

J A E R I - M
91-068

小型ストレージリング（J S R）の
ビーム寿命に関する研究

1991年5月

横山 稔・柳田 謙一・永井 高久
原田 俊治・横溝 英明・益子 勝夫
石崎 暉洋・田山 豪一・山田 浩司

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）
あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1991

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 日立高速印刷株式会社

小型ストレージリング（J S R）の
ビーム寿命に関する研究

日本原子力研究所大型放射光施設設計画推進室

横山 稔・柳田 謙一・永井 高久

原田 俊治・横溝 英明・益子 勝夫

石崎 暢洋・田山 豪一・山田 浩司

（1991年4月1日受理）

小型ストレージリング J S R のビーム寿命についての実験的及び数値的解析を今回行ったのでその解析方法及びその結果についてまとめておく。また、ラティスを変更した場合の蓄積および寿命に関する検討を行ったので、それについてもまとめておく。

Study on Beam Lifetime of JSR

Minoru YOKOYAMA, Kenichi YANAGIDA, Takahisa NAGAI
Shunji HARADA, Hideaki YOKOMIZO, Katuo MASHIKO
Nobuhiro ISHIZAKI, Hidekazu TAYAMA and Koji YAMADA

Office of Synchrotron Radiation Facility Project
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received April 1, 1991)

JSR is a compact electron storage ring constructed in Tokai Research Establishment. Operation of JSR has been started in April 1989. The stored beam current record till July 1990 was about 160mA.

In this report, we have discussed mainly the beam lifetime by measuring the decay of stored beam current.

Keywords: JSR, Storage Ring, Beam Lifetime, Vacuum, Traking

目 次

1.はじめに	1
2.ストレージリングのビーム蓄積	1
2.1 入射蓄積量	1
2.2 ビームロス量	2
2.3 ビーム不安定性による蓄積の制限	5
3. J S R のビーム寿命	7
3.1 パラメーター	7
3.2 ビーム寿命	7
3.3 ビーム蓄積の上限	9
4. J S R のビーム寿命測定	13
5.入射量を増加させるための検討	17
5.1 B T 系の改造	17
5.2 ラティスの変更	17
6.考察	25
7.まとめ	29
参考文献	30

Contents

1.	Introduction	1
2.	Beam Accumulation Theory	1
2.1	Beam Capture	1
2.2	Beam Loss	2
2.3	Limit of Beam Accumulation for Instability	5
3.	Beam Lifetime of JSR	7
3.1	Beam Parameter	7
3.2	Beam Lifetime	7
3.3	Limit of Beam Accumulation	9
4.	Measurement of Beam Lifetime of JSR	13
5.	Investigation to increase Beam Accumulation	17
5.1	Reconstruction of BT Line	17
5.2	Change of Lattice	17
6.	Conclusion	25
7.	Summary	29
	References	30

1. はじめに

J S R^[1-3]の入射及びビーム蓄積実験は平成元年5月に開始した。それ以降、実験と解析そしてその結果に基づいてリング及びB T系の改造を行うことにより、平成2年4月に160 m Aの電子ビームを蓄積することに成功している。ここでは主に、蓄積リングにおいて重要であるビーム寿命の測定とその解析結果について詳しく報告する。また、J S Rのラティスを変更した場合のビーム蓄積に関する検討結果についても報告する。

2. ストレージリングのビーム蓄積

蓄積リングにおいてそのビーム蓄積量（その最大蓄積量）を増加させ、その寿命を長くすることは、放射光を利用することにおいて重要な事項である。ここでは一般のストレージリングにおけるビーム蓄積について、そのメカニズムを簡単に述べておく。

蓄積リングへのビーム入射はライナック等の加速器からビーム輸送系を経由して行われる。そのビーム蓄積のメカニズムは穴の開いた花瓶に蛇口から水を注いで水を貯めていく状況によく類似している。すなわちビーム入射量が蛇口からの水量に相当し、そして、ビームの寿命等によって失われるビーム量が、花瓶の穴から漏れる水量に相当させればよい。単位時間△Tの間に蓄積されるビーム量△Iは、

$$\frac{\Delta I}{\Delta T} = I_{INJ} - I_{LOS} \quad (2.1)$$

で表される。ここで I_{INJ} , I_{LOS} は、それぞれ単位時間△Tの間に入射蓄積されるビーム量、及び失われるビーム量である。よってすぐにわかることがあるが、

$$I_{INJ} - I_{LOS} = 0 \quad (2.2)$$

のとき、ビーム蓄積量の最大値となる。ビーム蓄積量の最大値を増加させるためには、 I_{INJ} を大きくし、 I_{LOS} をなるべく小さくすることに他ならない。

2.1 入射蓄積量

入射蓄積量 (I_{INJ}) は、ライナック等の加速器で最終的に加速された単位時間当たりのビーム量 I_{EXIT} そして、ビーム輸送系での輸送効率 ϵ_{TR} ($0 \leq \epsilon_{TR} \leq 1$) に比例する。

$$I_{INJ} = I_{EXIT} \cdot \epsilon_{TR} \quad (2.3)$$

1. はじめに

J S R^[1-3]の入射及びビーム蓄積実験は平成元年5月に開始した。それ以降、実験と解析そしてその結果に基づいてリング及びB T系の改造を行うことにより、平成2年4月に160 m Aの電子ビームを蓄積することに成功している。ここでは主に、蓄積リングにおいて重要であるビーム寿命の測定とその解析結果について詳しく報告する。また、J S Rのラティスを変更した場合のビーム蓄積に関する検討結果についても報告する。

2. ストレージリングのビーム蓄積

蓄積リングにおいてそのビーム蓄積量（その最大蓄積量）を増加させ、その寿命を長くすることは、放射光を利用することにおいて重要な事項である。ここでは一般のストレージリングにおけるビーム蓄積について、そのメカニズムを簡単に述べておく。

蓄積リングへのビーム入射はライナック等の加速器からビーム輸送系を経由して行われる。そのビーム蓄積のメカニズムは穴の開いた花瓶に蛇口から水を注いで水を貯めていく状況によく類似している。すなわちビーム入射量が蛇口からの水量に相当し、そして、ビームの寿命等によって失われるビーム量が、花瓶の穴から漏れる水量に相当させればよい。単位時間△Tの間に蓄積されるビーム量△Iは、

$$\frac{\Delta I}{\Delta T} : I_{INJ} - I_{LOS} \quad (2.1)$$

で表される。ここで I_{INJ} , I_{LOS} は、それぞれ単位時間△Tの間に入射蓄積されるビーム量、及び失われるビーム量である。よってすぐにわかることがあるが、

$$I_{INJ} - I_{LOS} = 0 \quad (2.2)$$

のとき、ビーム蓄積量の最大値となる。ビーム蓄積量の最大値を増加させるためには、 I_{INJ} を大きくし、 I_{LOS} をなるべく小さくすることに他ならない。

2.1 入射蓄積量

入射蓄積量 (I_{INJ}) は、ライナック等の加速器で最終的に加速された単位時間当たりのビーム量 I_{EXIT} そして、ビーム輸送系での輸送効率 ϵ_{TR} ($0 \leq \epsilon_{TR} \leq 1$) に比例する。

$$I_{INJ} = I_{EXIT} \cdot \epsilon_{TR} \quad (2.3)$$

また、ストレージリング入射口まで輸送してきたビームのパラメーター（位相空間とエネルギー）は、リング内に入射した場合に蓄積可能な様に設計される（リングのアクセプタンスとのマッチング）。入射口でのビームの位相空間の広さは、上記の花瓶に水を入れるという表現では蛇口の断面積に相当し、リングのアクセプタンスは花瓶の口の大きさに相当する。よって、蛇口からの水をすべて花瓶に注ぐには蛇口の断面積が、花瓶の断面積よりなるべく小さくすることが設計の条件となる。

しかし、実際はライナックの最終部のビームのパラメーターの設計値とのずれ等によりミスマッチングが生じるため、入射量は設計値よりさらに小さくなる。

それらをすべて考慮すると、

$$I_{\text{INJ}} = I_{\text{EXIT}} \cdot \epsilon_{\text{TR}} \cdot \epsilon_{\text{AC}} \cdot \epsilon_{\text{CO}} \quad (2.4)$$

ここで、 ϵ_{AC} ($0 \leq \epsilon_{\text{AC}} \leq 1$)、 ϵ_{CO} ($0 \leq \epsilon_{\text{CO}} \leq 1$) はそれぞれ、リングのアクセプタンスと入射部ビームパラメーターの設計条件から求まる効率、そして、設計値とのずれによる効率である。 ϵ_{CO} による影響は、あたかも蛇口と花瓶の口の位置がずれて水が回りにこぼれてしまう状況に似ている。よってこのことを考えれば、リングのアクセプタンスをビームの入射部のパラメーターに比べてはるかに大きく設計しておけば、ビームパラメーターに多少のずれがあったとしても入射効率には影響を及ぼさないため、実際の調整が容易である。

2.2 ビームロス量

リングのパラメーターの調整後、蓄積したビームの単位時間当たりのビームロス量 I_{LOS} の中で最も占める割合の大きいのはビームの寿命によるビームロス I_{LIF} ある。ビーム寿命には真空による寿命、量子効果による寿命 (Quantum Liftime)、そして Touschek Liftime に分類される。

(1) 真空に依存したビーム寿命

ストレージリング内に蓄積された電子ビームはベータトロン振動をしながらリング内をほぼ光速で周回する。電子ビームが残留ガスと衝突すると、軌道から外れてビームダクトの壁に衝突し、ビームが失われる。当然、残留ガスの軌道上にある個数（密度）が多いほど即ち真空度 P が悪いほど失われるビーム量は多くなる。また、衝突により、単位時間に失われる電流値 ΔI は、蓄積した電子ビーム量 I_{STORE} が大きいほど多くなる。そして、衝突の起こる割合は衝突断面積 (σ_T) で表されるため、

$$\Delta I \propto \sigma_T \cdot P \cdot I_{\text{STORE}} \cdot \Delta T \quad (2.5)$$

で表されることになる。そして、真空による寿命 τ_{gas} は、

$$\tau_{\text{gas}} = I_{\text{STORE}} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta I} = 1 \times 10^{-27} / (\sigma_T \cdot P) \quad (2.6)$$

で表される。

衝突の割合は電子が衝突する対象により以下の3つに分けることができる。

① 残留ガスの原子核との散乱 (Rutherford scattering)

衝突断面積 σ_R は、

$$\sigma_R (Z) = 4\pi (r_0 \cdot Z/r)^2 / \theta_c^2 \quad (2.7)$$

である。ここで r_0 は古典電子半径であり、 $r_0 = e^2/mc^2$ (e は電子電荷、 m は電子の質量、 c は光速) で表される。そして、 r はローレンツファクターであり、 $r = E/m_0$ (E は電子のエネルギー、 m_0 は電子の質量 0.511 MeV) で表される。 θ_c はダクト壁との衝突にいたる限界角であり、ダクトの最少開口の片幅を a 、ビームの振動の幅に相当する β 関数により、 $\theta_c = a/\beta$ で表される。

② 原子核による制御放射 (bremsstrahlung)

$$\sigma_b = 4\alpha r_0^2 \cdot Z(Z+1) (4/3 \cdot \ln(r/r_c) - 5/6) \cdot \ln(183/Z^{1/3}) \quad (2.8)$$

ここで α は微細構造定数であり、 $\alpha = 2\pi e^2/hc$ (h はプランク定数) で表される。 r_c はエネルギーロスの臨界値であり、rf パケットの高さ $r_c/r = \Delta E/E$ で表される。

③ 残留ガスの核外電子との衝突 (Moller scattering)

核外電子1個との衝突断面積 σ_M は

$$\sigma_M = 2\pi r_0^2 / r \quad (2.9)$$

で表される。

①～③はそれぞれ独立の事象であり、トータルの断面積 σ_T は

$$\sigma_T = \sigma_R + \sigma_b + Z \cdot \sigma_M \quad (2.10)$$

と表される。

(2) 量子効果に依存したビーム寿命

蓄積した電子は光子をある確率 (量子力学的課程) で放出する (シンクロトロン放射) ため、大きな振幅 (ベータトロン振動とシンクロトロン振動) をするものが出てくる。大きな振動を持つ電子は、チャンバーに衝突したり、rf パケットからこぼれたりして失われてしまう。

シンクロトロン振動の場合

$$\tau_q = \frac{\tau_e}{2} \cdot \frac{e^\xi}{\xi} \quad , \quad \left(\xi = \frac{1}{2\pi\alpha h_a} \left(\frac{U}{E} \right) F(q) \Big/ \frac{0.5 r^2 h}{2\pi\rho \cdot mc} \right) \quad (2.11)$$

ここで τ_q は放射減衰時間

h_a はハーモニックナンバー

α はコンパクションファクター

U は1ターンあたりのエネルギー損失

ρ は曲率半径

である。

ペータトロン振動の場合

$$\tau_q = \tau_\epsilon \cdot \frac{e^\xi}{\xi} , \quad \left(\xi = \frac{\alpha_y^2}{2\sigma_y^2} \text{ or } \frac{\alpha_x^2}{2\sigma_x^2} \right) \quad (2.12)$$

ここで σ_x, σ_y は x, y 方向のビームサイズ

α_x, α_y は x, y 方向のダクトの寸法の $1/2$ である。

となる。

(3) タウシェック寿命

バンチ内での電子のクーロン散乱によって、大きな振動を持った電子はチェンバーに衝突したり、 r_f パケットからこぼれたりして失われてしまう。これをTouschek効果と呼び、この効果によっても、蓄積した電子ビームの寿命は短くなる。Touschek効果による寿命は、クーロン散乱が原因であるためバンチの体積 V に比例し、バンチ内の電子数 N に反比例する。

$$\frac{1}{\tau_{Tous}} = \frac{I \cdot r_0^2 \cdot C \cdot D(\zeta)}{8\pi \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y \cdot \sigma_s \cdot e f \lambda^{-3}} \quad (2.13)$$

$$\text{ここで, } \lambda^{-1} = \left(\frac{\Delta E}{E} \right)_{RP} = \sqrt{\frac{U \cdot F(q)}{\pi \alpha h a E}}$$

f は回転周波数

σ_s はビーム進君方向のバンチの長さ

$$\zeta = (\epsilon_{RF}/\gamma \sigma_p)^2 \quad \sigma_p = \frac{E \sigma_x}{\beta}$$

$$\epsilon_{RF} = \lambda^{-1} \cdot E$$

また、

$$D(\zeta) = \sqrt{\zeta} \left\{ -\frac{1}{2} e^{-\zeta} + \frac{\zeta}{2} \int_{\zeta}^{\infty} \frac{\ln u \cdot e^{-u}}{u} du \right. \\ \left. + \frac{1}{2} (3\zeta - \zeta \ln \zeta + 2) \int_{\zeta}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \right\}$$

である。 $D(\zeta)$ の計算結果を図 1 に示す。

さて、上記で述べた寿命は、式を積分すると直ちにわかるようにある時間の蓄積量に対して $1/e$ になるまでの時間で定義される。トータルな寿命は、各効果は独立に起るため

$$I(t) = I_0 (e^{-t/\tau_{gas}} \cdot e^{-t/\tau_q} \cdot e^{-t/\tau_{Tous}}) \\ = I_0 \cdot \exp (-t (1/\tau_{gas} + 1/\tau_q + 1/\tau_{Tous})) \quad (2.14)$$

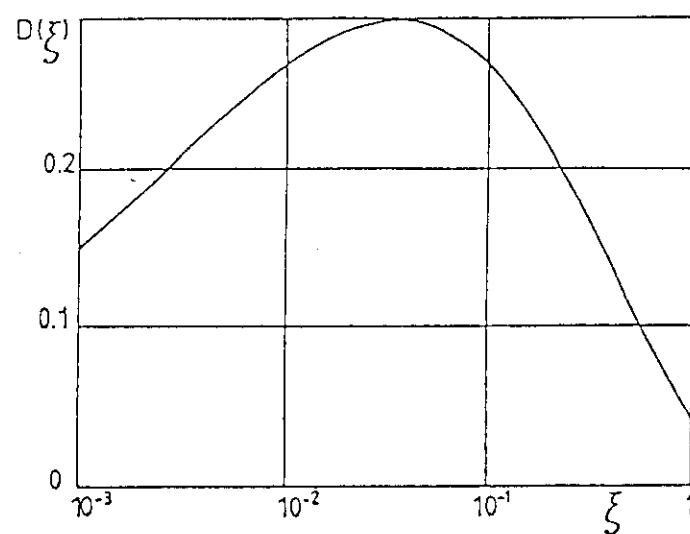
よって、

$$1/\tau_{\text{total}} = 1/\tau_{\text{gas}} + 1/\tau_q + 1/\tau_{\text{tot}}$$
 (2.15)

で表されることになる。

2.3 ビーム不安定性による蓄積の制限

以上で述べた事項の他、ビームの蓄積量や寿命に影響を与えるものとしてビーム不安定性がある。ビーム不安定性には、それを引き起こす原因によりいくつかに分けられる。例えば、RF空洞の高次モードがビームの持つ振動数に共鳴して引き起こされるcoupled-bunch instabilityでは、共鳴による成長率がビームのdampingと平衡すると、それ以上ビームが蓄積されなくなり蓄積量に制限を与えることになる。また、ビーム軌道上に多くのイオンがトラップされると、ビームサイズを大きくしたり、イオンのクーロン力により、チューンシフトを引き起こしてビーム寿命に影響を与える。



$$D(\xi) = \sqrt{\xi} \left\{ -\frac{3}{2} e^{-\xi} + \frac{\xi}{2} \int_{\xi}^{\infty} \frac{\ln u e^{-u}}{u} du + \frac{1}{2} (3\xi - \xi \ln \xi + 2) \int_{\xi}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \right\}$$

図 1 $D(\xi)$

3. J S R のビーム寿命

3.1 パラメーター

J S R は平成元年 4 月に日本原子力研究所東海研究所リニヤック棟建屋内に完成した小型電子蓄積リングがある。J S R の概略図を図 2 に示す。入射エネルギーは約 150 MeV で、300 MeV まで加速を行うことが可能である。J S R のラティスは C-G (Chasman-Green) タイプが採用されており、3 回対称のおにぎり型である。J S R の基本的なパラメーターを表 1 に示しておく。

3.2 ビーム寿命

J S R の真空度による寿命をここで評価しておく。

2 章で述べた各式に J S R のパラメータを代入する。

(1) 真空に依存した寿命

① 残留ガスの原子核との散乱 (Rutherford scattering)

衝突断面積 σ_R は θ_c を、

真空ダクトの幅の狭い Y 方向で定義すると

$$\theta_c = A / \beta_{Y\text{MAX}} = (9 \times 10^{-3}) / 7 = 1.3 \text{ m rad}$$

そして、 $r = 150 \text{ MeV} / 0.511 \text{ MeV} = 293.5$

$$\begin{aligned} \sigma_R(Z) &= 4\pi (r_0 \cdot Z / r)^2 / \theta_c^2 \\ &= 4\pi \{(2.8 \times 10^{-13})^2 Z^2 / 293.5\} (1.3 \times 10^{-3})^2 \\ &= 1.7 \times 10^{-24} \times Z^2 (\text{cm}^2) \\ &= 83 \times 10^{-24} (\text{cm}^2) \end{aligned}$$

② 原子核による制動放射 (bremsstrahlung)

r_f パケットの高さ $r_c / r = \Delta E / E = 0.01$ とすると

$$\begin{aligned} \sigma_b &= 4\alpha r_0^2 \cdot Z (Z+1) (4/3 \cdot \ln(r/r_c) - 5/6) \cdot \ln(183/Z^{1/3}) \\ &= 4 (2.8 \times 10^{-13})^2 (4/3 \cdot \ln(143) - 5/6) \cdot \ln(183/Z^{1/3}) / 137 \\ &= 1.32 \times 10^{-26} Z (Z+1) \cdot \ln(183/Z^{1/3}) (\text{cm}^2) \\ &= 3.22 \times 10^{-24} (\text{cm}^2) \end{aligned}$$

ここで α は微細構造定数であり、 $\alpha = 2\pi e^2 / hc$ (h はプランク定数) で表される。 r_c はエネルギーロスの臨界値であり、 r_f パケットの高さ $r_c / r = \Delta E / E$ で表される。

(3) 残留ガスの核外電子との衝突 (Moller scattering)

核外電子 1 個との衝突断面積 σ_M は

$$\begin{aligned}\sigma_M &= Z \cdot 2\pi r_0^2 / r_c \\ &= 1.7 \times 10^{-24} (\text{cm}^2)\end{aligned}$$

①～③トータルの断面積 σ_T は

$$\sigma_T = 88 \times 10^{-24} (\text{cm}^2)$$

となり、原子核との散乱に大きく依存していることがわかる。

(2) 量子のゆらぎによる寿命

エネルギー減衰時間は、 $\tau_e \approx 0.2$ (秒) である。次に (2.11), (2.12) 式の ξ を求める。

① シンクロトロン振動の場合

$h_a = 8$, $\alpha = 0.1$, $U = 50$ (eV), $\rho = 0.835$ (m) を代入し,

$$\xi_s \approx 2550$$

② ベータトロン振動の場合

x, y 方向については、 $\sigma_x = 0.21 \times 10^{-3}$ (m), $\sigma_y = 0.17 \times 10^{-4}$ (m)

$a_x = 55 \times 10^{-3}$ (m), $a_y = 18 \times 10^{-3}$ (m) を代入し,

$$\xi_x = 3.4 \times 10^4, \xi_y = 5.6 \times 10^5 \quad \text{となる。}$$

よってそれぞれの寿命は、非常に長いことがわかる。

(3) Touschek 寿命による依存

J S R の Touschek 効果に依存した寿命を見積る。(2.13) 式に S Y N C H コードの出力結果を代入する。代入した数値は,

$$\lambda^{-1} = 0.01$$

$$f = 14.6 \times 10^6$$

$$\sigma_x = 0.21 \times 10^{-3} (\text{m})$$

注) カップリングを 1 % とした。

$$\sigma_y = 0.17 \times 10^{-4} (\text{m})$$

$$\sigma_s = 0.01 (\text{m})$$

$$\zeta = 0.15$$

$$D(\zeta) = 0.25$$

であり、その結果

$$\frac{1}{\tau_{Touschek} \cdot I} \approx 3.3 I$$

となる。

以上の真空及びTouschek 寿命の数値を図3(a)にまとめておく。

また、x,y方向のカップリングによってもビームサイズは変化するため、それに依存したTouschek 寿命を図3(b)に示しておく。

3.3 ビーム蓄積の上限

3.2で述べたように Touschek 効果による寿命と真空に依存した寿命の2つが大きく効いてくることがわかる。

そこでJSRのビーム蓄積とビームロスの関係を(2.1)式であらわすと、

$$\frac{dI}{dt} = I_{INJ} - ((A + B) I^2 + C I) \quad (3.1)$$

ここで、 I_{INJ} は、JSRに1度の入射(1PPS)で蓄積されるビーム量である。

$A I^2$ は、Tousehek 効果によるビームロス量

$B I^2$ は、ビーム蓄積量が増加するに従って真空度が劣化する(光脱離による)ことによるビームロス量

$C I$ は、真空度に依存したビームロス量

蓄積量の最大値は(2.2)式で表される。(I_{INJ} を一定とした場合) JSRのビーム最大蓄積量は、

$$(A + B) I^2 + C I - I_{INJ} = 0 \quad (3.2)$$

で表せることができる。(3.2)式は、2次方程式であるから簡単にその解がわかり、また $I \geq 0$ より

$$I_{MAX} = (-C + \sqrt{C^2 + 4(A + B) \cdot I_{INJ}}) / 2(A + B) \quad (3.3)$$

となる。

表 1 J S R のパラメーター

入射エネルギー	150 MeV
蓄積エネルギー	300 MeV
仕様可能な直線部の長さ	1.45 m
周長	20.546 m
平均半径	3.27 m
偏向電磁石の台数	6台
偏向電磁石の形状	セクター
曲率半径	0.835 m
偏向磁場	1.2 T / 0.6 T
高周波加速周波数	116.7 MHz
高周波最大電圧	30 kV
高周波電力	2 kW
ペータトロン振動数 X方向	2.23
Y方向	0.83

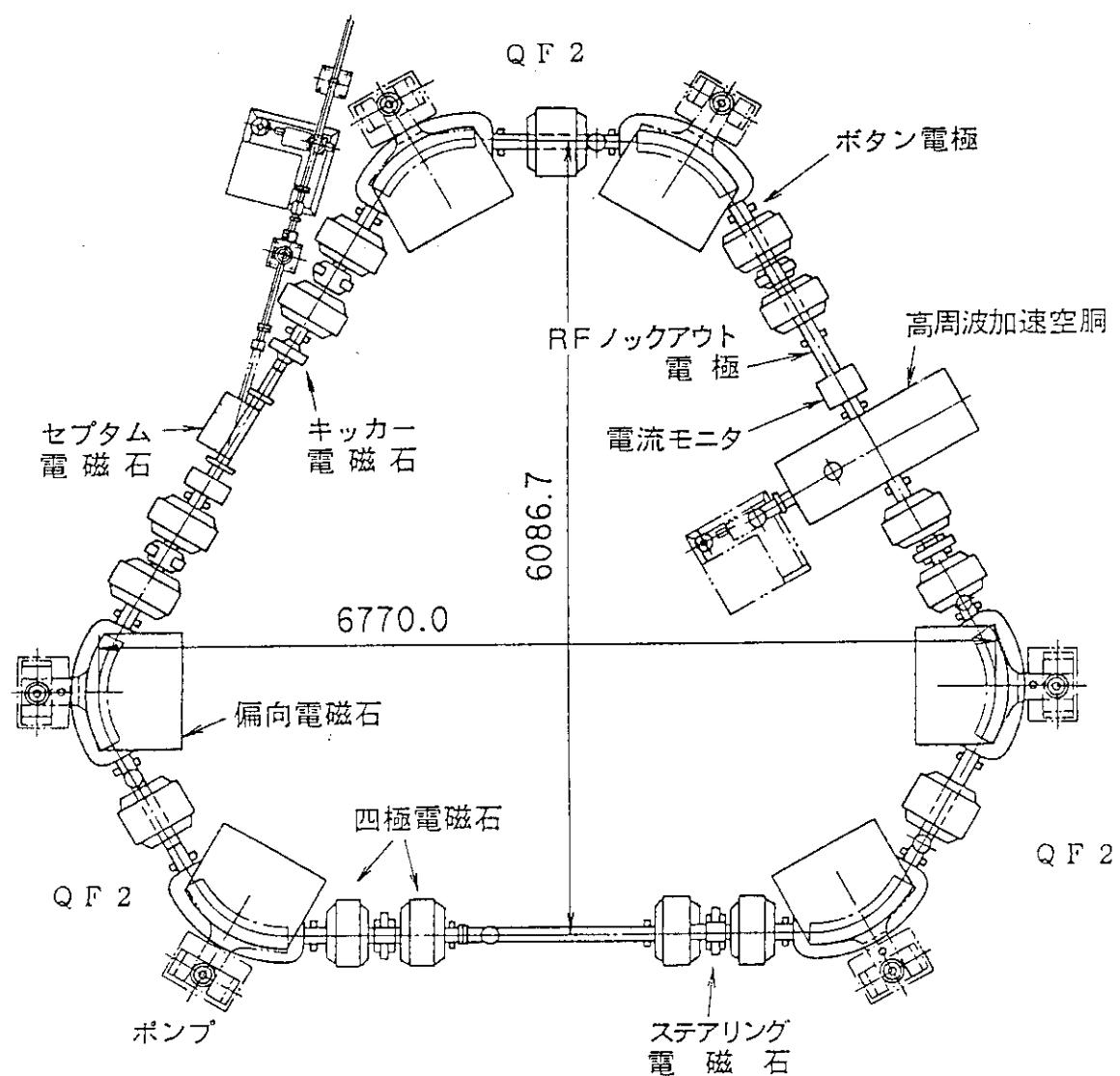


図2 J S R の概略図

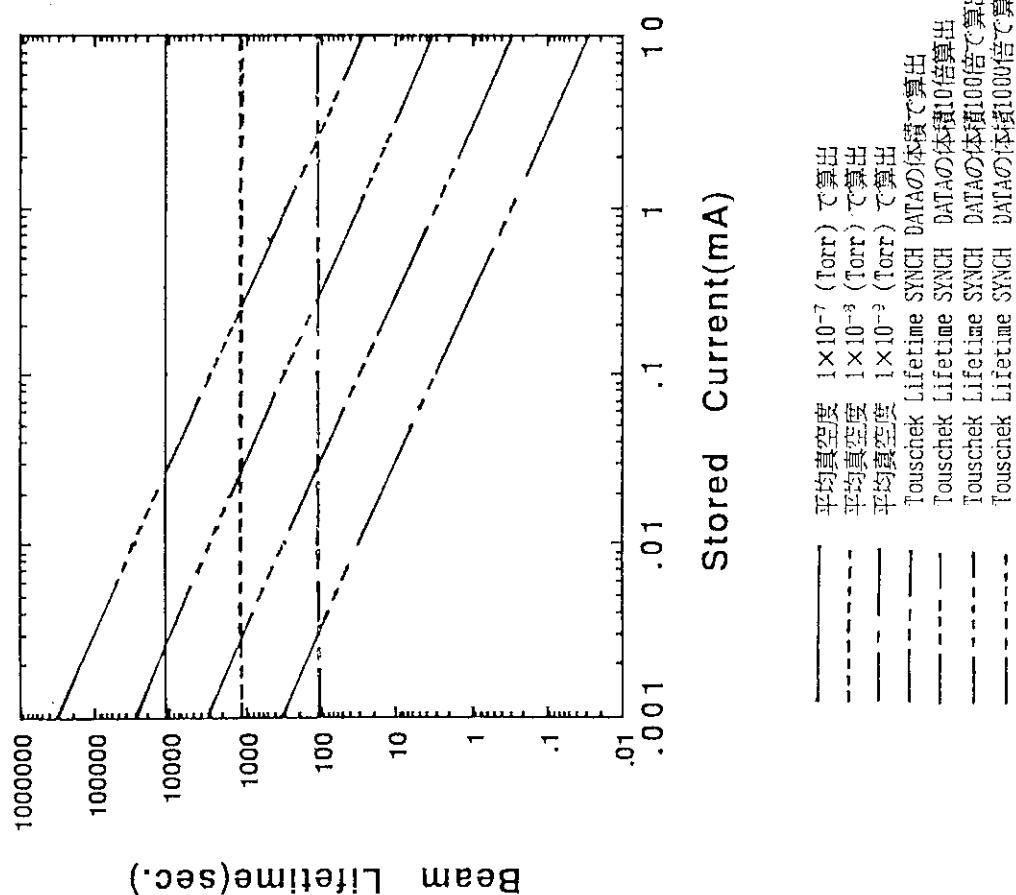


図 3(a) J S R の寿命の依存性

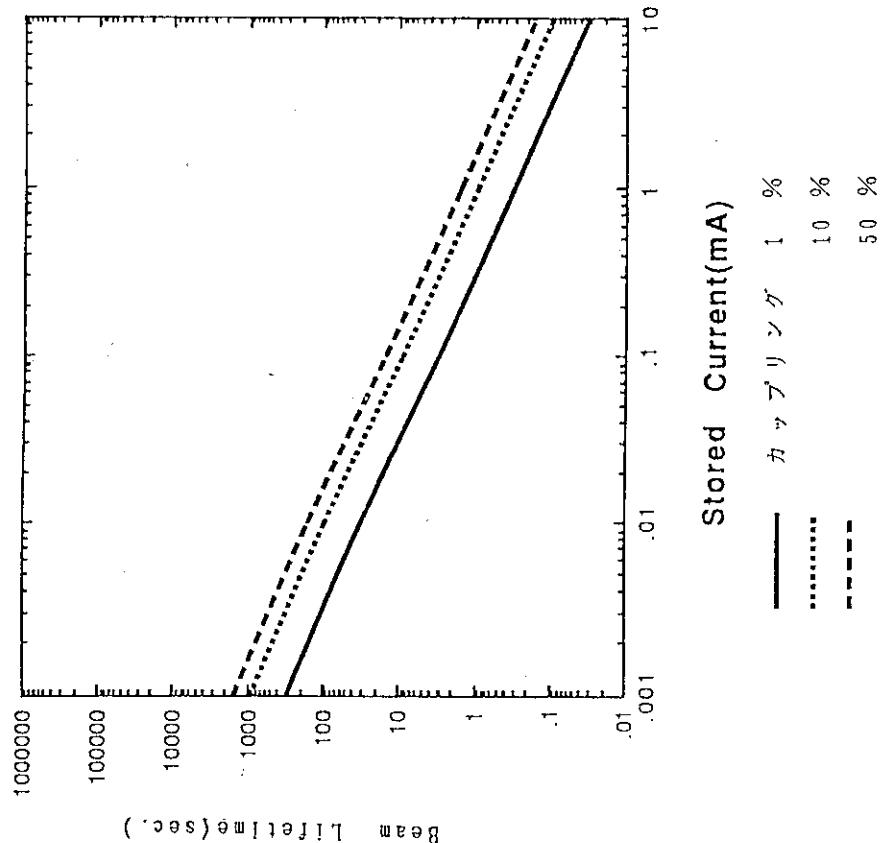


図 3(b) Touschek 寿命のカップリング

4. J S R のビーム寿命測定

ここでは、J S R のビーム寿命について測定結果に関する検討及びその結果について述べる。

J S R のビーム寿命の測定は 100 mA 程度ビーム入射蓄積終了後、D C C T の出力をハイブリッドレコーダーに 2 秒おきに取り込むことにより行った。また、それと並行して真密度の出力（ヌードイオングージ）も取り込んでいる。

(1) ビーム蓄積によるダクトの焼きだしの効果

平成 2 年 3 月 31 日と 4 月 6 日に測定したビーム蓄積量と真密度の関係の測定結果を図 4 に示す。各グラフの直線は、各データ点を最小 2 乗法を用いて整理し、得られたものである。蓄積電流値と真空の関係はグラフより、

$$P = a \cdot I + b \quad (4.1)$$

の関係があることがわかる。しかも、蓄積実験が進むにつれて、電流値に依存した真空上昇率 a (真空上昇率) が小さくなっていることがわかる。これは放射光がダクトにあたることによりダクトからガスが放出する (光脱離) ことが原因であり、その焼き出しの効果が進んでいることが考えられる。J S R におけるこの真空上昇率 a と蓄積電流値の時間積分 (Beam Dose 量) の関係を図 5 に示す。グラフから J S R の場合真空上昇率は、

$$a = 9.2 \times 10^{-8} (A \cdot h)^{-0.57} (\text{Torr}/A) \quad (4.2)$$

の関係があることがわかる。理論値では $-2/3$ 乗に比例するため、J S R では理論値に近い値が得られていることがわかる。

(2) 真密度に依存した寿命

(2.6) 式に (4.1) 式の P (4 月 6 日のデータ) を代入すると

$$\begin{aligned} 1/\tau_{\text{gas}} &= -\Delta I/I_{\text{STORE}} \cdot \Delta T = 1 \times 10^{27} \times (\sigma_T \cdot P) \\ &= 8.8 \times 10^4 (a \cdot I + b) \\ &= 8.8 \times 10^4 (5.6 \times 10^{-8} \cdot I + 1.2 \times 10^{-9}) \\ &= 4.9 \times 10^{-3} \cdot I + 1.06 \times 10^{-4} (\text{sec}^{-1}) \end{aligned} \quad (4.3)$$

平成 2 年 3 月 31 日と 4 月 6 日に測定したビーム蓄積量と、その電流値の Decay Rate (寿命の逆数) の関係を図 6 に示す。このグラフより 4 月 6 日のデータは、

$$-dI/I \cdot dt = 2.4 \times 10^{-2} \cdot I + 3.67 \times 10^{-4} (\text{sec}^{-1}) \quad (4.4)$$

の関係があることがわかり理論式 (3.1) 式 ($I_{\text{INJ}} = 0$ とした) を満足している。

Touschek 効果によるビーム Decay Rate は電流値に比例しているため、(4.4) の第二項には寄与しない。(4.3) 式の第二項と (4.4) 式の第二項が一致するように定数倍する。そ

れを行う理由としては、(2.7)式の散乱角が cod により小さくなっていることと、ビーム軌道上の平均真空度でなく、ヌードイオンゲージの読み値を用いていることの二つが上げられる。その結果第一項の定数は 1.7×10^{-2} となり、JSR の寿命は真空中に大きく依存していることがわかる。

Touschek 効果による項は、その残りの 7×10^{-3} ($A^{-1} \cdot sec^{-1}$) となる。理論値から求めた値に比較して非常に小さい。そこで、Touschek 寿命とその依存性を調るため RF 空洞加速電圧のみを変えてビーム寿命を測定した。RF の加速電圧は 7 kV, 10 kV, 15 kV, 20 kV で測定した。その Decay Rate をプロットしたものを図 7 に示す。これからわかるように、RF 加速電圧が 7 kV ~ 25 kV では寿命はほぼ一定であり、RF 電圧を 20 kV 付近でビームを蓄積する限り、Touschek 効果による影響は小さいことがわかる。

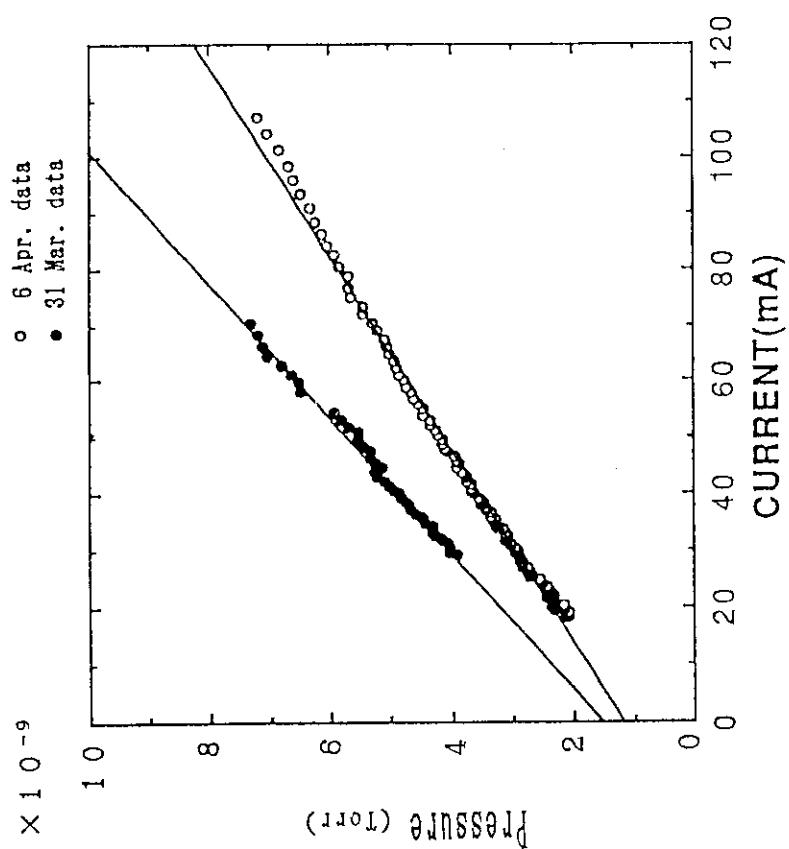


図 4 ビーム蓄積量と真圧度の関係

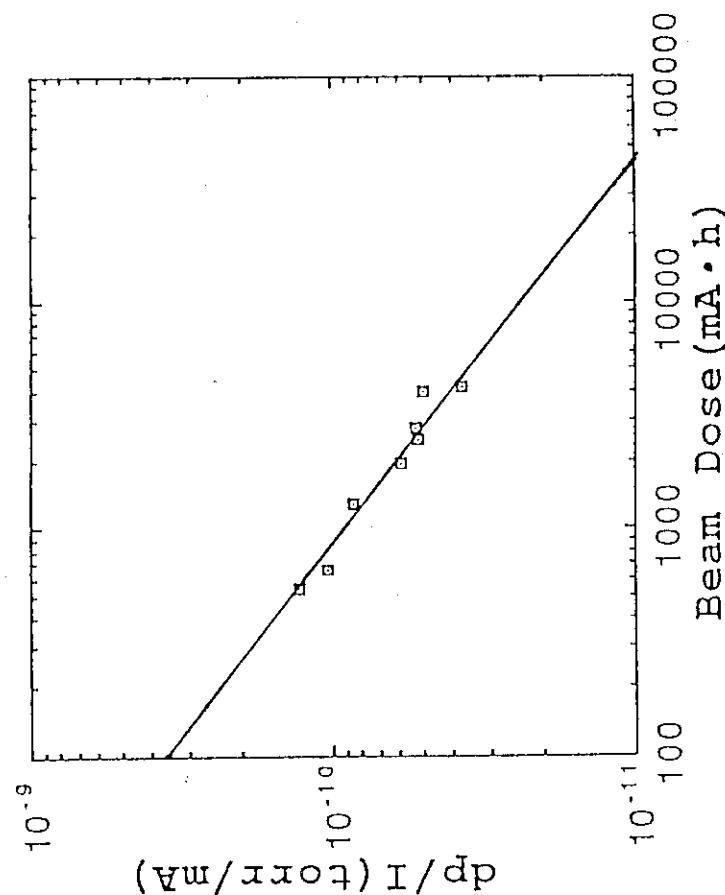


図 5 Beam Dose量と真圧度の関係

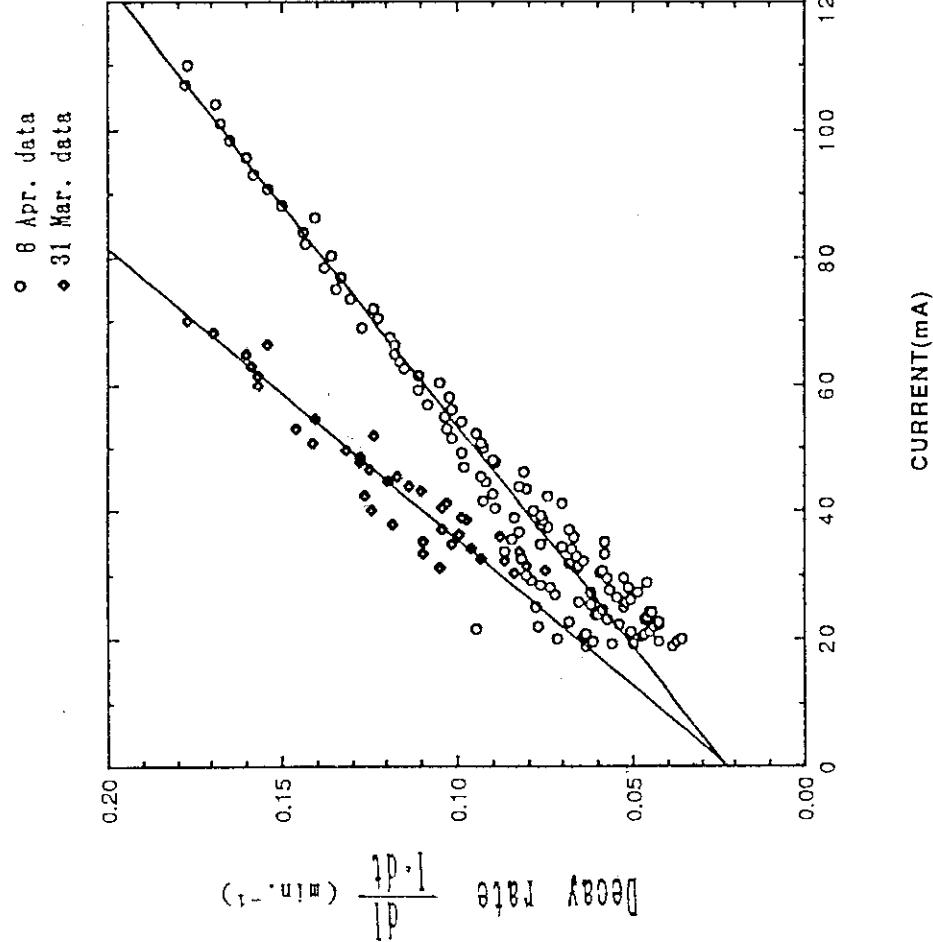
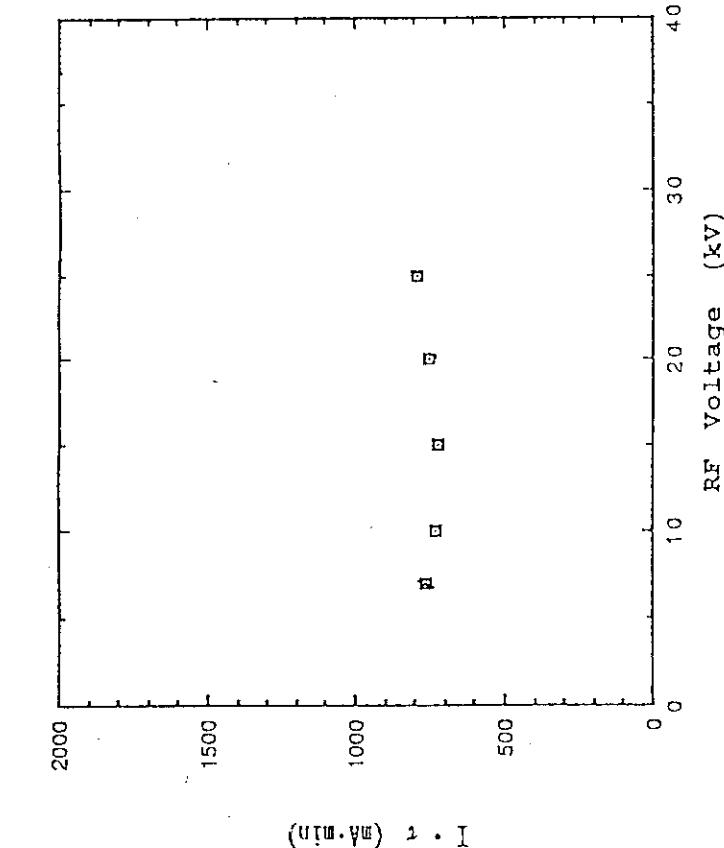
図 6 $\beta^- \mu$ 畏積量と decay rate の関係

図 7 RF 加速電圧と decay rate の関係

5. 入射量を増加させるための検討

5.1 BT系の改造

J SR 完成時のBT系はJ SR用に設計されたものでなく、設置されている磁石の位置調整機構が不十分であることによりJ SRへの輸送、及びアクセプタンス内への入射パラメーターの調整は充分でなかった。そこで平成2年の2月に既存設備の制限を受けながらBT系を検討し、それに従った改造を行っている。

その結果、ライナックからJ SRまでビームを導くまでの電磁石の調整時間の短縮と、J SR蓄積に対するビームパラメータの最適化がはかられ、 $\epsilon_{TR} \cdot \epsilon_{AC} \cdot \epsilon_{CO}$ 積 ϵ_{TR} が3倍から4倍に改善されている。

5.2 ラティスの変更

(1) 入射効率に関する検討

J SRはC-Gラティスを採用しているが、1セル内の偏向電磁石の間にあるX方向収束電磁石（以下QF2、図2、図8(a)参照）の励磁を弱くすることにより、 β 関数を小さくすることができます。全く励磁しない場合をAタイプとして、ダブルアクロマティックの場合をDタイプとして以下論議する。まずそれぞれの場合のDISPERSSION 及び β 関数の計算結果を図8(a), (b)に示しておく。

J SRは1つのキッカーを用いて入射しており、ビームがダンピングする間にダクト（セプタム出口より内側にあるセプタムの壁）に衝突しないことが蓄積の条件である。

J SRの入射口（セプタム出口でリングデザイン軌道の外側41mmにあり半径4mmのアパーチャーである。図9に示す。）での電子の位置及び入射方向（即ち位相空間）を初期値与えてリング内のトラッキングを行った。

キッカーの励磁波形は、図10(a)に示すとおりである。電子がリング内に入射されて最初にキッカー電磁石で蹴られるタイミングによって蓄積可能な位相空間の広さは異なってくる。

例として、Aタイプの場合の結果を図10(b)に示す。キッカーによる蹴り角と蓄積可能な位相空間の時間積分（図10(b)の斜線部の面積に相当する）をそれぞれの場合で求めた。cod のため、セプタムの壁が近づいた場合についても計算を行った。（cod はアライメント精度から、平均cod を算出した。）結果を図11(a), (b)に示す。

この計算結果から入射時にCODを考慮した場合のアクセプタンスをトラッキングにより比較すると、3倍もアクセプタンスが大きいことがわかる。

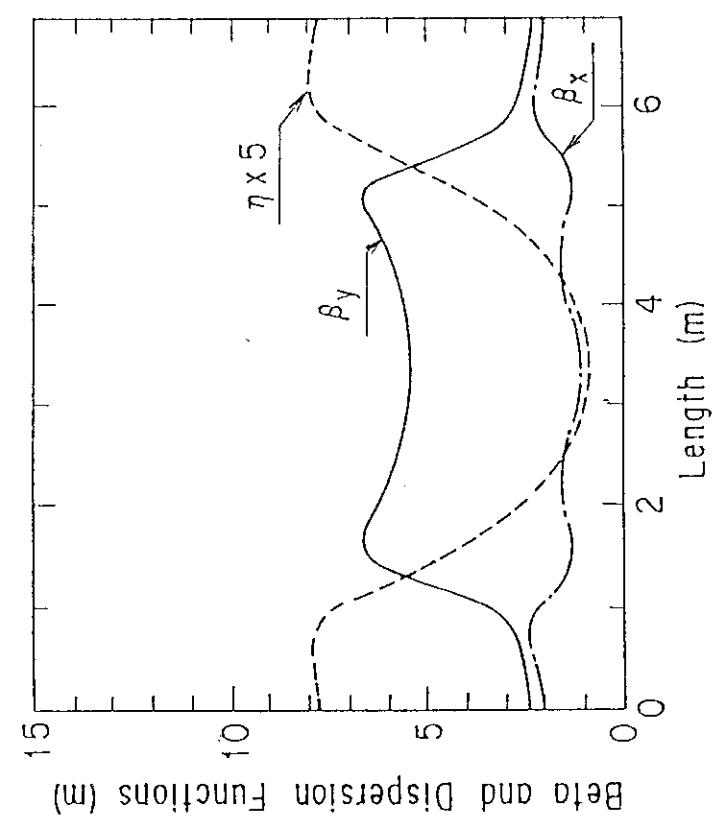
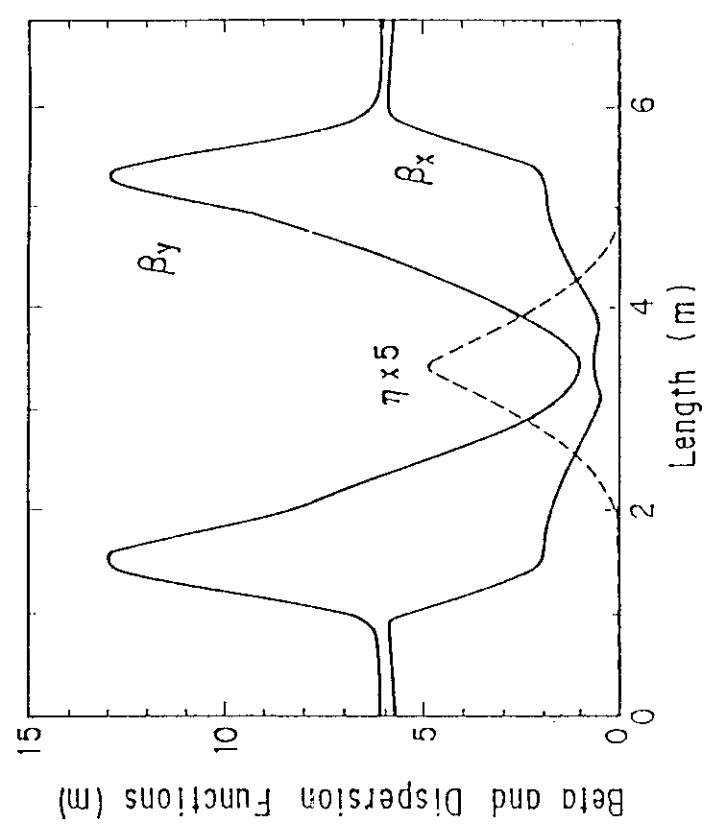
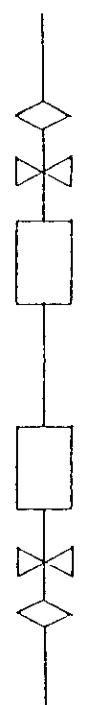
(2) 寿命に関する検討

この運転モードの変更は寿命にも大きく影響を及ぼす。3.2で示したように、JSRの寿命は、真空中に依存した寿命の中で原子核との散乱によるものが大きく効いている。そしてその算出には、ダクト壁との衝突に至る限界角が重要になっている。cod がある場合の限界角は、

$$\theta_c = (A - A_{\text{cod}}) / \beta_{Y\text{MAX}} \quad (5.1)$$

で表されると考えられる。ここで、 A_{cod} は cod による、理論軌道とのずれである。

A タイプは D タイプに比較すると β 関数が小さくしかも、cod も小さい。よって、衝突に至る限界角は大きくなり、寿命は長くなる。それぞれのモードに対する平均真空度と寿命の関係のグラフを図12(a), (b) に示す。この図では参考として平均 cod を考慮した場合もプロットしている。A タイプの場合の電流 0 mA 近傍の寿命は 45 分であるため、平均真空度は cod の幅を誤差と考えると、平均真空度は $3 \sim 4 \times 10^{-9}$ (Torr) となる。この平均真空度の値を D タイプの場合の寿命に適応させると、7 分から 15 分程度の寿命になり、寿命が $1/3 \sim 1/7$ になることがわかる。

図 8 (a) β , η 関数 (Double Achromatic)図 8 (b) β , η 関数 (Achromatic)

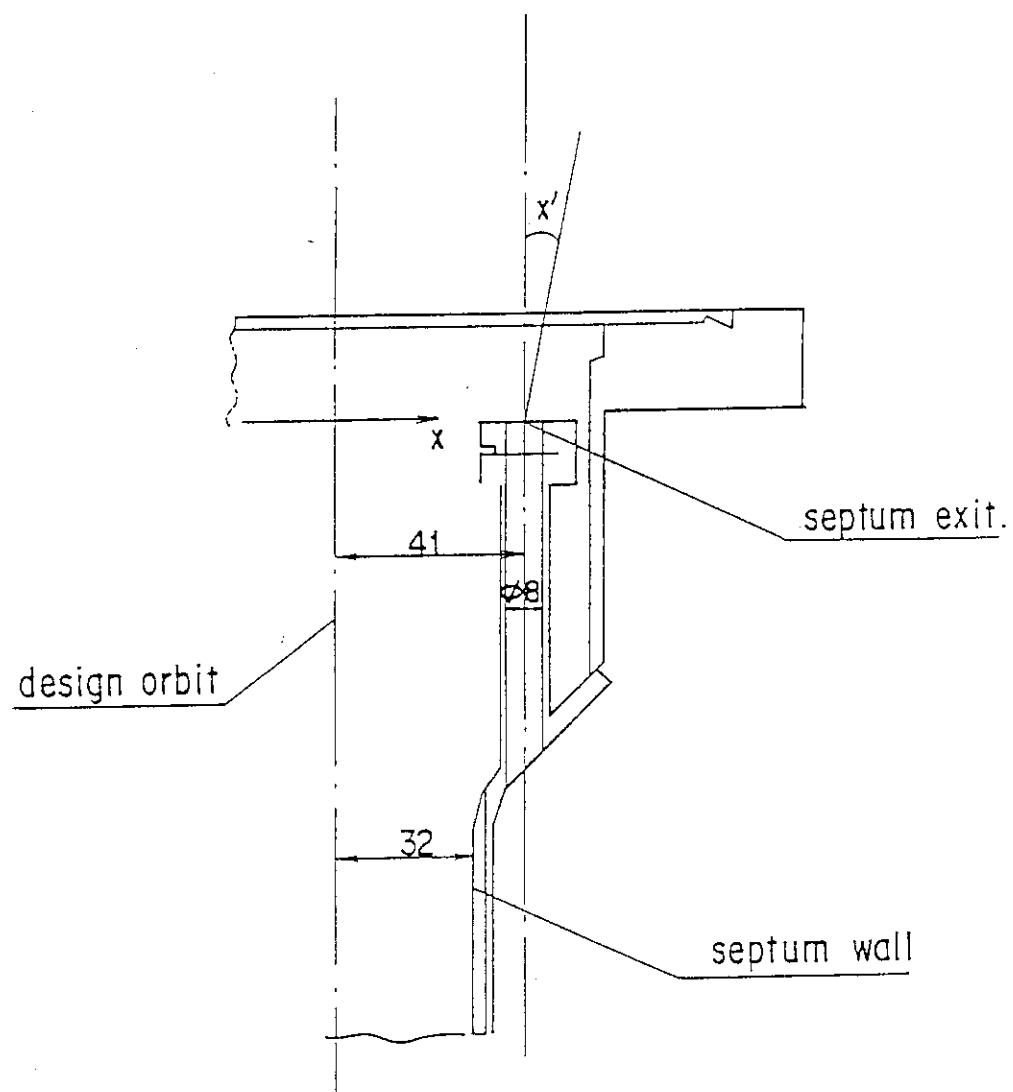


図 9 セプタム出口概略図

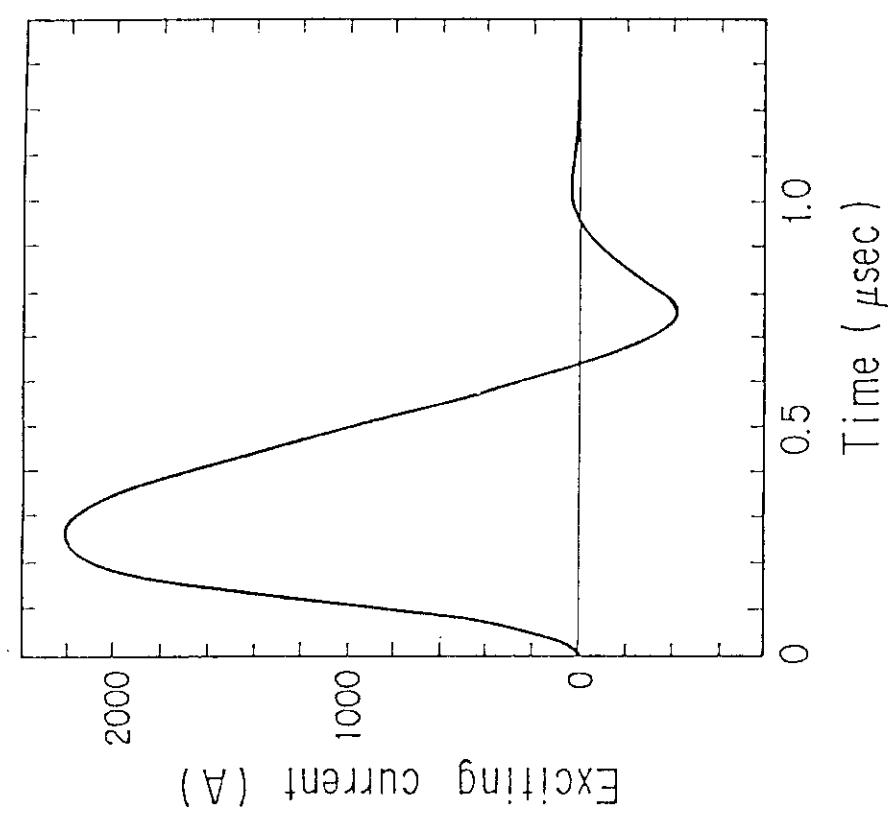


図10(a) キックカーティン電流波形

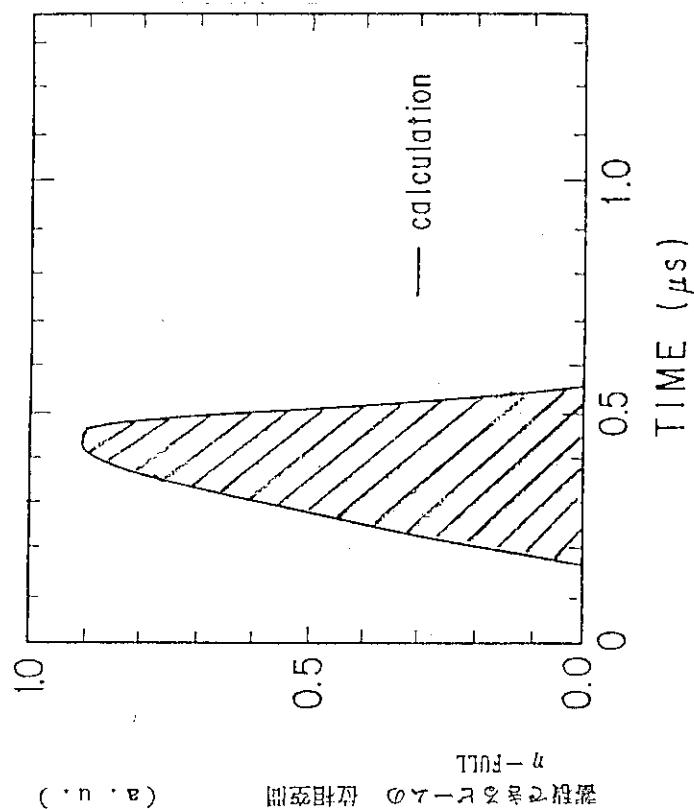


図10(b) キックカーティンミングと位相空間 (a, u, r)

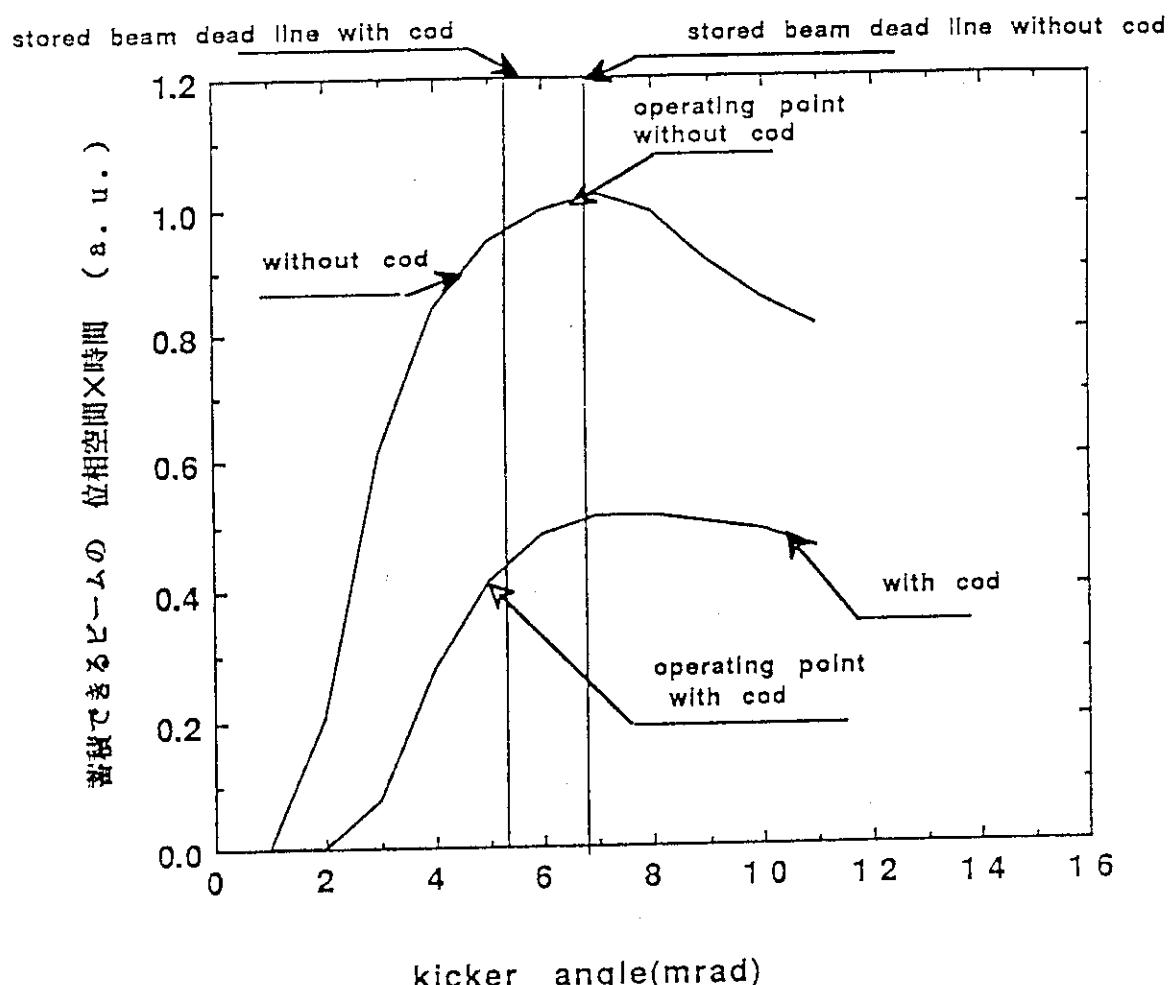


図11(a) キッカー蹴り角と位相空間の広さ dt の関係 (Double Achromatic)

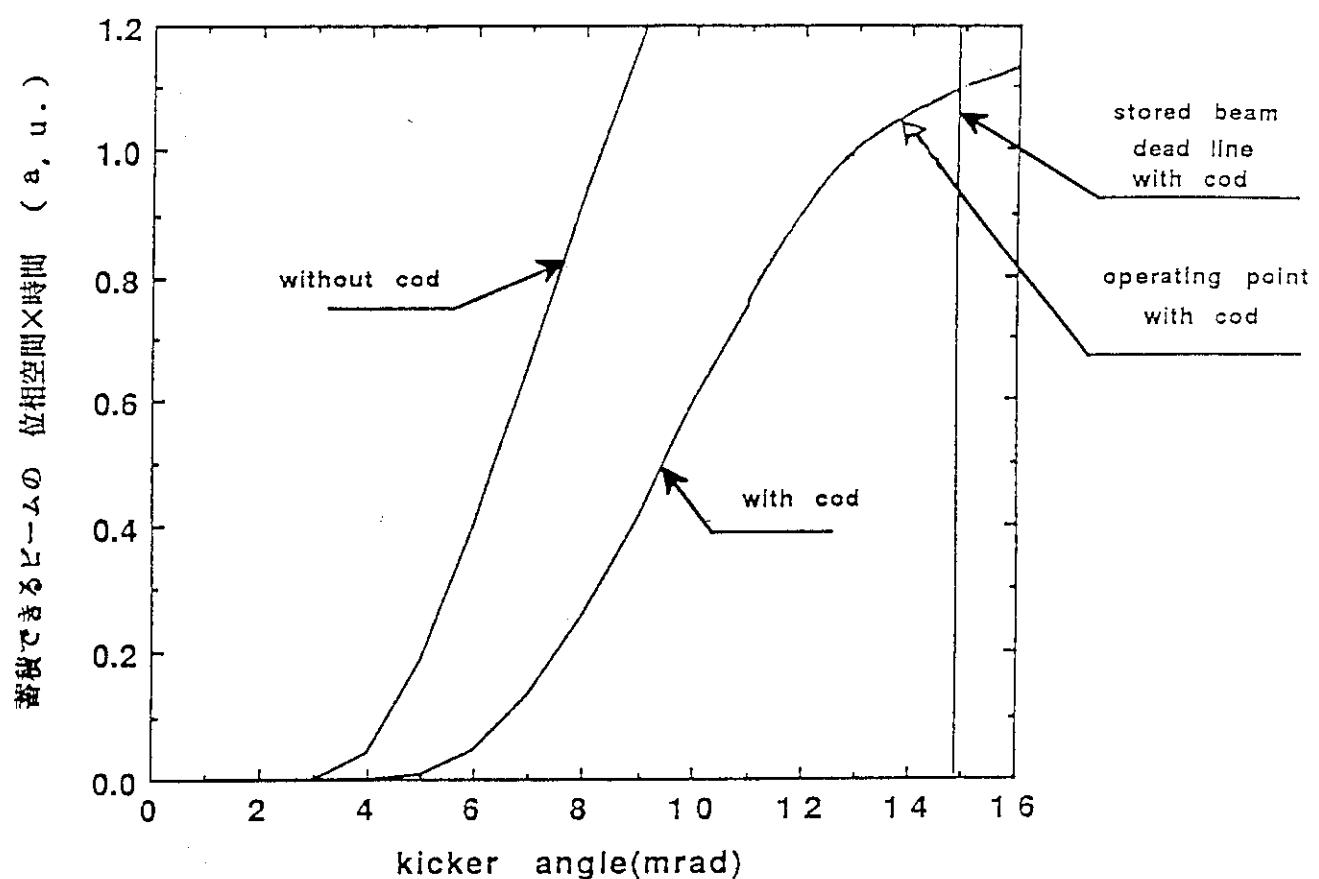


図11(b) キッカー蹴り角とJ位相空間の広さdtの関係 (Aタイプ)

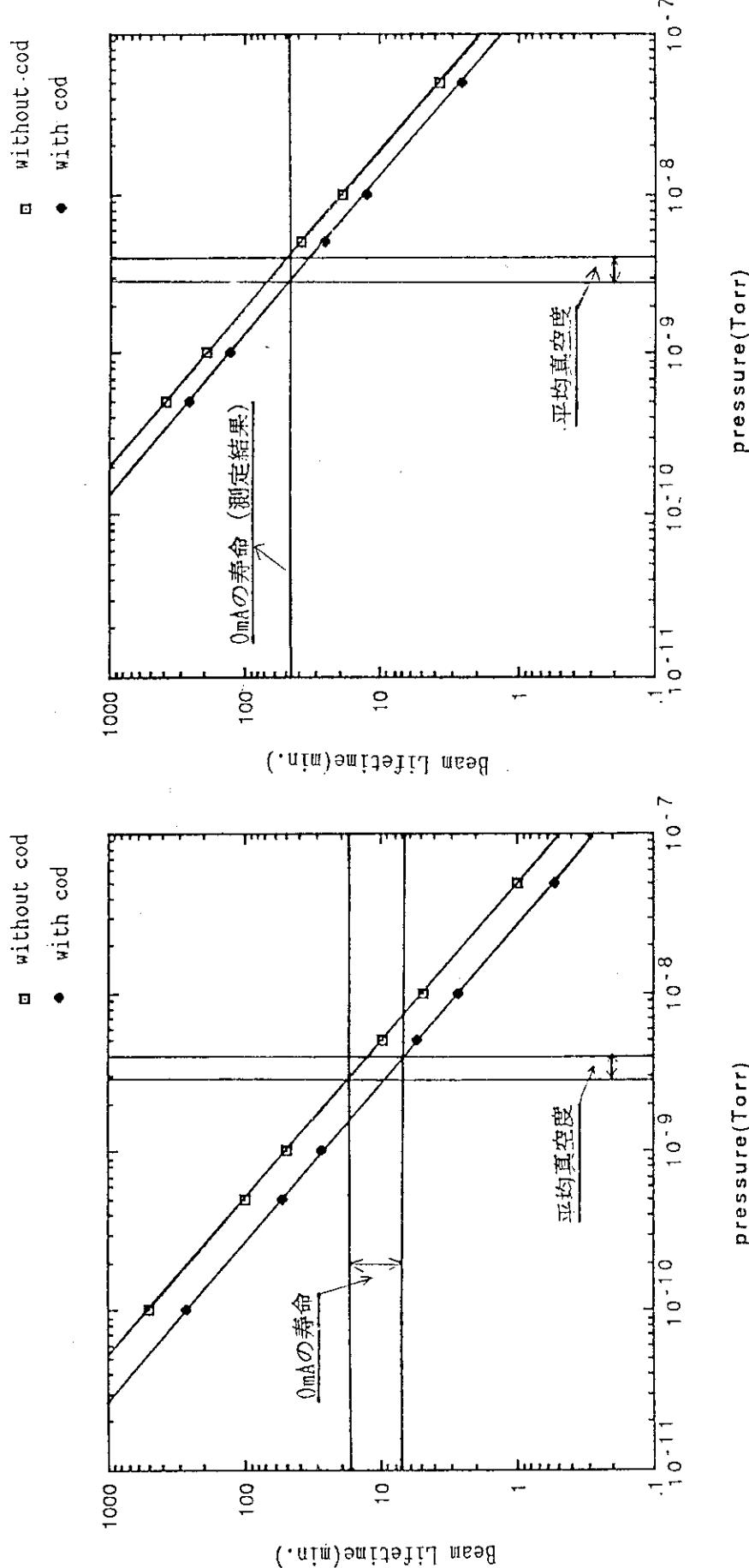


図12(a) 平均真空度と寿命 (Double Achromatic)

図12(b) 平均真空度と寿命 (Achromatic)

6. 考 察

(1) J S R の最大蓄積量

3章で述べた議論から 150 MeVにおける J S R の最大蓄積量を求める。

A タイプの場合 J S R に 1回の入射で蓄積する電流量は 2 mA である。（この値は蓄積電流値 0 mA の状態から最初の 1回の入射での蓄積量を D C C T で測定したものである。）4月6日の寿命の実測値（4.4）式を用いると、（3.3）式において

$$\begin{aligned} A + B &= 2.4 \times 10^{-2} && (\text{A}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1}) \\ C &= 3.67 \times 10^{-4} && (\text{sec}^{-1}) \end{aligned}$$

そして、

$$\begin{aligned} I_{INJ} &= 2 \times 10^{-3} && (\text{A} \cdot \text{sec}^{-1}) \\ I_{MAX} &= (-C + \sqrt{C^2 + 4(A+B) \cdot I_{INJ}}) / 2(A+B) \\ &= 0.289 \text{ (A)} \end{aligned}$$

となる、 J S R の現在までの最大蓄積量は 160 mA であるため（3.3）式だけでは説明することが出来ない。測定結果は、 100 mA 以下のデータを整理したものであるためそれ以上では別の効果を考慮しなければならないことがわかる。（例えばイオントラッピングやその他の不安定性）

図13(a)はイオンクリアニング電極に電圧を印加した場合としていない場合の蓄積後の減少曲線を比較したものであり、 明かに、 電圧を印加した場合の方が寿命が長いことがわかる。また、 それぞれの場合の Decay Rate は、 図13(b)ようになりイオンクリアリングをオフした場合は、（3.1）式に従わないことがわかる。さらに、 イオンクリアリング電極印加電圧 40 V 以下では、 ビームサイズが蛍光灯がふらつくように y 方向に振動（数 Hz 程度）する。

その様子をフォトダイオードアレイで測定したものを図13(c)に示す。これから数十 ms のオーダーでビームサイズが変化している様子がわかる。これらはイオントラッピングが起こっている時にみられる兆候であり、 100 mA 以上では最大蓄積量が（3.3）式で表せない原因の 1つであると考えられる。

(2) 寿命の向上

測定結果からわかるように真空系の改善を考えなければ、 0 mA の寿命でも 45 分以上延びることはない。また、 100 mA で 30 分以上のビーム寿命を得るのに必要な Beam Dose 量は、 110 A · h である。よって、 1 日 100 mA 蓄積し 10 時間運転しても 100 日以上かってしまうことになり、 そのことを含めても真空系の補強を行わねばならないことがわかる。

また、 ダブルアクロマチックモードでは上述の議論での値（入射蓄積量と、 寿命）を考慮すると I_{MAX} が 40 mA 程度になるため、 真空上昇率を改善するにはさらに時間がかかることにな

り、初期の運転には不向きであることが分かる。

(3) Touschek 効果

Touschek 効果による寿命が理論値から大きくずれている原因として Intrabeam Scattering によるエミッタنسの増大や、イオントラッピングによるビームサイズの増大等が考えられ、今後の実験及び解説によって解明する予定である。

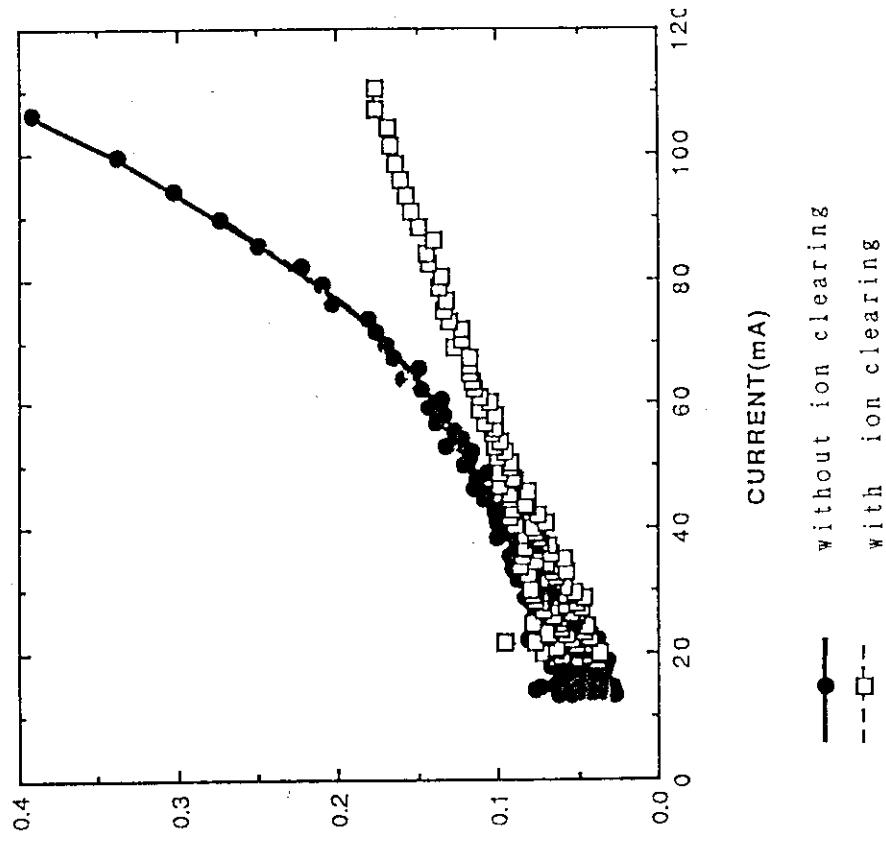


図13(b) イオンクリアリングのオン, オフによる
Decay Rateの違い

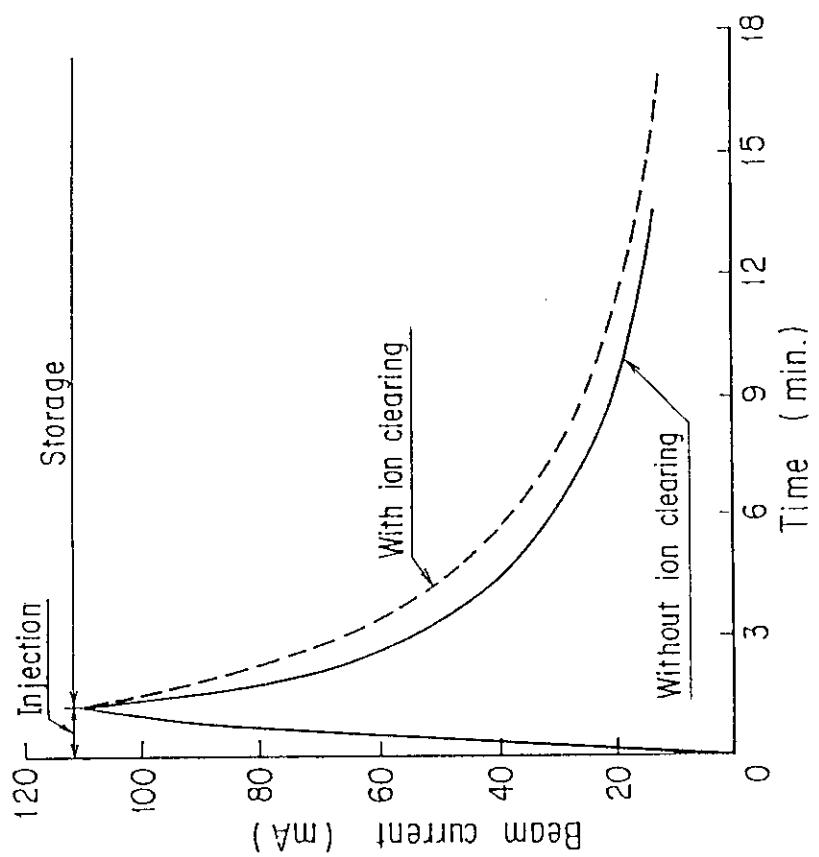


図13(a) イオンクリアリングのオン, オフによる
寿命の違い

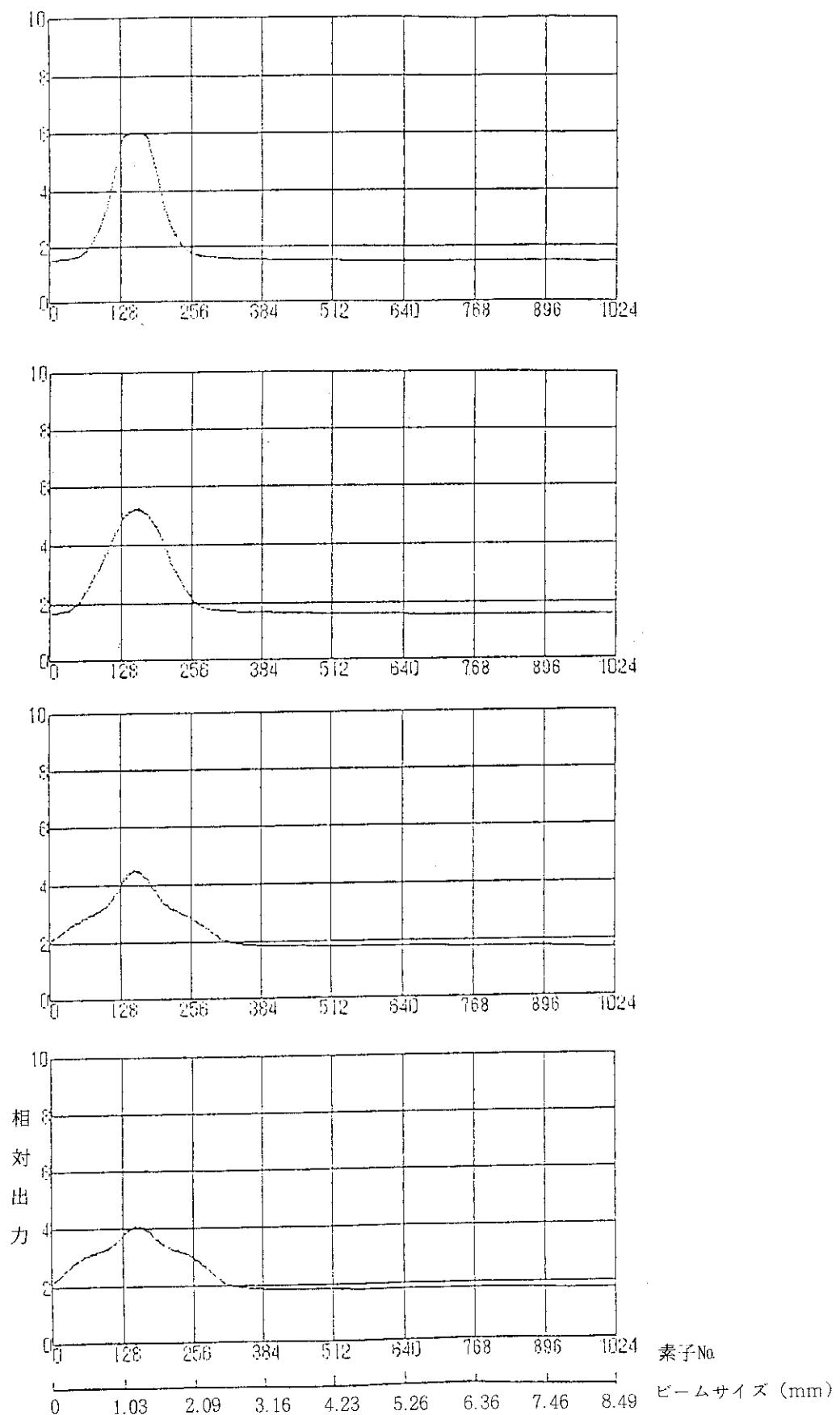


図13(c) フォトダイオードアレイによるビームサイズの変動測定

7. ま と め

- (1) J S R の 150 MeV の 100m A 以下の寿命 (R F 加速電圧 20 kV では) は 真空に依存した寿命が大きく寄与している。そして、ビーム蓄積時の光脱離による真空上昇率は Beam Dose の -0.57 乗に比例している。
- (2) Q F 2 の電流を印加しない場合はダブルアクロマティックモードに比べて寿命は長くそして 1 回の入射蓄積量が多いことが計算により示され、ビーム蓄積が容易な運転モードであることがわかった。
- (3) 現在の J S R の蓄積量の上限は寿命の効果だけでは説明できなく、イオントラッピングなど他の不安定性に起因していることがわかった。

参 考 文 献

- 1) H. Yokomizo, et al. : Proc. of European Particle Accelerator Conf. 1 (1988) 445.
- 2) H. Yokomizo, et al. : Rev. Sci. Instrum. 60(7) (1989) 1724.
- 3) H. Yokomizo, et al. : Nucl. Inst. Meth., A291, (1990) 472.
- 4) S. Harada, et al. : Particle Accelerators 33(1990) 1729.
- 5) K. Yanagida, et al. : Proc. of the 7th Symposium on Accelerator Science and Technology (1989) 4.
- 6) H. Yokomizo, et al. : Proc. of 2nd International Symposium on Advanced Nuclear Energy Research (1990) 273.
- 7) H. Kamitsubo, et al. : Proc. of European Particle Accelerator Conf. 1 (1988) 374.
- 8) M. Hara, et al. : Particle Accelerators 33(1990) 1741.
- 9) T. Harami, et al. : Particle Accelerators 33(1990) 1753.
- 10) H. A. Enge : Rev. Sci. Instrum. 35(1964) 278.
- 11) Takio Tommimasu, et al. : Jpn. J. Appl. Phys. 25, 1706(1987).
- 12) Takio Tommimasu, et al. : Rev. Sci. Instrum. 60(7), 1744(1989).
- 13) Shunji Harada, et al. : JAERI-M 90-124, (1990).
- 14) S. Turner : CERN 89-01, 114(1989).
- 15) Transaction on Nuclear Science vol. NS-32 No5, (1985).
- 16) ESRF Foundation Phase Report(1987).
- 17) OHO' 84 : KEK (1984).