

# TUNING OF THE RF PULSE COMPRESSOR IN THE C-BAND ACCELERATOR AT SACLA

Takahiro Inagaki <sup>#,A)</sup>, Tatsuyuki Sakurai<sup>A)</sup>, Katsutoshi Shirasawa<sup>A)</sup>, Chikara Kondo<sup>A)</sup>,  
Hirokazu Maesaka<sup>A)</sup>, Yuji Otake<sup>A)</sup>, Tsumoru Shintake<sup>A)</sup>  
<sup>A)</sup> RIKEN SPring-8 Center

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

## Abstract

The main accelerator of SACLA (SPring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser) is the C-band (5712 MHz) accelerator. In order to obtain high accelerating gradient (typ. 35 MV/m), an RF pulse compressor (SLED) is used. Precise tuning of resonant frequency is necessary to maximize power efficiency, to reduce the RF reflection, and to improve the stability. Mechanical tuners of both cavities were adjusted to meet the target value of 5712 ±0.05 MHz and VSWR < 1.15. After the high power RF conditioning, the resonant frequencies were finally tuned to be 5712 ±0.02 MHz by controlling the temperature of cooling water. In order to suppress the “spiky” waveform in the RF pulse compressor output, which causes the HV breakdown, an amplitude modulation was applied. It effectively reduced 20% of the peak power compared to the simple square wave, conserving the effective acceleration energy gain. The beam energy multiplication factor was about 2, which is consistent with the designed value. We confirmed the operational performance of the RF pulse compressor, which enables us to obtain designed accelerating gradient of 35 MV/m

## SACLA Cバンド加速器におけるRFパルス圧縮器の調整

### 1. はじめに

SPring-8 キャンパス内に昨年度に完成した X 線自由電子レーザー施設（愛称 SACLA : SPring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser）<sup>[1]</sup>では、限られた敷地に 8 GeV の電子加速器とアンジュレータ、実験施設を納めるため、加速電場の高い C バンド加速器を主加速器として使用している<sup>[2]</sup>。C バンド加速器では、加速管に供給する RF 電力を増倍し加速電場を高めるために、RF パルス圧縮器 (SLED) を使用する。SACLA では、クライストロンからの約 35 MW の出力を RF パルス圧縮器にてピーク 200 MW、幅 500 nsec のパルスとし、これを 2 本の 1.8 m 進行波型加速管に供給して加速電場 35MV/m を得る設計となっている。これを 64 ユニット使用する。

RF パルス圧縮器では、高い Q 値を持つ空胴に RF 電力を蓄積させるため、空胴の共振周波数が励振周波数 (5712 MHz) からずれると、圧縮後の出力が低下する。私達は、共振周波数を ±20 kHz 以内に合わせることを目標とし、調整を行った。まず空胴のチューナー機構を調整し、次に温度を最適化することにより、共振周波数を目標の範囲に納めた。

また、大電力 RF での運転に際しては、加速管での放電を減らすため、低電力 RF にて振幅変調をかけることにより出力波形の整形を行った。

本プロシーディングスでは、こうした周波数調整と、出力波形の整形の結果について、報告する。

### 2. RF パルス圧縮器の概要

RF パルス圧縮器の写真を図 1 に示す。クライストロンからの大電力 RF は、まず 3dB ハイブリッド

結合器で半分に分配され、2 台の共振空胴に蓄積される。一定時間経過後に RF の位相を反転させると、共振空胴に蓄積した RF 電力がクライストロン出力に重畳され、3dB 結合器の出力ポートに取り出される。こうして RF パルスを時間的に圧縮することによりピーク電力を高め、電子ビーム通過時の加速電場を増す。RF パルス圧縮器のパラメータを表 1 にまとめる。

表 1 : RF パルス圧縮器のパラメータ

共振周波数	5712 MHz
共振モード	TE <sub>0,1,15</sub>
Q <sub>0</sub> (実測)	約 185,000
β (実測)	約 9.0
VSWR (実測)	1.15 以下
最大運転条件	入力 50 MW × 2.5 μ sec 2.0 μ sec にて位相反転 繰り返し 60 pps
加速エネルギー増倍率	2 倍 (加速管の t <sub>f</sub> =300 nsec に対して)

共振空胴は、高い Q 値 (理論値 Q<sub>0</sub>~190,000) を持つ TE<sub>0,1,15</sub> の円筒モードを使用する。リニアコライダの開発時には、マルチバンチ運転のため出力のパルス幅を広げられる三連型の空胴が開発された<sup>[3]</sup>が、SACLA ではリニアコライダーほどのパルス幅を広げる必要はなく、単空胴を採用した。空胴の端板にはチューニング機構が設けられ、端板の薄肉部より内側の部分を撓ませて共振周波数を調整して

<sup>#</sup> inagaki@spring8.or.jp

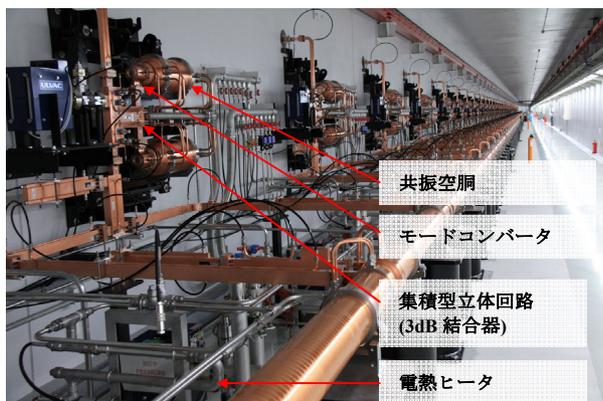


図 1: SACLA 加速器トンネルにて、RF パルス圧縮器が壁面に設置されている様子。

いる<sup>14)</sup>。チューナーには差動ネジ (1 回転あたり 0.1 mm の送り=500 kHz の周波数シフトに相当) が用いられ、10 kHz 以下での微小な調整が可能となっている。空洞の周波数調整に関しては次節以降で述べる。

共振空洞と 3dB 結合器との接続部には、モードコンバータ<sup>15)</sup>と呼ばれる変換器が用いられる。これは導波管を伝送する□TE10 モードから○TE01 モードに変換しスムーズに接続するためのものである。変換部は十字型に 4 つの結合孔を持ち、位相反転時に生じるピーク電場を軽減している。

3dB 結合器には、入出力の導波管部にモニタ用の方向性結合器や真空引き口を有する集積型立体回路と呼ばれる部品を開発し使用している<sup>15)</sup>。これは、

ひとつの銅ブロック上に回路を集積し、機械加工で製作することにより生産性を向上させたものである。方向性結合器はサイドカップル型 (結合度 -60dB) で、クライストロン出力と戻り (Kly\_Fwd、Kly\_Bwd)、RF パルス圧縮器からの出力と加速管からの戻り (Sled\_Fwd、Sled\_Bwd) の 4 つのモニタ信号を取得することができる。

SACLA では、高電場による放射線の発生を懸念し、RF パルス圧縮器を加速器トンネル内に設置している。従って、運転中はチューナーによる周波数調整はできないが、代わりに冷却水の温度を変更することにより周波数を調整 (温度係数-96 kHz/°C) することができる。SACLA では、共振空洞に流れる冷却水の温度を高精度に調節し、空洞の共振周波数を最終調整しつつ 0.1°C 以下で安定化させる温度調節システムが設けられている<sup>16)</sup>。冷却水の温度は、配管の上流側に設けられた電熱ヒータの電力を操作し、26.5°C~31°C の範囲で変更が可能である。

### 3. 共振空洞の周波数調整

#### 3.1 要求精度と調整手順

空洞の共振周波数が、使用 RF の周波数 (5712 MHz) からずれた場合、下記の影響が生じる。

#### ①両空洞ともに周波数がずれた場合

空洞に蓄積する RF の位相が蓄積時間とともに流れ、位相反転後の出力が低下する。また位相も変化する。SACLA の場合、空洞の周波数が 100 kHz ずれた時に、位相反転後出力の RF 電力は約 10% 低下 (増倍率は約 5% 低下) し、位相は約 17 度変化する。空洞の周波数を合わせることは、効率を高めることに加えて、温度変動時の出力変動を低減するためにも重要である。温度が±0.02°C 変動した時に RF 電力の変化を 0.1% 以下に抑えるためには、両空洞の周波数を 5712 MHz±20 kHz 以内に合わせる必要がある。

#### ②両空洞の周波数が異なる場合

3dB 結合器での整合が取れなくなり、クライストロンへの戻りパワーが増大する。VSWR を 1.1 以下に抑えるためには、両空洞の周波数を 5712 MHz±30 kHz 以内で一致させる必要がある。

私達はまず、低電力 RF にて両空洞のチューナーを操作して①と②を調整した。次に大電力 RF にて、冷却水の温度を変えて実運転時の①を最適化した。

#### 3.2 低電力 RF による調整

SACLA の RF パルス圧縮器 64 台は、2007 年より 2009 年にかけて、三菱重工業(株)・神戸造船所にて製作された。製作の状況および工場試験の結果は、文献[4]に詳しく報告されている。組立完了後には、低電力 RF による測定およびチューナー調整を行った。共振周波数を 5712 MHz に合わせつつ、VSWR が全体的に小さくなるよう調整する。この測定では空洞内を真空に引いた状態で行い、また、冷却配管に通水して温度を安定化している。

しかし、RF パルス圧縮器 27 台を製作し、据付を数か月後に控えた時点で、温度変化に対する共振周波数の換算を間違えていたことが発覚した。工場にて再調整することは工程上難しかったため、SACLA 加速器トンネルにて据付後に改めて、低電力 RF によるチューナーの調整を行うこととした。残りの 37 台については、工場での調整で済ませた。

据付後の現地調整では、図 2 に示すように、ネットワークアナライザの片端を 3dB 結合器の入力ポート (上部) に接続し、他端を方向性結合器の Sled\_Fwd に接続した。調整後の共振周波数と VSWR の測定例を図 3 に示す。方向性結合器の結合度は約-60dB であり、このオフセットを差し引けば、共振周波数の測定には問題は生じない。一方、VSWR の測定においては、3dB 結合器の出力ポート側に接続された加速管等での反射が重なる。ただし、これらの反射による VSWR は高々 1.1 程度であり、スパン 2 MHz の測定レンジにおいて十分に滑らかであるので、RF パルス圧縮器の周波数ずれに伴う VSWR 悪化とは十分に判別可能である。なお、この測定時も、空洞内を真空に引き、30°C に温度調整した冷却水を通水して測定を行った。

こうした調整の結果を、図4にまとめる。現地調整後(青印)のVSWRの測定では、前述のように加速管等の反射が含まれるので値が大きくなっているが、それでも1.15以下であり、クライストロンの動作許容値(VSWR<1.2)以内に納まっている。周波数については、おおむね±20kHz以内に納まった。一部50kHzほどずれているものがあるが、次節で述べる冷却水の調整範囲(±96kHz)に十分に納まっているので問題ない。

### 3.3 大電力RF運転時の、温度による周波数調整

実際の大電力RFによる運転時には、まず空洞の発熱による周波数の変化を考慮する必要がある。私達は2節で述べた温度調節システムにて、共振空洞に埋め込まれた測温抵抗体にて物温を測定し、運転条件を変えた時も物温が常に最適温度となるように冷却水の温度を制御している<sup>[5]</sup>。しかしながら、局所的な温度分布等により、いくらか運転条件に依存して変化する。次に、クライストロンからの出力が理想的な方形波ではなく、振幅や位相のリップルを伴っていることによる影響がある。最後に、温度計の絶対校正誤差により、温度表示値が異なる可能性がある。このように、大電力RFでの最適温度は、低電力RFでの最適温度と異なる可能性があるため、最終的な周波数調整は、実際に大電力RFを用いて行った。なお、現在の運転では主に運転繰り返し10ppsで運転を行っているので、以下の調整は全て10ppsにて行った。

温度調節システムの設定温度を±0.5°C変化させた時のRFパルス圧縮器からの出力(Sled\_Fwd)波形を、図5に示す。3700nsec付近の位相反転時の位相に着目すると、この前後の位相が等しい時に出力の振幅が最大となっていることがわかる。これは、空洞に蓄積されたRFの位相と、反転後の出力RFの位相が等しい時に最大の効率が得られるからである。各ユニットにて、大電力RF運転時のSled\_Fwd波形を取得し、それぞれの波形について3700nsec前後の位相差をゼロとするような温度を計算した。これを最適温度とみなし、各ユニットの温度調節システムにおける設定温度を変更した。最後に、最適温度から±0.5°C変化させ、Sled\_Fwd波形の振幅を測定し、最適値にいることを確認した。図6に、温度を変化させた時の振幅変化の例を示す。設定温度の時に、最大の出力となっていることがわかる。こうして全てのRFパルス圧縮器の周波数を、ほぼ±20kHz(±0.2°C)以内に納めた。

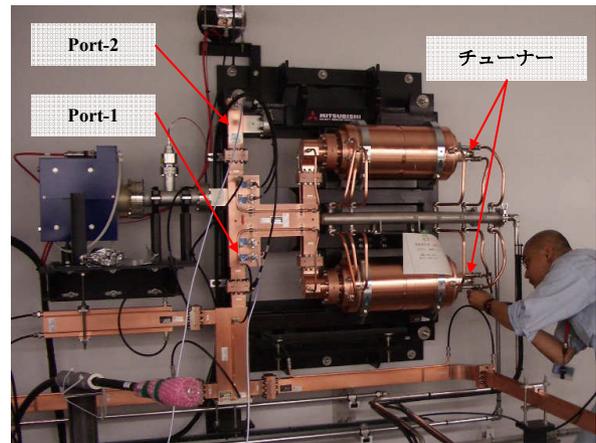


図2：現地でのチューナー調整の光景。

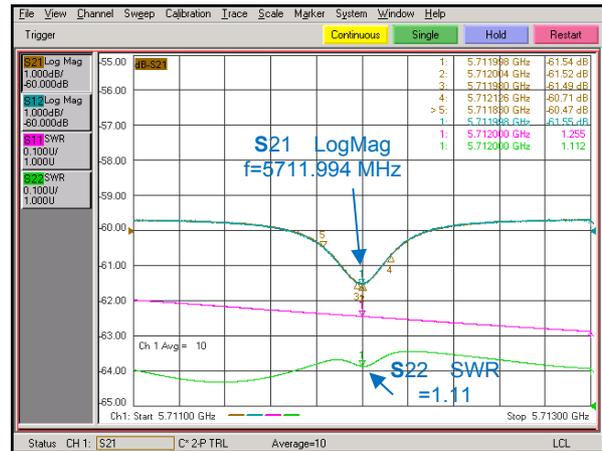


図3：現地調整後のS21、S22特性の例。

Port-1: Sled\_Fwdポート(結合度 約-60dB)  
Port-2: 3dB結合器の入力ポート

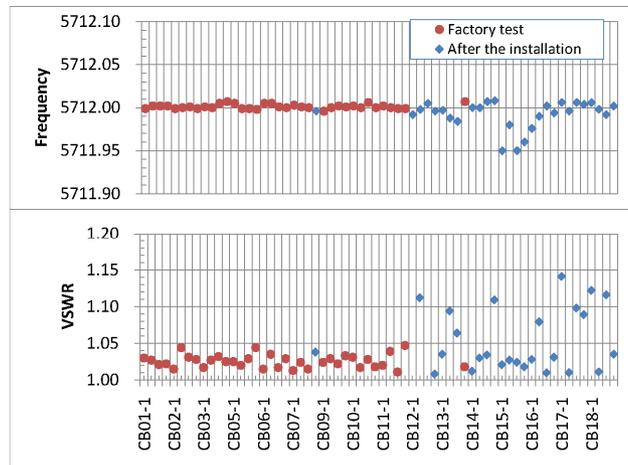


図4：低電力RFにて測定した、各ユニットの30°Cでの共振周波数とVSWR。赤印は工場試験での測定、青印は現地調整後の測定結果による。現地調整後のVSWR測定には、加速管等からの反射を含むため、値が大きくなっている。

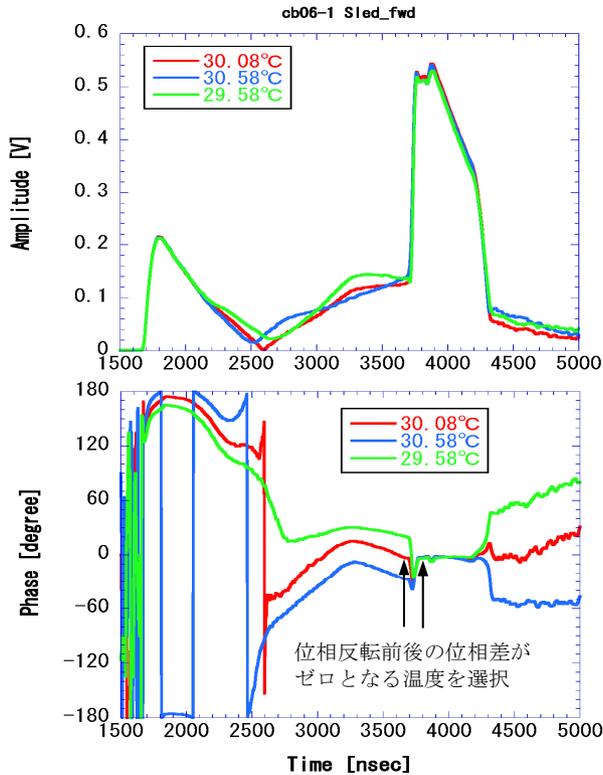


図 5：温度を±0.5°C変化させた時の Sled\_Fwd 信号の振幅および位相の変化。位相については、加速管出口での 4200 nsec 付近の位相が一定になるよう、低電力 RF にてフィードバック制御を行っているため、この付近の線が重なって見える。

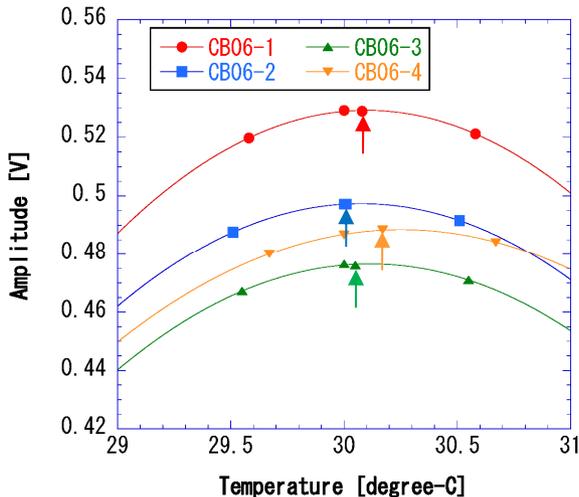


図 6：RF パルス圧縮器の設定温度を変化させた時の、Sled\_Fwd ピーク部の振幅の変化。それぞれ矢印で示した温度を最適温度として設定した。

#### 4. パルス尖頭部の平坦化

RF パルス圧縮器からの出力 (Sled\_Fwd) は、位相反転直後にスパイク状の高いピーク電力を持つ部分がある。この部分は、加速管等で放電を引き起こす要因となる。そこで、位相反転直後に低電力 RF にて振幅変調をすることによりピーク電力を抑え、放電の頻度を減らした。図 7 に、いくつかの振幅変調を行った際のクライストロン出力 (Kly\_Fwd) と RF パルス圧縮器の出力 (Sled\_Fwd) を示す。また、それぞれの振幅変調を行った時の、Sled\_Fwd 信号のピーク強度と、ピーク付近 300 nsec の平均電力より求めた加速電場、加速エネルギーに対する増倍率を表 2 にまとめる。「AM 100ns」「AM 300ns」はそれぞれ、位相反転後 100 nsec、300 nsec に渡ってピーク部を打ち消すような振幅変調をかけたものである。なお、「AM 300ns」にて、クライストロン出力波形平坦部の凸凹が変化しているのは、高電圧パルスのタイミングが異なっていたためであり、本題には影響しない。「FIR 130ns」は位相反転パターンに対して時間幅 130nsec の FIR フィルター (移動平均) をかけ平滑化したものである。Ideal (緑の点線) は、クライストロン出力が理想的な方形波 (位相反転も瞬時に行われる) の場合の波形を、実測の Q 値と  $\beta$  より計算したものである。

表 2 を見ると、振幅変調や平滑化をしたものは、理想的な方形波に比べて増倍率を低下させずにピーク強度を 20%以上抑えることに成功している。そこで私達は、「AM 100ns」の振幅変調を全数に適用し、ピーク強度を抑えた。図 8 に、各ユニットでの加速エネルギーの増倍率を示す。RF 電力の測定に関して最大 10%程度の系統誤差はあるにせよ、増倍率はほぼ設計どおりの 2 倍前後が得られており、RF パルス圧縮器が想定通り働いていることが確かめられた。

現在のビーム調整運転では、C バンド加速器はおおむね 35 MV/m から 37MV/m 程度の加速電場にて、最終エネルギー 7.0 GeV~7.4 GeV にて運転が行われている<sup>[2]</sup>。Sled\_Fwd 信号の強度より求めた加速電場の合計と電子ビームの実測エネルギーとを比較すると、5%程度の精度で一致している。C バンド加速器にて RF パルス圧縮器は設計通りの性能を発揮し、高加速勾配での運転に寄与している。

表 2：振幅変調の種類と出力波形のピーク値、加速管での加速エネルギー増倍率と加速電場

	ピーク強度	増倍率	加速電場
AM 100ns	204 MW	2.1 倍	38.3 MV/m
AM 300ns	135 MW	1.8 倍	33.6 MV/m
FIR 130ns	224 MW	2.1 倍	38.4 MV/m
Ideal	258 MW	2.1 倍	38.8 MV/m

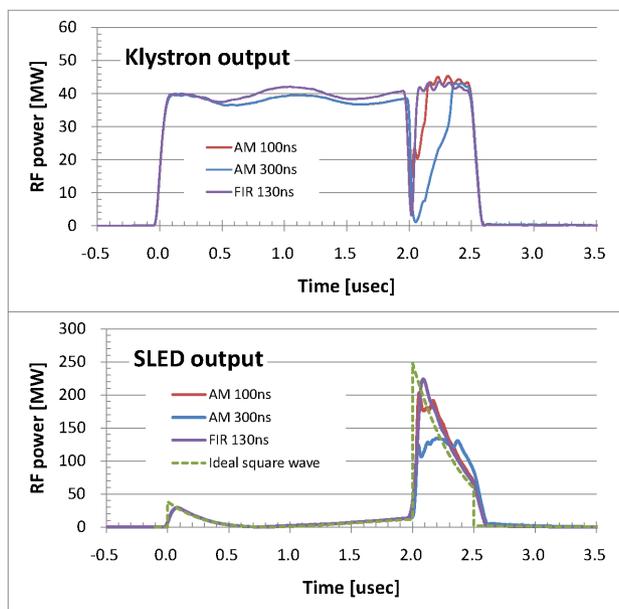


図 7：振幅変調を行った時の、クライストロン出力波形と RF パルス圧縮器の出力波形。それぞれの変調方法については、本文を参照のこと。

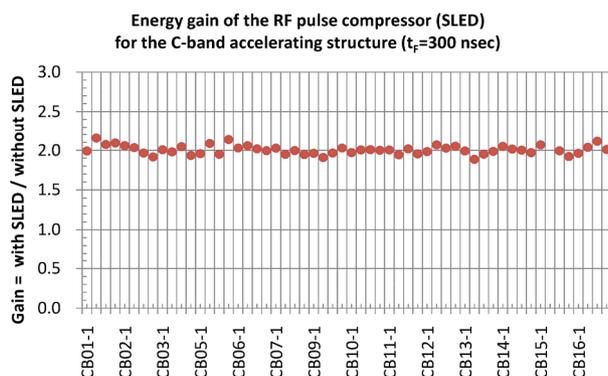


図 8：測定したクライストロン出力 (Kly\_Fwd) と RF パルス圧縮器出力 (Sled\_Fwd) より計算した、加速管でのエネルギー増倍率。最上流部の CB01-1 より CB16-4 までの 55 台 (CB15-2 は故障停止中) について記している。

## 5. まとめ

SACLA の C バンド加速器における RF パルス圧縮器 62 台について、空洞のチューナーによる調整と温度の調整を行い、共振空洞の周波数を  $\pm 20$  kHz 以内で最適化した。また、位相反転時のピーク電力を抑えるため低電力 RF での振幅変調を行い、尖頭を平坦化した。RF パルス圧縮器の加速エネルギー増倍率は設計通りの約 2 倍が得られており、高加速勾配 (約 35 MV/m) での運転を実現している。

## 謝辞

RF パルス圧縮器の製作にあたっては、三菱重工業㈱の沖平氏、井上氏をはじめ多くの方々の尽力により素晴らしい品質のものが出来上がりました。据付後のチューナー調整、および大電力 RF エージングに際しては益田氏ほか SES チーム 6 名に、温度調節システムに関しては XFEL の高橋氏と長谷川氏に、振幅変調に関しては XFEL の大島氏に、特に感謝いたします。そのほか、XFEL に関係する多くの方々のお陰で日々、C バンド加速器が運転できていること、感謝いたします。

## 参考文献

- [1] 田中均, “動き始めた X 線自由電子レーザー施設 SACLA の運転状況”, 本学会報告集 (2011).
- [2] 白澤克年, ほか, “SACLA 主加速器の運転状況”, 本学会報告集 (2011).
- [3] T. Shintake, et. al., “Development of C-band RF Pulse Compression System for e+e- Linear Collider”, Proceedings of PAC97, (1997).
- [4] 沖平和則, ほか, “C-band RF パルスコンプレッサーの量産結果報告”, 第 7 回日本加速器学会年会, (2010).
- [5] 三浦厚, ほか, “C バンド集積型立体回路の開発”, 第 3 回日本加速器学会年会, (2006).
- [6] T. Hasegawa, et. al., “Status of a precise temperature-regulation system for the C-band accelerator at XFEL/SPring-8”, Proceedings of IPAC10, (2010).