

[13P-40]

## Beam transport system's issues and cures in the JNC linac at the high average current electron beam acceleration.

MASAHIRO Nomura, KOICHIRO Hirano, YOSHIO Yamazaki, TAKEHIRO Ishikawa\*  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4002, Naritacho, Oaraimachi, Ibaraki, 311-13 JAPAN

### Abstract

We tested a beam transport system in the JNC Linac at a high average beam current test. In this test, a 100 mA electron beam with 1.5 msec pulse width and 35 pps repetition was accelerated to 7 MeV and we found issues those are heat generations of ceramics ducts for current monitors and a beam duct at a quadrupole magnet for a beam dump. In this paper, we discuss causes and cures of them.

## 大電流電子ビーム加速試験における JNC Linac ビーム輸送系の問題点とその対策

### 1. 序

サイクル機構では、平成元年度から加速器を用いた核変換の可能性を探るために解決しなければならない問題の一つである、大強度電子線形加速器の開発を行ってきた[1,2]。開発課題としては、「大電流電子ビームの加速」と「加速器の効率化」[3,4]である。今回の発表では、平成11年12月に行った大電流電子ビーム加速試験の結果明らかになった大電流電子ビーム加速におけるビーム輸送系の問題点とその原因及び対策について述べる。

### 2. 大電流電子ビーム加速試験

まず初めに、大電流電子ビーム加速試験の試験条件を表1に示す。

表 1 試験条件

ビームエネルギー	7MeV
ピーク電流	100 mA
繰り返し	35 pps
パルス幅	~ 1.5 msec
Duty Factor	~ 5 %
平均ビーム電流	~ 5 mA

試験では、まず初めに、ピーク電流 100 mA、パルス幅約 20  $\mu$ sec、繰り返し 35 pps のビームをビームダンプまで輸送し軌道の調整を行なった。その後、パルス幅を徐々に 1.5msec まで広げ、電流値、ビーム位置、温度、真空度等の測定を行なった。こうすることにより、ビームの立ち上がりの影響を取り除き、更に、ビームローディングによる加速管内の RF パワーの減少を、還流部内の RF パワーが一定になるように RF のパルス幅をビームのパルス幅に同期して広げることにより防ぎ、測定中の温度変動による影響も取り除いた。

測定の結果、ビーム輸送に関しては、ビームロス数は数%、プロファイルモニター(デマルケスト使用のスクリーンモニター)で観測したビーム径は 5-10 $\phi$ であった。電流値に

関しては時間的には安定していたもののパルス内で放電による変動が観測された。また、ビーム位置はチャージアップ等により数 mm 程度の変動を繰り返していた。温度に関しては、電流値モニター(CT)セラミックダクト及びビームダンプ発散用四重極電磁石(BD\_Q)のビームダクトの発熱が観測され、ビームダンプ本体の中心部に集中した温度上昇も観測された。真空度に関しては、ビームダンプからの放出ガスにより最終加速管近傍でのビームラインの真空度が  $10^{-5}$  Torr 程度まで悪化した。以上述べた測定結果の中で、ビーム輸送系に直接関係する発熱や温度上昇の問題について議論する。

### 3. CT セラミックダクトの発熱

まず初めに、CT セラミックダクトの温度上昇を図1に、この時の平均ビーム電流を図2に示す。ビーム軌道を調整しながら測定は3回行なった。CT7のセラミックダクトが約100度まで上昇している。試験終了後CT7を取り外し、セラミックダクトを観測したところ水平方向(x方向)にビームが当たったと思われる変色した跡が発見された。セラミックダクトの内径(40 $\phi$ )が通常のダクト(60 $\phi$ )に比べ小さいこと、更に、CTの設置場所が四重極電磁石(ダブレット)直後にあることから考えて、上流側の四重極電磁石(x-方向発散、y-方向収束)で広がったビームの一部がセラミックダクトに当たっていたと考えられる。電子ビームの平均電流が高いため、ビームロス0.1%でも約20W程度の発熱量となる。ビームのたまかな広がりを調べるためにParmelaによる軌道計算を行なった。計算結果を図3に示す。この計算結果から、発熱を伴う無視できない量のビームハローが40 $\phi$ 程度の大きさで広がっていたと考えられる。

### 4. BD\_Q のビームダクトの発熱

BD\_Q(ダブレット)は、約2m後方に設置されたビームダンプに、ビーム径を約200 $\phi$ まで広げて照射できるよ

うに最終加速管後に設置されている。

試験中にこの BD\_Q のビームダクトが約 180 度まで上昇した。ビームダクトを観察したところ、下流側の電磁石のダクト部分の上下方向にビームによると思われる変色部分が観測された。温度上昇が大きかった為、この部分に簡易の冷却系を設置した。原因は、先に述べた、CT セラミックダクトの発熱と同じで、上流側の四重極電磁石 (x-方向収束, y-方向発散) により y 方向に広がったビームの一部がビームダクトに当たった為と考えられる。Parmela による軌道計算を行なった結果、ビームハローが 40φ 程度以上の大きさに広がっていたと考えられる。計算結果を図 4 に示す。

## 5. ビームダンプ本体中心部の温度上昇

ビームダンプは通常のビームダンプとしての機能の他に、ビーム照射体としての研究ができるように、100 個の熱電対による温度測定、および、ビームダンプ本体を電気的に絶縁された構造 (4 分割) にすることにより電流値測定が可能ないように作られている。[5]

まず初めに、図 2 に示した電流値を加速した時のビームダンプ本体中心部の温度上昇を図 5 に示す。平均ビーム電流が 5mA 程度になると、ビームダンプ中心部では 200 度以上になった。この時中心部以外の温度上昇は 50 度程度であった。設計値 (平均ビーム電流 20mA の時に約 300 度) と比較してもかなり中心部の温度上昇は大きい。中心部に温度上昇が集中した理由は、ビームダンプ外側のダクトが発熱しビームを広げることができなかつた為である。現象を理解するために Parmela による軌道計算を行なったので、その結果を図 6 に示す。この計算結果から 40φ 程度に広がったビームハローがビームダンプ外側のダクトに当たっていたことが理解できる。これが、ビームを広げることができなかつた原因である。

中心部に温度上昇が集中したもう一つの原因として、x と y 方向のビーム不均一が挙げられる。プロファイルモニターによるビーム径の測定結果から考えてビームの大部分は 10φ 程度に収まっていると考えられる。ビーム径 10φ のビームのビームダンプまでの軌道を計算したのでその結果を図 7 に示す。ビームダンプの位置では x 方向と y 方向で広がりの違いが生じている。原因は、10φ 程度のビーム径をビームダンプの位置で 200φ 程度に広がるように、焦点を BD\_Q 直後に持ってきた為である。さらに、ダブルレットを使用したのも原因の一つである。図 7 を見ると、x 方向の焦点は下流側の四重極電磁石の位置にまできており、四重極電磁石を用いた発散系としての機能を失っている。

## 6. ビーム輸送系の改善案と課題

セラミックダクトの温度上昇に対する改善策としては、セラミックダクトの内径を通常のビームダクト程度に広げることで対応できる。しかし、このことはビームハローを後段まで輸送することを意味する。我々の加速器では、「加速する前に積極的に余分なビームは取り除く」と

言う方針で冷却機能を備えた 20φ のコリメーター (温度以外に、電気的に絶縁されている為電流値も測定可能) を加速器室入り口とパンチャー手前の二箇所に挿入している。この考えを加速部にも応用し、ある程度の間隔でこの種のコリメーターを挿入し積極的にビームハローは取り除くべきである。

このコリメータの挿入場所として是非とも必要な場所が BD\_Q 直前である。コリメーターを挿入することによりビームハローを取り除き、BD\_Q 及びビームダンプ外側のビームダクトの発熱を防ぎ、ビームをビームダンプ上に広げることが可能になる。また、このコリメータ上流の四重極電磁石と BD\_Q を組み合わせることでビーム発散系と考えることにより、ビーム発散に対する自由度が生まれ、手前の四重極電磁石でコリメータ位置でのビーム径を調整し、積極的にコリメータでビームハローを取り除き、主ビームは BD\_Q で広げビームダンプで受け止めるようにすることができる。こうすることにより、芯は細いがビームハローが広がっているビームや、全体的にひろがっているビーム等色々な分布を持ったビームに対応することが可能になってくる。更に、こうすることによりコンダクタンスが大きくなり、最終加速管近傍でのビームラインの真空度も改善することができる。

課題としては、ビームダンプ上での x と y 方向の広がりの不均一性が挙げられる。現在の平均電流では特に重要な問題にはならないが、今後平均電流を 10mA 程度まで高めた場合を考えると是非とも解決しなければならない問題である。また、今回のように平均電流の高いビームを加速する場合には、ビームハローに関する情報は重要であり、ある意味ではビーム本体よりも重要である。そこで、ビーム本体ではなく、ビームハローのエネルギー分布や密度分布等を測定する為のモニターの開発も重要な課題である。

## 7. 謝辞

大強度 CW 電子線形加速器の開発にあたり、豊富な経験に基づく有益な助言をして下さった鳥塚賀治教授、佐藤勇教授及び高エネルギー加速器研究機構の方々に感謝いたします。

## 8. 参考文献

- [1] M. Nomura *et. al.*: Proc. of the 24th Linear Accelerator meeting in Japan (1999) 27
- [2] Y. Yamazaki *et. al.*: Proc. of the 12th Symposium on Accelerator Scienc and Technology (1999) 191
- [3] K. Hirano *et. al.*: Proc. of the 12th Symposium on Accelerator Scienc and Technology (1999) 257
- [4] M. Nomura *et. al.*: Proc. of the 12th Symposium on Accelerator Scienc and Technology (1999) 260
- [5] H. Takei *et. al.*: Proc. of the 12th Symposium on Accelerator Scienc and Technology (1999) 558

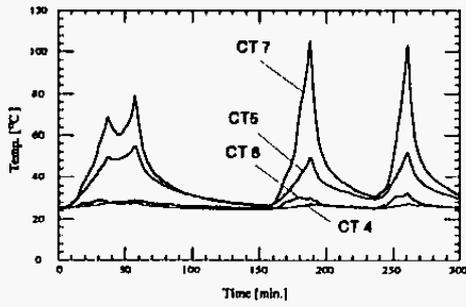


図1 CT セラミックスダクトの発熱

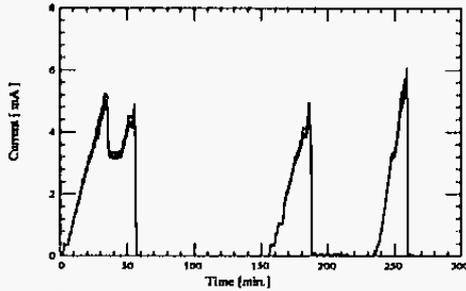


図2 平均ビーム電流

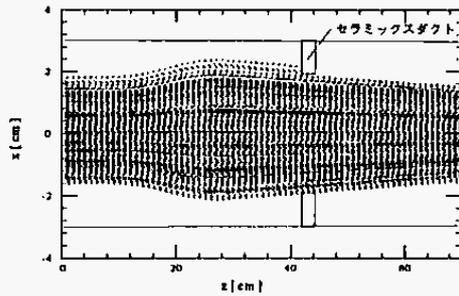


図3 CTセラミックスダクト近傍のビーム軌道計算  
電子ビームの初期条件は、エネルギー=6.5 MeV、  
ビーム径=40 $\mu$ 、エミッタンス=10 mm mrad で、  
ビームウエストは  $z=0$  の位置にあるとした。四  
重極電磁石の強度は実際に使用した値 -70  
gauss/cm を用いた。図中実線はビームダクトを示  
す。

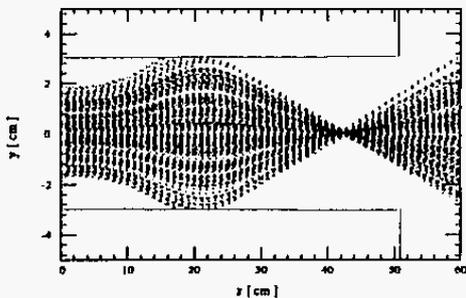


図4 BD\_Qのビームダクト近傍のビーム軌道計算  
電子ビームの初期条件は、エネルギー=7.0MeV、  
ビーム径=40 $\mu$ 、エミッタンス=10 mm mrad で、  
ビームウエストは  $z=0$  の位置にあるとした。四  
重極電磁石の強度は実際に使用した値 189  
( $x\_focus$ )と 252 ( $y\_focus$ ) gauss/cm を用いた。図中  
実線はビームダクトを示す。

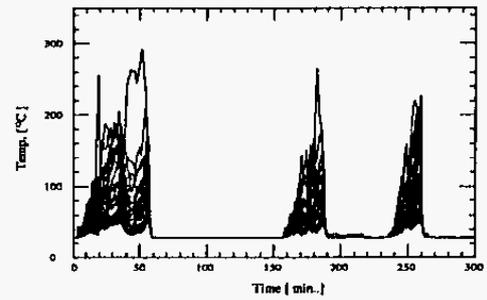


図5 ビームダンプ本体中心部における温度上昇  
ビームダンプ本体中心部に設置された37個の熱電  
対による測定結果。

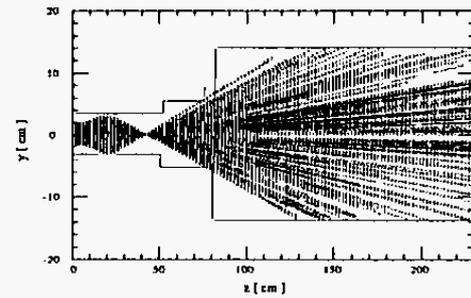


図6 ビームダンプ本体までの軌道計算  
電子ビームの初期条件は、エネルギー=7.0MeV、  
ビーム径=40 $\mu$ 、エミッタンス=10 mm mrad で、  
ビームウエストは  $z=0$  の位置にあるとした。四  
重極電磁石の強度は実際に使用した値 189  
( $x\_focus$ )と 252 ( $y\_focus$ ) gauss/cm を用いた。図中  
実線はビームダクトを示す。

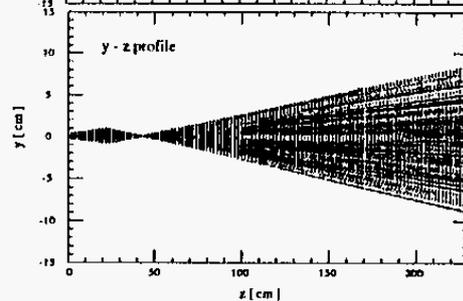
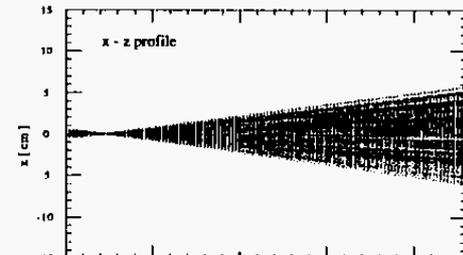


図7 ビームダンプ本体までの軌道計算  
電子ビームの初期条件は、エネルギー=7.0MeV、  
ビーム径=10 $\mu$ 、エミッタンス=10 mm mrad で、  
ビームウエストは  $z=0$  の位置にあるとした。四  
重極電磁石の強度は実際に使用した値 189  
( $x\_focus$ )と 252 ( $y\_focus$ ) gauss/cm を用いた。ビー  
ムダンプ本体は  $z=230$  cm の位置にある。