

[P7-20]

POWER EFFICIENCY OPTIMIZATION OF THE C-BAND RF-PULSE COMPRESSION SYSTEM

Mitsuhiro Yoshida, Tsumoru Shintake* and Hiroshi Matsumoto*

International Center of Elementary Particle Physics(ICEPP), University of Tokyo,

7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033, Japan

*High Energy Accelerator Research Organization (KEK),

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan

Abstract

The first high power model of 400 MW-class C-band rf-pulse compressor will be developed in this year. It is scheduled to be used for the future e^+e^- linear collider, where the power efficiency is an important issue. We analyzed the power flow around the compressor and introduced the phase compensation system to utilize the additional power in the front part of the modulator pulse. We expect that this leads the gain enhancement factor of 1.2. In this paper, we present the electric parameter optimization of the compressor to increase the power efficiency by taking into account dynamic responses in the klystron, accelerating structure and beam loading.

C-band パルス圧縮システムの電力効率の最適化

1 はじめに

今年度、出力 400MW 級の C-band パルスコンプレッサーのハイパワーモデルを製作する予定である。このパルスコンプレッサーの設計にあたり、将来リニアコライダー等において重要なシステム全体の電力効率が最大になる様に設計を行なう必要がある。そのために、C-band JLC(Japan Linear Collider) リニアックシステム [1, 2] のパルスコンプレッサー周りの消費電力を分析し、最適条件を検討した。

中でも、モジュレーター電圧の立ち上がり部分のエネルギーを、クライストロンの入力位相を高速に補償してパルスコンプレッサーに蓄積し、有効電力として使用することにした。この方法の有効性は昨年度コールドモデルを用いて実証したが、更にここでは、実際のクライストロンの出力波形と加速管、およびビーム負荷を考慮して加速電子のエネルギーゲインが最大となるようなパルスコンプレッサーの電気的パラメーターの最適化について議論する。

2 パルスコンプレッサー

電子・陽電子リニアコライダーの様なマルチバンチ運転のリニアックにおいてはそれぞれのバンチの加速エネルギーを均一にする必要がある。そのために C-band では、ビーム負荷を考慮した均一な加速ゲインを得る方法として、加速管の filling time の間、入力

電力を緩やかに立ち上げ、その後ビーム負荷を補償する台形状の高周波電力を加速管に供給する事を考えている。

ところで、リニアックでしばしば使われている SLED と呼ばれるシングルセル空洞のパルスコンプレッサーは、出力高周波パルスの前半にピークがある。したがって、パルスの立ち上がり部分で加速管に流れ出てしまう電力を緩やかに立ち上げるために、位相反転時に SLED への入力を絞る時間が長くなってしまい電力効率が良くない。

そこで、C-band では、このような出力パルスをより効率良く得る方法として、マルチセル結合空洞型のパルスコンプレッサーを考案した。3セルのコールドモデルで、3.5 倍のパワーゲインが得られている [3]。

3 RF システムのパワーフロー

図 1 の上段は C-band クライストロンの印加電圧であり、パルスモジュレーターの出力をパルストランスにより昇圧したものである。また、図 1 の下段はクライストロンの高周波出力パルスであり、印加電圧の全区間に高周波を入力し続けた場合の出力電力波形である。このクライストロンへの入力電力は総計で 500 ジュール/パルス程度あるが、通常は出力波形の平坦部分のみを使用するため、実際に使用できる有効電力は 124 ジュール ($50\text{MW} \times 2.5\mu\text{s}$) しかない。

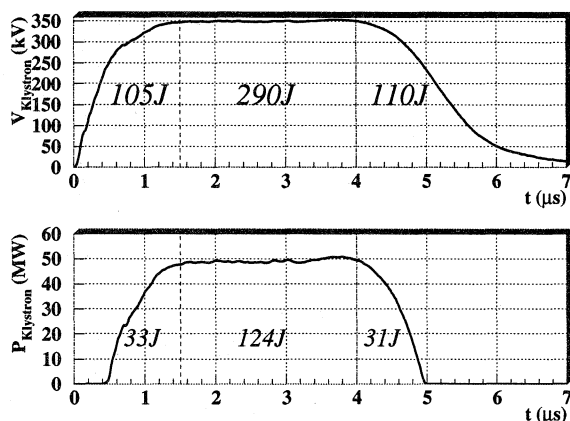


図 1: クライストロンの印加電圧 (上) とクライストロンの出力高周波電力波形 (下)

さらに、パルスコンプレッサーには、表 1 に示したような空胴の壁電流による電力消費、反射電力、入力位相反転時の損失電力、空胴の残留電力等の電力消費がある。この表 1 では、同じ径で 1m の空胴長のシングルセル空胴 ($TE_{01,35}(Q = 350k)$) と、3セル結合空胴 ($TE_{01,15}(Q = 200k)$, $TE_{01,5}(Q = 100k)$, $TE_{01,15}(Q = 200k)$) について比較を行なった。なお、シングルセル空胴型パルスコンプレッサーはマルチセル結合空胴に比べてパラメーターの自由度は大きい、Q が非常に高い空胴を実現するためには近接する高次の縮退モードに特別の配慮が必要である。

表 1: パルスコンプレッサーの電力損失 (1 パルス)

	シングルセル空胴 Q=350k	3セル結合空胴 Q=200k,100k,200k
入力電力	125J ($50MW \times 2.5\mu s$)	
壁電流消費	9.9J	16.3J
反射電力	22.4J	19.1J
位相制御	14.8J	9.8J
残留電力	18.7J	15.6J
ゲイン	3.37	3.65
出力電力	59.4J	64.2J

4 位相補償による電力効率の向上

図 1 から分かるように、クライストロン印加電圧の立ち上がり部分から、クライストロンに高周波を入力した場合、33 ジュール もの高周波電力が出力される。この部分ではクライストロンの中では電子の速度が変化するため出力高周波に位相回転が生じ、このままでは有効電力として使用できない。

そこで、クライストロンの入力高周波の位相を高速で制御する事によって、出力高周波の位相の補償が可能である。これにより立ち上がり部分の出力をパルスコンプレッサーに蓄積して電力効率を向上させる事が可能である。さらに、緩やかな入力の立ち上がりにより反射を低減し効率の向上が期待できる。この事は昨

年度パルスコンプレッサーのコールドモデルを使用して実証した [4]。また、このテストによりクライストロンの出力高周波を立ち上がりから立ち下がりまでの全ての出力区間について完全に位相補償できる事が分かった。

しかし、この実験に使用したパルスコンプレッサーはクライストロンの入力電力の平坦部分のみを使う事を想定して設計されているので、長い高周波パルスを考慮した最適化が必要である。

5 シミュレーション

パルスコンプレッサーの電力効率を最適化するには高周波システム全体を考慮したシミュレーションを行ない、それぞれのコンポーネントのパラメータの最適値を算出する事が重要である。ここでは、実際の C-band 50MW klystron の位相補償された出力波形を用いて、シングルセル空胴と、3セル結合空胴のそれぞれについて電氣的パラメータの最適値を求めた。

シミュレーションは、シングルセル空胴型と3セル結合空胴型のそれぞれについて、連立微分方程式を高速かつ高精度でトレースできる Bulirsch-Stoer 法 [5] を用いて結合空胴の連立微分方程式を解いた。さらに、確認のためにエネルギー保存則から求めたマクロな RF の流れの結果と比較した。また、加速管は $t_f = 280ns$ で、ビームの流れている時間は 200ns という設計である。

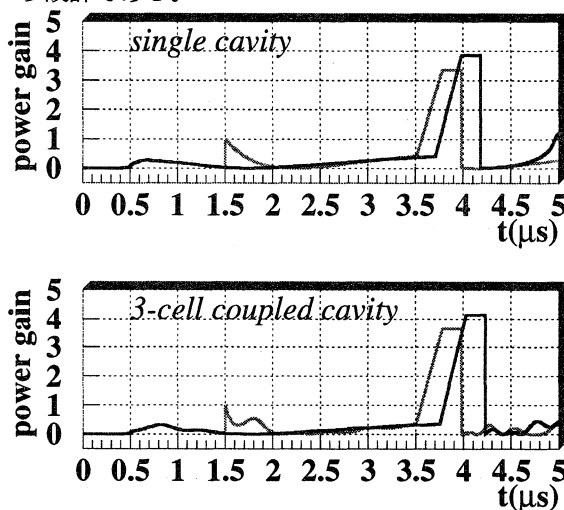


図 2: クライストロン出力の平坦部分のみを使った場合と、出力を位相補償した場合で最適化したパルスコンプレッサーの出力波形

最適化は、空胴自体の寸法 (=Q 値) は変えずに結合定数のみを変えたので、パワーゲインは $gain(t_{flip}, \beta, (k_{12}, k_{23}))$ というパラメーターの関数とし、モンテカルロ法でゲインの最大値を求めた。なお、 t_{flip} は位相反転を始める時間であり、位相補償され

ているので任意である。また β は入力結合定数、 k_{12}, k_{23} は3セル結合空洞のシミュレーション時のみ追加される変数で、それぞれ第一と第二空洞、第二と第三空洞の結合定数である。

図2にクライストロン出力の平坦部分のみ使用した場合と、位相補償した場合の長い入力にパルスコンプレッサーを最適化した場合の出力を示した。最適化の結果として、15%程度パワーゲインが増加しているのが分かる。

この時の消費電力の内訳は表2のようにになっている。

表2: パルスコンプレッサーでの電力損失 (1パルス)

() 内は出力後の電力を加えた場合。

	シングルセル空洞	3セル結合空洞
入力電力	166.5J(188J)	168.8J(188J)
壁電流消費	19.6J	32.6J
反射電力	27.7J	25.3J
位相制御	14.5J	10.2J
残留電力	37.1J(58.6J)	26.4J(45.6J)
ゲイン	3.85	4.16
出力電力	67.6J	72.9J

また、パラメータを最適値にした状態から、個別のパラメータを変化させたのが図3,4,5で、それぞれ、入力結合定数、位相反転の始まる時間、第1空洞に対する第3空洞に蓄えられる電力比というパラメータに対するパワーゲインを表している。

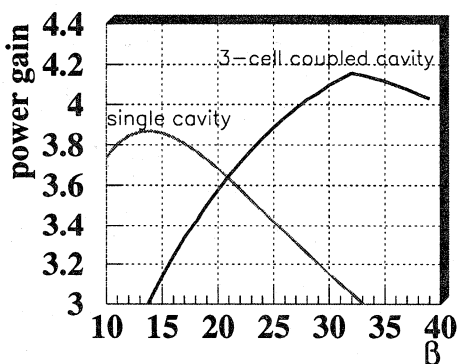


図3: 入力結合定数に対するパワーゲイン

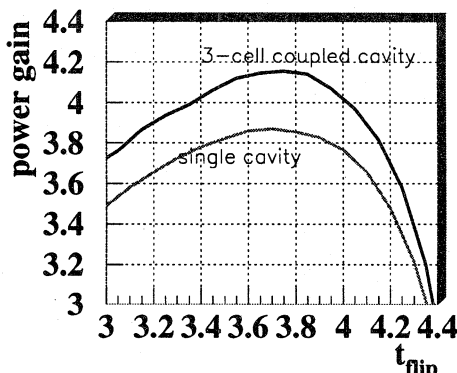


図4: 位相反転する時間に対するパワーゲイン

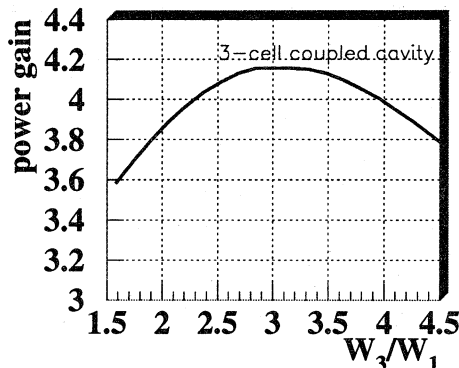


図5: 第三と第一空洞に蓄えるエネルギーの比に対するパワーゲイン

6 今後の課題

今回のシミュレーションではクライストロンからの出力は現状の波形をそのまま使用したが、位相補償制御を行なう事を前提とすれば、パルスモジュレーター出力を平坦にする必要はない。このような自由度が増えた条件でパルスモジュレーターのパラメータを変えてシステム全体の効率を最適化する事は今後検討する必要があるだろう。

また、パルスコンプレッサーにおけるエネルギー損失の内訳を見ると、反射電力と空洞の残留電力が非常に大きい事が分かる。これは、 β を時間的に変化させる事によって減らせると考えられる。もし β を十分に高速に変えさせられれば、Q値が大きいシングルセル空洞のパルスコンプレッサーを使用した方が壁電流消費が小さいために電力効率が良い事を示唆している。

また加速管についても、高周波入力と加速ゲインとの関係についてさらに調べていく必要がある。

今後はこれらの事をふまえた上で電力効率が最適なパルスコンプレッサーの設計を行なっていく予定である。

参考文献

- [1] T.Shintake et al., "C-band RF-system Development for e^+e^- Linear Collider", APAC98, KEK, March 23-27, 1998.
- [2] <http://C-band.kek.jp>
- [3] T.Shintake et al., "A New RF Pulse-Compressor Using Multi-Cell Coupled-Cavity System", EPAC96, Sitges, June 10-14, 1996, KEK Preprint 96-71.
- [4] M.Yoshida et al., "Efficiency and Gain Enhancement of RF-Pulse Compressor for C-band RF System" LINAC98, Chicago, August 23-28, 1998, KEK Preprint 98-141.
- [5] W.H.Press et al., "Numerical Recipes in C"