

## 大型加速器と小型加速器

## NTT シンクロトロン放射光施設

山田 浩治\*

## NTT Synchrotron Radiation Facility

Koji YAMADA\*

## Abstract

We report a present status of NTT synchrotron radiation facility. The facility consists of two electron storage rings (Super-ALIS, NAR) and a 15-MeV linac. Since 1989, the rings have been stably operated and have been mainly used for development of micro-fabrication technology. We also report here some topics in commissioning of the rings.

## 1. はじめに

NTT シンクロトロン放射光施設は1987年から1989年にかけて稼動を開始した民間企業初の放射光施設である。主な使用目的は建設ときに将来の露光技術として注目されていたX線露光による半導体微細加工であった。しかしながら現在ではそのような技術的方向性はほぼ無くなったため、加速器関係者の一部にはNTT放射光施設は既にシャットダウンしたのではないかと噂もあったようである。これはひとえに加速器担当者(=著者)の情報発信不足によるものであるが、さらに数年前に著者が関係者に配布した「SORリソグラフィ研究17年のあゆみ」という終結宣言まがいの小冊子も災いしたようである。

ところが実際にはNTT放射光施設には常に多くのユーザーが存在し、今日でも高い稼働率で運転を継続している。そこで本稿ではまずNTT放射光施設の現状を紹介し、有らぬ噂を立てられた加速器達の名誉挽回を図る。また、現状報告だけでは面白くない加速器研究者のために、NTT放射光加速器に特徴的なコミッションング上のトピックスなどを紹介する。

## 2. 施設の概要

図1にNTT放射光施設の平面図を示す。本施設には2台の電子蓄積リング、Super-ALIS<sup>1)</sup>、NAR<sup>2)</sup>、そして両リングに電子を供給する入射用線形加速器<sup>3)</sup>が存在する。これら加速器の基本性能を表1に示す。

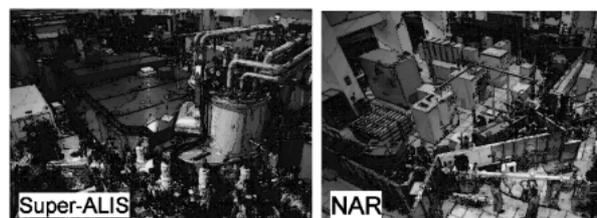
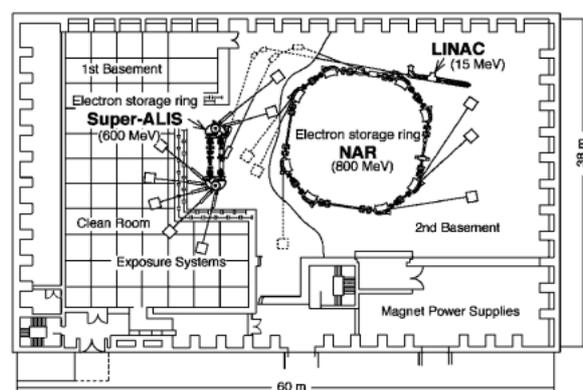


図1 NTT放射光施設の構成

Super-ALISは超伝導偏向電磁石を適用した世界初の電子蓄積リングである。線形加速器からの15 MeV電子とNARからの530 MeV電子の2系統の入射系を持つが、通常運転では後者を適用し、リング内加速した後に600 MeVで蓄積する。本装置の周辺には100 nm以下の超微細加工を想定し、クリーンルームが併設されている。NARは通常型電磁石を使用した電子蓄積リングである。線形加速器から15 MeV電

\* NTT マイクロシステムインテグレーション研究所  
NTT Microsystem Integration Laboratories  
(e-mail: kyamada@aecl.ntt.co.jp)

表1 電子蓄積リングの基本性能

	Super-ALIS	NAR
Max. Energy	600 MeV	800 MeV
Injection energy	15 MeV	15 MeV
	530 MeV (NAR)	
Max. BM field	3.0 T	1.44 T
Orbit radius	0.66 m	1.85 m
Circumference	16.8 m	52.78 m
Betatron tune	1.581/0.587	3.15/1.46
Chromaticity	-0.8/-2.5	-3.3/-0.73
Acc. Frequency	124.855 MHz	124.985 MHz
RF voltage	45 kV	60 kV
Harmonic number	7	22
Energy loss	17.3 keV/turn	19.6 keV/ turn
Natural emittance	940 nm rad	63 nm rad
Critical wavelength	17.3 Å	20.2 Å
Max. stored current	740 mA@600 MeV 1215 mA@530 MeV	135 mA

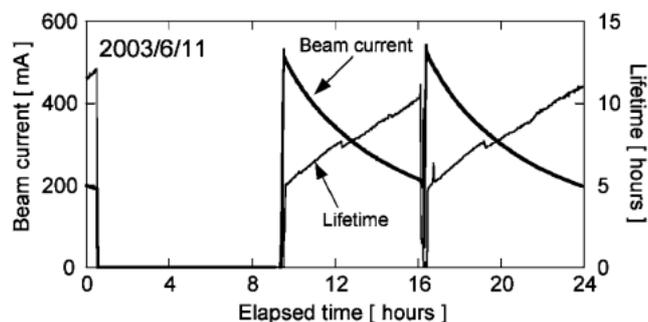


図2 Super-ALIS の蓄積電流とビーム寿命

子を入射し、800 MeV で蓄積する。サイズ、構造とともに高輝度化する前の UVSOR に似た装置であるが、挿入型光源は設置されていない。また NAR は Super-ALIS への入射用シンクロトロンとしての機能も有している。

典型的な運転日における Super-ALIS の蓄積電流およびビーム寿命を図2に示す。Super-ALIS は朝夕2回の入射を実施し、500 mA 以上の電流を蓄積する。NAR も Super-ALIS に同期して運転するが、蓄積運転する日は Super-ALIS より少ない。両リングとも深夜はユーザーの要望が無い限り、ビーム蓄積はしない。また土日休日は運転せず、毎週月曜日はマシンスタディー、あるいは装置保守に充当される。

蓄積電流の電流時間積で示した当施設の稼働状況を図3に示す。ここ10年は定常的に約90万 mA・時/

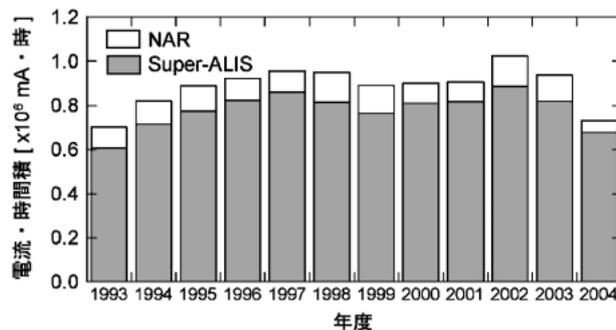


図3 NTT 放射光施設の稼働状況.

表2 NTT 放射光施設のビームライン

Super-ALIS		
SBL1	EUV lithography & evaluation	ASET
SBL2	EUV lithography & evaluation	ASET/EUVA
SBL3	Proximity X-ray lithography	NTT
SBL4	Proximity X-ray lithography	NTT
SBL5	Proximity X-ray lithography	NTT-ATN
SBL7	Photochemical reaction	NTT
SBL8	EUV microscopy	NTT
SBL9	Beam monitor	—
NAR		
ABL2a	X-ray microscopy	NTT
ABL2b	General purpose	NTT
ABL3	Photoelectron spectroscopy	NTT
ABL5	Photochemical reaction/biology	NTT
ABL6a	Photochemical reaction/biology	NTT
ABL6b	Photoelectron spectroscopy	NTT

年度の運転実績を維持しているが、その殆どは Super-ALIS の寄与である。また2004年度に見られる若干の稼働率の低下は後述する Super-ALIS 真空系のトラブルによるものである。また Super-ALIS の稼働率はヘリウム冷凍設備の稼働率に大きく影響されるが、10年以上を通じ安定した稼働状況を維持していることから判るように、ヘリウム冷凍機の稼働率は非常に高い。初期故障の減少と運転・保守技術の向上によりヘリウム冷凍機は定期点検時以外、ほぼ無停止で運転され、1988年の運転開始から2005年8月までの総運転時間は127000時間にも達する。

### 3. 施設の利用状況

ビームラインの設置状況およびそのユーザーを表2に示す。Super-ALIS のクリーンルームビームライン (SBL1~5) の多くを外部ユーザーが利用している。

例えば SBL1, 2 では超先端電子技術開発機構 (ASET) や極端紫外線露光システム技術開発機構 (EUVA) などの組織が波長 13 nm 近傍の極端紫外線光 (EUV) を利用した次世代半導体微細加工技術の研究を実施している。その他、X 線露光技術を適用し、様々な微細加工サービスも実施されている。以上の微細加工系ユーザーにとっては、大電流ビームを安定に蓄積できる加速器性能に加え、プロセス装置が完備した大規模クリーンルームなどの付帯設備が重要であるが、まさに NTT 放射光施設の存在理由はそこにある。

ところで、これら外部ユーザー利用の目的の多くが、放射光を用いない他の微細加工技術の立上であるところが興味深い。例えば EUV 露光では光源に放射光を使う計画はないが、彼らが当てにしているレーザープラズマ X 線源が未完成なので放射光でプロセス検討しているのである。あるいは、微細加工サービスの適用先は ArF エキシマレーザー露光技術のプロセス検討だったり、最近流行のナノインプリントの金型だったりするのである。即ち、NTT 放射光施設はそれ自身が商用加工ツールにはなれなかったが、商用ツールの開発に供される共同利用施設として活路が見出されたのである。

上記以外のビームラインは主に NTT 研究者が利用しているが、本施設では設立当初よりほぼ一人で 1 ビームライン使い放題の非常に恵まれた状況にある。

また放射光以外の利用として線形加速器の電子ビームを誘電体ナノ構造と直接相互作用させ、可変波長の高輝度 X 線を発生させる実験などが行われている<sup>4)</sup>。

#### 4. コミッショニングとトラブル

本施設の電子蓄積リングは、放射光装置として数百 mA の蓄積電流を必要とするにも関わらず、15 MeV

入射で 600 MeV 以上までリング内加速するというかなり無謀な設計思想を持っていた。また Super-ALIS は世界で始めて 180 度偏向の超伝導偏向電磁石を使い、そのラティス構造はそれまで見たことも無い細長いレーストラックである (図 4)。ここでは NTT 放射光施設に特徴的な加速器である Super-ALIS のコミッショニングにおけるトピックスやトラブルについて述べる。

##### 4.1 超伝導偏向電磁石の動特性<sup>5)</sup>

Super-ALIS のコミッショニングで最初につまずきそうなのが、全く放射減衰しない 15 MeV 電子を数百 mA 入射せよという難題である。これに対してはさすがに事前に対策されており、大きなアパーチャーのダクトと斜め下からの 2 次元ビーム入射を採用し、なんとか解決された。まるでプロトンマシンである。

しかしその後の加速が全くできなかった。調べてみると 2 個ある超伝導偏向電磁石の動特性がそれぞれ全く異なり、加速直後に互いの磁場が 20% もずれていた。片側の磁石内部の断熱シールドに誘導電流が流れていると想像された。超伝導磁石は構造が複雑で分解修理は不可能である。またこれらの磁石は直列接続され、単一電源から電源供給しているため、動的な補正も困難である。仕方ないので正常な磁石にシャント抵抗を入れて動特性を鈍らせることにしたのだが、必要な抵抗は 1 Ω, 1 kW の可変抵抗である。そんなものを特注している暇はないので、1 Ω, 1 W の抵抗 1000 本を圧着端子で束ね、手作りした (図 5)。なんとこれが非常に効果的で、加速中の磁場誤差は 0.5% 以下に低減され、少ない電流ながら 600 MeV までビーム加速できるようになった。たった 2 万円で 10 億円の装置が動くようになったのである。

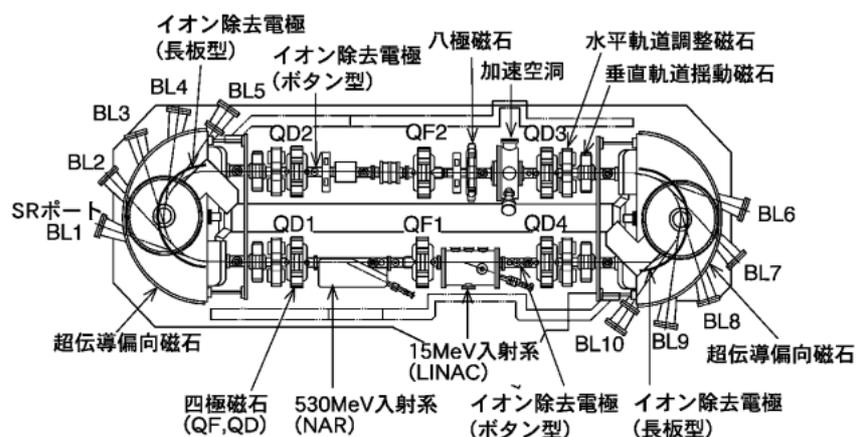


図 4 超伝導電子蓄積リング Super-ALIS の構造

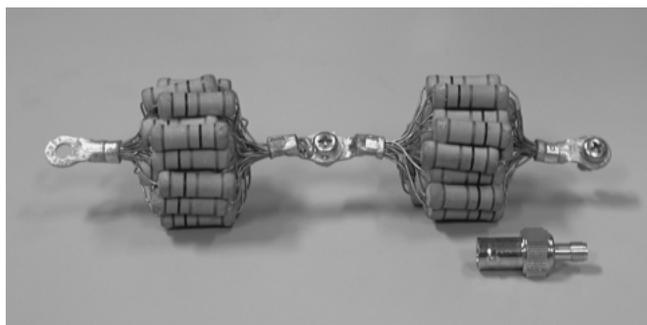


図5 超伝導電磁石動特性補正用抵抗の一部  
(手前に見えるのは SMA-BNC 変換コネクタ)

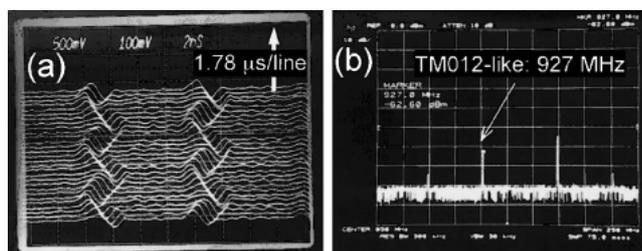


図6 縦方向バンチ結合不安定性の観測例  
(a) Longitudinal bunch motions, (b) a spectrum of electro-magnetic field in the cavity.

#### 4.2 バンチ結合不安定性<sup>6)</sup>

しかしその後、どうしても 50 mA 以上加速できない。調べてみると、放射減衰でビーム体積が小さくなり RF 空洞の高次モードが励起され、バンチ結合不安定性が発生しているようであった。ビームエネルギーは数十から 100 MeV とまだ低いので、不安定性の成長率は非常に大きく、また加速中なのでフィードバックによる安定化も困難であった。横方向の不安定性はなんとか八極電磁石で対策できたが、縦方向のバンチ結合不安定性は対策が難しかった。幸い、詳細な調査を通じ問題の高次モードは確定され(図6)、また RF 空洞には 2 個の可動チューナが設置されており、基本モード周波数と問題の高次モードの周波数がある程度独立に制御可能であった。そこでこれらチューナの 2 次元動作によりビームローディング条件を確保しつつ、バンチ結合不安定性を避けることができた。原因が確定できればなんとか対策できるものである。

#### 4.3 捕獲イオンによるランダウ減衰と大電流蓄積<sup>7)</sup>

以上に述べた 15 MeV 入射方式では様々な理由から、600 MeV で 200 mA のビーム蓄積が限界であった。そこで 1992 年末頃から NAR をブースターにし

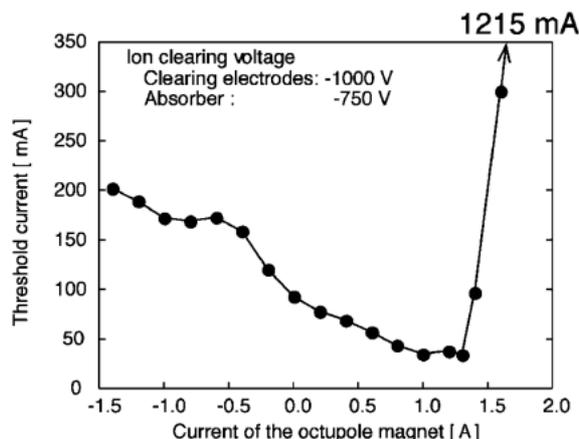


図7 八極磁石励磁量と最大蓄積電流値の関係  
(530 MeV 入射時)

た 530 MeV スタッキング入射に変更したが、これが良く機能し、あっという間に 500 mA 蓄積できるようになった。1200 mA を超えても、まだ入射可能であったが、一部のセラミックダクトが発熱したため、入射を断念したほどである。しかしこれには気が付かない安定化機構が働いていた。即ち、電子ビームに捕獲されたイオンの電場による八極摂動が、横方向運動に対し強いランダウ減衰を与えていたのである。試しに八極磁石をイオンの効果と逆向きに励磁すると図7に示すように 100 mA も蓄積できなくなった。イオン電場と八極磁石が打ち消しあってランダウ減衰効果がなくなったのである。このイオンによるランダウ減衰効果はビーム中性化率が 0.1% 程度でも有効に機能するため、ビーム寿命への悪影響は殆どない。従って現在でもこの現象を利用し、少ない八極磁場により 500 mA の大電流定常運転を実現している。

#### 4.4 ビームプロファイル<sup>8)</sup>

以上の様にビーム電流はユーザーにとって満足できる値になったのだが、そのうちビームプロファイルが傾いており X 線露光強度にムラが出ていると文句が出てきた。調査の結果、超伝導偏向磁石が持つ大きな六極磁場成分と、上下方向の COD とにより大きなスキュー四極摂動が出ていることが判明した。超伝導磁石には六極補正コイルがついているが、磁石中央部を補正するとエッジ部が増えるという代物であった。また COD はユーザーの希望する位置に固定されており変更できない。しかし、このスキュー四極摂動は素性が良くわかっていたので、簡単なフーリエ解析により、ある 1 つの波数成分のみの除去により、ビームプロファイルの補正が可能であることが判明した。具体的には弱いスキュー 4 極磁石を 1 個追加するだけ

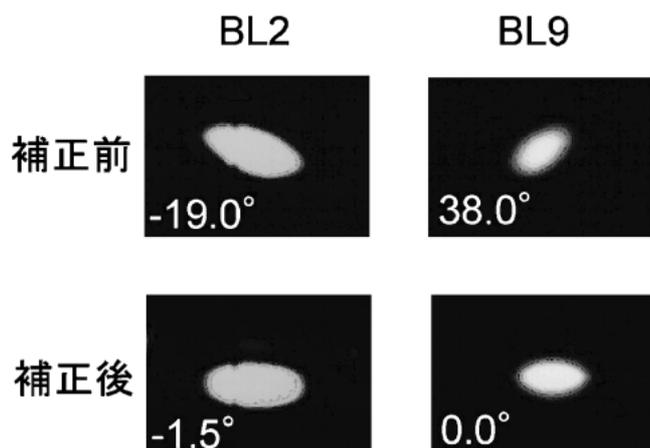


図8 ビームプロファイルの改善例

で良いのだが、図8に示すようにビームプロファイルが劇的に改善された。この対策においては理論解析やシミュレーションと実験結果がよく一致したため、個人的には非常に感動した記憶がある。

#### 4.5 トラブル

2台の電子蓄積リングを長年運用していると、様々なトラブルに見舞われる。装置にとって致命的なものとしては、1992年のSuper-ALISのRF伝送系の大規模放電や、2004年のSuper-ALISのRF空洞内への冷却水漏水などが印象深い。両者とも加速器へのダメージが大きく、現場を目にした著者は非常にショックをうけたものである。しかし、いずれも幸運に恵まれ、最悪の事態は避けられた。前者では空洞給電カップラが放電を免れ、後者では下に述べるように水浸しにはならなかったのである。また各メーカーの全面的な協力を得て2~3ヶ月でなんとか復旧できたのも幸いであった。ここでは記憶に新しいRF空洞漏水について概要を紹介する。

2004年のゴールデンウィーク(GW)直前のことである。著者は当時気になっていた原因不明の真空劣化の原因調査をしていた。結局大気側からのリークチェックでは原因は判らず、GWの停電に備え空洞冷却水を停止したその時である。イオンゲージの表示が一気に跳ね上がった。通水停止のショックで、どこかの冷却水配管にあった亀裂が拡大し、真空内に漏水したのだ。四重極質量分析器の分圧チャートがカラフルに振り切っていたのが目に焼きついている。リークチェック用に起動済みであったターボポンプですぐに排気したが、真空計は空しくも1 Pa近くにまで至った。そのうち何故か $10^{-3}$  Pa程度(だったと思う)まで真空が回復した。真空中にリークした水は蒸発熱に

より冷却されて氷となり、リーク穴を塞ぐと言われていた。この氷が頑張っている間にリークした配管を真空排気する緊急措置をとった。漏れたのはチューナ冷却水用のフレキ管であった。Super-ALISのRF空洞はリング本体に対し真空的に隔離できないため、結局ダメージはリング全体に及んだ。鬱としたGWの後にメーカーの協力を得てチューナ(ついでに給電カップラも)交換し、ベーキング、RFエージングを経て現状復帰した。

RF伝送系の放電もRF空洞内漏水も、おいそれとは体験できないトラブルで、良い勉強になったが、もう充分である。

#### 5. おわりに

以上、苦勞談ダイジェストになってしまったが、このような苦勞、特にコミッショニングを経験した研究スタッフは今となっては著者だけとなってしまった。放射光施設は一応、当研究所の重要施設であり、安全管理にも気を使うため、組織としては様々な支援体制を構築されているし、加速器系研究スタッフの意見もある程度尊重されている。しかしながら、加速器系研究スタッフの人数に関してはなかなか都合がつかないようである。当初は、真空系、RF系、電磁石系、制御系、入射系、ビームダイナミクス系などにそれぞれ担当者がいたのであるが、コミッショニングが一段落すると、あっという間に加速器系研究スタッフは3名にまで激減してしまった。そもそも原子核系の研究所でないため組織としては加速器に対する思い入れがない。従って、取り敢えず維持費は出すが、人は出さない方向性になるのは仕方がないことであろう。とにかく2~3人で真空系からビームダイナミクスまで面倒を見つつ、さらに施設の運用管理から放射線取扱主任者まで任されてしまうのである。

しかし悪いことばかりではない。本誌2巻2号にて野田章先生が述べられたように、小研究室ではこのような苦勞を通じ、全体を見通す訓練がなされるのである。この訓練により、理工学分野から人間関係に至る幅広い知識と経験を身につけることができる。また、学問的な見地から言えば、力学、量子力学、電磁気学、プラズマ物理などの基礎的な知識に基づき、様々な分野における現象を整理して解釈するスキルを身につけることができる。

このスキルは加速器分野の研究を遂行するに限らず、他の分野へ研究活動を拡大する際にも役立つ。例えば、加速器中の電磁波や電子ビームのダイナミクスは、周期系における電磁波や電子系の波動現象とい

う一般的な系を通じ、固体物理における電磁波・電子系の波動現象や最近流行のフォトニック結晶における電磁波伝播などに深いつながりがある。

著者はといえば、未だ上述のような達観したレベルには程遠いが、加速器科学をベースに少しばかり視野を広げてみようと考えている。例えば最近、極微小電磁波導波系に興味があるが、その一種であるフォトニック結晶導波路における電磁波伝搬モードの解釈には、進行波型線形加速器における電磁波伝搬のアナロジーが重要であった<sup>9)</sup>。

NTT 放射光施設を含め、小規模な加速器施設の研究者には逆境は付き物である。しかし著者は最近、適度な逆境は進化の源泉と思うことにしている。

### 謝辞

本項をまとめるにあたり、NTT 放射光施設の建設、運用、維持管理に協力していただいた各企業ならびに NTT 関係者の皆様に心よりお礼申し上げます。

### 参考文献

- 1) T. Hosokawa, T. Kitayama, T. Hayasaka, S. Ido, Y. Uno, A. Shibayama, J. Nakata, K. Nishimura and M. Nakajima, Rev. Sci. Instrum. 60, 1783 (1989).
- 2) S. Shibayama, T. Kitayama, T. Hayasaka, S. Ido, Y. Uno, A. Hosokawa, J. Nakata, K. Nishimura and M. Nakajima, Rev. Sci. Instrum. 60, 1779 (1989).
- 3) T. Hosokawa, T. Kitayama, T. Hayasaka, S. Ido, Y. Uno, A. Shibayama, J. Nakata, K. Nishimura and M. Nakajima, Proc. of 1989 IEEE Particle Accelerator Conference, 1459 (1989).
- 4) K. Yamada, T. Hosokawa and H. Takenaka, Phys. Rev. A 59, 3673 (1999).
- 5) K. Yamada, M. Nakajima and T. Hosokawa, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-41, 369 (1994).
- 6) K. Yamada, M. Nakajima and T. Hosokawa, Nucl. Instr. and Meth. A 382, 379 (1996).
- 7) K. Yamada, M. Nakajima and T. Hosokawa, Nucl. Instr. and Meth. A 370, 323 (1996).
- 8) K. Yamada and T. Hosokawa, Particle Accelerators. 57, 77 (1997).
- 9) K. Yamada, H. Morita, A. Shinya and M. Notomi, Opt. Com. 198, 398 (2001).