

## Cバンドディスクロード型加速管の大電力RF試験

### HIGH POWER RF CONDITIONING OF C-BAND DISK-LOADED TYPE ACCELERATING STRUCTURE.

櫻井辰幸<sup>#, A,B)</sup>, 稲垣隆宏<sup>A)</sup>, 安積隆夫<sup>A,B)</sup>, 恵郷博文<sup>B)</sup>, 鈴木大輔<sup>C)</sup>, 三浦禎雄<sup>C)</sup>, 大竹雄次<sup>A)</sup>  
Tatsuyuki Sakurai<sup>#, A,B)</sup>, Takahiro Inagaki<sup>A)</sup>, Takao Asaka<sup>A,B)</sup>, Hiroyasu Ego<sup>B)</sup>, Daisuke Suzuki<sup>C)</sup>, Sadao Miura<sup>C)</sup>,  
Yuji Otake<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> RIKEN SPring-8 Center

<sup>B)</sup> JASRI/SPring-8

<sup>C)</sup> Mitsubishi Heavy Industry CO. LTD

#### Abstract

In general, an accelerating structure to accommodate both a high-gradient and a high RF pulse repetition rate is necessary in order to increase an opportunity of a user experiment and to lower production costs in XFEL. A C-band disk-loaded type travelling wave structure has been developed to aim at an acceleration gradient higher than 50 MV/m and an RF pulse repetition rate operation of 120 pps. The accelerating structure was designed to be a quasi-constant gradient structure with an RF-mode of TM<sub>01</sub>-2 $\pi$ /3. In order to reduce surface electric fields, we employed an ellipsoidal curvature shape around an iris aperture. We performed a high power RF test and conditioning of the manufactured accelerating structure. The acceleration gradient was achieved to be as high as 50.1 MV/m by the conditioning with 107 MW average RF power. Moreover, 120 pps operation was carried out and the structure was operated without any serious trouble.

#### 1. はじめに

X線自由電子レーザー(XFEL)の新たな将来計画を考える上で、高電界で高繰り返し運転が可能な加速管は重要なキーワードとなる。加速管の高電界化は所定の電子ビームエネルギーを得るために必要な加速器長の短縮が可能となる。これは加速器を建設するためのコストを削減することに直結する。

XFELの加速器は線形加速器なので、一組の実験ユーザーにしかX線レーザーを供給できない。利用ユーザーを増やすためには高品質な電子ビームを複数のビームラインに振り分ける技術が必要となる。例えばSACLAでは400mの加速器の下流にパルス電磁石を設置し、bunch-by-bunchで複数のアンジュレータラインに電子を振り分け、異なる波長帯のX線レーザーを複数の実験ユーザーに同時に供給することを計画している<sup>[1]</sup>。電子ビームの振り分けはユーザーの利用機会が増えるが、ビームライン当りに供給されるX線レーザーのショット数はビームラインの数に反比例して少なくなる。これの改善には加速器の運転繰り返しを高くすることが有効である。これらのことから、高電界で高繰り返し運転が可能な加速管は加速器全体の製作コストの削減やユーザー利用実験の機会の増加に大いに効果がある。

我々は50 MV/m以上の高電界・120 pps高繰り返し運転に対応し、なおかつ製造コストの削減を目指した新しいCバンド加速管の開発を行った。この加速管の設計の詳細と低電力試験用の9セル試験空洞の製作と低電力試験の結果については文献[2,3]に示す加速器学会等で既に報告している。この報告では

加速管の高電界化・高繰り返し化に向けた構造・熱設計の結果と試作空洞を用いたシャントインピーダンス等のRF特性の測定を行い、その結果、設計値とはほぼ同程度の値が得られることを確認した。また本学会においても1.8mの長さのCバンド加速管の製作とRF調整を三菱重工業で行った結果が報告される<sup>[4]</sup>。本報告では以上の設計・低電力試験・実機製作を踏まえて、Cバンド加速管の大電力RF投入時の健全性を調べるために、大電力RF試験を行った結果について報告する。

#### 2. Cバンドディスクロード型加速管概要

ここで本加速管の設計定数について復習する。Table 1に開発したCバンド加速管のRFパラメータを示す。またFigure 1に加速管構造の断面模式図を示す。

加速管は高電界化を目指すために準定勾配ディスクロード型で加速モードをTM<sub>01</sub>-2 $\pi$ /3モードとした。これにより加速管のシャントインピーダンスは64M $\Omega$ /mに達し、設計上において加速管の高電界化に向けた目処が立った。加速セルには周波数調整を行うためのチューニング穴が設けられ、全体接合後に各セルの共振周波数の調整を精密に行うことが出来た。また加速管の構造をシンプルにしたことで、製造コストを削減することができた。高電界化に伴い、空洞内面の表面電界強度が上昇し、放電頻度が上昇する恐れがある。そのため表面電界強度を下げるために加速管のアイリスの断面形状を楕円形にした。これにより一般的な円形断面のアイリスに比べて約20%表面電界を下げる事が出来ると見込んでいる。また加速管の120ppsRF運転に伴う加速管の発

<sup>#</sup>t-sakura@spring8.or.jp

熱量増加による空洞の熱変形による周波数変化量を検討し、120pps 運転にも対応できる冷却構造と最適な冷却水温を決めた。

Table 1: Parameter of the C-band Disk-loaded Accelerating Structure

Operation frequency [MHz]	f	5712
Structure type	Quasi-constant gradient (Quasi-CG)	
Accelerating mode	TM <sub>01</sub> -2 $\pi$ /3	
Total cavity length [m]	L	1.860
Average unloaded Q factor	Q <sub>0</sub>	8800
Average group velocity	v <sub>g</sub> /c	0.023
Filling time [nsec]	t <sub>F</sub>	270
Attenuation constant	$\tau$	0.54
Average shunt impedance [M $\Omega$ /m]	r	64
Number of cell	N	100
Cross sectional shape of iris	Ellipsoidal curvature	

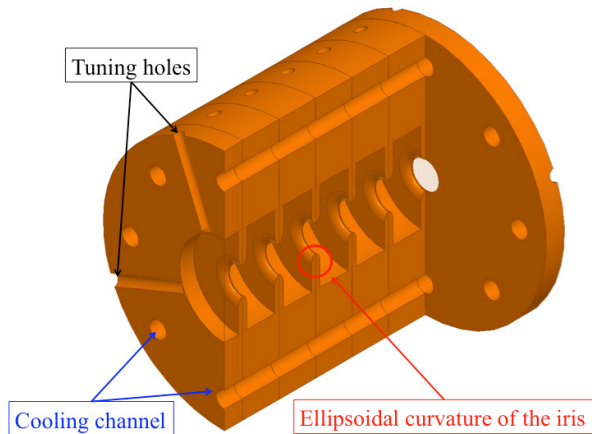


Figure 1: Cut-off view of the C-band accelerating structure.

### 3. C バンドディスクロード型加速管の大電力試験

#### 3.1 大電力 RF 試験の機器構成

製作した C バンド加速管の大電力 RF 試験は SACLA 施設内に新たに設置した大電力 RF テストスタンドで行った。加速管の大電力試験では、1) 到達加速電界、2) 放電頻度、3) コンディショニングの所要時間、4) 暗電流、5) 120pps 運転時の温度特性について確認した。

Figure 2 は C バンド加速管試験時の構成を示す。試験構成は C バンド加速管 1 本、RF パルスコンプレッサー、クライストロン、それらを接続する導波管、モジュレータ電源、高精度充電器で構成される。これらの運転に必要な低電力高周波システムやタイミング分配システム、制御装置は SACLA と同じ機器を使用した。SACLA の運転繰り返しの 2 倍である 120pps 運転に対応するために、クライストロンやモジュレータ電源、高精度充電器は専用のものが製作された [5]。

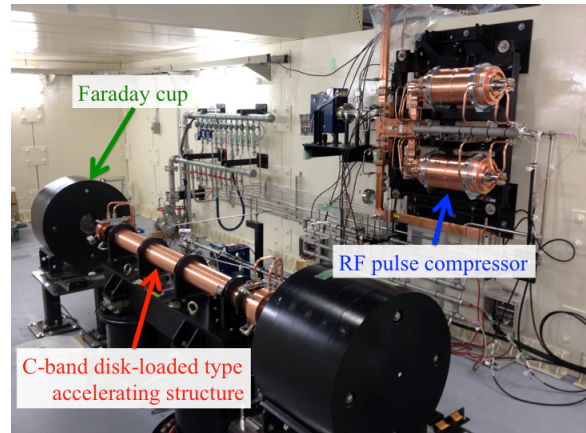


Figure 2: Layout of the high power RF test for the accelerating structure.

#### 3.2 到達加速電界

Figure 3 に本試験での最大加速電界時の RF の典型的な波形を示す。クライストロンの RF 出力は 32MW でパルス幅 2.5  $\mu$ sec であった。クライストロン出力は RF パルスコンプレッサー (SLED タイプ) で増倍され、ピーク電力 160MW、パルス幅 0.5 $\mu$ sec の RF 電力が得られた。そして加速管を通過し壁面損失によって減衰した後の RF はピーク電力で 51MW となった。

SLED からの出力電力と導波管での損失および加速管のシャントインピーダンスと減衰係数を用いて、加速管で発生された加速電界を算出した。RF パワーの測定は SLED 出口に設けた方向性結合器で検出し、ケーブル損失等を考慮して換算した。Figure 4 に加速電界の平均入力電力依存性を示す。大電力試験の結果、到達加速電界は平均入力電力 107 MW で 50.1 MV/m (平均) に達した。この試験で加速管の高電界運転性能が目標を満足することを確認した。

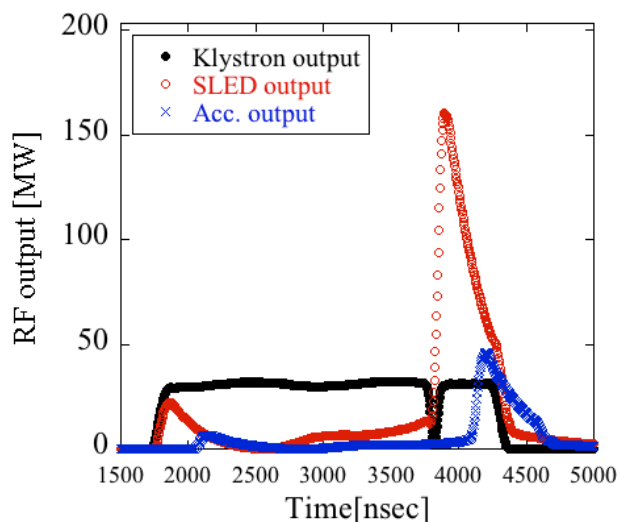


Figure 3: Waveform of the klystron output (black line), SLED output (red line) and though the accelerating structure (blue line).

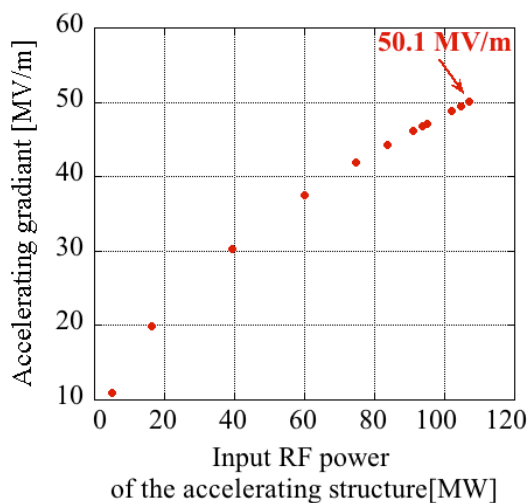


Figure 4: Accelerating gradient dependent on the average input RF power.

### 3.3 停止頻度

加速管が高電界で安定して使用できる事を確かめるために、加速管の放電による停止頻度の測定を行った。Figure 5 は加速管の放電頻度の加速電界依存性を示す。測定は運転開始 256 時間後と 370 時間後に行い、それぞれの時点の加速電界で 24 時間運転を行い、その間に起こった放電による停止回数を計測した。その結果、256 時間の時点で加速電界が 42 MV/m 以下では一度も停止すること無く運転を行うことが出来た。またコンディショニング時間が長くなるにつれて放電頻度が下がる傾向が見られることから、更なるコンディショニングを行うことで、高い電界でも安定運転が実現できることが予想される。

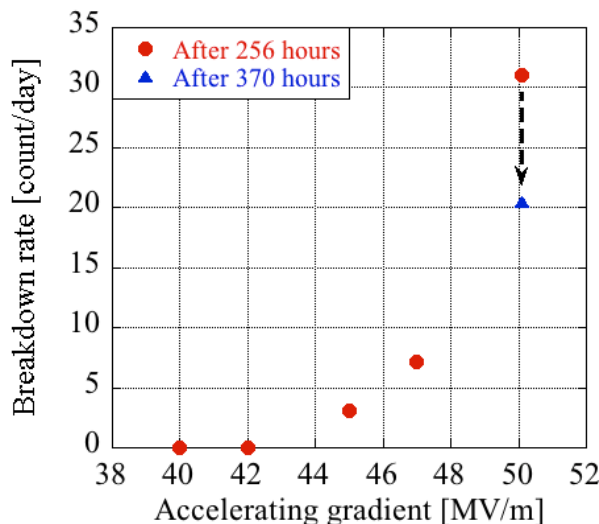


Figure 5: Breakdown rate per day dependent on the accelerating gradient.

### 3.4 大電力運転履歴

加速管のコンディショニングは以下のように行った。1) RF パルス幅を 0.1 $\mu$ s と短くし、徐々に RF 電力を増やした 2) RF 電力が最大まで到達したら、RF パルス幅を広げてコンディショニングを続ける。3) RF パルス幅が 1.0  $\mu$ s に到達したら、RF 位相の反転を行い、RF パルスコンプレッサーによる RF の圧縮を行う。4) パルス幅を定格の 2.5 $\mu$ s まで広げる。

トロン近傍・SLED 近傍・加速管の入力カプラー近傍・出力カプラー近傍の計 4 ヶ所に設置された真空計で計測した。加速管のコンディショニングは運転開始から約 130 時間で定格の RF パルス幅 2.5  $\mu$ s まで広げることが出来た。パルス幅を 2.5  $\mu$ s に広げた直後は、加速管内の真空悪化が激しく数分に一回の頻度で放電を起こした。その後 240 時間運転を継続すると、加速電界 50 MV/m で安定に運転できるようになった。

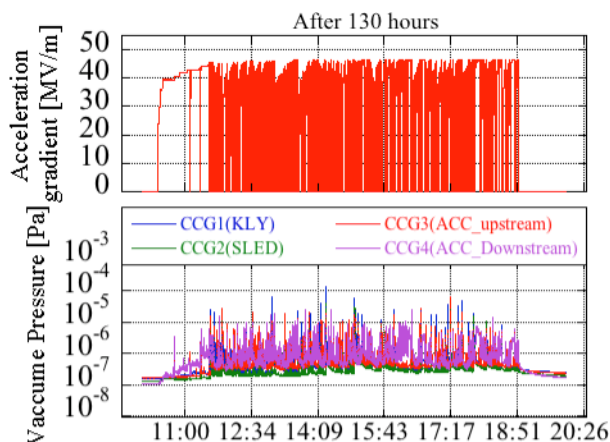


Figure 6: Trends in the acceleration gradient and vacuum pressure after 130 hours of the high power RF test start.



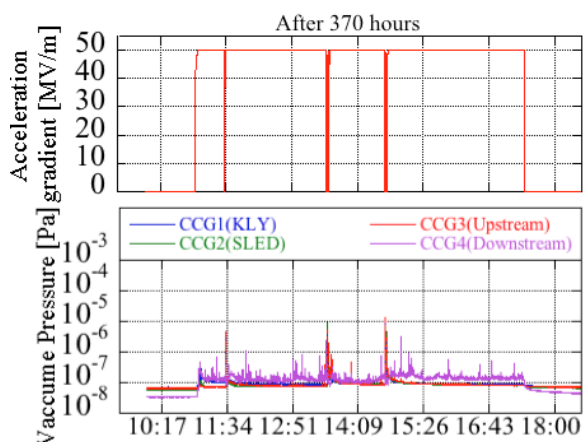


Figure 7: Trends in the acceleration gradient and vacuum pressure after 370 hours of the high power RF test start.

### 3.5 暗電流

加速管の内面から発生する暗電流を測定し、コンディショニングの経過による電界増倍係数 $\beta$ の変化を調べた。暗電流の測定は Figure 2 のように加速管の下流に設置した Faraday cup を用いた。Faraday cup の直径は 620 mm で加速管との距離は 200 mm であった。Figure 8 は暗電流量の加速電界依存性を示す。マーカーはコンディショニング時間の違いを示す。暗電流量はコンディショニングの経過と共に減少し、開始から 385 時間後には加速電界 50 MV/m で暗電流量が 150 pC/pulse となった。

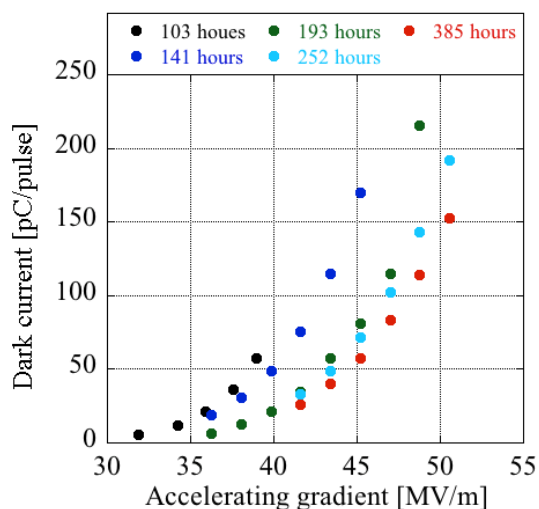


Figure 8: Dark current emissions dependent on the accelerating gradient in the course of the conditioning

Figure 9 は Fowler-Nordheim (F.N.) プロットを示す。この F.N.プロットから $\beta$ を算出するには、

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

で求められる<sup>[6]</sup>。ここで $I$ は暗電流、 $E_p$ は加速管の表面電界強度、 $\phi$ は銅の仕事関数=4.5 eVである。加速管の表面電界は軸上電界の 2.6 倍と仮定した。この結果、電界増倍係数 $\beta$ は74~79の範囲であった。長時間運転した常電導の加速管では一般的に、電界増倍係数は 40~100 程度になると言われている<sup>[7]</sup>。現状の値はこの範囲に入っており、今後長時間運転を行うことで値が下がっていくことが予想される。

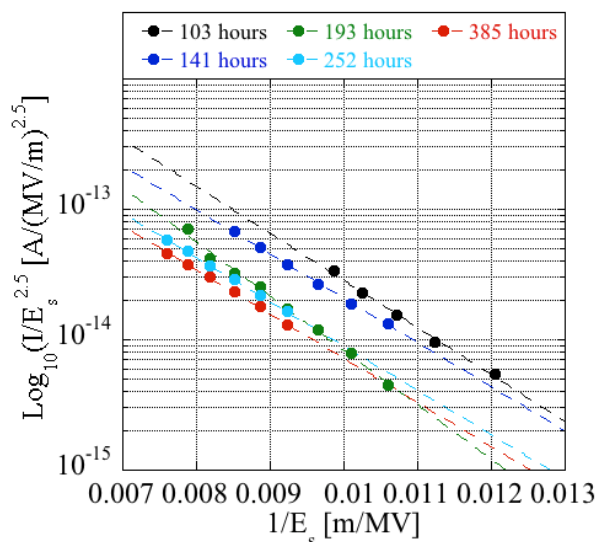


Figure 9: F. N. plot on the downstream side of the accelerating structure, while the conditions of conditioning times are different.

### 3.6 加速管の発熱量と空洞位相変化

120Hz の高繰り返し運転を行った際の加速管の温度特性を調べるために、加速管の発熱量の繰り返し依存性を測定した。発熱量の算出は加速管の冷却水の入出の水温の差から得られる熱量から求めた。Figure 10 は加速管の発熱量の運転繰り返し依存性を示す。各マーカーは測定時の加速電界を示す。その結果、加速電界 50 MV/m の時の最大発熱量は 4.8 kW に達した。

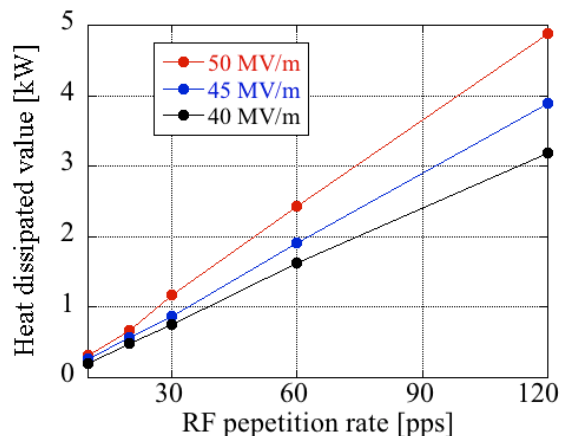


Figure 10: Heat dissipation in the accelerating structure as a function of the RF pulse repetition rate.

加速管の表面には温度を測定するための深さ 10 mm の穴が空けられている。そこに測温抵抗体を取り付け、加速管の物温を測定する。そして加速管中央の物温が一定になるように水温調整ヒーターで水温を制御している<sup>[8]</sup>。加速管のセルの発熱分布に異常がないことを確認するために、測温抵抗体を加速管の上流・中央・下流の物温測定箇所、および中央のセルに設けられたチューニング用の穴（深さ約 34 mm）の底に温度計を取り付け、加速管の温度分布の測定を行った。Figure 11 に各測定点での加速管温度の繰り返し依存性を示す。空洞中央（黒）を水温制御により 30°C で安定させた時、加速管上流（紫）と下流（青）は低くなり、120 Hz 運転では約 1°C 低くなる。これは加速管の冷却方式がカウンターフロー方式を用いており、予想した上下流の温度が低くなる傾向と一致する。チューニング穴の奥で測定した温度（赤）は空洞中央の温度に比べて 120Hz 運転時で 0.5°C 高くなった。空洞の設計時に行った熱計算の結果では 0.5~0.6°C の温度差であったので、測定結果とよく一致している。

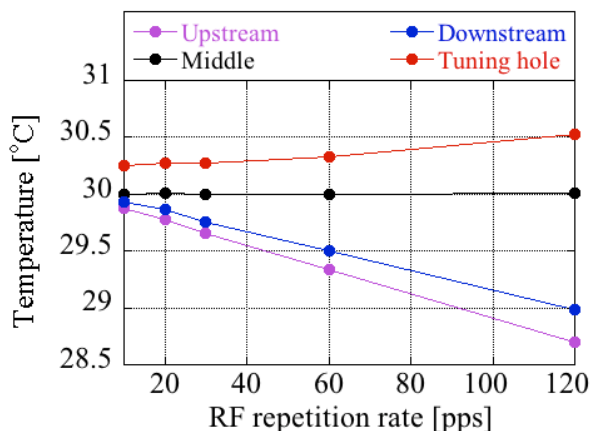


Figure 11: Temperatures of the accelerating structure operating at an acceleration gradient of 50 MV/m.

また運転繰り返しの変更による発熱量の変化による加速管入出の位相差の変化を測定した。これは発熱量の変化によって加速構造の寸法が変化し、周波数特性が変化することを意味している。Figure 12 に加速管前後の RF 位相の差の運転繰り返し依存性を示す。チョークモード型加速管は繰り返しを変更すると RF 位相が遅れる。120Hz を行った場合この位相差が 19° 遅れると推測される。これを加速電界に直すと約 6% 電界が低下することを意味する。これは RF による発熱によって、加速セル内径が広がる方向に変形し、共振周波数が下がっている事を示唆している。ディスクロード型は 120pps 運転を行っても位相差は 1° 以内に収まっており、冷却が適切で熱的な変形なども問題ないことが確認された。

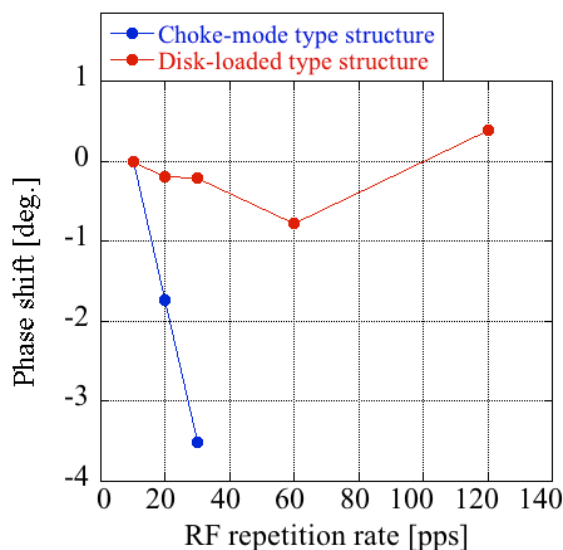


Figure 12: Phase shifts between the input and output RF of the accelerating structure depending on the RF pulse repetition rate for the choke-mode type structure and the disk-loaded type structure.

#### 4. まとめ

高電界・高繰り返し運転に対応した C バンドディスクロード型加速管を開発し、その性能を確かめるために大電力 RF 試験を行った。その結果、本試験での到達加速電界は平均入力 RF 電力 113MW で 50.1 MV/m に達した。また 256 時間のコンディショニング以降、42MV/m 以下の加速電界では 1 度も放電による停止は起こらなかった。より高い電界についても、コンディショニングの継続によって、停止頻度が下がる傾向にあった。これらによりこの加速管の高電界の性能が問題ないことが確認された。また 120Hz の高繰り返し運転についても、RF の位相シフトは 1° 以内に収まっており、冷却が適切で熱的な変形なども問題ないことが確認された。

この加速管は SACL 的 BL1 ビームライン上流に設置する長波長 SASE-FEL 用加速器として使用され、今秋より試験運転を開始する予定である。

#### 参考文献

- [1] T. Hara et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 16, 080701 (2013).
- [2] T. Sakurai et al., Proceeding of LINAC12, (2012).
- [3] T. Sakurai et al., Proc. of the 10th Particle Accelerator Society of Japan, (2013).
- [4] D. Suzuki et al., Proc. of the 11th Particle Accelerator Society of Japan, (2014).
- [5] C. Kondo et al., Proceeding of the 11th Particle Accelerator Society of Japan, (2014).
- [6] G. A. Loew et al., SLAC-PUB-4647 (1988).
- [7] A. W. Chao et al., "Handbook of Accelerator Physics and Engineering" World Scientific Pub. (1999).
- [8] T. Hasegawa et al., Proceeding of IPAC10 (2010).