

[P30-9]

HIGH-POWER TEST OPERATION OF THE PF LINAC RF SYSTEM

H. Hanaki, S. Anami, A. Enomoto, H. Kobayashi, S. Michizono, T. Oogoe and Y. Saito

National Laboratory for High Energy Physics
Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305 Japan

ABSTRACT

The RF source of the PF 2.5-GeV linac has been reinforced by installing SLEDs and replacing the existing 30-MW klystrons with new 50-MW ones. Conditioning of the upgraded high-power units is proceeding and the discharge in the process has been analyzed. A method for reducing the RF-conditioning period is proposed. The averaged energy gain and energy multiplication factor of the upgraded units in operation is 163 MeV/unit and 1.93, respectively.

PF リニアック RF 源の大電力試験運転

1. はじめに

KEK PF 2.5 GeV 線型電子加速器の増強 [1, 2] は 1994 年に開始され、1998 年の完成を目指して進行中である。RF 源に関する増強の進行予定は、今年度末の時点で概ね以下の通りである。

- ・新型サブブースタの設置は 63% 終了。
- ・大電力クライストロン用パルス変調器の出力電力増強 [3] 及び新造は 88% 終了。
- ・50 MW クライストロン [4] の設置は 69% 終了。
- ・SLED [5] の設置は 68% 終了。
- ・SLED を含めた加速ユニットのコンディショニングは 47% 終了。

96 年 8 月の時点では 11 ユニットの SLED が設置され、内 10 ユニットについてコンディショニングがほぼ終了した。また 8 ユニットは実際のビーム加速に使用されている。

2. RF コンディショニング

手順と履歴

改造以前には、一本の加速管に投入された最大 RF 電力は、約 8 MW であった。従って、50 MW クライストロンと SLED の設置により増強された、70 MW を越える電力をいきなり加速管に投入しようとしても、加速管内で放電を起こすだけで、マイクロ波は反射されて加速管に入って行かない。また頻繁に放電が発生すると、加速管内面が損傷を受け、その結果より放電しやすくなってしまふ。そこで以前にも増して注意深いコンディショニングを時間をかけて行う必要がある。

加速ユニットに SLED を設置した場合、最初の RF コンディショニングは次の手順で行われる。

- 1) まず SLED 空胴に離調棒を挿入して動作しないようにする。大電力 RF パルスを、0 から 30 ないし 40 MW まで数日かけて徐々に増加させながら、直接加速管に投入する。

- 2) 次に離調棒を抜き、SLED を動作させる。クライストロン出力を再び 0 から 40 MW まで徐々に増加させる。通常 2、3 週間を要する。

図 1 は、一例として 4-7 ユニットのコンディショニング履歴を示したものである。この例ではコンディショニングは比較的短期間で完了している。

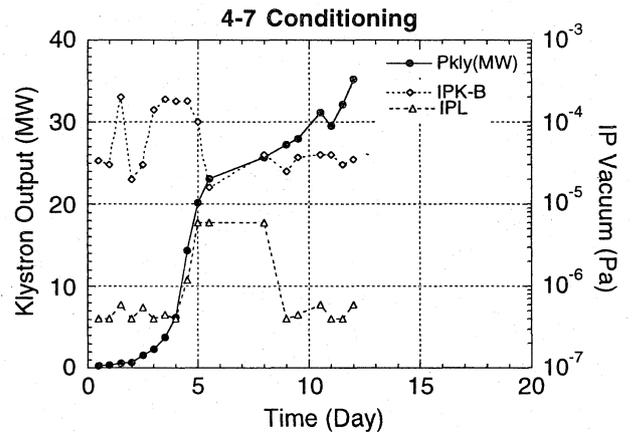


図 1 4-7 ユニットのコンディショニング履歴
 図中、IPK-B 及び IPL のシンボルは、それぞれ導波管および加速管内の圧力を示す

一方、コンディショニングに一ヶ月以上を要したり、あるいは RF 出力をあるレベル以上に上げると放電が著しく発生し、全くコンディショニングが進展しない例 (図 4) もあった。これらの原因を明らかにするのはそう容易ではないが、放電によって反射された RF パルス波形を解析したり (次節)、放電の際発生した X 線を放射線検出器により測定することで、放電箇所を推定する努力を続けている。

加速管内で反射された RF パルスの解析

KEK 電子線型加速器の場合、加速管一本のフィ

リングタイムは約 $0.5 \mu\text{s}$ である。従って加速管内で反射された RF パルスは、反射を起こしている部位により $0 \sim 1 \mu\text{s}$ の遅延時間を伴って観測される。そこで反射 RF パルスの遅延時間、パルス幅を解析すれば、反射すなわち放電が起きた部位を特定することができる。

以下、SLED RF パルス波形の増幅された部分（幅 $0.6 \sim 1 \mu\text{s}$ ）にのみ注目して解析を行うことにする。ただし解析を容易にするため、次のように仮定する。

RF パルスが加速管中を進行しているとき、ある部位で放電が発生したとする。その場所より上流側に存在しかつ進行中のマイクロ波は全て、放電が発生した位置で反射され、下流側のマイクロ波はそのまま加速管を通り抜ける。

さて、観測された反射 RF パルスのパルス幅を t_2 、遅延時間を t_1 とする。この t_1 は、加速管入口から放電地点 (L) までのマイクロ波伝搬時間の二倍に等しい。また、増幅された RF パルスが加速管入口に達してから放電が起こるまでのタイミングを T とする。

これら T および L は次式により求められる。

$$T = w - t_2$$

$$L = \frac{1}{g} \left[1 - \exp\left(\frac{t_1 - T}{2T_f} \ln(1 - g)\right) \right]$$

ただし、 T_f は加速管のフィリングタイムであり、 g は定電界加速管荷の場合 $1 - e^{-2\tau}$ (τ は減衰係数) と定義する。また $L = 0, 1$ はそれぞれ加速管入口および出口を表す。

現実の反射波形は先に仮定したように理想的ではなく、 T や L を求めるのは容易ではない。しかし現象を大まかに把握するために、比較的波形が乱れていない例を拾い、計算を行った。

図 2、3 は、4-7 ユニットの場について解析した結果である。ただし、一つのユニットは加速管 4 本で構成されているが、解析した反射波は SLED 出口で検出したため、どの加速管から反射されたのかは区別できない。

図 2 によれば、放電は、電界の一番強い RF パルス先頭ではなく、ある程度時間が経ってから発生している。これは、放電が成長するのには時間がかかる事実と良く一致している。

また図 3 からは、加速管入口カップラおよび出口カップラ近傍で放電が起きやすいことが判る。これも、過去に加速管を取り外して観察した例ではカップラ内に放電痕が見られた事実と矛盾がな

い。尚、図 3 の入口カップラ近傍での事象には、導波管内で発生した放電も含まれることに注意。

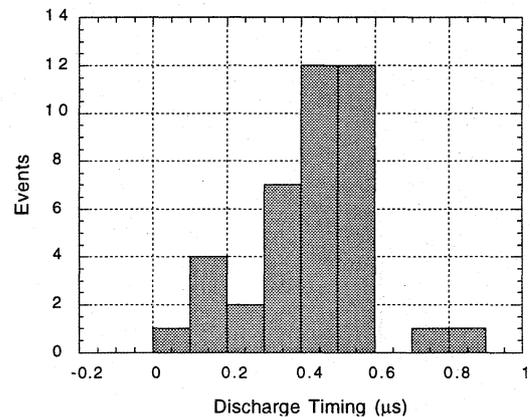


図 2 放電タイミングの分布 (4-7 ユニット)

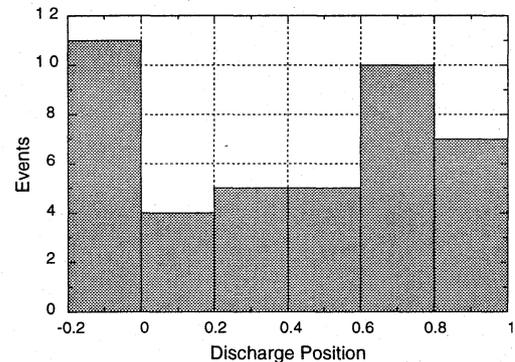


図 3 放電位置の分布 (4-7 ユニット)、ただし負の位置は単に計算誤差による

コンディショニング方法の検討

前述のコンディショニングが進まない不良ユニットへの対策として、立体回路や加速管を交換するというのは原則的に困難である。従って RF 側の工夫でコンディショニングを進展させるための方策を検討する必要がある。

そこでまず、SLED の増幅率をなるべく下げずに SLED 出力のピーク電界強度を下げる手段として、位相が反転する経過時間を、現在の 50 ns 以下から 300 ns 程度まで長くすることを考えた。位相反転時間を調整できる移相器をサブブースタに組み込み、再度コンディショニングを行った結果が図 4 に示されている。

この例 (5-6 ユニット) では、対策前は 10 MW 以上の RF 電力を投入すると放電が頻発し、十日以上かけても全くコンディショニングは進展しなかった。しかし対策後は十日で 32 MW をユニットに投入できた。明らかに効果があったと言える。

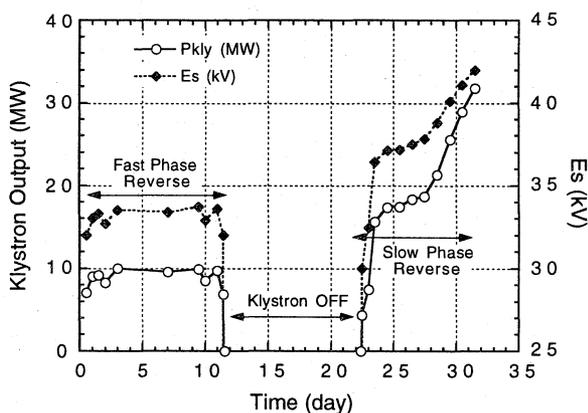


図4 5-6ユニットのコンディショニング履歴
履歴の左側は対策前、右側は位相反転時間を300 nsとした場合

位相反転時間を長くすると、SLED RF パルスのピーク部の立ち上がり時間は遅くなり、ピーク電力は低下する。また、その立ち上がり部での周波数の広がり小さくなり、狭帯域な加速管カップラでの反射が減少する（反射の現象は測定により確認された）。その結果、定在波のピーク電界強度が下げられることも、コンディショニングが進展しやすくなった原因と推測できる。

尚、この場合の加速エネルギー利得の低下を、あるユニットについて測定した結果は、約3%であった。

3. ビーム加速試験

コンディショニングの終了したユニットの大部分についてはエネルギー利得が測定された。以下の表は4セクターについての結果をまとめたものである。この時 SLED 空胴にエネルギーを蓄積する時間は3 μ sであった。

エネルギー利得の平均値は 163 MeV/unit (21.6 MeV/m) であり、仕様の 160 MeV を越えている。また増倍率の平均値は 1.93 であったが、これも計算された値 1.96 に近い。

SLED を動作させた場合のエネルギー利得および増倍率

Kly #	Kly Power (MW)	Energy gain (MeV/unit)	Energy Mult. Factor
4-1	32	152.5	1.92
4-2	30	164.5	2.12
4-3	43	164.0	1.78
4-4	32	148.5	1.87
4-5	38	165.0	1.90
4-6	48	179.0	1.85
4-7	35	170.0	2.06

SLED RF パルス波形は平坦部が無く、その上なるべく加速利得を稼ぎたいために、位相反転後のパルス幅をなるべく短くして空胴への蓄積時間を長くするようにしている。そのため、エネルギー利得は、RF とビーム間のタイミングに強く依存する。

次の図は、理論的あるいは実験的に求めたエネルギー利得の減少を、RF パルスのタイミングの関数として描いたものである。ただし、SLED 空胴の蓄積時間は 3.3 μ s、増幅された部分のパルス幅は 0.7 μ s であった。

測定点に対し、最小自乗方により二次関数をフィットさせた。その結果によれば、エネルギーの減少を 0.1% 以下におさえるには、タイミングは 7 ns 以下で管理しなければならない。

尚、現在製作中の新しいタイミングシステムの仕様は、その時間設定分解能、ジッター共に十分この要求を満たしている。

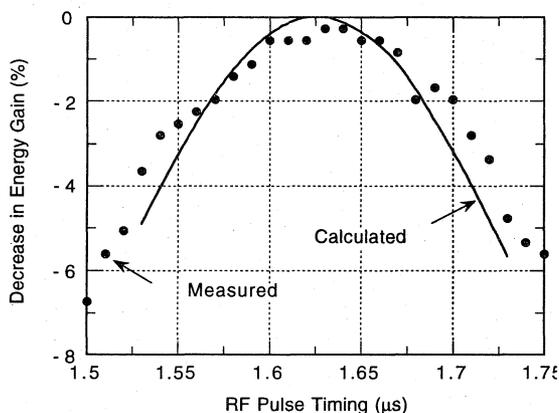


図5 RFパルスのタイミングの関数としてプロットしたエネルギー利得の低下

4. 参考文献

- [1] Design Report on PF Injector Linac Upgrade for KEKB (in Japanese), KEK Report 95-18, 1996.
- [2] A. Enomoto, et al., "Reformation of the PF 2.5 GeV Linac to 8 GeV", Proceedings of the 1994 International Linac Conference (Tsukuba), p 184.
- [3] H. Honma, et al., "Upgrade of the PF 2.5-GeV Linac Klystron Modulator for the KEK B-Facility Project", Proceedings of the 1994 International Linac Conference (Tsukuba), p 436.
- [4] S. Fukuda, et al., "Development of the B-Facility Linac 50-MW pulsed klystron", Proceedings of the 1994 International Linac Conference (Tsukuba), p 427.
- [5] H. Hanaki, et al., "Use of SLEDs for High-Gradient Acceleration", Proceedings of the 1994 International Linac Conference (Tsukuba), p 430.