

電子ドライブ方式による ILC 陽電子源の最適化とマルチバンチ効果の評価

AN OPTIMIZATION OF ELECTRON-DRIVEN ILC POSITRON SOURCE AND EVALUATIONS OF MULTI-BUNCH EFFECTS

清宮 裕史 *^{A)}、大森 恒彦 ^{A)}、奥木 敏行 ^{A)}、佐藤 政則 ^{A)}、浦川 順治 ^{A)}、栗木 雅夫 ^{B)}、高橋 徹 ^{B)}、柏木 茂 ^{C)}
Yuji Seimiya*^{A)}, Tsunehiko Omori^{A)}, Toshiyuki Okugi^{A)}, Masanori Satoh^{A)}, Jyunji Urakawa^{A)},
Masao Kuriki^{B)}, Tohru Takahashi^{B)}, Shigeru Kashiwagi^{C)}
^{A)}KEK, ^{B)}Hiroshima University/AdSM, ^{C)}Tohoku University

Abstract

International Linear Collider (ILC) is a future accelerator to find new physics behind the electroweak symmetry breaking by precise measurements of Higgs sector, Top quark, and so on. In current design of positron source, undulator scheme is adapted as a baseline. In the scheme, positrons are generated from gamma rays through pair-creation process in Ti-alloy target. Generations of the gamma rays by the undulator radiation requires more than 100 GeV electrons. Therefore, a system demonstration of the scheme is practically difficult prior to the real construction. Consequently, it is desirable to prepare a technical backup of this scheme. We study an design of positron source based on the conventional electron-driven scheme for ILC. Positron beam is generated by several GeV electron beam in this scheme. In this report, a start-to-end simulation of the electron-driven ILC positron source is performed. Beam-loading effect caused by multi-bunch acceleration is also considered.

1. 導入

国際リニアコライダー (ILC) は電子陽電子衝突型の加速器である。ILC は全長およそ 33km の長さを持ち、重心エネルギーは第 1 フェイズで 500GeV が想定されている。ILC の技術設計報告書は 2013 年に出版されている^[1]。この報告書には、ベースラインとして陽電子はアンジュレーター方式によって生成されることになっている。このアンジュレーター方式では、非常に長い超電導ヘリカルアンジュレーターを用いて偏極ガンマ線を生成、ガンマ線をチタン合金に照射、対生成過程を経ることで偏極陽電子を生成する。十分な量の陽電子を対生成によって得るためには、ガンマ線のエネルギーは 10MeV 以上である必要があるが、このガンマ線を得るためには 10mm のアンジュレーター周期の場合、150GeV 以上もの高エネルギー電子がドライバーとして必要となる。そこで、アンジュレーター方式では電子は陽電子と衝突するだけでなく、陽電子生成という二つの役割を持たせている。そのため、タイミングの調整が難しいだけでなく、電子バンチ繰り返しの時間構造は簡単に変えることはできない。アンジュレーター方式では短い時間に多量のガンマ線をターゲットに当てるため熱負荷が大きく、ターゲット破壊を避けるために、ターゲットは極高真空中で 100m/s もの速度で回転する必要がある、技術的リスクが高い。また、これまでアンジュレーター方式は加速器で運転されたことがなく、非常に長いアンジュレーターを安定に運転できるかといったことが不透明である。しかし、100GeV 以上の高エネルギー電子がドライバーとして必要であることから事前のシステム実証が困難である。そのため、未知の技術的リスクを避けるためにバックアップが望まれている。

ILC 陽電子源として考えられている他の主な方式としては、コンプトン方式、従来方式の電子ドライブ方式がある。コンプトン方式は、逆コンプトン散乱によって高エネルギーガンマ線を生成、対生成によって陽電子を生

成し、エネルギーの高い陽電子のみを捕獲することで偏極陽電子を得る方式である。この方式では、10MeV 程度のガンマ線を得るのに数 GeV 程度の電子で十分である。これは、アンジュレーター方式の周期長に対して用いられるレーザーの波長が格段に小さいためである。一方、アンジュレーター方式がアンジュレーター長さを長くすることでガンマ線量を増やせるのに対し、コンプトン方式ではレーザーとの干渉場所が限られてしまうため得られるガンマ線量が少ない。ILC で十分な量の陽電子を生成するには、少なくない開発要素が残されておりバックアップとしては適当ではない。そのため、我々はバックアップとして最有力候補の電子ドライブ方式について研究を行った。

電子ドライブ方式では、数 GeV の電子ビームを重金属ターゲットに当て、制動放射によって生じるガンマ線の対生成過程を経て陽電子を生成する。ただし、偏極陽電子を得ることはできない。アンジュレーター方式では数十 MeV のガンマ線をターゲットに当てることに対して、電子ドライブ方式では数 GeV の電子を当てるため熱負荷は高いように思える。事実、電子バンチ繰り返しの時間構造を同じにした場合、熱負荷を下げるためにターゲットは 400m/s もの速度で回転する必要がある^[2]。しかし、この方式では数 GeV 程度の LINAC を新設することで、アンジュレーター方式ではできなかった電子バンチ繰り返しの時間を長くすることで、それによって熱負荷を下げるができる。この電子ドライブ方式による陽電子源は、Ref. ^[3] によって提唱された。アンジュレーター方式ではマルチバンチの繰り返し時間である 200ms の内の 1ms をビーム生成時間として用いるのに対し、彼らの設計は新設した LINAC によって 200ms の内の 63ms をビーム生成時間として用いることで熱負荷を約 60 分の 1 に減らすことができる。そのため、ターゲットは 5m/s 程度で回転すればよい。ILC の衝突間隔は 1ms であるため、Damping Ring(DR) にて素早い取り出しの出来るキッカーを用いて陽電子の時間構造を 63ms から 1ms にする。この電子ドライブ方式に

* seimiya@post.kek.jp

よる陽電子源は、トンネルが十分広いことアンジュレータ方式と共存できる。二つの方式の互換性は、LCC (Linear Collider Collaboration) で最も注目されている話題の1つである [4]。

SLCの経験から、熱負荷によるターゲットの破壊を避けるためには、Peak Energy Deposition Density (PEDD) は35J/g以下であることが必要だとわかっている [3]。我々の目的は、現実的なパラメータの下、PEDDが35J/g以下で十分な量の陽電子をDRまで輸送できることを示すことである。これまで我々は、陽電子の捕獲率について、様々なパラメータを最適化させてきた [5]。ここでは、その結果に加えてマルチバンチ加速時のビームローディングについても議論する。

2. 陽電子源の構造と要求

電子ドライブ方式による陽電子源は Fig. 1 のように、電子 driver linac、陽電子生成ターゲット、横方向の運動量を抑制するための Adiabatic Matching Device (AMD)、200MeV 程度まで加速するための positron injector、電子や大きな運動量偏差を持つ陽電子を取り除くための chicane、5GeV まで加速するために booster linac、DR のアクセプタンスにビームをマッチさせるための Energy Compression System (ECS) から成る。DR に輸送後は、エミッタンスを小さくするために一旦 DR に貯められ、その後 main linac へと輸送される。

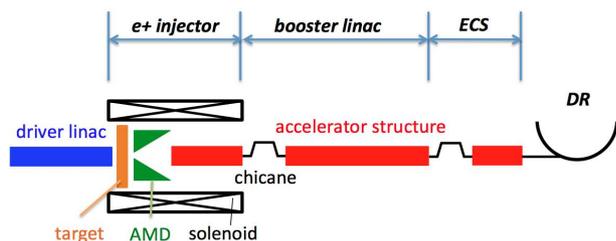


Figure 1: A schematic layout of the electron-driven positron source for ILC.

横方向の DR アクセプタンス (ダイナミックアパーチャー) は

$$\gamma A_x + \gamma A_y < 0.07 \text{ m}, \quad (1)$$

ここで、 γ はローレンツ因子、 A_x と A_y は水平 (x)、垂直方向 (y) の action value である。また、進行方向のアクセプタンスは、

$$\left(\frac{z}{0.035}\right)^2 + \left(\frac{\delta}{0.0075}\right)^2 < 1, \quad (2)$$

である [1]。ここで、 z と δ は進行方向の位置偏差と相対的エネルギー偏差である。電子 driver linac の電子ビームのエネルギー、粒子数は、典型的値としてそれぞれ 6GeV、 2×10^{10} 個を用いる。また、ターゲットは典型的値として厚さ 14mm の W-Re 合金を用いる。ILC の設計基準として、DR から衝突点までの陽電子のロスを考慮し、DR に入ることでできる陽電子数として 50% のマージンが望まれている。つまり、衝突点で必要なバンチごとの陽電子数 2.0×10^{10} の 1.5 倍の 3.0×10^{10} 個の陽電子を DR アクセプタンス内に入れる必要がある。

また、前述したように、これに加えてターゲット破壊を避けるために 35J/g 以下である必要がある。ここで、陽電子捕獲率 (Yield) を DR アクセプタンスに入る陽電子数をターゲットに当てた電子数で除した量と定義する。同じ量の陽電子を捕獲する場合、Yield を高めることは、技術的リスクの軽減、電力の高効率化、放射化の減少といった様々な利点がある。

電子 driver linac は Fig. 2 の左上のように 3.3ms 間隔 (300Hz) に 20 個のマルチパルス (200ms (5Hz)) の繰り返しで運転を行う。また、Fig. 2 の左下のように 300Hz で来る個々のパルスは 3 つのトレインで構成されており、全長 $1\mu\text{s}$ で、トレイン間隔は 100ns である。この 100ns の時間間隔は DR での電子雲効果を避けるために必要である。更に、各々のトレインは 44 つのバンチで構成されており、その間隔は 6.15ns である。電力効率を考慮すると、filling time が μs オーダーの常伝導空洞を採用するのが適切である。トレインの平均電流は 0.5A であり、大きいビームローディングとなるため、ローディング補正は必須である。3 つのトレインは μs オーダーのキッカーによって DR に入れられた後、ns オーダーの速いキッカーによって取り出される。これにより、衝突用の電子のタイミング (Fig. 2 の右図に一致) に合わせることができる。

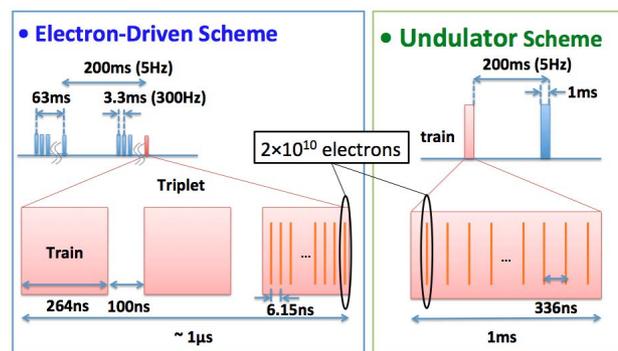


Figure 2: Multi-bunch structures on the electron-driven scheme before DR (left) and on the undulator scheme (right).

3. 陽電子捕獲シミュレーション

陽電子生成ターゲットから DR までの粒子トラッキングシミュレーションを行った。これまで、ドライブ用の電子ビームのエネルギーやビームの大きさ、ターゲットの厚さ、AMD の磁場強度やアパーチャーの大きさ、positron injector や booster linac のアパーチャーの大きさ、といったパラメータについて最適化を図ってきた [5]。しかし、後に示すようにビームローディングが非常に大きいため空洞への入力電力も非常に大きくなってしまふ。加速電場が小さくなると Yield は落ちてしまふが、Yield の減少量が小さい場合は技術的リスクを下げることができる。Fig. 3 は、平均加速電場と Yield との関係を表している。この図から、約 17MV/m 以下の加速電場で Yield の落ち方が激しくなっていることがわかる。このシミュレーションを行った際に用いた、十分な量の陽電子を DR アクセプタンス内に入れることのできるパラメータの一例を Table 1 に示す。次章では、平

Table 1: An optimum parameter set. Aperture values indicate the radius.

Parameter	Value	Unit
Drive beam energy	6.0	GeV
Target thickness	14	mm
Beam size (RMS)	4.0	mm
AMD peak field	5.0	T
AMD aperture	8	mm
Accelerator gradient (injector)	18	MV/m
Accelerator gradient (booster, ECS)	20	MV/m
Injector L-band accelerator aperture	20	mm
Booster L-band accelerator aperture	17	mm
Booster S-band accelerator aperture	10	mm
ECS L-band accelerator aperture	17	mm
Solenoid field	0.5	T
PEDD	27	J/g
# of electrons as drive beam / bunch	2.3	10^{10}

均加速電場が 18MV/m 時のマルチバンチによるビームローディングについて調査を行う。

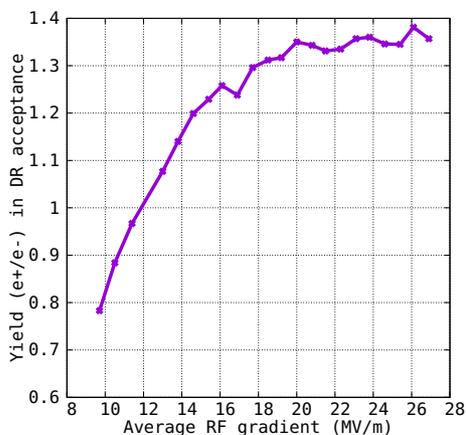


Figure 3: Yield at the DR depended on average accelerator gradient.

4. マルチバンチビームローディング

4.1 Positron Injector

Positron injector 部では、アパーチャーが半径 20mm の L-band の RF 空洞を使用しており、アパーチャーの大きさから定在波の加速管が妥当である。定在波の過渡的ビームローディングは次のように表される^[6]。

$$V = \frac{1}{1 + \beta} \left[2 \left(1 - e^{-t/t_f} \right) \sqrt{\beta P_0 r l} - i r l \left(1 - e^{-(t-t_b)/t_f} \right) \right], \quad (3)$$

ここで、 V は RF 空洞の加速電場、 β はカップリング定数、 P_0 は入力電力、 r はシャントインピーダンス、 l は RF 空洞の長さ、 i はビーム電流、 t_b はビームが空洞に

Table 2: Parameters of standing wave L-band RF cavity at positron injector.

Parameter	Value	Unit
RF cavity length (l)	3	m
Frequency (ω)	1.3	GHz
Shunt impedance (r)	57	$M\Omega$
Quality factor (Q)	10000	-
Current (i)	2.4	A
Coupling constant (β)	2	-

入った時の時刻、 t_f は filling time であり、

$$t_f = \frac{2Q_0}{\omega(1 + \beta)}, \quad (4)$$

ここで、 Q は Q 値を表す。変数 t が Eq. (3) の指数部のみに依存することから、適切な t_b を選ぶことで RF 空洞の加速電場を一定にすることができる。つまり、 t_b が次式を満たせば加速電場は一定である。

$$t_b = t_f \ln \left(\frac{i}{2} \sqrt{\frac{r l}{\beta P_0}} \right). \quad (5)$$

ターゲット直後の加速管もしくはその入り口では、電子と陽電子が混じったビームが同じ位相に乗るため、片方は加速、片方は減速となりビームローディングはキャンセルする。しかし、位相スリッページにより逆位相にトラップされるとビームローディングは陽電子のみの場合と比べておよそ 2 倍になる。それに加え、positron injector 部では衝突点での粒子数を確保するために、衝突点での粒子数の 2 倍程度が必要となる。そのため、トレインの電流は 2A を超える大電流となる。シミュレーションで使用した Injector 部の加速管のパラメーターを Table 2 に示す。これらのパラメーターと Eq. (3) - Eq. (5) を用いて、positron injector 部のビームローディングを含んだ加速勾配のシミュレーション結果が Fig. 4 になる。この図の赤線と青線は、それぞれ一定の入力電力 (290MW) を投入した場合と、3つのトレインの間隔 100ns を考慮して一定時間入力電力を止めた場合 (Fig. 5) の最大の加速電場 (V/l) の時間変化を表し、原点は電力を入力開始した時刻を表す。3つのトレイン間隔を考慮した場合、ビームが空洞に入る $t_b = 0.28\mu s$ に加速勾配は一定となり、トレイン間隔以外のビームが空洞内に存在する時間は加速勾配が一定であることがわかる。ピークの加速電場に対する平均加速電場の比が 7 割と仮定すると、Fig. 4 はおよそ平均加速電場 18MV/m を与える。この入力電力 290MW は、明らかに SLED システムのような RF パルス圧縮が必要となり、新たな開発要素となる可能性がある。このとき、平均加速電場を 15MV/m 程度に下げたとしても、Yield が下がることによってターゲットに当てる電流が増加し、それによってビームローディングが増加するため、入力電力はほとんど変わらない。現在、ピーク電力を減らすため、空洞の長さを短くする、空洞の加速勾配を減らす分アパーチャーを広げる、トレインのマルチバンチ間隔を広げるといった可能性が検討がされている。

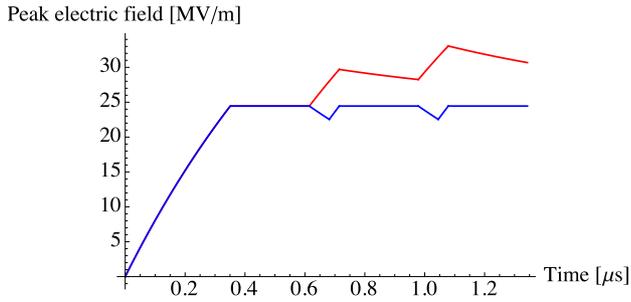


Figure 4: Accelerator peak gradient on standing wave L-band RF cavity. Blue line shows the constant gradient at beam acceleration. This gradient is generated by the input power Fig. 5. The other gradient shown by red line is generated by constant input power to RF cavity.

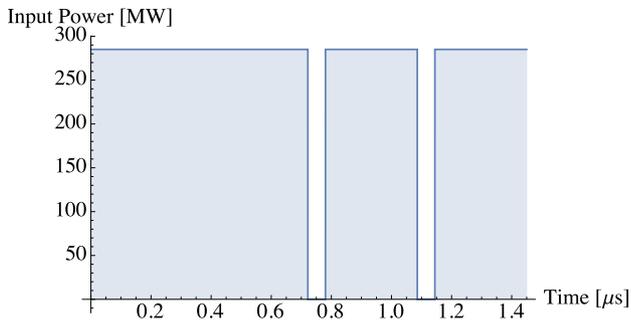


Figure 5: An input power which generates constant gradient at the beam acceleration for standing wave L-band RF cavity.

4.2 Booster Linac と ECS

Booster linac、ECS 部では、アパーチャーが半径 17mm の L-band の RF 空洞とアパーチャー 10mm の S-band の RF 空洞を用いており、これらは進行波の加速管で製作できる。入力電力が一定である場合の進行波の過渡的ビームローディングは、Ref. [7] から、

$$B_I(i, t, t_b) = \frac{ri}{2(1 - e^{-2\tau})} \times \left[\left\{ -\frac{\omega}{Q} (t - t_b) e^{-2\tau} + \left(1 - e^{-\frac{\omega}{Q}(t-t_b)} \right) \right\} \times U(t - t_b) - e^{-2\tau} \left\{ -\frac{\omega}{Q} (t - t_b - t_f) + \left(1 - e^{-\frac{\omega}{Q}(t-t_b-t_f)} \right) \right\} U(t - t_b - t_f) \right]. \quad (6)$$

ここで、 B_I はビームローディングによって引き起こされる電場降下を表し、 t_b はビームが空洞に入った時の時刻、 t_f は filling time、 τ は減衰定数、 U は単位ステップ関数である。Ref. [7] を参考に過渡的ビームローディングを完全に補正するための電場を求めると、以下の電場(を作るような入力電力)を加速管入り口 ($z = 0$) に加え

Table 3: Parameters of traveling wave L-band RF cavity at booster linac.

Parameter	Value	Unit
RF cavity length (l)	2	m
Frequency (ω)	1.3	GHz
Shunt impedance (r)	57	MΩ
Quality factor (Q)	10000	-
Current (i)	0.90	A
Filling time (t_f)	0.63	μs

ればよいことがわかる。

$$E(t) = E_0 U(t) + \sum_{n=1}^{\infty} [E_n U(t - t_n) + (t - t_n) E_{nT} U(t - t_n)], \quad (7)$$

$$t_n = t_b + (n - 1)t_f, \quad (8)$$

$$E_1 = \frac{ri}{2} (1 - e^{-2\tau}), \quad (9)$$

$$E_{1T} = -\frac{ri\omega}{2Q} e^{-2\tau}, \quad (10)$$

$$E_n = \frac{ri}{2} e^{-2(n-1)\tau} (1 - e^{-2\tau}), \quad n \geq 2, \quad (11)$$

$$E_{nT} = \frac{ri\omega}{2Q} e^{-2(n-1)\tau} (1 - e^{-2\tau}), \quad n \geq 2. \quad (12)$$

ここで、 E は電力供給で発生する加速管の長さで平均したピーク電場、 E_0 はローディングがない場合の平衡加速電場である。ただし、 $t_f \leq t_b$ である。また、このときの入力電力は、

$$P = \frac{E^2}{2\alpha r}. \quad (13)$$

ここで、 α は減衰係数を表す。この結果は、1つのトレインに対するビームローディングであるため、3つのトレインのビームローディングに拡張した上でビームローディング補正を行う。

シミュレーションで用いた Booster linac の L-band の RF 空洞のパラメーターを Table 3 に示す。Fig. 6 は、このパラメーターを用いてビームローディング補正しない場合 (赤線) と補正する場合 (青線) についてシミュレーションを行った結果である。また、Fig. 6 のビームローディング補正した場合の入力電力を Fig. 7 に示す。同様に、進行波の S-band の RF 空洞についても、そのパラメーターを Table 4、ビームローディング補正結果を Fig. 8、その入力電力を Fig. 9 に示す。Fig. 6 と Fig. 8 におけるピーク電場は、ビームが加速管で得る平均加速電場 20MV/m を与える。このように、理論上は加速電場を時間に線形に増減させることで (入力電力を時間の 2 乗で増減させることで)、一定の加速電場が得られることがわかる。また、L-band、S-band の進行波管では、ピーク電力が 100MW 程度必要であることがわかる。

5. まとめ

ILC ための陽電子生成ターゲットから DR までの陽電子捕獲シミュレーションを行った。シングルバンチでは、

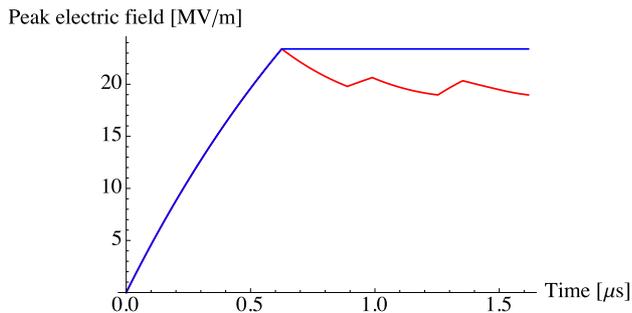


Figure 6: Accelerator peak gradient on traveling wave L-band RF cavity. Blue line shows the constant gradient at beam acceleration. This gradient is generated by the input power Fig. 7. The other gradient shown by red line is generated by constant input power to RF cavity (50MW).

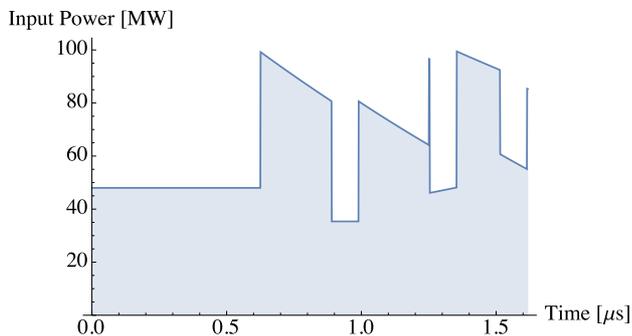


Figure 7: An input power which generates constant gradient at the beam acceleration for traveling wave L-band RF cavity.

特別な開発要素なしに現実的なパラメーターで十分な量の陽電子をDRアクセプタンス内に輸送できることを示した。また、ビームローディングをシミュレーションし、各々の加速管へのピーク入力電力が positron injector 部で約 300MW、booster linac や ECS で約 100MW 必要であることがわかった。そのため、特に positron injector 部においては SLED システムのような RF パルス圧縮を用いてビームローディング補正する必要があることが判明した。Positron injector における SLED システムには新たな開発要素が含まれる可能性があり、現在ピーク電力を下げるために空洞の長さを短くする、空洞の加速勾配を減らす分アパーチャーを広げる、トレインのマルチバンチ間隔を広げるといった可能性を検討することで可能な限り開発要素となり得る部分を無くす努力が

Table 4: Parameters of traveling wave S-band RF cavity at booster linac.

Parameter	Value	Unit
RF cavity length (l)	2	m
Frequency (ω)	2.6	GHz
Shunt impedance (r)	$57 \times \sqrt{2}$	M Ω
Quality factor (Q)	$10000/\sqrt{2}$	-
Current (i)	0.90	A
Filling time (t_f)	0.22	μ s

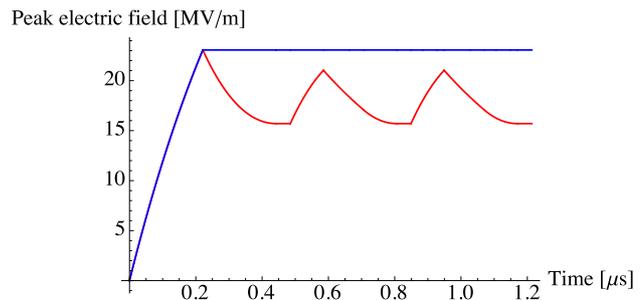


Figure 8: Accelerator peak gradient on traveling wave S-band RF cavity. Blue and red line shows the same manner as Fig. 6. The gradient shown by blue line is generated by the input power Fig. 9.

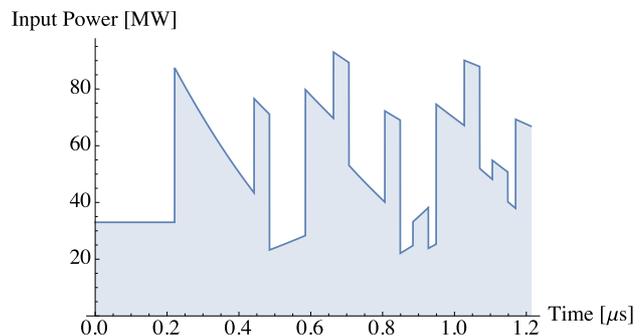


Figure 9: An input power which generates constant gradient at the beam acceleration for traveling wave S-band RF cavity.

続けられている。今後この問題を解消していくことで、電子ドライブ方式は ILC 陽電子源のより強力なバックアップとなり、ILC プロジェクトの技術的信頼性を高めることができる。

6. 謝辞

This work is partly supported by Grant-in-Aid for Scientific Research (C 26400293).

参考文献

- [1] The International Linear Collider Technical Design Report, ISBN 978-3-935702-74-4 (2013).
- [2] V. Bharadwaj, Y. Batygin, R. Pitthan, J. Sheppard, H. Vincke, J. W. Wang, J. Gronberg, and W. Stein, SLAC-PUB-11690 (2005).
- [3] T. Omori, T. Takahashi, S. Riemann, W. Gai, J. Gao, S. Kawada, W. Liu, N. Okuda, G. Pei, J. Urakawa, and A. Ushakov, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 672, 52-56 (2012).
- [4] Asian Linear Collider Workshop home page, <http://www-conf.kek.jp/alcw2015/>.
- [5] Y. Seimiya, M. Kuriki, T. Takahashi, T. Okugi, T. Omori, M. Satoh, J. Urakawa, S. Kashiwagi, LINAC14, Geneva, Switzerland, MOPP077 (2014).
- [6] "Accelerator Physics and Engineering", Alexander Wu Chao, Maury Tigner.
- [7] OHO1990, 竹田誠之, "リニアックの基礎".