

# A STUDY OF BEAM LIFE TIME OF NEA-GaAs CATHODE

Lei Guo<sup>1</sup>, Masao Kuriki<sup>1</sup>, Hokuto Iijima<sup>1</sup>, Kentarou Miyosi<sup>1</sup>

The Graduate School of Advanced Sciences of Matter Hiroshima University

1-3-1,kagamiyama,higashihiroshima,hirosima

## Abstract

We report results of test experiments of the NEA (Negative Electron Affinity) GaAs photo-cathode regarding to the extracted beam charge, namely beam life time. NEA-GaAs photo-cathode has advantages on high quantum efficiency, generation of ultra-low emittance and polarized electron beams. On the other hand, operational life time of NEA GaAs cathode is limited. Especially, the beam life time regarding on the extracted beam charge, has become a major obstacle on the practical applications. We performed experiments of beam extraction from NEA GaAs cathode and found that the damage coefficient of a single ion impact to the cathode was constant over the examined ion kinetic energy. By extrapolating to the high voltage corresponding to the real gun operation regime, the beam life time could be  $2.73E-9C.Pa/mm^2$  at 500kV. This number gives 8572 sec operational beam life time by assuming 10mA beam current, 1.E-10Pa in pressure, and  $3.14mm^2$  beam spot ; It suggests that 10mA operation of the NEA GaAs with such small beam spot is realistic.

## NEA-GaAs 光陰極のビーム寿命についての研究

### 1. はじめに

NEA(Negative Electron Affinity) とは真空のエネルギー準位が半導体の伝導帯の最低準位よりも低い特殊な表面状態であり、NEA-GaAs フォトカソードは物質のバンド構造による光励起の選択性を利用した偏極電子ビーム生成、NEA という特殊な表面状態に由来する極低エミッタンスビームの生成、高い量子効率など、多くの特長を有しており、ILC<sup>[1]</sup>や ERL<sup>[2]</sup>を始めとする多くの計画における電子源として開発が進められている。しかし使用中に NEA 表面が劣化し、光電子放出の量子効率が減少するという寿命問題が実用化の上で大きな障害となっている<sup>[3]</sup>。

今までに NEA-GaAs の寿命には残留ガス吸着、熱脱離、イオン逆流(IBB :Ion Back-Bombardment)という三つのプロセスがあることが明らかとなっている<sup>[3][4]</sup>。そのうち、電子ビームが残留ガスをイオン化し、これがカソードに逆流して NEA 表面を壊す IBB が大電流での電子ビーム生成において最大の問題となっている。以前我々は IBB によるビーム寿命の簡単な解析を行った<sup>[3]</sup>。この解析では発生するイオンは電子ビーム軌道上に一様に分布し、発生したイオンは必ずカソードに逆流すると仮定していた。しかし現実には、イオン化の確率は電子ビームのエネルギーに依存し、結果として位置に依存する。また逆流の確率も一様ではない。そこで本研究では、これらの効果を取り入れ、IBB による量子効率の劣化プロセスをより定量的に評価し、ビーム寿命に関する解析を行った。

### 2. IBB による劣化モデル

IBB による寿命劣化は、単位時間当たり、単位面積あたりにカソードに衝突するイオン密度に比例す

ると考えられる。逆流するイオン密度を  $n_B$  として、量子効率 $\eta$ の時間変化は、

$$\frac{dn}{dt} = -\sigma_{NEA}n_B\eta \quad (1)$$

と表すことができる。 $\sigma_{NEA}$ は逆流するイオンが NEA を壊す影響係数で面積の次元を持つ。今、電子ビームの進行方向を  $z$  にとり、運動エネルギー $E$ を持つ電子が $[z, z+dz]$ の微小区間で生成するイオン数  $dN_i$  はイオン化断面積 $\sigma(E)$ を用いて、

$$dN_i = N_e n_R \sigma(E) dz \quad (2)$$

と表せる。ここで、 $N_e$ は単位時間あたりの電子数、 $n_R$ は残留ガス密度である。その時カソードに衝突するイオン密度  $dn_B$  は、カソードへの逆流の確率  $\rho(z)$  を用いて

$$dn_B = \rho N_e n_R \sigma(E) dz / S \quad (3)$$

と表すことができる。ここで、 $S$ はカソードの面積である。従ってカソードに衝突するイオン密度は式(3)を  $z$  で積分して、

$$n_B = \frac{N_e n_R}{S} \int_0^z \rho(z) \sigma(E) dz \quad (4)$$

となる。残留ガス密度  $n_R$  は理想気体を仮定し  $n_R = P/kT$  ( $P$  は真空度、 $k$  はボルツマン定数、 $T$  は気体の温度) と圧力により表される。また、実効的にカソードの面積はレーザーの照射範囲であるので、 $S$  はレーザーのスポットサイズと等しいと仮定し、逆流確率  $\rho$  はこの領域にイオンが逆流する確率と定義する。カソード上での電子密度  $J = I/(eS)$  ( $e$  は素電荷)を用いて、式(4)を代入すると式(1)は、

$$\frac{d\eta}{dt} = -\frac{\sigma_{NEA}PJ}{ekT} \int_0^z \rho(z)\sigma(E)dz \quad (5)$$

となる。一般的に真空度は発生するビームの影響などにより変化するので、この場合この微分方程式の解は

$$\eta = \eta_0 \exp\left(-\frac{\int PJdt}{\theta}\right) \quad (6)$$

となる。ここで $\theta$ は $[C \cdot Pa/m^2]$ の単位を持つビーム寿命で

$$\theta = ekT/\sigma_{NEA} \int_0^z \rho(z)\sigma(E)dz \quad (7)$$

で定義される。本解析では $\sigma(E)$ として Thomson のイオン化断面積、

$$\sigma(E) = N \frac{\pi e^4}{E^2} \left(\frac{E}{I} - 1\right) \quad (8)$$

を用いた<sup>[8]</sup>。ここで  $N$ は最外殻の電子数、 $I$ はイオン化エネルギーである。残留ガスの主成分は水素と仮定し、 $I = 13.6[eV]$ という値を用いた。

本解析では、式(7)から $\sigma_{NEA}$ を評価するために、 $\theta$ を測定データから求めた。このことは4章で詳しく説明する。式(7)中の逆流確率 $\rho(z)$ は、実験装置の CST-Studio による電場解析、またその電場を用いた General Particle Tracer(GPT)を用いた電子ビームおよびイオンビームトラッキングのシミュレーションから求めた。電場の解析については本学会での三好による発表<sup>[6]</sup>を参照のこと。次節においてイオンの軌道解析について説明する。

### 3. イオン逆流のシミュレーション

本解析でのビーム寿命測定には広島大学が所有する光陰極試験装置 HUES-1<sup>[6]</sup>を用いている。三好<sup>[6]</sup>により求められた装置内の電場分布を用いて GPT により計算した電子ビームの軌道を図2に示す。横軸は電子ビームの進行方向に相当するカソードからの距離  $z$ 、縦軸は各々水平方向、垂直方向の位置をあらわす。ここでは電子ビームはカソード上に  $\sigma = 0.4mm$  のガウス分布により、 $\pm 2\sigma$  の領域に発生させている。ビーム電流は  $2\mu A$ 、 $V_B$  を  $-150V$  としている。カソードから発生した電子は水平・垂直方向に発散し、加えてテーブルに印加された電圧の効果によりチェンバー上方へ蹴られている。電子軌道のシミュレーションは  $V_B$  を  $-70 \sim -1200V$  まで変えて行った。

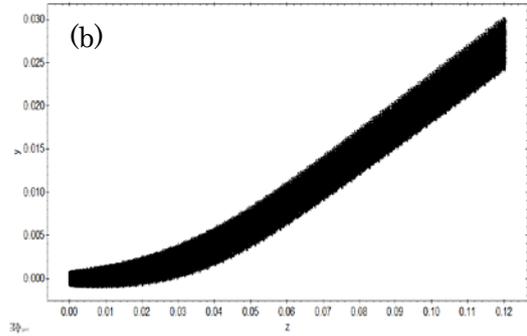
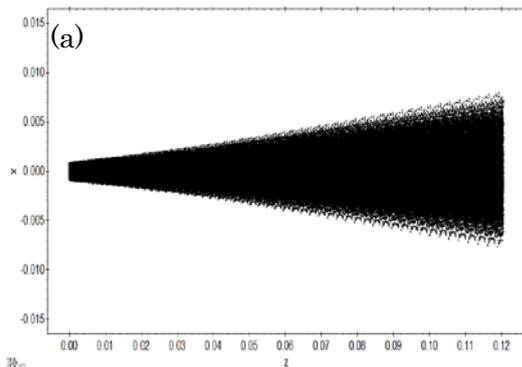
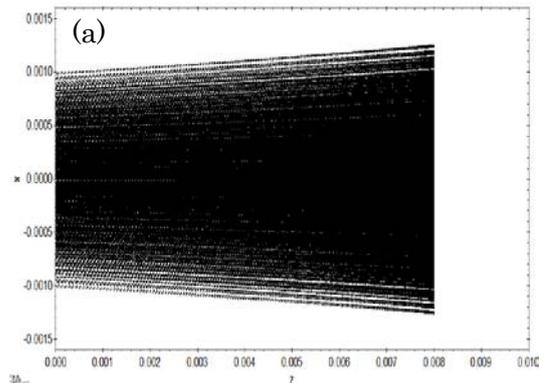


図2：初期ビーム半径を  $0.8mm$ 、ビーム電流を  $2\mu A$ 、バイアス電圧を  $-150V$  にしたときの電子ビーム軌道。(a)水平方向、(b)垂直方向。

イオン逆流確率  $\rho$  の計算はこれら電子ビーム軌道計算の結果を用いて行った。ある位置  $z$  において、電子ビームサイズに等しいガウス分布によりイオンを発生させた。イオンは  $H^+$  を仮定し、各位置で  $1000$  個の粒子を設定した。これを初期状態として、同様に GPT を用いてイオンの逆流軌道をシミュレートした。シミュレーションは各バイアスに対して、イオンの発生位置を変えながら行った。図3に  $V_B = -150V$ 、 $z = 8mm$  で発生させたイオン軌道の結果を一例として示す。イオン流は水平・垂直方向に収束し、今度はテーブルに印加された電圧の効果によりカソード下方へ蹴られているのが分かる。

実験で測定される量子効率レーザーの照射範囲に限られるので、逆流したイオン数  $N_B$  はこの範囲内のものを数え、その値を発生イオン数である  $1000$  で除したものを  $\rho$  とした。図3(c)に示してある点がイオンのカソード上への逆流位置、点線で示してある領域がカソード領域である。 $\rho$  を各々の電圧において  $z$  の関数として求めた。図4に各バイアス電圧  $V_B$  の、カソードからの距離  $z$  に対する  $\rho$  の計算結果を示す。いずれのバイアスでも  $z = 14mm$  以上の距離では  $\rho = 0$  となっている。数値積分を行うためには  $\rho$  の解析的表現が便利である。そのため五次の多項式で近似し、それを用いて数値計算を行った。図4中の波線は五次の多項式をデータに fit させた結果を示す。



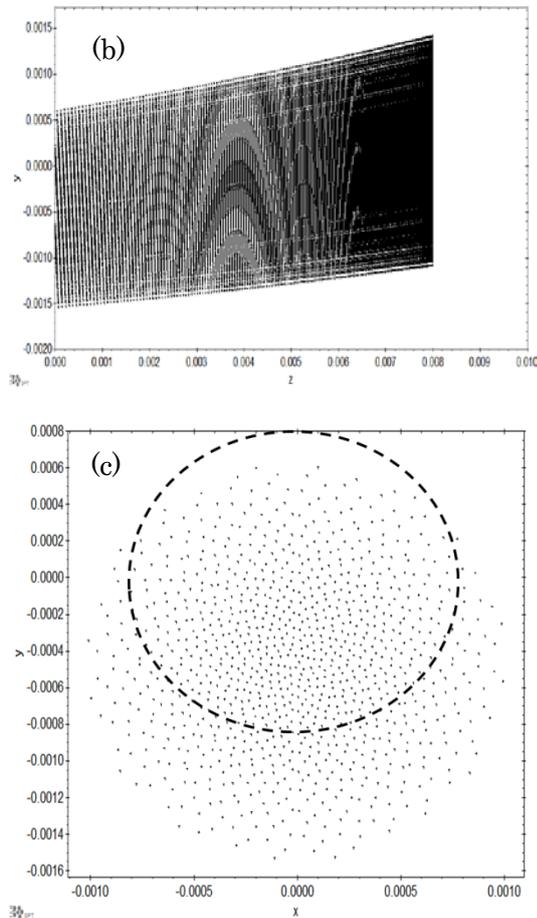


図 3:  $z=8\text{mm}$ 、バイアス電圧を $-150\text{V}$ にしたときのイオン逆流軌道。(a)水平方向、(b)垂直方向、(c)カソードに逆流したイオンの  $x$ - $y$  平面分布。破線はレーザースポットサイズを表す。

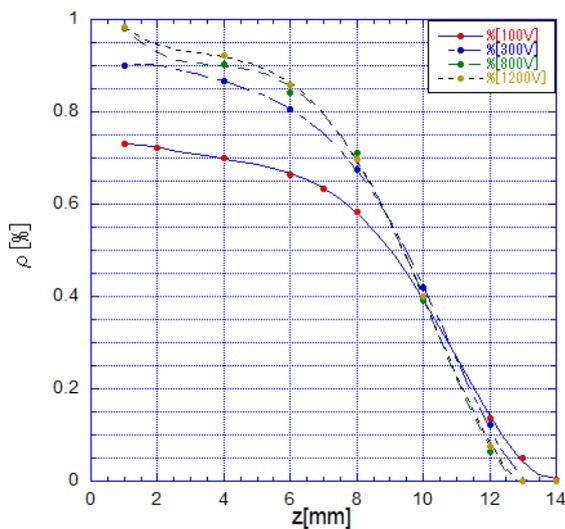


図 4: バイアス  $V_B=-100\text{V}, -300\text{V}, -800\text{V}, -1200\text{V}$  に対する時  $z$  を変化させた場合の  $\rho$ 。図中の波線は 5 次の多項式をデータに fit させた結果を示す。

また、ある位置における断面積を求めるためには  $E$ - $z$  の相関式が必要である。図 5 はバイアス電圧  $-100\text{V}$  において、電子ビームのエネルギーを  $z$  の関数として表したものである。 $E$  を  $z$  について線形と仮定し、その係数を求めた。図 5 では  $E(V=100) = 2318 z [\text{eV}/\text{m}]$  となる。

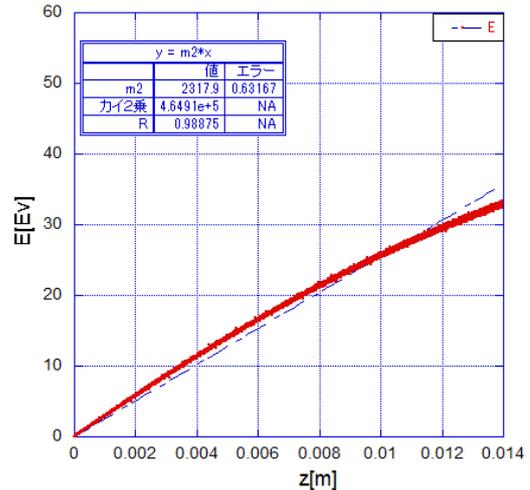


図 5 引出電圧  $V_B = -100[\text{V}]$  で電子を加速したときの  $z=14[\text{mm}]$  までのエネルギーの変化。

以上のように求めた断面積と逆流確率の  $z$  についての積分値をバイアス電圧の関数として図 6 に示す。イオン化断面積  $\sigma(E)$  は  $-30\text{V}$  くらいで最大値をとるが、この積分値はバイアス電圧  $-300\text{V}$  で最大値をとり、電圧があがるにしたがいゆるやかに減少していくことがわかる。

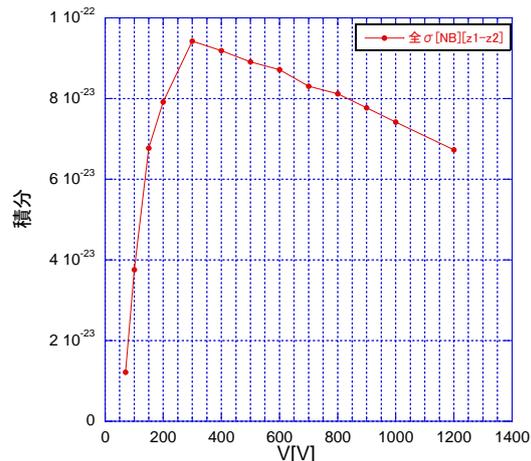


図 6  $\int_0^z \rho(z)\sigma(E)dz$  をバイアス電圧の関数として表したもの。

#### 4. ビーム寿命 $\theta$ の測定と解析

実験は広島大学のフォトカソードテストベンチでおこなった<sup>[5]</sup>。NEA-GaAs カソード活性化の後、電子ビーム引出実験をおこなった。カソード活性化の詳細については文献[7]を参照のこと。電子ビーム生成のため  $46\mu\text{W}$  の He-Ne レーザ ( $\lambda=633\text{nm}$ ) を連続

的に照射し続けた。レーザーのスポット径は  $\sigma = 0.4\text{mm}$  のガウス分布により、 $\pm 2\sigma$  の領域に発生させている。この測定をビームモードと呼ぶ。ビームモードでの量子効率の変化は、ガス吸着による効果と IBB による効果を含むものと考え、以下の式で表される。

$$\eta = \eta_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \exp\left(-\frac{\int JPdt}{\theta}\right) \quad (9)$$

ここで  $\tau$  はガス吸着による寿命である。レーザーの照射パワーが低い場合はガス吸着が支配的となるので、ビームモードの測定後にレーザーを 20 分間隔で 2 秒間だけ照射して量子効率の時間変化を測定した。これをダークモードと呼ぶ。このダークモードの測定から  $\tau$  を求め、ビームモードのデータからその効果を除くことで  $\theta$  を実験的に求めた。この一連の測定をバイアス電圧を変化させながら繰り返した。図 7 は電圧-100V におけるダークモードの測定例である。このデータから  $\tau$  を求める。実線はフィット関数の結果である。

図 8 は求められ  $\tau$  により補正した  $\eta$  を  $JP$  の積分値の関数として表示したものである。この図の傾きから  $\theta$  が求められる。図 9 に求めた  $\theta$  をバイアス電圧の関数として表す。

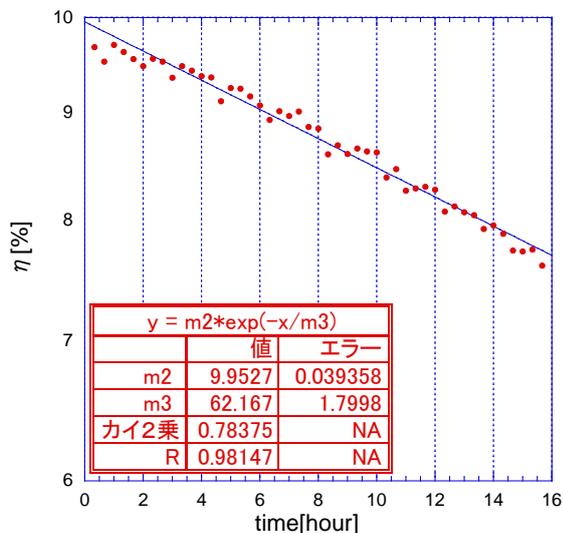


図 7 電圧-100V におけるダークモードの測定例。横軸は時間、縦軸は QE で、赤点が測定値、実線は指数関数によりフィットした結果をあらわす。

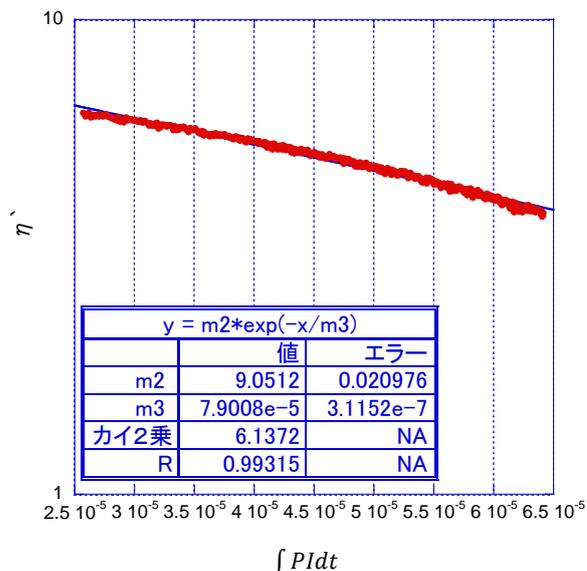


図 8 補正した量子効率を  $JP$  の積分値の関数として表示したものの。赤点が測定値、実線がフィット式(9)によりフィットした結果。

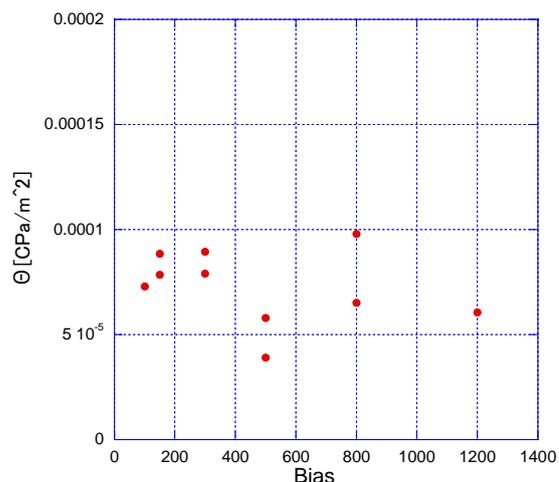


図 9 ビーム寿命  $\theta$  の解析結果をバイアス電圧の関数として表したものの。

$\theta$  を用いて式(7)から  $\sigma_{NEA}$  を求めた。その結果を図 10 に示す。ここで気体の温度は室温 ( $T=300\text{K}$ ) とした。図 10 から明らかなように、測定された範囲において、 $\sigma_{NEA}$  にバイアス電圧依存性はみられなかった。平均をとると、その値は  $1.33 \pm 0.49\text{E-}13\text{m}^2$  であった。

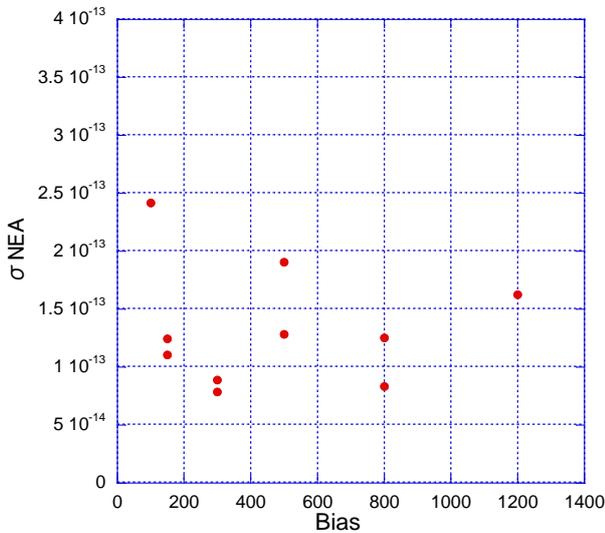


図 10 イオン衝突の影響係数 $\sigma_{NEA}$ の解析結果をバイアス電圧の関数として表したものの。明確な電圧依存性は見られない。

以上の結果を用いて、500kV の電子銃において NEA-GaAs フォトカソードを使用した場合に予測されるビーム寿命を外挿により推測することが可能である。一次元系を仮定し、イオン逆流確率を  $\rho = 1$  として、すべてのイオンがカソードに逆流すると仮定する。またカソードとアノード間隔を 10cm とすると、式(8)により $\theta$ は  $2.73E-9C.Pa/mm^2$  と求められる。温度を室温  $T = 300K$  にしている。真空圧力  $1E-10Pa$ , ビームスポット径  $3.14mm^2$  を仮定した場合のビーム寿命として、85.7C, 10mA 運転時で 2.38 時間の連続運転が可能であることを示すものである。

## 6. まとめ

GaAs フォトカソードのビーム寿命特性について、解析をおこない、イオン衝突によるカソードの量子効率への影響係数 $\sigma_{NEA}$ を求めた。この値は異なるバイアス電圧に対して、測定した範囲でほぼ一定であり、その平均値は  $1.33 \pm 0.49E-13 m^2$  であった。この値から 500 kV の電子銃で予測される運転可能時間を外挿によりもとめ、10 mA での ERL において、85.7C, 2.38 時間の連続運転が可能であることを示すものである。

## 7. 謝辞

本研究は文部科学省の量子ビーム基盤技術開発プログラム「超伝導加速による次世代小型高輝度光子ビームの開発」および高エネルギー加速器研究機構による大学等連携支援事業のサポートのもとに行われた。

## 参考文献

- [1]羽島良一、“コンパクト ERL の設計研究”
- [2]“ILC Reference Design Report”, ILC-Report-2007-1, 2007
- [3]H.Iijima, et al., Proc. of International Particle Accelerator

Conf. (IPAC 2010), TUPE086, 2010

[4]正中智慧, “GaAs 光カソード加熱によるダーク寿命の低下についての研究” 6<sup>th</sup> Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2009

[5]久保大輔, “クライオポンプと NEG ポンプを使用した光陰極試験装置開発”, 7<sup>th</sup> Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2010

[6] 三好健太郎, 平成 23 年度学士論文, 「光陰極試験装置における 3 次元トラッキングシミュレーション」

[7]正中智慧, “高輝度電子源のための GaAs 光陰極寿命の温度依存性についての研究”, 修士論文(2009 年度)

[8]<http://www.nucleng.kyoto-u.ac.jp/people/itoh/lecture/scationzclasc.pdf>