

HIGH GRADIENT TEST ON THE C-BAND CHOKE-MODE TYPE ACCELERATING STRUCTURE

T. Inagaki^{1,A)}, K. Onoe^{A)}, T. Shintake^{A)}, H. Baba^{A)},
X. Marechal^{B)}, S. Takahashi^{B)}, H. Matsumoto^{C)}, S. Miura^{D)}

^{A)} SPring-8 / RIKEN Harima Institute, 1-1-1 Kouto, Mikazuki-cho, Hyogo, 679-5148

^{B)} SPring-8 / JASRI, 1-1-1 Kouto, Mikazuki-cho, Hyogo, 679-5148

^{C)} KEK, 1-1 Oho, Tsukuba, 305-0801

^{D)} Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., 5007 Itozaki, Mihara-shi, Hiroshima, 729-0393

Abstract

SPring-8 has a single-pass X-ray FEL project, SPring-8 Compact SASE Source (SCSS). The C-band (5712 MHz) choke-mode type accelerating structure will be used for the project. We successfully obtained an accelerating gradient of up to 33 MV/m at 55 MW rf peak power, after 344 hours rf processing. While the operation, there was found no difficulty even at 32 MV/m. We confirmed that rf parameters (attenuation, filling time, etc.) of the structure shows the design value. No phase shift was observed during the operation. This means the structure suffered no damage. Amount of dark current generated by rf is 89 pC for each pulse at 32 MV/m and 700 nsec pulse width. In SCSS, beam current is designed to be 1 nC for each pulse. The dark current will be reduced the accuracy of beam position in the BPM. Therefore, rejection of the noise due to the dark current will be important consideration. A dark current profile shows that most of the dark current started edges around the beam holes and it does not travel just along the beam axis.

C-band チョークモード型加速管の高電界試験

1. 高電界試験の目的

SPring-8 Compact SASE-FEL Source (SCSS)^[1]では、6～8 GeVの主加速器部にチョークモード型のCバンド(5712 MHz)加速管^[2]を108～144本使用する予定である。SCSSでは、この加速管に定格でピーク強度53 MW (最大71 MW) のRFを供給し、定格で32 MV/mの加速電界を得る。この時、最大表面電界は88 MV/mと従来のSバンド加速管の倍の電界強度となる。高電界による放電の恐れや暗電流の増加などの問題がないか調べるために、実際に加速管に大電力RFを供給し、試験を行った。また、今回の加速管試験は、加速管の試験だけでなく、電源からクライストロンも含めたCバンド加速器システムの複合試験でもある。

2. セットアップ

図1 に高電界試験テストスタンドの写真を示す。モジュレータ電源によりCバンドクライストロンに最大 -360 kV、4.5 μ secの電圧を印加し、進行波管アンプより400 WのドライブRFを入力すると、クライストロンから最大で55 MWのRFが導波管を通してシールド内の加速管に供給される。これにより加速管内に最大で $E_a=33$ MV/mの加速電界が得られる。セットアップの詳細については文献[3]を参照されたい。

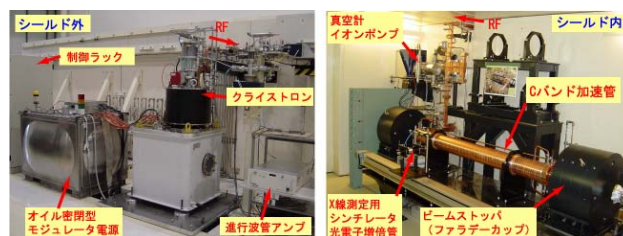


図 1: 高電界試験のセットアップ。左はシールドルーム外側、右はシールドルーム内側。

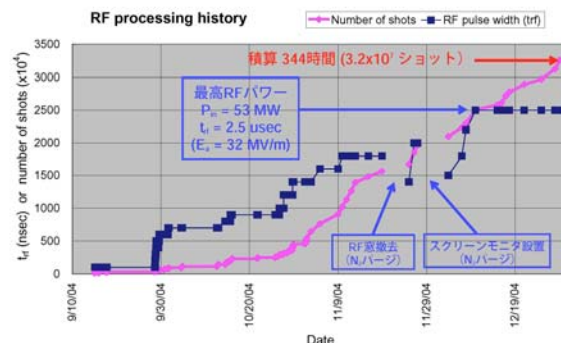


図 2: RFエージングの履歴。●印が積算ショット数。■印が、RFのパルス幅。

¹ E-mail: inagaki@spring8.or.jp

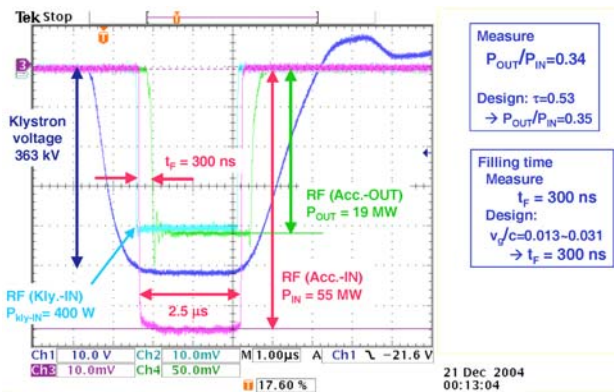


図 3： 典型的な測定波形。Ch1:クライストロン印加電圧(Vk)、Ch2:クライストロン入力RF、Ch3:加速管入口でのRF、Ch4:加速管出口でのRF。

3．RFエージングと放電頻度

図2 に、今回のRFエージングの履歴を示す。2004年9月14日に初めて加速管に大電力RFを入れ、9月28日から本格的にエージングを開始した。1月12日までにのべ344時間の運転を行った。運転繰り返しは、10月末まで10 ppsで慎重にエージングを行い、その後はおよそ30 ppsでエージングを行った。積算ショット数（運転パルス数）は、 3.2×10^7 回となる。今回のエージングは、PLCを用いた自動エージングコントロールシステム^[3]を用いて、RFパルス幅（ t_{rf} ）を徐々に最大2.5 μsecまで延ばしながら、加速管へ供給するRFパワーを最大55 MWまで上げた。

t_{rf} が1.4 μsecを超えると急に放電の頻度が上がった。この時の主な放電箇所は、クライストロンの下流にあるRF窓のセラミック部分であった。今回のセットアップではRF窓は必ずしも必要でないでRF窓を撤去した。高頻度の放電は無くなり、加速管のエージングに専念することが可能となった。

エージングの最後の頃には、 $t_{rf}=1.2$ μsec程度までならほとんど放電を起こさずに最大RFパワーを入れることができた。パルス幅が長くなると放電の頻度が上がり、2.5 μsecでは最大RFパワーで数分も持たずに放電を起こし停止し、その度に再起動を行った。ただし、実際の加速器ではRFパルス圧縮を行い $t_{rf}=500$ nsecにて運転するので、問題はない。放電頻度を抑えるためには、必要以上にパルス幅を広げないことが重要である。

4．測定されたRFの波形

図3に、加速管に最大RFパワーを供給した時の典型的な波形を示す。クライストロンのビーム電圧-363 kVを印加した時、加速管に入るRFは55 MWであった。そして加速管から出るRFは19 MWであった。従って、加速管で34%まで減衰する。一方、加速管

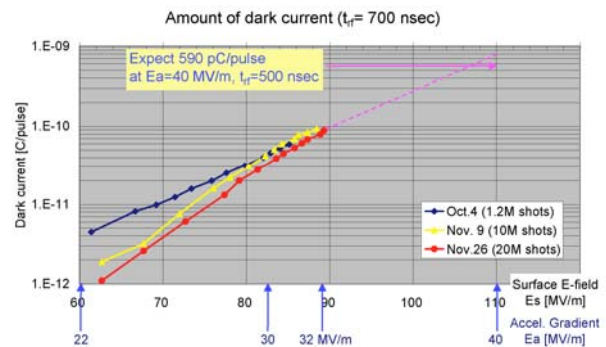


図 4： 暗電流の測定結果。横軸が最大表面電界強度（Ea）、縦軸が暗電流の量。

の設計値 $\tau=0.53$ より減衰は $\exp(-2\tau)=35\%$ と見積もられる。測定された減衰はほぼ設計どおりである。次に、加速管の前後でのRFパルスの遅延は300 nsecと測定された。これは加速管の設計値 $v_g/c=0.013 \sim 0.031$ より計算されるFilling time $t_f=300$ nsec と一致している。

また、加速管入口のRFと出口のRFとを同期検波し位相差をモニタする回路を用意した。今回のエージングを通じて、測定精度 10° 以上の位相差のずれがないことを確認した。このことは、今回のエージングによって移相をずらす加速管内部の損傷がないことを示している。

5．暗電流の測定

加速管にピーク強度53 MWのRFを供給した時、加速管の内部には軸上で $E_a=32$ MV/m、表面で最大 $E_s(\max)=89$ MV/mの電界が生じる。この高電界により放出される暗電流の量を測定した。図1に示すように、加速管の上下流80 mmに、直径550 mm、厚さ320 mmの鉄製のビームダンプを絶縁させて置いた。そして、ダンプへの電荷蓄積をピコアンメータにより測定した。下流側の暗電流測定結果を、表1および図4に示す。RFエージングが進むと暗電流は減少してゆくことがわかる。また、加速管上流側に出る暗電流は、加速管下流側のおよそ40%であった。

電界強度と暗電流の関係は、Fowler-Nordheim (F-N) の電界放出理論^[4]により、横軸が $1/E_s$ 、縦軸が $\log_{10}(I/E_s^{2.5})$ であるF-Nプロット上で直線に乗ることがわかっている。表面の凹凸による局所的な電界増倍を表す電界増倍係数 β は、以下のようにF-Nプロット上の傾きから求められる。

$$\frac{d(\log_{10}(I/E_s^{2.5}))}{d(1/E_s)} = -\frac{2.84 \times 10^9 \phi^{1.5}}{\beta}$$

ϕ は銅の仕事関数で、他の文献^[4]と同じく $\phi=4.5$ eV とした。各データをF-Nプロット上にて直線近似

し、 β を求めたものを表1に記す。ここでも初期のエージングによって表面の凹凸が減り増倍係数が減少することがわかる。今回の加速管は 2.0×10^7 ショットのエージングにより $\beta=70 \sim 80$ 程度になったが、他の加速管での測定結果[4]と比較してもエージング期間が短いことを考慮すればおよそ良好であったと結論される。

表 1: 暗電流測定結果

運転時間 (shot数)	パルス幅 t_{rf}	$E_a=32\text{MV/m}$ 時の 暗電流 (下流側)	増倍係数 β
31時間 (1.2×10^6)	700 ns	59 pC/pulse ($E_a=31\text{MV/m}$ にて)	143
160時間 (1.0×10^7)	700 ns	94 pC/pulse	79
	1400ns	177 pC/pulse	72
235時間 (2.0×10^7)	700 ns	89 pC/pulse	77
	1400ns	151 pC/pulse	73

実際のSCSS加速器では、RFパルス圧縮をしてから加速管に入れるため、 $t_{rf}=500$ nsecである。 $t_{rf}=700$ nsecでの測定と1400 nsecでの測定から外挿して、500 nsecでの暗電流を見積もると、71 pC/pulse ($E_a=32$ MV/m時)と推定される。また、F-Nプロット上の直線近似にて外挿すると、 $E_a=40$ MV/mで $t_{rf}=500$ nsecの時には、590 pC/pulse と推定される。一方、SCSSでは電子ビームの電荷量はおおよそ1 nC/pulseである。従って、ビーム位置モニタを考える際に注意が必要である。

6．暗電流のプロファイルの測定

図5に示すように、加速管より230mm下流にスクリーンモニタを置き、蛍光板上のプロファイルをCCDカメラを用いて測定した。通常運転時は、図5の右上に示すような暗電流のプロファイルが得られる。そして加速管の内部で放電した時は、右下のように蛍光板が輝き、大量の電子を放出したことを示している。通常時の暗電流プロファイルを画像解析し、 x 、 y 軸上の強度分布を取ったものも同時に示す。プロファイルの広がりFWHMで約9 mmで、加速管下流側のアイリス径14 mm ϕ から大きく広がってはいないことを示している。また、中央付近に凹みが見られるが、ビーム軸中心を抜けてくる暗電流がいくらか少ないことを示している。これは、暗電流の発生点が加速管の内壁であるため、ビーム軸に対して多少の角度がつくためだと思われる。従って、加速管の下流に適当なコリメータを入れることにより、中心軸上を通るビームと角度発散のある暗電流とを弁別できると期待される。

6．Cバンド加速器の今後の予定

SCSSでは、今秋にFEL試験加速器を建設し運転を

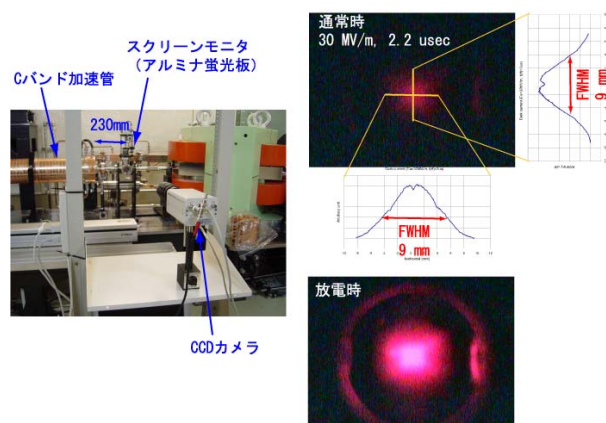


図 5: 左：スクリーンモニタの配置。
右：通常時及び放電時の暗電流プロファイル。

行う予定^[1]である。今計画では、Cバンド加速管を4本使用し250 MeVまでの加速を行う。今回の試験により、Cバンド加速管が $E_a=32$ MV/mにて問題なく使用できることを実証した。そして、試験加速器では、今回使用できなかったRFパルス圧縮器 (SKIP, SLED) を使うことにより、 $E_a=40$ MV/m程度までパワーを上げ、動作試験をしたいと考えている。

謝辞

今回のRFエージングの際には、著者達の他に、理研の渡川和晃氏、大竹雄次氏、白澤克年氏、芦谷庸平氏、JASRIの高嶋武雄氏にも参加していただき、交替でエージングを行った。多忙の中、感謝している。また、JASRIの高城徹也氏ほかSCSSグループ、Spring-8の多くの方々にご協力いただき感謝している。

参考文献

- [1] URL: <http://www-xfel.spring8.or.jp>
「SCSS X-FEL Conceptual Design Report」2005年
- [2] T. Shintake, et. al., "HOM-Free Linear Accelerating Structure for e+e- Linear Collider at C-Band", PAC'95, KEK-Preprint 95-48 (1995); 三浦禎雄「Cバンドチョークモード型加速管の製作」第28回リニアック技術研究会 p218-220 (2003)
- [3] 稲垣隆宏「C-bandチョークモード型加速管の高電界試験に向けて」p281-283;
尾上和之「PLCを用いた自動エージングコントロールシステム」p546-548;
高橋直「Cバンド加速管の精密温調システム」p329-332 共に第1回日本加速器学会(2004)
- [4] 五十嵐康仁「高電界加速のためのリニアック加速管に関する研究」KEK Report 2003-9 (2004); H. Matsumoto, "Dark Currents" LINAC'96, KEK-Preprint 96-120 (1996);