

Nextef2 : KEK における X バンド高電界試験スタンドの再生

NEXTEF2: REBORN X-BAND HIGH-GRADIENT TEST STAND AT KEK

阿部 哲郎^{*,A)}, 明本 光生^{A)}, 佐武 いつか^{A)}, 佐藤 政則^{A)}, 中島 啓光^{A)},
夏井 拓也^{A)}, 東 保男^{A)}, 肥後 壽泰^{A)}, 松本 修二^{A)}, 工藤 拓弥^{B)}

Tetsuo Abe^{*,A)}, Mitsuo Akemoto^{A)}, Itsuka Satake^{A)}, Masanori Satoh^{A)}, Hiromitsu Nakajima^{A)},
Takuya Natsui^{A)}, Yasuo Higashi^{A)}, Toshiyasu Higo^{A)}, Shuji Matsumoto^{A)}, Takuya Kudou^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{B)} MITSUBISHI ELECTRIC SYSTEM & SERVICE CO.,LTD.

Abstract

Overcoming the difficulties of the fire, the X-band (11.4 GHz) high-gradient test facility at KEK has been reborn into Nextef2. Rebuilding the safer and simpler system, we have started high-power test operation up to 14 MW, where our current target is 30 MW. We report the recent history and status.

1. はじめに

常伝導加速構造で高い加速周波数を採用することにより、加速器の小型化と高い加速効率を実現できる。加速構造の製作実績、大電力高周波源や大電力用パーツの入手性を考えると、高エネルギー高周波加速器の現実的加速周波数帯は(現時点では) X バンドであろう。KEK で X バンド (11.4 GHz) 高電界加速管の本格的な開発が始まったのは、1990 年代の Global Linear Collider (GLC) の時代である [1]。2007 年から 2019 年にかけては、欧州の常伝導リニアコライダー計画 CLIC [2] 用の高電界加速管を CERN-SLAC-KEK の 3 極国際共同体制で開発した。最終的な成果としては、リニアコライダーで要求される高い安定度(真空放電起因のブレイクダウン率が 3×10^{-7} /pulse/m 以下)にて 100 MV/m の高い加速勾配を立てることができる加速管の開発に成功した [3]。

KEK の X バンド高電界試験施設 Nextef (New X-band Test Facility) は、GLCTA (Global Linear Collider Test Accelerator) の資産と経験を受け継ぎ、CLIC 用高電界加速管の共同開発研究を通して成熟した。数十メガワット級の X バンド加速構造試験施設としては国内で唯一である。ところが、CLIC 用加速管の共同開発研究の終了間際の 2019 年 4 月、Nextef で大きな火災が発生してしまった。それまで構築してきたハードウェアの半分以上を失ったが、蓄積した知識と経験、そして志を糧に、火災前の Nextef (Nextef1) は Nextef2 として生まれ変わった (Nextef1 と 2 を総称して Nextef と呼ぶことにした)。Nextef2 では、高エネルギー志向を維持しつつも、小型加速器向けの応用加速器の展開という新機軸を設けた。病院の一室に入るような小型放射線治療装置や、大型インフラの深部における不具合を現地で透視できる可搬型(小型)高エネルギー・リナックなどは、X バンド加速器の適した応用例である。

2. 火災

当時の Nextef1 はフル稼働中で、2 台の X バンド用高電圧パルス電源(モジュレータ)の内の 1 台が火災で激しく焼損した。火災の原因は、プラスチック筐体の充電コンデンサの破裂・発火(または引火)と結論づけている。焼損したモジュレータの写真を Fig. 1 に示す。本稿では火災に関する詳細については述べないが、この苦い経験を Nextef2 に活かすことは必須である。



Figure 1: Bird's-eye view (left) and inside (right) of the burnt modulator at Nextef1 (April 2019).

Nextef の設置されている試験エリアは加速管組立室と呼ばれ、約 12 m × 16 m の広さがある。焼損したモジュレータから発生した煤により、加速管組立室内にあったすべての装置・物品は致命的なダメージを受けた。我々は約 2 ヶ月をかけて、加速管組立室内にあった全ての装置・物品を搬出し、その大部分を廃棄した。その後、専門業者により、加速管組立室内部全体の汚染回復洗浄が行われた。加速管組立室が試験エリアとして再建可能な状態になるまで、火災発生から 1 年近くかかった。その後、冷却水配管や各種ケーブル敷設、放射線安全システムなどのインフラ復旧に約半年かかった。さらにその後、Nextef2 の安全対策と大電力高周波源の復旧に約 1 年、モジュレータの立ち上げ試験・調整に約半年かかった。火災発生から X バンドの大電力高周波を再度出せるようになるまで、約 3 年もかかったことになる。

* tetsuo.abe@kek.jp

3. モジュールの改造

Nextef1 時代に使用していた 2 台のモジュールの内の 1 台は火災で焼失したが、もう 1 台は火災のあった加速管組立室の隣のアセンブリホールに設置してあったため、直接の被害はなかった。Nextef2 ではそのモジュールを再利用するため、まず内部の清掃後、充電コンデンサを交換した。ここで、これまで使用してきたプラスチック筐体の充電コンデンサを使用することもできたが、火災の原因がその破裂にあると結論づけているため、破裂しない金属筐体のコンデンサに全数交換した。その際、コンデンサ内の設計電位傾度を下げた (52.8 → 49.8 V/μm @ 38 kV 充電電圧)。しかし、金属筐体でも、長期間使用しているとコンデンサ内の圧力が上昇して、強度の弱い接合箇所から絶縁油が漏れることは原理的に避けられない。そこで、より高い安全性を確保する試みとして、モジュール自体に消火器を導入する改造を行った。米国 SLAC 国立加速器研究所では、消火器を導入した X バンド用モジュールを長年使用しているので、我々は SLAC へ行って、その担当者から直接詳しい話を聞いた。SLAC の X バンド用モジュールの高圧部筐体は 2 つの筐体に分かれており、一方 (筐体 A) には最も発熱量の多い抵抗体を、他方 (筐体 B) には最も可燃物の多い充電コンデンサ (プラスチック筐体) が入っている。筐体 A では、外気を取り入れて抵抗体を強力に風冷している。一方、筐体 B では密閉度を高めて外界とは遮断して、内部循環方式で軽く風冷している。筐体 B には外部から細い管が入っており、そこを通して内部の空気を少しずつピックアップして、それを煙検知器 (商品名: VESDA) に入れている。筐体 B には別の太い管も入っており、VESDA で検知した煙の濃度がある閾値を超えると、その管を通して消火剤である炭酸ガスを一気に投入し、内部が酸欠となって自動的に消火する仕組みになっている。VESDA は総散乱方式の高感度煙検知器である上、筐体 B の密閉度が高いので、わずかな煙でも検出可能である。

Nextef の X バンド用モジュールの高圧部筐体は、SLAC のように二つには分かれておらず、筐体上面にある巨大ファン群で (充電コンデンサと抵抗体を含む) 筐体内部全体を強力に風冷する仕組みになっている。また、外気を取り入れるためのスロットが、筐体下部の随所に空いている。このような事情から、SLAC の X バンド用モジュールと同じような構造に改造することは現実的でないかと判断した。そこで、Fig. 2 にあるように、充電コンデンサをマウントした架台の周りを難燃性の板で囲うことにより、SLAC の筐体 B を模擬した。そして、その囲いの内部は別途内部循環方式で風冷し、また、VESDA へのピックアップ管と消火剤の投入管を設けた。消火剤としては、人体への影響と地球温暖化係数を考慮して、二酸化炭素 (8%)、窒素 (52%)、アルゴン (40%) の不活性ガス混合気体 (IG-541) を採用した。このような囲いを用いる方式は初めてであるため、実際に消火剤を噴射して、筐体内部の酸素濃度の変化を

測定する実験を行った。その結果、その酸素濃度は、消火の目安となる 15%¹ を十分下回ることを確認できた。VESDA の発報閾値は 2 段階ある。低い方の煙濃度閾値は (現時点では) 0.1%/m (減光率で表す) に設定してあり、これを超えるとモジュールの高圧がオフになる (低圧はオンのままで、消火剤は噴射されない)。一方、高い方の閾値は 2%/m に設定してあり、これを超えると、モジュールの低圧オフと筐体上面にある巨大ファン群の停止を行った上で、消火剤が噴射・投入されるシーケンスとなっている。尚、住宅用火災警報器の発報煙濃度は 10%/m である。

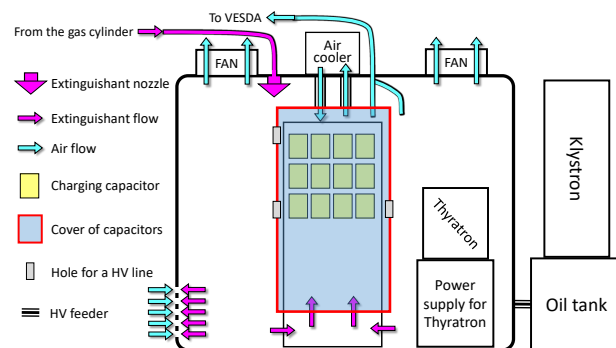


Figure 2: Schematic diagram of the high-voltage (HV) part of the high-power RF source for Nextef2.

Nextef2 用モジュールの仕様を Table 1 に示す。

Table 1: Specification of the modulator for Nextef2

Output voltage range	5 to 23 kV
Output current (max)	7.85 kA
Pulse width	4.5 μs
Output impedance	3.06 Ω
Repetition rate (max)	50 Hz

Table 2: Specification of the X-band klystron for Nextef2

Frequency	11.424 GHz
Peak power	50 MW
Pulse width	400 ns
Cathode voltage	500 kV
Cathode current	250 A
Perveance	0.8 μP
Efficiency	~50 %
Gain	~50 dB
Main focus	PPM

¹ 大気中の酸素濃度は約 21 % である。

4. RF 大電力ライン

Nextefで保有するXバンド・クライストロンの球は、GLCTAから受け継いだ3本のみである。その仕様をTable 2に示す。先の火災で、その内の1本が真空リークを起こしたが、残りの2本に真空リークは無く、また、低圧エミッション試験で十分なエミッションをとれることが確認できた。GLC向けに開発された大電力高周波源システムでは、1台のモジュレータが2台のクライストロンをドライブする方式になっている。しかし、復旧予算の都合で、クライストロン1本のみをドライブする形でNextef2が始まることになった。1台のクライストロンにはRF出力ポートが2本あり、それら2つの出力を3dBハイブリッド・カプラで合成している。そして、約16mの導波管系を通して、高電界試験を行う小部屋（「シールドB」と呼んでいる）内まで大電力RFを送る立体回路を構築した（Fig. 3参照）。ここで、当該3dBハイブリッド・カプラの合成出力ポートのすぐ下流からシールドB内まで、円形導波管（WC-40）を用いた。通常の銅製WR-90矩形導波管（内断面積： $22.86 \times 10.16 \text{ mm}^2$ ）内の伝送モード（ TE_{10} ）では2%/m強ものRF電力を高周波表皮抵抗により失うのに対して、同じく銅製のWC-40円形導波管（内径：40mm）の伝送モード（ TE_{01} ）では0.8%/m程度の損失で済む。

Figure 4(a)は、本RF大電力ラインのSパラメータ測定値である。3dBハイブリッド・カプラの合成出力ポート（WR-90）、すなわち上流側のモード変換器の入口をポート1とし、シールドB内にある下流側のモード変換器の出力ポート（WR-90）をポート2として、ネットワークアナライザを使って測定した。一目でわかるように、多数のレゾナンスがある。一方、Fig. 4(b)の青色プロットは、CST STUDIO SUITE [4]を使って、本RF大電力ラインを設計値通りにシミュレーションした結果である。細かい構造や大きさに違いはあるものの、多数のレゾナンスがある状況は測定値と似ている。Figure 4(b)の緑色プロットは、下流側のモード変換器を除いた、つまり、円形導波管端をポート2とした場合のシミュレーション結果である。そのようにすると、レゾナンスがかなり無くなるのがわかる。Figure 5は、円形導波管のバンドを渡るたびに、どのようなモードが発生するかを示したシミュレーション結果である。ここで、WC-40円形導波管内の12GHz以下の伝搬モードは10個あり、RF電力の伝送に使用する TE_{01} モードは、（周波数の低い方から）6番目である。つまり、円形導波管はシングルモードでは使えないことに注意が必要である。Figure 5が示すことは、バンドで発生する寄生モードは、バンドを渡るたびに多くなっていくということである。そして、それら寄生モードは、円形導波管のバンドを通りにくく、また、モード変換器では殆ど変換されず反射する。つまり、現状のRF大電力ラインは、大きな（長い）共振器となっている。なるべく低損失になるように、そして、現場の状況によく合わせるために7箇所円形導波管バンドを用いたが、それが裏目に出た結果である。周波

数によっては、リターン損失が15dB程度（VSWRで1.4程度）と大きいので、大きなRF電力を通すためには、このレゾナンスの問題を解決する必要がある。現在は比較的反射の小さい周波数で運転しているが、抜本的解決法も検討中である。

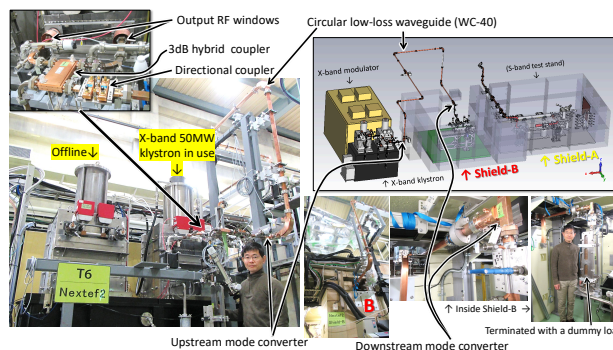


Figure 3: Photographs and 3D drawing of the high-power RF transmission line.

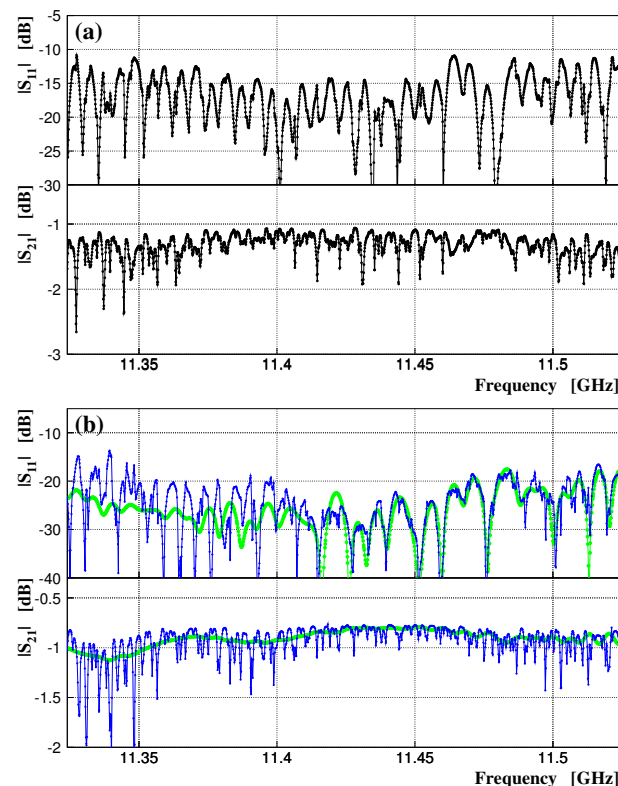


Figure 4: S-parameters of the high-power RF transmission line for a frequency range of $11.424 \text{ GHz} \pm 100 \text{ MHz}$. (a) Measurements. (b) Simulation results for the full model (blue) and the model without the downstream mode converter (green).

5. LLRF

今後のさまざまな展開を見据えて、シンプルな構成をコンセプトに再構築した。尚、Nextefで使用し

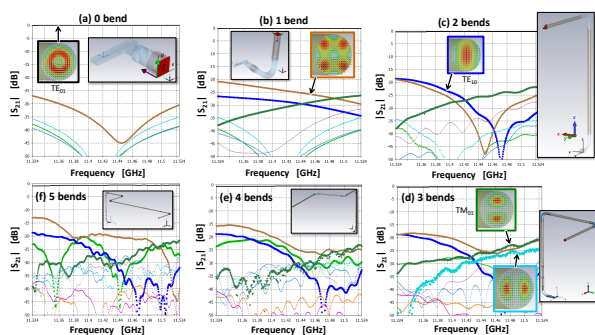


Figure 5: Transmission coefficient (S_{21}) for (a) the mode converter only, with (b) one, (c) two, (d) three, (e) four, or (f) five bends serially mounted to the mode converter. The black plots are results for the transmission mode of TE_{01} at the port 2, and others are parasitic modes.

てきているクライストロンのビーム収束用磁界は主に永久磁石 (Periodic Permanent Magnet: PPM) で発生させているため、低い充電電圧ではビームが通らない。そこで、Nextef では、(充電電圧ではなく) クライストロンへの入力 RF 電力のレベルを変えて、クライストロンの出力レベルを制御している。

5.1 ハードウェア

RF 制御の流れを Fig. 6 に示す。ハードウェアの殆どは、GLCTA や Nextef1 から受け継いだ、よりシンプルな構成のコンセプトを実現するため、いくつかの機器は新規購入した。例えば、Nextef1 でのタイミングパルスは、まずラインシンク・モジュールでひとつ発生させ、それから FANOUT や遅延モジュールを使って様々なタイミングを作っていた。一方、Nextef2 では、1 台のパルスジェネレータ (BNC Model 577) で三つの異なるタイミングパルスを生成しているので、遅延モジュールは使っていない。その三つのタイミングパルスの内、最も早いものは内部クロックに同期させ、次のパルスは最初のパルスから相対的に数 μs 遅延させて発生させ、さらに最後のパルスは、2 番目のパルスに対して相対的に $1 \mu\text{s}$ 遅延させている。これで、クライストロン入力のタイミングが、カソード電圧最高値付近になる。もし、モジュレータのサイクロンを交換した場合は、最初と 2 番目のパルス間の相対的タイミング (現時点では $6 \mu\text{s}$ 遅延) を変えるだけでよいので、(Nextef1 の時と比べて) 調整が容易になった。クライストロンへの入力 RF 電力レベルの制御に関しては、これまで通り RF 振幅変調器を使っているが、それに内蔵されている PIN アッテネータのダイナミックレンジを大幅に広げた。Nextef1 では 20dB であったが、Nextef2 では 50dB レンジを持つ PIN アッテネータを内蔵したモジュールを新規製作した。これにより、低い RF 電力から高い RF 電力まで一貫して制御できるようになった。

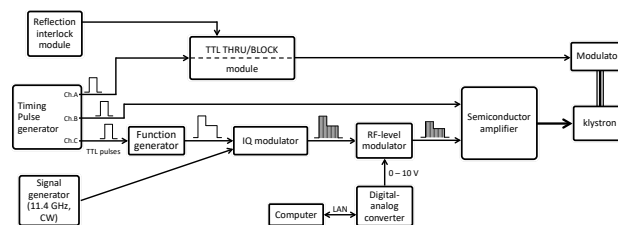


Figure 6: Conceptual diagram of the LLRF hardware configuration.

5.2 ソフトウェア

EPICS [5] をベースとした新たなシステムを構築した。Nextef1 では、人間が直接操作する制御ソフトウェア内で (VISA 等を使って) 直接ハードウェアを制御していた。そのようなやり方では、ハードウェアに近い下位の要素 (要素 A) と、人間に近い上位の要素 (要素 B) が混在し、メンテナンス性が悪いと感じていた。そこで、Nextef2 では、Fig. 7 にあるように、要素 A と B を切り分けるコンセプトでシステムを構築した。Figure 7 の左部が要素 A で、ハードウェア制御に精通した者が製作・保守するが、一旦完成すれば、更新頻度は低い。一方、Fig. 7 の右部の要素 B では、実際にこのテストスタンドを動かす者 (必ずしもハードウェアに詳しくない) が試験内容に合わせて運転制御ソフトウェアを頻繁かつ容易に更新できる。

EPICS で扱う重要な測定値や設定値は、Archiver Appliance を使って常時保存している。特に各種設定値の保存は、後に当時の運転状態を調べたい時に役立つ。

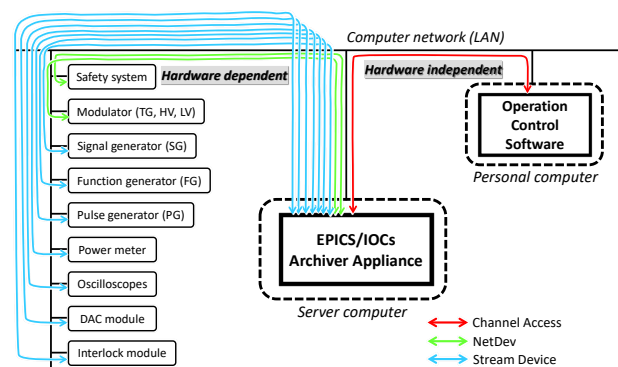


Figure 7: Conceptual diagram of the LLRF software configuration.

6. 運転制御ソフトウェア

前節で説明したように、運転制御ソフトウェアは上位概念だけで構成できる。コードとしては、EPICS の Channel Access (CA) が使えればよく、言語としてよく使われているのは Python や SAD [6] (KEK の場合) であるが、Nextef2 では (製作者の趣味もあり) Fortran2008 でコーディングした。現代的 Fortran か

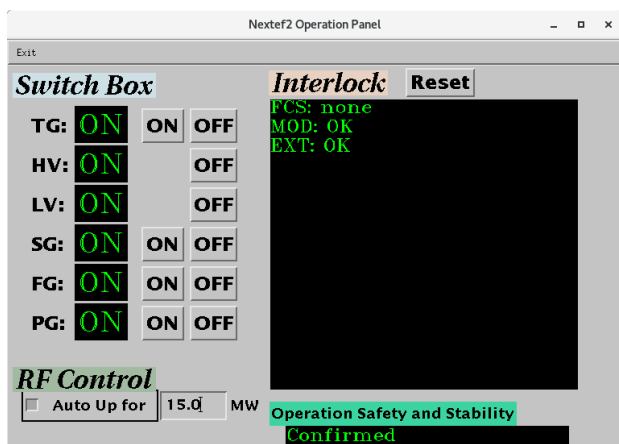


Figure 8: Operation panel during the stable operation (July 28, 2022).

ら CA ライブラリを呼ぶインターフェイスは自作した²。グラフィックスに関しては、DISLIN ライブラリ [7] を用いた。Figure 8 に、現時点の運転制御パネルを示す。先の火災の教訓から、モジュレータの低圧 (LV) や高圧 (HV) をオンするスイッチは運転制御パネルにはなく、モジュレータの筐体にはめ込まれている物理的制御パネル上でのみオンできるように変更した。ただし、火災や地震などの非常時には、遠隔から LV や HV を即座にオフする必要性はあるので、インターロック機能を使ってオフするボタンを設けた。また、高圧をオンした後の最初の運転開始後は、60 秒間の安全・安定な運転を確認する期間を設けており、それを終えた後に、最終確認のための物理的ボタン (モジュレータのある現場に 1 個ある) を押すよう運転制御パネル右下にメッセージが出る。そのボタンを 30 秒以内に押さないと、運転が自動的に停止する仕組みになっている。つまり、現場で運転を開始して、すぐに現場を離れてしまうと、60+30=90 秒後に運転は自動停止する。これは、運転を開始してしばらくは (現時点では 60 秒間)、安全かつ安定な運転かどうかをオペレータが現場で確認することを常に思い出させるための仕組みである。

7. 大電力試運転

大電力試運転の状況の例を Fig. 9 に示す。各コンポーネントの健全性や、上述の機能の動作を確認しつつ、本稿執筆の時点では、パルス幅: 100 ns、パルス繰り返し: 50 Hz で 14 MW の RF 電力まで到達した。Nextef2 で高電界試験を開始する段階での目標は 30 MW である。

8. まとめ

KEK の X バンド高電界試験施設は Nextef2 として再スタートをきった。Nextef1 と火災での経験を基に、より安全かつシンプルなシステムとなっている。

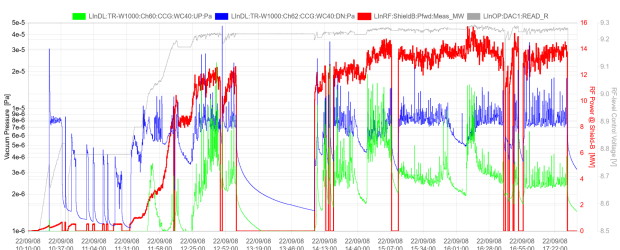


Figure 9: Example of the high-power test operation, showing the data retrieved from Archiver Appliance. The red line indicates the peak RF power measured near the dummy load at the end of the high-power RF transmission line. The blue and green lines indicate the vacuum pressures at the most downstream (i.e., near the dummy load) and upstream (i.e., near the klystron) WC-40 waveguides, respectively. The gray line indicates the control voltage (0 to 10 V) for the RF level of the klystron input sent from the digital-analog converter (DAC) to the RF-level modulator, which is computer controlled so that the maximum vacuum pressure should be lower than a specified value (currently 1×10^{-5} Pa).

現在は、目標の RF 出力 30 MW を目指して試運転中である。

今後、さまざまな高電界試験を行い、X バンド加速器の大きな展開を図る。

謝辞

火災からの復旧において、さまざまな方々のご理解とご協力をいただきました。特に、当時の神谷理事、山口加速器施設長、古川加速器第五研究系主幹、日下田資産マネジメント室長には多大なご支援をいただきました。また、電子陽電子入射器グループの皆様には、さまざまな形でご支援・ご協力をいただきました。

Fortran2008 の EPICS/CA ライブラリへのインターフェイスに関しては、森田昭夫氏 (KEK 加速器) の助言をいただきました。

これまで関係してきた皆様にお礼申し上げます。

参考文献

- [1] J. Wang and T. Higo, "Accelerator Structure Development for NLC / GLC", ICFA Beam Dyn. Newslett. **32**, 27-46 (2003), SLAC-PUB-10370.
- [2] M. Aicheler *et al.*, "A Multi-TeV Linear Collider Based on CLIC Technology: CLIC Conceptual Design Report", CERN-2012-007, SLAC-R-985, KEK-Report-2012-1, PSI-12-01, JAI-2012-001 (2012).
- [3] 阿部 哲郎, "常伝導高電界加速研究の最前線", 高エネルギーニュース Vol.36 No.4 pp. 168-179, 2018.
- [4] <https://www.3ds.com/ja/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>
- [5] <https://epics.anl.gov/>
- [6] <https://acc-physics.kek.jp/SAD/>
- [7] <https://www.dislin.de/>

² Fortran2008 仕様のみを使い、かつ Bind(C) で実現した。