

大出力クライストロンの高効率化に関する研究(4)

- 共同研究報告書 -

技術資料		
開示区分	レポートNo.	受領日
Z	ZY1604 97-001	97.11.10

この資料は技術管理室保存資料です
閲覧には技術資料閲覧票が必要です
動力炉・核燃料開発事業団 技術協力部技術管理室

1997年3月

京都大学エネルギー理工学研究所
動力炉・核燃料開発事業団
(大洗工学センター)

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、特に限られた関係者だけに開示するものです。ついては供覧、複製、転載、引用等を絶対に行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう厳重に管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないように特に注意して下さい。

本資料についての問合せは下記に願います。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団
技術協力部 技術管理室

限 定 資 料

PNC ZY1604 97-001

1 9 9 7 年 3 月

大出力クライストロンの高効率化に関する研究

平野耕一郎*, 谷 賢*, 吉川 潔**, 大西正視**,
山本 靖**, 督 寿之**, 増田 開**

要 旨

本報告書は、京都大学エネルギー理工学研究所と動力炉・核燃料開発事業団が、「大出力クライストロンの高効率化」に関して、共同で実施した研究成果をとりまとめたものである。

本研究の目的は、加速器による消滅処理システムにおいて、電子加速に必要な高周波エネルギー発生用大出力・定常クライストロンの高効率化を図るための技術に関連して、電子ビーム輸送の物理モデルの確立、コード開発・検証、およびエネルギー回収型コレクタの設計を行うことである。

今年度は、昨年度までに完成したクライストロンの二次元シミュレーションコードについて、実機との比較による検証を行い、十分な解析精度があることが確かめられた。

このコードを用いて、エネルギー回収型コレクタおよびホロービームの利用による大出力クライストロンの高効率化について検討・評価を行った結果、それぞれ総合効率 66.5% および 62.2% と、従来の効率 58.0% から大きく改善されることが分かった。また、回収コレクタおよびホロービームを併用することによるさらなる効率の向上も期待され、これらの方法による大出力クライストロン効率の大幅な改善が十分に可能であるとの結論が得られた。

さらに、開発した二次元コードの二次元・三次元のハイブリッドコードへの発展の予備検討を行って一部作成に取りかかり、また、今後の課題を明らかにした。

* 動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術開発部先進技術開発室

** 京都大学エネルギー理工学研究所

COMMERCIAL PROPERTY
PNC ZY1604 97-001
March, 1997

Study on High Efficiency High Power Klystron

Kohichiro Hirano*, Satoshi Tani*, Kiyoshi Yoshikawa**, Masami Ohnishi**,
Yasushi Yamamoto**, Hisayuki Toku**, Kai Masuda**

ABSTRACT

This paper describes the study on high efficiency high power klystron, done collaboratively by Kyoto University and PNC.

The objective of this study is to develop and verify klystron simulation code and, using developed code, to design multistage depressed collector (MDC), intending to examine and establish the methods to enhance efficiencies of high power CW klystrons for the particle accelerator application to the transmutation system.

To verify the developed 2-dimensional klystron simulation code, comparisons of klystron performances were made between simulations and experiments, showing excellent agreements.

By use of the developed code, we evaluated efficiency enhancement by either MDC or use of hollow beam instead of existing solid beam, resulting in 66.5% or 62.2% efficiency, respectively. These results are very encouraging compared with 58.0% without the MDC or the hollow beam. It is expected that, by using both the MDC and hollow beam, further efficiency enhancement could be achieved.

New 3-dimensional computer programs were developed for semi-automatic mesh generation and magnetostatic field calculation, intending to further improvement of the 2-D klystron code to 3-D code.

* Frontier Technology Development Section, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation
** Institute of Advanced Energy, Kyoto University

目 次

1. まえがき	1
2. 定常大出力クライストロンの二次元解析コードの検証と評価	3
2.1. クライストロン高周波出力の実機測定値との比較	3
2.2. 計算精度および計算時間の評価	4
2.3. 既存のクライストロン解析コードとの比較	5
2.3.1. 解析モデル・解析方法の比較	5
2.3.2. 解析結果の比較	7
2.3.3. 解析結果の相違に関する考察	7
3. 定常大出力クライストロンの高効率化	9
3.1. 電子ビーム直接発電による高効率化	9
3.1.1. ビーム直接発電器の設計	9
3.1.2. ビーム直接発電器の最適パラメータの理論評価	10
3.2. ホロービーム利用による高効率化	11
4. 高周波取り出し空洞の三次元評価コード開発の予備検討	13
5. 考察	15
6. あとがき	16
引用文献	17
表・図面	18
付録A	41

表・図 目 次

表 2.1	コード検証に用いたクライストロン基本仕様の比較.....	18
表 2.2	FCI, KUFCI の比較に用いた空洞配置	19
表 2.3	FCI, KUFCI 解析結果の比較 (効率[%] ; 左-FCI・右-KUFCI)	19
図 2.1	KUFCI 解析におけるクライストロン内電子分布 (スナップショット)	20
図 2.2	KUFCI 解析結果と実機測定値との比較 — 入出力特性	21
図 2.3	KUFCI 解析結果と実機測定値との比較 — E3718 飽和出力	22
図 2.4	KUFCI 解析精度評価に用いたモデル.....	23
図 2.5	時間ステップ数, 径方向粒子数に対する KUFCI 解析結果の収束性.....	23
図 2.6	メッシュ数・時間ステップ数・径方向粒子数による KUFCI 解析入出力特性 の変化.....	24
図 2.7	FCI, KUFCI, 実機の比較 — E3718 二号機飽和効率のビーム電圧依存....	25
図 2.8	FCI, KUFCI における共振空洞固有モード計算の相違.....	26
図 2.9	解析軌道のフィラメンテーション	27
図 2.10	ドリフトチューブ径による入出力特性の変化	28
図 3.1	E3718 クライストロンにおける使用済みビーム (ビーム電圧 90kV, 飽和出力動作)	29
図 3.2	エネルギー回収型 5 段コレクタ内の電子軌道 (18kV 刻みの電極電圧の場合)	30
図 3.3	エネルギー回収コレクタ内の二次電子損失の評価.....	31
図 3.4	高周波入力による使用済み電子ビームのエネルギー分布の変化 (E3718, ビーム電圧 90kV)	32
図 3.5	エネルギー回収型コレクタによる理論最大回収効率.....	33
図 3.6	エネルギー回収型コレクタによる理論最大総合効率.....	34
図 3.7	エネルギー回収型 5 段コレクタ内の電子軌道 (最適電極電圧の場合)	35
図 3.8	ソリッドビーム, ホロービームの E3718 内電子分布	36
図 3.9	電子ビームと出力空洞との相互作用 — 電子運動エネルギーおよび単位面積あたりのビーム電力の径方向分布..	37
図 3.10	ソリッドビーム, ホロービームによる入出力特性の比較	38
図 4.1	出力空洞の三次元シミュレーション概念図	39
図 4.2	三次元メッシュ生成プログラムの実行例	40

1. まえがき

我が国が来るべき21世紀において世界の先進国として世界平和のために様々な分野で貢献することは国際的に強く期待されており、またそれは平和国家を標榜する日本国民だれしもの願いである。しかしながら、その活動、とりわけわが国に強く期待されている経済活動の基盤となるエネルギーの確保にかかわるいわゆるエネルギーセキュリティーの問題については、残念ながら未だ十分な答は出されていない。

現在の世界のエネルギー資源予測によれば、200年近い埋蔵量のある石炭以外の石油、天然ガスの可採年数はせいぜい40年、および60年程度と見積もられている。すなわち、21世紀においては、その全期間にわたって20世紀のようなエネルギー需給構造を維持することは不可能であり、さらに近年の化石燃料燃焼による地球温暖化抑制への要求とも関連して化石燃料依存からの脱却もより厳しく求められると考えられる。

このような状況にあって一次エネルギーのうち60%弱をも占める石油の100%を海外に依存している我が国が将来にわたり持続的に発展し、かつ国際貢献が可能かどうかはいつにエネルギーセキュリティーの確保にかかっている。我が国にとってこの歴史的ともいえる問題は他国とは比較にならぬほどの最も大きなアキレス腱となる可能性が高い。

我が国のエネルギー長期政策によれば、2010年度には1989年度に較べエネルギーは32%と増加するが、石油は3%の微増に留まり、その石油代替を主として原子力、石炭、天然ガスに求めた見通しをたてている。しかし、天然ガス資源の寿命を考慮すれば、核融合や太陽エネルギーなどの新エネルギーを経済的に利用可能とする画期的技術が確立されない限り、原子力と石炭を21世紀の主要エネルギー源とする環境整合性の極めて高いエネルギーシステムを構築せざるを得ず、開発に長期間かかることを考慮すれば早急にそのシステム構築に着手しておくことが肝要である。もし幸いにして画期的新エネルギー源が開発されればその時点で組み込めば良い。

以上のような状況にあって、原子力エネルギー利用には、間断なき安全性向上の努力が求められており、核分裂で発生する放射性物質の処理や無害化はその最も重要な課題のひとつである。

なかでも、TRUと共に核分裂数の6%の確率で発生する放射性¹³⁷Csの処理技術の開発は緊急を要し、従来の原子炉による消滅処理法のほかにその処理時間が長いという欠点を克服する新しい方法として、高エネルギー陽子による核破碎や高エネルギー電子による(γ, n)反応を利用した核種変換による消滅方式の開発研究がオメガ計画として現在我が国で進められている。

これらはいずれも粒子(電子)加速器を使用するが、従来加速器は学術研究や軍事研究といった経済性においてあまり制約されない分野で主として使用してきた経緯があるため、使用の方法によっては経済性の成立しない場合が多い。

産業界において現在これら加速器を積極的に使用して利潤を上げている産業は極めて高

い付加価値を生み出す半導体産業などわずかにすぎない。しかも、半導体産業で使用されるビームの特性は、量的なものよりどちらかと言えばむしろ質的なものに特化されており、同じ粒子（電子）加速とはいえ、オメガ計画のようなビームの質とともに量的にもある程度の量（粒子束＝電流量）が要請されるものとは大きく異なる点を明確に認識しておく必要がある。

確かに消滅処理の価値は人類にとっては計り知れないほど高いものであるが、自由電子レーザーによる高効率同位体分離技術が開発されるまでは残念ながら消滅処理後のプロダクトは流通商品としては対象外で、現在のところ超LSIなどとは全く比較にならない。

この点に加速器による消滅処理方式の弱点が存在し、また、それ故に本方式の高効率化がその成立性に極めて緊密にかかわってくるといえよう。

本報告書は、上記オメガ計画のうち動力炉・核燃料開発事業団が担当している電子ビームによる放射性¹³⁷Csの消滅処理技術のうち加速器による消滅処理システムにおいて、高エネルギー電子発生に不可欠の高周波エネルギー発生用高出力・定常クライストロン管の高効率化に関する方法・技術について、平成8年度に京都大学原子エネルギー研究所と「高出力クライストロンの高効率化に関する研究」という課題で共同研究を行った結果についての報告を記したものである。

加速器による消滅処理システムにおいては、システムにおける最大の電力消費源である電子ビーム加速管へ高周波を供給する大電力・定常クライストロン管の高効率化が不可欠であるが、クライストロン管の電子・電磁波相互作用部の最適設計だけでは限界がある。このため、コレクタで熱として処理されている未利用電子エネルギーの高効率電気エネルギー変換が大電力・定常クライストロン管の高効率化と消滅処理システム成立のために不可欠となる。

未利用電子エネルギーの高効率電気エネルギー変換装置の設計においては、クライストロンの出力空腔下流での電子ビームの持つエネルギー・速度分布の空間分布を精密に知る必要がある。従来クライストロンの設計指針として行われてきたシミュレーションでは、空間・空間分布が十分ではなく、遙かに高い精度の粒子シミュレーションが必要となるため、平成5年度より電子ビームの動特性を精度よく評価できる電子ビーム輸送コードにおける物理モデルの調査・検討および実際のコード開発を行ってきた。

今年度は、昨年度までに完成したシミュレーションコードについて、実機試験結果および既存のクライストロンシミュレーションコードとの比較を行いコードの詳細な検証を行うこと、また、エネルギー回収型コレクタの設計および最適パラメータの評価を行うこと、他の高効率化の方法を検討・評価すること、および出力空腔の三次元解析・設計による高効率化を目的としたシミュレーションコードの三次元化を目標として共同研究を行った。

2. 大出力クライストロンの二次元解析コードの検証と評価

使用済み電子ビームのエネルギー回収効率はコレクター部への入射電子の空間・速度分布に強く依存するため、この分布を精度よく知ることが必要である。特に出力空洞との相互作用後の電子ビームの場合、電子ビームのエネルギーに広がりが生じると同時に、速度成分についても複雑な分布を示すと考えられ、単純な分布関数で与えることはできない。このため、クライストロン内の電子・電磁波相互作用解析粒子シミュレーションによって、使用済み電子ビームの分布を求めることが必要となり、そのシミュレーションコードには、既存のクライストロン設計用コード以上の高い計算精度が求めらる。

以上の目的で昨年度までに開発したクライストロン二次元解析コード（KUFCI コード）^{(1), (2)}について、クライストロン高周波出力の実機測定値との比較を中心に、精度・解析モデルを検証した。

2.1. クライストロン高周波出力の実機測定値との比較

昨年度までに開発した KUFCI コードの妥当性・計算精度を検証する目的で、コードを複数の実機クライストロンに適用し、高周波出力の測定値との比較を行った。

KUFCI コードの汎用性を確かめるために、大出力で定常・パルスの二つの運転モードを持つ東芝 E3718 (1.25GHz, 定常 1MW またはパルス 3.6MW)、テレビ放送用中出力定常の 1AV56 (615MHz, 17kW) および大出力高パービアンスのパルスクライストロン XK-5 (2.86GHz, 36MW) の、特性の大きく異なる三つのクライストロンをコード検証の対象とした。E3718, 1AV56 および XK-5 クライストロンの基本特性を表 2.1 に示す。

図 2.1(a)～(c)に各クライストロンの電子軌道解析結果（スナップショット）を示す。電子軌道シミュレーションに導入した外部磁場は、E3718 の解析では集束コイルおよびポールピースから静磁場計算コード⁽²⁾を用いて計算し、1AV56 および XK-5 の解析では軸上磁場強度分布の実測値を次の式を用いて近軸展開した磁場分布を用いた。

$$A_{t,\theta}(z,r) = \frac{1}{2} r B_{f0,z}(z) \quad (2.1a)$$

$$B_t(z,r) = \nabla \times A_t(z,r) \quad (2.1b)$$

ここに、

B_{f0} ：外部集束磁場の軸上強度分布

$A_f = [0, 0, A_{f,\theta}]$ ：ベクトルポテンシャル

$B_f = [B_{fx}, B_{fy}, 0]$ ：磁束密度

KUFCI シミュレーション結果と実機測定データとの比較を図 2.2(a)～(c)および図 2.3 に示す。

図 2.2(a)～(c)は各クライストロンの入出力特性を示している。E3718 はビーム電圧 83kV の定常動作および 147kV のパルス動作について、また 1AV56 は出力空洞の負荷 Q 値 43, 67 および 92 の三通りの場合について、KUFCI シミュレーションと実機の比較を行った。いずれも KUFCI シミュレーション結果と実機測定値とは良く一致しており、飽和出力の実機測定値との誤差は -7.5～+6.9% となっている。

また、図 2.3 は E3718 クライストロンのビーム電圧による飽和出力の変化を示しており、最適な動作電圧以外の場合でも、KUFCI シミュレーションが実機を精度良く再現していることが分かった。

2.2. 計算精度および計算時間の評価

KUFCI コードにおける電子・高周波共振空洞相互作用解析の精度・解の収束性を調べ、十分な精度を得るために必要な粒子数・時間ステップ・空間メッシュ数を調べる目的で、E3718 クライストロンの共振空洞をモデルにして、粒子数・時間ステップ・空間メッシュの大きさを変化させてシミュレーションを行った。精度を得るために必要な計算条件を知ることによって、計算時間を必要最小限に抑えることができる。

まず、空間メッシュの大きさは $\Delta r = 0.75\text{mm}$, $\Delta z = 2.25\text{mm}$ で固定し、時間ステップ数 $T/\Delta t$ を 1RF 周期あたり 64～128 ステップ、1 ステップあたり入射する粒子数（径方向粒子数） N_p を 4～24 個の範囲で変化させ、以下のモデルでシミュレーションを行った。

E3718 クライストロンの入力空洞およびドリフトチューブ形状（図 2.4）にビーム電圧 85kV, パービアンス $0.9\mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$ （ビーム電流 22.3A）の直流電子ビームを入射し、空洞の高周波電磁界からビームが得る RF 電力 P_b 、および入力空洞のギャップ中心から 120mm 下流（第 2 空洞の位置）でのビームの RF 電流成分 I_b を調べた。空洞に与える電圧は $V_c = 1, 10, 85\text{kV}$ の三通りの場合について行った。

図 2.5(a)～(d)にシミュレーション結果を示す。図より、時間ステップについては、1 周期あたり約 60 ステップで 2%, 100 ステップで 1% 程度の誤差に収まっていることが分かる。また、径方向粒子数については、6 個程度で十分であることが分かった。

次に、以下の二通りの計算条件で KUFCI コードを、二通りの離調周波数の場合について E3718#2 に適用し、入出力特性を比較した。

(a) $T/\Delta t = 96$, $\Delta r = 0.75\text{mm}$, $\Delta z = 2.25\text{mm}$, $N_p = 16$

(b) $T/\Delta t = 62$, $\Delta r = 1.50\text{mm}$, $\Delta z = 4.00\text{mm}$, $N_p = 5$

(b)は、次節で述べる FCI コード⁽³⁾での計算で用いられた計算条件である。KUFCI コードの計算時間は、一つの計算につき、(a)の条件では約 100 分、(b)の条件では約 12 分である。図 2.6 に示されたように、条件(a), (b)ともに計算結果に大きな違いはなく、入出力特性を得るためにには(b)の条件で十分であることが分かった。ただし、エネルギー回収型コレクタを設計する目的で使用済み電子ビームを計算するためには、(b)の条件で十分であるとは言えず、特に径方向粒子数については 5 個では不十分である。

2.3. 既存のクライストロン解析コードとの比較

本研究での KUFCI コードの開発に際して参考にしてきた、既存のクライストロン解析コード、FCI コード⁽³⁾の解析結果と比較することにより、KUFCI コードに新たに導入した解析方法・モデルの有効性を検証・評価した。FCI と KUFCI の比較は、既に昨年度 E3718 二号機の高周波飽和出力について行い、KUFCI シミュレーション結果の方が実機測定値により一致することが確かめられたが（図 2.7）⁽²⁾、今年度は FCI と KUFCI との相違をさらに検証するために複数のパラメータ（空洞配置・離調周波数）で両者の比較を行った。

2.3.1. 解析モデル・解析方法の比較

KUFCI コードでは、電子ビームと共振空洞との相互作用などの基本的な物理モデルについては FCI コードを参考にしながらも、本研究の目的に必要とされるより高い解析精度を得るために、主に以下のような改良を行ってきた。

(a) FCI コードではドリフトチューブのテーパーを扱うことができないが、共振空洞とビームとの相互作用は径方向に一様ではなく、ドリフトチューブ径が実機と異なると軌道解析結果に誤りを生じるので、KUFCI コードではドリフトチューブのテーパーを扱えるようにした。

- (b) FCI コードでは共振空洞をギャップのみで表し、固有モードを短時間で簡単に計算できるようにしているが（図 2.8(a)），特にギャップ近傍の固有モード電界形状がビームとの相互作用に大きく影響すると考え、KUFCI コードでは共振空洞の形状を考慮して固有モードを計算して（図 2.8(b)），軌道シミュレーションに導入した。
- (c) FCI コードでは外部集束磁場を軸上磁場強度の測定値から近軸展開して与えているが、特にコレクタポールピース付近で大きな誤りを生じると考え、新たに開発した二次元磁場解析コード⁽²⁾を用いて集束コイル・ポールピースを含めた領域で集束磁場を計算し、その結果を KUFCI による軌道シミュレーションに導入できるようにした。
- (d) 電子ビーム・共振空洞相互作用モデルにおいて、新たな空洞電圧の計算方法を開発・適用し、FCI コードで用いられている方法と比較して、より少ない周期数で高精度の解を得ることが可能となった（付録 A 参照）。
- (e) ビーム自身が作る電磁界の計算に二次の有限要素を用いることによって、ビーム解析軌道のフィラメンテーションを抑え、ビーム軌道の精度を向上させた（図 2.9(a), (b)）。
- (f) 高周波寄生発振（離散化誤差等によって生じたドリフトチューブの伝搬モードがビームと相互作用して増幅され発振する計算上の不安定現象）を抑える方法として、FCI コードでは出力空洞の下流ですべてのモードを強制的に減衰させる方法が用いられている。KUFCI コードでは、新たに考案した安定度の高い計算方法をビームの作る電磁界の計算に適用して高周波寄生発振の問題を解決した（引用文献(2)の 2.3.2 節参照）。

これらのうち、高周波出力の計算精度に大きく影響すると考えられる改良点は(a), (b)および(d)であるが、これらのうち(a)については 2.3.2 節で考察する。(f)については、使用済み電子ビームの空間・速度分布等には影響を与えるが、高周波出力にはさほど影響しないと考えられる。(c)についても同様に、ガンおよびコレクタのポールピース付近以外の電子・高周波相互作用領域ではドリフトチューブ径（15～18mm）は集束コイル・ポールピース径（210～350mm）に比べて十分小さく、高周波出力には影響しない。

2.3.2. 解析結果の比較

前節で述べた改良点が解析精度の向上に有効であることを確かめるために、E3718 二号機の改良を目的とした FCI コードによるシミュレーションと同じパラメータを用いて、KUFCI シミュレーションを行い、FCI と KUFCI の比較を行った。シミュレーションに用いたパラメータは、E3718 二号機の空洞配置を基本に空洞配置を少しずつ変化させ（表 2.2）、さらにそれぞれの空洞配置について第 4, 5 空洞の離調周波数を変化させたもので、外部集束磁場および入射ビームは固定とした。

シミュレーションの結果（表 2.3）、FCI と KUFCI には大きな違いがみられた。昨年度の比較（図 2.7）と同様に、FCI では KUFCI と比べて飽和出力が 20~35% 大きく計算されている。各パラメータによる飽和出力の変化についても、傾向は概ね類似しているものの、パラメータの優劣が逆になっている場合もあり、また、KUFCI の結果の方がパラメータの変化に対する飽和出力の変化が大きい。実機において空洞配置を変化させることは容易ではないので、これらの結果を実機測定値と比較することは困難であるが、昨年度行った比較（図 2.7）と併せて、KUFCI の方が解析精度が高く、空洞配置や離調周波数の変化に対してもより敏感であることが判明した。

2.3.3. 解析結果の相違に関する考察

2.3.2 節で述べた FCI コードと KUFCI コードの高周波出力計算結果の相違の原因を明らかにする目的で、2.3.1 節で述べた FCI と KUFCI との解析モデル・方法の相違点のうち最もシミュレーション結果に影響があると考えられるドリフトチューブのテーパーについて、その高周波出力に与える影響を調べた。

実機の E3718 クライストロンでは 15, 16.5, 18mm の二段階のテーパーがついているが（図 2.1(a) 参照）、ここでは 15, 16.5, 18mm のテーパーなしのドリフトチューブの場合について KUFCI シミュレーションを行った。

入出力特性を、テーパーを考慮した場合の結果とともに図 2.10 に示す。図から、それらの場合について入出力特性が大きく異なることが分かる。特に、15 および 16.5mm のテーパーなしのドリフトチューブの場合には、テーパーを考慮した場合と比べて飽和出力がそれぞれ 4.2% および 2.5% 大きくなっている。これは、出力空洞のドリフトチューブ径が小さいほどビームが空洞のギャップの近くを通り、ビームと空洞の相互作用が強くなっているためであると考えられる。一方、18mm のドリフトチューブの場合には、テーパーを考慮した場合とほぼ同じ飽和出力 (-1.1%) となっているものの、入出力特性はテーパーを考慮した場合と大きく異なる。これは、実機においてはドリフト径 15 または 16.5mm の上流の

空洞との相互作用が実際よりも弱く計算され、利得が小さく計算されたためである。

以上の結果から、ドリフトチューブのテーオーを考慮して実機により近い形状をシミュレーションに取り入れることが重要であることが分かった。FCIコードがドリフトチューブのテーオーを考慮できないことが、FCIシミュレーション結果の高周波出力が実機測定値やKUFCIシミュレーション結果より大幅に大きく計算される原因の一つであると考えられる。

3. 定常大出力クライストロンの高効率化

定常大出力クライストロン東芝 E3718 を高効率化する目的で、

(a) ビーム直接発電器による使用済み電子ビームエネルギーの回収

(b) ホロービームの利用

の二つの方法について、本研究で開発した KUFCI コードを用いて、高効率化の可能性を検証した。

3.1. 電子ビーム直接発電による高効率化

3.1.1. ビーム直接発電器の設計

ビーム電圧 90kV、飽和出力動作の場合について、KUFCI コードによるシミュレーション結果（図 3.1）を入射条件として、二次元粒子軌道解析コード KUAD をもとにプラズマ直接発電機解析用に改良された KUNAITUS コード^{(4), (5)}を用いてエネルギー回収コレクタの設計を行った。回収電極は 5 段で電極電圧は 18kV 刻みとし、コレクタ形状のみを最適化した。

コレクタ形状およびコレクタ内の電子軌道解析結果を図 3.2 に示す。コレクタ形状の設計に際しては、以下の点に留意した。

(a) コレクタ内に等電位面が上流に向かって凸になるように電極を配置し、クライストロン電子・高周波相互作用部に電子が逆流しないようにする。

(b) 各回収電極の上流側から電子が回収されると、生じた二次電子が加速され損失となるので、できる限り電子ビームが電極の上流側に当たらないようにする。

電極形状を少しづつ変化させて繰り返しシミュレーションを行った結果、得られた最大回収効率は、二次電子による損失を考慮しない場合で 36.9%（総合効率は 66.5%）となった。ここで得られた効率は、次節で述べる理論最大回収効率 70.1%（総合効率 79.3%）に比べると低いものの、エネルギー回収型コレクタの無い場合の効率 58.0% に比べて大幅に向上している。

図 3.2 のシミュレーション結果から二次電子による損失を試算した。二次電子による損失

は、各回収電極の上流側から回収された電子が一定の生成割合で二次電子を生成し、生成された二次電子は一段手前より高い電位の電極に回収されるものとして試算した（図3.3）。二次電子生成効率を1.0とした場合、総合効率は65.8%と計算され、二次電子損失による効率の低下は高々0.3%であることが分かった。

3.1.2. ビーム直接発電器の最適電極電位の理論評価

E3718 クライストロン内の電子・電磁波相互作用シミュレーションによって得られた使用済み電子ビームのエネルギー分布（図3.4）をもとに、ビーム直接発電の最適電極電位の理論評価を行った。エネルギー回収コレクタの回収電極の段数を増やすば回収効率は向上するが、回収電極数を増やすとコレクタの形状や電極電位の設定に必要な外部回路が複雑となるため、外部回路のコスト等を含めて最適化する必要がある。

エネルギー回収コレクタに入射された全ての電子がそのエネルギーに最も近くかつ高い電位にある電極に回収されるとすると、入射電子ビームのエネルギー分布 $I(V)$ (V 以下のエネルギーの電子電流) が与えられたとき、 N 段の回収コレクタによる回収電力 P_{col} は次式で与えられる。

$$P_{\text{col}} = \sum_{n=1}^N V_n \{I(V_{n+1}) - I(V_n)\} \quad (3.1)$$

ここに,
たたし V_n : エネルギー回収電極電圧
 $V_{N+1} = \infty$

入射ビームのエネルギー分布 $I(V)$ および回収コレクタの段数 N が与えられれば、(3.1)式で計算される P_{col} を最大とする電極電圧は一意に決まる（理論最大回収電力）。外部回路構成の容易さを考慮して、最終段の電極電位を電子銃のカソードと同じ電位に設定した場合の理論最大回収電力は、次の最大値問題を解くことにより得られる。

$$\text{maximize } \tilde{P}_{\text{col}} = \sum_{n=1}^{N-1} V_n \{I(V_{n+1}) - I(V_n)\} \quad (3.2)$$

たたし $P_{\text{col}} = \tilde{P}_{\text{col}} + V_b \{I_{\text{total}} - I(V_b)\}$
ここに $V_N = V_b$: カソード電圧（ビーム電圧）
 I_{total} : コレクタに入射されるビーム電流

KUFCI コードのシミュレーション結果を用いて、E3718 クライストロンにおけるエネルギー回収コレクタの理論最大回収効率を(3.2)式から計算した結果を図 3.5 に、理論最大回収時の総合効率を図 3.6 に示す。飽和出力動作において 5 段の回収コレクタを用いれば、理論的には回収効率 70.1%，総合効率 79.3% が得られ、回収コレクターのない場合の効率 58.0% から飛躍的に改善されることが分かった。また、図 3.5 および図 3.6 より 6 段以上の電極を用いても、回収効率および総合効率はさほど向上しないことが分かる。

この理論最大回収効率を与える電極電圧 10, 25, 36, 63, 90kV (5 段コレクタ) を、3.1.1 節で 18kV 刻みの電極電圧に対して最適化したコレクタ形状に与え、エネルギー回収シミュレーションを行った (図 3.7)。シミュレーションの結果、回収効率は 28.4%，総合効率は 65.9% (二次電子による損失を考慮した場合 65.4%) と計算され、18kV 刻みの電極電圧を与えたときよりもむしろ効率は低下した。

今後、最適電位に対してコレクタ形状を最適化すれば、効率向上の可能性はある。しかし、コレクタ形状の設計には、形状を少しづつ変えて多数のシミュレーションを行う必要があり、かなりの労力を要する。また、その結果得られた形状が最適であるかどうかは定かではない。エネルギー回収型コレクタの電極形状や外部磁場形状を含めた最適化を効率よく行うためには、その手法・自動アルゴリズムなどの確立が必要となるであろう。

3.2. ホロービーム利用による高効率化

クライストロンにおける電子ビームと高周波共振空洞との相互作用は、空洞のギャップ付近で最も強く、逆に軸上で最も弱い。このため、軸付近を通る電子ビームは、高周波の增幅にあまり寄与せず、全体の効率を低下させている可能性がある。したがって、通常のソリッドビームの代わりに中空のホロービームを利用すれば、クライストロンの効率が向上する可能性がある。

そこで、KUFCI コードを用いて、ホロービームの利用によるクライストロン効率の向上の可能性を検証した。

通常のソリッドビーム (入射半径 11.2mm, ビーム電流 24.3A, ビーム電圧 90kV, 飽和出力動作) の場合、図 3.8(a) に示した E3718 クライストロン内の電子の分布 (スナップショット図) から分かるように、軸付近のビームは外側の電子に比べて、出力空洞付近での軸方向の集群が不十分である。

また、図 3.9 は、ソリッドビームの場合のシミュレーションにおける、E3718 クライストロンの出力空洞の (a) 上流、(b) ギャップ中心、(c) 下流での電子ビームエネルギーおよび単位面積あたりのビーム電力の半径方向分布を示している。この図から、軸付近のビームは出

力空洞で十分にエネルギーを失っておらず、高周波出力に十分に寄与していないことが分かる。

ホロービームの利用によるクライストロン効率の向上の可能性を検証する目的で、E3718 クライストロンにおいて内径 5mm のホロービームを入射ビームとして、シミュレーションを行った（図 3.8(b)）。ビームの外径 11.2mm、ビーム電流 24.3A、ビーム電圧 90kV はソリッドビームの場合と同じである。また、外部集束磁場も同一のものを導入した。

図 3.10 に示したように、ホロービームの方が、同じ入射ビーム電力でより高い出力が得られることが分かった。飽和出力時の効率は 62.2% となり、ホロービームを利用することによって、ソリッドビーム（エネルギー回収なし、効率 58.0%）の場合と比べて飽和出力が 7.3% 向上することが分かった。

ホロービームではソリッドビームよりも空間電荷力が小さくなるため、ホロービーム用に外部集束磁場を調整して、ビームがドリフトチューブにあたらない範囲で出力空洞付近の磁場強度を弱くすれば、さらに効率を向上させることができる。また、さらに細い（内径の大きい）ホロービームを使えばさらなる効率の向上が期待できるが、その場合には電子銃の設計・製作に困難が伴うことが予想される。ホロービームによる効率向上の可能性が示されたが、KUAD コードを用いたホローカソード電子銃の設計、KUFCl コードによる電子銃・ドリフトチューブ一体のシミュレーション等による、ビームの安定性も含めた詳細な検討が今後の課題となる。

4. 高周波取り出し空洞の三次元評価コード開発の予備検討

本共同研究では昨年度までに大出力クライストロンの二次元解析粒子シミュレーションコードを開発し、前章で述べたように、この二次元コードを用いて大出力クライストロンの高効率化の可能性を示すことができた。

しかし、実機クライストロンの高周波取り出し空洞（出力空洞）は非軸対象であるため、シミュレーションコードの精度をさらに向上させて詳細な設計・検証を行うためには、出力空洞の三次元解析が必要となる。

特に、高周波飽和出力に大きな影響を与える出力空洞付近の外部集束磁場強度を最適化する際には、電子ビームが出力空洞内壁にあたらない範囲で磁場強度を弱くする必要がある。実機のシミュレーションにおいて磁場強度が弱すぎる場合には、出力空洞付近より下流で電子ビームがドリフトチューブにあたる結果が得られており、また、このことは実機で観測された高周波出力導波管の以上加熱の一因であると考えられる。出力空洞付近では低エネルギーの電子が多数存在し電磁界形状の影響を強く受けいることから、このような現象を正確にシミュレーションするためには、出力空洞付近での電磁界の三次元形状を考慮する必要がある。

また、出力空洞で三次元効果を受けた使用済み電子ビームは三次元形状となる。その度合いが著しく強い場合には、エネルギー回収型コレクタ電極において二次元シミュレーションでは予測不可能なビームによる熱負荷の集中が起こる可能性もあり、このことを検証・評価するためにも三次元シミュレーションが必要である。

クライストロン全体を三次元で取り扱うことは、計算時間・計算機メモリの面から、非現実的である。また、出力空洞以外の電子錠およびビーム・高周波相互作用部は軸対象形状であり、三次元で取り扱う必要はない。したがって、これらの領域は二次元、出力空洞のみを三次元で取り扱うことのできるハイブリッドコードへの発展が最も有効であると考えられる。

クライストロンの二次元・三次元ハイブリッドコードによるシミュレーションについては、三次元電磁界・ビーム解析汎用コード（MAFIA コード）を用いたシミュレーションが報告されており⁽⁶⁾、一定の成果をあげている。このシミュレーションで用いられた二次元と三次元シミュレーションの接続方法（図 4.1）などを参考にして、本共同研究で開発した二次元コード KUFCI を二次元・三次元のハイブリッドへ発展させれば、前述した出力空洞付近の三次元効果を正確・高精度にシミュレーションすることが可能になる。また、エネルギー回収コレクタの三次元シミュレーションによる設計には、京都大学で以前開発したビーム直接発電機用三次元コード KUNABE-3⁽⁷⁾を用いることができる。

KUFCI コードを二次元・三次元のハイブリッドへ発展させるためには、

- (a) 三次元メッシュ生成プログラムの開発
- (b) 出力空洞および導波管内の高周波の伝搬を解析する三次元コードの開発
- (c) KUFCI コードの電子ビーム軌道解析およびビームの作る電磁界解析の三次元化

が必要である。

今年度は、これらのうち(a)三次元メッシュ生成プログラム（図 4.2）の開発を行った。さらに、三次元の静磁場計算コードを開発し、これまでの二次元コードとの比較によるコード検証を行った⁽⁸⁾。

今後、これらの三次元コードを発展させ、(b)出力空洞および導波管内の高周波の伝搬を解析する三次元コードの開発を行う必要がある。(c)KUFCI コードの電子ビーム軌道解析およびビームの作る電磁界解析の三次元化については、計算時間・計算機メモリの面で工夫が必要ではあるが、基本的にはこれまでの二次元の場合と同一の方程式であり、また、直交座標系の場合にはむしろ円筒座標系よりも取り扱いが容易になるため、三次元への発展は比較的容易であると考えられる。

5. 考察

昨年度までに完成したシミュレーションコード KUFCI について、実機試験結果および既存のクライストロンシミュレーションコードとの比較を行いコードの詳細な検証を行った。

実機との比較においては、KUFCI コードの汎用性を確かめるために、特性の大きく異なる三つのクライストロン（大出力で定常・パルスの二つの運転モードを持つ東芝 E3718、テレビ放送用中出力定常の東芝 1AV56 および大出力高パービアンスのパルスクライストロン XK-5）をコード検証の対象とした。各実機の入出力特性および E3718 飽和出力のビーム電圧による変化について、KUFCI シミュレーションの結果は実機測定値と良く一致しており、KUFCI コードの精度が十分であることが確かめられた。

シミュレーションに使用する時間ステップ数・粒子数・メッシュ数などを変化させ、KUFCI のビーム・共振空洞相互作用解析の精度を詳細に検証し、また、精度を確保するために必要な最小限の時間ステップ数等を評価した。その結果、E3718 クライストロンの場合、SunSparc20 ワークステーション上で約 12 分の計算時間で十分な精度が得られることが分かった。

既存のシミュレーションコードとの比較については、昨年度行った FCI、KUFCI、実機の比較において、FCI による飽和出力は KUFCI や実機測定値よりも 15%以上大きく計算され、KUFCI シミュレーション結果の方が実機測定値により一致することが確かめられたが、この点をさらに明らかにするために、空洞配置および空洞の離調周波数を広範囲に変化させ、FCI および KUFCI でシミュレーションを行い比較した。その結果、FCI では KUFCI よりも飽和出力が 20~35%も大きく計算されること、また、KUFCI 計算結果の方が空洞配置や離調周波数の変化に対して敏感であることが分かった。

大出力クライストロンを高効率化する方法として、(1)使用済み電子ビームのエネルギー回収型コレクタによる回収、および(2)ホロービームの利用の二つの方法について検討・評価を行った。

(1)については、等間隔の電極電圧でのコレクタの予備設計、および最適電位の理論評価を行った。理論評価においては最大 70.1%の総合効率が得られ、エネルギー回収型コレクタなしの場合の 58.0%から効率が大幅に向かうことが分かったが、シミュレーションを用いた実際のコレクタ設計においては 66.5%までしか得られなかった。エネルギー回収型コレクタによって効率が大きく改善されることは示されたが、コレクタの最適設計に際しては最適化の対象が多く多数のシミュレーションを行う必要があり、今後、コレクタ形状・電極電位・外部磁場等を最適化する手法・自動アルゴリズム等の確立が必要となるであろう。

(2)について、通常のソリッドビームのシミュレーション結果から、電子ビームと高周波共振空洞との相互作用は、空洞のギャップ付近で最も強く、逆に軸上で最も弱いことが分

かった。そこで、全体の効率を下げる原因になると考えられる軸付近にビームのない、中空のホロービームを用いてシミュレーションを行ったところ、外径 11.2mm に対して内径 5mm のホロービーム入射の場合で、飽和出力が 7.3% 向上することが分かった。さらに内径の大きいホロービームを利用すればさらに効率が向上すると考えられるが、今後、ホロービームの安定性も考慮したホローカソード電子銃の設計が必要となる。

また、エネルギー回収型コレクタとホロービームを併用することにより、さらに効率が向上することが期待され、今後の検討課題である。

高周波取り出し空洞の三次元評価コード開発については、既存のコードを調査・検討し、これまでに開発した二次元コードの二次元・三次元のハイブリッドコードへの発展の予備検討を行い、課題を明らかにした。

6. あとがき

本共同研究で行った「大出力クライストロンの高効率化」に関して、当初はクライストロン管設計用シミュレーションコードを利用してコレクター入口における電子ビームの初期条件を求め、専らコレクターの最適化を行おうと考えていた。そのために、既存のコードの精度や開放性を詳細に調査・検討したが、結果として独自に開発する必要性のあることが明らかとなった。さらに、動燃においてはクライストロン管の大幅な性能改善が将来要請されるため、三次元コードへの拡張容易性を具備したコード開発を行う必要がある。

今年度は、昨年度までに完成したクライストロンの二次元粒子シミュレーションコードについて、実機との比較による検証を行い、十分な解析精度があることが確かめられた。また、既存のコードとの比較においては、本共同研究で開発したコードの優位性が確認された。

このコードを用いて、大出力クライストロンの高効率化について検討・評価を行った結果、五段のエネルギー回収型コレクタおよびホロービームの利用により、それぞれ総合効率 66.5% および 62.2% と、従来の効率 58.0% から大きく改善されることが示された。また、回収コレクタおよびホロービームを併用することによるさらなる効率の向上も期待され、これらの方法による大出力クライストロン効率の大幅な改善が十分に可能であるとの結論が得られた。

また、開発した二次元コードの二次元・三次元のハイブリッドコードへの発展の予備検討を行って一部作成に取りかかり、また、今後の課題を明らかにした。

引用文献

- [1] 吉川潔, 平野耕一郎 他, 大出力クライストロンの高効率化に関する研究－共同研究報告書－ (1996).
- [2] 吉川潔, 平野耕一郎 他, 大出力クライストロンの高効率化に関する研究－共同研究報告書－ (1997).
- [3] T. Shintake, HIGH-POWER KLYSTRONS SIMULATIONS USING FCI-FIELD CHAGE INTERACTION CODE, KEK Report (1990).
- [4] Y. Yamamoto, K. Yoshikawa, Y. Hattori, DEVELOPMENT OF A TWO-DIMENSIONAL SIULATION CODE (KUAD) INCLUDING ATOMIC PROCESSES FOR BEAM DIRECT ENERGY CONVERSION, Proc. of 12th Symposium on Fusion Engineering, IEEE, pp.1222-1226 (1987).
- [5] K. Yoshikawa, S. Kouda, Y. Yamamoto, K. Maeda, DEVELOPMENT OF A TWO-DIMENSIONAL PARTICLE TRAJECTORY CODE AND APPLICATION TO A DESIGN OF A PLASMA DIRECT ENERGY CONVERTER IN THE FUSION ENGINEERING FACILITY BASED ON MIRROR PLASMA CONFINEMENT, Fusion Technology, vol.14, no.2, pp.264-283 (1988).
- [6] U. Becker, M. Dohlus, T. Weiland, THREE DIMENSIONAL KLYSTRON SIMULATION, to be published in Particle Accelerators.
- [7] K. Yoshikawa, Y. Nimura, Y. Yamamoto, H. Watanabe, DIRECT ENERGY CONVERSION FROM UNNEUTRALIZED ION BEAMS IN A NEGATIVE-ION-BASED NEUTRAL BEAM INJECTION SYSTEM, Fusion Technology, vol.17, no.4, pp.527-539 (1990).
- [8] 島田茂樹, Staggered-Array Undulator の特性解析および設計に関する研究, 京都大学大学院工学研究科電気工学専攻修士論文 (1997).

表2.1 コード検証に用いたクライストロン基本仕様の比較

	東芝 E3718		東芝 1AV56	SLAC XK-5
	CW	パルス		
動作周波数[MHz]	1250		615.25	2856
ビーム電圧[kV]	最大 90	最大 147	17	265
ビーム電流(ピーク) [A]	最大 24.3	最大 56.5	2.21	286
ビーム電力(ピーク)	最大 2.2MW	最大 8.3MW	38kW	76MW
パービアンス [$\mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$]	0.9	1.0	1.0	2.1
飽和出力	1.0MW ^{*1}	3.6MW	17kW	36MW
効率[%]	58.1 ^{*1}	42.7	45	47.5

(*1 ビーム電圧 83kV 動作時)

表 2.2 FCI, KUFCI の比較に用いた空洞配置

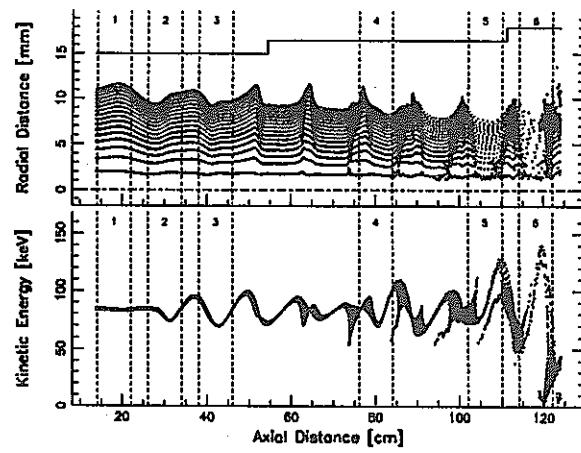
	空洞 No.					
	1 (input)	2	3	4	5	6 (output)
(0)	-	-	-	-	-	-
(1)	-	-	-	+20	-	-
(2)	-	-5	-15	+20	-	-
(3)	-	-5	-15	+20	+5	-
(4)	-	-5	-15	+20	-5	-

(単位 mm ; E3718 二号機での位置を 0mm としてコレクタ側を+、電子銃側を-方向とする)

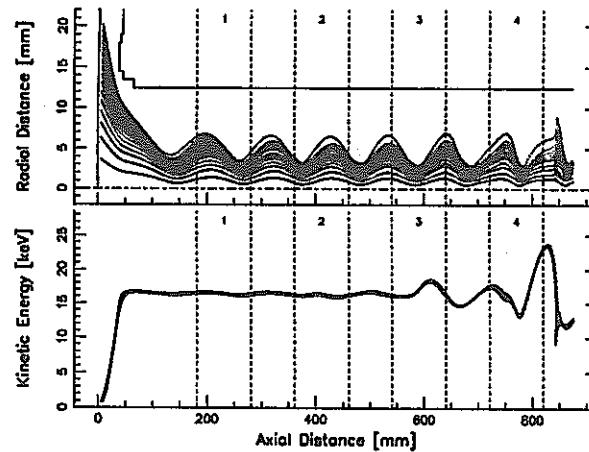
表 2.3 FCI, KUFCI 解析結果の比較 (効率[%] ; 左 - FCI ・ 右 - KUFCI)

$\Delta f_4, \Delta f_5$ [MHz]	空洞配置				
	(0)	(1)	(2)	(3)	(4)
25, 25	71.2 59.1	71.0 59.3	70.8 59.2	71.3 -	71.3 58.9
25, 30	70.7 57.0	71.5 57.8	71.6 57.4	71.5 57.2	71.4 57.5
30, 30	70.4 55.1	70.5 55.1	70.5 54.0	70.6 53.5	70.9 54.2
35, 30	69.4 51.5	68.9 50.9	- -	- -	- -

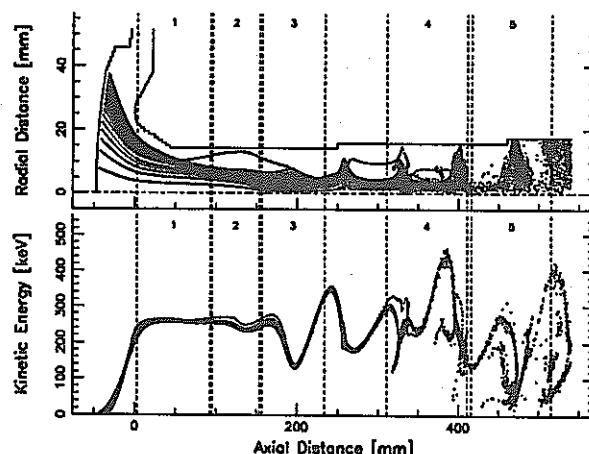
($\Delta f_4, \Delta f_5$: 第 4, 5 空洞の離調周波数)



(a) E3718

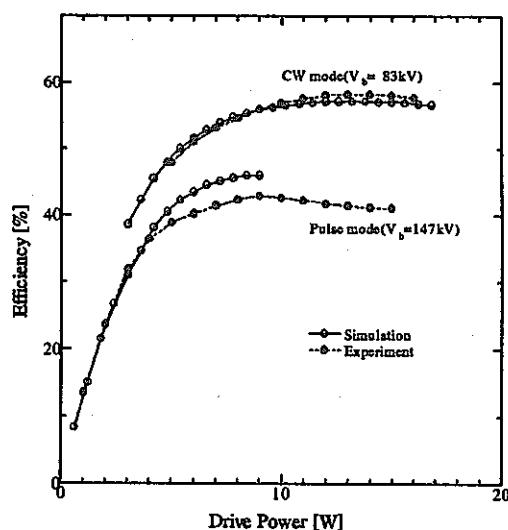


(b) 1AV56

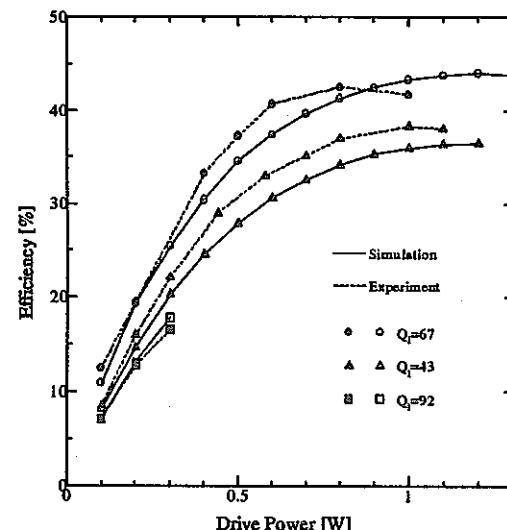


(c) XK-5

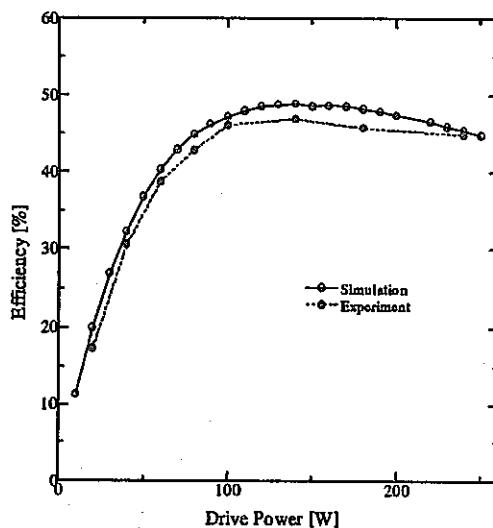
図 2.1 KUFCI 解析におけるクライストロン内電子分布（スナップショット）



(a) E3718



(b) 1AV56



(c) XK-5

図 2.2 KUFCI 解析結果と実機測定値との比較 — 入出力特性

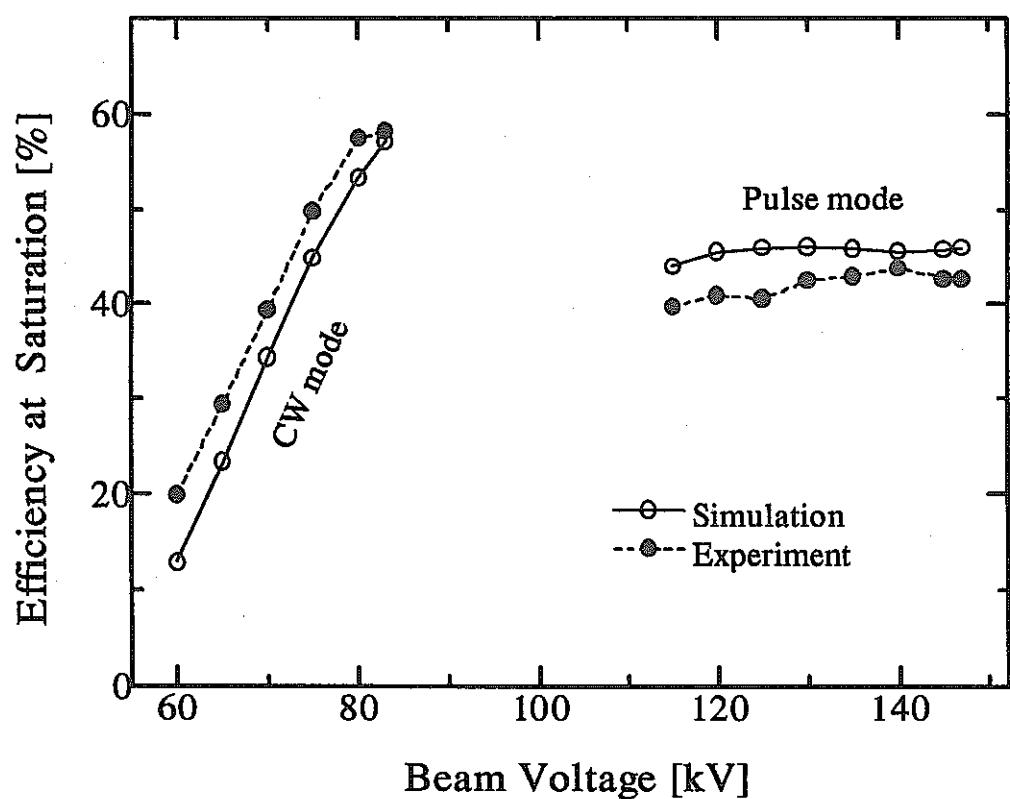


図 2.3 KUFCI 解析結果と実機測定値との比較 – E3718 飽和出力

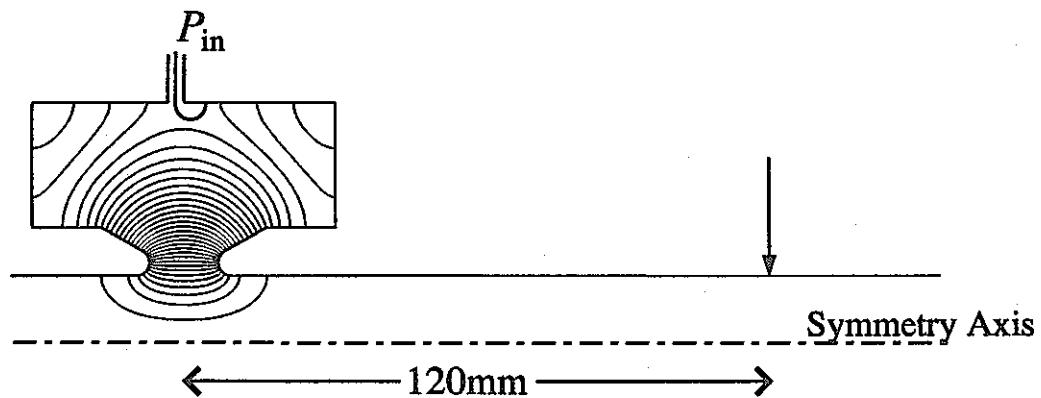


図 2.4 KUFCI 解析精度評価に用いたモデル

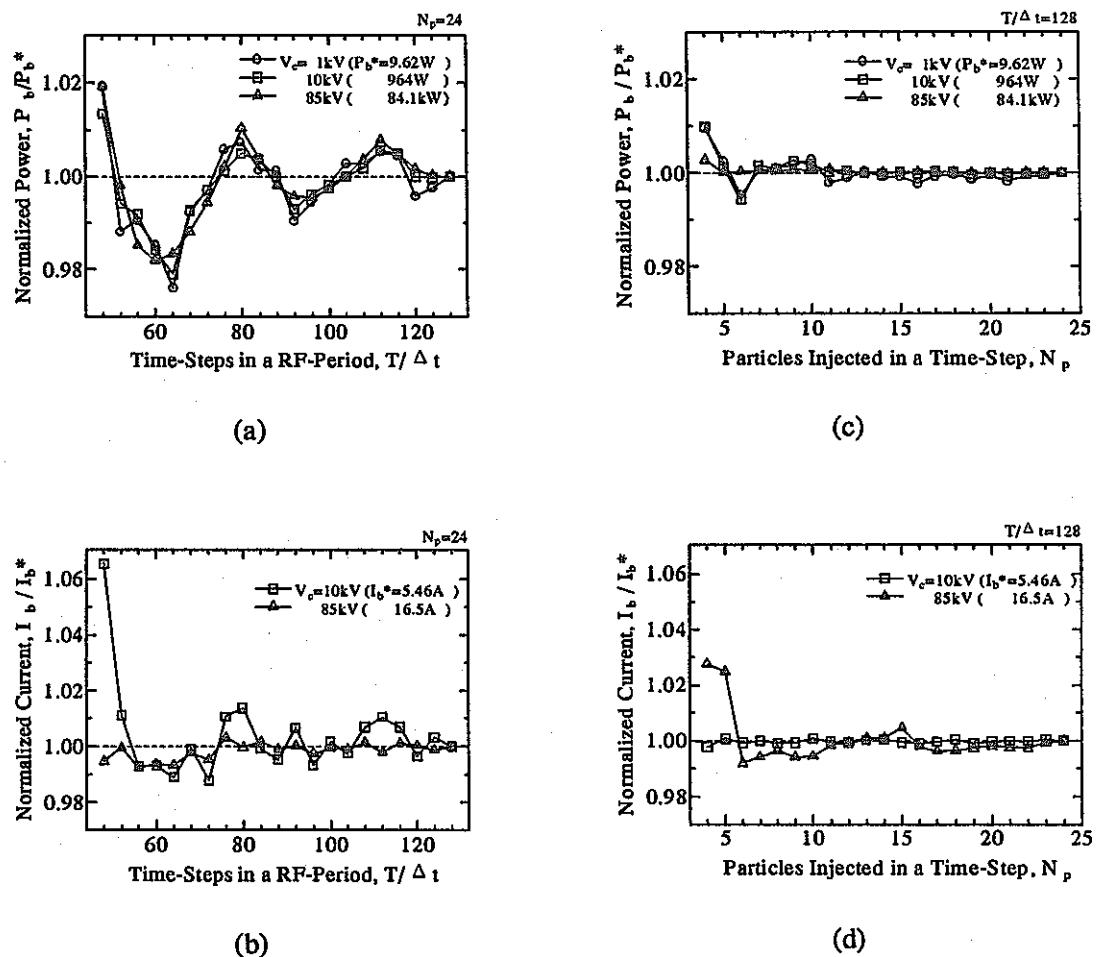


図 2.5 時間ステップ数, 径方向粒子数に対する KUFCI 解析結果の収束性

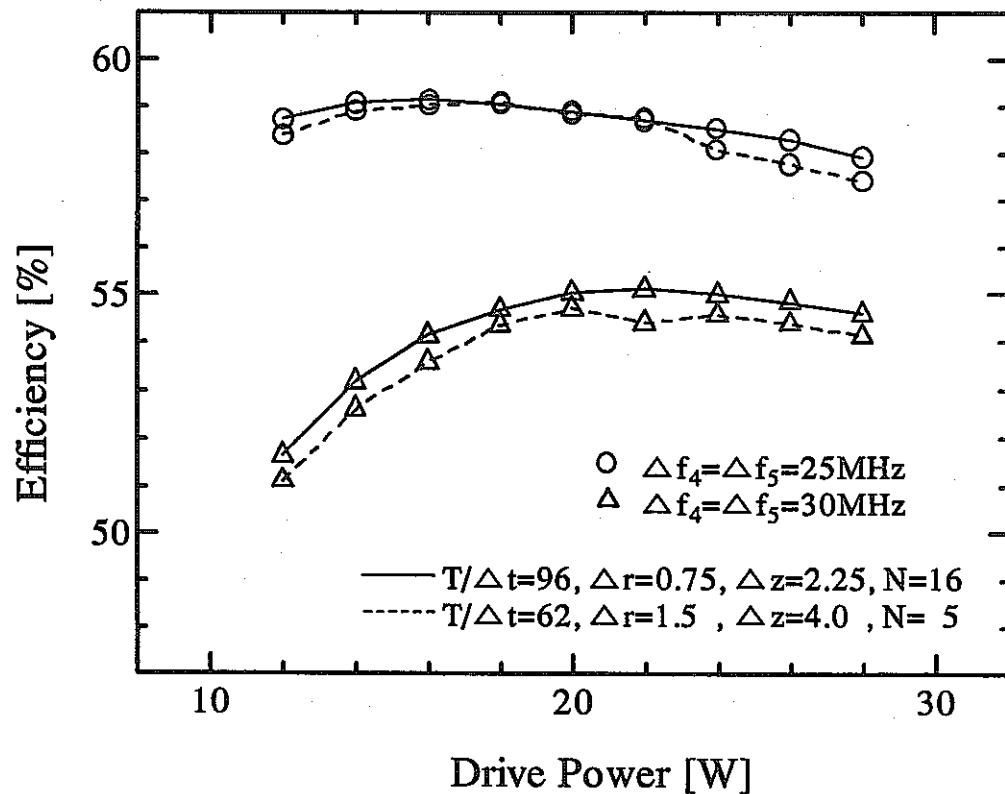


図 2.6 メッシュ数・時間ステップ数・径方向粒子数
による KUFCI 解析入出力特性の変化

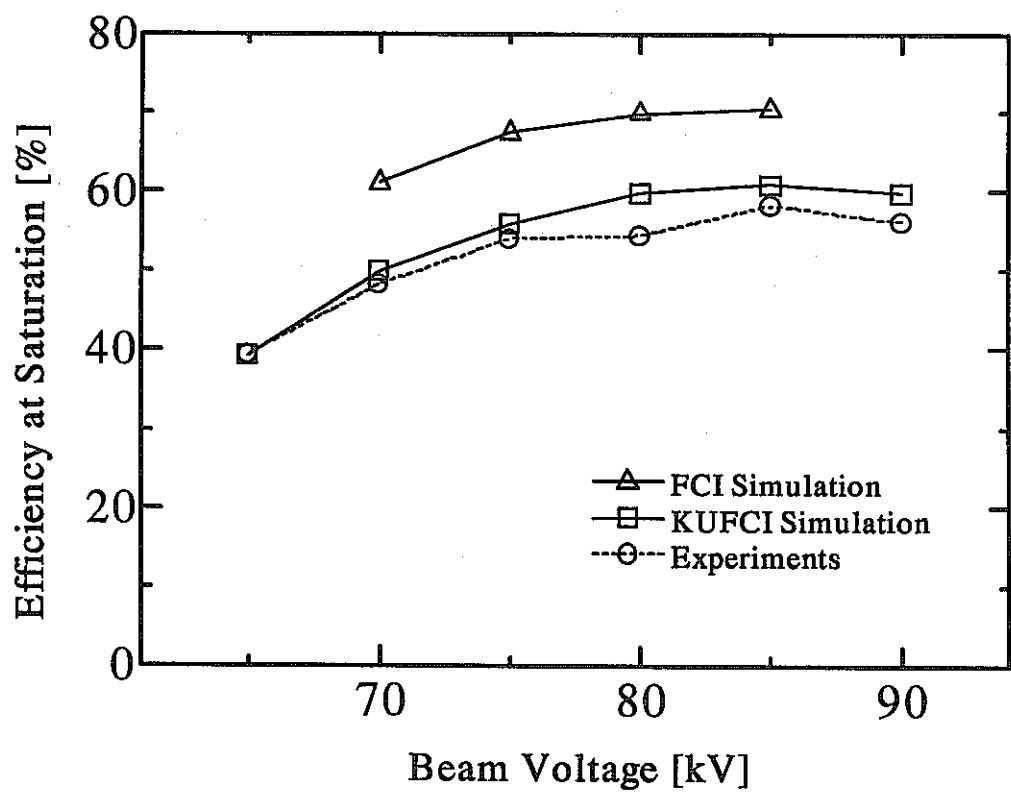
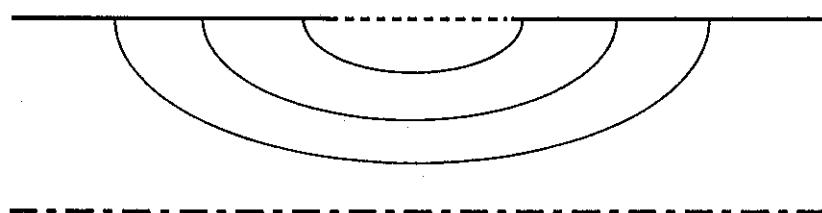
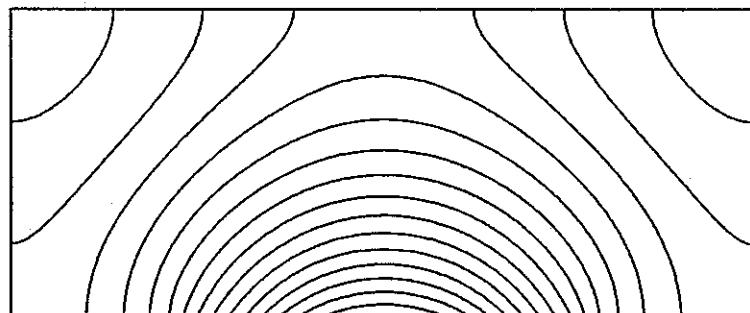


図 2.7 FCI, KUFCI, 実機の比較 — E3718 二号機飽和効率のビーム電圧依存

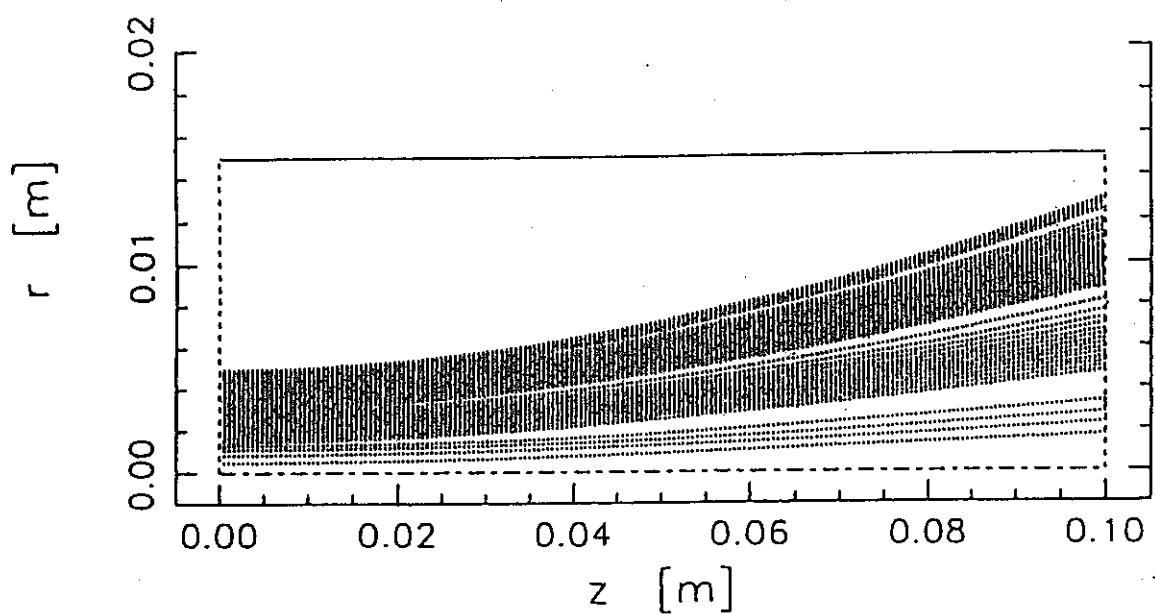


(a) FCI

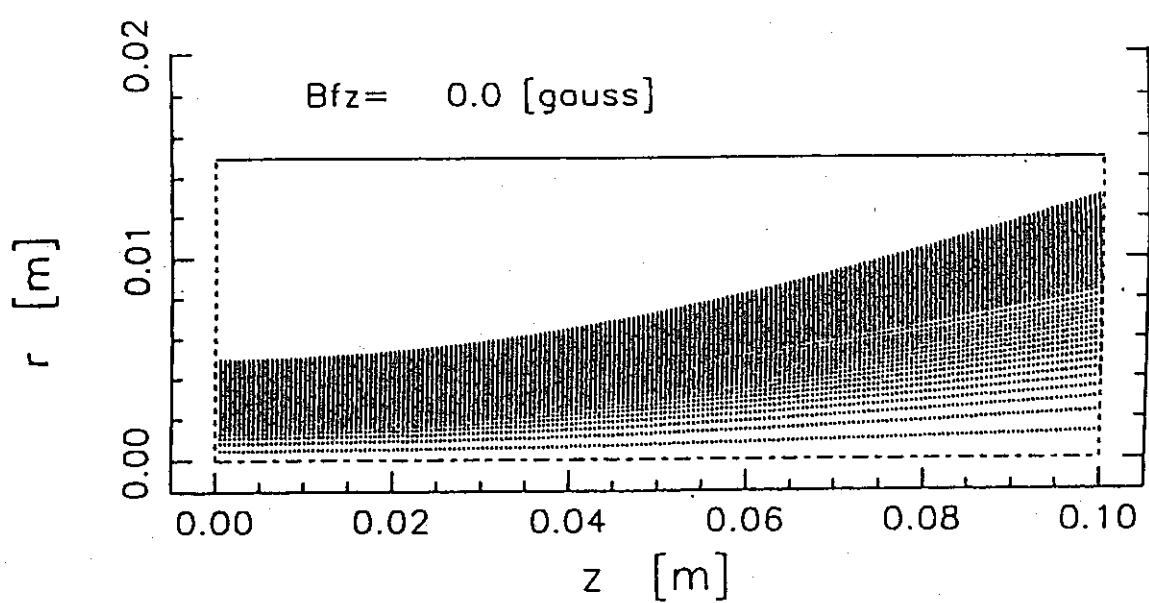


(b) KUFCI

図 2.8 FCI, KUFCI における共振空腔固有モード計算の相違



(a) 一次要素を用いた場合



(b) 二次要素を用いた場合

図2.9 解析軌道のフィラメンテーション

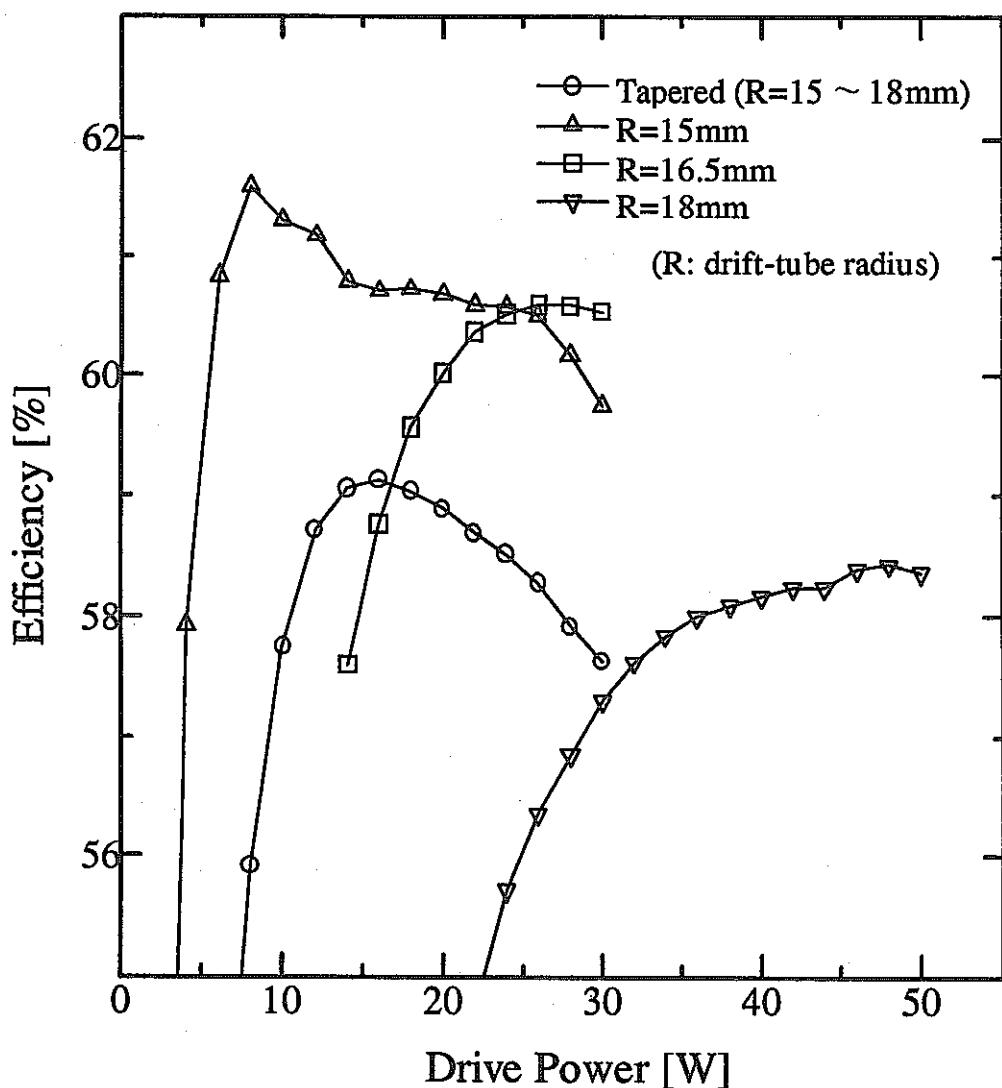


図 2.10 ドリフトチューブ径による入出力特性の変化

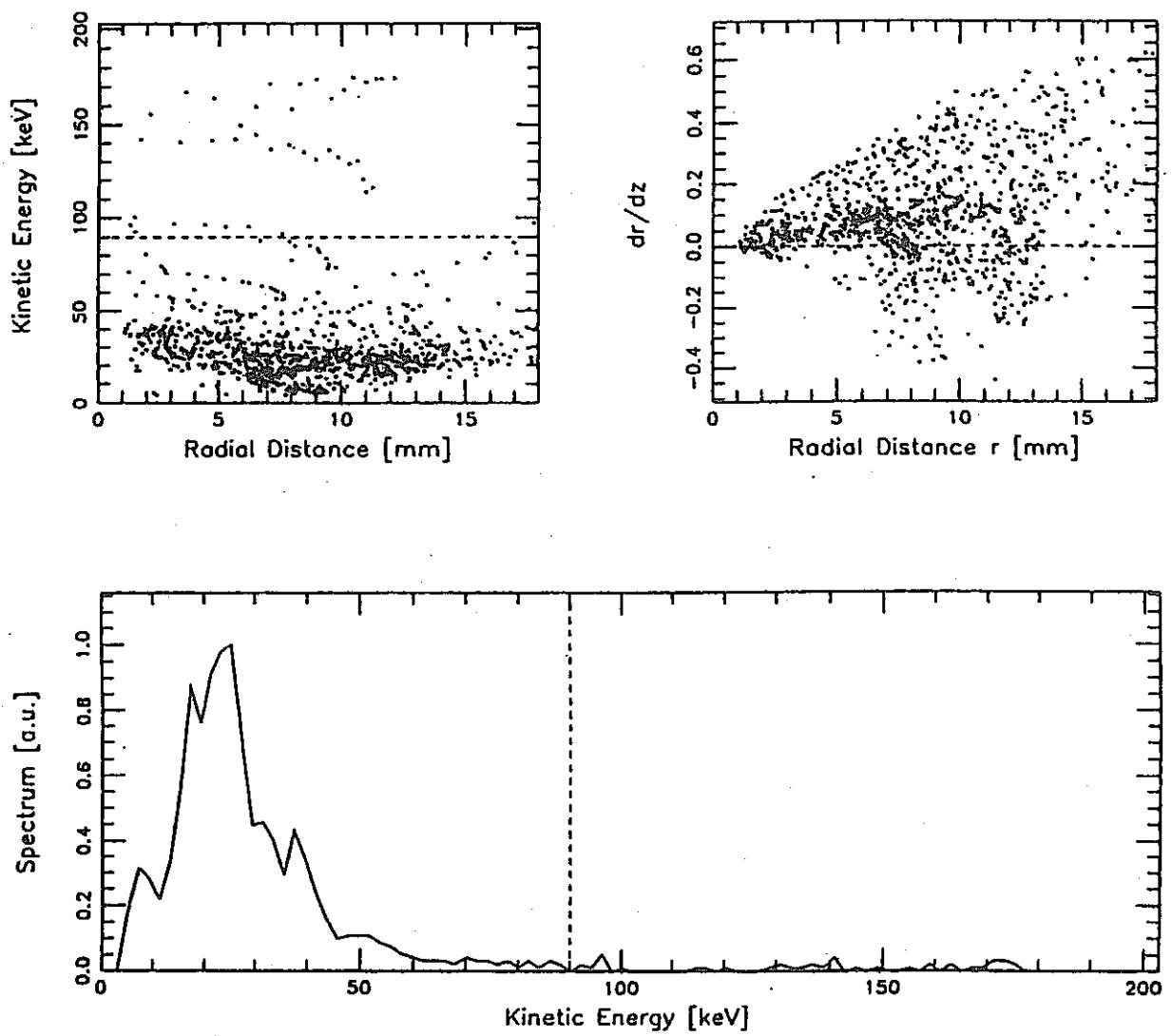


図 3.1 E3718 クライストロンにおける使用済みビーム
(ビーム電圧 90kV, 飽和出力動作)

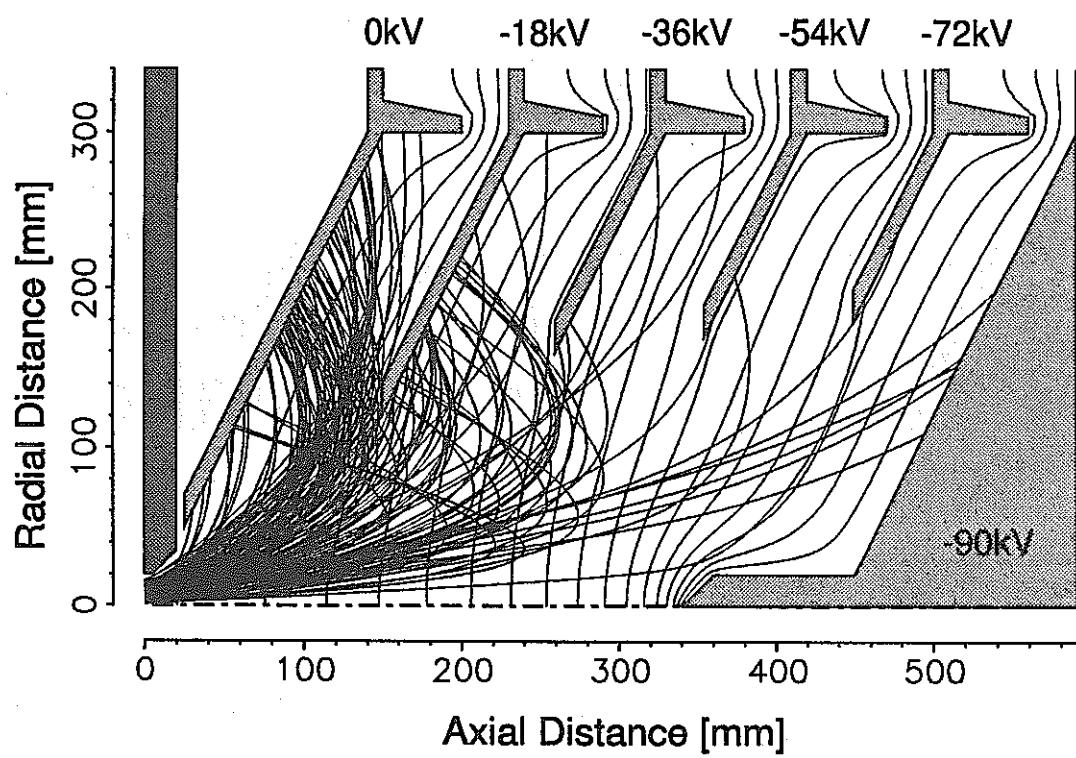


図 3.2 エネルギー回収型 5段コレクタ内の電子軌道
(18kV 刻みの電極電圧の場合)

→ Electron

↔ Secondary

$$V_{n-1} > V_n > V_{n+1}$$

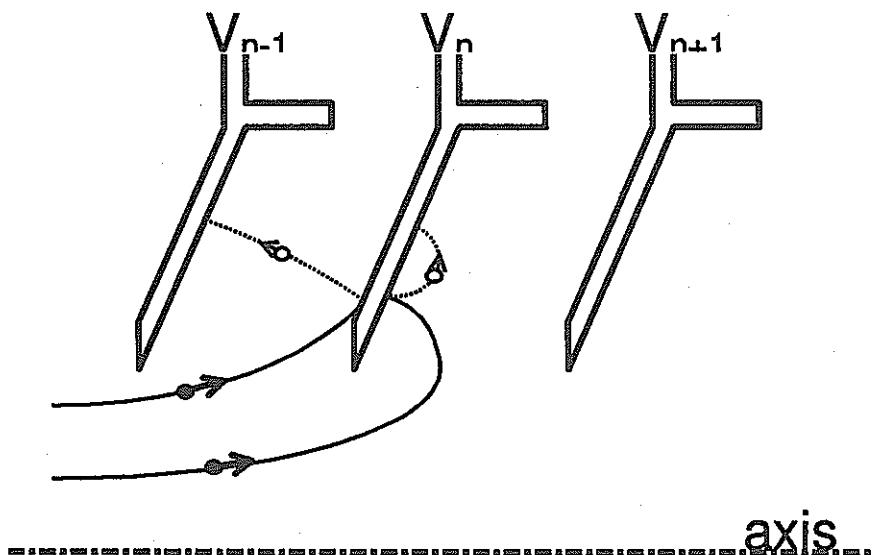


図 3.3 エネルギー回収コレクタ内の二次電子損失の評価

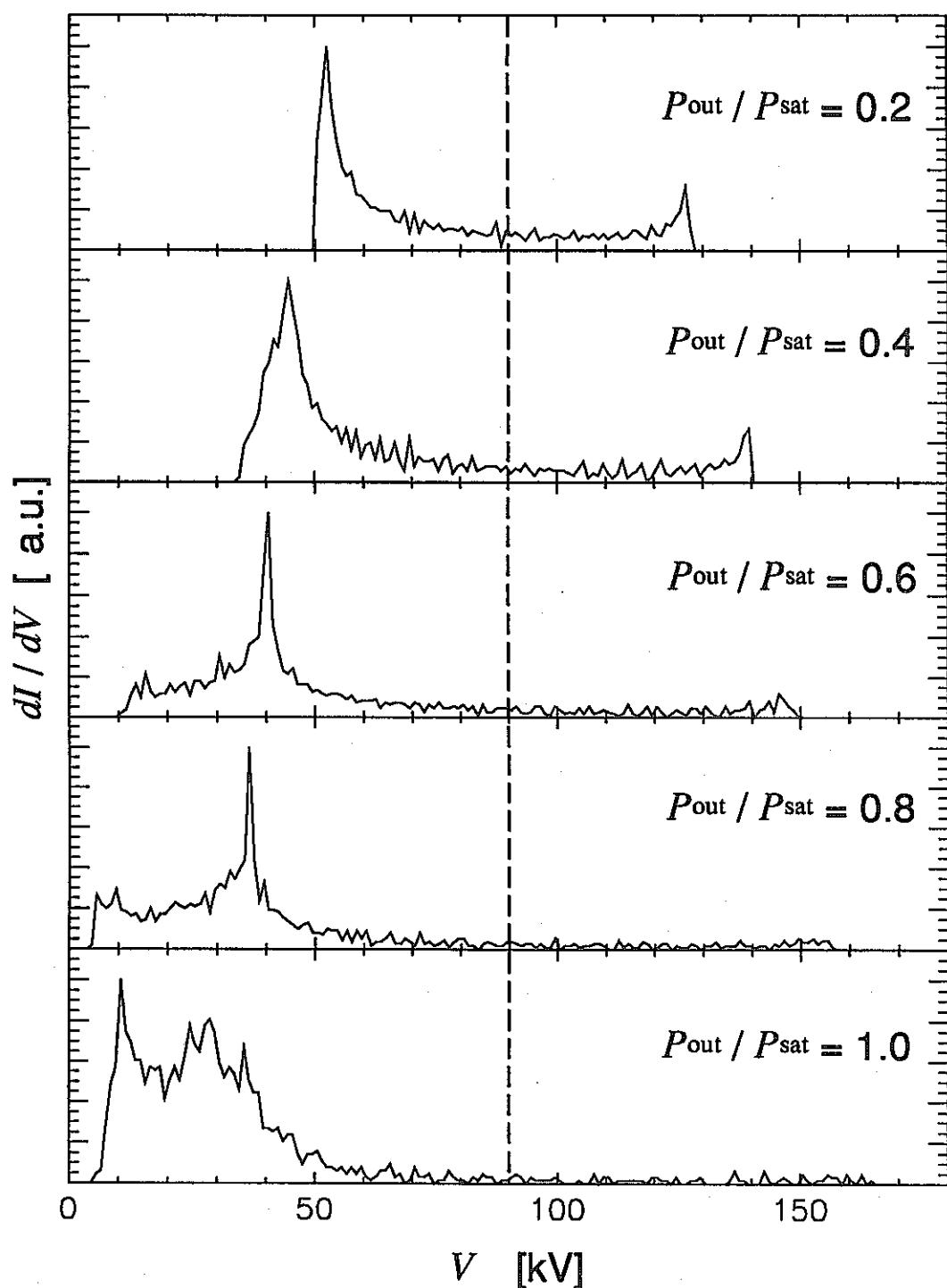


図 3.4 高周波入力による使用済み電子ビームのエネルギー分布の変化
(E3718, ビーム電圧 90kV. P_{out} : 高周波出力, P_{sat} : 飽和時の出力)

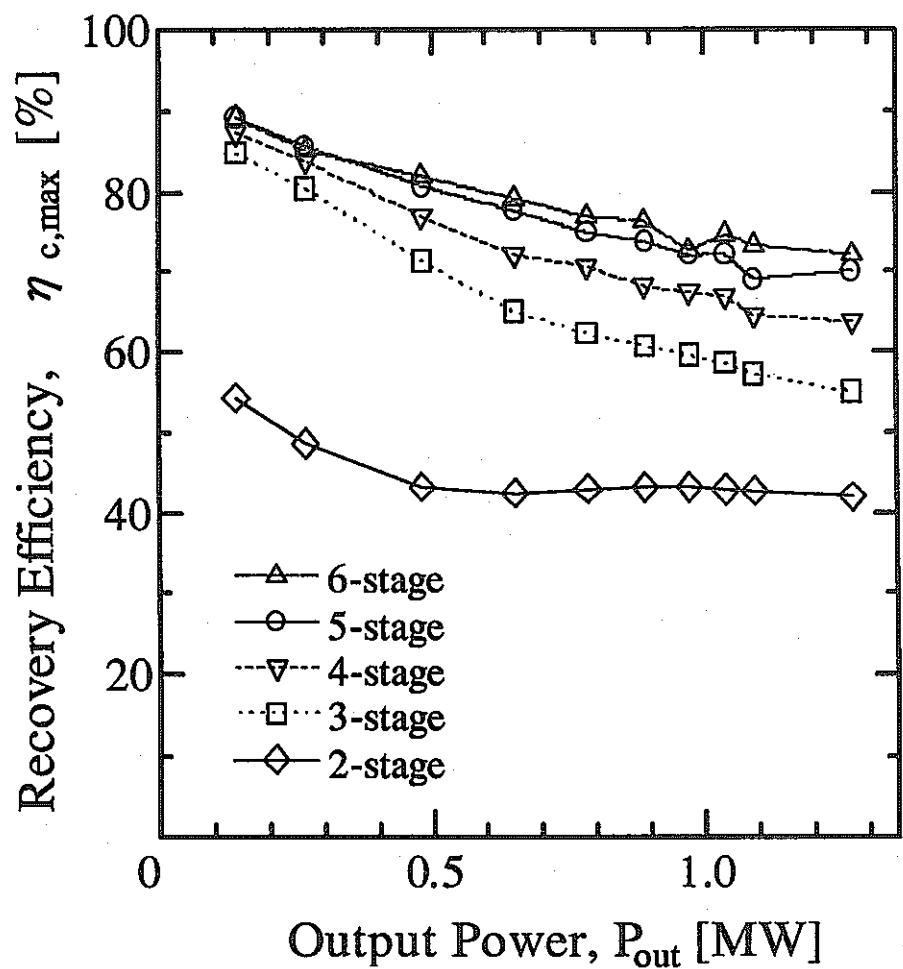


図3.5 エネルギー回収型コレクタによる理論最大回収効率

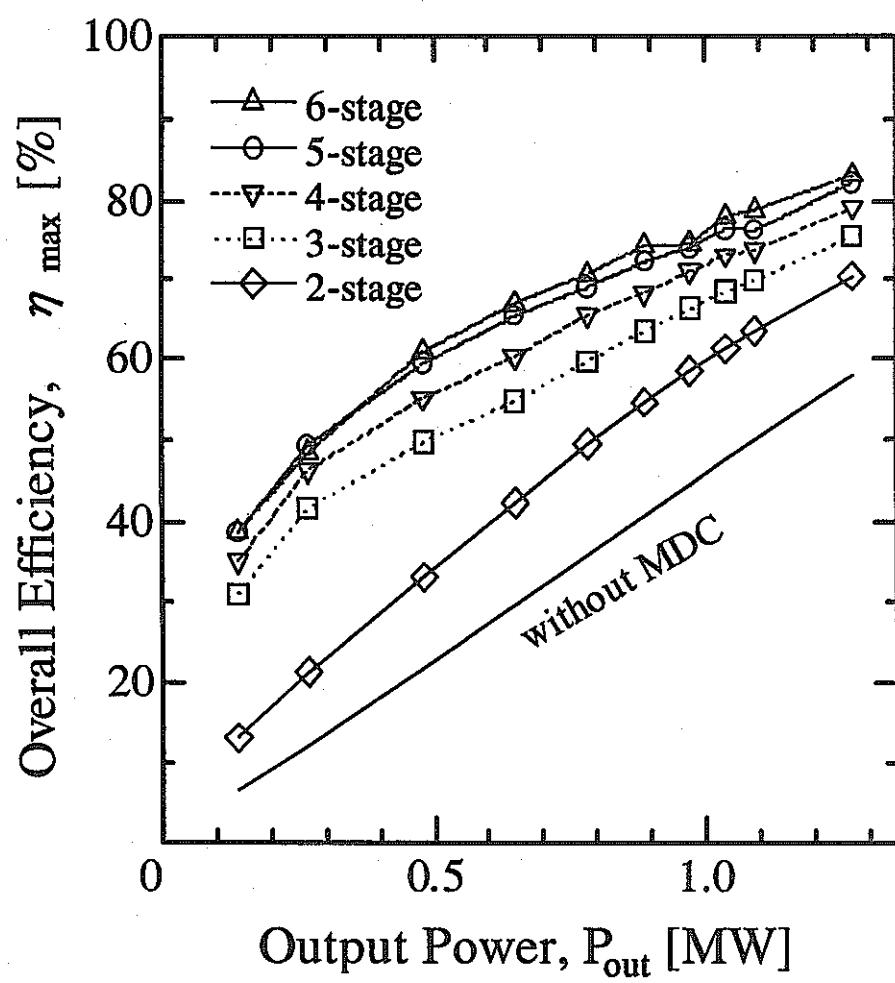


図 3.6 エネルギー回収型コレクタによる理論最大総合効率

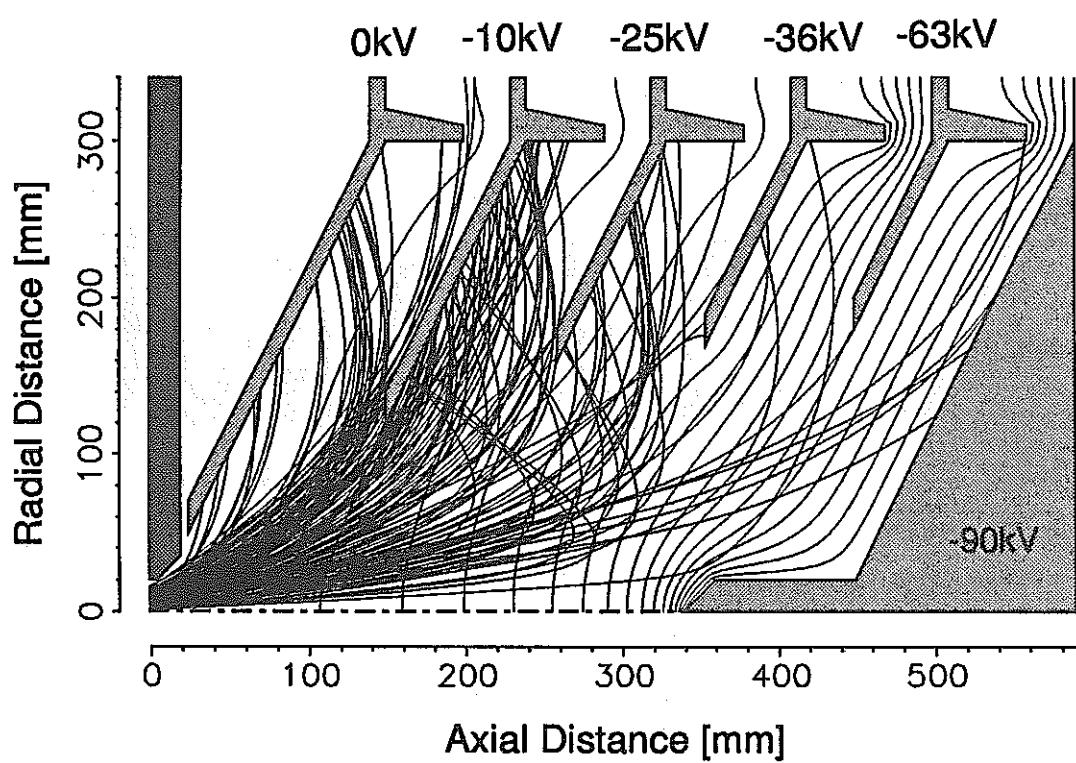
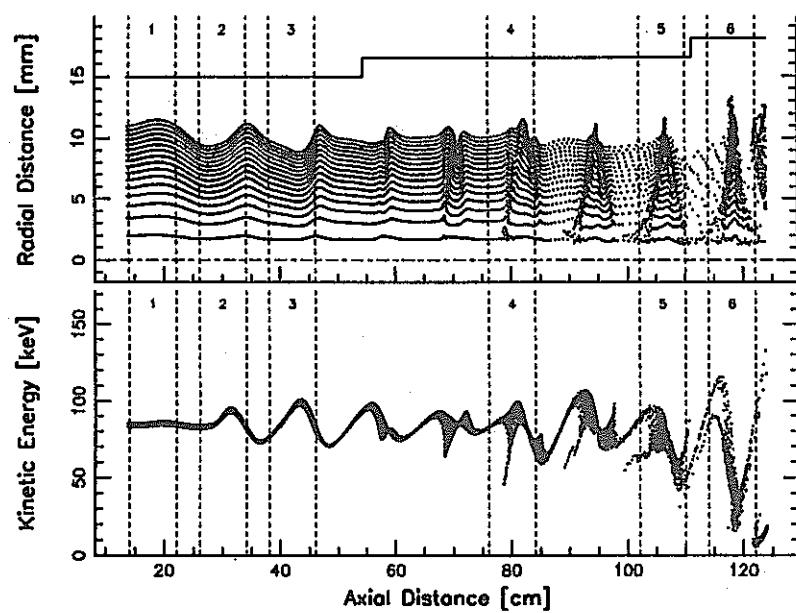
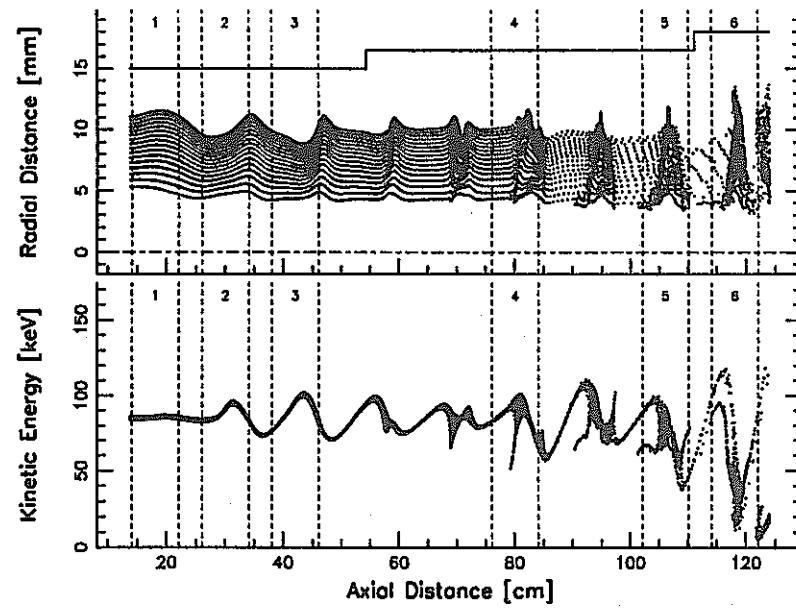


図 3.7 エネルギー回収型 5段コレクタ内の電子軌道
(最適電極電圧の場合)

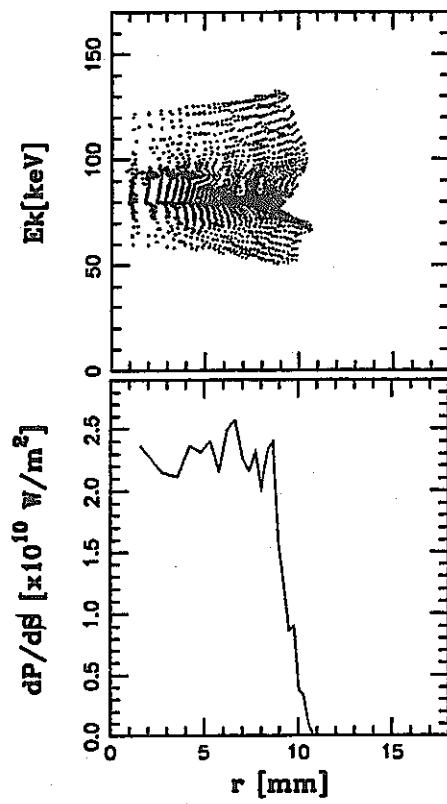


(a) ソリッドビーム

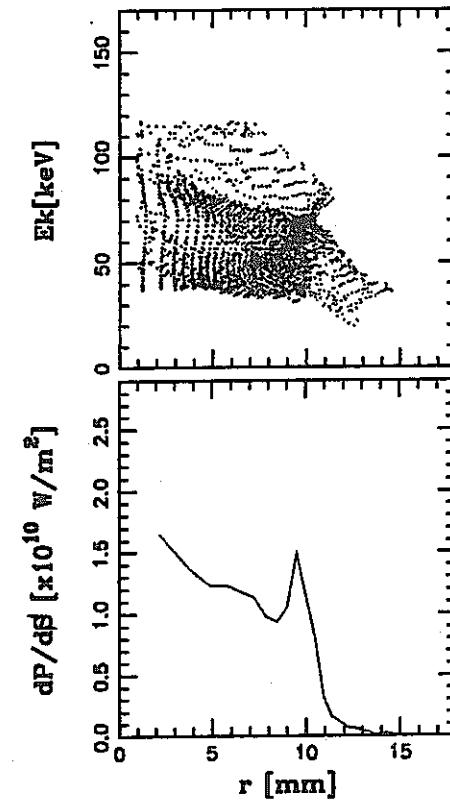


(b) ホロービーム

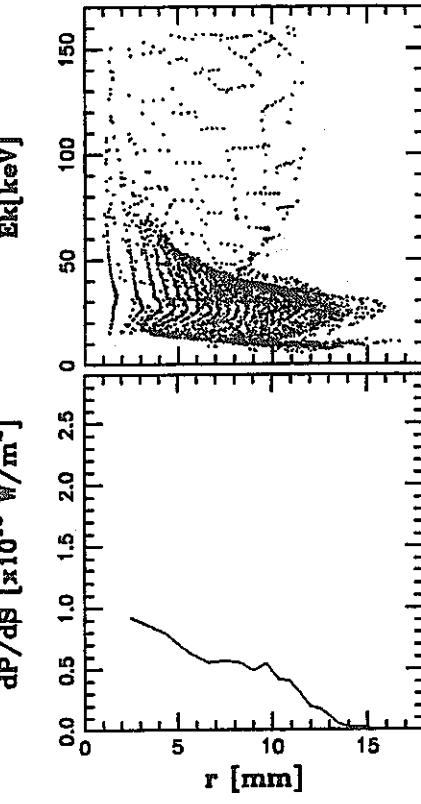
図 3.8 ソリッドビーム, ホロービームの E3718 内電子分布



(a) 出力空洞上流



(b) 出力空洞ギャップ中心



(c) 出力空洞下流

図 3.9 電子ビームと出力空洞との相互作用 — 電子運動エネルギーおよび単位面積あたりのビーム電力の径方向分布

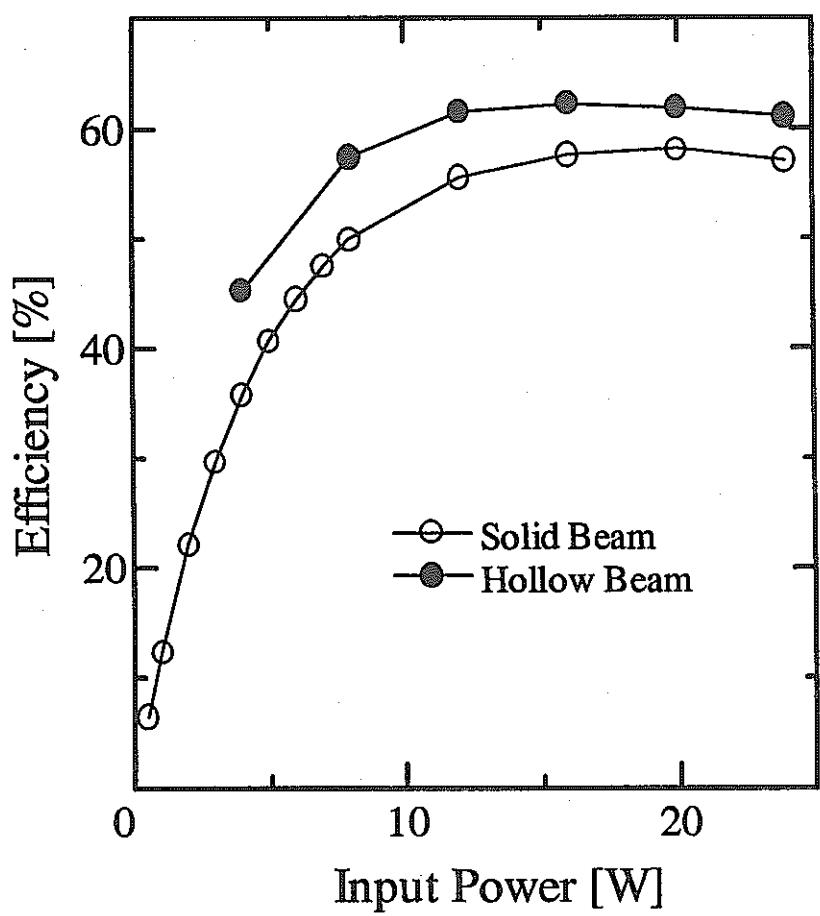


図 3.10 ソリッドビーム, ホロービームによる入出力特性の比較

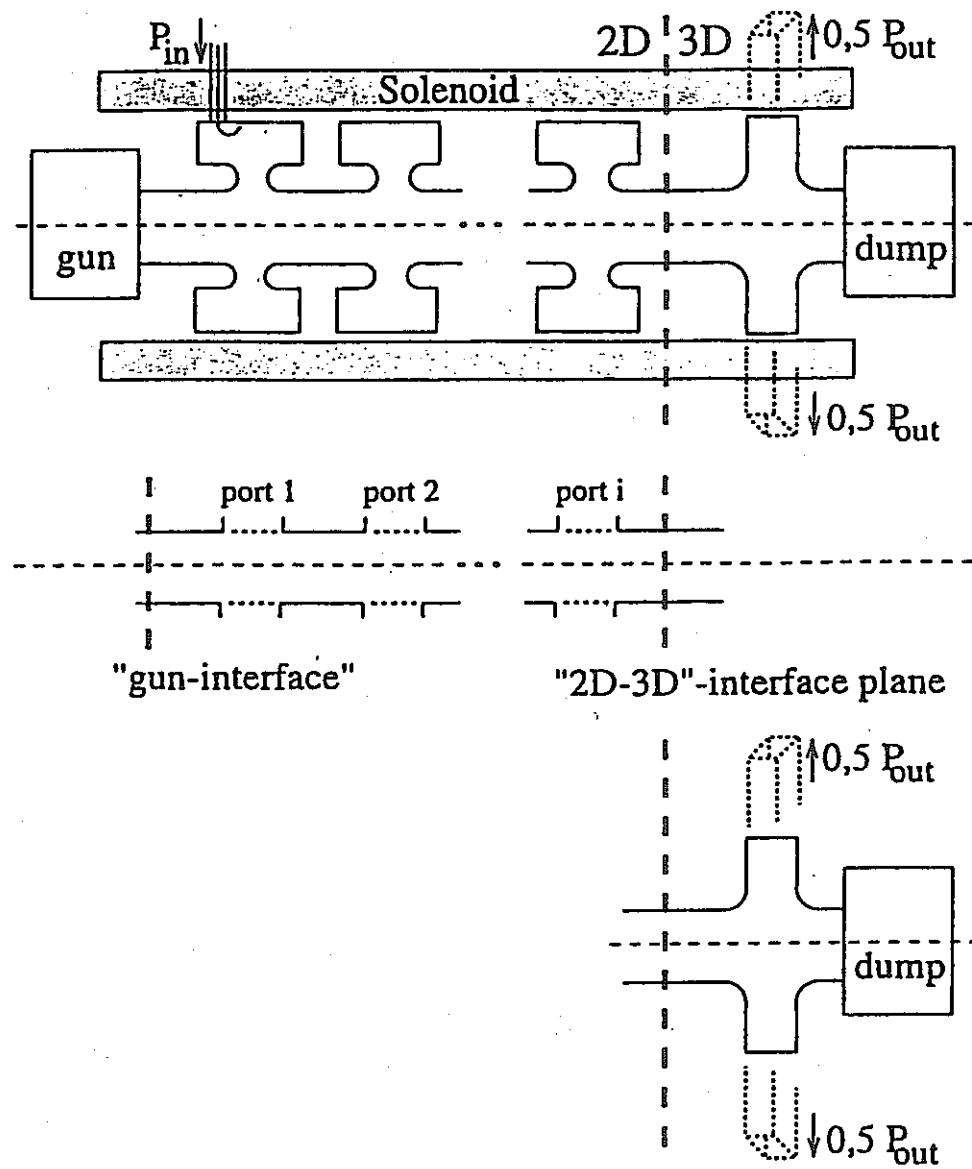


図 4.1 出力空洞の三次元シミュレーション概念図

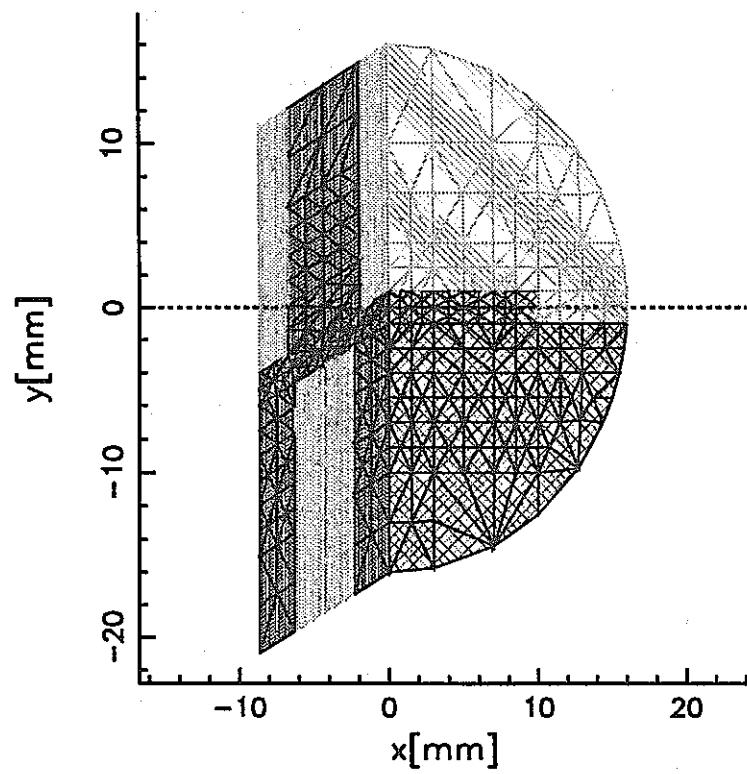
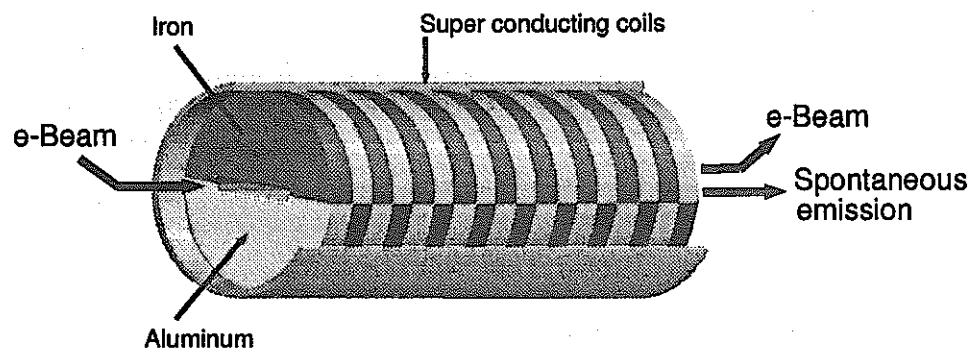


図 4.2 三次元メッシュ生成プログラムの実行例

付録 A

電子ビーム・高周波共振空洞解析モデル（参考文献(2)より抜粋）

電子ビームと共振空洞との相互作用は、図 A.1 に示したような等価回路でモデル化することができる。

$$I_b = YV, \quad Y = G + j\omega C + \frac{1}{j\omega L} \quad (A.1)$$

ここに， V : 空洞電圧
 I_b : ビームローディング電流
 L, C, G : 共振空洞パラメータ（共振周波数，Q 値，R/Q 値）
 の測定値から計算される回路定数

集群した電子ビームによる共振モードの励振はビームローディング電流 I_b で置き換えられ、次式で表される。

$$I_b = \frac{2}{T} \int_{-T}^T i_b(t) e^{-j\omega t} dt, \quad (A.2)$$

$$i_b(t) = - \int E_{c0}(r) \cdot J(r, t) dV$$

ここに， E_{c0} : 共振空洞の固有モード
 J : 電子ビームの電流密度
 $f = \omega/2\pi = 1/T$: 動作周波数

一方、共振空洞の作る電磁界は

$$E_c(r, t) = v(t) E_{c0}(r) = \operatorname{Re} [V e^{j\omega t}] E_{c0}(r) \quad (A.3)$$

で与えられ、空洞電圧 V によってビームの電流密度 J が変化するため、(A.2)式で計算される I_b は V の関数となる。

各時間ステップで(A.2)式からビームローディング電流 I_b を計算し、空洞電圧 v の時間発展を解けば、空洞電圧の最終値（周期定常解）が得られることになるが、空洞の Q 値が高

いため周期定常解に収束するまでには膨大な計算時間を要することになる。例えば E3718 のアイドラ空洞 (Q 値は 3,000) の場合には、 V の誤差 2.5% 以内に収束するまでにおよそ 3,000 周期の計算が必要となる。

この問題を避けるために、既存のクライストロン設計用コードでは次の二つの方法が用いられている。

- (a) ビームローディング電流 I_b を上流の空洞との相互作用でビームが持っていた高周波電流成分 I_{b0} と空洞電圧 V によって新たに生じる成分 I_{bl} とに分けて考え、 I_{bl} については線形近似が成り立つと仮定して、

$$I_b = I_{b0} + I_{bl} = I_{b0} + Y_b V \quad (\text{A.4})$$

ここに、 Y_b : ビームアドミッタンス

とする。この近似を用いれば、 V は I_{b0} からすぐに計算されるが、 V が大きくなる場合には線形近似が成り立たなくなり、誤差が大きくなる。

- (b) 準定常近似を用いて、空洞電圧 v の時間に関する常微分方程式をフーリエ係数 V の常微分方程式に置き換えて V の時間変化を解く。この場合には加速係数を用いてある程度まで解の収束を速めることができる。

FCI コードでは、まず(a)の方法で V を概算し、その値を初期値として(b)の方法を用いることによって比較的短時間の計算で精度を得ている。

そこで、この FCI コードの方法を KUFCI コードに適用してその精度および収束性について検討したところ、15~20 周期の計算で空洞電圧 V の誤差 1% 以内の精度が得られるものの、0.1% 以内の誤差に収束させるためにはおよそ 100~120 周期の計算が必要であることが分かった。また、各空洞についてあらかじめビームアドミッタンス Y_b をシミュレーションで計算しておく必要があるという欠点もあり、本研究では更に短時間で高い精度が得られる方法を検討し、以下に記すような方法を採用した。

- (c) 等価回路方程式の時間発展を解かずに、空洞電圧 V の最終値を 1 周期毎に予測して修正する。 $n+1$ 周期目の空洞電圧 $V^{(n+1)}$ は次式で与える。

$$V^{(n+1)} = V^{(n)} \frac{I_{b0}}{I_{b0} - I_b^{(n)} + YV^{(n)}}, \quad (A.5)$$

ここに, I_{b0} , $I_b^{(n)}$: 空洞に電圧 $V=0$, $V^{(n)}$ が印可されたときの電子ビーム J から(A.2)式より計算されるビームローディング電流

これを, $I_b^{(n)} = YV^{(n)}$ となるまで繰り返す。

この方法を用いることにより, 10~15 周期の計算で V の誤差 0.1% 以内に収束させることができ, 短時間の計算で高精度の解を得ることが可能となった。

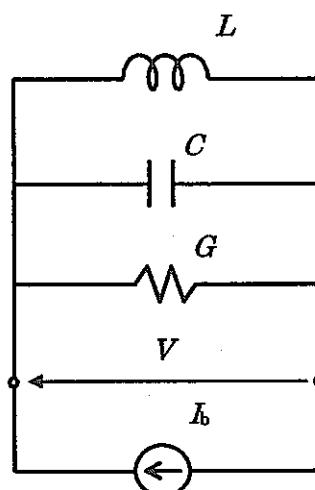


図 A.1 高周波共振空洞の等価回路