

# KEK 電子陽電子入射器の共振充電型クライストロン電源 De-Q'ing コントローラへのデジタルインターフェースの導入

## DIGITAL INTERFACE MODULE FOR DE-Q'ING CONTROLLER OF THE RESONANT CHARGING TYPE KLYSTRON MODULATOR AT THE KEK e-/e+ INJECTOR LINAC

三浦孝子<sup>#, A, B)</sup>, 中島啓光<sup>A)</sup>, 夏井拓也<sup>A, B)</sup>, 松本利広<sup>A, B)</sup>, 松本修二<sup>A)</sup>, 東福知之<sup>C)</sup>, 草野史郎<sup>C)</sup>  
Takako Miura<sup>#, A, B)</sup>, Hiromitsu Nakajima<sup>A)</sup>, Takuya Natsui<sup>A, B)</sup>, Toshihiro Matsumoto<sup>A, B)</sup>, Shuji Matsumoto<sup>A)</sup>,  
Tomoyuki Toufuku<sup>C)</sup>, Shiro Kusano<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Institute (KEK)

<sup>B)</sup> The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI

<sup>C)</sup> Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd.

### Abstract

At the KEK e-/e+ injector LINAC, it has previously confirmed that switching the voltage setting of the resonant charging-type klystron power supply from remote control to local control improved the beam energy jitter. Under remote control, the voltage setting is regulated by analog-level signals from an external module, which is considered susceptible to noise. Therefore, a LAN interface was introduced to directly set digital values to the De-Q'ing controller of the power supply. This presentation reports on the stabilization of the power supply voltage achieved through the implementation of the digital interface.

### 1. はじめに

KEK 電子陽電子入射器 [1] は、SuperKEKB HER/LER や光源加速器 PF-R、PF-AR の4つのリング型加速器へビームを供給する線形加速器である。特に SuperKEKB リングには、高品質なビームが求められており、高い RF 安定度が要求されている。入射器は、Fig.1 のように A-C、1-5 の全 8 セクターに分けられており、高周波源として約 60 台の大電力 S バンドクライストロンが使用されている。クライストロンの仕様は周波数 2856 MHz、ピーク出力 40 MW、RF パルス幅 4  $\mu$ s、繰り返し 50 pps である。RF の位相や振幅ドリフトについては、RF 位相フィードバックやビームのエネルギーフィードバックなどで補正が可能であるが、パルス毎の RF ジッターについては補正が困難であるため、ジッターの低減が重要である。クライストロンは、RF 振幅の飽和点付近で運転されており、RF ジッターの要因としては、クライストロンパルス電源の電圧ジッターによるものが大きい。

クライストロンパルス電源には、共振充電型[2]とインバータ型[3]の 2 種類がある。入射器上流側では、Fig.2 に示すような共振充電型が多く使われている。電圧設定をスタディのために一時的にリモート制御からローカル制御に切り替えた際、J-ARC と呼ばれるアークセクションでビームのエネルギージッターの改善が確認された。リモート制御では、外部モジュールからアナログレベル信号で電圧設定を制御しているためにノイズの影響を受けやすいと考え、電源の De-Q'ing コントローラに対して、デジタル値を直接与えるためのインターフェースを導入した。本稿では、デジタルインターフェース導入による電源電圧安定化とビームのエネルギージッターへの効果について報告する。

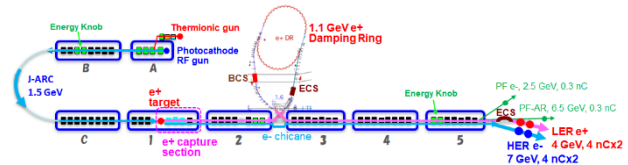


Figure 1: Layout of KEK e-/e+ injector LINAC.

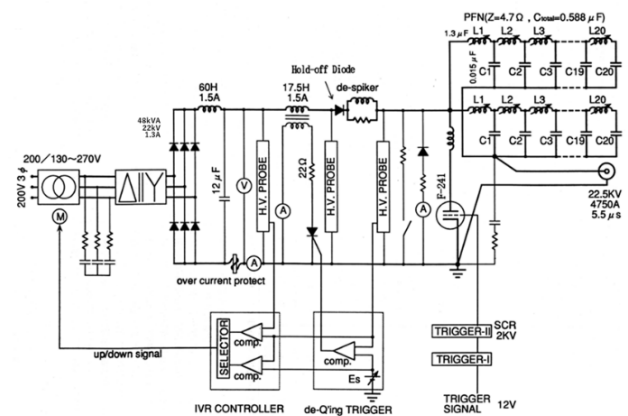


Figure 2: Resonant charging circuit for PFN [2].

### 2. DeQ コントローラ LAN インターフェース

共振充電型の回路は、Fig. 2 に示すように PFN コンデンサーへの充電電圧をモニターし、電圧設定値(Es)のレベルを超えると De-Q'ing 回路のコンパレータにより De-Q'ing Trigger が ON となり、充電が停止する。De-Q'ing コントローラには、Es 値の設定に対して、ローカルとリモ

<sup>#</sup> takako.miura@kek.jp

ート制御があり、リモートの場合は外部のモジュールから 0-10 V のアナログレベル信号を受け、ADC でサンプリングした後、DAC で生成したレベル信号をコンパレータに与えている。アナログレベル信号による Es 値の受け渡しではノイズの影響を受けるため、De-Q'ing コントローラへ LAN-シリアル変換を用いて Es の値をデジタル値で受け渡すように Fig. 3 のような LAN インターフェースモジュールを導入した。導入にあたっては、簡単且つ安価に導入できるような構成とし、更に切り替えスイッチを設け、リモート制御の際にデジタル/アナログの切り替えができるようにした。このスイッチのフラグにより、アナログを選択した場合は、従来と全く同じ制御方式となるため、新たに導入したデジタルモードで何かしらの動作不良が起きても回避できるようにしている。

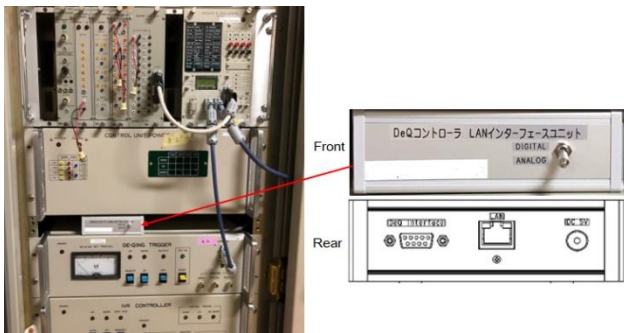


Figure 3: Photo of the DeQ LAN interface module.

### 3. 電源電圧安定度

典型的な電源電圧ジッターの波形を Fig. 4、各クライストロン電源電圧のジッターの peak-peak の測定結果を Fig. 5 に示す。De-Q'ing コントローラへの設定電圧のデジタル化は、現在のところ KL\_C1 を除く KL\_12 までの上流側とエネルギー調整用の KL\_51 と KL\_52 に導入されている。ただし、KL\_52 は光通信による Es 設定が行われている箇所である。共振充電型電源で従来のアナログ制御の場合は、多くが peak-peak で 0.2% ~ 0.3% 程度であ

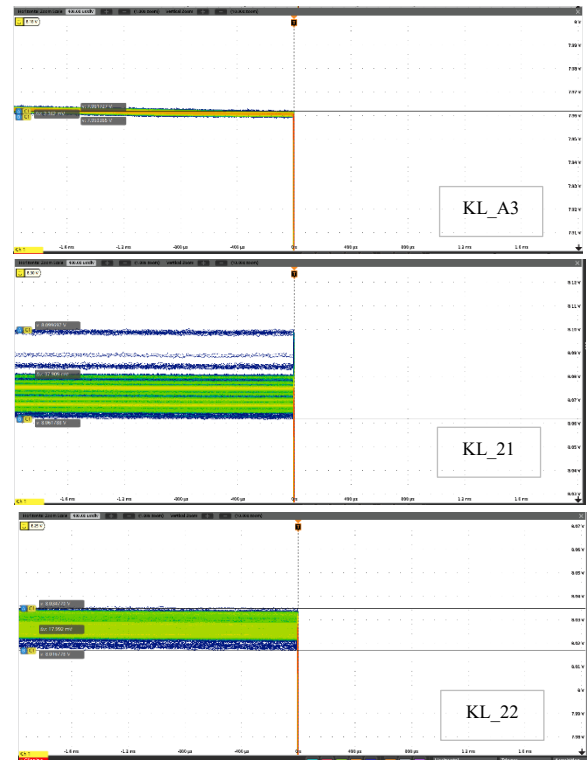


Figure 4: Examples of the typical Klystron HV jitters. (KL\_A3: DeQ LAN, KL\_21&22: DeQ Analog).

り Fig. 4 の KL\_22 のような波形である。0.4% を超える場所では、Fig. 4 の KL\_21 のような波形で、設定値がデジタル的に大きく異なっているようである。一方、デジタル化した箇所は、0.03%~0.04% 程となり、アナログに比べ安定度が大きく改善されていることが分かる。

一方、Fig. 5 内のインバータ電源の安定度を見てみると、KL\_A1\_A と KL\_61 は高精度タイプで通常より 1/10 の安定度のはずであるが、期待した値より悪い結果であった。原因については、現在調査中である。KL\_A1\_B

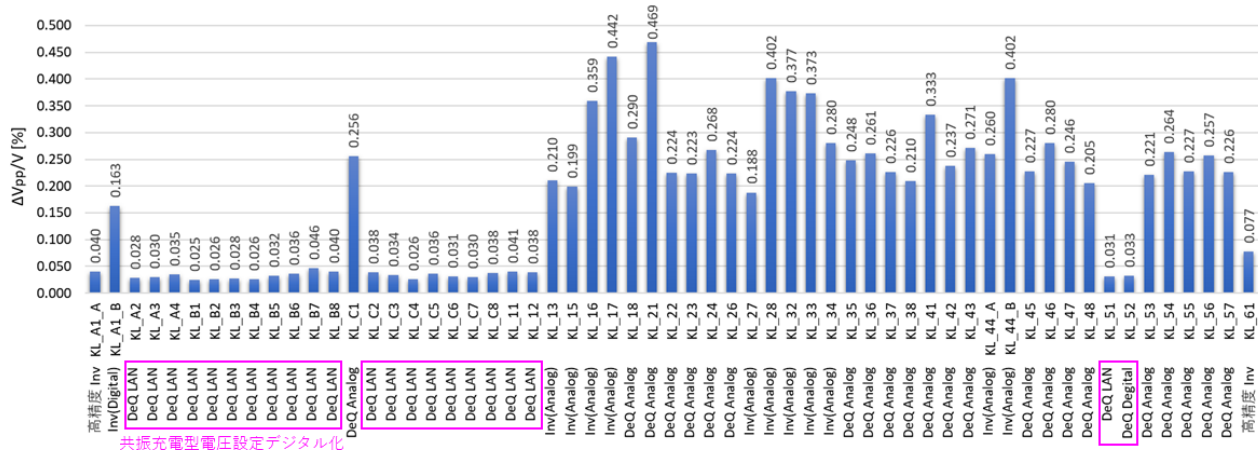


Figure 5: HV stability for each klystron unit in the injector LINAC.

は、インバータ電源で  $E_s$  をデジタル設定する箇所であるが、アナログ設定と比べて大きな改善とはなっていないことがわかる。インバータ電源の改善には、高精度タイプの導入か、または、安価に改善するには更なる検討が必要である。

### 3. RF 安定度

クライストロンの電圧変動から生じる RF の振幅・位相変動については次のように見積もられる。クライストロンの電流  $I$ 、電圧  $V$ 、RF 電力への変換効率を  $\eta$  とすると、パービアンス  $K$  と RF のパワー  $P$  は次のように表される。

$$K = I/V^{3/2} \quad (1)$$

$$P = \eta IV = \eta KV^{5/2} \quad (2)$$

RF 振幅  $A$  は  $\sqrt{P}$  に比例するため、

$$\Delta A/A = 5/4 \Delta V/V \quad (3)$$

と表される。位相は、クライストロンのドリフトチューブ(長さ  $L$ )での電子の走行時間  $L/\beta c$  から計算される。

$$\theta = \omega L/(\beta c) \quad (4)$$

電子の静止質量を  $m_0$  とすると、 $\Delta\theta$  は、

$$\Delta\theta = -\frac{\omega L}{c} \frac{eV}{m_0 c^2} \left[ \left( 1 + \frac{eV}{m_0 c^2} \right)^2 - 1 \right]^{-3/2} \frac{\Delta V}{V} \quad (5)$$

ここで、 $L=403$  mm、 $V=300$  kV とすると、 $\Delta\theta = -3.99$  deg/% となる。RF の振幅・位相ジッターともに電圧ジッター  $\Delta V/V$  に比例する。つまり、電源電圧の変動が 1/10 になったとすると RF の変動も 1/10 になるはずである。

Table 1 に、加速管出口の RF ピックアップ信号に対する RF モニター[4]での測定結果の一例を示す。デジタルモードにすることで、ジッターは改善されているものの半分程度のオーダーであった。この値は、RF リファレンス測定からモニター自身のエラーとして、振幅 0.05% RMS、位相 0.02 deg RMS(ゲート幅 20 ch での値)を補正した後の値である。RF モニター自身の精度の限界から、評価が難しいところである。

Table 1: RF Jitter Measured with RF Monitor

	$\Delta A/A$	$\Delta\theta$
Analog	0.07% RMS	0.15 deg. RMS
Digital	0.03% RMS	0.08 deg. RMS

### 4. ビームのエネルギージッター測定

A-B セクターの DeQ コントローラ LAN インターフェースをアナログからデジタルに切り替えて、J-ARC におけるビームのエネルギージッターの測定を行った。Figure 6 は、RF 電子銃からの SuperKEKB HER 用電子ビームと熱電子銃からの PF-R 用電子ビームに対する測定結果である。ここで各データポイントは、100 パルスを使った標準偏差を示している。アナログからデジタルに切り替えることで、エネルギージッターが約 1/3 まで小さくなったこと

が確認された。電源電圧は充分安定化したものの、RF 励振系側の精度が効いていると考えられる。加速に用いられているのはクライストロン 11 台でビームのエネルギージッター 0.01% RMS から換算すると、デジタルモードで、クレスト付近での加速した場合、1 ユニットあたりの振幅変動はおおざっぱに  $0.01\% \cdot \sqrt{11} = 0.03\%$  RMS 程度と見積もることができる。

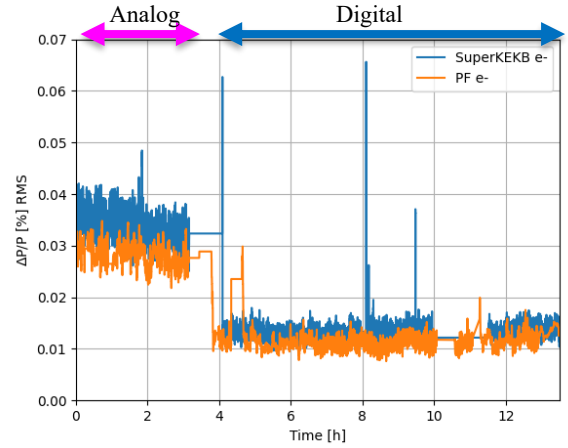


Figure 6: Beam stability in analog and digital modes at J-ARC.

### 5. まとめ

電子陽電子入射器のクライストロン用共振充電型パルス電源に対し、De-Q'ing コントローラへのリモートでの電圧設定をアナログ方式からデジタル方式に切り替え可能な LAN インターフェースを導入した。デジタルモードにすることで、クライストロンの電源電圧の安定度が大きく改善することが確認された。LAN インターフェースモジュールは、デジタルモードを安価に導入することができ、現在まで陽電子生成ターゲットの上流側の電源に対してほぼ全ての箇所に導入した。A-B セクター下流の J-ARC でビームのエネルギージッターを測定したところ、デジタルモードに切り替えることで、エネルギージッターが 1/3 程度に低減されたことが確認された。

### 参考文献

- [1] H. Ego *et al.*, “SuperKEKB 入射性能向上への KEK 電子陽電子入射器アップグレード”, Proc. 21th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Yamagata, Japan, Jul. 31-Aug. 3, 2024, pp. 608-612.
- [2] 道園真一郎, “高周波源”, KEK OHO 2002, <http://accwww2.kek.jp/oho/OHOtxt/OHO-2002/txt-2002-4.pdf>
- [3] M. Kawamura *et al.*, “KEK 電子陽電子入射器モジュール用インバータ電源の現状 (2)”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, pp. 481-485.
- [4] H. Katagiri *et al.*, “SuperKEKB 入射器の高周波モニタシステム”, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Japan, Aug. 9-11, 2014, pp. 1312-1314.