

[09-P02]

BEAM INSTABILITY OF FEL LINAC AT NIHON UNIVERSITY

K.Hayakawa, T.Tanaka, Y.Hayakawa, Y.Matsubara, K.Sato, I.Sato, I.Kawakami,
H.Nakazawa*, K.Yokoyama*, T. Sakai* and K.Kanno*

Atomic Energy Research Institute, Nihon University
7-24-1 Funabashi Narashinodai 274-8501 Japan
*College of Science and Technology, Nihon University
7-24-1 Funabashi Narashinodai 274-8501 Japan

Abstract

Beam instability is observed at that the rf pulse is fed after the beam pulse to the accelerating tubes. Preliminary analysis has been performed. During the filling time, the rf field is induced by the semi-bunched electron beam. A fundamental and/or higher harmonics with backward group velocity will build up rapidly. These induced waves will continue after filling time and cause the beam instability. A mechanism of the continuity is not clear.

日大 FEL 用リニアックのビーム不安定性

1. 序

日大電子線利用研究施設では FEL の発振を目指してリニアックの整備を進めている。様々な問題点があり、その多くは克服されているが、現在でも未解決の問題がある[1][2][3]。その一つに電子ビームの不安定性がある。ここで報告するのは、加速管に電子ビームを入射した後に、マイクロ波を供給した場合に生ずる不安定性である。結論としては、このような手法は用いるべきではないということであるが、現象として興味深いものがある。定量的な解析はまだ十分に行われていないが、定性的には幾つかの手がかりが得られている。

2. ビーム不安定性

日大 FEL 用リニアックではゲインの小さい FEL に対応するために、20 μ sec のビームパルス幅で加速できるように設計されている。ところが使用するクライストロンが、仕様上このパルス幅に対応していない。我々は注意深くエージングを進めることにより、このパルス幅でも運転できるようになると考えているが、確証があるわけではない。そこで、出力の大

き(>20MW)領域では、エージングが進むまでの経過措置として、短いパルス幅での運転を行っている。また、電子銃のグリッドパルサーの立ち上がりは遅く、3 μ sec 程度である。この状況で過渡現象の持続時間を最小限にして、できる限りパルス幅の広い電流と加速エネルギーを得るために、電子銃のグリッドパルスを立ち上げた後にマイクロ波を供給する方法を試みた。このとき、コアモニターによって観測されたビーム電流に不安定性が現れた。コアモニターは 1 図に示すように、電子銃の直後、バンチャーの出口、最初の 4m 加速管の前後、リニアックの出口に置かれている。また、リニアックの後、90°偏向、運動量分析系を通過した後に、CM06、CM07 のコアモニター及び、ビームダンプを利用したファラデーカップ(FC)が設置されている。ビーム不安定性現れた例を図 2 に示す。図 2 はコアモニターの波形で、トレースに対応するコアモニターは図中に示した。これと比較するために、マイクロ波のタイミングを電子銃グリッドより早くした場合のコアモニターの波形を図 3 に示す。この図で、CM02 と CM05 の波形はほぼ電子銃の電流の立ち上がり波形を再現して

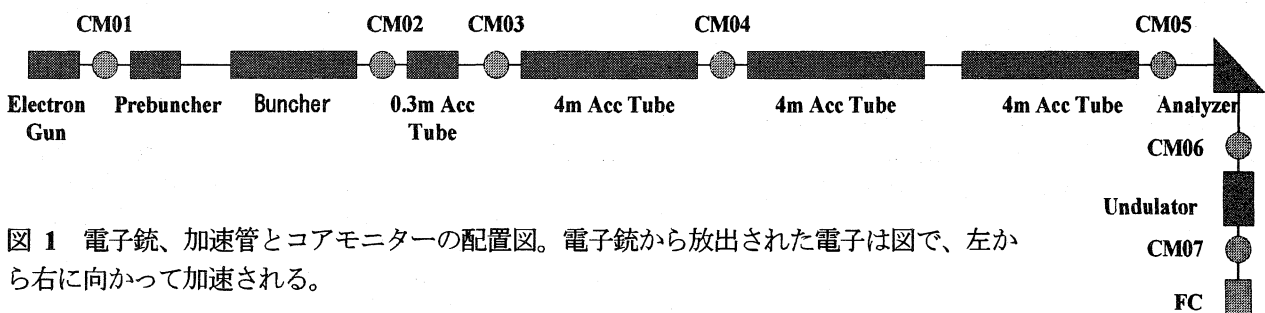
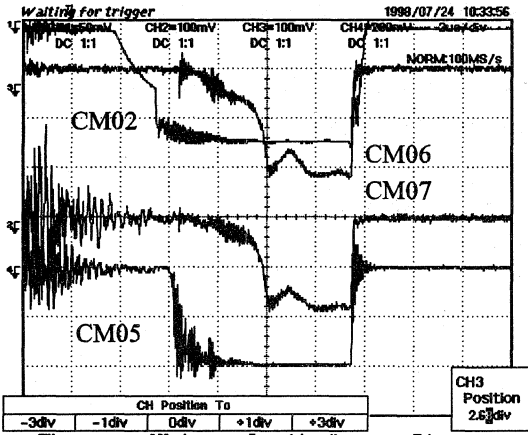
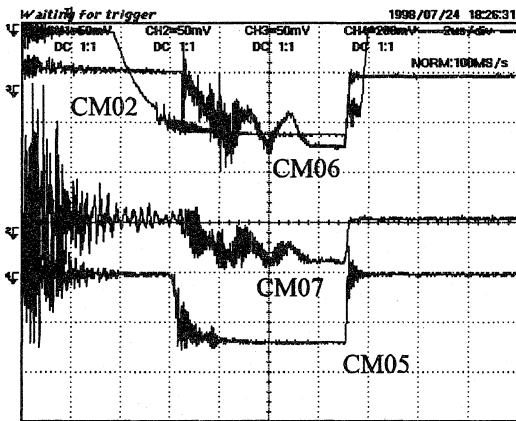


図 1 電子銃、加速管とコアモニターの配置図。電子銃から放出された電子は図で、左から右に向かって加速される。



(A)



(B)

図2 コアモニターの波形。トレースの番号順に、CM02,CM06,CM07,CM05に対応する。(A)と(B)はバンチャープリバンチャーの位相が異なる。

いる。CM06及びFCのエネルギー分析された後の波形は、電子銃の立ち上がり部分が失われているものの、電子銃電流が一定となった後はこの部分の電流もほぼ一定となっていることがわかる。これに対して、図2(A)(B)は電子ビームの開始2 μ sec後にマイクロ波を立ち上げた場合である。図からわかるようにバンチャーから出たところ(CM02)で測定した波形では先頭部分が2~2.5 μ secの間電流が変動している様子が見られる。リニアック出口(CM05)ではこれより少し(~500nsec)遅れてビームが出始め、やはり、先頭部分で変動している。(B)はプリバンチャーバンチャー間の位相を変化させた場合であるが、このときはさらに激しく、エネルギー分析後の波形ではパルス全体にわたって変動している様子が見られる。これらの波形の乱れは当初、測定系のノイズと考えていたがその後の測定で、実際に電流が変動していることが明らかとなった。

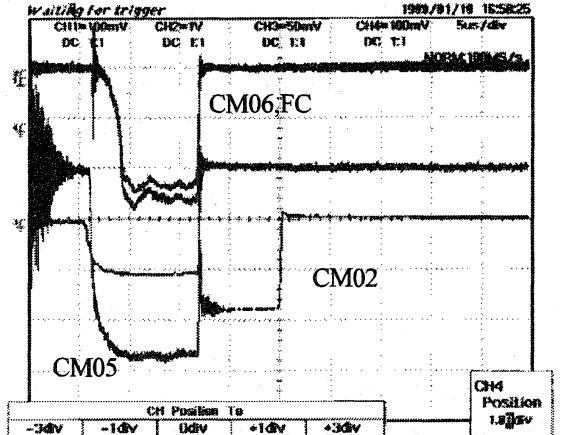


図3 マイクロ波投入後にビームを入射した場合のビーム波形。

3. 原因

図3の波形は、ビーム負荷の影響によるエネルギーの変動を考えれば、電流の立ち上がりの部分は定常電流に達した後と比べて負荷が軽く、到達エネルギーが高くなることでごく自然に説明できる。

問題は図2の波形である。電子銃から放出された電子ビームの内、全くマイクロ波を経験しない部分はリニアックに沿って配置された収束系と整合しないので、加速管出口、CM05の位置まで到達する電流は少ないと考えられる。マイクロ波の4m加速管に対するフィリングタイムは約1.2 μ secなので、マイクロ波の立ち上がりからこの時間経過するまでのビームは定常状態の加速エネルギーに達しない。この過渡現象によりバンチャー出口とリニアック出口における電流の立ち上がりの時間差ができると考えられる。

マイクロ波を電子ビームより遅れて入力する場合、以上のような自明な現象が起こるが、この他に、バンチャーの形成はバンチャーの入り口付近で主になされることに注意する必要がある。マイクロ波の加速管内における群速度は進行波形加速管の場合、光速の1%程度であることを考慮すると、マイクロ波を入力後20~30nsec後には不完全ながらバンチャーが形成されるようになると考えられる。一方、電子ビームは100kVの電子銃においてすでに光速の0.55%の速度に達している。従って、この時点では、ほとんど加速はなされず、これより下流部では電子銃のエネルギーを持ち、且つバンチャーしたビームが加速管を通過することになる。この状況は4m加速管にマイクロ波が充填される1.2 μ sec後まで、徐々にビームエネルギーを増しながら継続する。先に述べた電流の擾乱はここに原因を求めるのが妥当であろう。

4. 解析(Preliminary)及び議論

問題を単純化するために、電子銃のエネルギー 100kV、速度 $0.55c$ の完全にバンチしたビームが、位相速度を光速に等しく設定された加速管を通過する場合を考える。基本モード、すなわち、電子の進行方向に電場を持つ TM_{01} モードを考えると、バンチは位相速度 $0.55c$ の成分と最も強く結合するであろう。このとき誘起されるマイクロ波は電子を減速する位相を持ち、図 4 のブリリアンダイアグラムで示すように、 $4/3\pi$ モード付近になる。従って、このマイクロ波は backward wave すなわち、加速管の上流に向かってエネルギーが伝搬するモードとなり、急速に成長すると考えられる。

進行方向に対して垂直方向に電場の成分を持ち BBU の原因となる HEM_{11} モードを考えると、電子ビームがこの方向の非対称性を持つ場合、加速管全長で、バンチがマイクロ波に対して位相 180° 先行するモードが強く励起される。しかしこの場合、通常 BBU の発生する状況と異なり、図 4 に示すように、forward wave すなわち、加速管の下流に向かってエネルギーが伝搬するため、このモードの成長は顕著ではないと考えられる。

以上から、ビームに遅れてマイクロ波を加速管に入射した場合、フィリングタイムに達する間、時間的に周波数が変動する基本モード及び、backward wave となる高調波のマイクロ波が誘起され、電流の擾乱を引き起こしていると考えられる。

この議論は、加速管のフィリングタイムの間に現

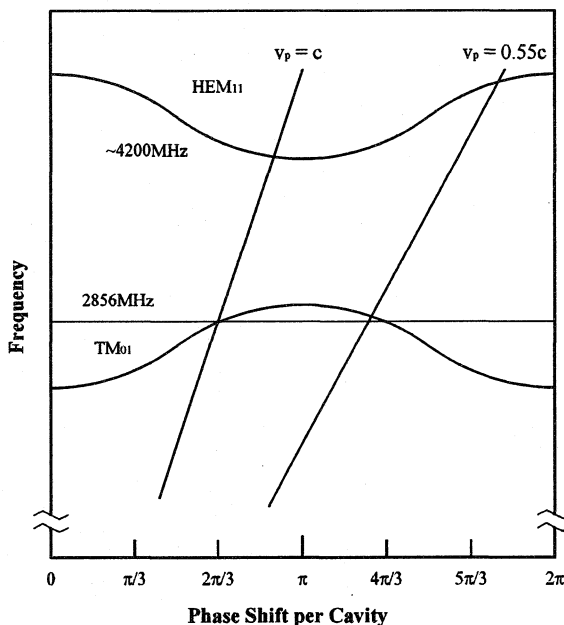


図 4 基本モードと HEM_{11} モードのブリリアンダイアグラム。直線は位相速度 c 及び $0.55c$ に相当する傾きを表している。

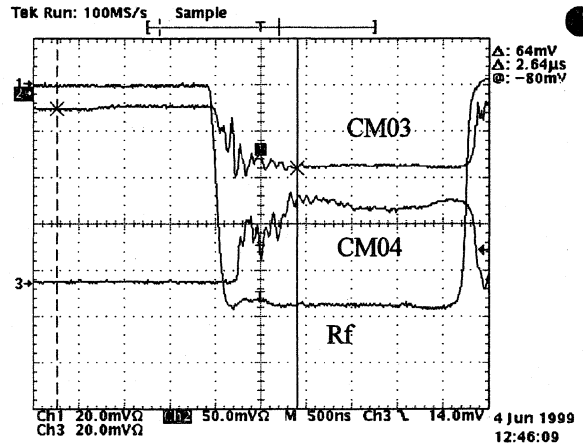


図 5 マイクロ波の検波波形と 4m 加速管の前後で観測されたビーム波形。

れると考えられる現象であるが、観測されている擾乱は図 2 に示したように、この時間の後まで続いているように見える。マイクロ波の立ち上がるタイミングと電流の変動を詳細に観測したものが、図 5 である。この図は、クライストロン出口のマイクロ波の検波波形と最初の 4m 加速管前後のコアモニター CM03 及び CM04 で測定したビーム波形を示す。時間軸は $500\text{ns}/\text{div}$ である。CM03 で観測されるのは 0.3m 加速管を通過したビームであるが、マイクロ波の立ち上がりとほとんど同時にビームも立ち上がり、およそ $1\mu\text{sec}$ の間変動が続いている。CM04 で観測される波形はこれより少し遅れて立ち上がり、やはり $600\text{--}700\text{nsec}$ 程度激しい変動が持続し、この後、数 100nsec かけて減衰してゆくように見える。また図 5 のデータを測定したときには、擾乱のパターンがパルスごとに変化していたが、大体 3 種類の擾乱パターンしか現れなかった。CM03 で観測されるビームはバンチャーと 0.3m 加速管を通過するが、そのフィリングタイムは 250nsec 程度である。ところが、電流の擾乱はこの後まで続いている。従って、ビームの先頭で誘起されたマイクロ波をフィリングタイムの後まで持続させる機構が存在すると思われるが、現在のところ明らかではない。

参考文献

- [1] I.Sato et al., "The present status of LEBRA in Nihon-University", Proceedings of this meeting.
- [2] T.Sakai et al., "Instability of the Pulse Modulators for FEL Linac at Nihon University", Proceedings of this meeting
- [3] K.Kanno et al., "Improvement of the Klystron Heater Transformer for 125MeV Linac" Proceedings of this meeting