

## KEK 電子陽電子入射器での ScandiNova K-300 モジュレータのテスト

### HIGH POWER TEST OF ScandiNova K-300 MODULATOR IN KEKB INJECTOR LINAC

松本修二<sup>#</sup>, 設楽暁, 東保男, 中島啓光, 設楽哲夫, 夏井拓也, 竹中たてる, 恵郷博文  
Shuji Matsumoto<sup>#</sup>, Satoru Shitara, Yasuo Higashi, Hiromitsu Nakajima, Tetsuo Shidara, Takuya Natsui,  
Tateru Takenaka, Hiroyasu Ego  
Accelerator Lab., KEK

#### Abstract

High-power tests were conducted on the ScandiNova K-300 modulator in the klystron test hall of the KEK electron-positron injector. The E3730A (a 50 MW S-band klystron manufactured by Canon Electron Tube Devices Co., Ltd.) used in the injector was installed to evaluate the performance of the K-300 when it is installed in the injector. This report summarizes and reports the results of the tests conducted from spring to autumn 2024.

#### 1. はじめに

KEK 電子陽電子入射器は、1982 年以来 KEK つくばキャンパスにて稼働中の高エネルギー電子線形加速器で、現在は電子/陽電子 7 GeV/4 GeV まで加速でき、加速したビームを衝突型蓄積リング SuperKEKB や放射光源 PF および PF-AR に供給している [1]。この加速器は

- S-band (2856 MHz. 熱電子銃入射部以外すべて。)
- 1 つの RF ユニットの、モジュレータ 1 台+クライストロン 1 台にて 4 本の 2 m 進行波加速管に S バンドマイクロ波を供給(E gain =160 MV/unit)。
- 各モジュレータは Pulse Forming Network (PFN)回路と充電器、および Thyatron スイッチを内蔵しておりパルス出力によりクライストロンを駆動(operate at most 40 MW 4  $\mu$ s. 管種は E3730A& PV3050)。
- PFN 最大充電 45 kV、パルス繰り返し 50 Hz。PFN 出力パルス幅は 5.6  $\mu$ s でクライストロンにより RF 増幅する Flat top 部の幅は 4  $\mu$ s。

のような RF ユニットの持つ。入射器にはこのような加速ユニットが 60 台ある。モジュレータ出力の安定性は

- Timing jitter (Thyatron) ~ 10 ns or less
- Peak voltage fluctuation, pulse-to pulse <0.2 %
- Peak voltage fluctuation, <0.5 %/ Hr
- Pulse flatness <0.3%(p-p over 4 $\mu$ s)

のような仕様値を持つ。

近年の入射器 RF ユニットの懸念事項として、まず Thyatron 価格上昇と長納期化がある。入射器での Thyatron の平均寿命はおむね 30 kHr である。これまで毎年 5 から 10 台程度を調達してきたが、近年の価格上昇は、次第に予算を圧迫しつつあることは否めない。また RF ユニットの構成する各種機器でのトラブル発生や、保守部品の入手困難にも遭遇し始めた。これらは運転開始以来すでに 40 年以上経過していることによる機器老朽化や陳腐化、寿命等の影響が考えられる。

以上のような背景の下、近年の電子管電源の半導体化の傾向も考えあわせ、KEK 電子陽電子入射器内のクライストロンテストホールにて ScandiNova 社製 K-300 モジュレータ[2]の高電力試験を行なうこととなった。試験は将来の置き換え計画の検討として行なうので、電源負荷としては入射器で現在使用している E3730A(キャノン電子管デバイス社製 50 MW S バンドクライストロン)を装荷した。2023 年秋から準備し 2024 年春から秋にかけて性能評価試験を行った。

さてモジュレータの入射器クライストロンギャラリーでの配置状況の検討用にかかれた 3D 図 (Fig. 1) を見てみると、現行モジュレータからの K-300 への置き換えは物理的に可能なだけでなく、むしろ設置スペースは置き換えにより節約されそうなのがわかる。

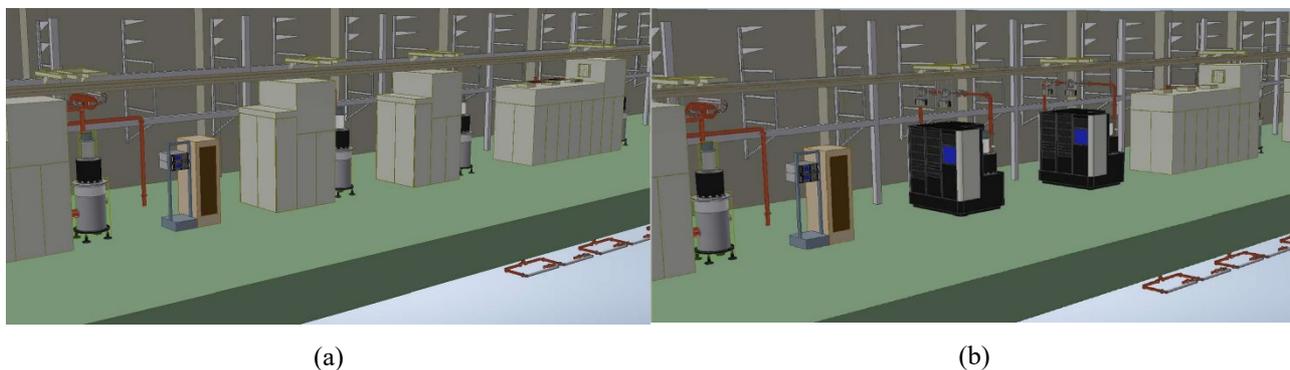


Figure 1: Status of the modulator arrangement for the electron-positron injector: Current (a) and K-300 adaptation (b).

<sup>#</sup> shuji.matsumoto@kek.jp

ところで、入射器クライストロンギャラリーの電気設備をなるべく改造なくそのまま利用できるためには、K-300 の電氣的仕様を入射器の現行モジュレータに合わせる必要がある。RF ユニット 1 台ごとに1つ設置されている配電盤の最大供給可能な電気容量は重要なパラメータになる。K-300 稼働時に必要な冷却水量は現在のもので足りているので、少なくとも既存の冷却水設備の大幅な改造は必要ないであろう。

## 2. 試験

Table 1: Test History

2023.10	KEK 入射器棟に搬入。
2023.11	組み立て後 SAT (Site Acceptance Test)。クライストロン装荷、ダイオードテスト。SAT パス。
2024.02	RF 運転開始。性能確認。
2024.04	パルストランス TAP 切り替え。58 ⇒64。クライストロン出力 >40 MW peak の確認。
2024.05-.10	長期 RUN。

今回の試験の履歴を表1にまとめた。今回は使用するクライストロンを KEK からスウェーデンに送付しての ScandiNova 社での出荷前出力試験を省いた。

### 2.1 SAT (Site Acceptance Test)

K-300 搬入後に電子陽電子入射器棟内にて組み立て作業を行なった。入射器手持ちの予備クライストロン (E3730A:入射器ですでに運転していたもの)を装荷し、給電配線と冷却水供給口との接続を行ない、まずダイオード (RF 入力なし)にて通電した。4 時間の連続運転時に記録された高圧波形は Fig. 2 を参照。

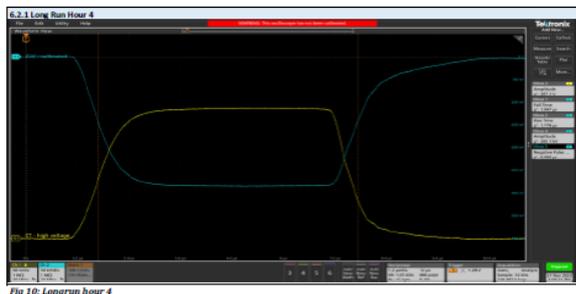


Figure 2: Waveforms (final) monitored at SAT. Yellow: CT, Blue: CCVD. Nov. 21, 2023.

SAT の結果をまとめると、

- Diode test (E3730A 280 kV 50 pps, 4 Hrs) done.
- Confirm Flat top 1.5 %
- Pearveance measured was 1.9
- while it is 2.1 in the inspection reports by Canon, reconfirmed by the test in KEK also.

### 2.2 RF 運転

SAT の結果では、パービアンスのモニター値がクライストロンの試験成績書および KEK での受け入れ試験時の値とは異なり、この不一致の原因は不明であった (原因調査のためにクライストロンを同型の新品に置き換えたが、パービアンスの不一致は解消されなかった)。この件にもかかわらず RF の出力試験の準備を開始しクライストロンの出力導波管を既存の加速管試験施設への導波管系へ接続した (ダミーロードで終端されている)。

RF を出力すると直ちにクライストロン出力が K-300 の示すカソード電圧モニター値に誤差 ( $\sim +6\%$ ) があることが判明した。クライストロン出力を  $\sim 40$  MW とした状況の確認を優先することとし、K-300 のパルストランス 2 次側取り出し端子を切り替えることで充電電圧を変更せずカソード電圧を上げることとした。この切り替え作業を実施した (Fig. 3)。

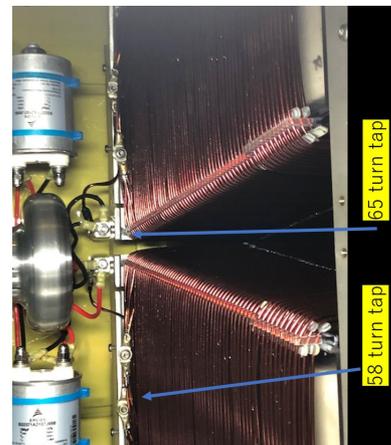


Figure 3: Switch tap58 to 65.

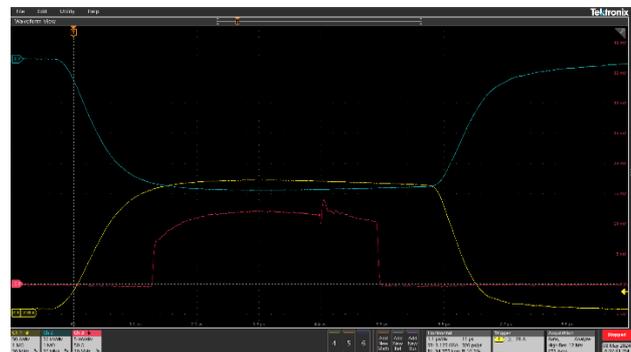


Figure 4: Waveforms /w RF. Yellow: CT, Blue: CCVD, Red: RF KLY OUT. May 08, 2024.

電力ロスを回避するため 36 個装着されている波形調整のための回路をすべて切り離した。これにより RF peak power > 40 MW とできることを確認したが、波形調整 (フラットトップの平坦度) や立ち上がり立下りは犠牲になってしまった (Fig. 4)。波形調整に関しては今後の課題である。Figure 5 はこの時の試験の様子である。KEK の試験で使用した K-300 機はスイッチユニットが 6 台装荷

されていた。なおスイッチユニットを 8 台に増強した同型別機の試験では、波形その他の性能を維持しつつクライストロンからの出力を 40 MW 以上に確保できたとのことである[3]。



Figure 5: K-300 running at KEK Injector test hall. Achieving 40MW RF peak output power, Apr. 17, 2024.

### 2.3 長期運転

Tap 調整後に長期運転を実施した。2024 年 5 月より開始し、7 月から 9 月の夏メンテ期間を挟んで 10 月まで、おおよその積算時間は 2 kHr となる。この間 KEK インフラ(分電盤)の NFB TRIP 以外には、重大なトラブルに起因する運転停止はおこらなかった。ノイズ環境の変化による機器の動作異常等も見られなかった(周辺の機器の動作異常も含めて)。

NFB TRIP 事象については、試験をおこなった K-300 電源を最大定格で動かした際の必要な AC 電力が大きくなりすぎてブレーカがトリップしたもので、コンデンサバンクへの充電電圧を下げることで対処した。最適に調整された場合での所要電力量は、今後詳細な調査が必要である。

### 3. まとめと課題

今回、K-300 を試験する機会をいただき実際にクライストロンを装荷した試験を行なったことはよい経験であつ

た。今後の展開次第でもあるが、今回得られた様々な知見は、将来の導入時には役に立つであろう。

今回は、1 台のみの試験運転であったので、運転の制御は実質いわゆる LOCAL モードでおこなわれた。入射器には 60 台の RF ユニットがあるので、リモート制御が前提となるわけで入射器の制御システムとの親和性は今後の課題である。

スイッチにサイラトロンを使わない電源であるので、電源動作時に周辺への問題となるような電磁ノイズの放出はなかったと思われる。ちなみに現状の電源ではサイラトロンからのノイズに起因する周辺機器の動作不良は時折みられるので(その都度サイラトロンのリザーバ等を調整する)、この点でより安定な機器動作への期待が持てた。

半導体スイッチ (IGBT 等) を使用するためであろうがパルス毎の電圧変動はカタログ通りにかなり小さいことが確認された。

例年入射器では PFN 等高圧部品の清掃が重要なメンテナンス項目となっている。気中に数 10 kV の高圧回路が設置されている関係上どうしてもすす汚れがついてしまうようである。半導体スイッチを使う電源では発生する電圧が 1 桁低くなるので、メンテナンス作業の負担が低減されることになればよろこばしい。

### 謝辞

試験には ScandiNova 社に多大な協力をいただきました。同社日本法人 湯城 磨氏はじめの関係者の方々に感謝いたします。

### 参考文献

- [1] H. Ego *et. al.*, “KEK 電子陽電子入射器アップグレードによるビーム入射性能向上”, PASJ2025, THP004, Tokyo, Japan, Aug. 2025, these proceedings.
- [2] O. Yushiro, M. Lindholm, “スカンジノバ・システムズの加速器関連技術への貢献”, PASJ2025, WEP062, Tokyo, Japan, Aug. 2025, these proceedings, <https://scandinovasystems.com>
- [3] O. Yushiro, Private Communication.