

## 次世代放射光リングの入射器として使用する

### C バンド加速器の機器設計と開発状況

#### DESIGN AND DEVELOPMENT STATUS OF A C-BAND ACCELERATOR SYSTEM USED AS AN INJECTOR FOR A NEXT-GENERATION SR SOURCE

稲垣隆宏<sup>#, A)</sup>, 安積隆夫<sup>B, C)</sup>, 岩井瑛人<sup>A)</sup>, 大島隆<sup>B, C)</sup>, 近藤力<sup>B, C)</sup>, 前坂比呂和<sup>A)</sup>, 西森信行<sup>C)</sup>, 田中均<sup>A, C)</sup>,  
Takahiro Inagaki<sup>#, A)</sup>, Takao Asaka<sup>B, C)</sup>, Eito Iwai<sup>A)</sup>, Takashi Ohshima<sup>B, C)</sup>, Chikara Kondo<sup>B, C)</sup>, Hirokazu Maesaka<sup>A)</sup>,  
Nobuyuki Nishimori<sup>C)</sup>, Hitoshi Tanaka<sup>A, C)</sup>  
<sup>A)</sup> RIKEN SPring-8 Center, <sup>B)</sup> JASRI, <sup>C)</sup> QST

#### Abstract

A next-generation synchrotron radiation (SR) source, which has been constructed in Sendai, adopted the C-band high-gradient accelerator system as a main accelerator of the 3 GeV low-emittance electron beam injector. Since the C-band accelerator in SACLA has been successfully operated for many years, we transfer the C-band accelerator system of SACLA, which includes a normal-conducting, disk-loaded type traveling wave structure, a 50 MW pulsed klystron and an insulation oil-filled modulator. For reduction of the construction cost, a simplified RF pulse compressor (SLED), a simplified high voltage capacitor charger and a GaN-based driver amplifier are developed and tested. Since the requirements of the RF stability are moderate compared to those of SACLA, we decided to omit the precise temperature regulation system of the RF structure. Concerning the low-level RF control, we developed a simplified modulation/demodulation system based on the micro-TCA.4 platform. In this proceeding, we report the design and a current status of developed components of the C-band accelerator system.

#### 1. はじめに

軟 X 線からテnder-X 線領域の高輝度放射光の供給を目的として、仙台の東北大学青葉山新キャンパス内に、高輝度 3 GeV 級放射光源(次世代放射光施設)の建設が進められている[1,2]。この次世代放射光施設は、量子科学技術研究開発機構(QST)と、光科学イノベーションセンターが主体となり、2023年度の利用運転開始を目指しているものである。

次世代放射光施設は、高輝度の放射光を発生させるため、周長 350 m のリングに 16 セルの 4-Bend Achromat ラティスを組み、ビーム電流 400 mA で水平エミッタンス 1.1 nm·rad のビームを蓄積する。各セルにある 5.4 m の長直線部と 1.6 m の短直線部にアンジュレータや多極ウイグラーを挿入し、最大 26 本のビームラインに放射光を供給できる設計となっている。リングの狭いアパーチャに Top-up 入射をするためには、低エミッタンスの安定したビームを供給する必要があり、3 GeV のライナックを電子入射器として用いることとした。ライナックには、高電場の C バンド加速器を用いることで、全長をリング直径と同程度の 110 m に収めることができる。

C バンド加速器は、S バンド加速器の 2 倍の周波数である 5.712 GHz の RF を用いるため、加速空洞のサイズが半分になり、電力効率が良く加速電場が上げられる。2011 年から運転を開始した X 線自由電子レーザー(FEL)施設 SACLA[3]では、C バンド加速器を主加速器とし、128 本のチョークモード型加速管にて 35 MV/m の加速電場を発生させて、8 GeV までの加速運転を常時行っている[4]。また、2014 年から 2016 年に建設された

SACLA-BL1 加速器[5]では、高電場に対応したディスクロード型加速管 10 本を使用し、加速電場 42 MV/m での常用運転を行っている[6]。このような実績のある SACLA の C バンド加速器システムを用いることで、信頼性のある入射ライナックを短期間に建設することを目指している。

この次世代放射光施設は、年間 5000 時間以上の運転を予定しており、加速器の信頼性、安定性はきわめて重要である。少人数の加速器スタッフで運転を維持するため、保守性も重要である。更に、限られた予算で建設するためのコスト削減や、運転維持のための高効率化も必要である。また、将来計画として、ライナックのトンネルを延長し、軟 X 線、テnder-X 線領域の FEL 施設を併設することも考えている。こうした事を考慮して、入射ライナックの設計を行った。本論文は、このうち C バンド加速器の機器設計と開発状況について、報告する。

#### 2. 入射ライナックと C バンド加速器の構成

##### 2.1 入射ライナックの構成

入射ライナックの構成を Fig. 1 に示す[7]。入射ライナックに重要なのは、信頼性と安定性、保守性であるので、これらに優れた熱カソード電子銃を採用した。この入射ライナックでは、SACLA の 500 kV 電子銃のような特殊な機器の使用は避けつつも、最適設計により高輝度ビームを得られる電子銃システムを開発した[8]。実績のある EIMAC 社製グリッド付き熱カソードを用い、印加電圧も 50 kV と低く抑える代わりに、直後に置かれた 238 MHz 空洞で 500 keV まで加速することにより、電荷量 0.3 nC で規格化エミッタンスが 10 mm·mrad 以下の高輝度ビームを得る設計である。得られたビームを 476MHz 空洞と後続の S バンド加速管で速度圧縮し、BC1(Bunch

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

compression chicane)でエネルギー選別して C バンド加速器に入射する。約 80 m の C バンド加速器で 3 GeV まで加速した後、ビーム輸送路を通して蓄積リングに入射する。リングへの入射繰り返し周波数は最大 1 Hz としているので、ライナックの運転も 1 Hz である。但し、初期の RF コンディショニングは、最大 25 Hz で行うこととし、RF システムや電力設備、冷却設備も、そのための容量を確保している。従って、将来の FEL 運転の際には、繰り返しを上げて運転することが可能である。

C バンド加速器の加速管は、SACLA-BL1 加速器にて使用したディスクロード型の進行波加速管を用いる。ただし、RF 電力をより効率的に使うため、1 加速管あたりの空洞数を 102 個から 114 個に増やし、全長を約 2 m とした。加速管 2 本を、1 台のクライストロンでドライブし、これを 1 ユニットとする。この入射ライナックでは、トリップ頻度を下げ、到達エネルギーに余裕を持たせるために 20 ユニットを用いることとした。想定する加速電場と到達エネルギーを Table 1 にまとめる。20 ユニット全て運転すれば、37 MV/m の加速電場で 3 GeV まで加速できる。加速電場を 42 MV/m まで上げることができれば、2 ユニットの予備ができる。放射光施設のようにユーザー供用中の連続運転を行う加速器では、複数の予備ユニットを用意し、故障時には切り替えをして運転を継続することが必要である。こうしたユニット単位の切り替え運用を想定して、システムの設計を行った。

また、将来に FEL へのビーム供給を行う場合には、高輝度かつ高ピーク電流の電子ビームが必要になるので、電子銃やバンチャー空洞を改造するとともに、シケイン BC2 を追加することを考えている。上流から 20 m 付近に BC2 を設置できるよう、スペースを空けている。

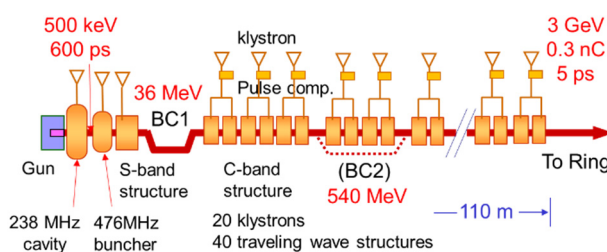


Figure 1: Configuration of the 3 GeV linac.

Table 1: Expected Accelerating Gradient and Final Beam Energy, Including 36 MeV at BC1

Number of RF unit	37 MV/m × 4m = 148 MeV/unit	42 MV/m × 4m = 168 MeV/unit
18 unit	2.70 GeV	<b>3.06 GeV</b>
19 unit	2.85 GeV	3.23 GeV
20 unit	<b>3.00 GeV</b>	3.40 GeV

## 2.2 C バンド加速器システムの構成

Figure 2 に C バンド加速器システムの構成を、Fig. 3 に設置された時のイメージ図を示す。基本的には、実績のある SACLA の C バンド加速器システム[4]と同様の構成とした。RF 源は最大出力 50 MW のクライストロンで、RF パルス圧縮器 (SLED) で電力を約 4 倍に高めたあと、2 本の加速管に供給する。加速管へ 80 MW の RF 電力を供給すると、42 MV/m の加速電場が得られる設計である。クライストロンの動作に必要な 350 kV、310 A のパルス電力はモジュレータが供給し、約 300 W の励振 RF は、クライストロンごとに用意されたドライバーアンプが供給する。制御ラックに設置された低電力 RF システムと PLC 制御システムを通じて、上位制御系からの遠隔制御を行う。

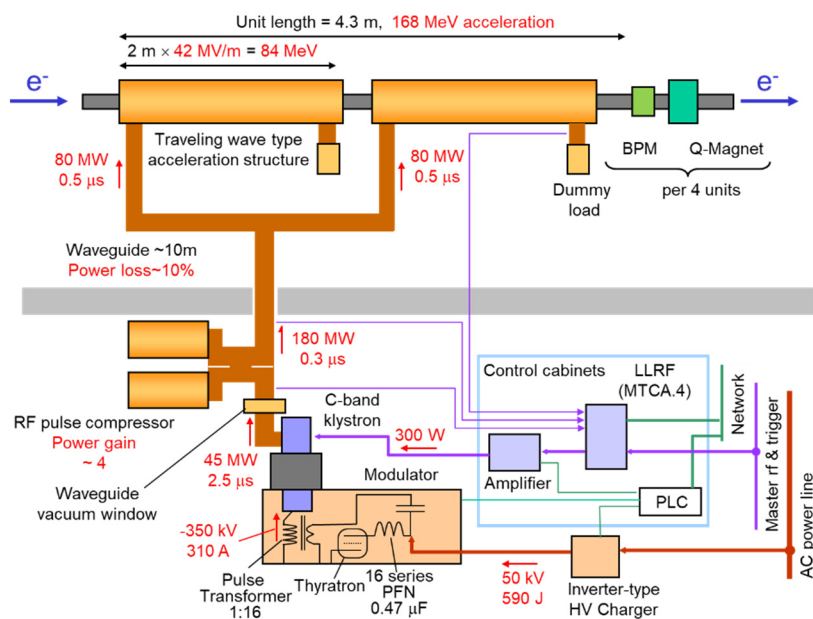


Figure 2: Configuration of the C-band accelerator system.

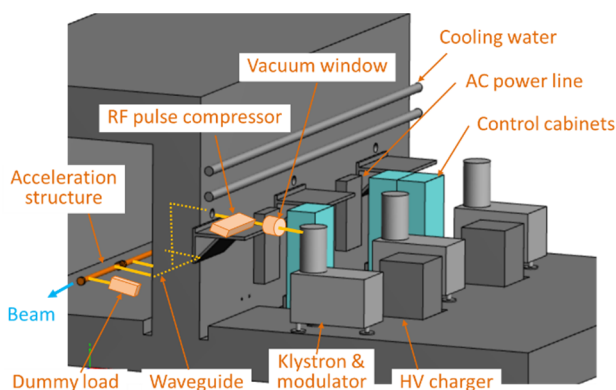


Figure 3: Installation image of the C-band accelerator.

### 2.3 仕様の簡略化とコスト削減

今回の入射ライナックでは、FEL のように電子ビームのピーク電流やエミッタンスの安定性は重要でなく、RF の要求精度は SACLA よりも数倍から一桁程度緩いものとなる。C バンド加速器は基本的にクレスト位相にて使用するため、加速器終端でのエネルギー安定性 0.1%を確保することから要求される C バンド加速器の RF 位相の安定度は $\pm 2.5^\circ$  ( $1 - \cos 2.5^\circ = 0.1\%$ )である。また、パルスの繰り返しも、通常は 1 Hz での運転を想定しているため、冷却水設備や電力設備の負荷も減らすことができる。

#### 1) 精密温度制御の省略

最も温度変化の影響を受けやすい加速管と RF パルス圧縮器の温度係数を Table 2 に示す。位相変化を $\pm 2.5^\circ$ 以下にするためには、0.1 K 程度の温度安定性が必要である。SACLA では、施設から供給される冷却水(約 26.5°C)の温度安定性が $\pm 0.05$  K で、この冷却水を電熱ヒータで 28~30°C に昇温して $\pm 0.02$  K 以下に安定化し、加速管と圧縮器に通水している[9]。しかし、電熱ヒータで消費する電力は、1 ユニットあたり 15 kW になり、1 Hz 運転時には、半分以上の電力がここで使用されることになってしまう。そこで、施設から供給される冷却水の温度が  $28 \pm 0.05^\circ\text{C}$  で安定であることを前提に、精密温度制御を省略することとした。

加速管は製作時に周波数が決まってしまうので、28°C で最適となるようメーカーでデンプリング調整した後に納入する。また、通常の運転は 1 Hz なので、発熱による温度勾配は無視できる。

一方、RF パルス圧縮器は、共振空洞にチューナーが設けられているので、周波数の調整が可能である。今回の入射ライナックでは、圧縮器をクライストロンギャラリ側に設置し、運転時の周波数調整を行うこととした。

Table 2: Temperature Coefficient for C-band Accelerating Structure and RF Pulse Compressor

	Accel. structure	RF pulse comp.
Amplitude	-0.02% / 0.1 K	-0.06% / 0.1 K
Phase	1.1° / 0.1 K	1.7° / 0.1 K

#### 2) モジュールータ充電電源の簡略化

モジュールータの Pulse forming network (PFN) 回路の電圧は、クライストロンの安定性に直結するため、その充電電源は重要な機器である。SACLA ではインバータ式の主充電部と補充電部を組み合わせ、10 ppm(rms)の電圧安定性を出している[10]。今回の入射ライナックでは、充電電圧の安定度は 0.08% (800ppm)程度でよいので、補充電部を省略し主充電部単独で用いることとした。スイッチング回路の Pulse wave modulation (PWM)による充電電流制御を最適化し、電圧の整定精度を上げている。昨年に試作した充電電源では、模擬負荷による充電試験にて 200 ppm(p-p)以下のショット毎電圧安定度を実現している。

#### 3) 水冷ラックと低ノイズ電源の省略

SACLA では、全ての低電力 RF 機器、タイミング機器は低ノイズ DC 電源にて駆動し、水冷ラックにおさめて安定化を図るなど、安定性と制御精度を追求した機器構成となっていた。今回の入射ライナックでは、そこまでの安定性は必要ないので、通常の高圧ラックとし、電源も通常の AC による電源供給とした。

## 3. 機器の開発と試験

### 3.1 RF パルス圧縮器

RF パルス圧縮器(通称 SLED)は、クライストロンの RF 出力を 2 台の共振空洞に蓄積し出力することで、ピーク電力を 4 倍に高めるものである。SACLA で使用する圧縮器は、リニアコライダーのマルチバンチ運転向けに開発された三連空洞型の圧縮器の設計[11]を踏襲しており、4 結合穴のモードコンバータで矩形導波管から円筒導波管に変換してから空洞と結合するなど、複雑な構造となっていた。単空洞の場合は、ここまでの構造は不要と思われるので、加速器のコスト削減を図るため、きわめて単純化した圧縮器を試作し、試験を行った。

Figure 4 に試作した圧縮器の写真と、HFSS で計算した共振空洞断面の電場分布を示す。共振空洞の RF モードは TE<sub>0,1,20</sub> モードとし、空洞のサイズ(内径 152.4 mm, 長さ 578.3 mm)は 5.712 GHz で共振し、また他のモードと分離されるよう選択した。空洞の片端には、TM モードと分離するための離調溝を周囲に掘り、中央部には、ダイヤフラム式のチューナー機構を設けた。反対側の端板には、導波管と結合する直径 20 mm の結合穴が 2 個設けられている。結合穴は、導波管の H 面に  $3\lambda_g/2$  の間隔で開けられており、TE<sub>0,1,x</sub> モードを励起しやすくしている。結合度は端板の厚みによって調節する。穴の周囲部は半径 3 mm の曲面取りをしているが、それでも表面には最大で 50 MV/m の電場が立つことが想定される。そこで端板を電解研磨し表面精度を上げた。2 台の空洞は 3dB ハイブリッド結合器に接続され、圧縮器として動作する。

試作した圧縮器の低電力 RF 特性を Table 3 にまとめる。空洞接合前の RF 測定では、部品の接触が十分でなく空洞の Q 値が低かったため、端板を薄くして結合度を上げた。しかし接合後に Q 値が設計近くの値になり、結合度が大きくなり過ぎてしまった。今後の製作時には、RF 測定の手順を改善する。



これらの特性を確認後、SACLA のテストスタンドにて、大電力試験を行った。約 500 時間のコンディショニング運転後、50 MW、2.5  $\mu$ s のクライストロン出力をパルス圧縮しピークで約 350 MW の出力が得られること、この状態で安定して運転ができることを確認した。放電による停止頻度は、60 Hz 運転時で 1 日に数回程度であり問題ない。放電や暗電流による X 線も観測されず、遮蔽壁の外側に置いてよいことが確認された。

また、この試験においては、圧縮器の下流側に、今回の入射ライナックで新たに使用する予定の 3 ポート型分配器と、ベータホール型方向性結合器 (RF ピックアップ) も設置して運転を行った。放電などの問題も無く、350 MW の大電力が通過する場所で使用してもよいことが確認された。

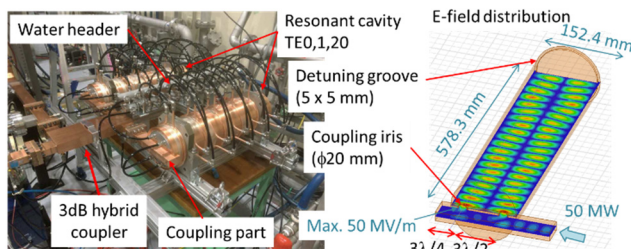


Figure 4: Photograph of the RF pulse compressor prototype (left) and the simulated electrical field distribution (right).

Table 3: RF Parameters of the RF Pulse Compressor

	Design	Measurement
Resonant frequency	5712 MHz	5712.028 MHz
Unloaded Q	190,000	186,000 (98%)
Coupling $\beta$	12	16.5
VSWR	< 1.1	1.04

### 3.2 導波管真空窓の大電力試験

今回の入射ライナックでは、クライストロンの故障時に加速管を窒素置換することなく交換作業を行えるよう、導波管の途中に真空窓を設ける予定である。真空窓としては、KEK の入射器グループで開発されたミックスモード型の真空窓[12]を用いることを考え、大電力試験を行った。大電力試験は、レゾナントリングを用いたものと、クライストロン出力を直接通した場合との 2 種類を行った。レゾナントリングを用いた試験では、RF のパルス幅 1  $\mu$ s で周回電力のピーク値 120 MW までの運転を行い、問題がないことを確認した。次に、真空窓の取り付け位置を変え、クライストロン出力が直接通過する状況で試験を行った。最大出力 50 MW、パルス幅 2.5  $\mu$ s の RF を通過させても問題がないことを確認した。

### 3.3 加速管の大電力試験

加速管は、ディスクロード型進行波加速管[6]とし、空洞数を 114 個に増やしたものとする。RF モードは、位相

進度  $2\pi/3$  の準定電界型で、電場の強いアイリス先端を楕円形状にすることにより表面電場強度を緩和している。SACLA の運転では、加速管の放電頻度で設定加速電場を決めており、RF 電力にはまだ余裕がある。従って、加速管を 10% 伸ばすことにより RF 電力を有効に使用し、クライストロンの本数を減らすことにした。

昨年度、全長 2 m のディスクロード型加速管を 4 本製作した。製作結果は良好で、空洞の周波数は 5712 MHz に一致し、累積移相誤差も  $\pm 3^\circ$  以内に収まっていた。詳細は[13]を参照のこと。このうちの 2 本をテストスタンドに設置し、大電力試験を行った。Figure 5 は、テストスタンド遮蔽室内の光景である。RF パルス圧縮器は、試作機を壁面に取り付けて使用した。加速管や導波管は、RF パルス圧縮器が遮蔽室内であること、導波管真空窓が無いことを除けば、実機の入射ライナックとほぼ同じ構成であり、到達加速電場だけでなく停止頻度や長期安定性も含めた総合的な試験となっている。

試験ではまず、狭いパルス幅で徐々に RF 電力を投入し、その後パルス幅を広げる手順で RF コンディショニングを行った。運転開始から約 1 か月後にパルス幅を 2.5  $\mu$ s まで広げられた。2 か月後の現在は目標の加速電場である 42 MV/m で定常的に運転できるようになった。現在の典型的なパルス波形を Fig. 6 に示す。クライストロンの印加電圧は 330 kV、RF 出力は 41 MW で、RF パルス圧縮後のピーク出力は約 270 MW である。この RF 電力から 5% の導波管ロスを引き、2 本の加速管に RF 電力が投入されたとして、加速管のシャントインピーダンスから加速電場を計算すると、約 42 MV/m となる。放電などによる停止頻度は、60 Hz で運転して 1 日に数回である。入射ライナックとして 1 Hz で運転する分には、問題ない。

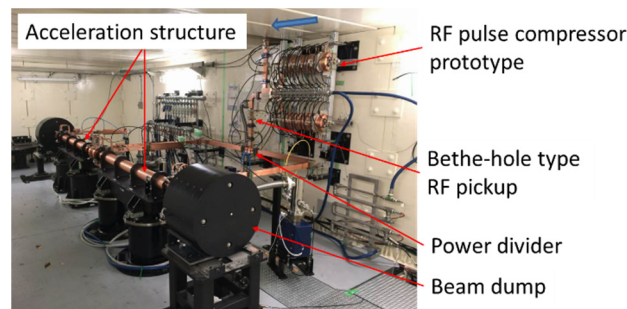


Figure 5: Photograph of the high-power RF test of the acceleration structure.

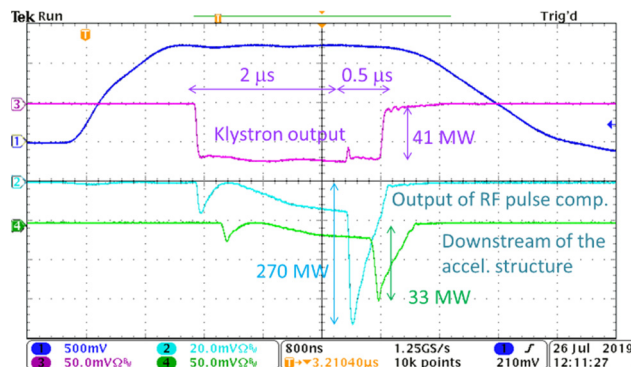


Figure 6: Typical RF waveforms at the high-power test.

### 3.4 ドライバーアンプ

近年、高耐圧高効率の窒化ガリウムを用いた高周波増幅器 (GaN-HEMT: High Electron Mobility Transistor) の発展は目覚ましく、C バンド帯でも数 100 W の出力が得られる素子が入手できるようになった。そこで、この GaN-HEMT 素子を最終段に使い、最大 800 W のパルス出力が得られるドライバーアンプを試作した。アンプの外観写真および入出力特性を Fig. 7 に示す。800 W 近くまで直線性を保ち、ドライバーアンプとしての使用に問題ないことがわかる。アンプは 5 月末より、SACLA の C バンド deflector 空洞用クライストロンに接続し、60 Hz での連続運転試験を行っている。ショット毎の振幅安定性、位相安定性は、従来のドライバーアンプと同程度で問題ない。空冷なのでいくらか室温の変動の影響を受け 0.5° 程度の変動が見られることもあるが、実用上は全く問題ない。今後も運転を続け、長期耐久性、信頼性を確認する予定である。

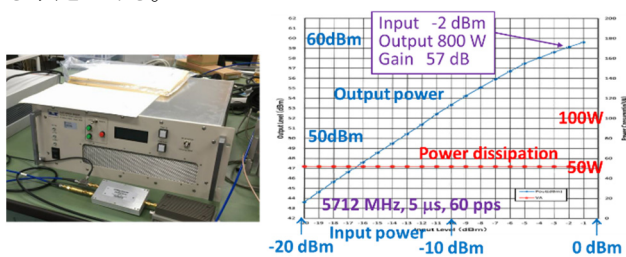


Figure 7: Photograph of the C-band 800 W driver amplifier (left) and the linearity data at the factory test (right).

### 3.5 低電力 RF 系

最近のデジタル制御機器の主流である Micro-TCA.4 規格のモジュールを用い、コンパクトで拡張性の高いシステムを構築することを目指している。RF の変調は IQ 変調方式を用い、250 Ms/s 程度の高速デジタルの DAC からの制御信号を Rear Transition Module (RTM) に入力し Vector Modulator で変調して出力する。また、RF 信号の検出は、RTM でダウンコンバートされた信号を同じデジタルの ADC で測定する。デジタルに搭載された FPGA で信号の処理や補正を行い、またフィードバック動作も高速に行うことができる。Micro-TCA.4 の機器は集積性が高く、1 つのモジュールで 1 ユニット分の変調と検出 (最大 8 channel) を行うことができる。コスト削減のため、この Micro-TCA.4 はクライストロン 2 ユニットに 1 台配置することとし、両脇のクライストロンに対して制御を行う。現在、候補となる複数の機器について、性能の評価試験を行っており、詳細は[14]を参照のこと。Figure 8 に、試験を行っているモジュールの例を示す。

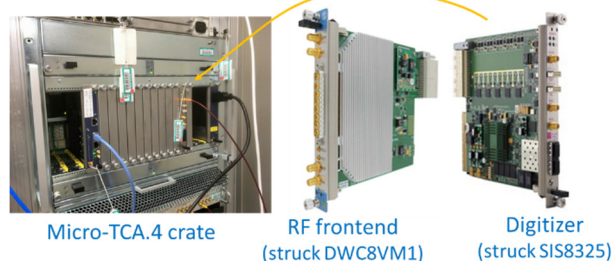


Figure 8: Example of the Micro-TCA.4 modules.

## 4. まとめ

次世代放射光施設の入射ライナックにて、主加速器として使用される C バンド加速器の構成と仕様について検討した。実績のある SACLA のシステムを踏襲しつつも、冷却水の精密温度調節システムを省略し、RF パルス圧縮器、導波管機器やモジュレータ充電電源についても簡素化して、コストを抑えた。RF パルス圧縮器や導波管機器については、大電力試験を行って、大電力でも使用できることを確認した。低電力 RF 系については、Micro-TCA.4 規格のものを新規開発している。クライストロン用ドライバーアンプについても、この機会に GaN-HEMT 素子のものを開発した。こうした機器の開発や試験は順調に進んでおり、建設の障害になるような事項はない。加速器機器の調達も、今年度より開始となる。再来年度の建屋完成、設置開始に向けて、更に細部を検討し、また低電力 RF 系なども試験や調整を重ねてゆく予定である。

## 謝辞

機器開発の多くは、一昨年度までは大竹雄次氏がチームリーダーとして主導されてきました。機器の設計や製作においては、各担当メーカーの方々、特に三菱重工機械システムの重岡氏、日本高周波の相澤氏、奥山氏、三菱電機の東村氏などに、大変お世話になりました。テストスタンドでの大電力試験は、スプリングエイトサービスの運転保守スタッフ、特に渡邊氏、江口氏、益田氏、吉岡氏、田中信一郎氏などに設置から運転まで行っていただきました。これら多くの方々に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] 内海渉, “次世代放射光施設設計画の推進状況”, 第 16 回日本加速器学会年会, 2019 年.
- [2] 西森信行, “3GeV 次世代放射光施設の加速器システム”, 第 16 回日本加速器学会年会, 2019 年.
- [3] T. Ishikawa *et al.*, Nature Photonics 6, 540 (2012).
- [4] T. Inagaki *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams 17, 080702 (2014).
- [5] S. Owada *et al.*, J. Synchrotron Rad. 25, 282-288 (2018).
- [6] T. Sakurai *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams 20, 042003 (2017).
- [7] 安積隆夫, “次世代放射光施設のための 3GeV 線型加速器の基本設計”, 第 16 回日本加速器学会年会, 2019 年.
- [8] 安積隆夫, “グリッド付き熱カソードを用いた低エミッタンス電子銃システムの開発”, 第 16 回日本加速器学会年会, 2019 年.
- [9] T. Hasegawa *et al.*, Proceedings of IPAC'10 (2010).
- [10] 近藤力, “SACLA-BL1 用高精度 PFN 充電器の開発”, 第 13 回日本加速器学会年会, 2016 年.
- [11] M. Yoshida, Ph. D thesis of Univ of Tokyo, Dec 2003
- [12] S. Michizono *et al.*, “Development of C-band high power mix-mode RF window”, proceedings of LINAC 2004 THP58 (2004).
- [13] 比嘉実作, “3GeV 次世代放射光リングのための入射器加速空洞の製造”, 第 16 回日本加速器学会年会, 2019 年.
- [14] 岩井瑛人, “次世代放射光施設入射器における MTCA.4 規格を用いたデジタル LLRF システムの評価”, 第 16 回日本加速器学会年会, 2019 年.