

IMPROVEMENT OF THE ACCELERATING GRADIENT AND REDUCTION OF THE TRIP RATE OF THE C-BAND ACCELERATOR IN SACLA

Takahiro Inagaki ^{#,A)}, Tatsuyuki Sakukrai ^{A)}, Chikara Kondo ^{A)}, Yuji Otake ^{A)}

^{A)} RIKEN SPring-8 Center

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Hyogo, 679-5148

Abstract

In X-ray FEL facility SACLA, 64 units of C-band (5712 MHz) high gradient accelerators are employed to accelerate an electron beam up to 8 GeV. In order to obtain a high accelerating gradient of over 35 MV/m with a low trip rate, high power RF conditioning was performed during nighttime of last year. After the conditioning for 550 hours, the trip rate decreased to be 1/10 of the rate in last summer. When we gradually increased the accelerating gradient, the trip rate also increased and was roughly proportional to the 30th power of the accelerating gradient. In order to reduce the dead time for experimental user operation, we shortened the recovery time after the RF trip from more than one minute to 30 seconds without any trouble. Owing to these conditioning and optimization, we now routinely operate the accelerator with an beam energy of 8.5 GeV, an accelerating gradient of 38 MV/m, and an acceptable trip rate of once per 20 minutes for the user operation. Besides the RF trip, trip rate due to the self-triggering of the thyratron became unignorable after the long RF conditioning, because of decreasing the number of RF arcing. We expect to reduce the trip rate by modifying the interlock system to ignore a single phenomenon of the self-triggering associating with the trip in this summer.

SACLA Cバンド加速器の加速電場の向上とトリップ頻度の低減

1. はじめに

X線自由電子レーザー施設 SACLA (SPring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser) では、8 GeV 電子加速器の全長を短くするため、加速電場の高い Cバンド (5712 MHz) 加速器を 64 ユニット使用している。400 MeV から 1.4 GeV のバンチ圧縮部 (BC3) までのオフクレスト (-48°) 部に 12 ユニット、1.4 GeV から 8 GeV までのクレスト加速部に 52 ユニットが使用されている^[1,2]。いずれのユニットも 35 MV/m 以上の定格加速電場にて、運転を行う。これは、従来の Sバンド加速器の約 2 倍の電場であ

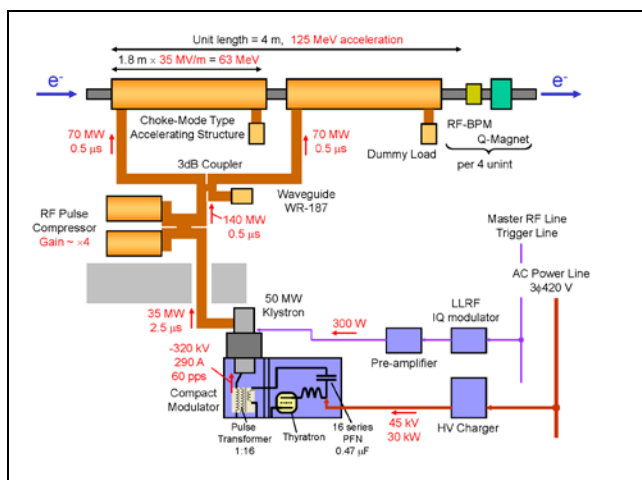


図 1 : C バンド加速器 1 ユニットの構成。定格の加速電場 35 MV/m で運転する際の典型的なパラメータを、赤字で記している。

り、大型加速器としてはこれまでにない電場強度である。しかも SACLA はシングルパス FEL マシンであり、加速器個々のトリップ (インターロックによる運転停止) が FEL 施設全体の停止や不安定性に直結するため、トリップ頻度は 1 時間に 1 回程度に抑える必要がある。従って、Cバンド加速器はいずれも、高加速電場かつ低いトリップ頻度という、相反する要求を満たしながら長期間にわたって安定に運転し続ける必要がある。

SACLA の加速器は 2009 年から 2010 年に建設され、2011 年の 3 月からビーム調整運転を開始、6 月には目標である FEL 発振を実現することができた^[1]。但しその時点では、コンディショニング時間の不足から、まだトリップの頻度が高かった^[2]。トリップの主な原因は、大電力 RF による加速管等での放電と、サイラトロン (Thyratron) の自爆である。このうち RF による放電は、電場を下げるにより頻度は少なくなり、また、コンディショニングにより減少する。そこで当面の FEL の調整では、エネルギーを 7 GeV に下げ繰り返しも 10 pps に落として運転した。そして夜間にはコンディショニングを継続し、放電によるトリップの頻度を減少させた。サイラトロン (Thyratron) の自爆に関しては、インターロック機構を見直し単発の自爆を無視することにより、トリップの頻度を大幅に低減できる目処をつけた。また、加速器のデッドタイムを減らすため、トリップ時の RF 再投入を早めた。

こうして、35 MV/m 以上の高電場で運転を行う目処が立ち、本年 3 月から開始したユーザー利用運転では、繰り返し 10 pps ながら加速電場を約 38 MV/m、エネルギーを施設上限の 8.5 GeV まで上げて運転を行っている。次章以降で、これらの詳細を報告する。

[#] inagaki@spring8.or.jp

2. Cバンド加速器の構成と高電場対策

Cバンド加速器の構成を図1に示す。最大定格50 MWのクライストロンを約35 MW出力で使用し、RFパルス圧縮器(SLED)でピーク強度を約4倍に高め、2本の加速管にフィードして定格の加速電場35 MV/mを得る設計となっている。もし仮にクライストロン出力を50 MWまで高めることができれば、40 MV/m以上の加速電場が得られる計算になる。しかし実際には、高電場による放電が発生するため、実用上使用できる電場の上限が決まる。

RF構成機器のうち高電場による放電を起こす可能性が高いのは、加速管とRFパルス圧縮器である。放電の可能性を減らすために、以下の点を重視した。

- 1) 電場の集中を避け、表面電場を下げること。
- 2) 高品質の銅材料を用い、清浄な環境で加工をすること。
- 3) 空洞内面を汚さず、超高真空を保つこと。
- 4) 加速効率を確保しつつピーク電力を減らすために、SLEDの使用で起こるスパイク的な電場を抑えて波形を極力、平坦化すること。
- 5) 丹念に大電力RFによるコンディショニングを行うこと。

1は空洞の設計に関する事である。SACLAのCバンド加速管は元々、 e^+e^- リニアコライダースのために設計された。全長1.8 mの準定電界進行波管で、共振空洞の外側にチョーク構造を介してHOMダンパー(SiC吸収体)を有し、将来のマルチバンチ運転にも対応したものとなっている^[3]。最大電場の生じるアイリス部の電場集中を下げるため、ディスク厚は4 mmとしアイリス部はR2を取っている。そのため最大表面電場は、軸上電場の2.7倍程度に抑えられる。また、カプラー部での電場の対称性を良くし、また電場を下げ放電を減らすために、J型2開口型^[3]を採用している。

RFパルス圧縮器は、高いQ値($Q_0 > 180,000$)を持つTE_{0,1,15}モードの共振空洞2台と、導波管との接続を担うモードコンバータ、そして3dBハイブリッド結合器から構成される。RFパルス圧縮器は空洞の結合孔に高電場が生じ放電を起こす事が多い。そのため、SACLAのモードコンバータでは、結合孔の数を増やしてそれぞれの通過高周波電力を減らすために4つの結合孔を持つバタフライ型を採用している^[4]。

2の品質について、SACLAで使用する128本の加速管、64台のRFパルス圧縮器はいずれも、三菱重工工業㈱にて製造された^[5]。銅素材は、高電場での使用実績の高い日立電線製の無酸素銅class-1を用い、加速管についてはボイドのリスクを無くすため素材段階でHIP処理を施している。各空洞はそれぞれ清浄な環境で超精密旋盤にて加工され、真空ロウ付けにて接合される。加速管については、出荷前に放出ガスを分析し、特に残留油分による炭化水素系の不純物が付着していないか確認している。また、製造に並行して大電力RF試験を3度ほど行い、製造品

の品質を確認した^[6]。

3の真空について、SACLAでは、真空度は加速管近傍の導波管に接続されたイオンポンプの直近にコールドカソードゲージ(CCG)を設置して測定している。真空系の排気コンダクタンスから計算すると、加速管や導波管の真空度は、CCGでの測定値より実際は1桁から3桁程度悪い可能性がある。高電場での放電現象の研究^[7]より、真空度が 10^2 Pa台を超えると耐電圧が低下すると言われている。そのため、真空度に関するインターロックの閾値はCCGの測定値で 1×10^5 Pa付近に設定している。但しコンディショニングが進んだ現在では、ベース真空度は 10^{-8} Pa台であり、RF放電でこの閾値を超える事は少ない。その代わりにRF反射インターロック(クライストロンへの戻りが2 MWを超えると停止)によって放電時のRFの戻りを検知し、クライストロンの運転を停止している。

4に関しては、パルス波形を生成するIQ変調器にて、位相反転直後に振幅変調を加えることにより、RFパルス圧縮器の出力波形を成形し、圧縮器のゲイン(電力で約4倍)を減らすことなく位相反転直後のスパイク電圧を20%程度抑えている^[8]。

5のコンディショニングについては、次章以降で詳しく述べる。

3. コンディショニングによるトリップ頻度の減少

3.1 2011年の運転状況

コンディショニングは、通常よりも高い電場をかけ放電を繰り返すことにより空洞内面の状態を整え放電しにくくする手法である。Cバンド加速器の初期コンディショニングは、2010年の10月より始まり、それぞれ約500時間から1000時間のコンディショニング運転を行ったが、電源の故障や設置工程の遅れのため最後のユニットは2010年2月の開始となり、3月のビーム調整運転時にはまだトリップ頻度が高めであった^[2]。だが、当面のビーム調整の目的のためには、エネルギーは重要ではないので、エネルギーを7 GeV(平均の加速電場33 MV/m程度)に下げ、繰り返しも10 ppsに落として運転をすることとした。

しかし、翌年には開始するFELの利用実験のために、加速器のエネルギーを上げ、供給可能なX線の短波長化が必要であった。従って、ビーム調整の行われない夜間を利用してコンディショニングを行い、放電の頻度を減少させた。

3.2 コンディショニングとトリップ頻度の変化

Cバンド加速器64ユニットのうち2台(オフクレスト部に1台、クレスト加速部に1台)を予備ユニットとして確保しつつ残りの62台で8 GeV運転を行うためには、加速電場は36 MV/m以上が必要である。そこで、コンディショニングでは少し上の37~38 MV/mに電場を設定し、連続運転を行った。

図2の上図は2011年9月から11月のコンディショニング運転時の、加速器全体のトリップ頻度の推移を示す。最初の1か月は節電要請のため10 ppsにて運転し、10月中旬以降は、60 ppsに繰り返しを上げ、電場も少し上げて運転した。トリップの主な原因は、RFによる放電（赤線）とサイラトロン（青線）の自爆（青線）である。RFによる放電はコンディショニングによって確実に頻度が減り、50日間（コンディショニング運転：約550時間）で頻度が約1/10になった。 t 時間経過後の頻度 $P(t)$ はおおよそ下式で表わされる。（図中にも橙色点線で示す。）

$$P(t) = P_0 \exp(-t / 240 \text{ 時間})$$

また、図2下部には、3つの期間でのRFによる放電頻度の分布を示す。分布はおおむねポワソン分布的であり、ユニット間の個体差もなく統計的な扱いができることを示している。一方、サイラトロン（青線）の自爆については、コンディショニングを重ねても、頻度はほとんど変化しない。

こうして、11月には平均加速電場37.8 MV/mで運転しても放電の頻度は30分に1回程度となり、8 GeV以上のエネルギーで運転を行う目処が立った。実際に10月末には加速電場を37 MV/mまで上げ、

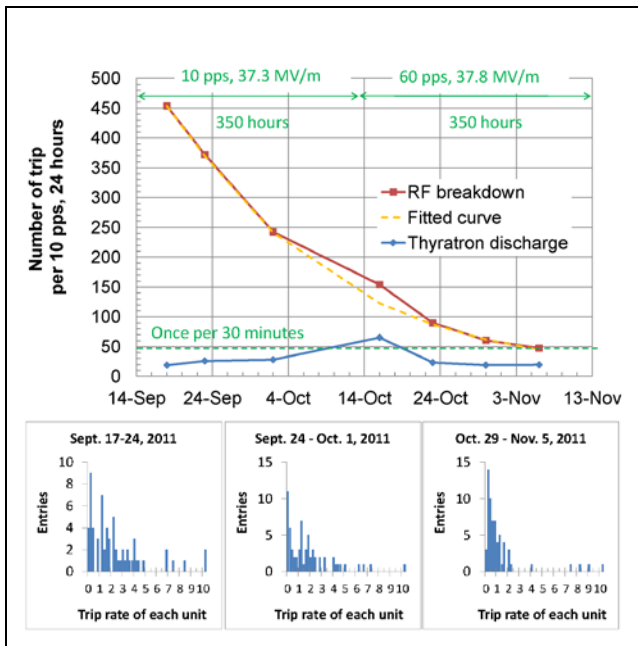


図2：（上図）2011年9月～11月のコンディショニング運転時の、Cバンド加速器全体のトリップ頻度の推移。RFによる放電（赤線）とサイラトロン（青線）とに分けて集計している。RFによる放電に関しては、本文に記す近似曲線を点線で示している。（下図）ユニット毎のトリップ頻度の分布。下の分布は、9月の運転開始後1週間、次の1週間、および42～49日後、の3つの期間ごとに集計したものである。いずれも、10 ppsで24時間運転した時のトリップ数に換算している。

8.3 GeVでのビーム運転を行うことができた。

3.3 加速電場とトリップ頻度

ここまでのコンディショニングを通じて、加速管やRFコンポーネントには大きなトラブルや損傷も無く、時間をかけてコンディショニングをすれば放電の頻度を減らすことができるとわかった。放電の頻度の減少は指数関数的であるので、頻度が低くなれば効果は頭打ちとなる。更なるコンディショニングを効率的に進めるために、段階的に電場を上げた。

図3に、加速電場を段階的に上げた時のトリップ頻度の推移を示す。それぞれの電場で30～50時間ほど運転してトリップ頻度を集計し、問題が無いことを確認してから電場を上げていった。電場が上がるとRFによる放電の頻度は高くなる。放電頻度 P はおおむね、加速電場 E_a の30乗に比例していた。この関係は、Xバンドや30 GHzの高電場加速管等でも同様の傾向が見られている^[9]。

$$E_a^{30} / P = const.$$

一方、サイラトロン（青線）の自爆やクライストロン内の放電によるトリップの頻度は、電圧が上がってもほとんど変化しない。

116時間をかけて39.3 MV/mまで電場を上げた後、再び37.8 MV/mまで戻して運転したところ、放電の頻度は約2/3に減少していた。図2で示したのと同様のコンディショニング効果が、ここでも見られている。その後も段階的に電場を上げ、2012年の2月には、現システムの最大能力である40～42 MV/mの電場にて、コンディショニングを行った。

3.4 デッドタイムの短縮

XFELでは、1台でもクライストロンの運転を停止すると、レーザーの発振が止まったり波長が変

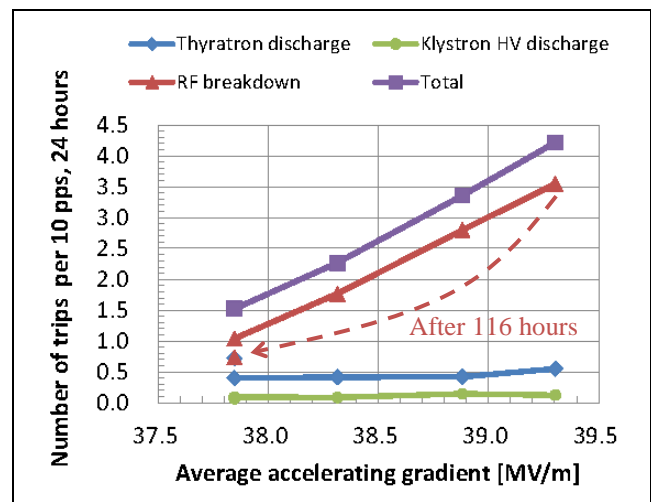


図3：電場強度を変えた時のトリップ頻度。項目別に集計している。測定は37.8 kVから順に電圧を上げてゆき、116時間後に再び37.8 kVの測定をした時は、RF放電によるトリップの頻度は約2/3に減っていた。

わったりして実験に使用できなくなる。従って、復旧に要する時間を短縮しデッドタイムを減らすことは、施設の利用効率を上げるうえで重要である。

図4に、加速管付近で放電した時の、真空度の推移を示す。放電時に悪化した真空度はおおむね20秒程度でベース真空度まで回復している。この排気時間 T は、放電箇所の容積 V と排気コンダクタンス C の比 V/C で決まる。 C バンド加速管の容積は1本あたり $V=9\text{ L}$ 、加速管中央から端までの排気コンダクタンスは $C=0.5\text{ L/sec}$ なので、 $T \sim V/2C=9\text{ 秒}$ と、この排気時間は実測ともおおむね一致する。従って、排気速度の悪い C バンド加速管であっても、20秒程度まで復旧時間を短縮するのは問題ないと推測される。コンディショニング運転時に使用する自動運転シーケンスを利用し、休止時間や昇圧時間の設定を変えて運転して比較した。試験では、平均加速電場 38.2 MV/m に設定して連続運転し、放電の頻度と、連続放電の割合を記録した。連続放電とは、ここでは電圧が元に戻る（復旧する）までの間に再び放電で停止した場合を指している。復旧時間を早めたために更なる放電を誘発することがないか、連続放電の割合から判断するためである。

試験の結果を表1にまとめる。予想通り、復旧時間を23秒まで短くしても、放電の頻度も連続放電の割合も変わらなかった。いずれの条件でも、3回に1回程度は連続放電を起こす。この事より、いったん放電すると再び放電を起こしやすくなる事は事実であるが、残留ガス以外の要因によると思われる。

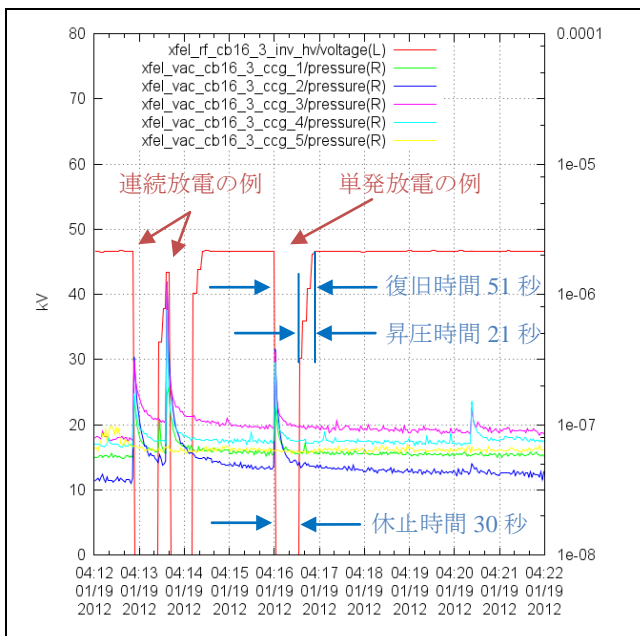


図4： RF による放電時の、真空度の推移の例。赤：PFN 充電電圧（左目盛）、緑：クライストロン直後の導波管真空度、青：RF パルス圧縮器付近の真空度、紫：上流加速管入口の導波管真空度、水色：上流加速管出口のダミーロード部真空度、黄色：下流加速管出口のダミーロード部真空度。真空度はいずれも右目盛。

これまでの運転では、トリップが起こった時、オペレータが確認後に手動でリセット、再起動をさせていたので、1分から2分のデッドタイムが生じていた。今回の試験結果をもとに、ビーム運転時も自動で復旧させるシーケンスを導入し、RFの復旧時間を30秒程度まで短縮し、電子ビームも1分以内に復旧させることができた。

表1： 復旧時間を短縮した時の、放電頻度と連続放電（本文参照）の割合。この測定時は、平均加速電場 38.2 MV/m に設定して運転した。放電頻度は、10 pps、24時間あたりの全体のトリップ回数。

| 条件 | 休止時間 | 復旧時間 | 放電頻度 | 連続放電の割合 |
|-----|------|------|---------|---------|
| A | 60 秒 | 5 分 | 134 回/日 | 32% |
| B | 30 秒 | 51 秒 | 102 回/日 | 26% |
| C | 25 秒 | 43 秒 | 97 回/日 | 29% |
| D | 15 秒 | 23 秒 | 101 回/日 | 36% |
| C再現 | 25 秒 | 43 秒 | 84 回/日 | 33% |

3.5 サイラトロンの自爆によるトリップの低減

図5に、 35 MV/m 運転時の各ユニットのトリップ頻度の分布を示す。この加速電場では、RF放電によるトリップは少なく（33%）、予想通りサイラトロンの自爆（64%）によるトリップが主になっている。

サイラトロンの自爆とは、本来のトリガタイミングより前に高電圧電極間が導通し、モジュレータのPFN回路に充電されたエネルギーが失われてしまう事象である。図6に、自爆が起こった時のPFN回路への充電波形の例を示す。自爆が起こるとPFN電圧は一旦ゼロとなるため、本来のトリガ時に目標電圧まで到達せず、これを充電電源が検知してインターロックで停止する。この自爆事象はプレトリガとも

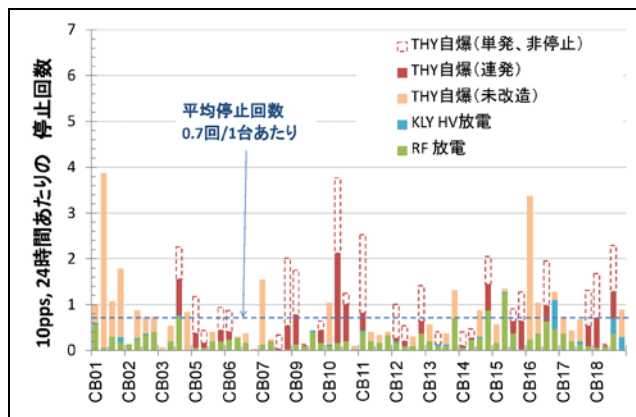


図5： C バンド加速器 64 ユニットのトリップ頻度とその内訳。2012年6月24日から1か月のデータを集計した。この期間中、ビームエネルギーは $5.8\sim 7.9\text{ GeV}$ で、各ユニットの加速電場は図6の 7.9 GeV 設定（約 35 MV/m ）で運転している。

言われ、既知の現象である。しかし、SACLA で 70 台超のサイラトロンを使用すると、その頻度が思いのほか高く、またコンディショニングによって減少する様子もないので、加速器の運転に支障を与えることとなった。

私達の使用するサイラトロン e2v 社 CX-1836 は、3 ギャップ型の重水素サイラトロンである。サイラトロンの動作サイクルでは通常、トリガにより重水素ガスをプラズマ化して導通した後、電流が無くなれば 10 μ sec 前後でプラズマが消滅して耐電圧を回復する。自爆の場合も、プラズマの消滅に関しては同様の過程を経ることが予想される。図 6 の波形を見ると、サイラトロンの自爆後に再び充電が始まり、電圧が上昇している。すなわち、サイラトロンの耐電圧はすぐに回復しており、次のパルスは通常通り印加しても問題ないと思われる。但し、このインターロック自体を殺してしまうと、充電電源やモジュレータ自体の故障を検知できず危険である。そこで、自爆が 1 回起こっても運転は継続されるが 1 分間に 2 度目が起こったら停止するようにインターロック機構を改造する。工程の都合から、本年 6 月に 25 台の改造を行い、残りは今夏に改造を行う。実際にこの改造を行ったユニットの停止頻度は約 1/3 に減った。図 5 に示した THY 自爆（単発、非停

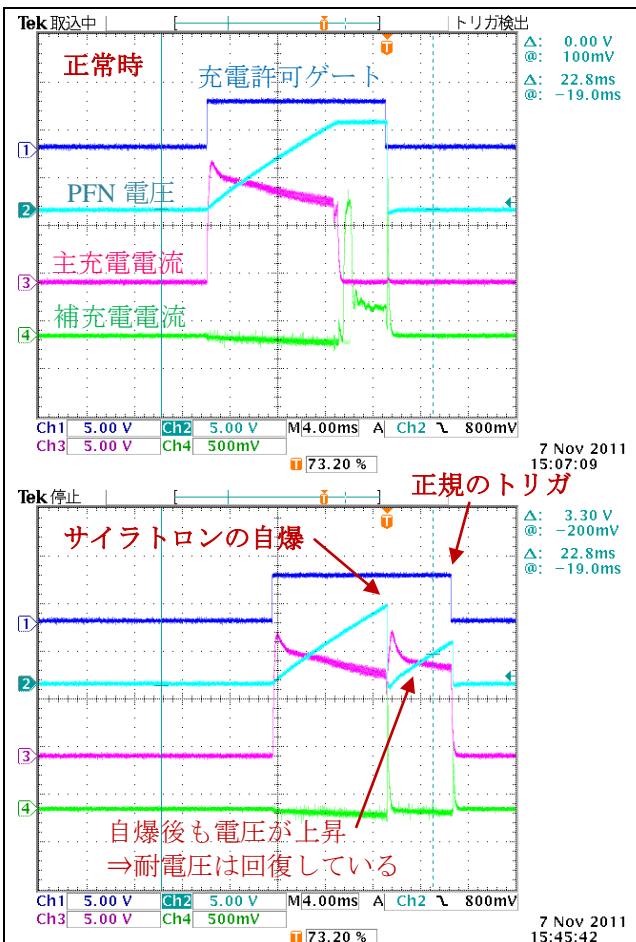


図 6： 正常時の PFN 充電波形（上）と、サイラトロン自爆時の波形の例（下）。この時の充電電圧は約 45 kV。

止）と THY 自爆（連発）のヒストグラムはそれぞれ、単発の自爆を無視した回数と、連発したために停止した回数を示す。今夏に残り（未改造と書かれた部分）の改造によって停止回数は更に減ると期待される。これにより、現在は 10 pps に限定される繰り返し周期を 20 pps、30 pps へと順次上げる予定である。

また同時に、サイラトロンの自爆事象を解明し、低減するための検討、試験も進めている。具体的には、リザーバ電圧と自爆頻度の相関や、トリガグリッド波形の確認、そして他のサイラトロンの使用や将来の半導体化も含めて、中長期的な検討を行っている。

4. 現在の加速電場とトリップ頻度

前章で記したように、大電力 RF によるコンディショニングによりトリップの頻度が減少し、3 月からの利用運転の際には予定通り電場を上げ、ユーザーからの要望に即したエネルギーで運転することができている。典型的な運転条件である 7.9 GeV 運転時、および施設の上限エネルギーである 8.5 GeV 運転時の各ユニットの加速電場を、図 7 に示す。7.9 GeV 運転時はおおむね 35 MV/m、8.5 GeV 運転時は 38 MV/m 程度の加速電場である。

加速電場の算出は、CB05～CB18 のクレスト加速部については、FEL 発振波長の変化を電子ビームのエネルギー変化に換算して求めている。FEL 発振した状態で 1 ユニットずつ順番にクライストロンを OFF し、FEL 発振波長の変化を実験棟にあるインライン波長計^[10]で測定して、電子ビームのエネルギー変化に換算している。

一方、RF パルス圧縮器出口や加速管出口での RF モニタ信号の強度と加速管のパラメータからも、加速電場を算出できる。この方法では、方向性結合器や減衰器、IQ 検出器等の校正誤差、および電子ビームの乗るタイミングの誤差等により 10% 程度の系統誤差が生じる。この方法で求めた加速電場と、前述のエネルギー変化から求めた加速電場とは、系統誤差である 10% 以内でほぼ一致した。CB01～CB03 のオフクレスト部については、BC3 を挟みクライストロンを OFF した時の変化が単純でないため、RF 強

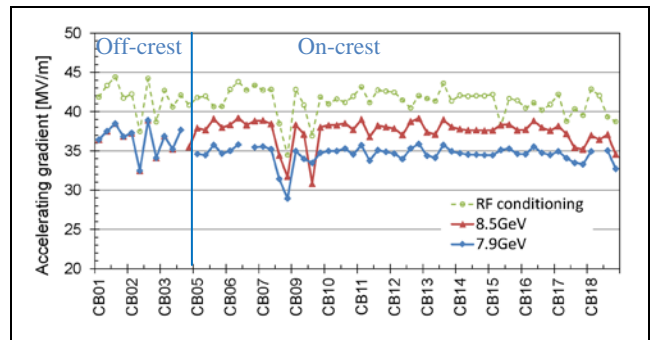


図 7： C バンド加速器 64 ユニットの加速電場。7.9 GeV 運転時と 8.5 GeV 運転時の電場を示す。加えて、これまでのコンディショニング運転時の最高電場を点線で示す。

度から求めた加速電場を、図 7 に記している。

現在の通常運転時のトリップ頻度は、加速電場 35 MV/m (図 7 の 7.9 GeV 運転時) の時、図 5 示すように 1 台あたり 0.7 回/日で、加速器全体では 30 分に 1 回程度、38 MV/m (同 8.5 GeV 運転時) の時は、1 台あたり 1.1 回/日で、加速器全体では 20 分に 1 回程度である。この停止頻度はまだ多いが、利用実験で許容できる範囲である。

5. まとめ

SACLA の C バンド加速器は、35 MV/m 以上の高電場で常時運転するため、放電によるトリップ頻度の低減が重要である。昨年 9 月から 11 月にかけて、約 550 時間のコンディショニング運転を行い、トリップ頻度を 1/10 に下げることができた。また、トリップ後の復旧を早めて 1 分以内のデッドタイムとし、マシンの利用率を高めた。こうして本年 3 月からのユーザー利用運転では、加速電場を定格以上の 38 MV/m、エネルギーを 8.5 GeV まで上げ、幅広いユーザーの要望に応えることが可能となった。通常運転時のトリップ頻度は、10 pps にて 20 分から 30 分に 1 回程度で、利用実験で許容できる範囲である。35 MV/m 以下の加速電場では、RF 放電によるトリップは少なく、多くはサイラトロンの自爆によるものである。この自爆によるトリップを 1/3 程度に低減するよう、今夏にインターロック機構の改造を予定している。そして運転繰り返しを順次上げてゆく予定である。

参考文献

- [1] H. Tanaka and M. Yabashi, et. al., "A compact X-ray free-electron laser emitting in the sub-angstrom region", *nature photonics* 2012.141, (2012).
- [2] 白澤克年、他、"SACLA 主加速器の運転状況", 第 8 回日本加速器学会プロシーディングス (2011); T. Inagaki, et. al., "Operational status of C-band high gradient accelerator for XFEL/Spring-8", *Proc. of IPAC11*, (2011).
- [3] T. Shintake, et. al., "HOM-Free linear accelerating structure for e+e- linear collider at C-band", *Proc. of PAC95*, (1995); H. Matsumoto, et. Al., "C-band choke mode accelerator structure for the linear collider", *Proc. of EPAC96*, (1996); C. Suzuki, et. Al., "Input coupler design for C-band accelerating structure", *Proc. of PAC97*, (1997).
- [4] T. Shintake, et. al., "Development of C-band RF pulse compression system for e+e- linear collider", *Proc. of PAC97*, (1997);
- [5] 三浦禎雄、他、"C バンドチョーク型加速管の量産結果報告", 第 7 回日本加速器学会プロシーディングス (2010).
- [6] 櫻井辰幸、他、"XFEL/Spring-8 での C-band 加速器システム量産品の高電界試験", 第 7 回日本加速器学会プロシーディングス (2010).
- [7] 例えば、T. Ramsvik, et. al., "Influence of ambient gases on the dc saturated breakdown field of molybdenum, tungsten, and copper during intense breakdown conditioning", *PRST-AB* 10, 042001, (2007).
- [8] 稲垣隆宏、他、"SACLA C バンド加速器における RF パルス圧縮器の調整", 第 8 回日本加速器学会プロシーディングス (2011).
- [9] A. Grudiev, et. al., "A new local field quantity describing the high gradient limit of accelerating structures", *Proc. of*

LINAC08, (2008)

[10] Y. Inubushi, et. al., to be published.