

OPERATION STATUS OF THE SACLA MAIN ACCELERATOR

Katsutoshi Shirasawa ^{#A)}, Takahiro Inagaki^{A)}, Chikara Kondo^{A)}, Tatsuyuki Sakurai^{A)}, Tsumoru Shintake^{A)}

^{A)} XFEL Research and Development Division, RIKEN SPring-8 Center, RIKEN Harima Institute
1-1-1, Kouto, Sayo, Hyogo, 679-5148

Abstract

The C-band (5712 MHz) accelerator was constructed as the main linac of SACLA (SPring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser). At SACLA, we need a stable electron beam to produce a high peak current higher than 3 kA with a 10% (1σ) fluctuation for the SASE-XFEL. Therefore, the typical requirements of an RF acceleration field stability are 0.01% (1σ) in amplitude and 0.1 degree (1σ) in phase. In order to satisfy the requirements, we developed a highly stable high-voltage (HV) supply for charging PFN (pulse forming network) capacitors, because a PFN capacitor charged voltage determines the stabilities of an rf phase and amplitude at an RF source. The measured pulse-to-pulse stability of the HV power supply was 0.001% (1σ). On the other hand, the C-band accelerator should generate high accelerating gradient to fit our SACLA in the small space on the SPring-8 campus. After the RF conditioning of 128 C-band accelerating structures for 6 months, we started the operation of the SACLA main linac with an accelerating gradient of 35 MV/m. Acceleration of the electron beam successfully reached up to 7.8 GeV.

SACLA 主加速器の運転状況

1. はじめに

SACLA は X 線自由電子レーザーの発生を目的とした加速器施設である。2011 年 2 月からビーム調整を行い、2011 年 6 月 7 日に波長 0.12 nm にてレーザー増幅を実現した^[1]。SACLA 加速器全体の概要を図 1 に示す。主加速器として 35 MV/m 以上の高加速電界が得られる C バンド加速器が使用されており、64 台の 50 MW クライストロンと 128 本のチョークモード加速管を使用して電子ビームを 8 GeV まで加速する。高加速電界を発生できるため、加速器がコンパクトになり、建家等の費用も抑えられる。

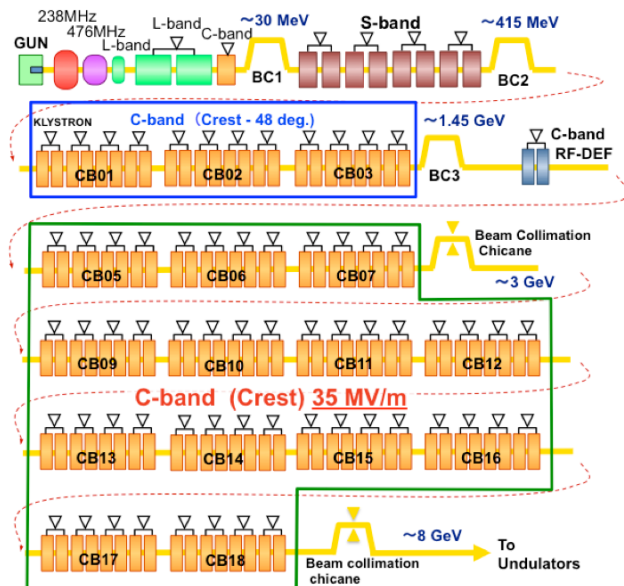


図 1 : SACLA 加速器の構成。主加速器には C バンドクライストロン 64 台を使用している。

SACLA ではレーザー増幅 (SASE) を実現するために、非常に高い安定度が必要とされる。理由は、3 kA 以上のピークカレントを得るために 3000 倍以上のパンチ圧縮を行う為である。従って、主加速器における加速電界の最大許容変動 (1σ) も大変厳しく、電圧変動 0.01%、位相変動 0.1 度である^[2]。高加速電界、高安定度という高い要求を満たし、加速器としての安定な運転を実現するため、SACLA 主加速器グループでは各機器の開発を行い、建設を行った。特に、電圧変動の主原因となる PFN 充電器は、理研とニチコン株式会社にて共同開発を行い、10 ppm を達成した。2010 年 10 月より現地設置が完了したユニットから RF エージングを開始し、2011 年 3 月には 7.8 GeV にて初の電子ビーム加速に成功した。以下に RF エージングの進捗、実際に達成された各機器の性能、ビームコミッション時の運転状況について報告する。

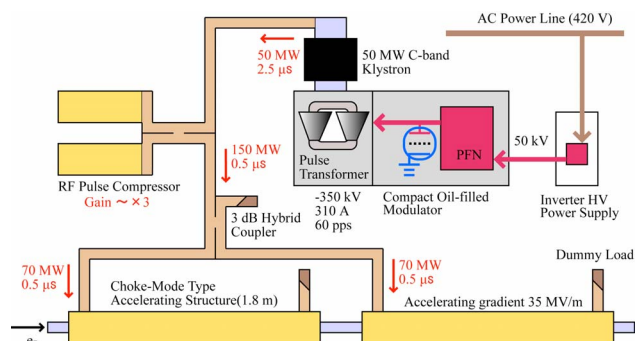


図 2 : C バンド主加速器システム 1 ユニットの概略図。

[#] kshira@spring8.or.jp

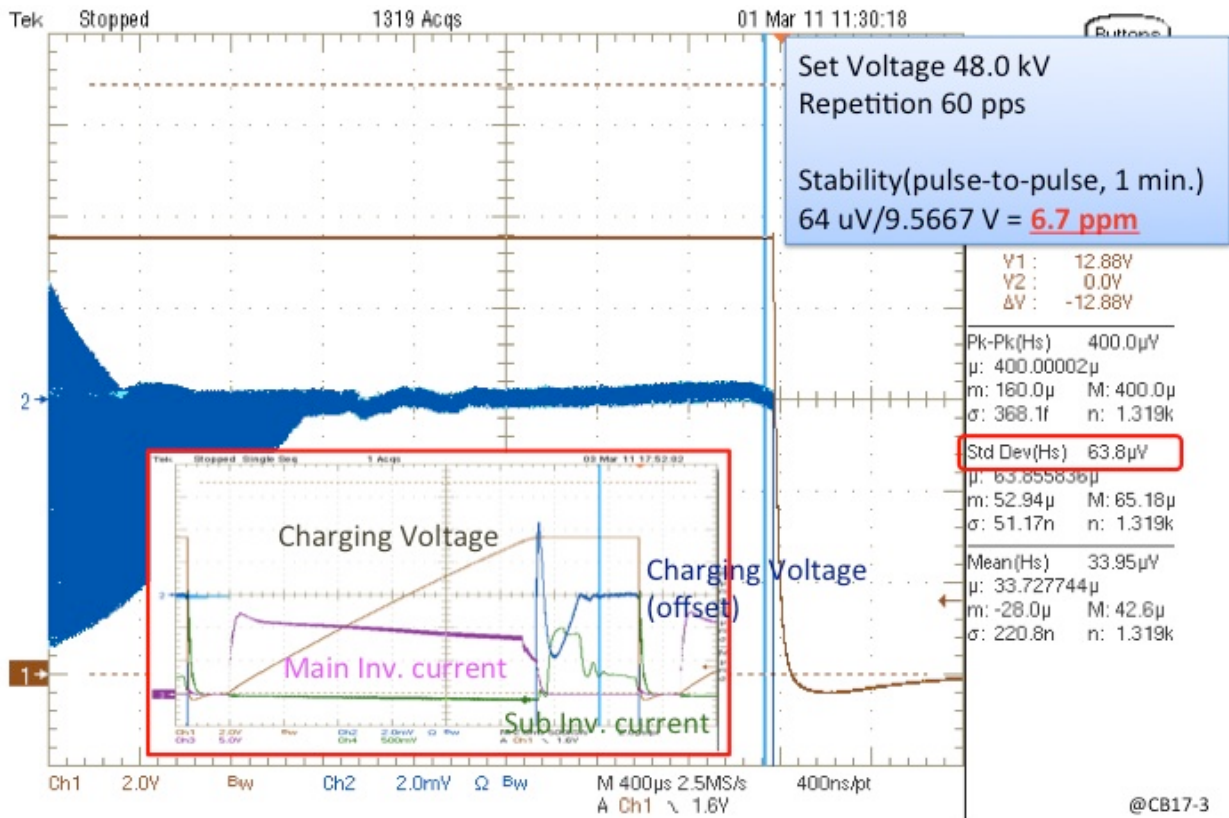


図3：充電電圧 48 kV での充電波形。電圧モニタ(50 kV/10 V)の出力を LeCroy 社製の DA1855A にてオフセット電圧を重畳し、パルス毎の電圧安定度を測定した。

2. 主加速器の構成

主加速器として C バンド(5712 MHz)加速器システムが採用されている。50MW クライストロンを 64 本使用し、128 本の加速管(1.8 m)に大電力 RF を供給する。クライストロンごとにユニットが構成されており、電源や真空などを監視する PLC、タイミング信号や低電力 RF を制御する VME などユニットごとに設置されている。1 ユニットの構成を図 2 に示す。

2.1 モジュレータ電源(350 kV, 310 A)

モジュレータは PFN 回路とパルストランスを絶縁油を満たした同じ筐体に納めた一体型モジュレータが設置されている。大電力の回路を全て 1 つの鋼鉄製タンクに閉じ込め、入出力のラインにも適切なフィルタを設置することで漏れ出るノイズを小さくしている^[3]。サイラトロンにより 5000 A 程度の大電流をスイッチングする際にノイズが一番大きく、問題となる可能性がある。しかし前記の工夫により、SACLA では約 70 台のクライストロン用モジュレータが稼動しているが、周辺機器にノイズの影響は見られない。

2.2 PFN 高電圧充電器(50 kV, 37 kW)

SACLA においては従来の de'Qing 回路を伴った共

振充電方式では要求される電圧精度に対して不十分な性能なので、インバータ充電方式の電源を使用している。加速電界の電圧安定度を要求精度 0.01% 以内にするには、この電源の電圧安定度を上げる必要がある。ゆっくりした変動(0.1 Hz 以下)についてはフィードバック制御をかけた変動の低減を行うことが可能である。しかし、パルス駆動のリニアックでは PFN コンデンサの充電電圧変動のようなパルスジッタはフィードバック制御では少なくできないので、

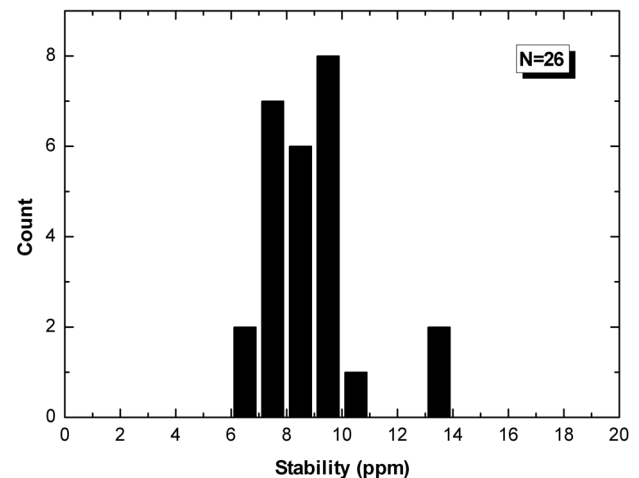


図4：各充電器のパルス毎電圧安定度 (1σ) のばらつき。48 kV, 60 pps 運転時。測定台数は 26 台。

変動量自身を小さくしなければならない。この目標を達成するには、SACLAに先駆けて建設されたSCSS試験加速器におけるインバータ電源の電圧安定度である0.1%程度では不十分である。このハードルを超えるため理研・ニチコン株式会社で共同開発を行い、電圧安定度0.01%(1 σ)以下の高電圧充電器を開発した^{14,5)}。この充電器は大容量のインバータ回路と小容量のインバータ回路を備えた並列インバータ方式となっている。まず大容量のインバータ回路で設定電圧値の99.7%程度まで充電を行い、その後小容量かつスイッチング周波数の高いインバータ回路のみを動かし高精度の電圧整定を行う。大容量のインバータ回路は電力も大きいため、ノイズ源となり易く、電圧整定時には止めておく設計となっている。図3にSACLAクライストロンギャラリーにて測定した、パルス毎の電圧安定度(1分間)を示す。1 $\sigma = 0.00067\%$ (6.7 ppm)が得られている。また各充電器の安定度の分布を図4に示す。サンプルで測定した26台のほとんどが0.001%(10 ppm)程度の安定度を達成しており、要求精度を十分に満足している。

インバータの充電電圧安定化のフィードバック制御には、モジュールータタンクに設置した高電圧プローブの信号を使用している。従来のプローブは1G Ω の抵抗を使用しているが、SACLAでは100M Ω の抵抗を使用した高精度で応答速度の速いプローブとなっている。プローブ内部は、絶縁を保ち抵抗体の冷却を行うためにフロリナートが満たされており、冷却配管により水冷されている¹⁶⁾。これは長期電圧安定度(10時間程度)に貢献しており、長期安定度は図3に示した1分間での値とほぼ変わらない。

3. RF エージング

今まで述べてきた機器の開発後に、SACLAのクライストロンギャラリーに大電力高周波機器を設置して、2010年10月より加速器収納部に設置された加速管のRFエージングを開始した。目標加速電界である35MV/mで運転を行うには、試験加速器や大電力テストベンチの経験から60ppsにて500時間

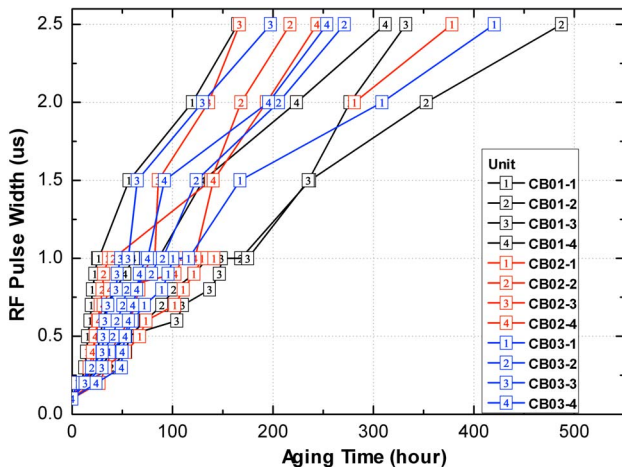


図5：RFエージング中のRFパルス幅が広がっていく様子。

以上が必要である¹⁷⁾。当初のRFエージングの目標は、ビーム調整時の運転繰返し10ppsにて加速器としての停止頻度を3回/時以下とすることであった。停止原因は加速管内での放電によるクライストロンへのRF反射、サイラトロン自爆、クライストロン管内放電である。RFエージング中はRF反射が圧倒的に多い。従って、大電力クライストロンを使用しているユニットは入射部を含めると約70台あるので、各ユニットの停止頻度は1回/日程度に抑えなければいけない。

RFエージングは各ユニットのクライストロン電源、真空機器などをコントロールするPLCに組み込まれたシーケンスにより自動的に行われた。加速管に入力するRFパルス幅は0.1usより始めて、途中SLEDを動作させるためパルス幅1usより位相反転を開始し、定格の2.5usまで徐々に広げた。位相反転のタイミングは、RFパワーが増幅される部分の時間幅が0.5usとなるタイミングとした。設定したパルス幅にてクライストロン出力が50MWに到達した後、次のパルス幅に移行した。CB01から03に関して、エージング中のRFパルス幅の推移を図5に示す。定格2.5usまで必要なエージング時間にはかなりばらつきがあるが、想定通り500時間以内で到達していることが分かる。しかしながら上に述べたように、各ユニットを35MV/m、10ppsにて1日1回程度の停止頻度までエージングにするには、60ppsにて約1000時間のRFエージングが必要であった。ほぼエージングが終了した2011年3月に主加速器に電子ビームを通し、全てのユニットにてクレスト位相で加速することにより7.8GeVまで電子を加速した。その時点での各ユニットRFエージング積算時間を図6に示す。

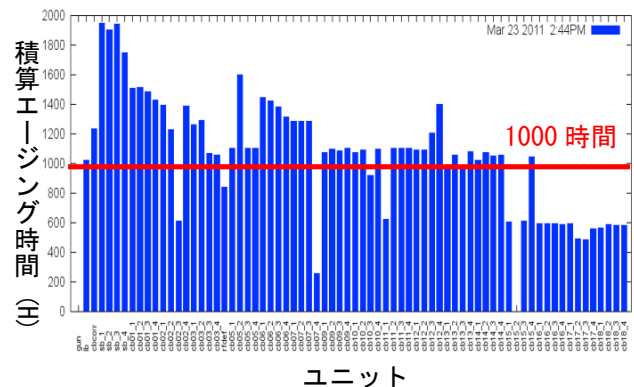


図6：初めてとなる電子ビーム運転直前の各ユニットの積算エージング時間。RFエージング中の運転繰返しは60ppsであった。グラフはSACLAデータベースより引用した。

4. 運転状況

4.1 ビーム運転

ビーム運転時の各ユニットの加速電界を図7に示す。加速器の高周波パルスの繰返しは10ppsである。

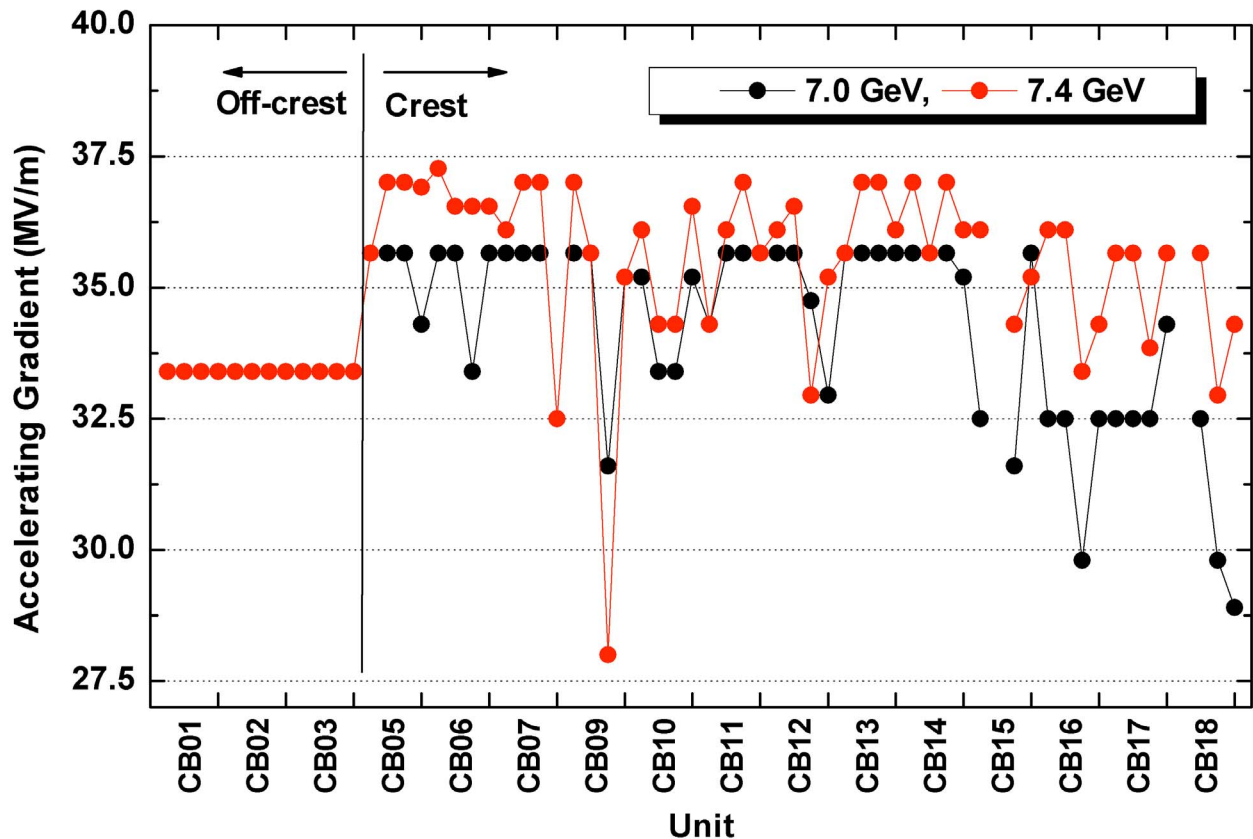


図7：ビーム運転時の各主加速器ユニットの加速電界。2011年7月現在、ビーム調整は主に7.0 GeVで行なわれており、7.4 GeVはビーム調整における最大エネルギーである。

各ユニットの加速電界は停止頻度を考慮して決定した。主な原因となるRF反射は加速管内の放電などにより発生するので、加速電界を下げることで発生頻度を下げることができる。停止頻度は加速器全体で3回/時以下を目標とした。図6に示すRFエージング時間が1000時間を超えるユニットに関しては、ほぼ35 MV/mを達成できた。2011年7月現在、7.0 GeV運転時の加速器の停止頻度は2回/時、7.4 GeVでは3回/時程度であり、主な停止原因はRF反射とサイクロトンの自爆である。CB01から03はバンチ圧縮を行うために加速電界を下げ、オフ Crest 位相にて加速を行っている。CB15以降の加速電界が低い理由は、機器設置の時期が遅れ、RFエージングの時間が短かった為である。

ビーム運転時におけるRF位相の安定度（Cバンド）は0.032 deg. (rms)、加速器の加速電子ビームのエネルギー安定度は 1.5×10^{-4} (rms)となっており、レーザー増幅の条件を満たしている。詳細は参考文献を参考されたい^[8,9]。

4.2 トラブル

ビーム運転中の各ユニットの加速電界を示した図7において、加速電界を下げているCB09-3はクライストロンの出力RF窓付近の放電により真空悪化が多発することが理由である。データが欠けているCB15-2はパルストランスの放電、CB18-1はクライストロンの管内真空悪化で運転を停止している。そ

の他、RFエージングを開始してから発生した主なトラブルを以下に挙げる。

(1) 高電圧ケーブル(50 kV)の絶縁破壊

PFN充電器とモジュレータを接続する高電圧ケーブルの絶縁破壊が5件ほど発生した。原因は端末加工時に絶縁体に傷をつけてしまい、更にその傷周辺をねじるようにケーブル敷設を行ったことが原因であった。

(2) パルストランスの放電

パルストランス2次巻線の高圧側にて線間放電が発生した。放電は負荷であるクライストロンの管内放電時に起こっており、負荷短絡時に生じた過電圧が原因と思われる。3台が同じ症状で故障した。残りのパルストランスについても当然クライストロンの管内放電を経験しているが、問題なく動作している。現在、対策品を開発中である。

他にビーム運転に影響が及ぶ高周波源の故障等は、加速管・SLEDを含めて主加速器では発生していない。総運転時間は2011年7月現在、長いもので4000時間を超えている。故障が発生しているユニットに関しては2011年の夏季停止期間に交換をし、さらにRFエージングを行い、加速器の定格エネルギーである8 GeVでの安定運転を目指す予定である。

5. まとめ

2011年2月、Cバンド加速器と高精度インバータPFN充電器を採用したSACLA主加速器が完成した。要求された高加速電界(35 MV/m以上)と高電圧安定度(0.01%以下)も実現した。PFN高電圧充電器のパルス毎の電圧安定度は要求よりも1桁良い0.001%(10 ppm)を達成した。RFエージングが不足しているユニットもあるが、RFエージングを継続し、加速電界を向上させる予定である。

謝辞

PFN充電器のデータは、ニチコン草津株式会社の松本圭司氏、川口秀章氏を中心に取得して頂いた。また、SACLA主加速器の素晴らしい性能は、多くの業者、スタッフの協力により実現されました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 田中均 他, “動き始めた X 線自由電子レーザー施設 SACLA の運転状況”, 本学会発表
- [2] 田中均 他, “XFEL/SPring-8 のバンチ圧縮性能に及ぼす RF 機器変動の影響評価”, 2007 年加速器学会
- [3] 近藤力 他, “XFEL/SPring-8 向けクライストロン用パルス電源のノイズ対策” 2009 年加速器学会
- [4] 新竹積 他, “XFEL/SPring-8 向け高安定高周波電源について”, 2007 年加速器学会
- [5] 川崎敦志 他, “X-FEL/SPring-8 向け高電圧充電器の開発”, 2008 年加速器学会
- [6] 岡田幸一, “XFEL/SPring-8 向けフロリナート充填型高電圧プローブの開発”, 2008 年加速器学会
- [7] 櫻井辰幸 他, “XFEL/SPring-8 での C-band 加速器システム量産品の電力試験”, 2010 年加速器学会
- [8] 大竹雄次, “XFEL/SPring-8 “SACLA” の加速器構成機器の試運転と性能”, 本学会発表
- [9] 大島隆, “XFEL/SPring-8 “SACLA” におけるタイミング・LLRF システムの性能”, 本学会発表