

JAERI-M

6 4 6 9

大型トカマク装置の真空容器電磁モデル

——過渡現象解析の一方法——

(臨界プラズマ試験装置設計報告・XIX)

1976年3月

嶋田隆一・谷 啓二・田村早苗・小林朋文*・小林哲郎**・吉田吉一***

日 本 原 子 力 研 究 所
Japan Atomic Energy Research Institute

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

大型トカマク装置の真空容器電磁モデル
—過渡現象解析の一方法—
(臨界プラズマ試験装置設計報告 XIX)

日本原子力研究所東海研究所核融合研究部

嶋田隆一・谷 啓二・田村早苗

小林朋文^{*}・小林哲郎^{**}・吉田吉一^{***}

(1976年2月10日受理)

トカマク型装置におけるトロイダル方向に電氣的絶縁のない真空容器をトロイダル方向の多数のワンターンコイル群として扱い、トカマク型装置固有の過渡的な電磁的現象に対して、真空容器上の電流分布を求めた。この方法を用いて、複雑な断面形状の真空容器についても、プラズマとの相互作用などによる過渡的な電磁現象を取り扱うことができる。

* 外来研究員 : 日立製作所原子力研究所
** " : 富士電機
*** 特別研究生 : 東北大学

JAERI-M 6469

Transient Current Distribution on a Vacuum Vessel of a
Large Tokamak

Ryuiti SHIMADA, Keiji TANI, Sanae TAMURA, Tomofumi KOBAYASHI,*
Tetsuro KOBAYASHI,** Yoshikazu YOSHIDA***

Division of Thermonuclear Fusion Research, Tokai, JAERI

(Received February 10, 1976)

A numerical method is presented for determining transient current distribution on a vacuum vessel of a large Tokamak which has no electric insulation in the toroidal direction. The vacuum vessel is treated as many toroidal conducting rings connected electrically with their mutual inductance.

The current distribution on the vessel is determined from the currents of these rings by solving the circuit equations. The inductance of the vessel is determined after taking the current distribution into account.

By this method, the current distribution of a vacuum vessel with arbitrary cross section can be obtained.

* Atomic Energy Research Laboratory, Hitachi, Ltd

** Fuji Electric Co., Ltd

*** Tōhoku University

目 次 な し

1 はじめに

トカマク型装置の特徴の一つは、プラズマを2次回路とした変圧器であると言うことができる。プラズマは一般に金属でつくられた真空容器中にあり、容器のワンターン抵抗はプラズマのそれより大きくなるように設計されている。鎖交磁束の変化によるワンターン電圧は、プラズマと容器の両方に電流を流すが、プラズマの温度が上がってプラズマの抵抗が減少すれば、ほとんどの電流はプラズマに流れることになり、容器電流は無視できる。

真空容器の電磁的特徴は、プラズマをトポロジカルに包んでいることである。真空容器に流れる電流は容器の自己インダクタンスとワンターン抵抗で決まる時定数で変化し、時定数より早い変化に対してはプラズマをシールドしようとする効果がある。従って、ワンターン抵抗が大きいといっても、容器の時定数より早い変化に対してプラズマや他のコイルに大きな影響を与えることが考えられる。

通常の電気回路図で、抵抗のあるトーラス状のコイルがもう一つのコイルを包んでいることの効果を表わすことは難しい。例えば、容器が完全導体でできていると想定すれば、プラズマと外部回路は完全に切り離されていなければならない。すなわち完全にシールドされた状態である。この状態を回路図上では容器抵抗を零とすることで実現できなければならない。このようにプラズマと容器とは、電気回路的に考えた場合、特殊な状態であると言うことができる。

この報告は、プラズマ電流の励起時やプラズマ電流柱の運動によるトカマク装置固有の過渡的な電磁現象において、上述のような特性をもった真空容器を取り扱う一つの方法を述べたものである。

第2章で電流分布を仮定したトーラス状コイルのインダクタンスの算出法により、自己インダクタンスを求め、さらに、相互インダクタンスについては、容器がプラズマを完全に包んでいる効果からその条件を求め、プラズマと容器の相互インダクタンスを求める。

第3章では、真空容器をトロイダル方向のワンターンリングに分解して、プラズマの囲りに多数配置し、それぞれのリングに回路方程式を与えて、これを解くことにより、容器に流れる電流の分布を求めることができることを述べている。

第4章では、現在設計中のJT-60の場合について、特にプラズマ電流がある時定数で消滅する場合の容器電流を求める。さらに、トロイダルリングに分解した容器全体の巨視的なインダクタンスをここで求めた電流の変化より逆に推定し、第2章で求めたものと比較する。

本報告では、このように真空容器を多数のトロイダルリングに置き換えることによって、容器に流れる電流の分布を求め、さらに容器の自己インダクタンス、プラズマとの相互インダクタンスを求める方法が有効であることを示す。この方法によれば、容器の断面形状、抵抗分布がかなり複雑な場合でも、まったく同様に取り扱うことができる。

2 真空容器の自己インダクタンス，プラズマとの相互インダクタンス

図1に示す円形断面形状の円環の自己インダクタンスは，表面の電流分布を一様と仮定すれば

$$L = \mu_0 R \left(\ln \frac{8R}{a} - 2.0 \right) \quad (1)$$

である。しかし，アスペクト比 (R/a) が小さくなると電流の一様分布は，期待できなくなる。

JT-60の場合，真空容器を $R = 3.0 \text{ m}$ ， $a = 1.2 \text{ m}$ と近似すれば， $L = 3.8 \mu\text{H}$ である。

プラズマとの相互インダクタンスは，図1に示すようにプラズマが容器に包まれており，この条件を考慮して図2に示す回路図より求める。相互インダクタンス M は，飽和などの非線形現象がないことから，相反性より

$$M_{fp} = M_{pf}, \quad M_{pv} = M_{vp}, \quad M_{fv} = M_{vf} \quad (2)$$

である。容器とプラズマの回路方程式は，

$$M_{fv} \dot{I}_f + L_v \dot{I}_v + M_{vp} \dot{I}_p + R_v I_v = 0 \quad (3)$$

$$M_{fp} \dot{I}_f + M_{vp} \dot{I}_v + L_p \dot{I}_p + R_p I_p = 0 \quad (4)$$

ただし，ここで添字 p ， v ， f はそれぞれプラズマ，真空容器，および変流器コイルを表わす。

包まれていることの条件として，もし容器のワントーン抵抗 R_v が零，つまり，容器が完全導体であったならば，変流器とプラズマは電磁的に結合しないことに注目する。(3)式の R_v を零とし，(3)，(4)式より

$$\begin{aligned} \left(M_{fp} - \frac{M_{vp} M_{fv}}{L_v} \right) \dot{I}_f + \left(L_p - \frac{M_{vp} M_{vp}}{L_v} \right) \dot{I}_p \\ + R_p I_p = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

変流器とプラズマは結合しないのであるから

$$M_{fp} - \frac{M_{vp} M_{fv}}{L_v} = 0 \quad (6)$$

となる。

(6)式が包まれていること条件であり、ここで M_{fp} と M_{fv} が等しい、すなわち、変流器の作る磁力線は、容器、プラズマの領域にもれ磁束を作らないと仮定すれば、(6)式から

$$M_{vp} = L_v \tag{7}$$

である。これがプラズマが真空容器に包まれていること条件である。結局容器に流れる電流の作る磁束は、すべてプラズマと鎖交することを表わしている。この結果、(5)式のプラズマのインダクタンスは $L_p - M_{pv}$ となり、プラズマと容器の間の空間の磁束によるインダクタンスであることが示され、完全導体で包まれたプラズマをうまく説明することができる。

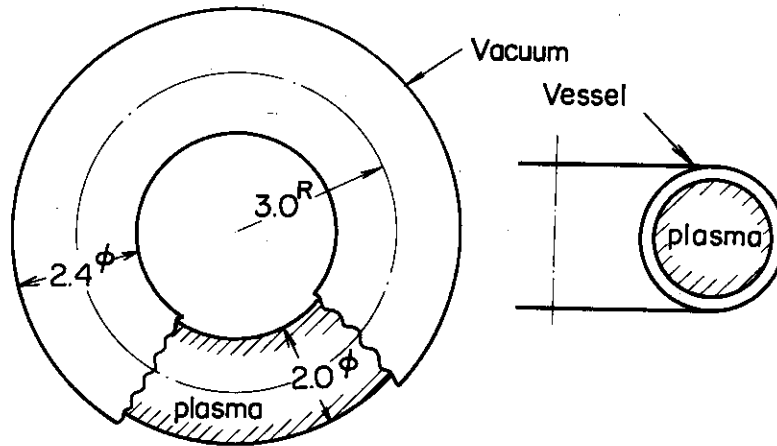


図1 真空容器とプラズマ (単位 メートル)

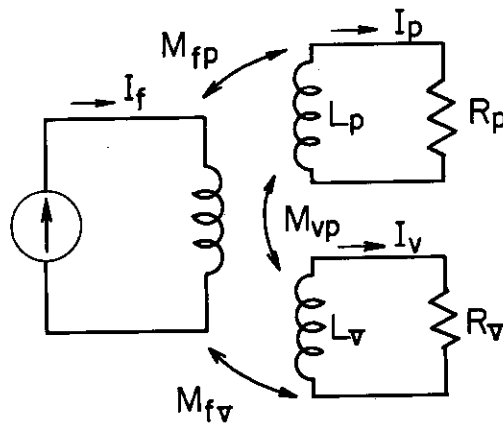


図2 回路図

3 真空容器のリングモデル

第2章では、真空容器に流れる電流の表面分布を一様と仮定して求めたが、ここでは容器をトロイダル方向にワンターンした平行な同軸円形コイル群に分割して、それぞれのコイルに回路方程式を与えることによって、容器の電流分布を求める方法を述べる。

図3に示すように、真空容器はプラズマを囲む軸対称なトーラスであるとし、ポロイダル方向（ θ 方向）に分割し、それぞれのリングの中心が容器の形状を十分現わす程度の分割数が必要である。

容器がトロイダル方向に軸対称であり、かつ上下対称であるとすれば、 θ 方向へ流れる電流はない（もし流れれば、その電流のリターンがない）のであるから、このように分割しても、プラズマと真空容器の電磁的結合になんら影響をおよぼさない。

リング k に着目すれば、このリングの回路方程式は、

$$M_{kk} \dot{I}_k + \sum_{k \neq j} M_{kj} \dot{I}_j + I_k R_k = 0 \quad (8)$$

M_{kk} : リング k の自己インダクタンス

M_{kj} : リング k とリング j との相互インダクタンス

I_k : リング k の電流

R_k : リング k のワンターン抵抗

従って、この系の回路方程式は

$$\begin{bmatrix} M_{kj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_k \end{bmatrix} = 0 \quad (9)$$

で表わされる。リングの自己インダクタンスは、各リングの相互の位置が容器の電気的特性を決定すると考えられるので本来無意味で、実際はリング間隔よりも十分小さい円形断面のリングの自己インダクタンスとする。この自己インダクタンスの取り扱いの影響は後に述べる。

相互インダクタンスは、図4に示すような2個の同軸平行な円形コイルの場合、

$$M = \frac{\mu}{4\pi} \iint \frac{ab \cos(\varphi - \varphi') d\varphi d\varphi'}{\sqrt{a^2 + b^2 + d^2 - 2ab \cos(\varphi - \varphi')}} \quad (10)$$

となる。この式は次のように書き換えることができる。

$$M = \frac{\mu}{4\pi} f \sqrt{ab} \quad (11)$$

と置けば、 f は

$$f = -4\pi \left\{ \left(k - \frac{2}{k}\right) K + \frac{2}{k} E \right\} \quad (12)$$

ここに $k^2 = 4ab / \{(a+b)^2 + d^2\}$

K, E はそれぞれ k を母数とする第一種および第二種完全楕円積分である。

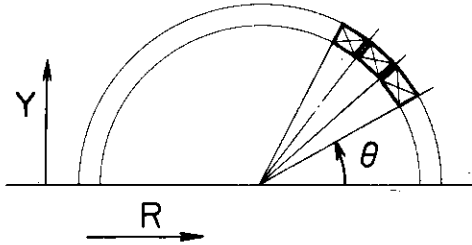


図3 真空容器の分割

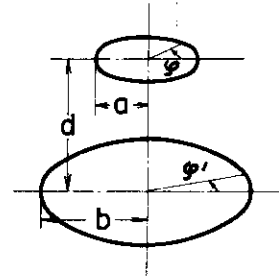


図4 同軸平行円形コイルの相互インダクタンス

4 リングモデルによる真空容器電磁現象の解析

4.1 計算式

プラズマと真空容器の電磁相互作用を取り扱う際に、プラズマの位置が時間的に変化する場
合についても、解析できるようにしたい。電磁誘導による電圧 V_k は

$$V_k = \frac{d\phi_k}{dt} = \Sigma (M_{kj} \dot{I}_j + \dot{M}_{kj} I_j) \quad (13)$$

であり、プラズマの変位による相互インダクタンスの時間変化がある場合は、 M_{kj} の微分形を
求めることが必要となり、複雑となる。そこで鎖交磁束の連続に基づいた回路方程式で考える。
この方が応用範囲が広がる利点がある。

リング k について、鎖交磁束数 ϕ_k および回路方程式は、次のようである。

$$\phi_k = \Sigma M_{kj} I_j \quad (14)$$

$$\phi_k = \int V_k dt \quad (15)$$

$$V_k + R_k I_k = 0 \quad (16)$$

V_k : リング k のワンターン電圧

従って、この系の回路方程式は、

$$\begin{bmatrix} M_{kj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_k \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} I_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{kj} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \phi_k \end{bmatrix} \quad (17')$$

$$\begin{bmatrix} \phi_k \end{bmatrix} = \int \begin{bmatrix} V_k \end{bmatrix} dt \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} V_k \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_k \end{bmatrix} \quad (19)$$

(17), (18), (19) 式により、プラズマと真空容器の相互作用を解析することができる。

4.2 ADSL シミュレーター言語を用いての計算

ADSL 言語は時間経過に対して変数が連続的に変化する過程をシミュレートするために開発されたものである。これは主にアナログ計算機の関数ブロック（例えば積分器、遅延回路など）を機能に含んでおり、Fortran 言語の機能もあわせて活用できる。ADSL 言語はアナログ計算機のブロック図、または提起された回路を微分方程式で表現したとおりにプログラムできるように意図されている。

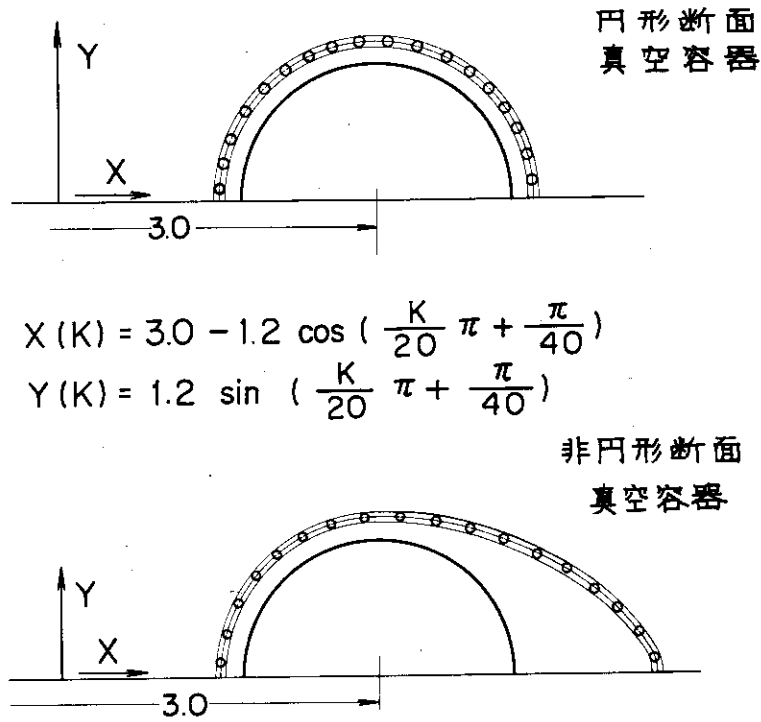
JT-60 の場合、真空容器はトロイダル方向に厚肉部とベローズ部の交互になっているが、ワンターン抵抗は、ベローズ部で決まるため、厚肉部を無視してよい。ベローズの性質から、トロイダル方向の抵抗は、 θ 方向に均一に分布していると考えられる。従って、容器を N 本のリングに分割する場合は、それぞれのリングのワンターン抵抗は真空容器抵抗の N 倍を与える。

リングの配置は図 5 に示すように、 $X-Y$ 平面の座標で与えられる。ここでは、まず円形断面について計算し、第 2 章で求めた結果と比較し、さらに JT-60 の非円形断面について検討を行なう。

真空容器に流れる電流が現実の問題になるのは、次のような過渡的な状況が生じる場合である。

- ① プラズマ電流立ち上げ時 → 容器電流分布によるプラズマ領域の不整磁場
- ② プラズマのフィードバック制御時 → 制御おくれ時間
- ③ プラズマの消滅時 → 容器電流の大きさ

この中で、③の場合について計算を行なった。



$$X(K) = 3.0 - 1.2 \cos\left(\frac{K}{20}\pi + \frac{\pi}{40}\right)$$

$$Y(K) = 1.2 \sin\left(\frac{K}{20}\pi + \frac{\pi}{40}\right)$$

K	X	Y	K	X	Y
1	1.803	0.094	11	3.120	1.200
2	1.833	0.280	12	3.420	1.180
3	1.891	0.459	13	3.700	1.080
4	1.976	0.627	14	3.950	0.940
5	2.087	0.779	15	4.180	0.800
6	2.220	0.912	16	4.400	0.680
7	2.373	1.023	17	4.640	0.520
8	2.540	1.108	18	4.820	0.380
9	2.719	1.166	19	4.950	0.220
10	2.905	1.196	20	5.04	0.100

図5 円形断面，非円形断面それぞれのリング配置

4.3 プラズマ消滅時の真空容器電流

プラズマ電流が3.3MA (JT-60のプラズマ電流の設計最大値) から τ の時定数で減少する場合の容器に流れる電流を求める。

すなわち，

$$I_p = I_{p0} e^{-\frac{t}{\tau}} \tag{20}$$

真空容器に流れる電流分布，全電流の時間変化を円形，非円形断面の場合に対して計算した結果を図6, 7, 8, 9に示す。

4.4 リングモデルによる真空容器の自己インダクタンス，相互インダクタンス

リングモデルによる真空容器の全電流波形より，自己インダクタンス，プラズマとの相互インダクタンスを求める。

真空容器に流れる電流 I_v は、各リングの同時刻の電流の総和とする。

$$I_v = \sum I_k \tag{21}$$

プラズマとの結合は、回路図2において、 $I_f = \dot{I}_f = 0$ として

$$I_p = I_{p0} e^{-\frac{t}{\tau}} \tag{22}$$

$$M_{vp} \dot{I}_p + L_v \dot{I}_v + R_v I_v = 0 \tag{23}$$

(23)式を I_v について解き次式を得る。

$$I_v = - \frac{M_{vp} I_{p0}}{\tau L_v \left(\frac{R_v}{L_v} - \frac{1}{\tau} \right)} \left(e^{-\frac{1}{\tau} t} - e^{-\frac{L_v}{L_v} t} \right) \tag{24}$$

I_v を最大にする時間 $t = t_{max}$ は、

$$t_{max} = \frac{1}{\frac{1}{\tau} - \frac{R_v}{L_v}} \ln \frac{L_v}{\tau R_v} \tag{25}$$

である。図6で円形断面の容器の全電流波形と比較することによって (t_{max} の値により L_v の値が、そのときの I_v の値から M_{vp} の値がそれぞれ求まる。) $L_v = 4.6 \mu\text{H}$, $M_{vp} = 4.0 \mu\text{H}$ と決めると、第2章で求めたものとよく一致する。図10は、リングモデルによる場合と集中定数的に L_v , M_{vp} を与えた場合の容器の全電流波形を比較したものである。

真空容器の自己インダクタンス、プラズマとの相互インダクタンスは、容器上の分布を考慮しなくてもよい場合は、この方法で求めた L_v , M_{vp} で近似してよい。

J T - 60 の非円形真空容器の場合は、同様の方法により自己インダクタンス、プラズマとの相互インダクタンスをそれぞれ $4.61 \mu\text{H}$, $3.68 \mu\text{H}$ と決定できる。

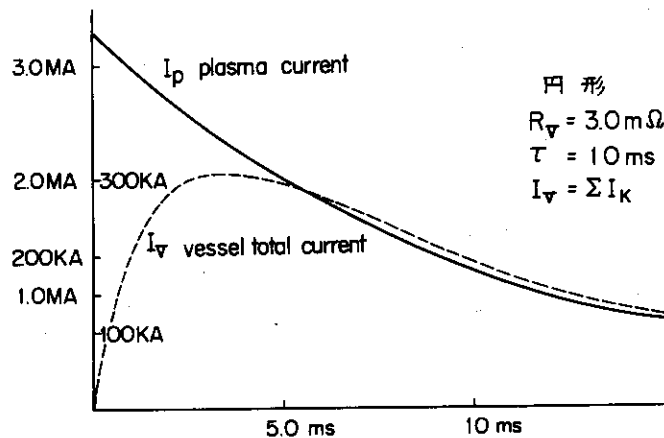


図6. プラズマ電流変化，円形断面真空容器の全電流変化

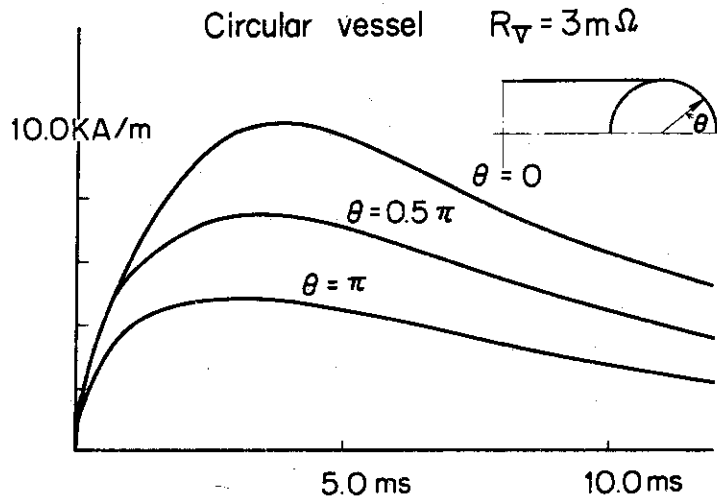


図7 円形断面真空容器の電流密度時間変化

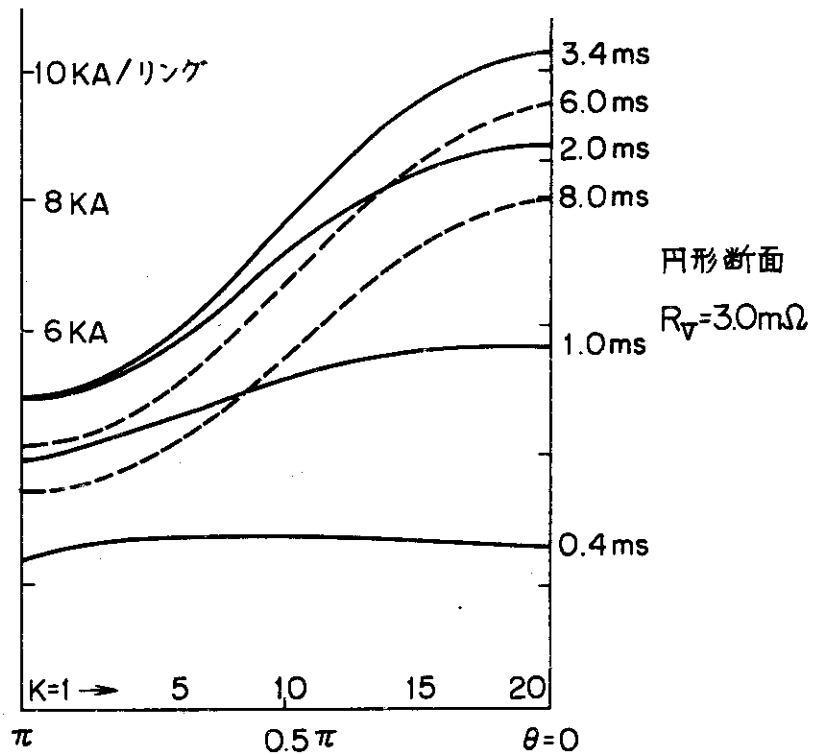


図8 円形断面真空容器の電流分布

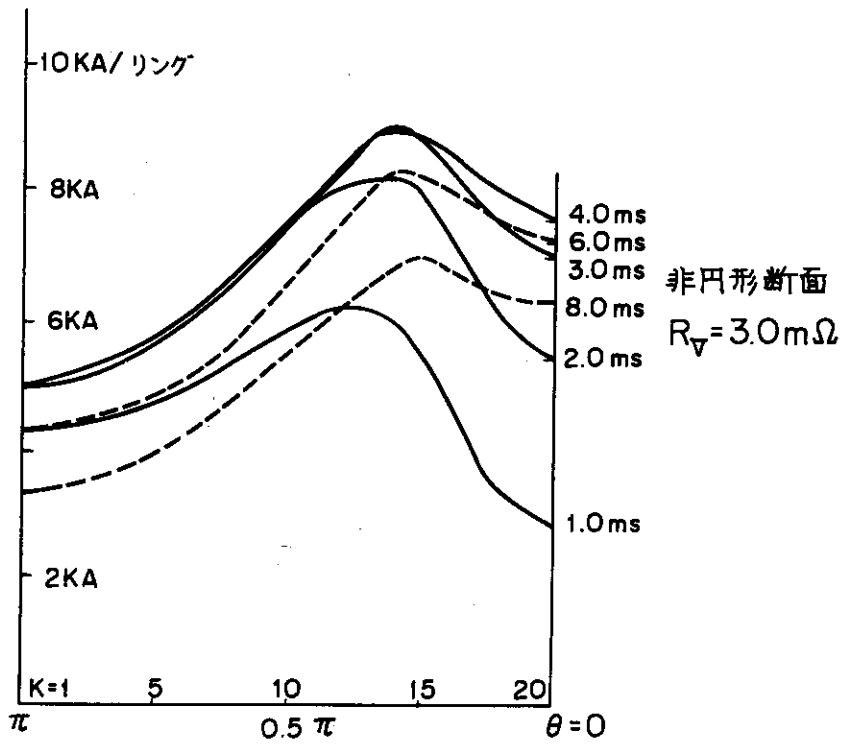


図9 非円形断面真空容器の電流分布

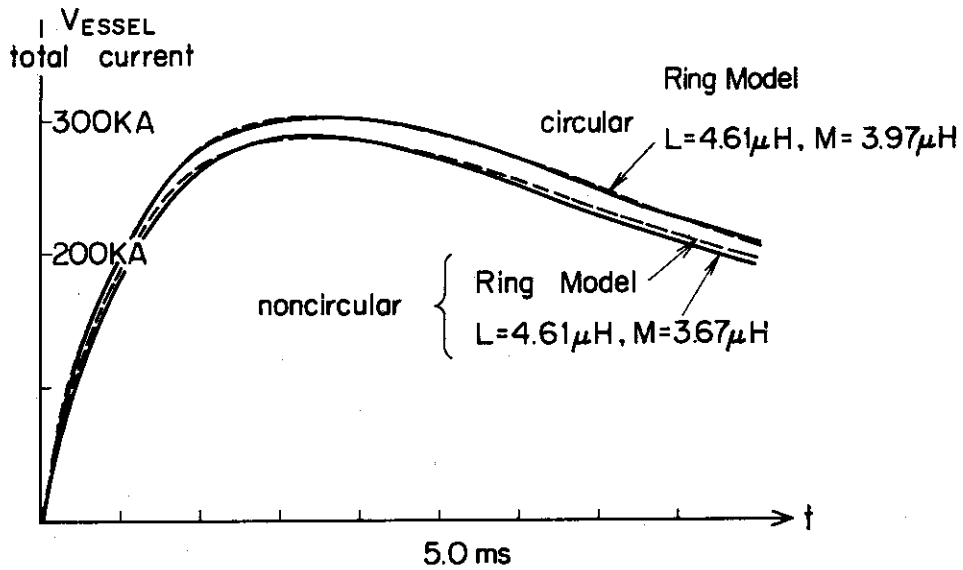


図10 リングモデルによる場合と集中定数的に L_v, M_{vp} を与えた場合の容器全電流波形の比較

5 あとがき

真空容器をトロイダル方向の同軸平行円形コイル群に置き換えて、真空容器に流れる電流の分布を求め、その場合の自己インダクタンス、プラズマとの相互インダクタンスを求めることができた。さて、第3章に残してあった問題、すなわち分割された各円形リングの自己インダクタンスの影響であるが、リングの断面を半径5 cmとした場合と半径1 cmとした場合について実際に計算を行ない両者の差がほとんどないことを確めた。

このことからこのリングモデルによる計算の妥当性が示されていると考えてよいであろう。

この方法は複雑な形の真空容器、抵抗分布でも、まったく同様に取り扱い、また効果を発揮することが予想される。最近、狐崎氏は、JT-4の真空容器に対して、多様な応用を試みている。JT-60に対しては、ここで報告した方法をさらに発展させ、現在、計算コードを作成中である。この計算コードは、全トロイダル磁場コイル系はもちろん、真空容器、プラズマを計算機の能力によってできるだけ多くのトロイダルリングに分解し、時々刻々の電流分布、磁束分布、電界分布を求めることを目的としている。

尚、この研究に対して有益な助言をいただいた吉川允二氏、鈴木康夫氏をはじめ、JT-60グループの方々に御礼申し上げます。

付録 真空容器の分布電流解析コード CUDISEL
ADSLプログラムマニュアルおよびプログラムリスト

(1) パラメータ表示

$\mu(k, J)$: リング k と J の相互インダクタンス

$L(J)$: リング J の自己インダクタンス

$F_0(J)$: 鎖交磁束 ($t=0$)

$R(J)$: ワンターン抵抗

$I(J)$: リング電流

$V(J)$: ワンターン電圧

$FF(J)$: 鎖交磁束 ($t=t$)

$X(J)$: リングのトーラス大半径方向の座標

$Y(J)$: 大半径方向に垂直の座標

$A(J)$: リングの小半径

I_p : プラズマ電流, I_{VE} : 容器トータル電流, R_{VE} : 容器ワンターン抵抗,

DWNTIM : プラズマ電流減少時定数, $J \leq 10$, プラズマ $J > 10$ 容器

(2) インプットデータ

Card 1 タイトル文は第1桁目から書く必要はないが、データとの間に1つ以上の空白がある。なお、第1桁目に星印がある行は注釈行である。

Card 2 2次元以上の配列を宣言するとき第1桁目に/を置いたFORTRAN文である。

Card 3 ラベルSTORAGEは一次元の配列を宣言する、...は連続を表わす。

Card 6 TABLE文は、STORAGEで宣言された配列に値を代入する。

Cade 14 ラベルFIXEDは、整数変数を宣言する。

ここに書れていない変数はすべて実数型である。

Cade 15 CONST, PARAM文はデータ文であることを示す。

Card 16 FINISH文は、この条件でシミュレーションを終了する。

Card 18~21 積分法を指定する。ADSLには、7種類の積分法が用意され、集中化積分ルーチンを指定する。ここでは可変時間間隔の4次のルンゲ・クッタ法である。

TIMER文は、積分演算時間(FINTIM), 出力間隔(OUTDEL), 積分間隔

(DELT)を指定する。DELMINは、可変間隔積分法の最小積分間隔を指定する。

ここでは、出力間隔0.4mS, 終了時間20mSである。

Cade 22 INITIAL から DYNAMIC までが初期値設定セグメントである。この中の構造文はすべて時刻0.0のときのみ、計算される。

Cade 25 NOSORT文以後は、自動順序づけされない。

Cade 30 リングの上下対称性を表わす。

Card 34 容器の抵抗の40倍のワンターン抵抗を与える。

Card 37 容器リングのインダクタンスを計算する。

- Card 51 $t = 0$ の鎖交磁束数を計算する。
- Card 58 シミュレーションの実行セグメントの開始を示す。
- Card 60 プラズマが静止している場合、39へ飛ぶ。動く場合は、その位置のインダクタンスを各時刻で計算する。
- Card 66 レセクゼーションさせる。しかし、積分法が可変時間間隔を採用し、相対誤差、絶対誤差がそれぞれ、0.0001, 0.001 に指定されているので、 $I(J)$ の変化は少なく、レラクゼーションさせずともよい。ここでは10回行っている。
- Card 67 磁束変化からリングの電流を求める。
- Card 77 ワンターン電圧を求める。
- Card 80 プラズマの大半径方向の位置、プラズマを時間的に変位させる場合は、ここに $X_p = f(\text{TIME})$ の関数で与える。
- Card 86 プラズマ電流の変化
- Card 88 SORT文以後は、自動順序づけの対象になる。
- Card 89~109 ADSLの積分法、アナログ計算機の積分器と同じ機能を持つ。V10を初期値0.0で積分すると、FF10になる。ADSLでは、この積分器を300まで使用できる。この中で添字付き変数は使用できない。
- Card 197 出力文、PRINT文は、カラム形式または、等号形式で最大49個まで出力間隔で出力される。
- Card 202 LABEL文はプリント・プロットのタイトルを与える。
- Card 203 プリント・プロット形式で出力させる。
- Card 207 副関数プログラムは、STOP文の後におかれる。ここでは、相互インダクタンスを求める。
- Card 218 自己インダクタンスを求める。
- Card 223 ENDJOB文でADSLプログラムの終りを示す。この文だけ第1桁目から書く。
最後にこのプログラムの出力の一部、Card 203 によるプリント・プロット形式での出力を示す。

SOURCE STATEMENT

```

**** CURRENT DISTRIBUTION ON VACUUM VESSEL CODE NO=CUDISEL *****
1 TITLE CURRENT DISTRIBUTION (PLASMA DOWN)
2 / DIMENSION MU(50,50)
3 STORAGE L(50),F0(50), R(50),I(50),V(50),F(50),FF(50),X(50), ...
4 Y(50),A(50),RC(10),FD(50),FSMI(50)
5 STORAGE I0(10)
6 TABLE I(10)=3.3E+6, I(11-50)=40*0.0
7 TABLE A(1-10)=0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9,1.0,A(11-50)= ...
8 40*0.01
9 TABLE X(21-30)= 3.12, 3.42, 3.70, 3.95, 4.18, ...
10 4.40, 4.64, 4.82, 4.95, 5.04
11 TABLE Y(21-30)= 1.20, 1.18, 1.08, 0.94, 0.80, ...
12 0.68, 0.52, 0.38, 0.22, 0.10
13 TABLE X(1-10)=10*3.0, Y(1-10)=10*0.0
14 FIXED II, ID, JJ, JD, K
15 CONST RVE=1.5E-3
16 FINISH IP=3.0E+3
17 PARAM DWNTIM=10.0E-3
18 METHOD RKS
19 TIMER OUTDEL=0.4E-3
20 TIMER FINTIM=20.0E-3
21 TIMER DELMIN=0.5E-10
*****
22 INITIAL
23 IAU=DWNTIM
24 IPO=3.3E+6
25 NOSORT
26 DO 1 K=11,20
27 X(K)=3.0-1.2*COS(3.1416/20.0*(K-11)+3.1416/40.0)
28 Y(K)=1.2*SIN(3.1416/20.0*(K-11)+3.1416/40.0)
29 1 CONTINUE
30 DO 2 K=31,50
31 X(K)=X(K-20)
32 Y(K)=-Y(K-20)
33 2 CONTINUE
34 DO 3 K=11,50
35 R(K)=RVE*40.0
36 3 CONTINUE
37 DO 20 II=10,50
38 DO 10 JJ=10,50
39 IF (II.EQ. JJ) GO TO 5
40 IF (II.LE.10,AND, JJ.LE.10) GO TO 4
41 MU(II, JJ)=MUTIAL(X, Y, II, JJ)
42 MU( JJ, II)=MU( II, JJ)
43 GO TO 10
44 4 MU(II, JJ)=LINDU(X, II, A)
45 MU( JJ, II)=MU( II, JJ)
46 GO TO 10
47 5 MU(II, JJ)=0.0
48 10 CONTINUE
49 L(II)=LINDU(X, II, A)
50 20 CONTINUE
51 DO 35 II=10,50
52 FU(II)=0.0

```

FACOM 230-M7 A D S L -750515- (V-01,L-13)

76-02-03 PAGE 2

SOURCE STATEMENT

```

53      DO 30 JJ=10,50
54      FU(JJ)=FO(JJ)+MU(JJ,JJ)*I(JJ)
55      30 CONTINUE
56      FU(JJ)=FU(JJ)+L(JJ)*I(JJ)
57      35 CONTINUE
*****
58      DYNAMIC
59      NOSORT
60      IF (XP.EQ.3.0) GO TO 39
61      DO 37 JD=11,50
62      MU(10,JD)=MUTIAL(X,Y,10,JD)
63      MU(JD,10)=MU(10,JD)
64      37 CONTINUE
65      39 CONTINUE
66      DO 55 K=1,10
67      DO 50 ID=11,50
68      FD(ID)=0.0
69      F(ID)=FO(ID)+FF(ID)
70      DO 40 JD=10,50
71      FD(ID)=FD(ID)+MU(ID,JD)*I(JD)
72      40 CONTINUE
73      FSMI(ID)=F(ID)-FD(ID)
74      I(ID)=FSMI(ID)/L(ID)
75      50 CONTINUE
76      55 CONTINUE
77      DO 60 ID=11,50
78      V(ID)=-R(ID)*I(ID)
79      60 CONTINUE
80      XP=3.0
81      X(10)=XP
82      IVE=0.0
83      DO 120 ID=11,50
84      IVE=IVE+I(ID)
85      120 CONTINUE
86      I(10)=I*EXP(-TIME/TAU)
87      IP=I(10)
88      SORT
89      FF10=INTGRL(0.0,V10)
90      FF11=INTGRL(0.0,V11)
91      FF12=INTGRL(0.0,V12)
92      FF13=INTGRL(0.0,V13)
93      FF14=INTGRL(0.0,V14)
94      FF15=INTGRL(0.0,V15)
95      FF16=INTGRL(0.0,V16)
96      FF17=INTGRL(0.0,V17)
97      FF18=INTGRL(0.0,V18)
98      FF19=INTGRL(0.0,V19)
99      FF20=INTGRL(0.0,V20)
100     FF21=INTGRL(0.0,V21)
101     FF22=INTGRL(0.0,V22)
102     FF23=INTGRL(0.0,V23)
103     FF24=INTGRL(0.0,V24)
104     FF25=INTGRL(0.0,V25)
105     FF26=INTGRL(0.0,V26)
106     FF27=INTGRL(0.0,V27)

```

FACOM 230-M7 A D S L -750515- (V-01,L-13)

76-02-03 PAGE 3

SOURCE STATEMENT

```
107      FF28=INTGRL(G.U,V28)
108      FF29=INTGRL(G.U,V29)
109      FF30=INTGRL(G.U,V30)
110      V10=V(10)
111      V11=V(11)
112      V12=V(12)
113      V13=V(13)
114      V14=V(14)
115      V15=V(15)
116      V16=V(16)
117      V17=V(17)
118      V18=V(18)
119      V19=V(19)
120      V20=V(20)
121      V21=V(21)
122      V22=V(22)
123      V23=V(23)
124      V24=V(24)
125      V25=V(25)
126      V26=V(26)
127      V27=V(27)
128      V28=V(28)
129      V29=V(29)
130      V30=V(30)
131      V31=V(31)
132      V32=V(32)
133      V33=V(33)
134      V34=V(34)
135      V35=V(35)
136      V36=V(36)
137      V37=V(37)
138      V38=V(38)
139      V39=V(39)
140      V40=V(40)
141      V41=V(41)
142      V42=V(42)
143      V43=V(43)
144      V44=V(44)
145      V45=V(45)
146      V46=V(46)
147      V47=V(47)
148      V48=V(48)
149      V49=V(49)
150      V50=V(50)
151      I10=I(10)
152      I11=I(11)
153      I12=I(12)
154      I13=I(13)
155      I14=I(14)
156      I15=I(15)
157      I16=I(16)
158      I17=I(17)
159      I18=I(18)
160      I19=I(19)
161      I20=I(20)
```

FACOM 230-M7 A D S L - (50515- (V-01.L-13)

76-02-03 PAGE 4

```

SOURCE STATEMENT
162      121=1(21)
163      122=1(22)
164      123=1(23)
165      124=1(24)
166      125=1(25)
167      126=1(26)
168      127=1(27)
169      128=1(28)
170      129=1(29)
171      130=1(30)
172      NCSORT
173      FF(10)=FF10
174      FF(11)=FF11
175      FF(12)=FF12
176      FF(13)=FF13
177      FF(14)=FF14
178      FF(15)=FF15
179      FF(16)=FF16
180      FF(17)=FF17
181      FF(18)=FF18
182      FF(19)=FF19
183      FF(20)=FF20
184      FF(21)=FF21
185      FF(22)=FF22
186      FF(23)=FF23
187      FF(24)=FF24
188      FF(25)=FF25
189      FF(26)=FF26
190      FF(27)=FF27
191      FF(28)=FF28
192      FF(29)=FF29
193      FF(30)=FF30
194      DO 200 10=31,50
195      FF(10)=FF(10-20)
196      200 CONTINUE
197      PRINT IVE, IP, XP
198      PRINT I11,I12,I13,I14,I15,I16,I17,I18,I19,I20,I21,I22,I23,I24,I25
199      PRINT I26,I27,I28,I29,I30
200      PRINT V10,V11,V12,V13,V14,V15,V16,V17
201      PRINT V18,V19,V20,V21,V22,V23,V24,V25,V26,V27,V28,V29,V30,V31,V32
202      LABEL VESSEL TOTAL CURRENT DWNTIM=10 MS, RVE=1.5 MOHM
203      PRINT IVE,IP
204      PRINT I11, I15, I20, I25, I30
205      END
206      STOP
207      REAL FUNCTION MUTIAL(X,Y,I,J)
208      DIMENSION X(50),Y(50)
209      DD=(X(I)-X(J))**2+(Y(I)-Y(J))**2
210      AK2=DD/((X(I)+X(J))**2+(Y(I)-Y(J))**2)
211      AK=SQRT(1.0-AK2)
212      CALL CEL11S(AK,CK)
213      CALL CEL12S(AK,CE)
214      F=-4.0*3.1416*((AK-2.0/AK)*CK+2.0/AK*CE)
215      MUTIAL=SQRT(X(I)*X(J))*F*1.0E-07
216      RETURN

```

SOURCE STATEMENT

```

217      END
218      REAL FUNCTION LINDU(X,I,A)
219      DIMENSION X(50),A(50)
220      LINDU=3.1416**4.0E-7*(ALOG(8.0*X(I)/A(I))-1.75)*X(I)
221      RETURN
222      END
223  ENDJOB
    
```

OUTPUT VARIABLE SEQUENCE

TAU	IPO	XP	IVE	IVE	IP	V10	ZZ0002	FF10	V11
ZZ0004	FF11	V12	ZZ0006	FF12	V13	ZZ0008	FF13	V14	ZZ0010
FF14	V15	ZZ0012	FF15	V16	ZZ0014	FF16	V17	ZZ0016	FF17
V18	ZZ0018	FF18	V19	ZZ0020	FF19	V20	ZZ0022	FF20	V21
ZZ0024	FF21	V22	ZZ0026	FF22	V23	ZZ0028	FF23	V24	ZZ0030
FF24	V25	ZZ0032	FF25	V26	ZZ0034	FF26	V27	ZZ0036	FF27
V28	ZZ0038	FF28	V29	ZZ0040	FF29	V30	ZZ0042	FF30	V31
V32	V33	V34	V35	V36	V37	V38	V39	V40	V41
V42	V43	V44	V45	V46	V47	V48	V49	V50	I10
I11	I12	I13	I14	I15	I16	I17	I18	I19	I20
I21	I22	I23	I24	I25	I26	I27	I28	I29	I30

TRANSLATION TABLE CONTENTS

	OUTPUT NAME	INPUT NAME	INTGRL BLOCK	MEMORY BLOCK	PARAM NAME	STORAGE NAME	LITERAL CONST	MACRO DEFINE	SORT SECTION
USED	110	66	21	0	2	14	21	4	2
(MAX)	(1000)	(3000)	(300)	(300)	(400)	(25)	(100)	(50)	(15)

FACOM 230-M7 A D S L -750515- (V=01,L=13)

76.02.03 PAGE 16

VESSEL TOTAL CURRENT DWNTIM=10 MS, RVE=1.5 MOHM

RKS METHOD

TIME	IVE	(MIN)	(MAX)
0.0	0.0	+	
0.4000E-03	0.11266E+06	-----+	
0.8000E-03	0.20109E+06	-----+	
0.1200E-02	0.27069E+06	-----+	
0.1600E-02	0.32550E+06	-----+	
0.2000E-02	0.36860E+06	-----+	
0.2400E-02	0.40213E+06	-----+	
0.2800E-02	0.42787E+06	-----+	
0.3200E-02	0.44721E+06	-----+	
0.3600E-02	0.46124E+06	-----+	
0.4000E-02	0.47087E+06	-----+	
0.4400E-02	0.47682E+06	-----+	
0.4800E-02	0.47968E+06	-----+	
0.5200E-02	0.47996E+06	-----+	
0.5600E-02	0.47807E+06	-----+	
0.6000E-02	0.47434E+06	-----+	
0.6400E-02	0.46909E+06	-----+	
0.6800E-02	0.46259E+06	-----+	
0.7200E-02	0.45504E+06	-----+	
0.7600E-02	0.44665E+06	-----+	
0.8000E-02	0.43756E+06	-----+	
0.8400E-02	0.42793E+06	-----+	
0.8800E-02	0.41787E+06	-----+	
0.9200E-02	0.40748E+06	-----+	
0.9600E-02	0.39686E+06	-----+	
0.1000E-01	0.38509E+06	-----+	
0.1040E-01	0.37524E+06	-----+	
0.1080E-01	0.36435E+06	-----+	
0.1120E-01	0.35348E+06	-----+	
0.1160E-01	0.34268E+06	-----+	
0.1200E-01	0.33198E+06	-----+	
0.1240E-01	0.32140E+06	-----+	
0.1280E-01	0.31099E+06	-----+	
0.1320E-01	0.30075E+06	-----+	
0.1360E-01	0.29070E+06	-----+	
0.1400E-01	0.28087E+06	-----+	
0.1440E-01	0.27125E+06	-----+	
0.1480E-01	0.26186E+06	-----+	
0.1520E-01	0.25271E+06	-----+	
0.1560E-01	0.24380E+06	-----+	
0.1600E-01	0.23514E+06	-----+	
0.1640E-01	0.22672E+06	-----+	
0.1680E-01	0.21854E+06	-----+	
0.1720E-01	0.21061E+06	-----+	
0.1760E-01	0.20293E+06	-----+	
0.1800E-01	0.19548E+06	-----+	
0.1840E-01	0.18827E+06	-----+	
0.1880E-01	0.18124E+06	-----+	
0.1920E-01	0.17445E+06	-----+	
0.1960E-01	0.16789E+06	-----+	
0.2000E-01	0.16157E+06	-----+	

FACUM 230-M7 A D S L -750515- (V-01.L-13)

76.02.03 PAGE 17

VESSEL TOTAL CURRENT DWTIM=10 MS. RVE=1.5 MOHM

RKS METHOD

TIME	IP	(MIN)	(MAX)
0.0	0.33000E+07	-----+	
0.40000E-03	0.31706E+07	-----+	
0.80000E-03	0.30463E+07	-----+	
0.12000E-02	0.29268E+07	-----+	
0.16000E-02	0.28121E+07	-----+	
0.20000E-02	0.27016E+07	-----+	
0.24000E-02	0.25959E+07	-----+	
0.28000E-02	0.24941E+07	-----+	
0.32000E-02	0.23963E+07	-----+	
0.36000E-02	0.23023E+07	-----+	
0.40000E-02	0.22121E+07	-----+	
0.44000E-02	0.21253E+07	-----+	
0.48000E-02	0.20420E+07	-----+	
0.52000E-02	0.19619E+07	-----+	
0.56000E-02	0.18850E+07	-----+	
0.60000E-02	0.18111E+07	-----+	
0.64000E-02	0.17401E+07	-----+	
0.68000E-02	0.16718E+07	-----+	
0.72000E-02	0.16063E+07	-----+	
0.76000E-02	0.15433E+07	-----+	
0.80000E-02	0.14826E+07	-----+	
0.84000E-02	0.14246E+07	-----+	
0.88000E-02	0.13688E+07	-----+	
0.92000E-02	0.13151E+07	-----+	
0.96000E-02	0.12635E+07	-----+	
0.10000E-01	0.12140E+07	-----+	
0.10400E-01	0.11664E+07	-----+	
0.10800E-01	0.11207E+07	-----+	
0.11200E-01	0.10767E+07	-----+	
0.11600E-01	0.10345E+07	-----+	
0.12000E-01	0.99344E+06	-----+	
0.12400E-01	0.95497E+06	-----+	
0.12800E-01	0.91752E+06	-----+	
0.13200E-01	0.88155E+06	-----+	
0.13600E-01	0.84698E+06	-----+	
0.14000E-01	0.81377E+06	-----+	
0.14400E-01	0.78186E+06	-----+	
0.14800E-01	0.75120E+06	-----+	
0.15200E-01	0.72175E+06	-----+	
0.15600E-01	0.69345E+06	-----+	
0.16000E-01	0.66626E+06	-----+	
0.16400E-01	0.64013E+06	-----+	
0.16800E-01	0.61503E+06	-----+	
0.17200E-01	0.59092E+06	-----+	
0.17600E-01	0.56775E+06	-----+	
0.18000E-01	0.54549E+06	-----+	
0.18400E-01	0.52410E+06	-----+	
0.18800E-01	0.50355E+06	-----+	
0.19200E-01	0.48380E+06	-----+	
0.19600E-01	0.46483E+06	-----+	
0.20000E-01	0.44661E+06	-----+	