

JAERI-Research

JP9950154

99-019



# 陽子蓄積リング用高周波系の概念検討

1999年3月

野田文章・金正倫計

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、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。

入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越し下さい。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布を行っております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1999

編集兼発行 日本原子力研究所

## 陽子蓄積リング用高周波系の概念検討

日本原子力研究所東海研究所中性子科学研究センター  
野田 文章・金正 倫計

(1999年2月3日受理)

日本原子力研究所は中性子科学研究計画を提案してきた。この計画で陽子蓄積リングは2台でパルス幅 $1\mu s$ 以下、出力パワー5MWのビームを中性子散乱実験に供給しなければならない。ライナックのパルス構造を400ns-ON,270ns-OFF、リングのハーモニック数を1とした場合、空洞の基本周回周波数は1.49MHzとなる。リング当たり2.5MWを達成するため、入射パルスは荷電変換多重入射によってリングに蓄積する。そのため最大蓄積時で平均周回電流値は50Aに達する。このような大電流ビームを安定に蓄積リングに蓄積し、速い取り出しでビームを取り出すにはパンチングファクタとビームの運動量広がりを制御する必要がある。そこで陽子蓄積リング用高周波空洞として、同調型高周波空洞と非同調型高周波空洞の2種類の空洞について概念設計を行い比較検討を行った。その結果、大電力の高周波源が必要などいくつかのデメリットはあるものの、装荷する磁性材料の寸法制限がないことや1台の空洞に高調波成分も同時に給電できるなどの点から非同調型高周波空洞が本陽子蓄積リングに適しているという結論を得た。また、高周波を利用した空洞システムの有効性並びに非同調型高周波空洞システムを利用した場合のビームローディングの影響を調べるため、縦方向ビームトラッキングコードを作成し、シミュレーションを行った。

この結果、高周波を利用した空洞システムの有用性を示すとともに、ビームローディング力を低減した空洞システムの設計のための指針を得ることができ、必要なR&D項目の抽出ができた。本報告書ではこれらについて報告する。

**A Conceptual Study of the RF System  
for the Proton Storage Ring**

Fumiaki NODA and Michikazu KINSHO

Center for Neutron Science  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 3, 1999)

Japan Atomic Energy Research Institute, JAERI, has been proposing the Neutron Science Project (NSP). In this project, the proton storage ring must provide a short pulsed proton beam of less than 1ms with an average beam power of 5MW with two rings. In case of a pulse length is 670nsec (filling factor is 60%) and a harmonic number of the ring is 1, the revolution frequency is 1.49MHz. To achieve a beam power of 2.5MW/ring, the injection beam is compressed by means of a multi-turn charge exchange injection. And the average circulating current becomes 50A at the end. This circulating beam current is very large and it induces a heavy beam-loading and space-charge. It is necessary to keep the bunch structure and to reduce the beam loss under the severe conditions. The RF system is made use of controlling the bunch structure, bunching factor and momentum spread. So, we have designed the two types of RF system and compared these RF systems. In consequence of comparison, untuned RF cavity system is suited to use for the storage ring. The reasons are no limit for the size of core, no control of resonant frequency and simplicity for barrier bucket system. And we have developed the longitudinal simulation code to investigate the storage process with untuned RF system. In conclusion, the barrier bucket system is effective for the storage ring. And we got the guide for design of the RF cavity system. This paper describes the preliminary study of the RF system, longitudinal beam tracking code and simulations.

**Keywords:** Proton Storage Ring, RF System, Untuned RF Cavity, Barrier Bucket, Bunching Factor, Beam Loading, Space Charge Force, Longitudinal Simulation

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 高周波空腔システム .....	4
2.1 高周波空腔システムの概要 .....	4
2.2 同調型高周波空腔システム .....	6
2.3 非同調型高周波空腔システム .....	14
2.4 高周波加速系の比較検討 .....	22
3. 縦方向シミュレーション .....	23
3.1 縦方向シミュレーションの概要 .....	23
3.2 縦方向シミュレーションコード .....	23
3.3 ビームシミュレーション .....	29
4. まとめ .....	63
謝 辞 .....	64
参考文献 .....	64

## Contents

1. Introduction .....	1
2. RF Cavity System .....	4
2.1 Outline of RF Cavity System .....	4
2.2 Tuned RF Cavity System .....	6
2.3 Untuned RF Cavity System .....	14
2.4 Consideration on RF Cavity System .....	22
3. Longitudinal Simulation .....	23
3.1 Outline of Longitudinal Simulation .....	23
3.2 Longitudinal Simulation Code .....	23
3.3 Beam Simulations .....	29
4. Summary .....	63
Acknowledgment .....	64
References .....	64

This is a blank page.

## 1. はじめに

原研中性子科学研究計画[1]では中性子散乱実験用に短パルス ( $<1\mu\text{s}$ )、大強度 (5MW) ビームが必要となる。本計画ではこれを蓄積パルス幅  $0.5\mu\text{s}$  以下、蓄積パワー2.5 MW の2機の陽子蓄積リングで達成することを想定し、現在検討を進めている[2]。図 1-1 に入射ビームのパルス構造並びに短パルスビーム生成の概略を示す。また表 1-1 に入射ビームのパラメータを示す。2機の陽子蓄積リングで達成することを想定した場合でも蓄積リングあたりの蓄積粒子数は  $2.1 \times 10^{14}$  個となり、周回電流値は平均値で 50A にも達する。このようなビームを蓄積し、中性子散乱実験エリアにビームを安定に供給するには、H<sup>-</sup>入射に伴うビームロス、入射ペインティング、荷電変換フォイルの寿命、蓄積時のビーム不安定性、早い取り出し時のビームロスなど種々の課題をクリアする必要がある。本研究では蓄積時のビーム不安定性のうち縦方向の空間電荷力によるビーム発散、ビームローディング下でのビーム挙動を調べ、安定に蓄積し、速い取り出し時のビームロスを避けるために必要な陽子蓄積リング用高周波空洞システムの概念検討を行った。また、縦方向ビームトラッキングコードを製作し、シミュレーションを行った。本報告書ではこれらについて報告する。

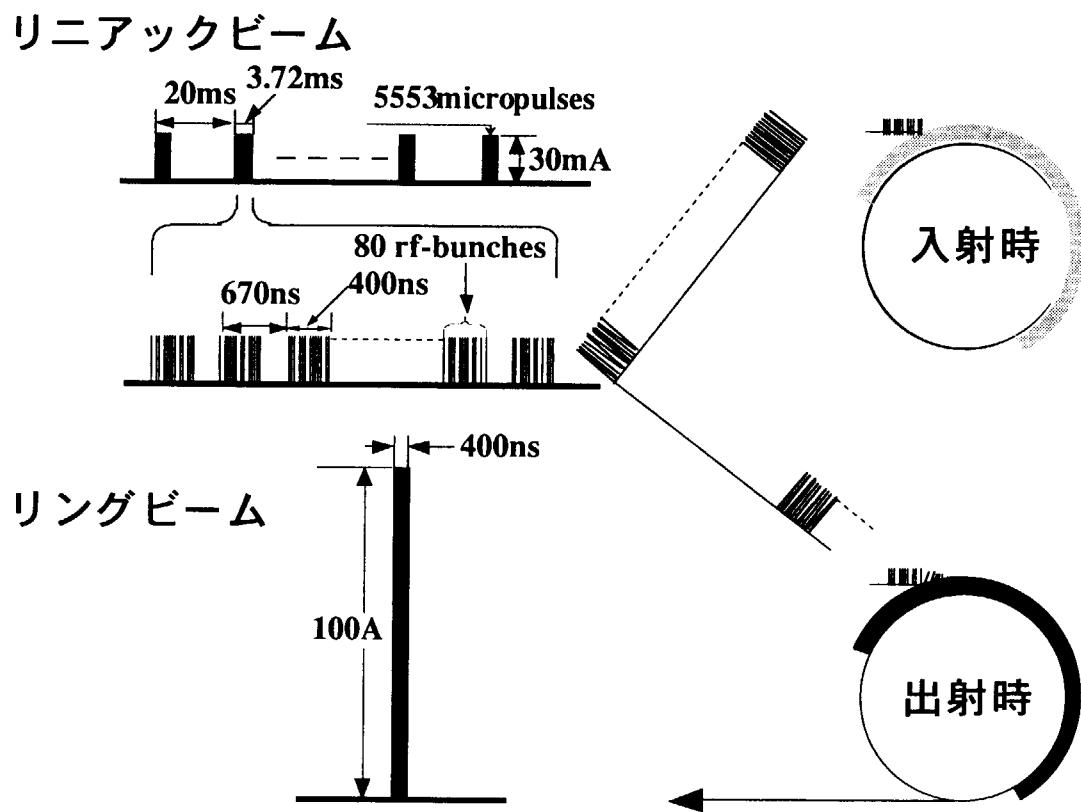


図 1-1 入射パルス構造ならびに短パルスビーム生成の概略

表 1-1 入射ビームパラメータ

	第1期	第2期
運動エネルギー	1.5GeV	
全エネルギー	2.44GeV	
運動量	2.25GeV/c	
$\beta$	0.923	
$\gamma$	2.599	
$B\beta$	7.51 Tm	
$\Delta p/p$	$\pm 0.4\%$	
$\epsilon_x$	2.0 $\pi$ .mm.mrad	
$\epsilon_y$	2.0 $\pi$ .mm.mrad	
ピーク電流値	16.7mA	30mA
パルス幅	2ms	3.7ms
繰り返し	50Hz	
パルス構造	400ns-ON, 270ns-OFF	
平均ビーム電流	1mA	3.33mA
粒子数	$1.25 \times 10^{14}$	$4.17 \times 10^{14}$
ビームパワー	1.5MW	5MW

## 2. 高周波空洞システム

### 2.1 高周波空洞システムの概要

本計画のリングではビームを加速しないが、蓄積したビームのバンチ構造を保ち、中性子科学研究に必要なビームを取り出すために高周波空洞が必要となる。この高周波空洞の制御は取り出し時のビームロスを低減する上でも重要となる。表 2.1-1 に高周波加速系に要求される基本性能を示す。

表 2.1-1 高周波系基本性能

運転周波数（基本波）	1.5MHz
ハーモニック数	1
繰り返し	50Hz
最大蓄積時間	4ms
蓄積ビーム電流（平均）	50A

このリングでは最大 50A に達する平均ビーム電流を安定に周回させねばならない。周回ビームの時間構造は、高周波の基本波 1 周期 670ns のうち 400ns を占める。理想的に密度が一様分布の場合、ビーム電流のピーク値は 80A、基本波成分は 40A である。このピーク値はビームの分布によって大きく変化し、パラボラ分布の場合、ビーム電流のピーク値は 120A、基本波成分は 65A にも達する。そのため、空間電荷効果によるビーム損失を抑制し、さらにビーム負荷効果による高周波加速系の不安定化を回避することが重要である。その上で高周波加速系に要求される性能を以下に示す。

- (1) 基本波 (1.5MHz) 以外に高調波の加速電圧を印加し、ビームの時間構造を平坦化してピーク電流値を下げる。
- (2) 周回ビームがみる高周波加速系のインピーダンスを下げ、ロビンソンの安定条件 (relative loading  $Y < 2$ ) を満足させる。

陽子リング用高周波空洞は電子用のものと大きく異なり、空洞内に磁性体コアを装荷する。これは電子リングの場合、粒子速度がほぼ高速に達しているため周回周波数が非常に高いのに対して、陽子リングの場合は数 Mhz であるため、磁性体コアを装荷しない状態では空洞長が非常に長くなってしまうためである。磁性体装荷型の空洞としては同調型高周波空洞と非同調型高周波空洞の 2 種類が考えられる。同調型高周波空洞とは  $Q$  値を高くすることによって基本波のみを効率よく給電できるタイプの空洞である。しかし、 $Q$  値が高いためビームの周回周波数の変化や周回電流の変化による共振周波数

の変化をバイアス電流で常に同調させる必要がある。そのため同調型高周波空腔と呼ばれる。今までの陽子リング加速器の主流はこの同調型高周波空腔で、コアにはフェライトが使用された。一方、非同調型高周波空腔は損失の大きなコアを装荷することによってQ値を下げ、広帯域にわたって高周波電力を給電できるようにした空腔である。この場合、ビームの周回周波数の変化や周回電流の変化による共振周波数の変化に合わせて空腔を同調させる必要がないため非同調型高周波空腔と呼ばれる。先に述べた高周波系への要求を満たす高周波システムについてこれら2種類の空腔システムを比較検討し、それぞれのメリット、デメリットを検討していく。

### 2.1.1 必要電圧の評価

#### 2.1.1.1 運動量拡がり $\Delta p/p$ のビームを捕獲するの必要な電圧 $V_0$

運動量の拡がり  $\Delta p/p$  のビームを捕獲するの必要な電圧  $V_0$  は、

$$eV = \frac{h\kappa^2 |\eta| \beta^2 E \pi^3 B^2}{8q} \left( \frac{\Delta p}{p} \right)^2 \quad (2.1-1)$$

で求められる。ここで  $h$  はハーモニック数、 $\kappa$  は dilution factor と呼ばれる因子で longitudinal phase space でビームの占める面積と高周波バケットの面積の比で表され、ここでは  $\kappa = 2$  とした。E は全エネルギー、q は荷電数を表す。ここで  $\eta$  はラティス依存のパラメータであるため確定できないが、概算のうえでは -0.1 とした。また、入射ビームの運動量の広がり  $(\Delta p/p)_{inj}$  は ±0.4% とした。

したがって、ビームを捕獲するの必要な電圧  $V_0$  は、

$$V_0 = 18.6 \quad [kV]$$

となる。

#### 2.1.1.2 空間電荷効果の電圧換算値 $V_{sc}$

空間電荷効果による加速電圧の打ち消し分  $V_{sc}$  は、ビームの進行方向分布形状をパラボリックで近似した場合、

$$V_{sc} = \frac{3eg_0 N}{4\epsilon_0 \gamma^2 R \Delta\phi^2} \quad (2.1-2)$$

で求められる。ここで $\Delta\phi_B$ はバンチ半幅を表し、ここでは入射ビームのバンチ構造が保存されるとして $400/670 \times \pi$  [rad]とする。 $g_0$ は $r_d/r_b=1.5$ とし、 $g_0=1.81$ とした。また、 $\epsilon_0$ は真空中での誘電率 $8.854 \times 10^{-12}$ [F/m]である。この場合、空間電荷効果の電圧換算値 $V_{sc}$ は

$$V_{sc} = 7.4 \quad [\text{kV}]$$

となる。

### 2.1.1.3 必要空洞電圧

必要な高周波電圧 $V_{rf}$ は空間電荷効果による加速電場の打ち消し分 $V_{sc}$ と運動量の拡がりをもつビームの捕獲に必要な電圧 $V_0$ の和となる。従って、2.1.1.1、2.1.1.2節の議論より必要な高周波電圧 $V_{rf}$ は

$$V_{rf} = V_{sc} + V_0 = 26 \quad [\text{kV}]$$

となる。空洞の設置可能な直線部は1セルあたり4.5m以上あるので空洞の単位長さあたりの発生電圧を10kV/mとすれば十分1セル内に設置可能である。

## 2.2 同調型高周波空洞システム

### 2.2.1 同調型高周波空洞

図2.2-1に同調型高周波空洞の構造を示す。高周波空洞の構造はギャップ間電圧の波形歪みの起こりにくい1/4波長半同軸共振器対向型とし、装荷する磁性体コアとして従来より使用されているフェライトを採用する。標準的な幅1インチのトロイダルコアの場合、外径は製造用プレスの寸法から500mmに、内径はビームダクトの寸法から250mmに制限される。1コアあたりの発生電圧を高めようとすると、コア内の高周波磁場強度が高くなるが、上記の制限からサイズで補うことは困難となる。したがって、高い高周波磁場に対しても安定でQ値が低下しにくいフェライトを選択する。

コアの本数は絶縁対策の容易さから24本とし、加速間隙に12kV ( $\pm 6$ kV)を印加する。周回ビーム電流50Aによるコアバイアスの効果が無視できないので、コアは4ブロックに分割スタックし8字型バイアス巻線を施す。これにより、加速間隙を中心とした2台の1/4波長半同軸共振器の共振周波数がずれるのを避ける。コアの冷却は各スタック毎に、水冷銅板によるサンドイッチ構造で達成する。

このリングでは周回ビームの加速を正味行わないので、電力増幅器から見

た周回ビームは容量性負荷となる。その無効電力を消去するには高周波空洞を誘導性負荷になるように離調しなければならない。しかし、離調量が大きくなりすぎると高周波空洞のインピーダンスが2倍高調波(3MHz)で無視できなくなり、周回ビームの2倍高調波電流が不要な2倍高調波電圧を加速間隙に誘起する。これを避けるためには高周波空洞のR/Q値を低くする必要があり、透磁率が低いフェライトを選択する。透磁率が低すぎると必要な離調量を実現するためのコアバイアス電流が大きくなるので、比透磁率が150程度の材質にする。

高周波空洞はA級動作四極真空管1台で、片側の1/4波長半同軸共振器を直接励振する。もう一方の1/4波長半同軸共振器は、結合用8字型巻線で磁気結合して励振する。図2.2-2にその並列共振等価回路を示す。Lはフェライトコアの全インダクタンス、Cは加速間隙の等価静電容量、Rはシャントインピーダンスで高周波空洞内での全損失を表す。フェライトコアの全インダクタンスLは、コアの外半径を $r_o$ 、内半径を $r_i$ 、幅をw、比透磁率を $\mu'$ 、装荷数をn、真空の透磁率を $\mu_0$ とすると

$$L = \frac{n\mu_0\mu'w}{2\pi} \ln \frac{r_o}{r_i} \quad (2.2-1)$$

で求められ13mHとなる。加速間隙の等価間隙容量をCとすると共振周波数 $f_r$ は

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.2-2)$$

である。バイアス電流を通電しない状態での共振周波数を1.2MHzに設定すると、必要な等価間隙容量Cは1350pFになる。等価間隙容量Cは

$$C = C_{gap} + \frac{C_{coax}}{2} + \frac{C_{tube}}{4} + C_{vac} \quad (2.2-3)$$

で表せる。 $C_{gap}$ は加速間隙部、 $C_{coax}$ は同軸構造部、 $C_{tube}$ は電力増幅器最終段、そして、 $C_{vac}$ は加速間隙部に取付ける真空コンデンサの静電容量である。ここで、 $C_{gap}$ 、 $C_{coax}$ はそれぞれ次のように求められる。

$$C_{gap} = \frac{\epsilon_0 \pi r_{duct}^2}{d_{gap}} + \frac{\epsilon_0 \epsilon_{cer} S_{cer}}{d_{gap}} \quad (2.2-4)$$

$$C_{coax} = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon' l_{cav}}{\ln(r_{cav}/r_{duct})} \quad (2.2-5)$$

$$\epsilon' = \frac{1}{1 - \ln(r_o/r_i)/\ln(r_{cav}/r_{duct})} \quad (2.2-6)$$

ここで、 $r_{cav}$  は空洞外導体半径、 $r_{duct}$  は空洞内導体半径、 $l_{cav}$  は空洞長、 $d_{gap}$  は間隙長、 $\epsilon_{cer}$  は間隙部セラミックの比誘電率 ( $\sim 10$ ) 、 $S_{cer}$  はそのセラミックの断面積を表す。 $C_{gap}$  は45pF、 $C_{coax}$  は42pF、 $C_{tube}$  は60pFであるので、真空コンデンサの容量 $C_{vac}$  は1270pFとする。バイアス電流を1000Aまで通電すれば、フェライトの比透磁率は40程度まで下がる。したがって、共振周波数は1.2~2.3MHzで可変である。

図2.2-2の等価回路では周回ビーム電流を定電流源 $I_b$ として表しているが、周回ビーム電流は電力増幅器から実効的に静電容量 $C_b$ として見える。静電容量 $C_b$ は周回ビーム電流の基本波成分 $I_b$ と

$$C_b = \frac{I_b}{2\pi f V_{gap}} \quad (2.2-7)$$

の関係にある。ここで、 $f$ 、 $V_{gap}$  はそれぞれ加速間隙に印加する高周波電圧の周波数と振幅である。 $f = 1.5\text{MHz}$ 、 $V_{gap} = 12\text{kV}$ 、 $I_b = 65\text{A}$ とすると、 $C_b = 575\text{pF}$ である。したがって、周回ビーム電流の増加に従い高周波空洞の共振周波数 $f_r$ は、同調制御ループの作用で1.5MHzから1.8MHzまで上昇する。 $V_{gap} = 6\text{kV}$ の場合でも $f_r$ の上昇は2.1MHzまでであり、電力増幅器を含めた加速系の全Q値が5に低下しても、インピーダンスは2倍高調波(3.0MHz)までは及ばない。

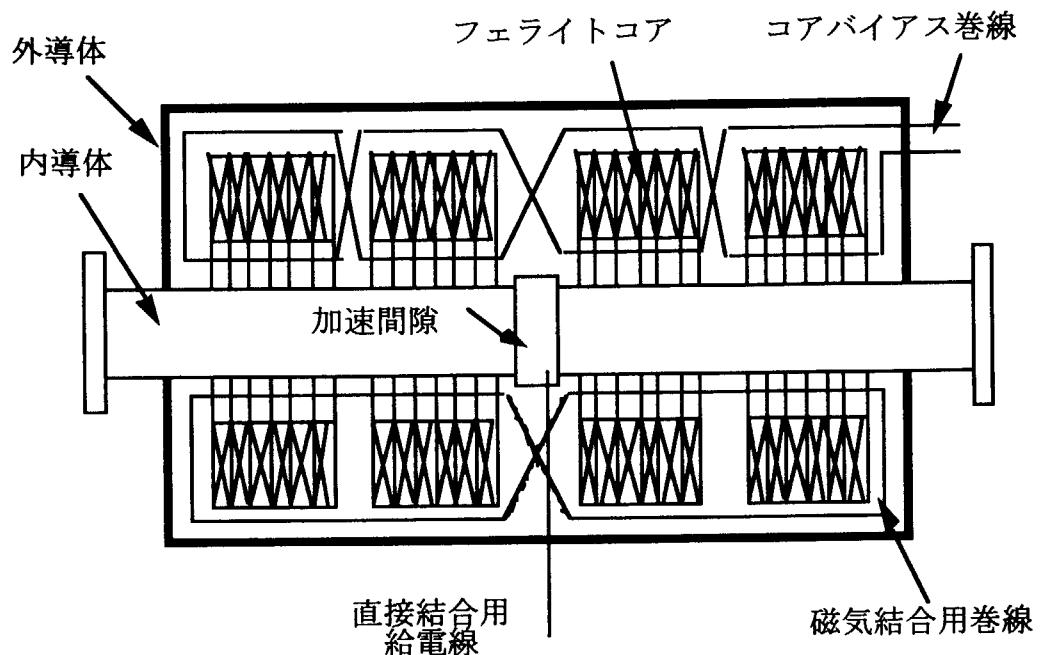


図 2.2-1 同調型高周波空洞の構造

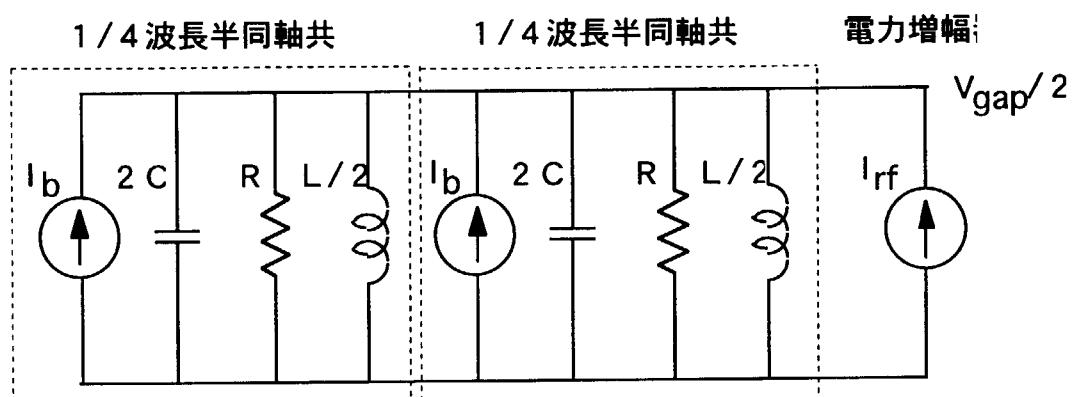


図2.2-2 同調型高周波空洞の並列共振等価回路

## 2.2.2 高周波増幅器

図2.2-3に電力増幅器の構成を示し、表2.2-1にその仕様を纏める。電力増幅器の最終段にはプレート許容損失100kW級の四極真空管を1台採用する。直流遮断用のコンデンサを通し、片側の1/4波長半同軸共振器の内導体をプレート出力で直接励振する。プレート直流電源はチョークコイル100mHを通して四極真空管に接続する。電力増幅器から高周波空腔側を見たインダクタンスは3.3mHであり、チョークコイルが高周波空腔の共振特性に与える影響は無視できる。

高周波空腔のシャントインピーダンスRは最大励振時 $1.2\text{k}\Omega$ （フェライトコア1本当たり $50\Omega$ ）である。したがって、加速間隙電圧12kVを発生するためには1/4波長半同軸共振器1台当たり10A、すなわち四極真空管のプレート高周波電流は20A必要である。四極真空管をA級動作させ、プレート直流電流30Aが流れるようにグリッドバイアス電圧を設定する。EIMAC社製4CW100,000Eの場合、スクリーン電圧を2kVに設定すると必要なグリッドバイアス電圧は-200Vとなる。また、プレート高周波電流20Aを流すために必要なグリッド入力高周波電圧は120Vである。グリッドの高周波入力をインピーダンス整合のために $50\Omega$ で終端した場合、必要な高周波電力は150Wである。したがって、四極真空管の駆動段は小型の固体増幅器（トランジスタ増幅器）で実現できる。

最後にプレート許容損失について検討する。グリッド入力高周波電圧に対するプレート出力高周波電圧の直線性を確保するには、プレート直流電圧は15kV程度必要である。その場合プレート直流電流30Aを定常的に流し続けると、プレート損失は最大450kWにも達してしまう。そこで、グリッドバイアス電圧をシンクロトロンの運転周期に合わせてプログラミング制御し、ビーム蓄積時間外はプレート電流を遮断する。これによりduty factorが1/5に低減できるので、プレート損失は最大90kWに収まる。以上は四極真空管をA級動作させる最も厳しい場合である。実際は加速系の全Q値が5以上に確保できるのでAB級で動作させても波形歪みの問題はなく、その場合プレート損失はさらに軽減できる。

表2.2-1 同調型高周波空腔用高周波電力増幅器の設計仕様

駆動段増幅器	トランジスタ電力増幅器 150W
最終段増幅器	四極真空管電力増幅器 (4CW100,000E)
給電・動作方式	A級 (ただし、duty factor 1/5 で通電)
プレート直流電圧	15 kV
プレート直流電流	30 A
プレート高周波電圧	6 kV
プレート高周波電流	20 A
プレート損失	90 kW
グリッド直流電圧	-200 V
グリッド高周波電圧	120 V
スクリーン直流電圧	2 kV

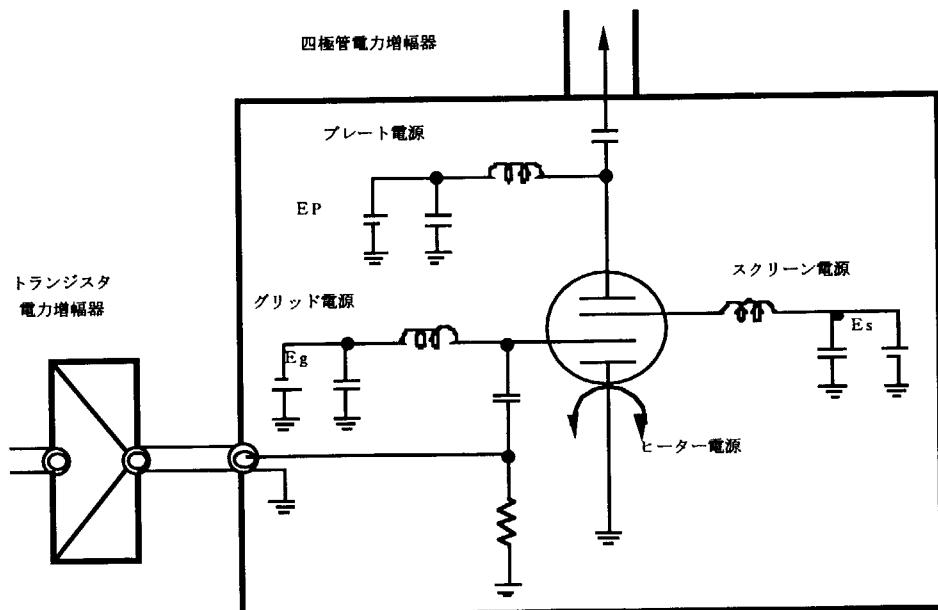


図2.2-3 同調型高周波空腔用高周波電力増幅装置の構成

### 2.2.3 制御系

高周波制御系の役割は、高周波空洞の間隙に印加する高周波電圧の周波数・位相・振幅を調整することである。本陽子蓄積リングは周回ビームの加速を正味行わないので周波数は一定である。ただし、線形加速器からの入射ビームのマクロパルスを1バンチとしてリング内に捕獲するため、高周波電圧の周波数は線形加速器の低エネルギー系に設置されるビームチョッパーの駆動周波数と一致し、しかも一定の位相差を維持しなければならない。さらに、入出射用のパルス動作機器とのタイミング制御も必要になる。これらのタイミングのずれはリング内でのバンチ長の増大につながり、最悪の場合、e-p不安定性を引き起こし定格ビームパワーまで蓄積できなくなったり、ビーム取り出し時のロスにつながる。

同調型高周波空洞を用いた場合の高周波制御系の構成を図2.2-4に示す。高周波制御系は以下の5つのフィードバック系で構成する。

#### (1) 空洞電圧フィードバック ( A V C ループ )

運動量分散と空間電荷力による周回ビームのデバンチを防ぐため、加速間隙に高周波電圧を印加する。 A V C ループ は高周波電圧の振幅が設定値を維持するように、高周波空洞に供給する高周波電力を制御する。

#### (2) 空洞位相フィードバック ( 空洞位相ロックループ )

リング周長にわたり複数の高周波空洞を設置するので、それぞれの高周波電圧の位相を基準位相に対して予め設定する必要がある。空洞位相ロックループは高周波空洞毎に、高周波電圧の位相がその設定位相を維持するよう制御する。

#### (3) 空洞共振周波数フィードバック ( 空洞同調ループ )

電力增幅器から高周波空洞側をみたインピーダンスが抵抗性になるように、空洞の共振周波数を制御する。そのためには、加速間隙電圧と四極真空管のグリッド入力電圧の位相差が  $0^\circ$  を保持するように、バイアス電流値を制御してフェライトコアの透磁率を変化させる。容量性負荷である周回ビーム電流の増加とともに、高周波空洞のインピーダンスを誘導性に離調することになる。

#### (4) ビーム位相フィードバック ( D F ループ )

周回ビームのバンチが位相振動すると、運動量分散が大きくな

りビーム損失につながる。DF ループは加速間隙電圧とビーム電流の位相差を検出し、その振動を抑制するように高周波基準信号を位相変調する。

### (5) R F フィードバック

高周波空洞に装荷するフェライトコアのインピーダンスと採用する100kW級四極真空管の出力インピーダンスでは、relative loading  $Y > 6$  となりビーム負荷効果に対するロビンソンの安定条件を満足しない。そこで、R F フィードバックにより1.5MHz付近の空洞インピーダンスを実効的に1/10程度に低減する。すなわち、加速間隙電圧の分圧信号を高周波制御系に戻し、加速間隙電圧を打ち消す位相で高周波基準信号に加算する。

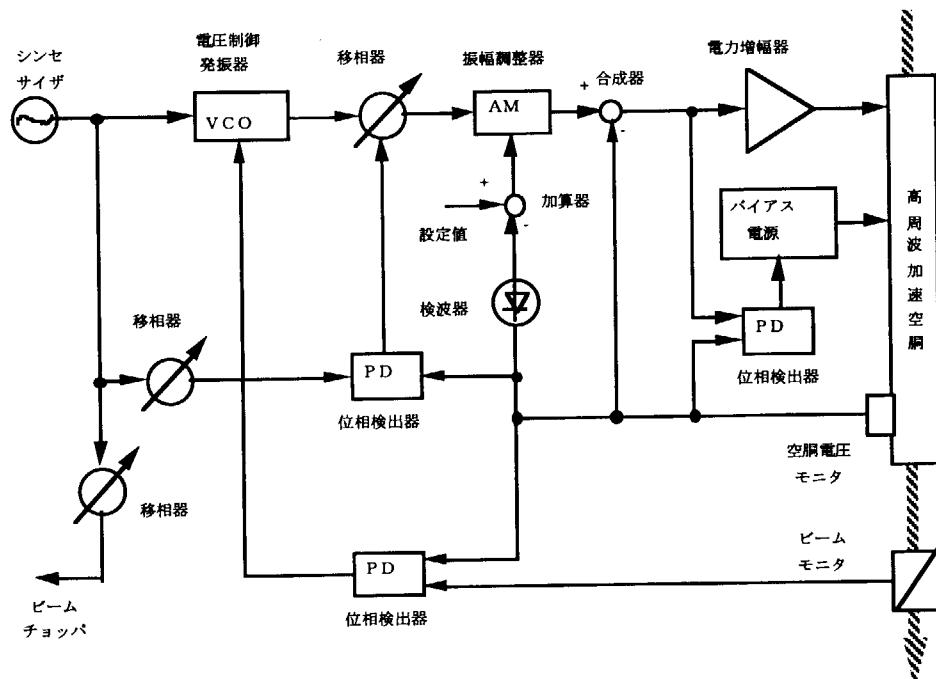


図 2.2-4 同調型高周波空洞用高周波制御系の構成

## 2.3 非同調型高周波空洞システム

非同調型高周波空洞のQ値は低く、広帯域にインピーダンスを有している。したがって、基本波以外にも3～4倍高調波まで1台の高周波空洞で発生させることができ、非常に高い空洞電圧が必要でない場合は、空洞システムを非常にシンプルなものできる。

### 2.3.1 非同調型高周波空洞

図2.3-1に高周波空洞の構造を示す。高周波空洞の構造は加速間隙電圧の波形歪みの起こりにくい1/4波長半同軸共振器対向型とし、装荷する磁性体コアとして鉄基アモルファス系の磁性合金を採用する。日立金属製ファインメットは鉄基アモルファスを再結晶化した微細結晶軟磁性合金で、高複素透磁率、高飽和磁束密度、高キュリー温度特性を有し、非同調型高周波空洞の装荷磁性体として優れている。ファインメットコアは表面に絶縁層を施した幅1インチのテープ状のファインメットリボンを、適当な張力で巻心に巻き付けながらトロイダル形状に成型する。したがって、フェライトコアとは違い外径が1m程度の大型コアを製造することもできる。以下、装荷磁性体としてファインメットを選択した場合について検討する。

加速勾配10kV/m以上を実現するため、コアは8本装荷し加速間隙に8kV(±4kV)を印加する。コア1本当たり1kVの電圧を発生する必要があるが、ファインメットは高飽和磁束密度、高キュリー温度特性のため問題は生じない。

高周波空洞へはA B級動作の四極真空管を2台用いpush-pull方式で給電する。ただし、それぞれ1ターンループを用いた磁気結合方式で高周波空洞を励振する。図2.3-2にその並列共振等価回路を示す。Lはファインメットコアの全インダクタンス、Cは加速間隙の等価静電容量、Rはシャントインピーダンスで高周波空洞内での全損失を表す。ファインメットコアの複素透磁率、寸法と装荷数から、ファインメットコアの特性を直列回路として表現したときの全インダクタンス $L_s$ と全抵抗 $R_s$ が次式で与えられる。

$$2\pi f L_s = nKf\mu_0\mu'w \ln \frac{r_o}{r_i} \quad (2.3-1)$$

$$R_s = nKf\mu_0\mu''w \ln \frac{r_o}{r_i} \quad (2.3-2)$$

ここで、コアの外半径を $r_o$ 、内半径を $r_i$ 、幅をw、複素比透磁率を( $\mu'$ ,  $\mu''$ )、占積率をK、装荷数をn、真空の透磁率を $\mu_0$ で表した。そこで、並

列回路に変換すると次式のごとく、高周波空洞の並列共振等価回路のL、Rが得られる。

$$2\pi f L = \frac{R_s^2 + (2\pi f L_s)^2}{2\pi f L_s} \quad (2.3-3)$$

$$R = \frac{R_s^2 + (2\pi f L_s)^2}{R_s} \quad (2.3-4)$$

一方、加速間隙の等価静電容量Cは

$$C = C_{gap} + \frac{C_{coax}}{2} + 2C_{tube} \quad (2.3-5)$$

で表せる。 $C_{gap}$  は加速間隙部、 $C_{coax}$  は同軸構造部、 $C_{tube}$  は電力増幅器最終段の静電容量である。ここで、 $C_{gap}$ 、 $C_{coax}$  はそれぞれ、以下のごとく概算する。

$$C_{gap} = \frac{\epsilon_0 \pi r_{duct}^2}{d_{gap}} + \frac{\epsilon_0 \epsilon_{cer} S_{cer}}{d_{gap}} \quad (2.3-6)$$

$$C_{coax} = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_{cer} \epsilon' l_{cav}}{\ln(r_{cav}/r_{duct})} \quad (2.3-7)$$

$$\epsilon' = \frac{1}{1 - \ln(r_o/r_i)/\ln(r_{cav}/r_{duct})} \quad (2.3-8)$$

ここで、 $r_{cav}$  は空洞外導体半径、 $r_{duct}$  は空洞内導体半径、 $l_{cav}$  は空洞長、 $d_{gap}$  は間隙長、 $\epsilon_{cer}$  は間隙部セラミックの比誘電率 ( $\sim 10$ )、 $S_{cer}$  はそのセラミックの断面積を表す。

これらの式を用いて、一例として外径780mm、内径420mmのファインメットコアを用いて試算すると、周波数1.5MHzにおける複素比透磁率は(1300, 2600)、コアの占積率を0.6として、 $L = 95\text{mH}$ 、 $R = 450\text{W}$ 、 $C_{gap} = 45\text{pF}$ 、 $C_{coax} = 45\text{pF}$ 、 $C_{tube} = 80\text{pF}$ となる。したがって等価静電容量Cは228pFとなり共振周波数は1.08MHzに位置する。以上は周回ビーム電流が0Aの場合であるが、周回ビーム電流が50Aまで増加すると、高周波空洞の共振周波数は3MHz近くまで変化する。

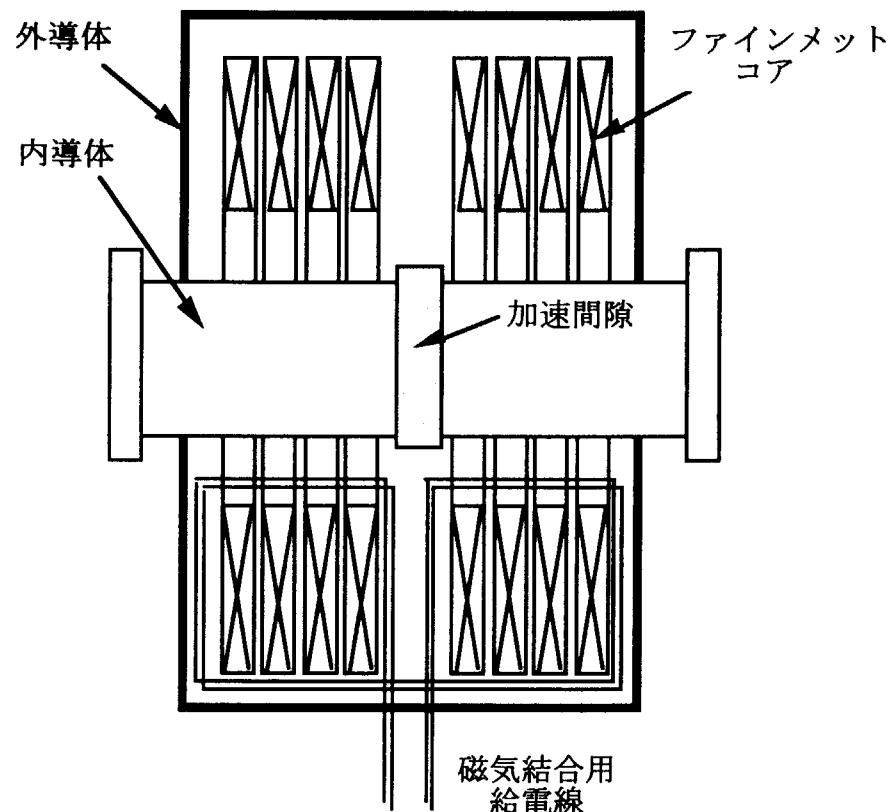


図2.3-1 非同調型高周波空洞の構造

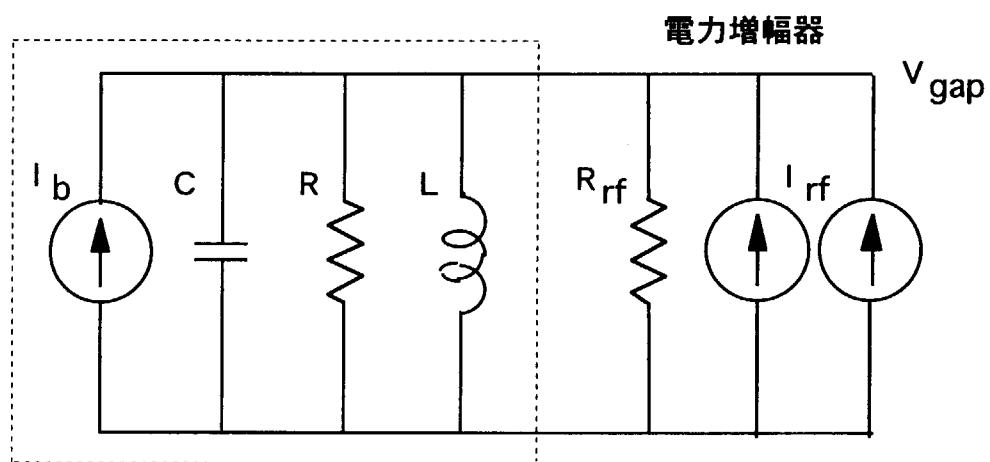


図2.3-2 非同調型高周波空洞の並列共振等価回路

### 2.3.2 電力増幅器

図2.3-3に電力増幅器の構成を示し、表2.3-1にその仕様を示す。電力増幅器の最終段にはプレート許容損失300kW級の四極真空管（例えば、EIMAC 社製4CM300,000G）を2台採用する。四極真空管の動作はAB級に設定し push-pull 方式で高周波空洞へ給電する。ただし、高周波空洞の励振には1ターンループを用いた磁気結合方式を採用する。これは、電力増幅器から高周波空洞側を見たインダクタンスが100mH近くあり、高周波空洞の共振特性への影響が無視できる1mH以上のチョークコイルの製作が困難であるからである。

高周波空洞のシャントインピーダンスは周回ビーム電流が50Aに達すると  $150\Omega$  （ファインメットコア 1 本当たり  $19\Omega$ ）まで低下するので、加速間隙電圧8kVを発生するためには有効電流として53A供給する必要がある。また、周回ビーム電流の基本波成分65Aを無効電流として補償する必要がある。したがって、四極真空管のプレート高周波電流（基本波成分）は84A必要になる。四極真空管の動作をA B 級に設定するため、プレート直流電流10A程度が流れるようにグリッドバイアス電圧を設定する。EIMAC 社製 4CM300,000Gの場合、プレート直流電圧を10kV、スクリーン電圧を2kVに設定すると、必要なグリッドバイアス電圧は $-450V$ となる。プレート高周波電流84Aを流すために必要なグリッド入力高周波電圧は300Vである。グリッドの高周波入力をインピーダンス整合のために50Wで終端した場合、必要な高周波電力は900Wである。以上は基本波成分の供給のみを考慮したが、高調波成分も考慮に入れてプレート高周波電流のピーク値が150Aに達する場合を考える。その場合でも、グリッド入力高周波電圧のピーク値は400Vであり、必要な高周波電力は2kW以下で済む。したがって、四極真空管の駆動段は固体増幅器（トランジスタ増幅器）で実現できる。終端抵抗50Wに必要な除熱能力は高周波空洞の運転の duty factor 1 / 5 を考慮すると400W以下なので、これも問題にはならないと考える。

最後にプレート許容損失について検討する。グリッド入力高周波電圧に対するプレート出力高周波電圧の直線性を確保するには、プレート直流電圧は10kV以上必要である。しかしながら、高周波空洞励振用の1ターンループにはプレート直流電圧が重畠するため、絶縁対策の容易さからプレート直流電圧は10kVにとどめた。そこで、プレート直流電流10Aを定常的に流し続け、ピーク値が150Aの高周波電流を高周波空洞の運転の duty factor 1 / 5 で通電する場合を考える。その場合でもプレート損失は最大200kWであり、4CM300,000Gのプレート許容損失以内に十分おさまる。

表2.3-1 非同調型高周波空洞用高周波電力増幅器の設計仕様

駆動段増幅器	トランジスタ電力増幅器 2 kW × 2
最終段増幅器	四極真空管電力増幅器 (4CM300,000G) × 2
給電・動作方式	A B 級プッシュプル
プレート直流電圧	10 kV
プレート直流電流	10 A
プレート高周波電圧	8 kV
プレート高周波電流	150 A
プレート損失	200 kW
グリッド直流電圧	-450 V
グリッド高周波電圧	400 V
スクリーン直流電圧	2 kV

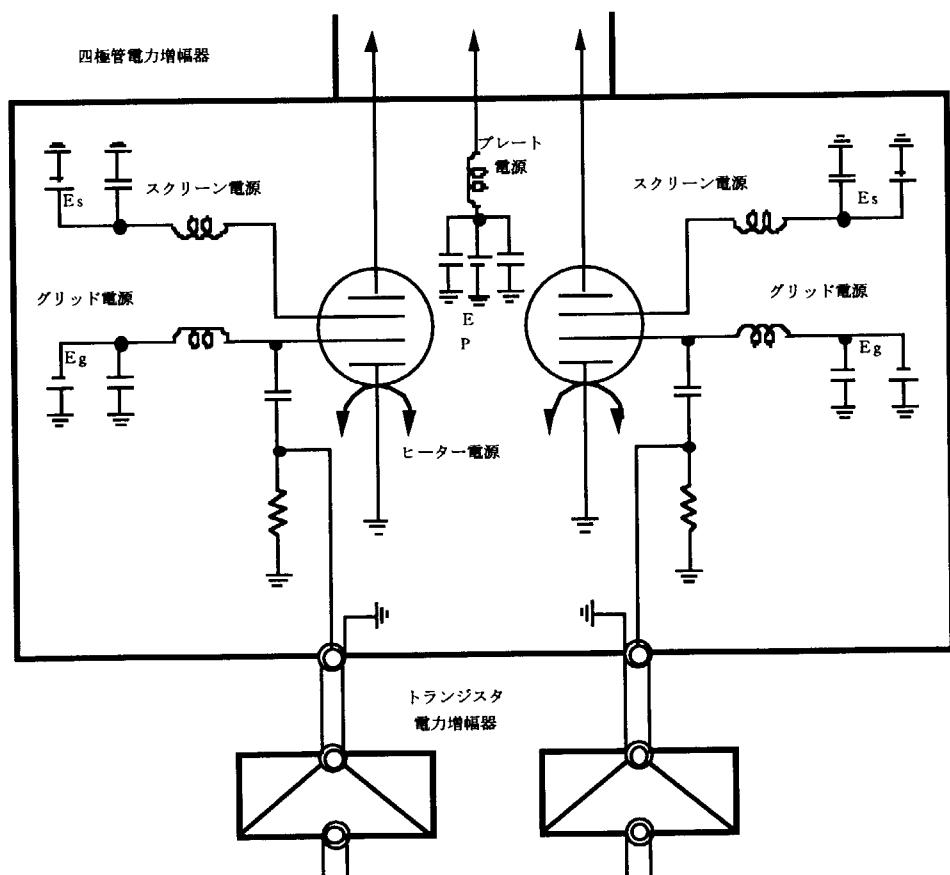


図 2.3-3 非同調型高周波空腔用高周波電力増幅装置の構成

### 2.3.3 制御系

非同調型高周波空腔を用いた場合の高周波制御系の構成を図2.3-4に示す。かなりの部分が同調型の場合と共通するので異なる部分のみを説明する。まず、高周波空腔の共振周波数の制御が不要なので、空腔同調ループが存在しない。また、高周波空腔に装荷するファインメットコアのインピーダンスと採用する300kW級四極真空管の出力インピーダンスが十分低く relative loading  $Y \sim 1$  が実現できるので、R F フィードバックは必ずしも必要ではない。一方、高周波空腔の高周波電圧として基本波成分以外に高調波成分を印加する場合は、A V C ループをそれら高調波成分に対しても設け振幅制御を行う。周回ビーム電流が加速間隙に誘起する高調波電圧が大きいと外部から高調波成分の振幅・位相を制御できない。そこで、ビームモニタで検出した周回ビーム電流の高調波成分を高周波制御系に入力し、周回ビーム電流が加速間隙に誘起する高調波電圧を打ち消す位相で高調波基準信号に加算する。なお、基本波成分に対して同様なことを行えば、同調型の制御系で述べたR F フィードバックと同様な効果がある。

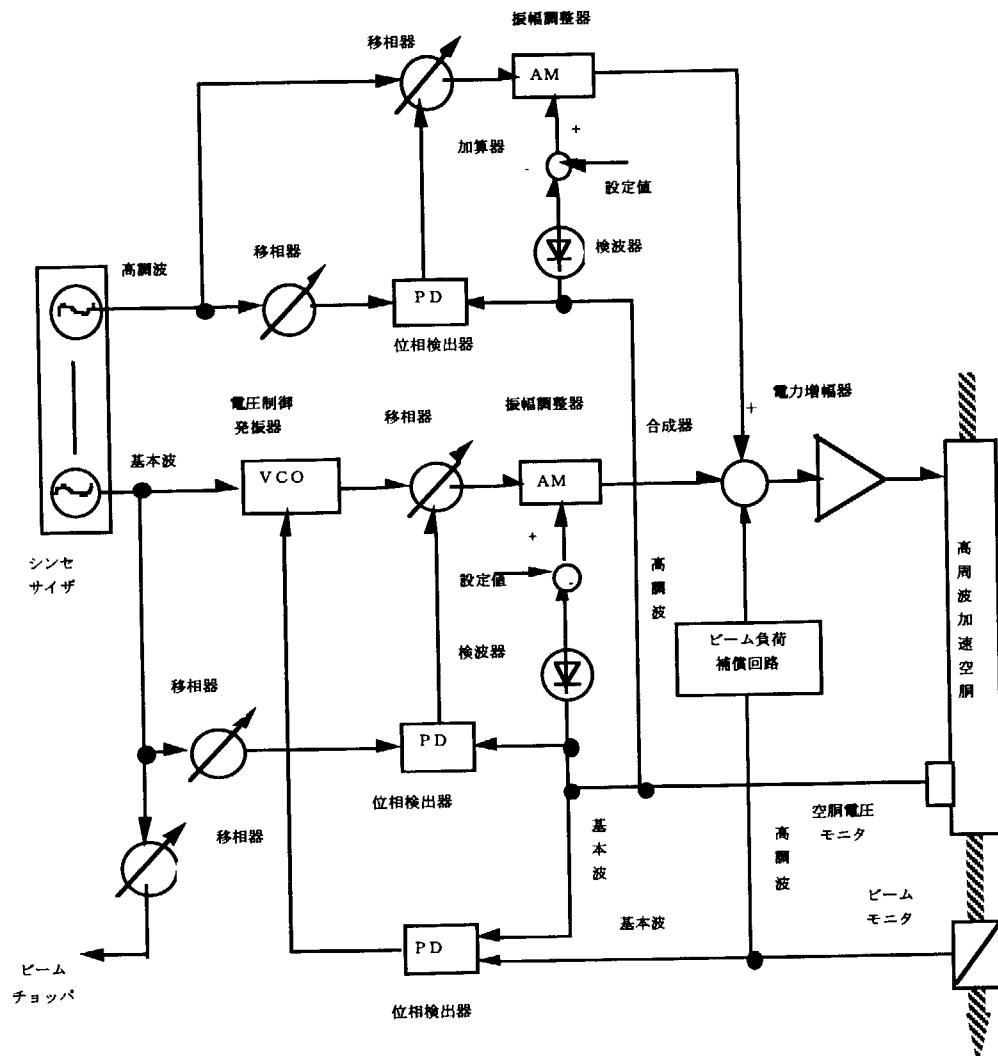


図 2.3-4 非同調型高周波空洞用高周波制御系の構成

## 2.4 高周波加速系の比較検討

同調型高周波空洞を用いた高周波加速系と非同調型高周波空洞を用いた高周波加速系の比較を以下に列挙する。

- (1) 非同調型ではコアバイアス電源が不要になるが、周回ビーム電流を無効電流として補償しなければならぬので大電力の高周波電力増幅器が必要になる。一方同調型では3kHz程度の周波数応答を有するコアバイアス電源の開発が必要となる。
- (2) 非同調型では高周波空洞の共振周波数制御が不要であるが、周回ビームが加速間隙に誘起する高調波電圧を消去するビーム負荷補償が必要となる。
- (3) 同調型でフェライトコアを用いる場合、ビームダクトの内径は200mm以下（ただしICF203法兰ジを使用すると150mm以下）に制限される。そのため高い高周波磁束密度でもQ値が高く安定に保持できるフェライトコアの開発が必要となる。一方、非同調型でファインメットコアを用いる場合、事実上の制限はない。
- (4) 非同調型でファインメットコアを用いる場合のほうが、実現できる加速勾配が大きい。

以上の比較検討より、本蓄積リングの場合、大電力の電力増幅器が必要かつビームの高調波成分が誘起する高調波電圧の負荷補償が必要であるというデメリットはあるものの、コアバイアス、共振周波数制御が不要で磁性体コアの寸法制限がない非同調型高周波空洞が適していると考えられる。以下3章では非同調型高周波空洞を用いた場合についてビームシミュレーションを行う。

### 3. 縦方向シミュレーション

#### 3.1 縦方向シミュレーションの概要

高周波空洞のギャップ間に電場をたてると、高周波バケット呼ばれる安定領域が形成される。粒子はこの安定領域内でシンクロトロン振動と呼ばれる振動運動を行う。ここでは2章で高周波空洞の概念設計を行った際のパラメータを用いてこのシンクロトロン振動のシミュレーションを行う。さらにこのシミュレーション結果を基に、空洞パラメータの最適化を行うことを目指す。

#### 3.2 縦方向シミュレーションコード

##### 3.2.1 運動方程式

縦方向のビームの運動は次の連立微分方程式で表される。

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\Delta E}{\Omega_s} \right) = \frac{qeV_f}{2\pi} (\sin \phi - \sin \phi_s) \quad (3.2-1)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{h\eta\Omega_s}{PR} \left( \frac{\Delta E}{\Omega_s} \right) \quad (3.2-2)$$

$\Delta E$  : 任意の粒子と同期粒子とのエネルギーのずれ(eV)

$\phi$  : 高周波に対する任意の粒子の位相 (rad.)

$\Omega$  : 同期粒子の角速度 (1/sec)

$$\eta : \eta = \frac{1}{\gamma_r^2} - \frac{1}{\gamma^2} \quad q : \text{荷電数}$$

ここで添字  $s$  のつくパラメーターは同期粒子のパラメーターであることを意味する。これはシンクロトロン振動と呼ばれる単純な振動方程式である。この運動の様子を図 3.2-1 に示す。ここでは一般的な場合を考え、同期位相が 0 でない場合の運動の様子である。上段に示すような高周波電圧を空洞に印可するとそのポテンシャル内の粒子はその中で振動運動を行いながら安定に捕獲される。この様子を図 3.2-1 下段のように位相空間で表示するとその運動は一般的に RF バケットと呼ばれる安定領域内を回転運動している様に表すことができる。またこの安定領域外の粒子はこの安定領域に沿った運動を行いながら発散していく。これらの粒子は最終的には真空ダクトとに衝突し、ビームロスとなる。

式 (3.2-1) (3.2-2) では式が煩雑になるため  $\Delta P$  の代わりに  $\Delta E$  を用いて表記した。 $\Delta E$  と  $\Delta P$  の関係は次式で表される。

$$\Delta E = \beta^2 E \frac{\Delta P}{P} \quad (3.2-3)$$

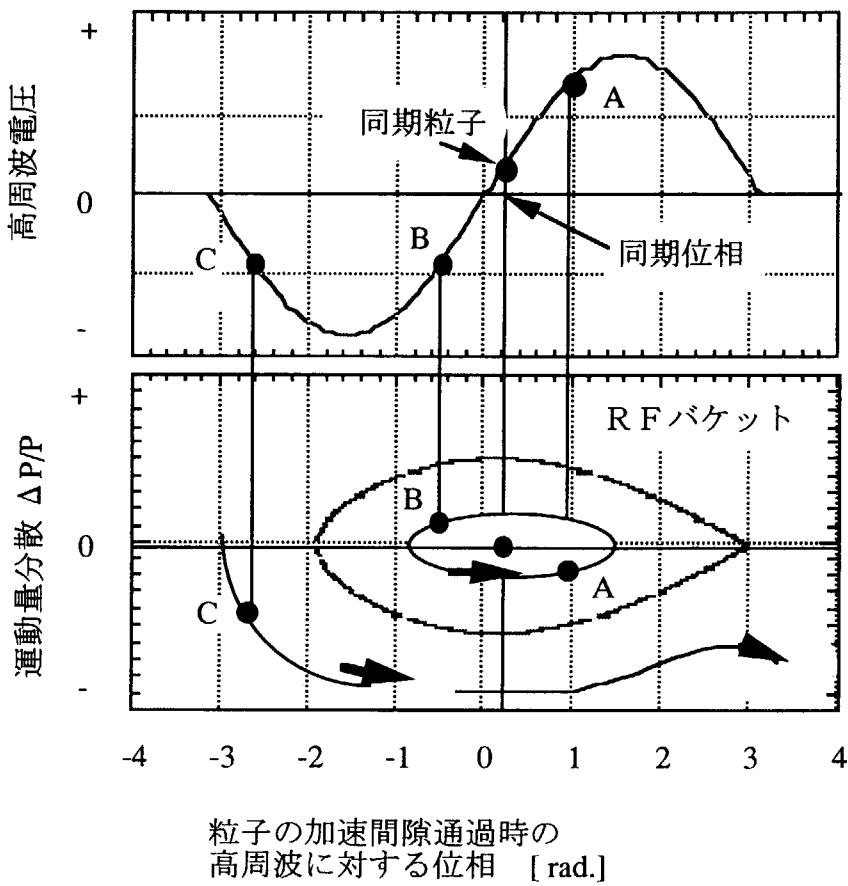


図 3.2-1 RF バケットと高周波電圧の関係

以上、一般的なシンクロトロン振動について簡単に説明した。しかし後述するように大きな空間電荷力下や大ビームローディング下ではその運動は大きく異なる。特にバリアバケットを用いた空洞システムではバケット内のビームに高周波空洞による力が及ばないため、空間電荷力やビームローディングの影響を受けやすい。

本研究では位相方向の粒子分布形状に依存する空間電荷効果の時間変化を厳密に評価するため、式 (3.2-1)、(3.2-2) を式 (3.2-4)、(3.2-5) に示す差分形式に置き換え各ターン毎に粒子分布形状を求める。この手法により任意のターン数での空間電荷効果によるビーム発散力を評価することができる。

$$\Delta E_{i,n} = \Delta E_{i,n-1} + qeV_n (\sin \phi_{i,n} - \sin \phi_{s,n}) \quad (3.2-4)$$

$$\Delta \phi_{i,n} = \Delta \phi_{i,n-1} + \frac{2\pi}{\Omega_s} \frac{h\eta}{PR} \Delta E_{i,n} \quad (3.2-5)$$

n : ターン数 i : 粒子番号

### 3.2.2 空間電荷効果

空間電荷効果は高周波電圧  $V_{rf}$  を打ち消し、実効的なRFパケットを縮小させる。これによって図3.2-2に示すように空間電荷力によって高周波電場による収束力が低下し、バンチが伸びることになる。

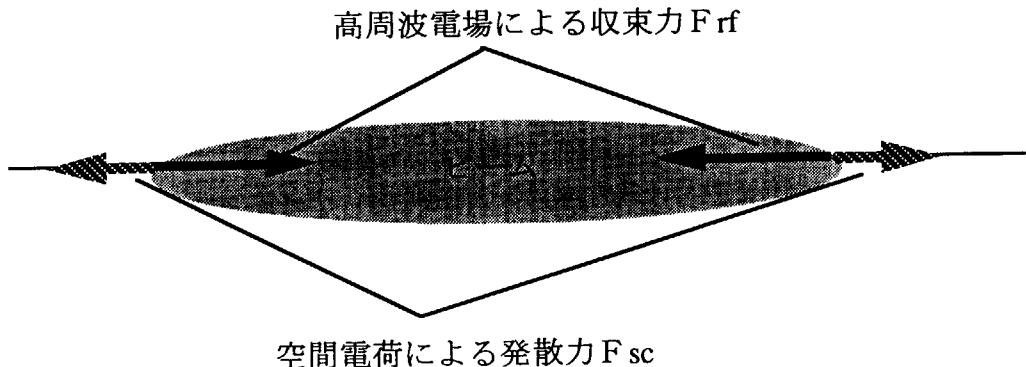


図3.2-2 高周波電場による収束力と空間電荷効果による発散力の関係

縦方向の空間電荷力は図3.2-3の様なモデルを想定し、微少範囲内で Maxwell方程式

$$\int \vec{E} d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \int \vec{B} d\vec{\sigma}$$

を解くことによって求められる[3]。ここでダクトのインダクタンスが非常に小さく、ほぼ完全導体と見なせる場合、縦方向の空間電荷力は次式で表される。

$$V_{sc} = \frac{eg_0}{2\epsilon_0 \gamma^2 R} \frac{\partial \lambda(\phi)}{\partial \phi} \quad (3.2-6)$$

$$\varepsilon_0 : \text{真空の誘電率} \quad g_0 = 1 + 2 \ln \left( \frac{r_d}{r_b} \right)$$

$$r_b : \text{ビーム半径} \quad r_d : \text{真空ダクト半径}$$

$$\lambda(\phi) : \text{粒子線密度}$$

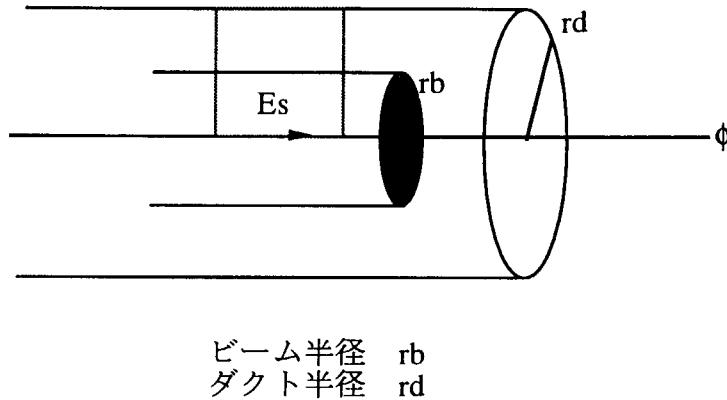


図 3.2-3 空間電荷効果の計算モデル

この効果を運動方程式に組み込むと式 (3.2-4) は式 (3.2-7) に示す形となる。

$$\Delta E_{i,n} = \Delta E_{i,n-1} + qe \left\{ V_{rf,n} (\sin \phi_{i,n} - \sin \phi_{s,n}) + V_{sci,n} \right\} \quad (3.2-7)$$

ここで重要なのは粒子の縦 (位相) 方向分布  $\lambda(\phi)$  の評価方法である。上式より分かるように縦方向の空間電荷力はリング内での粒子線密度  $\lambda(s)$  によって時々刻々変化する。粒子が RF バケット全体に広がっている場合、図 3.2-4(a) のように粒子の位相方向分布  $\lambda(\phi)$  をそのバケット形状で近似することが可能である。また、バンチ (集群) が強い場合、図 3.2-4(b) のようにパラボリック分布で近似するのが一般的である。本研究では 1 ターン毎に粒子の位相方向分布を式 (3.2-8) のフーリエ級数として求め、過渡的な粒子分布変化を考慮している。また、式 (3.2-8) の形で粒子分布を表すことにより、式 (3.2-6) の微分項を容易に求めることができる。図 3.2-5 にパラボリック分布近似の場合とシミュレーションから得られた空間電荷力の比較を示した。

$$\lambda(\phi) = a_0 + \sum_{j=1}^k (a_j \cos(j\phi) + b_j \sin(j\phi)) \quad (3.2-8)$$

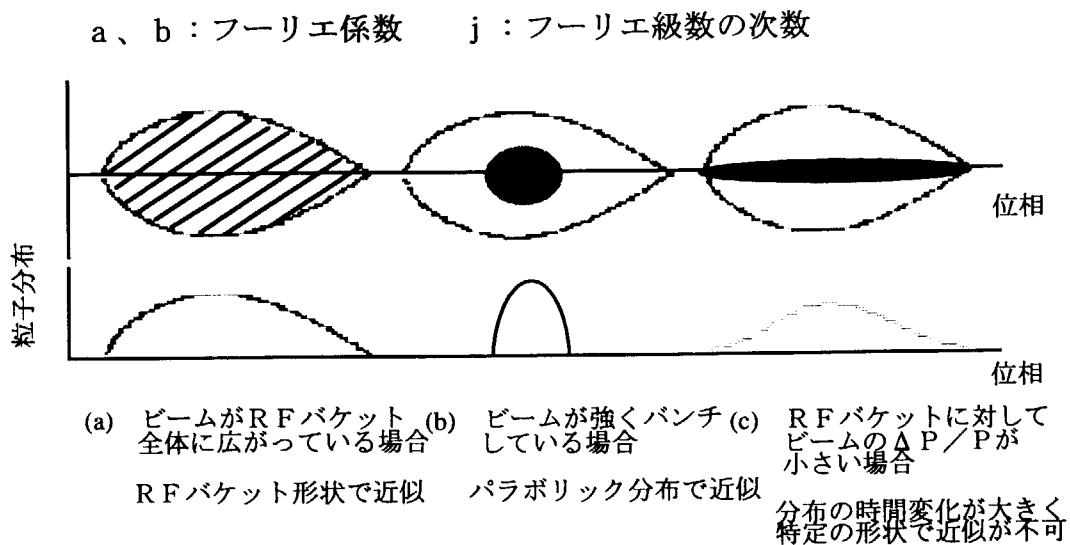


図 3.2-4 RF バケットとビームとの関係によるビーム形状の近似例

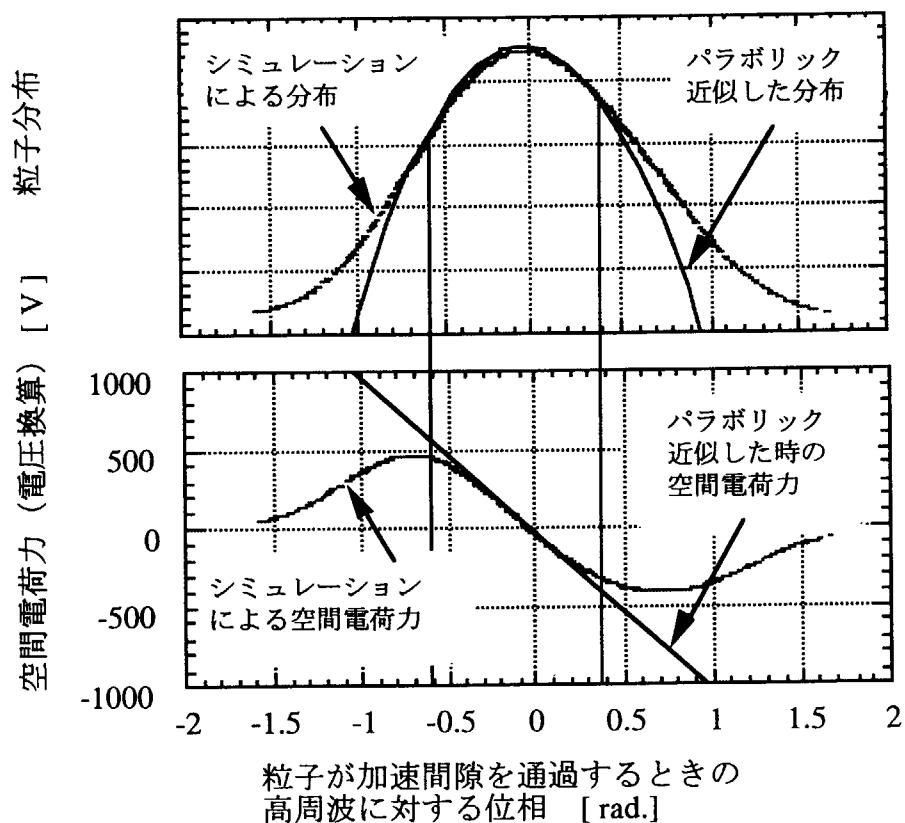


図 3.2-5 シミュレーションによる粒子分布と  
パラボリック分布近似による空間電荷力の比較  
上段：位相方向粒子分布 / 下段：空間電荷力（電圧換算値）

### 3.2.3 ビームローディング

#### 3.2.3.1 Impedance

空洞のインピーダンスは周波数依存性がある。図 3.2-6 に示す R C L 並列共振回路により高周波空洞を模擬した場合、そのインピーダンスは

$$\alpha_n = \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(n\omega C - \frac{1}{n\omega L}\right)^2} \quad (3.2-9)$$

$$Z_n = \frac{1}{\alpha_n} \quad (3.2-10)$$

と表すことができる。ビームの周回電流によって誘起される電圧を

$$V(n\omega) = a_n \sin(n\omega t - \varphi_n) + b_n \cos(n\omega t - \varphi_n) \quad (3.2-11)$$

$$I(n\omega) = a_n \alpha_n \sin(n\omega t) + b_n \alpha_n \cos(n\omega t) \quad (3.2-12)$$

とフーリエ展開できるので上記のインピーダンスによって誘起される電圧は

$$V(n\omega) = a_n \sin(n\omega t - \varphi_n) + b_n \cos(n\omega t - \varphi_n) \quad (3.2-13)$$

と表すことができる。ただしここで  $\varphi_n$  は

$$\varphi_n = \tan^{-1} \left( R \left( n\omega C - \frac{1}{n\omega L} \right) \right) \quad (3.2-14)$$

である。

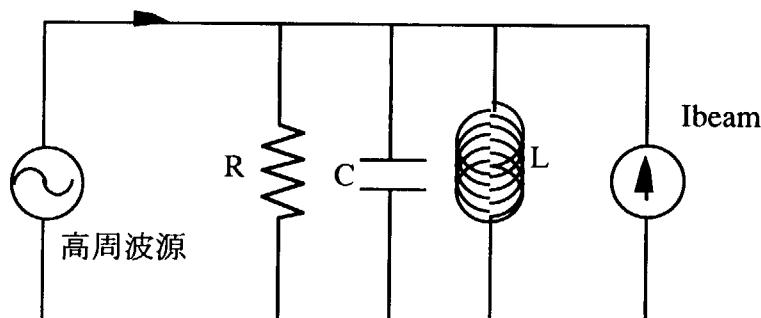


図 3.2-6 空洞等価回路

### 3.3 ビームシミュレーション

#### 3.3.1 基本波空洞システム

基本波空洞のみで構成された高周波システムの場合、その運動方程式は次式で表される。

$$\Delta E_{i,n} = \Delta E_{i,n-1} + qe \left[ V_n (\sin \phi_{i,n} - \sin \phi_{s,n}) + V_{sc} + V_{bl} \right] \quad (3.3-1)$$

$$\Delta \phi_{i,n} = \Delta \phi_{i,n-1} + \frac{2\pi}{\Omega_s} \frac{h\eta}{PR} \Delta E_{i,n} \quad (3.3-2)$$

この場合のシミュレーション結果を図 3.3-1 に示す。この結果は各ターン毎に 0.4% の広がりを持つビームがバケット中央に入射されるとし、2800 ターンまで入射を繰り返したのち、2 台目のリングの入射が終了するまでリングに蓄積したときのものである。ビームローディングによって誘起される電圧は基本波と 2 倍高調波の組み合わせで補正してある。図 3.3-1 に示すように基本波空洞のみで構成される空洞システムによって形成されるバケットはバケット中央が膨らんだ形状となる。そのバケット内に捕獲されたビーム自体もバケット中央部で運動量分散が大きくなり、縦方向の粒子分布もパラボリック分布に近い形となる。シミュレーションより運動量分散は入射時の 0.4% から 0.8% 程度まで拡がり、ピーク電流値は 125A 越えることが分かった。誘起されるビームローディング電圧も 50kV を越えている。

This is a blank page.

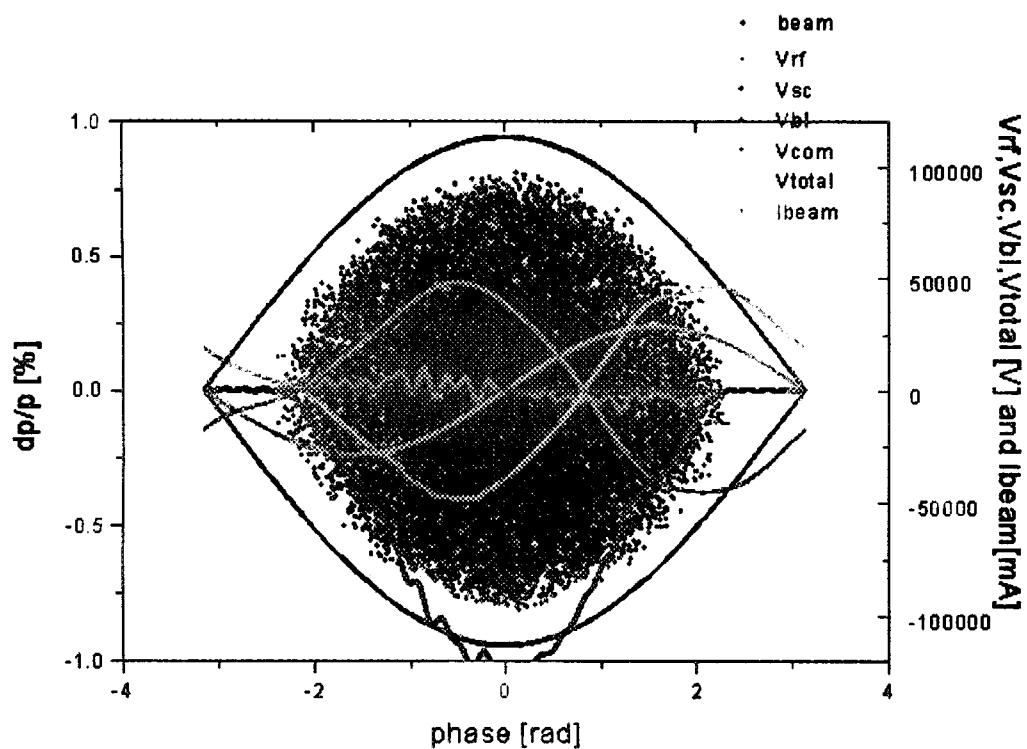


図 3.3-1 縦方向位相空間図

水色：高周波電圧  
 赤色：補正用高周波電圧  
 青色：空間電荷力  
 紫色：ビームローディング電圧  
 緑色：ビーム分布（ビーム電流）

This is a blank page.

### 3.3.2 高調波空腔システム

#### 3.3.2.1 高調波空腔システムの概要

基本波と高調波の組み合わせで構成した高周波システムの場合、その電圧比によって高周波波形、ポテンシャルの形状が変化する。高調波を入れる目的はポテンシャルの底を平坦にし、ビームの縦方向分布の一様化を図るとともにバケットの面積を保った状態でポテンシャルの深さを浅くし、運動量分散方向への広がりを抑えることがある。一番簡単な例として基本波と2倍高調波を利用した場合を考える。この場合、電圧比は

$$\begin{aligned} V_{rf} &= \{V_1 \sin(\phi) + V_2 \sin(2\phi)\} \\ V_2 &= -0.5V_1 \end{aligned}$$

の様にとればよく、このときの電圧波形ならびにポテンシャルは図 3.3-2、3.3-3 に示すようになる。また粒子の運動方程式は

$$\Delta E_{i,n} = \Delta E_{i,n-1} + qe \left[ \sum_{j=1}^2 V_n \{\sin(j\phi_{i,n}) - \sin\phi_{s,n}\} + V_{sc} + V_{bl} \right] \quad (3.3-3)$$

$$\Delta\phi_{i,n} = \Delta\phi_{i,n-1} + \frac{2\pi}{\Omega_s} \frac{h\eta}{PR} \Delta E_{i,n} \quad (3.3-4)$$

と表すことができる。

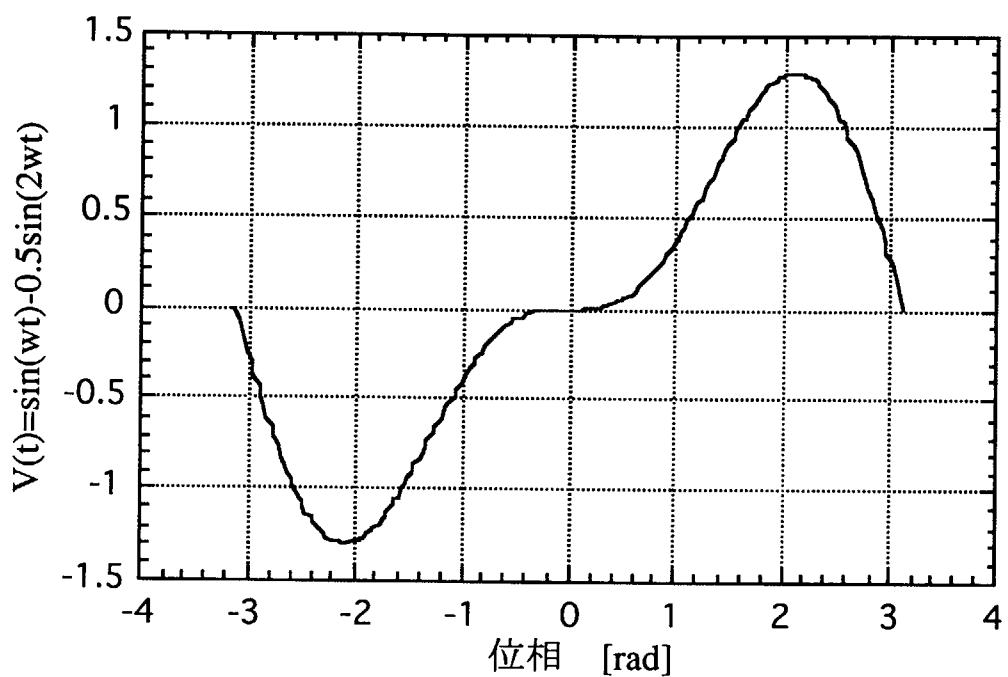


図 3.3-2 電圧波形

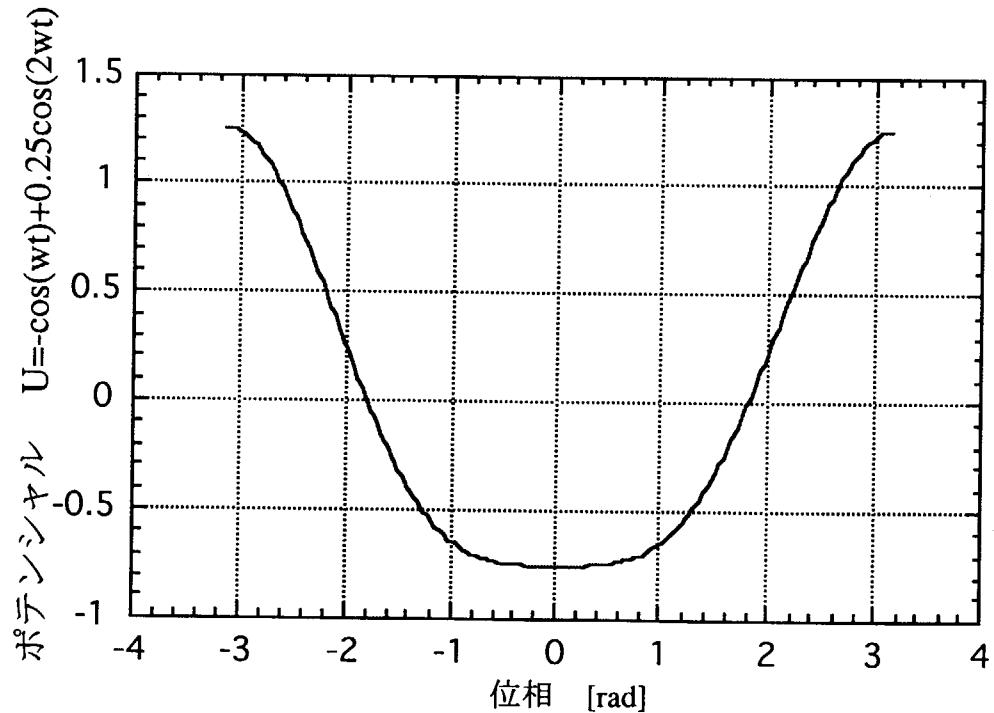


図 3.3-3 ポテンシャル

### 3.3.2.2 バリアバケット

次にさらに高調波を加えた場合を考える。運動方程式は2倍高調波を用いた場合と同様に

$$\Delta E_{i,n} = \Delta E_{i,n-1} + qe \left[ \sum_{j=1}^J V_n \{ \sin(j\phi_{i,n}) - \sin \phi_{s,n} \} + V_{sc} + V_{bl} \right] \quad (3.3-5)$$

$$\Delta \phi_{i,n} = \Delta \phi_{i,n-1} + \frac{2\pi}{\Omega_s} \frac{h\eta}{PR} \Delta E_{i,n} \quad (3.3-6)$$

と記述できる。ここで何倍の高調波までを利用するか（Jをいくらにするか）という問題が生じるが、ビーム取り出し用キッカー電磁石の立ち上げに要する200nsのビームのない空間を確保するため、ここでは3倍高調波（J=3）までとした。これを決めるに当たってはJ=4の場合の200nsのビームのない空間を確保するためには高い空洞電圧が必要であること、運動量分散の増大・ピーク電流値の抑制の面でJ=3の場合とJ=4の場合とでは劇的な変化がないことをシミュレーションで確認した。

3倍高調波までを利用した場合、各電圧比は

$$V_1 : V_2 : V_3 = 1 : 1 : 0.4$$

とした。このときの電圧波形、およびポテンシャルを図3.3-4, 3.3-5に示す。実際のシミュレーションではピーク電圧30kVとした。

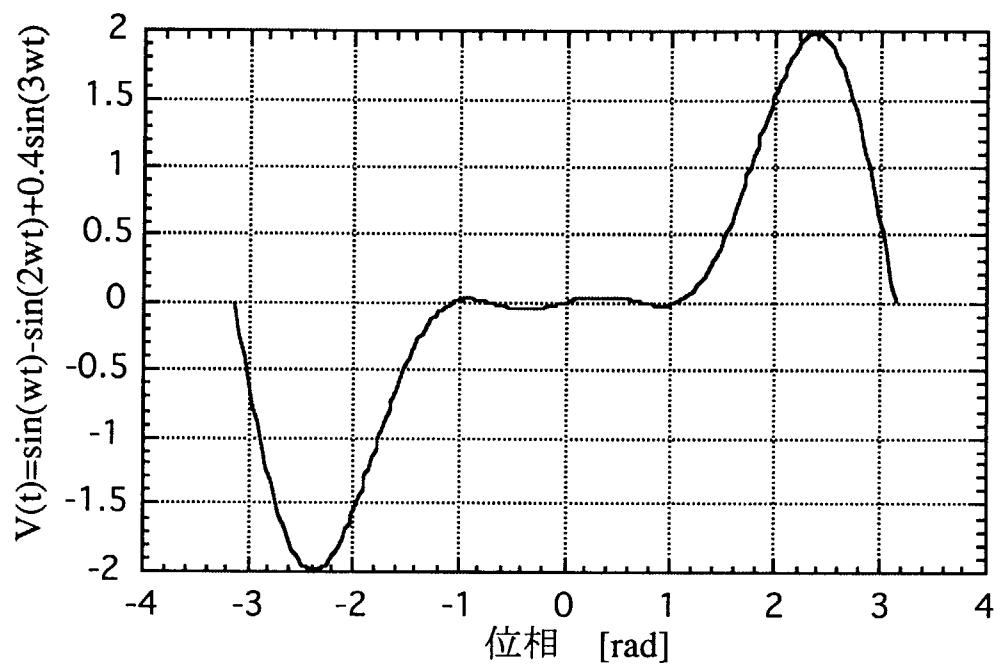


図 3.3-4 電圧波形

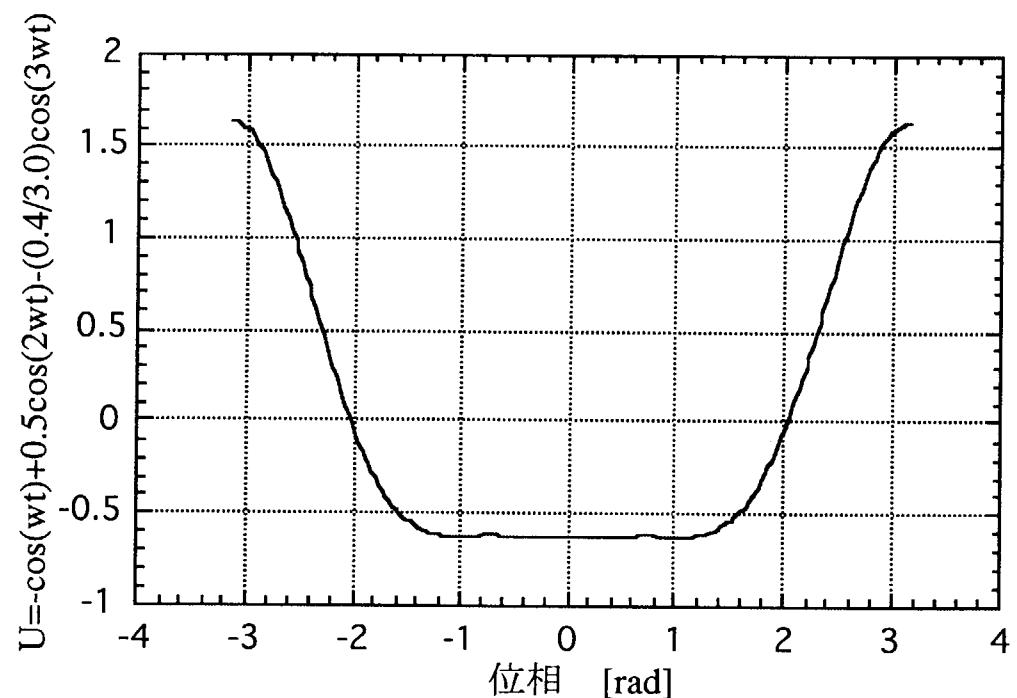


図 3.3-5 ポテンシャル

まず、図 3.3-6、3.3-7 は空間電荷効果ならびにビームローディングの補正を行わなかった場合にビームがどのようになるかを示すものである。図 3.3-6 は入射開始後 2ms での位相空間図である。この段階ですでにバンチ構造は崩れしており、取り出し時にかなりのビームロスと取り出し用機器（特にセプタム電磁石の放射化が起こることが分かる。また、蓄積段階においても e-p 不安定性が生じるものと思われる。図 3.3-7 はさらに 2ms の間ビームを蓄積した後の位相空間図である。運動量の広がりはマイナス方向で 2%以上となっており、ベンディング部（ディスペーションの高い領域）でのビームサイズは設計値の 2 倍程度になり、リング内に設置したコリメータの負荷が非常に大きくなるものと思われる。これらの結果は最悪の場合であるが、2.5MW の大強度蓄積リングを考える上で空間電荷効果ならびにビームローディングの補正とそれに耐えうる空洞システムの構築が非常に重要なことが分かる。

This is a blank page.

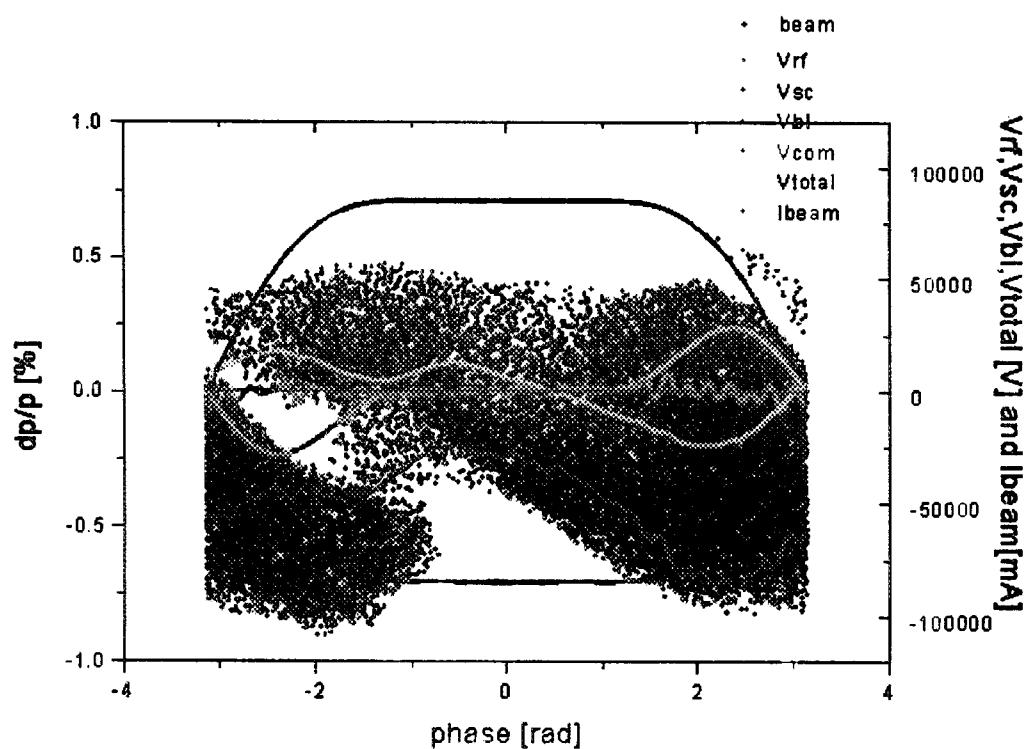


図 3.3-6 縦方向位相空間図（ビームローディング補正なし, 2ms 後）

水色：高周波電圧  
 青色：空間電荷力  
 紫色：ビームローディング電圧  
 緑色：ビーム分布（ビーム電流）

This is a blank page.

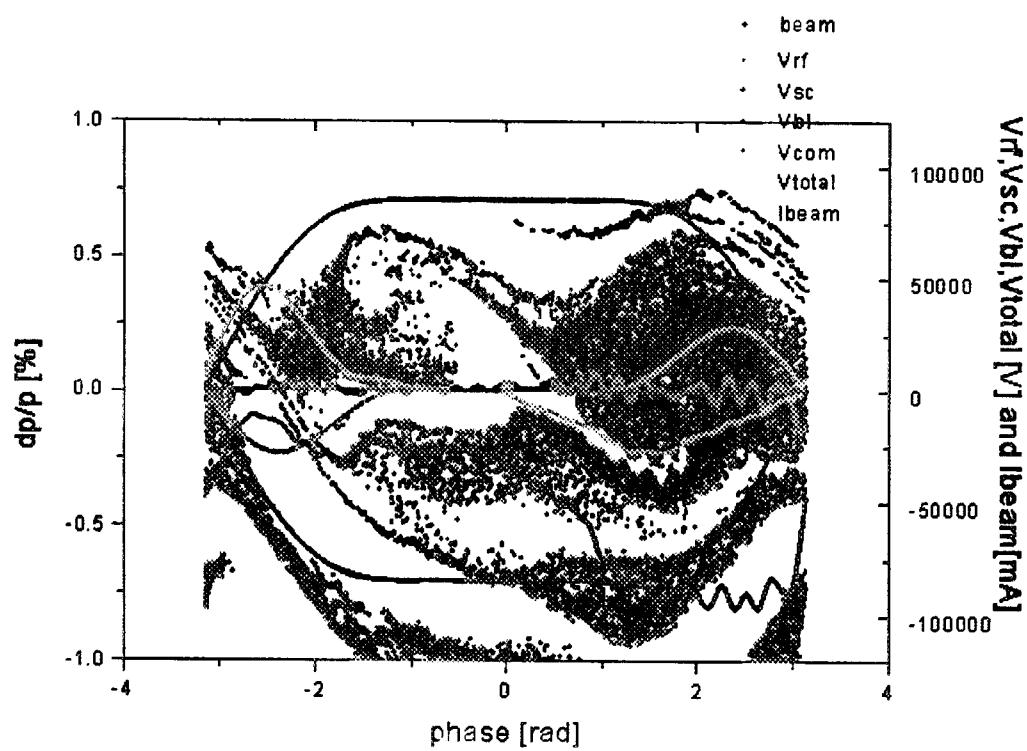


図 3.3-7 縦方向位相空間図（ビームローディング補正なし, 4ms 後）

水色：高周波電圧

青色：空間電荷力

紫色：ビームローディング電圧

緑色：ビーム分布（ビーム電流）

This is a blank page.

次に空洞システムに要求される仕様を決定するため、共振周波数、Q値を変化させた場合にビーム分布、誘起電圧等がどのように変化するかについて調べた結果を示す。

まず、図 3.3-8～3.3-10 に共振周波数を変化させた場合の縦方向シミュレーションの結果を示す。いずれの場合も各ターン毎に 0.4% の広がりを持つビームがバケット中央に入射されるとし、2800 ターンまで入射を繰り返したのち、2 台目のリングの入射が終了するまでリングに蓄積したときのものである。図 3.3-8 は共振周波数を 1.5Mhz にとった場合である。この場合、ビームの基本波成分の寄与が大きく空洞に誘起される誘起電圧波形も基本波に近い形となっている。しかし、周回電流の基本波成分が大きいため、誘起電圧のピークは 50kV に達している。図 3.3-9 は共振周波数を 3.0Mhz にとった場合で、ビームの 2 倍高調波成分の寄与が大きくなっている。誘起電圧のピークは若干下がり 48kV 程度となっている。図 3.3-10 は共振周波数を 4.5Mhz にとった場合である。この場合はビームの 3 倍高調波成分の寄与が大きくなり、誘起電圧のピークは 46kV に達している。いずれの場合もビームの分布自体には大きな違いはみられなかった。図 3.3-11 にはビーム分布をフーリエ級数展開したときの各成分の強度を示した。

This is a blank page.

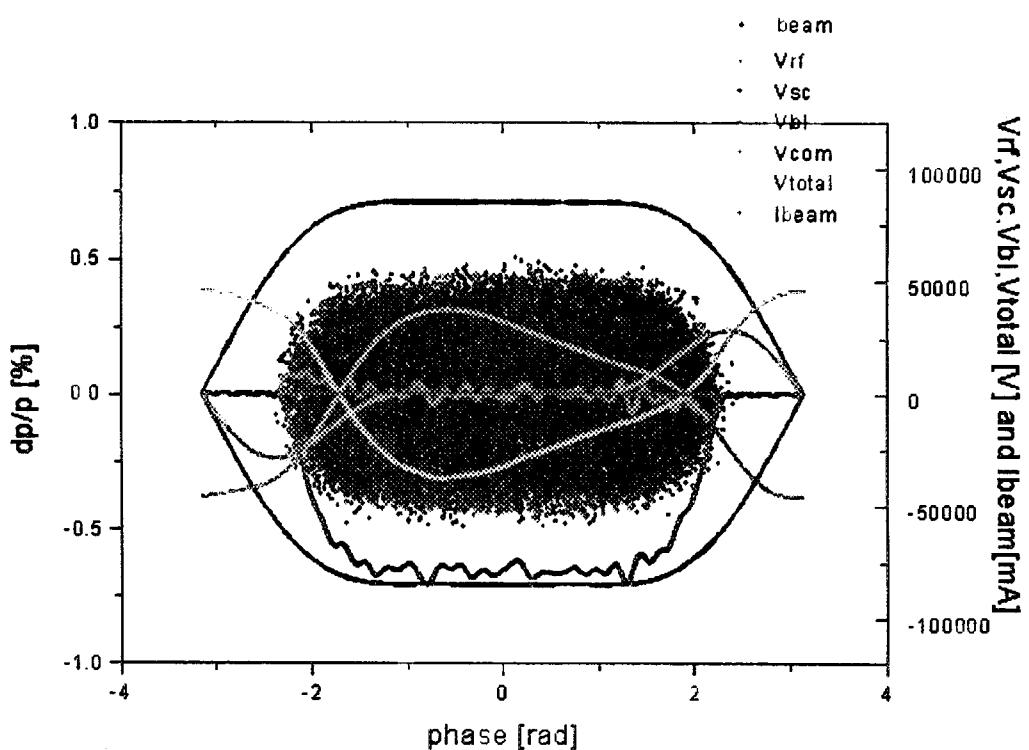


図 3.3-8 縦方向位相空間図（共振周波数：1.5 Mhz）

水色：高周波電圧  
 赤色：補正用高周波電圧  
 青色：空間電荷力  
 紫色：ビームローディング電圧  
 緑色：ビーム分布（ビーム電流）

This is a blank page.

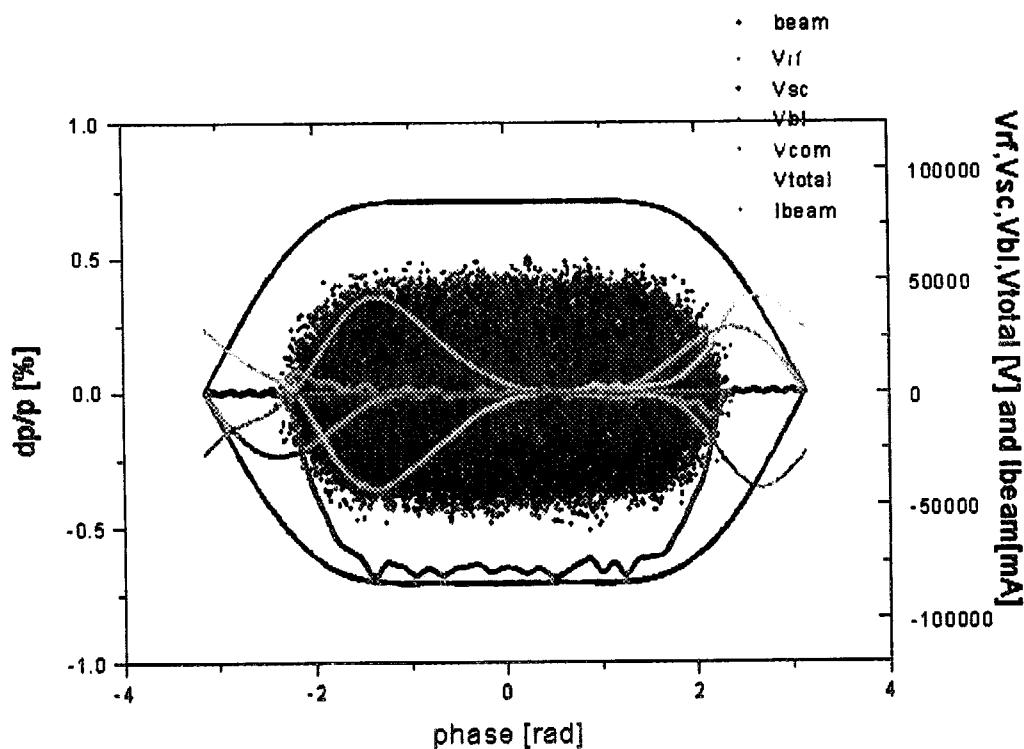


図 3.3-9 縦方向位相空間図（共振周波数：3.0 Mhz）

- 水色：高周波電圧
- 赤色：補正用高周波電圧
- 青色：空間電荷力
- 紫色：ビームローディング電圧
- 緑色：ビーム分布（ビーム電流）

This is a blank page.

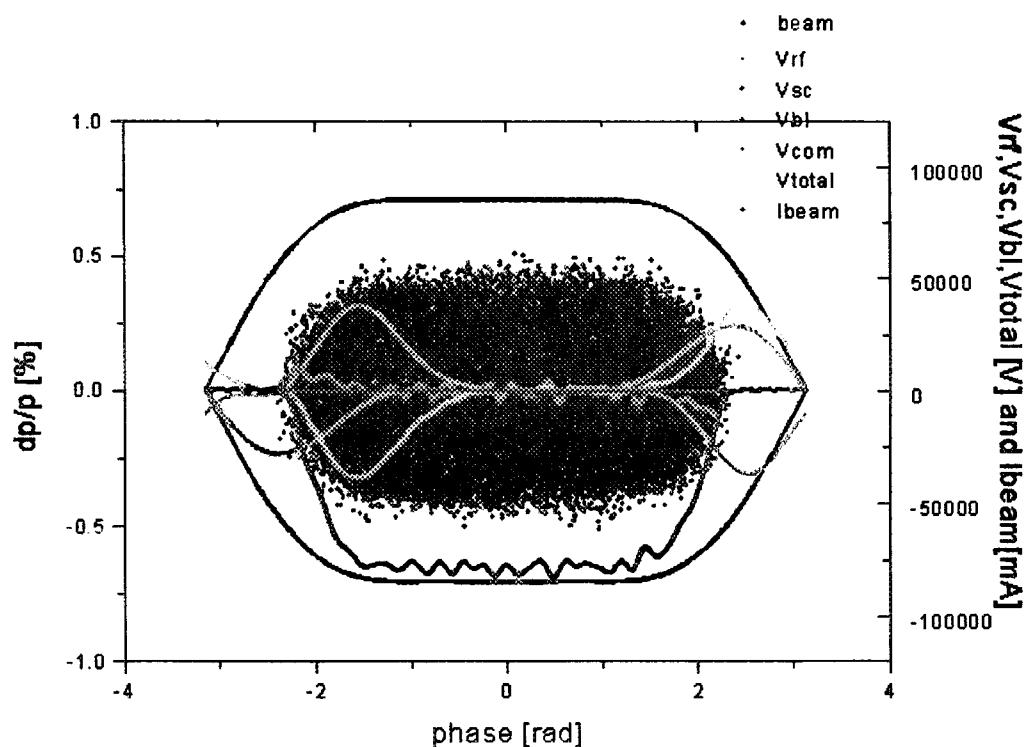


図 3.3-10 縦方向位相空間図（共振周波数：4.5 Mhz）

- 水色：高周波電圧
- 赤色：補正用高周波電圧
- 青色：空間電荷力
- 紫色：ビームローディング電圧
- 緑色：ビーム分布（ビーム電流）

This is a blank page.

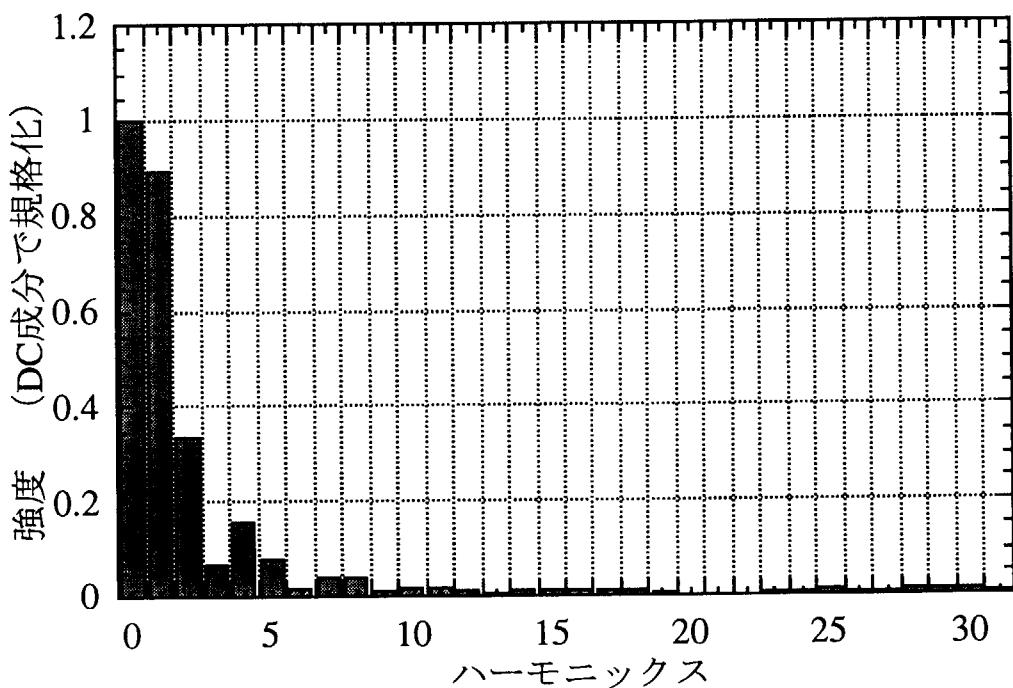


図 3.3-11 ビームの各周波数成分比

このように共振周波数を変化させていくと誘起される電圧の波形、ピーク電圧が変化する。図 3.3-12 に誘起電圧のピーク電圧の変化を示した。ピーク電圧は共振周波数を上げるとともに下がったが、その変化は緩やかなものであった。また、図 3.3-13 に示したように誘起電圧を 3 倍の高調波まで補正したときの最大誤差は共振周波数を上げると大きくなることがわかる。これは共振周波数が高くなるにつれビームの高次の高調波成分の影響が大きくなるため、3 次までの補正では補正しきれなくなっていることが示す。しかしながら、ビームシミュレーションではこれらの補正誤差による明瞭な違いはみられなかった。したがって電源系統の負荷の観点から共振周波数を決定してよいと考えられる。

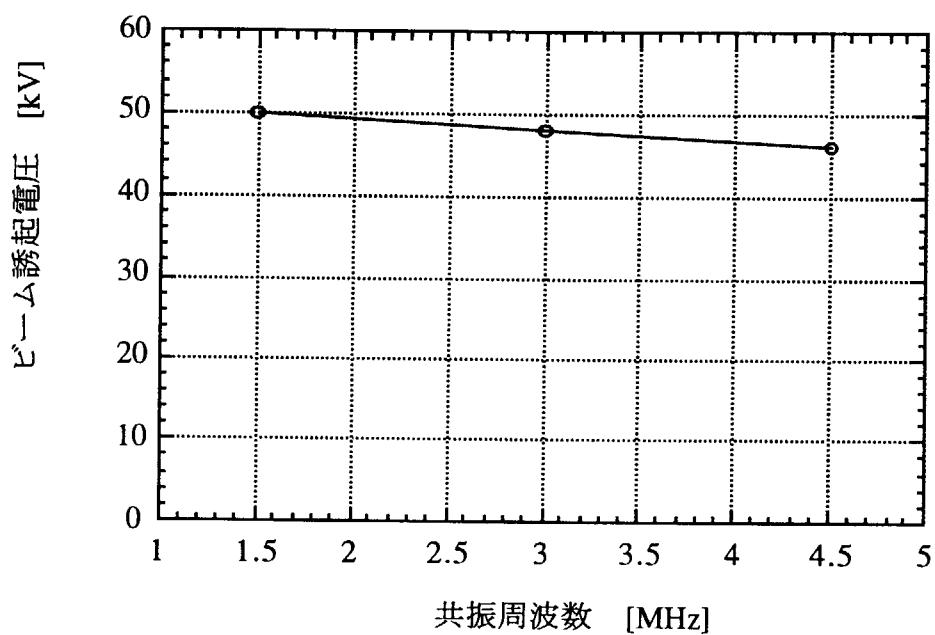


図 3.3-12 誘起電圧のピーク値の共振周波数依存性

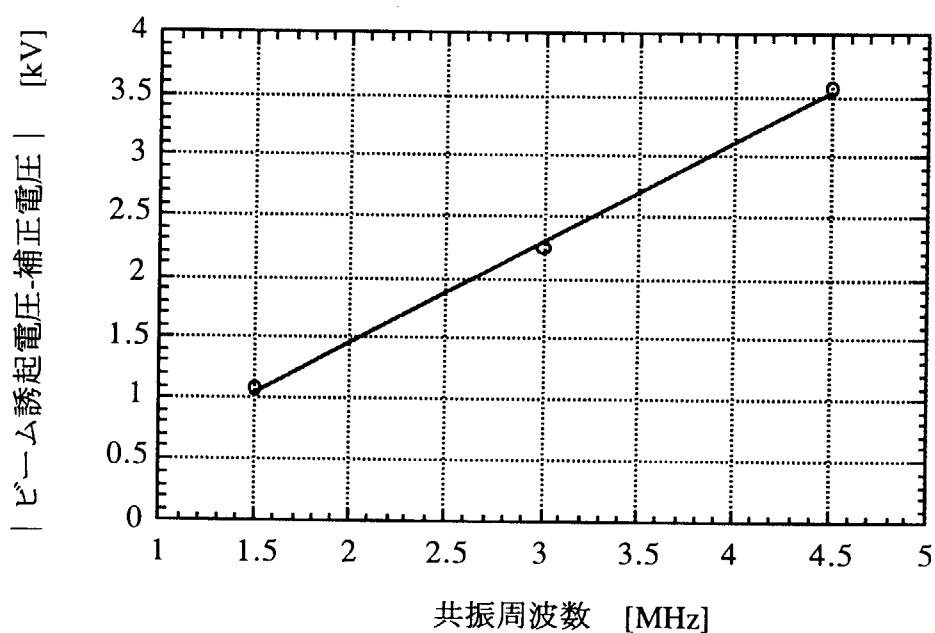
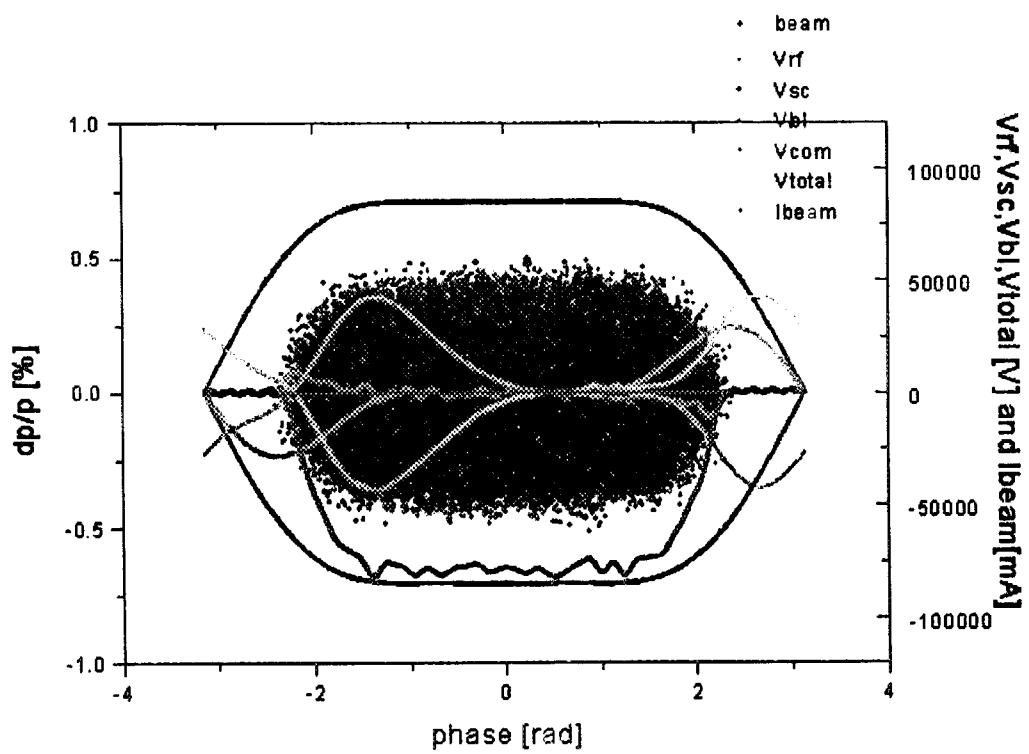


図 3.3-13 補正誤差の共振周波数依存性

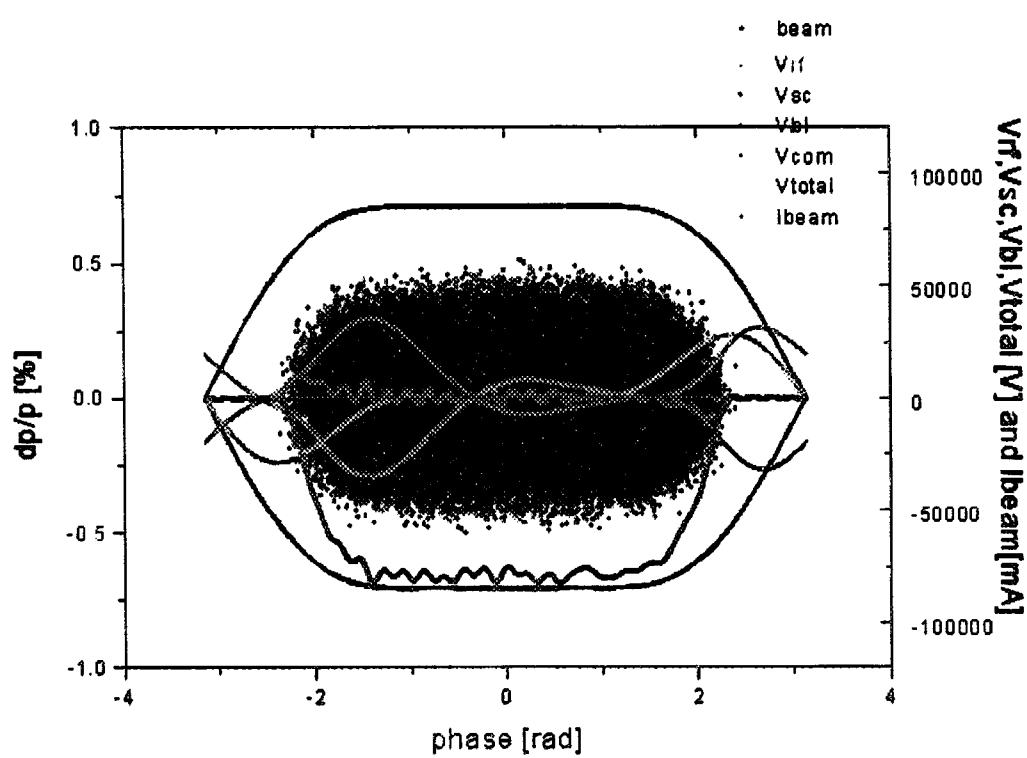
次に図 3.3-14～3.3-16 に  $Q$  値を変化させた場合の縦方向シミュレーションの結果を示す。いずれの場合も共振周波数依存性を調べたときと同様、各ターン毎に 0.4% の広がりを持つビームがバケット中央に入射されるとし、2800 ターンまで入射を繰り返したのち、2 台目のリングの入射が終了するまでリングに蓄積したときのものである。共振周波数は 3.0MHz に固定してある。図 3.3-14 は  $Q$  値を 0.6 にとった場合である。この場合、誘起電圧のピークは 40kV 程度となる。図 3.3-15 は  $Q$  値を 1.15 にとった場合で、誘起電圧のピークは 26kV まで低下している。図 3.3-16 は  $Q$  値を 2.3 にとった場合で、誘起電圧のピークはさらに下がり、16kV 程度となった。一方誘起電圧の波形の違いは少なかった。

This is a blank page.

図 3.3-14 縦方向位相空間図 ( $Q=0.6$ )

水色：高周波電圧  
 赤色：補正用高周波電圧  
 青色：空間電荷力  
 紫色：ビームローディング電圧  
 緑色：ビーム分布（ビーム電流）

This is a blank page.

図 3.3-15 縦方向位相空間図 ( $Q=1.15$ )

水色：高周波電圧  
 赤色：補正用高周波電圧  
 青色：空間電荷力  
 紫色：ビームローディング電圧  
 緑色：ビーム分布（ビーム電流）

This is a blank page.

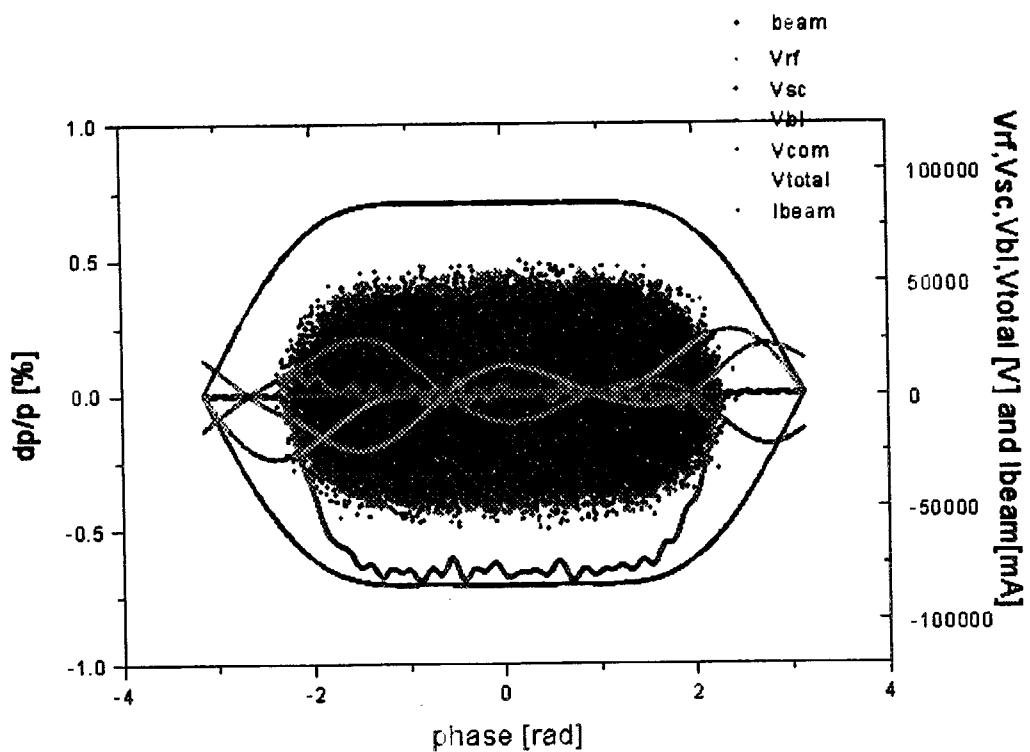


図 3.3-16 縦方向位相空間図 (Q=2.3)

水色：高周波電圧  
 赤色：補正用高周波電圧  
 青色：空間電荷力  
 紫色：ビームローディング電圧  
 緑色：ビーム分布（ビーム電流）

This is a blank page.

このようにQ値を変化させていくと誘起される電圧のピーク電圧が大きく変化する。図3.3-17に誘起電圧のピーク電圧の変化を示した。ピーク電圧はQ値を上げるとともに急激に下がる傾向がみられた。また、図3.3-18にはこの誘起電圧を3倍の高調波まで補正したときの最大誤差を示した。Q値が高くなるにつれビームの高次の高調波成分の影響が小さくなるため、補正誤差は小さくなる。以上の結果よりQ値は高くとる方が望ましいことが分かる。しかし、Q値を高くすると1台の空洞に複数の周波数成分を給電することは困難になる。またファインメットコアを用いた場合、Q値をどの程度まで高くできるかについてはR&Dが必要である。

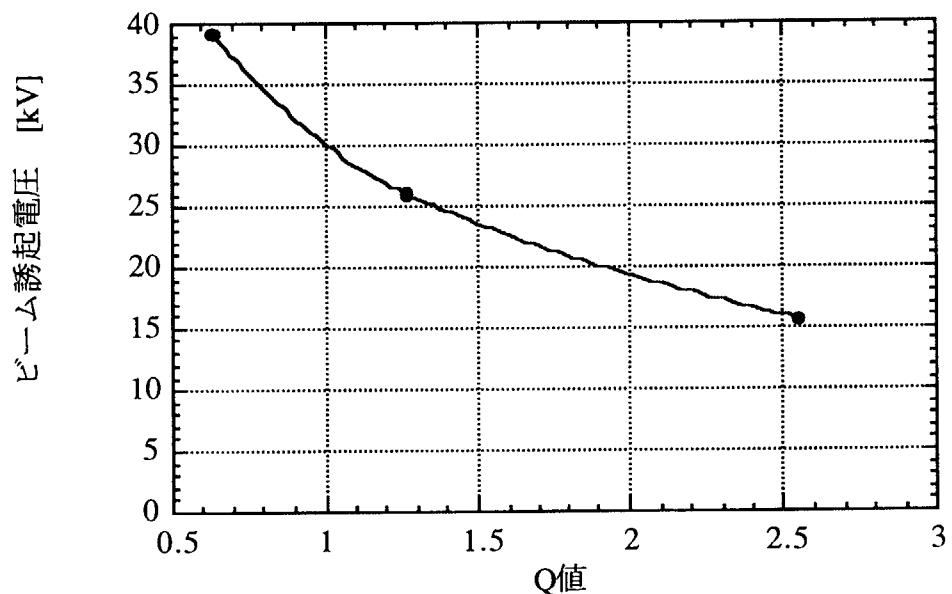


図3.3-17 誘起電圧のピーク値のQ値依存性

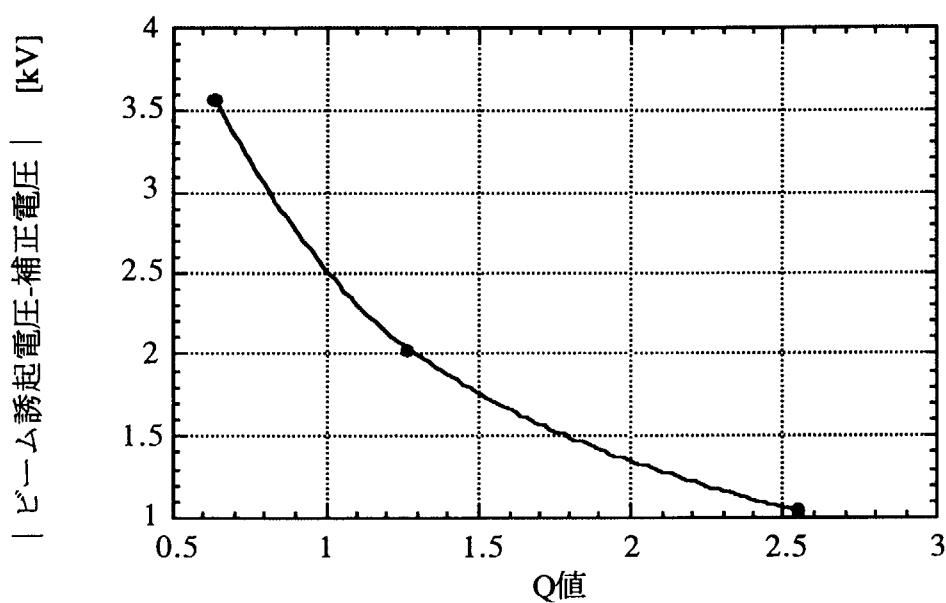


図 3.3-18 補正誤差の Q 値依存性

#### 4. まとめ

以上、空洞の同調型高周波空洞と非同調型高周波空洞の概念設計を行い、比較検討を行った。また縦方向のビームトラッキングコードを作成しビームシミュレーションを行い、大強度ビームの引き起こすビームローディング、空間電荷効果の影響について調べた。これらの検討結果を以下に示す。

まず同調型高周波空洞と非同調型高周波空洞の比較結果を表 4-1 に示す。

表 4-1 同調型高周波空洞と非同調型高周波空洞の比較結果

	同調型	非同調型
高周波電力増幅器	小	大
コアバイアスの必要性	要開発	不要
共振周波数制御	必要	不要
ビーム補償	必要	高調波成分まで必要
コア寸法	制限あり	制限なし
コア材質	要開発	ファインメットで可能
高調波の利用	別途専用空洞が必要	1 台の空洞で利用可能
加速電圧/m	小	大

この比較検討より、本蓄積リングの場合、大電力の電力増幅器が必要かつビームの高調波成分が誘起する高調波電圧の負荷補償が必要であるというデメリットはあるものの、コアバイアス、共振周波数制御が不要で磁性体コアの寸法制限がない非同調型高周波空洞が適していると考えた。また非同調型の場合、1 台の空洞に複数の高調波成分を給電可能であるため、バリアベケットの利用など高調波を同時に給電する高周波システムに適していると考えられる。

次にビームシミュレーションコードを作成し非同調型高周波空洞を使用した高周波システム下でのビームローディング、空間電荷効果等を調べた結果について述べる。まず、基本波空洞のみを使用した場合と比較して高調波を利用することによって周回電流のピーク値、運動量の拡がりを抑制することが可能であることが分かった。このシミュレーション結果を表 4-2 に示す。

表 4-2 基本波空腔システムと高調波空腔システムの比較結果

	基本波空腔システム	高調波空腔システム (基本波+2,3 倍高調波)
周回電流値 (ピーク値) (バンチングファクタ)	130A (0.38)	75A (0.67)
運動量拡がり (入射時 0.4%)	0.8%	0.5%
ビームローディング	50kV	30kV

いずれの場合も速い取り出しに必要な 170ns のビームギャップは確保できた。また、空腔の Q 値、共振周波数を適当に選ぶことによってビームローディングならびにビーム補償時の誤差を小さくできることができることが分かった。この結果より Q 値、共振周波数ともに高めにとることが要求されるが、これについては高周波源の負荷等を含めて今後仕様を詰めていく必要がある。またファインメットコアを用いた空腔で Q 値を高くすることについては R&D も必要と考えられる。

### 謝 辞

本研究を行うに当たり、多大な助言と激励を賜った陽子加速器研究室 水本元治室長、ならびに陽子リング研究室 横溝英明室長に深く感謝致します。

### 参考文献

- [1] M.Mizumoto et al, "A High Intensity Proton Linac Development for Neutron Science Research Program" XVIII International Linac Conference, LINAC96, Geneva, Switzerland 26-30 August 1996, p662-664
- [2] M. Kinsho et al, : A Preliminary Study of the Proton Storage Ring for the Neutron Science Project at JAERI, Proceedings of the 11th Symposium on Accelerator Science and Technology
- [3] A.Hofmann ; "SINGLE-BEAM COLLECTIVE PHENOMENA - LONGITUDINAL", CERN

# 国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	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
物質量	モル	mol
光强度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放熱束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	L, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バーン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリ	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
$10^{18}$	エクサ	E
$10^{15}$	ペタ	P
$10^{12}$	テラ	T
$10^9$	ギガ	G
$10^6$	メガ	M
$10^3$	キロ	k
$10^2$	ヘクト	h
$10^1$	デカ	da
$10^{-1}$	デシ	d
$10^{-2}$	センチ	c
$10^{-3}$	ミリ	m
$10^{-6}$	マイクロ	μ
$10^{-9}$	ナノ	n
$10^{-12}$	ピコ	p
$10^{-15}$	フェムト	f
$10^{-18}$	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1 eVおよび1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

## 換 算 表

力	N(=10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.48422	0.453592	1

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(N\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ボアズ)}(\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)}(\text{cm}^2/\text{s})$$

圧力	MPa(=10 bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg(Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 <sup>3</sup>	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	$1.33322 \times 10^{-4}$	$1.35951 \times 10^{-3}$	$1.31579 \times 10^{-3}$	1	$1.93368 \times 10^{-2}$
	$6.89476 \times 10^{-3}$	$7.03070 \times 10^{-2}$	$6.80460 \times 10^{-2}$	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)
	1	0.101972	$2.77778 \times 10^{-7}$	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-4</sup>	0.737562	$6.24150 \times 10^{-18}$	= 4.184 J(熱化学)
	9.80665	1	$2.72407 \times 10^{-6}$	2.34270	$9.29487 \times 10^{-3}$	7.23301	$6.12082 \times 10^{-19}$	= 4.1855 J(15 °C)
	$3.6 \times 10^6$	$3.67098 \times 10^5$	1	$8.59999 \times 10^5$	3412.13	$2.65522 \times 10^6$	$2.24694 \times 10^{25}$	= 4.1868 J(国際蒸気表)
	4.18605	0.426858	$1.16279 \times 10^{-6}$	1	$3.96759 \times 10^{-3}$	3.08747	$2.61272 \times 10^{19}$	仕事率 1 PS(仏馬力)
	1055.06	107.586	$2.93072 \times 10^{-4}$	252.042	1	778.172	$6.58515 \times 10^{21}$	= 75 kgf·m/s
	1.35582	0.138255	$3.76616 \times 10^{-7}$	0.323890	$1.28506 \times 10^{-3}$	1	$8.46233 \times 10^{18}$	= 735.499 W
	$1.60218 \times 10^{-19}$	$1.63377 \times 10^{-20}$	$4.45050 \times 10^{-26}$	$3.82743 \times 10^{-20}$	$1.51857 \times 10^{-22}$	$1.18171 \times 10^{-19}$	1	

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
	1	$2.70270 \times 10^{-11}$		1	100
	$3.7 \times 10^{10}$	1		0.01	1

照 般 線 量	C/kg	R
	1	3876
	$2.58 \times 10^{-4}$	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

(86年12月26日現在)

