w_y) \cos(2\beta w_y)] & R_c \leq x \leq R_d \\ &= 0 & R_c > x, \quad x < R_d, \\ J_y &= J(z) \cos(\beta y) \cdot \delta(x - R_c) & 0 \leq y \leq 2w_y \\ &= 0 & 0 > y, \quad y \leq 2w_y. \end{aligned}$$

ここで β は、アンテナでの位相定数であり、今回の計算では、リターンとコイル及びファラディシールドを、真空中の無限平板上の板として近似した値を用いる。

また領域Ⅲのプラズマ中の電磁界は、コールド近似の分散式^[6]

$$\begin{pmatrix} S - n_{\parallel}^2 & -iD & n_{\parallel} n_{\perp} \\ iD & S - n_{\parallel}^2 - n_{\perp}^2 & 0 \\ n_{\parallel} n_{\perp} & 0 & P - n_{\perp}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} = 0$$

を解くことにより、任意の波数 k に対する電界の各方向の比が求められる。

さらに、下記に示す、領域間の境界条件より、電磁界が求められる。

$$\begin{aligned} \text{リターン} & \quad E_{\perp y} = E_{\parallel y} = 0, \\ \text{コイル} & \quad \begin{cases} E_{\perp y} = E_{\parallel y} \\ E_{\perp z} = E_{\parallel z} \\ B_{\perp y} = B_{\parallel y} \\ B_{\perp z} - B_{\parallel z} = \mu_0 J_{ky}, \end{cases} \\ \text{ファラディ} \\ \text{シールド} & \quad E_{\parallel z} = E_{\perp z} = 0, \end{aligned}$$

$$\text{プラズマ} \\ \text{層間} \quad \begin{cases} E_{\parallel j}^j = E_{\parallel y}^{j+1} \\ B_{\parallel z}^j = E_{\parallel z}^{j+1} \end{cases}$$

また、アンテナの放射インピーダンス Z は放射電力を P 、アンテナ電流を I とすると

$$Z = \frac{2P}{I^2}$$

で与えられる。ここで、Induced EMF 法^[7]より放射電力 P は

$$\begin{aligned} P &= -\frac{1}{2} \iiint \mathbf{J}^* \cdot \mathbf{E}_1 dV \\ &= P_x + P_y \end{aligned}$$

で与えられる。なお、 P_x は、フィード部が、 P_y は、コイル部が作る放射電力である。

2.3 評価方法

計算結果の評価としては、前述したアンテナの放射インピーダンス Z 、コイルでの最大電圧 V_{\max} 、VSWR、結合効率の他、放射効率、即ち放射スペクトラムの中で、真空中の波数 $k_0 (= \omega/c)$ よりも大きい部分を占める割合を導入する。

a 放射抵抗

アンテナでの放射抵抗 Z のうち、実数部を Z_R 、虚数部を Z_I とすると、 Z_R は、実効的にアンテナからプラズマへ放射された電力を示し、 Z_I は、アンテナ上に溜め込まれる無効電力を意味する。したがって、 Z_R をより大きくし、 Z_I を低い値にするアンテナ設計が望ましい。

b V_{\max}

アンテナでの最大電圧 V_{\max} は、次式で与えられる。

$$V_{\max} = \sqrt{\frac{2P_0}{Z_R} \cdot \frac{2|Z_I|}{|\sin 4\beta w_y|} \cdot \sin 2\beta w_y}$$

ここで P_0 は、アンテナに印加される電力で、今回の場合は、1.5MWである。また、 $2w_y$ は、アンテナ長である。上式より、 V_{\max} は、 $|Z_I|$ に比例し、 $Z_R^{1/2}$ に逆比例していることがわかる。なお、JFT-2や2Mでの実験では、アンテナでの耐電界は、約 20 kV/cm (トロイダル磁場と平行方向) を越えているが、この値を目安とする。この V_{\max} が高いと、アンテナで絶縁破壊が発生するのでアンテナ設計を制限する、1つのパラメータとなる。

c VSWR (電圧定在波比)

VSWR(ρ)は、次式で与えられる。

$$\rho = \frac{1 + |\gamma|}{1 - |\gamma|}$$

ここで

$$\gamma = \frac{\sqrt{(Z_0 - Z_R)^2 + Z_I^2}}{\sqrt{(Z_0 + Z_R)^2 + Z_I^2}}$$

(Z_0 は、電力給電線の特徴インピーダンス (50Ω))

VSWRは、アンテナと電力給電線とのマッチングの関係を示す。この値が高いと、給電線上に高電圧部が発生し、絶縁破壊の危険性が高まるとともに、長パルス実験ではアンテナ及び給電線でのジュール損による発熱問題が重大となるので、極力低い値の設計にしなければならない。JT-60のICRF加熱システムとしては、VSWRを25としているので、今回の計算では、この値を目安とする。

d 結合効率 η_1

結合効率 η_1 を、次式で定義する。

$$\eta_1 = \frac{Z_R}{Z_R + Z_C}$$

ここで、 Z_C は、電力給電線での損失であり、今回 0.2Ωとして計算した。したがって、 η_1 は、高周波電力が効率よくアンテナ部で損失する(放射される)割合を示す。なお、アンテナの電力反射係数を与えた場合の効率としては、

$$\eta_1' = (1-\alpha)(1-\gamma^2) \frac{1}{1-\gamma^2(1-\alpha)^2}$$

(α : 給電線での電力損失係数
 γ^2 : アンテナでの電力反射係数)

で与えられる。

e 放射効率 η_2

放射効率 η_2 を、次式で定義する。

$$\eta_2 = \frac{1 - \iint_{-k_0}^{k_0} Z_{kR} dk_y dk_z}{\iint_{-\infty}^{\infty} Z_{kR} dk_y dk_z}$$

ここで、 k_0 は、真空中の波数であり、 $\int_{-k_0}^{k_0} Z_{kR} dk_y dk_z$ の成分はアンテナのフィード部を流れる電流によって励起されプラズマ周辺部を伝搬するモード (TEMモード) である。JFT-60 では、 $k_0 = 2.5 \text{ m}^{-1}$ と従来の実験条件 (JFT-2, 2Mでは、それぞれ $k_0 = 0.4 \text{ m}^{-1}$, 0.8 m^{-1}) に比べて大きく、上記のモードが設計により比較的大きな部分を占める場合がある。このようなモードがプラズマ加熱にどのような悪影響 (加熱効率の劣化、不純物発生等) を及ぼすか、まだ実験的に明らかにされていないが、 η_2 を大きくすることをアンテナ設計上の1つの指針とした。

3. 計算結果及び考察

3.1 アンテナ構造

初めに、アンテナ構造の最適化を行う。決定すべきことは、コイル-ファラディシールド間距離、コイル-リターン間距離、及びフィード部をRFポートの中心にするか (Center-Feed)、上下端にするか (Center-Short) の選択である。(Fig. 3)。その際、アンテナ長、巾、ファラディシールドの厚みは、固定して各パラメータを比較した。なお、計算に用いた標準のプラズマパラメータは、大半径 3 m、小半径 0.905 m とし、密度分布は中心が $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ で、2乗分布しており、スクレープオフ層の密度減衰距離 λ_p は、0.02 m とした。またプラズマ中心での磁場を 4 T とした。

まず、コイル-ファラディシールド間距離であるが、Center-Feed、Center-Short とも、距離が短い方が良いことを示している。(Fig. 4, 5)。これは、コイル-プラズマ間距離が近い方が良好な結合をすることを意味する。したがって、コイル-ファラディシールド間距離を決定するものは、絶縁破壊電界であり、この部分は、磁界と垂直方向であるが、約 20 kV/cm という値を目安にし、1.5 cm を今回採用する。

次にコイル-リターン間距離であるが、Center-Feed、Center-Short 両者の場合も、距離を長くした方が、 η_1 、VSWR を良くする方向であるのに対し、 V_{max} 、 η_2 にとっては、不利な方

$$\eta_1' = (1-\alpha)(1-\gamma^2) \frac{1}{1-\gamma^2(1-\alpha)^2}$$

(α ; 給電線での電力損失係数
 γ^2 ; アンテナでの電力反射係数)

で与えられる。

e 放射効率 η_2

放射効率 η_2 を、次式で定義する。

$$\eta_2 = \frac{1 - \iint_{-k_0}^{k_0} Z_{kR} dk_y dk_z}{\iint_{-\infty}^{\infty} Z_{kR} dk_y dk_z}$$

ここで、 k_0 は、真空中の波数であり、 $\int_{-k_0}^{k_0} Z_{kR} dk_y dk_z$ の成分はアンテナのフィード部を流れる電流によって励起されプラズマ周辺部を伝搬するモード (TEMモード) である。JT-60では、 $k_0 = 2.5 \text{ m}^{-1}$ と従来の実験条件 (JFT-2, 2Mでは、それぞれ $k_0 = 0.4 \text{ m}^{-1}$, 0.8 m^{-1}) に比べて大きく、上記のモードが設計により比較的大きな部分を占める場合がある。このようなモードがプラズマ加熱にどのような悪影響 (加熱効率の劣化、不純物発生等) を及ぼすか、まだ実験的に明らかにされていないが、 η_2 を大きくすることをアンテナ設計上の1つの指針とした。

3. 計算結果及び考察

3.1 アンテナ構造

初めに、アンテナ構造の最適化を行う。決定すべきことは、コイル-ファラディシールド間距離、コイル-リターン間距離、及びフィード部をRFポートの中心にするか (Center-Feed)、上下端にするか (Center-Short) の選択である。(Fig. 3)。その際、アンテナ長、巾、ファラディシールドの厚みは、固定して各パラメータを比較した。なお、計算に用いた標準のプラズマパラメータは、大半径 3 m、小半径 0.905 m とし、密度分布は中心が $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ で、2乗分布しており、スクレープオフ層の密度減衰距離 λ_n は、0.02 m とした。またプラズマ中心での磁場を 4 T とした。

まず、コイル-ファラディシールド間距離であるが、Center-Feed、Center-Short とともに、距離が短い方が良いことを示している。(Fig. 4, 5)。これは、コイル-プラズマ間距離が近い方が良好な結合をすることを意味する。したがって、コイル-ファラディシールド間距離を決定するものは、絶縁破壊電界であり、この部分は、磁界と垂直方向であるが、約 20 kV/cm という値を目安にし、1.5 cm を今回採用する。

次にコイル-リターン間距離であるが、Center-Feed、Center-Short 両者の場合も、距離を長くした方が、 η_1 、VSWR を良くする方向であるのに対し、 V_{max} 、 η_2 にとっては、不利な方

向となる。これは、コイルーリターン間距離を長くすることが、フィード部を長くしながらループ面積を大きくすることになるため、プラズマと結合する磁束が多くなる反面、フィード部の寄与が増大し、 η_2 が減少するものと考えられる。今回の計算により、VSWRを25以下、 V_{\max} を30 kV以下とする条件から、コイルーリターン間距離を4~8 cm に選ばば良いことが分る。

(Fig. 6, 7)。

なお、今までの計算では、アンテナ巾を固定していたが、リターンーコイルーファラディシールド間距離をそれぞれ4 cm, 1.5 cm に固定した場合のアンテナ巾の依存性を Fig. 8 に示す。結果は、 η_1 , VSWR に関しては狭い方が、 V_{\max} , η_2 に関しては、広い方が良い。しかし、 V_{\max} については、巾を拡げると、トロイダル方向のアンテナ間距離が短くなり、ここでの絶縁破壊が問題となる。これらのことから、アンテナ巾は、今回の様な2×2ループ型アンテナにおいて、重要なパラメータではないと考えられる。

さて、以上の計算結果より、アンテナ構造を以下の様に決定する。

アンテナ長	20 cm
アンテナ巾	8 cm
コイルーリターン間距離	4~8 cm
コイルーファラディシールド間距離	1.5 cm

3.2 位相制御

位相制御については、トロイダル、ポロイダル両方向があり、今回の計算では、トロイダル方向の位相差を一定にし、ポロイダル方向の位相差をパラメータにしたものと、その逆の場合について行った。(Fig. 9~15)

まず、ポロイダル方向の位相制御であるが、Center-Short の場合には、位相差なしの方が、すべての点で良いのに対し、center-feed の場合には、 η_1 , V_{\max} , VSWR については、位相差をつける方が悪くなるが、 η_2 に関しては良くなる。このことは、アンテナ上の電流の最大点が、短絡部分にあるので、アンテナ電流のポロイダル方向の波数(K_y)スペクトラムが、この位置に大きく依存するためである。すなわち、center-short の場合には、ポロイダル方向に位相差をつけた方が、 K_y が狭くなるのに対し、center-feed の場合には、逆に K_y が拡がる。(Fig. 16) このことと、真空中の波数、 $K_0^2 = K_x^2 + K_y^2 + K_z^2$ の関係を考えて、 K_y が大きくなり、 $K_y > K_0$ となれば、真空中で波が存在できなくなる。すなわち、実効的に $\iint_{-K_0}^{K_0} Z_R dk_y dk_z$ の値が小さくなるためとして、結合のポロイダル位相差の依存性が説明できる。

次に、トロイダル方向の依存性であるが、center-short, center-feed の両者とも、 η_1 , V_{\max} , VSWR に関しては、位相差をつけると不利であり、 η_2 では有利である。このことは、単純に、位相差があると、 K_z スペクトラムが拡がるとともに、互いの成分を打ち消すからだと考えられる。なお、トロイダル方向に $\pi/2$ の位相差をつけた場合には、かなりのスペクトラムの片寄りが見られた。このことは、電流駆動の可能性を示していると考えられる。

以上の結果より、 η_2 の改善という点で、位相差制御は、重要であることが明らかとなった。また、center-short, center-feed の選択において、位相差(0, π)では、決定的な差は見

られないが、(0, 0)では、center-shortの方が、 η_2 を大きくできることから、center-shortを採用し、以下計算を進める。

3.3 プラズマパラメータ

プラズマパラメータの依存性については、プラズマ密度及び、密度分布についてのみ、計算を行った。すなわち、中心プラズマ密度 n_{00} 、リミッター位置での密度 $\frac{\Delta_n}{1+\Delta_n} \cdot n_{00}$ 、分布指数 m 、及び、リミッター端からファラディシールドまでの密度の減衰距離 λ_n についてである。

これらのパラメータに対する、 η_1, η_2 の依存性を、Fig. 17~20に示す。 λ_n の場合を除き、大きな影響はない。これに対し、 λ_n が大きくなるに従って、 η_2 が上昇する。波の結合を考えると、アンテナから放射された波のインピーダンスと、プラズマ中のインピーダンスが一致して、波がプラズマへ入ってくるわけであるから、密度変化が緩やかであれば、プラズマ中のインピーダンスの変化もゆっくり変化する。したがって、それだけマッチングする位置(巾)が広がるため、結合が良くなると考えられる。これに対して、フィーダ部からの波は、壁とプラズマ間の真空層を伝搬していくと考えられるから、周辺のプラズマ密度が低い程伝搬しやすい。以上のことから、 λ_n に対する η_2 への依存が説明されると考えられる。

3.4 計算モデルの限界

今回の計算モデルにおいては、プラズマ中の波を cold 近似の分散式により求めるとともに、single pass model を用いて計算を行っている。これは、hot の分散式を使った計算において、JT-60の場合、single passで充分波がプラズマに吸収されるという結果や、JFT-2, 2Mでの実験結果とよく一致しているという点から、これらの近似は、結合という点で、問題ないと考えられる。しかしながら、プラズマ中の波の吸収過程で、モード変換、対向面壁での波の反射効果などについては、説明できない。

また、アンテナでの位相定数 β を、真空中での値を用いて、計算を行って来たが、 β は、プラズマとの結合により変化する値であり、今後の計算においては、self-consistent にする必要がある。

最後に、JT-60用の結合計算の問題として、プラズマからの入熱を避けるためのガードリミッター (Fig. 1) の影響がある。このガードリミッターのために、アンテナからの磁束が、妨げられ、結合効率 η_1 は、減少するのではないかと考えられる。しかし逆に、アンテナから上下左右に放射される、真空伝搬可能な波は、抑制され、 η_2 の値は大きくなると期待される。この様に、ガードリミッターの効果を正確に評価することは、非常に重要であり、今後の研究課題として残されている。

4. 結 論

- ① JT-60用ループ型アンテナの最適構造計算を行い、結合効率が94%以上、かつ耐電圧にも問題のない以下のアンテナ寸法値を得た。

center-short	2 × 2ループ型アンテナ
アンテナ長	20 cm
アンテナ巾	8 cm
コイル-リターン間距離	4~8 cm
コイル-F.S. 間距離	1.5 cm

- ② 2 × 2ループ型アンテナの位相制御の効果を調べ、以下の傾向を得た。
トロイダル方向の位相差を大きくすると、center-short, feedの両者とも、 η_1, V_{max} , VSWRが悪化、 η_2 が改善される。
ポロイダル方向の位相差を大きくする、center-shortの場合すべて悪化し、center-feedの場合、 η_2 のみが改善、他は悪化する。
- ③ 結合に対する、プラズマ密度の影響を調べ、スクレープオフ層の密度減衰距離 λ_n 以外は、結合への影響が少ないことと、 λ_n が大きいと η_2 に対して有利であるということが明らかとなった。

謝 辞

本報告をまとめるにあたり御指導、御鞭達を戴いた、吉川充二大型トカマク開発部長、飯島勉次長、白形弘文JT-60第4開発室長に深く、感謝致します。また、小幡行雄核融合研究部長、田中正俊次長には、終始激励を戴いたことに感謝の意を表します。

4. 結 論

- ① JT-60用ループ型アンテナの最適構造計算を行い、結合効率が94%以上、かつ耐電圧にも問題のない以下のアンテナ寸法値を得た。

center-short	2 × 2ループ型アンテナ
アンテナ長	20 cm
アンテナ巾	8 cm
コイル-リターン間距離	4~8 cm
コイル-F.S. 間距離	1.5 cm

- ② 2 × 2ループ型アンテナの位相制御の効果を調べ、以下の傾向を得た。
トロイダル方向の位相差を大きくすると、center-short, feedの両者とも、 η_1 , V_{max} , VSWRが悪化、 η_2 が改善される。
ポロイダル方向の位相差を大きくする、center-shortの場合すべて悪化し、center-feedの場合、 η_2 のみが改善、他は悪化する。
- ③ 結合に対する、プラズマ密度の影響を調べ、スクレープオフ層の密度減衰距離 λ_n 以外は、結合への影響が少ないことと、 λ_n が大きいと η_2 に対して有利であるということが明らかとなった。

謝 辞

本報告をまとめるにあたり御指導、御鞭達を戴いた、吉川充二大型トカマク開発部長、飯島勉次長、白形弘文JT-60第4開発室長に深く、感謝致します。また、小幡行雄核融合研究部長、田中正俊次長には、終始激励を戴いたことに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) JFT-2 GROUP, in Heating in Toroidal Plasma (Proc. 3rd Joint Varenna-Grenoble Int. Symp. Grenoble, 1982) Vol. 1, Grenoble (1982)259.
- 2) HWANG, D., BITTER, M., BUDNY, R., CAVALLO, A., CHRIEN, R., et al., in Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (Proc. 9th Int. Conf. Baltimore, 1982) Vol. 2, IAEA, Vienna (1983)3.
- 3) EQUIPE TFR, in Heating in Toroidal Plasmas (Proc. 3rd Joint Varenna-Grenoble Int. Symp. Grenoble, 1982) Vol. 1, Grenoble (1982)225.
- 4) T. IMAI et al. in Proc. of 5th Topical Conf. of RF Plasma Heating, Madison, Wisconsin, Feb. 21-23 1983.
- 5) V.P. BHATNAGAR, R. KOCH, A.M. MESSIAEN, R.R. WEYNANTS, Nucl. Fus. 22(1982)280.
- 6) T. Stix, "The theory of plasma waves" Mc Graw-Hill Book, New York, 1962.
- 7) RAMO, S., WHINNERY, J., VAN OUZER, T., "Fields and Waves in Communication Electronics", J. Wiley & Sons, New York (1965).

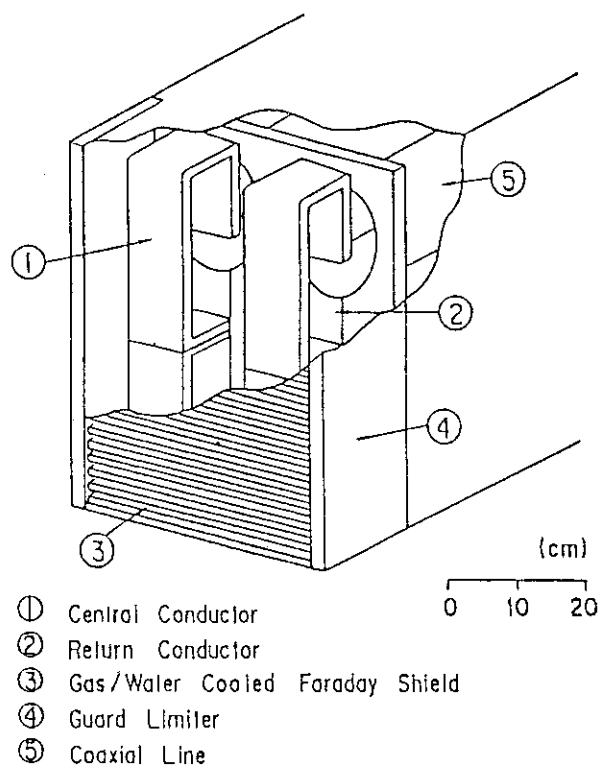


Fig.1 JT-60 ICRF加熱用2×2ループアンテナアレイ

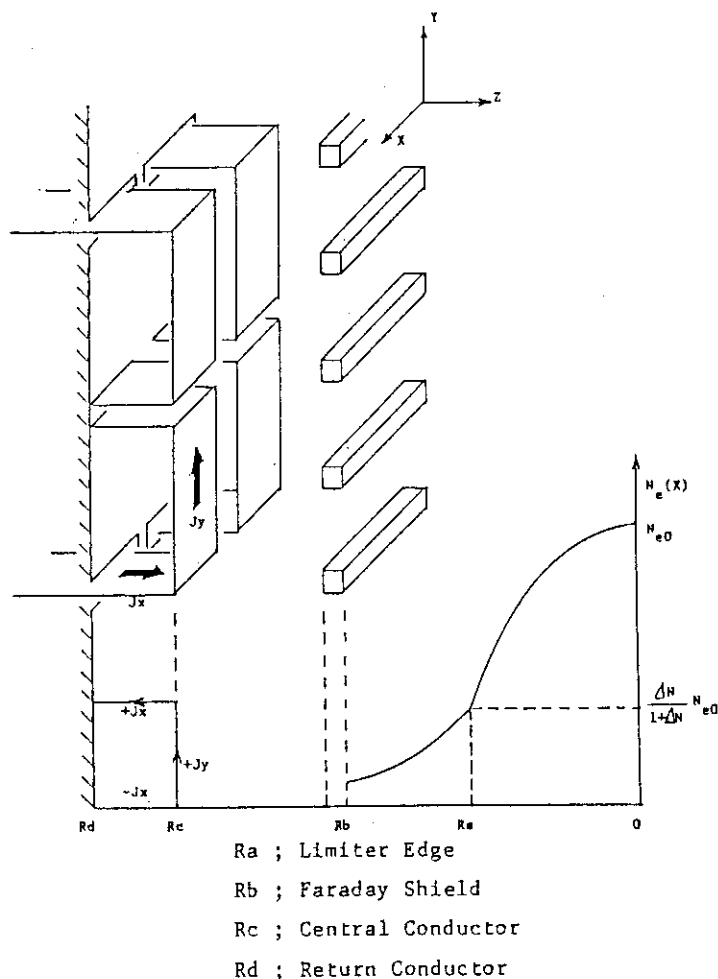


Fig.2 計算モデル

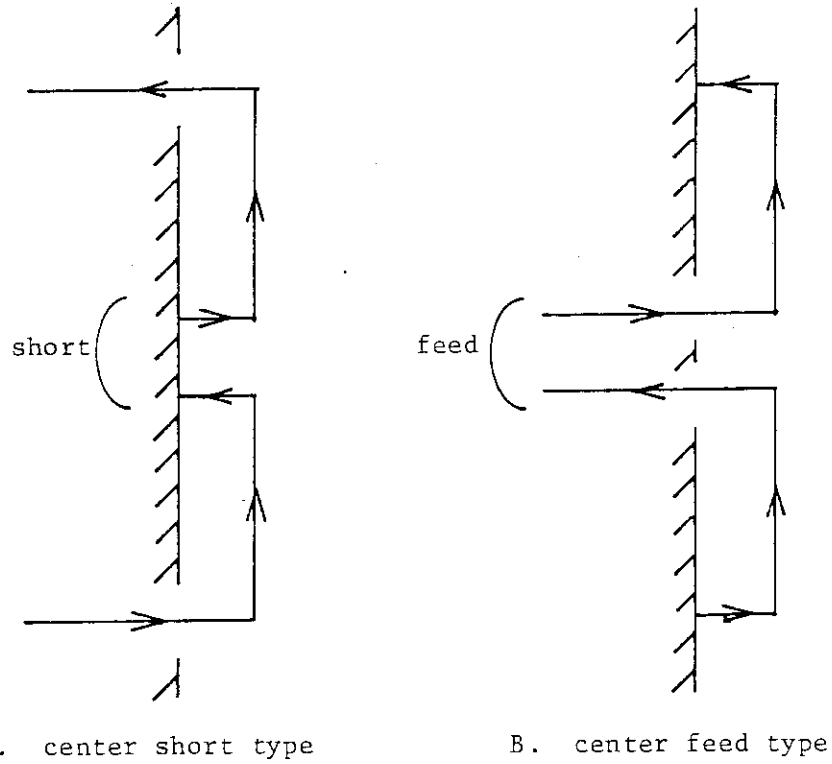


Fig.3 Center-short 型アンテナと Center-feed 型アンテナ。
 Center-short 型は、電力供給部（フィーダ部）を RF ポートの上下端に位置するのに対し、Center-feed 型は、電力供給部を RF ポート中心に位置する。したがって、Center-short 型においては、電流最大点が RF ポート中心に在り、Center-feed 型においては、RF ポート上下端に存在する。（Fig.16 参照）

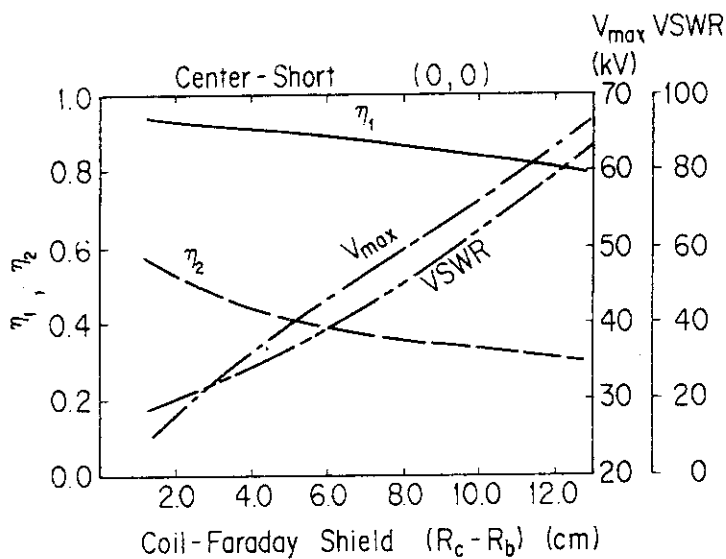


Fig. 4

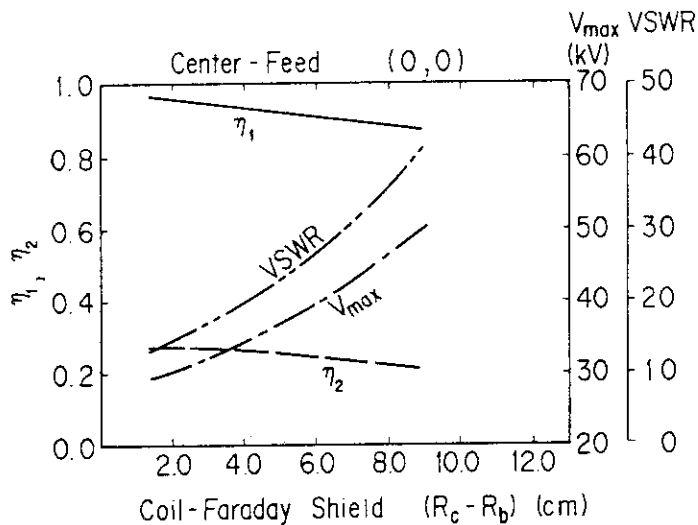


Fig. 5

Fig. 4,5 結合特性に対する、コイルファラディシールドの依存性。
 Fig.4はCenter-short型、Fig.5はCenter-feed型についてであり、ともに位相差が無い場合である。

VSWR = 25以下, $\frac{V_{max}}{R_c - R_b} = 20 \text{ kV/cm}$ 以下
 が設計基準である。

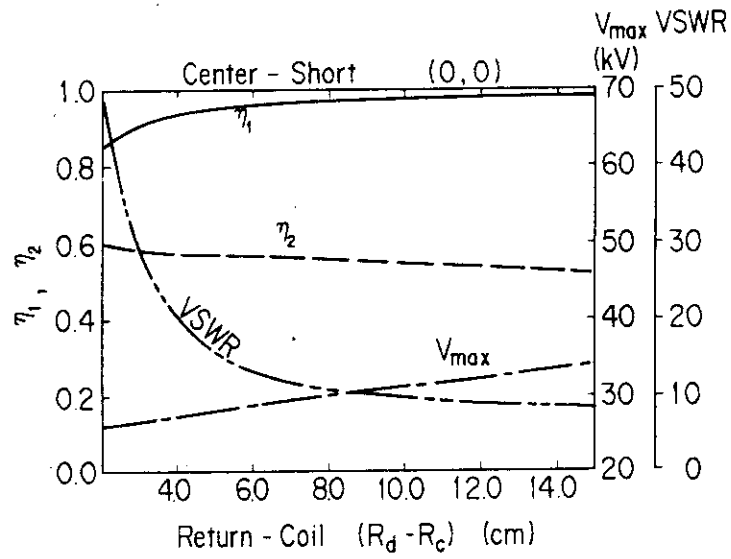


Fig. 6

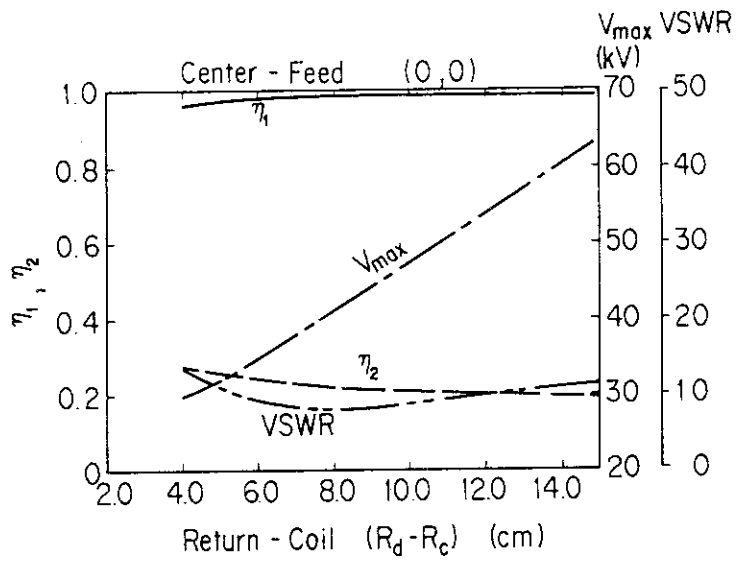


Fig. 7

Fig.6,7 結合特性に対する、コイルーリターン間距離の依存性。

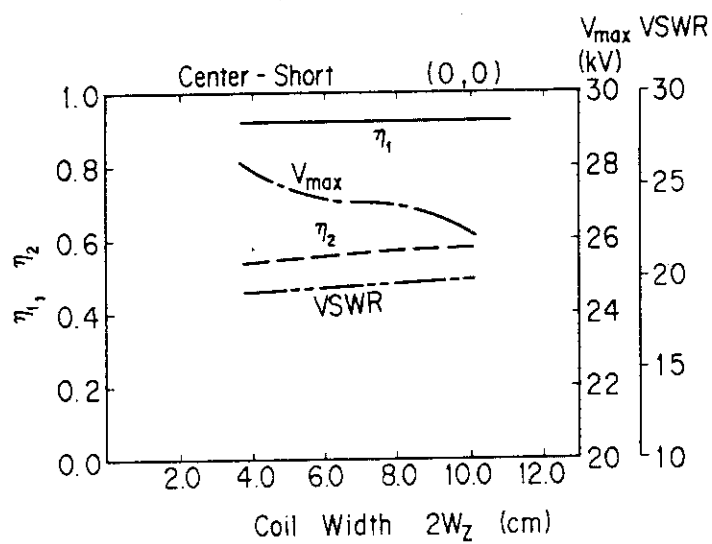


Fig.8 結合特性に対するアンテナ中の依存性。

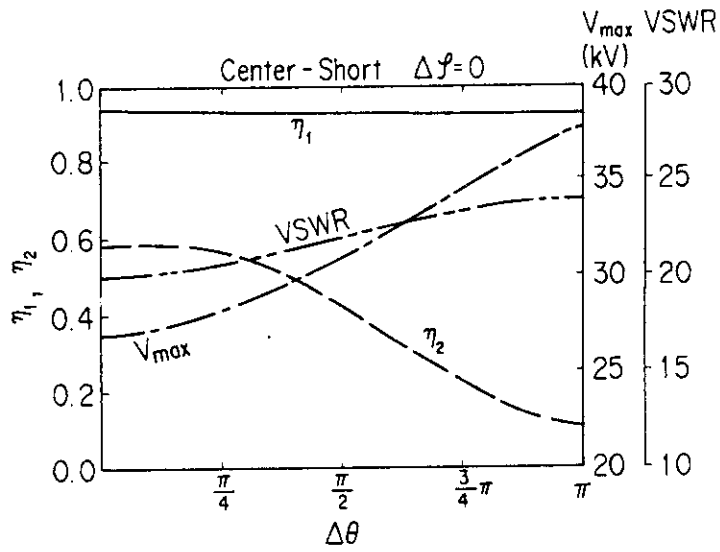


Fig. 9

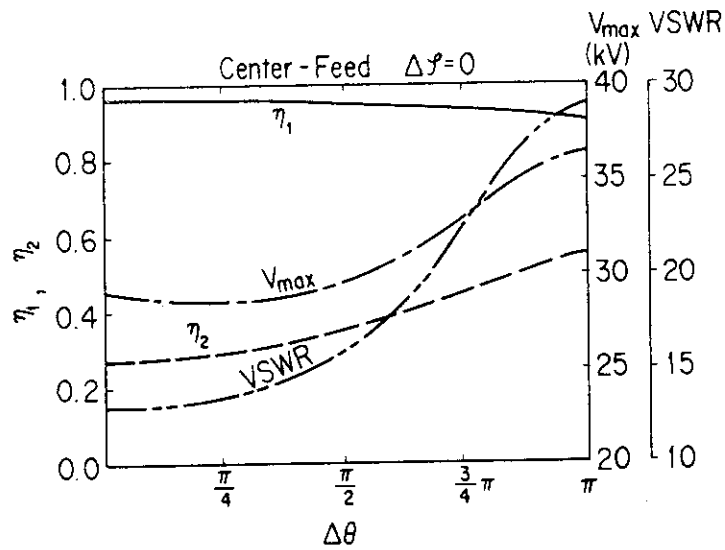


Fig.10

Fig. 9,10 結合特性に対するポロイダル方向位相差の依存性。
 Fig. 9 は Center-short 型, Fig.10 は Center-feed 型についてである。両者ともトロイダル方向位相差は無い場合についての計算である。

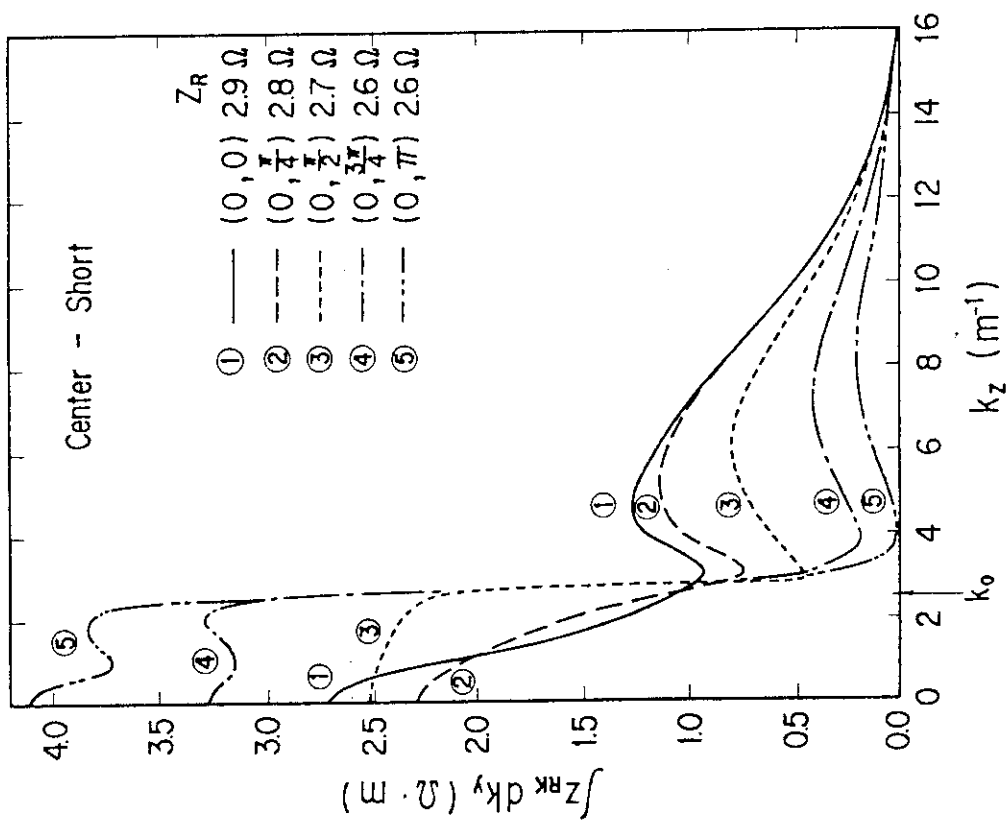


Fig.11 Center-short 型アンテナの、放射抵抗スペクトラムに対するポロイダル方向位相差の依存性。位相差をつけることにしたがい $K_z > K_0$ の成分が減少している。

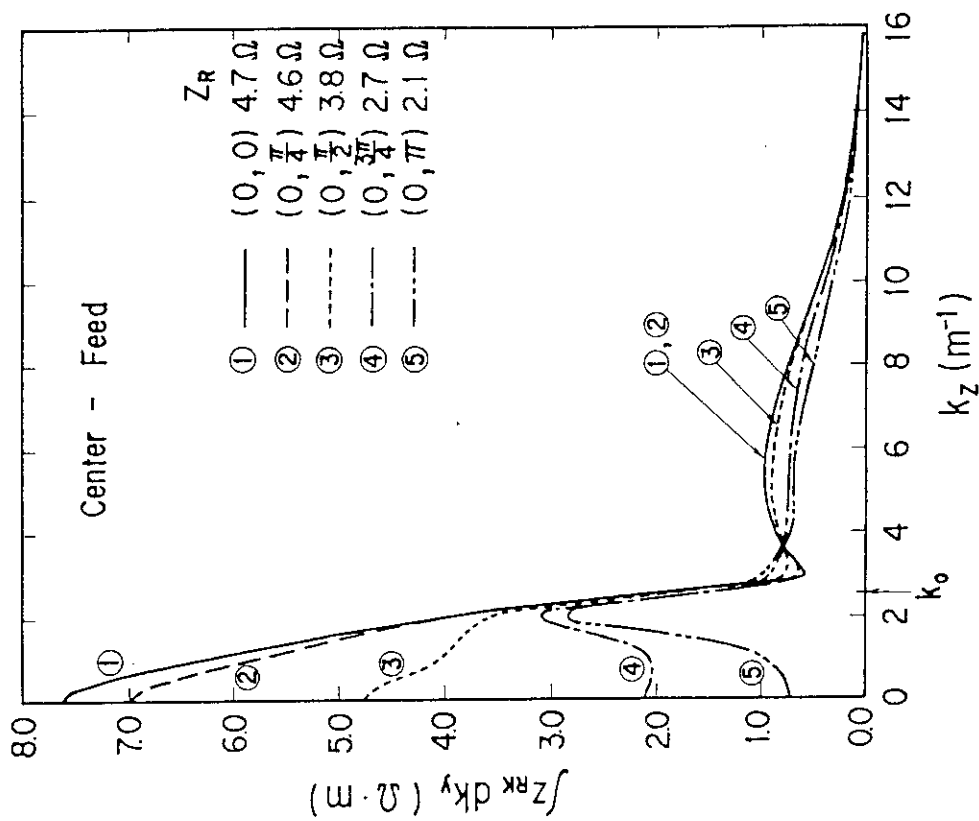


Fig.12 Center-short 型アンテナの、放射抵抗スペクトラムに対するポロイダル方向位相差の依存性。Center-feed 型とは、 $K_z < K_0$ の領域で逆の傾向を示す。

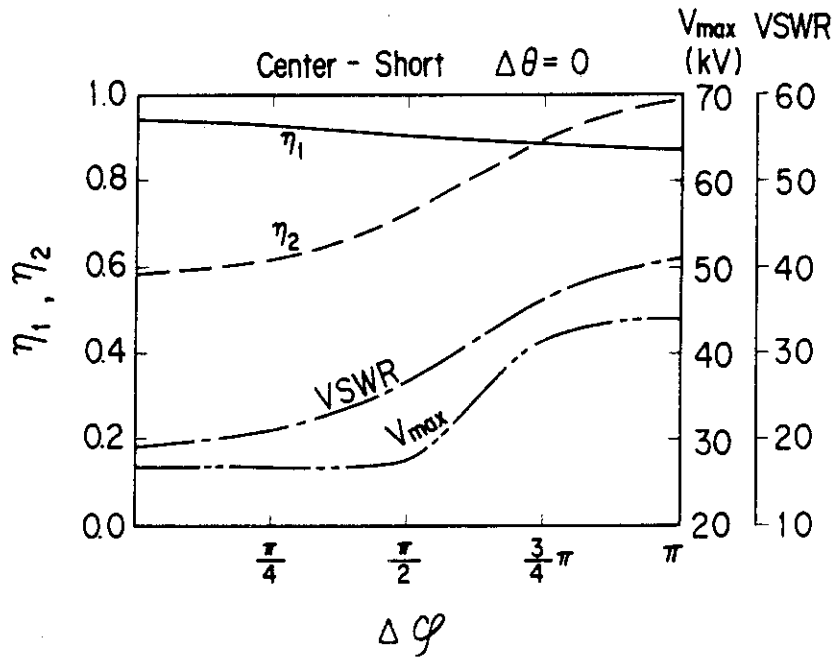


Fig.13

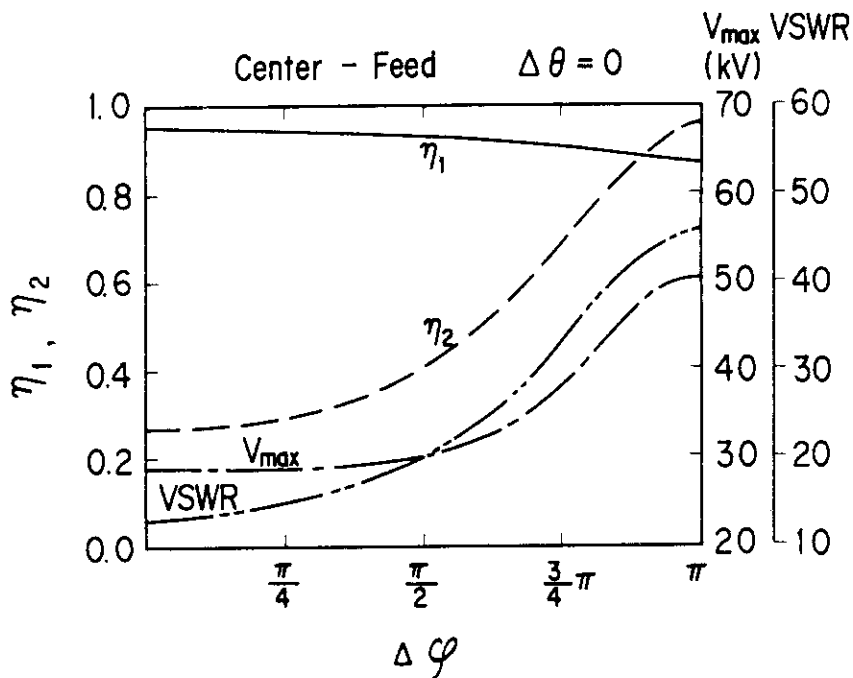


Fig.14

Fig.13,14 結合特性に対するトロイダル方向位相差の依存性。
ポロイダル方向には位相差は無い。

Center - Short $\Delta\theta = 0$

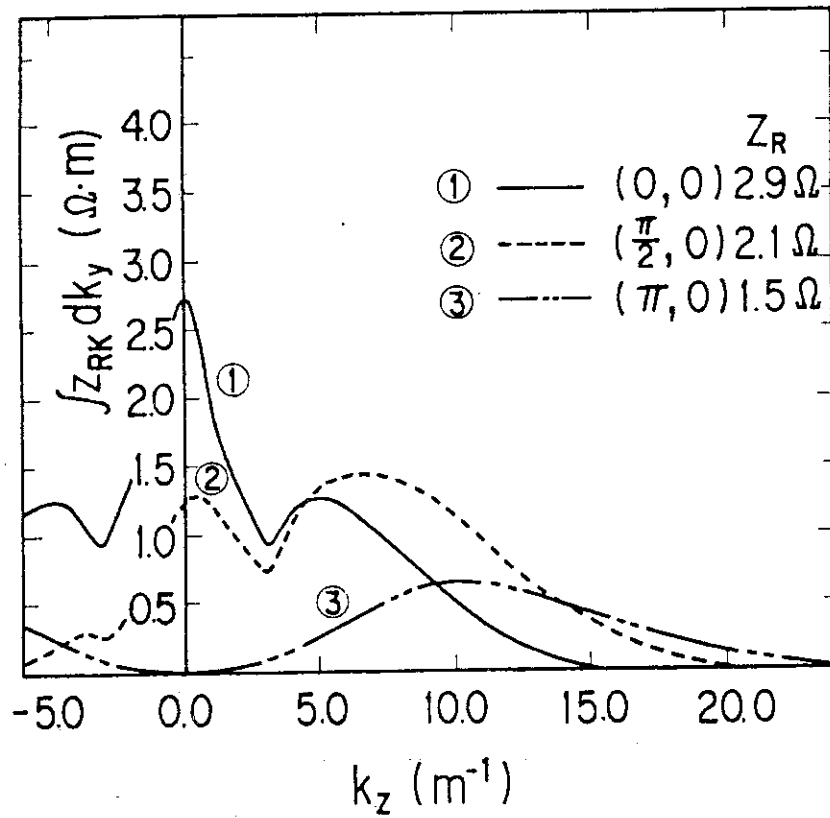


Fig.15 Center-short 型アンテナの，放射抵抗スペクトラムに対する，トロイダル方向相差の依存性。位相差 90° (②)の場合には，かなりの片寄ったスペクトラムになることがわかる。

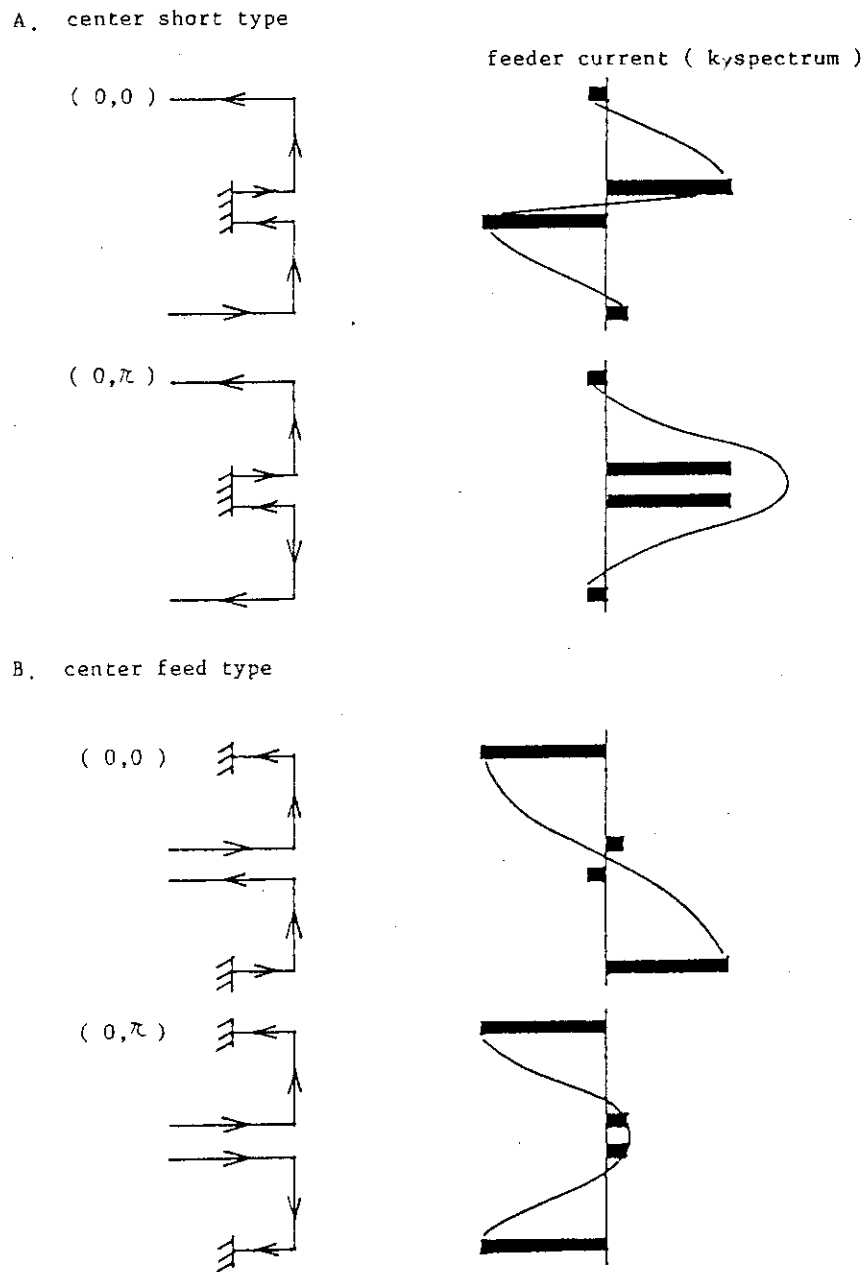


Fig.16 位相制御と電流分布。Center-short 型では、中心が Center-feed 型では、上下端へのフィード部が、それぞれ電流最大点となる。したがって、位相制御を行うことにより、スペクトラムが大きく変化する。

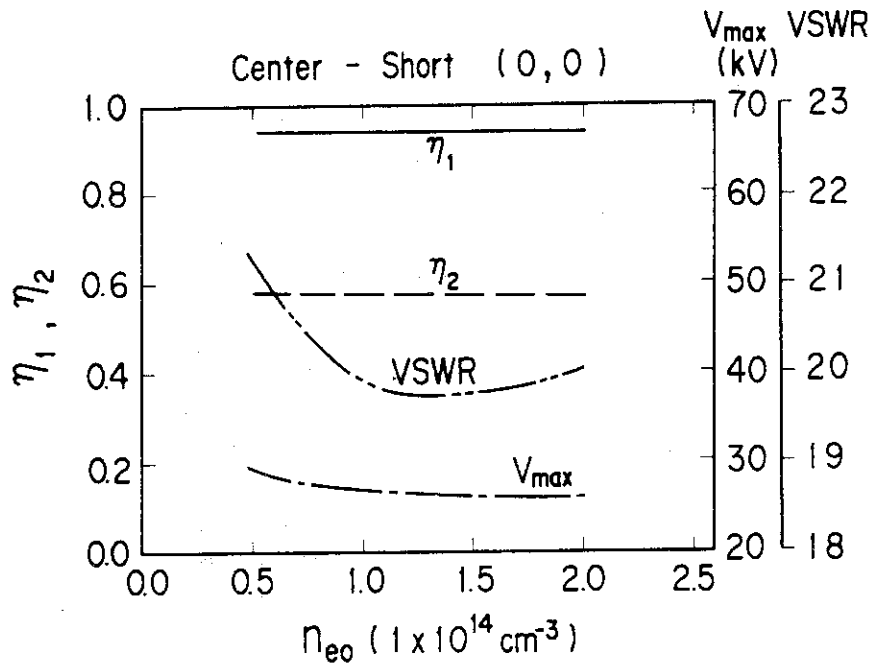


Fig.17 結合特性に対するプラズマ中心密度の依存性。

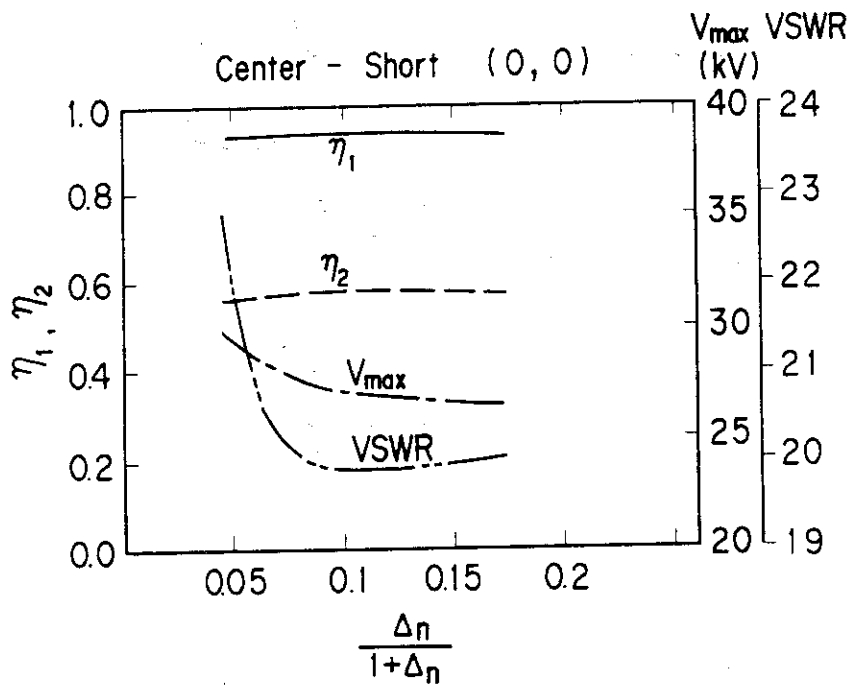


Fig.18 結合特性に対するプラズマ周辺密度の依存性。

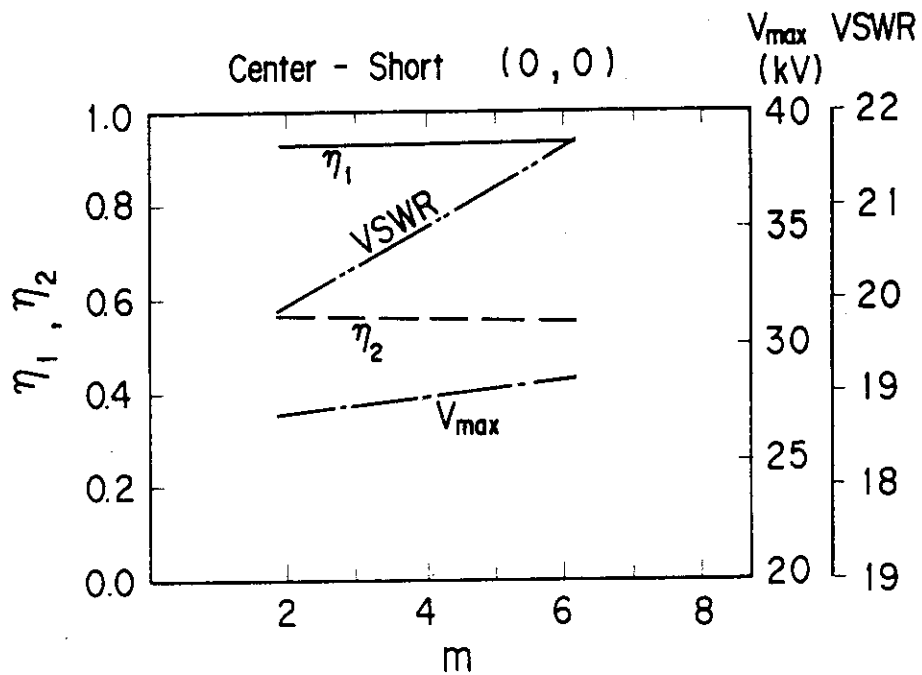


Fig.19 結合特性に対するプラズマ密度分布指数の依存性。

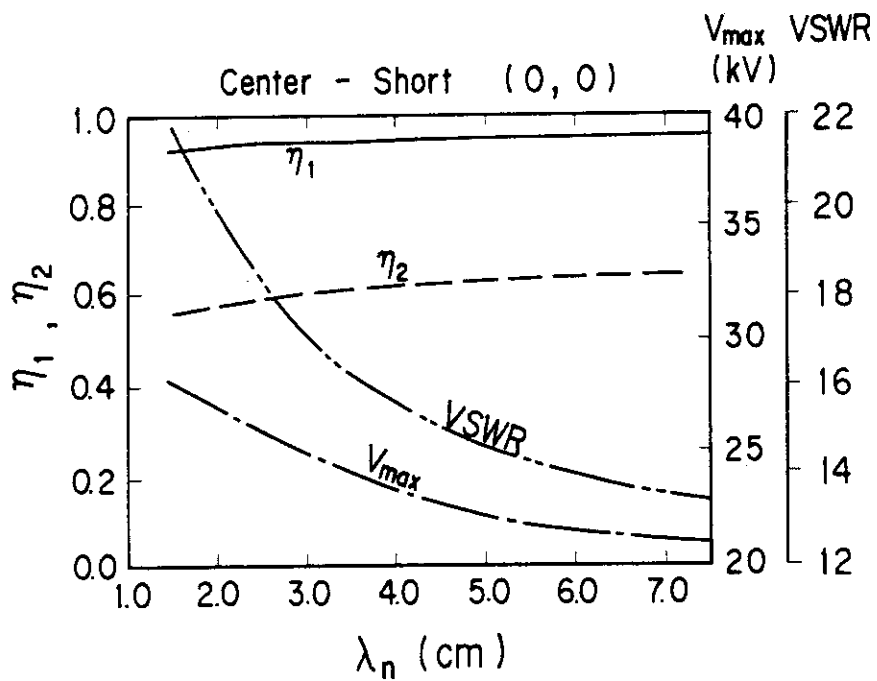


Fig.20 結合特性に対するプラズマ密度減長距離の依存性。