

OSCILLATION ANALYSIS OF J-PARC 972 MHz KLYSTRON

Mitsuhiro Yoshida^{1,A)}, Shigeki Fukuda^{A)}, Etsuji Chishiro^{B)}, Masayoshi Yamazaki^{B)}, Toshihiko Hori^{B)},
Seiya Yamaguchi^{A)}, Shozo Anami^{A)}, Hiroto Urakata^{C)}, Kenichi Hayashi^{C)}, Mitsunori Sakamoto^{C)}

^{A)} High Energy Research Organization (KEK)

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

^{B)} Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI)

2-4 Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1195

^{C)} Toshiba Electron Tubes and Devices Co., Ltd.

1385 Shimoishigami, Otawara, Tochigi, 324-8550

Abstract

The first 972 MHz klystron for J-PARC had a strong oscillation in some regions. The oscillation frequencies were 1458 MHz and 3210 MHz. It caused that serious temperature rise was observed in the drift tube due to the beam hit. After many investigation of this klystron, we can conclude that the possible source of the oscillation was in the second cavity. The second cavity had higher modes like TM_{011} and TM_{021} and they were strongly coupled with the beam because of its long gap and longitudinal symmetric cavity. I estimate such an oscillation phenomenon using time domain simulation of the electromagnetic field and the electron beam.

J-PARC用972MHzクライストロンの発振解析

1. はじめに

J-PARC陽子ライナックの高ベータ部のRF源として開発された972MHzクライストロンは強い発振に悩まされた。当初はダイオード発振と誤認し^[1]、電子銃部の材質の変更を行ったが、変更後も1458MHzと3210MHzの発振が観測された^[2]。さらにビーム電圧のある範囲では発振が原因でビームがビームパイプに当たり、クライストロン内部の真空が悪化したため長時間運転ができなかった。

その後電子銃部に追加パーツを取り付けた実験から発振の原因が電子銃部で無い事が判明した。そしてゲイン空洞が原因である可能性が指摘され、空洞の調整機構を利用した変形等による測定から、これらの発振は第二空洞が原因で生ずるドリフトチューブ発振である事がわかった^[3,4]。第二空洞に起因する発振が起きた原因は、この第二空洞が上下対称な上、ギャップが広く、 TM_{011} 、 TM_{021} に類似した高次モードとビームの結合が大きかったためであった。

本稿では、この第二空洞による発振条件の予測や、ビームとの結合度を求めるため、シミュレーションによる発振現象の解析を行った。

2. 発振の概要

J-PARC用972MHzクライストロンは6空洞で構成され、第二及び第三空洞は帯域を広げるために離調したゲイン空洞となっている。設計上の動作電圧は110kV, 50A ($\mu P=1.37$)でRF出力は3MWである。

発振の周波数に対して、発振が起きたビーム電圧

の範囲は表1のようになっていた。

表1：発振の起きたビーム電圧範囲

発振周波数	ビーム電圧	備考
1458MHz	62~82kV	74kV以上で真空度悪化
3210MHz	82kV~	

図1は1458MHzにおける発振RFを、検波してオシロスコープで見たもの(左上)と、スペクトラムアナライザで周波数を見たもの(左下)である。

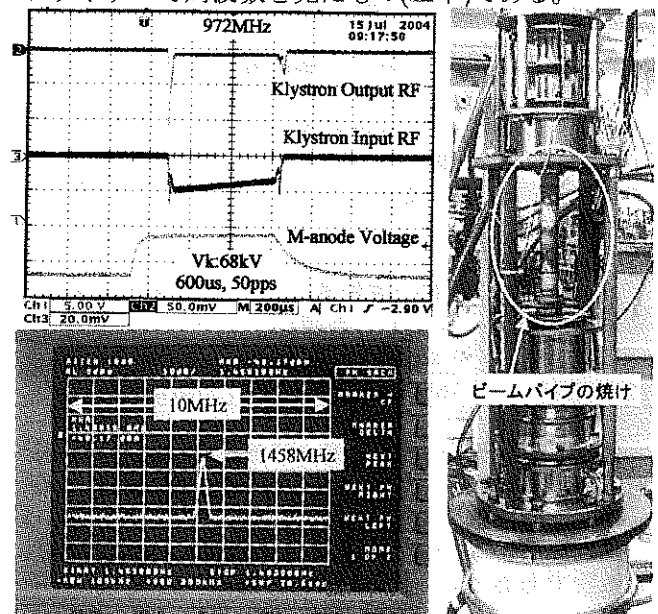


図1：発振波形とビームパイプの焼け

¹ E-mail: mitsuhiro.yoshida@kek.jp

図1(右)はこの発振により、ビームパイプにビームが当たり、ビームパイプを過熱した結果変色している事が分かる。これが原因でクライストロン内部の真空が悪化し、この領域では長時間運転ができず、発振の詳細な測定が難しかった。

3. 発振の原因

このクライストロンは広帯域チューニングを取っているため、第二空洞は周波数の低い側に離調されている。そのため空洞の容積が大きい。さらにビームローディングとQ値の関係から、ビームパイプのギャップが40mm程度と他の空洞に比べ広い。このギャップの間隔は、発振開始電圧での電子の速度 $v=0.45c$ で割ると、0.3nsであり、ほぼ発振周波数で位相が反転する時間となる。さらに実際にはギャップの外側にも電界の染み出しがありビームからはさらに長い時間の電界との相互作用があり発振しやすいことになる。

この第二空洞での軸対称の高次の固有モードは図3のようになっており、それぞれ TM_{011} 、 TM_{021} と類似した固有モードである。これらの共振周波数は表1の測定結果と良く一致している。

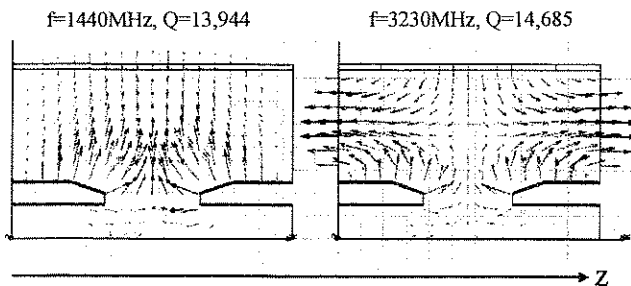


図3：高次の固有モード

また第二、第三空洞には離調量を補正するためのチューナーが取り付けられており、これらを動かして空洞を変形した際に発振周波数がどのように変化するかを試験した。表2はこのギャップ調整量 ΔL に対する発振周波数の変化 Δf のシミュレーションとの比較である。

表2：第二空洞の調整量に対する周波数の変化

発振周波数	$\Delta f / \Delta L$ (実測)	$\Delta f / \Delta L$ (計算)
1458MHz	3.8MHz/mm	5.5MHz/mm
3210MHz	16MHz/mm	9MHz/mm

変化量に実測と計算に違いがあるのは、空洞の変形時に空洞が歪んでいるためであると考えられるが、基本的な傾向は同じであると言える。

これらの結果からこれらの発振が第二空洞に起因する物であるという結論に達した。

4. 発振機構

ビームの電力 P_{beam} に対して空洞の電磁波による変

調を受けた結果、ビームの電力が変化する差分量を ΔP_{beam} は以下のように表せる。

$$\Delta P_{beam} = P_{beam} \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{\gamma}{\gamma_0} - 1 \right) dt$$

$$\gamma = \sqrt{1 + \left(\frac{p}{m_0 c} \right)^2}, \frac{dp}{dt} = q E_0 f(z) \cos \omega t$$

ここで T は周期であり、通常の TM_{010} モード等では、1周期積分すると上式はキャンセルされ ΔP_{beam} は0になる。しかし TM_{011} 、 TM_{021} 等の高次モードでは、片側の電界でパンチングが起き、これがもう一方の電界から加速もしくは減速を受け、パンチした位相と減速位相が重なると空洞の蓄積エネルギーが増える方向になる。

5. シミュレーション

このような軸に沿って前後対称な高次モードによる発振を定量的に評価し理解を深めるため、電磁波と電子ビームの相互作用シミュレーションを行った。ここでは発振の条件を求めるため、空洞内の電磁波の蓄積エネルギー U を外部からの励振により序々に増やしていき、それぞれの蓄積エネルギーに対して電子ビームのエネルギー変化の1波長平均 ΔP_{beam} を求めた、ここで内部エネルギーの変化 dU/dt は以下のような式で表す事ができる。

$$\frac{dU/dt}{\omega U} = \frac{-\Delta P_{beam}}{\omega U} - \frac{1}{Q}$$

図4は1458MHzの発振に対して、この式を $\omega U / P_{beam}$ の関数としてプロットしたものである。

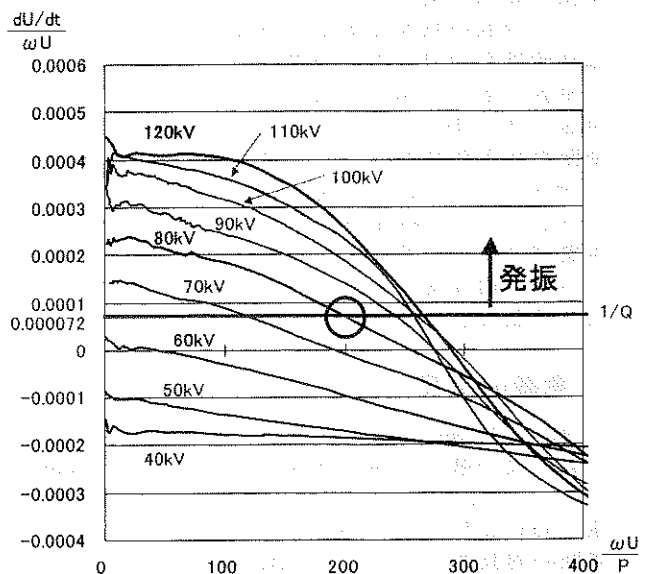


図4：ビーム電圧毎の空洞蓄積エネルギーに対する電力収支

この図4は、 $1/Q$ のラインより上にある時には、ビームから空洞に供給されるエネルギーがあり発振状態にある事を意味している。この空洞への供給エネルギーにより空洞内の電磁波エネルギー U は上昇し、 $1/Q$ のラインと交わる点でビームから供給されるエネルギーと壁電流による損失が釣り合い、この点で発振が持続する。

図4の切片から発振開始電圧は6.5 kVである事が分かり、これは測定結果とほぼ一致する。

図5はこの発振で電子がパンチされる様子を表示したもので、左側の電界によって加減されたビームが右側の電界上に到達した際パンチしているのが分かる。

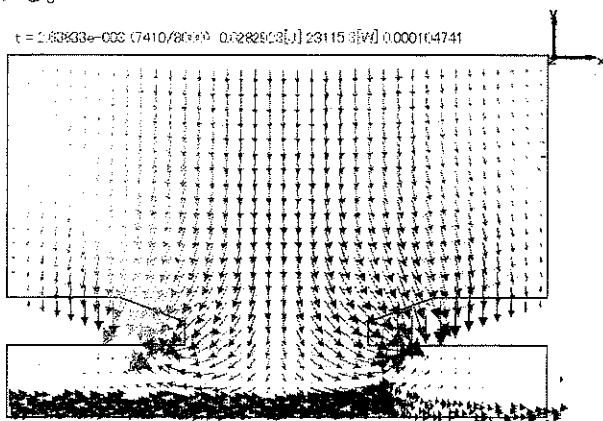


図5：ビーム電圧=80kV、空洞の電磁波エネルギー=0.03Jでのビームがパンチする様子

さらに図4からビーム電圧が8.0 kVの時にビームから供給されるエネルギーと壁電流が均衡するポイントでの蓄積エネルギー U は0.03[J]である。この時のビームの軌道は図6のようになり、測定結果と同様にこの電圧でビームがビームパイプに当たる事が確認できた。

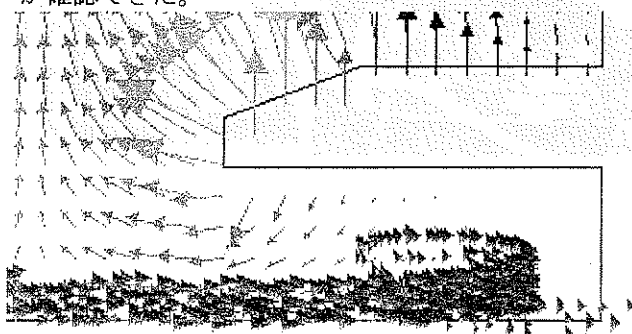


図6：ビーム電圧=80kV、空洞の電磁波エネルギー=0.03Jでのビーム軌道

6. 発振対策

このような軸方向の前後に対称なモードによる発振の対策としては、以下のような方法が考えられる。

- (1). ビームから見た電界の節をなくすように、ギャップをオフセットする。

- (2). ビームとの結合を小さくするためギャップを狭める
- (3). 空洞の材質の一部を導電率の低い材料に変更し Q 値を下げる。

今後の972MHzクライストロンには(1), (2)を採用する事となった、これにより図1の固有モードは図6のようになり、軸方向に対して節が無くなる。この発振対策により、1458MHz及び3210MHzの発振は完全に抑制された事が確認できた。

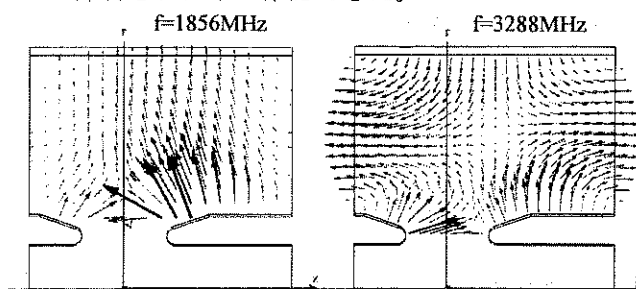


図7：ギャップをオフセットした空洞のモード

しかし4.077GHzというさらなる高次モードの発振が110kVで確認された。これは収束磁場を強くする事で抑制する事ができた。

7. まとめ

TM_{011} , TM_{021} 等の軸に沿って前後対称な高次モードによる発振現象を、電磁波シミュレーションによってほぼ再現する事ができた。972MHzクライストロンでのこの経験により、今後クライストロンの空洞設計における許容パラメーターを把握できたため、今後のクライストロン開発においてはこのような発振は設計段階から排除できるであろう。

参考文献

- [1] E. Chishiro, et al., "Development of 972 MHz Klystron for High-Intensity Proton Accelerator Facility", Proceedings of LINAC2002, P.455, Gyeongju Korea, 2002
- [2] 堀利彦, et al., "原研972MHz RFテストスタンドの現状報告", Proceedings of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p.212, Funabashi Japan, Aug. 4-6, 2004
- [3] 堀利彦, et al., "原研972MHz RFテストスタンドの現状2005", Proceedings of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Saga Japan, Jul. 20-22, 2005
- [4] "The Stanford two-mile accelerator - 10-1 Design considerations and development work", p.311, 1968, W.A. Benjamin, Inc.