

# PERFORMANCE OF THE XFEL/SPring-8 KLYSTRON MODULATORS

Katsutoshi Shirasawa <sup>#,A)</sup>, Takahiro Inagaki<sup>A)</sup>, Chikara Kondo<sup>A)</sup>, Tatsuyuki Sakurai<sup>A)</sup>, Tsumoru Shintake<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> SPring-8 Joint-Project for XFEL/RIKEN

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

## Abstract

We have installed about 60 klystron modulators to the XFEL/SPring-8. The power supply generates -350 kV, 310 A with 2.5  $\mu$ s flat top pulse to drive a C-band 50 MW klystron. In order to check the quality of the products, we analyzed the inspection data of the 60 modulators. In this paper, we report the statistical performance of the mass produced klystron modulators.

## XFEL/SPring-8 クライストロンモジュレータ量産機の性能

### 1. はじめに

XFEL/SPring-8 は現在建設が進んでいる X 線自由電子レーザーを目的とした線型加速器である。主加速器の RF 源として 64 本の C バンド 50 MW クライストロンを使用する。今回、クライストロンを駆動するためのモジュレータ電源約 60 台の製作が完了したので、その性能について報告する。特に出力電圧のばらつきについて評価する。

### 2. クライストロンモジュレータ

#### 2.1 C バンド加速器システム

C バンド加速器システムの概略図を図 1 に示す。インバーター電源によってモジュレータの PFN 回路に最大 50 kV の充電を行う。高電圧スイッチにはサイラトロン(E2V, CX1836)を使用している。パルストランスは利昌工業株式会社製のエポキシ含浸型 [1] を使用しており、16 倍に昇圧して電圧-350 kV、電流 310 A、パルス全幅約 5  $\mu$ s の高電圧パルスをクライストロンに印加する。クライストロンから出力される大電力マイクロ波は、パルスコンプレッサー (SLED) でパルス圧縮された後、2 本の C バンド加速管に供給される。XFEL/SPring-8 では、この C バンド主加速システムを 64 ユニット使用し、8GeV まで電子を加速する。

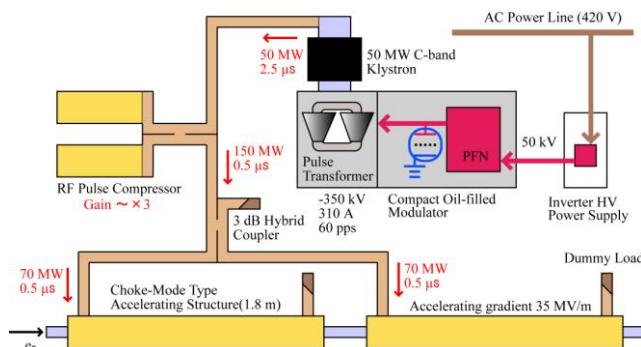


図 1 : C バンド主加速器システムの概略図。

#### 2.2 チューニングロッド無しの PFN



図 2 : XFEL/SPring-8 クライストロンモジュレータの外観。

モジュレータ電源の外観を図 2、主要なパラメータを表 1 に示す。PFN とパルストランスが絶縁油を満たした一つの筐体に納められている。通常、PFN のインダクタンスはチューニングロッドを持ってお

表 1 : モジュレータ電源の主要パラメータ

|                |                               |
|----------------|-------------------------------|
| 充電電圧           | 50 kV                         |
| 出力電圧・電流        | -350 kV, 310 A                |
| パルストランス<br>昇圧比 | 1:16 (7:112)                  |
| PFN 容量         | 470 nF (29.3 nF × 16)         |
| パルス幅           | 4.7 $\mu$ s (平坦部 2.5 $\mu$ s) |
| 最大繰り返し         | 60 pps                        |

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

りパルス波形の調整を行うが、本モジュレータではインダクタンスは固定である。各インダクタンスはシミュレーションによって最適化されている[2]。

### 2.3 量産機の製造

主加速器で使用するモジュレータ電源の製作担当は、ニチコン株式会社である。2010年8月現在、約60台のモジュレータが製造され、現場への設置を終えている[3]。

## 3. 量産機の性能

### 3.1 電圧・電流波形

充電電圧を48 kVに固定して測定した各モジュレータの電圧波形を図3、電流波形を図4に示す。電圧モニタはピアソン社製のCVD(VD-301)で、分圧比は1:10000、カタログ上の精度は±5%である。

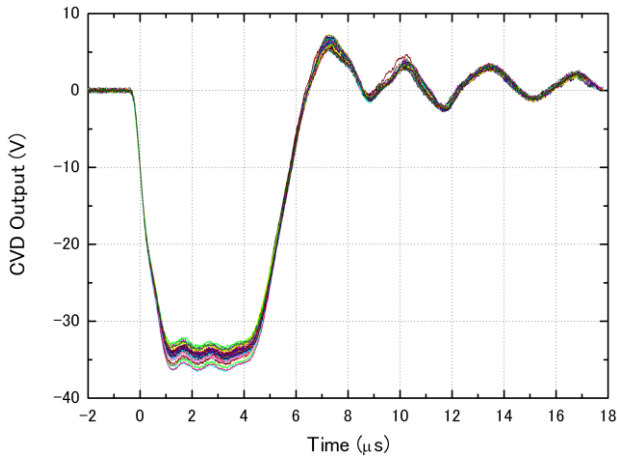


図3：クライストロンビーム電圧波形。充電電圧は48 kV。CVD(1:10000)で測定。60台分の波形を重ね書き。

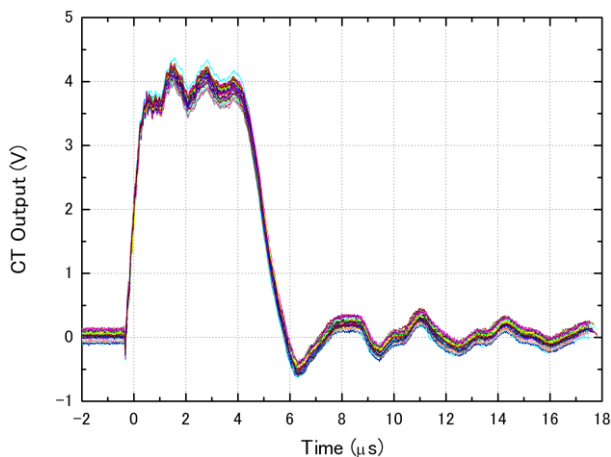


図4：クライストロンビーム電流波形。充電電圧は48 kV。CT(80 A/V)で測定。60台分の波形を重ね書き。

電流モニタはピアソン社製CT(7738)を使用しており、1 MΩ受けで、0.0125 V/Aの出力が得られる。CVDはパルストランス2次高圧出力端子に接続され、CTはパルストランス2次巻線のGND側で配線をクランプし測定している。マイクロ波の出力波形より、CVD出力波形はクライストロンビーム電圧と同等だと考えられるが、電流はパルストランス等の影響を大きく受けていると思われるので、今回の解析にはCVDの出力を用いた。

### 3.2 CVDの較正值

クライストロンビーム電圧を測定するCVDは、モジュレータごとに較正を行った。CVDを完全に絶縁油に浸した状態でパルスジェネレータから約20 Vの電圧を印加して、出力をオシロスコープで計測し、較正值を求めている。

較正值のばらつきを図6の(c)(d)に示す。カタログ上の精度±5%と矛盾の無い値が得られている。

表2：主な部品・モニタ値のばらつき

|                     | Mean  | 1σ    |        | サンプル数 |
|---------------------|-------|-------|--------|-------|
| モジュレータ出力電圧(kV)      | 341   | 6.18  | 1.9%   | 59    |
| CVD較正值              | 10099 | 163   | 1.6%   | 62    |
| CVD出力電圧(48 kV充電)(V) | 33.8  | 0.65  | 1.9%   | 60    |
| クライストロンパービアンس(μP)   | 1.50  | 0.019 | 1.3%   | 57    |
| 高電圧プローブ(MΩ)         | 100   | 0.27  | 0.27%  | 63    |
| PFNキャパシタンス          | --    | --    | 0.2%   | --    |
| PFNインダクタンス          | --    | --    | 0.83%  | 51    |
| インバーター電源(暫定)        | --    | --    | 0.002% | --    |

### 3.3 高電圧プローブ

PFN回路の充電電圧を測定する高電圧プローブには、株式会社日本ファインケム社製P100-Fを使用している。出力はインバーター電源の電圧フィードバックに使用される。高電圧を高速かつ高精度で測定するため、プローブの入力抵抗は100 MΩと一般的なプローブの抵抗値1 GΩと比べ小さくなっている。インバーター電源の短時間電圧安定度は全幅で100 ppm(0.01%)以下を実現しており、非常に安定である。

抵抗値のばらつきを図5の(a)(b)に示す。他の部品に比べて、ばらつきは一桁近く小さい。

### 3.4 Cバンド 50 MW クライストロン

モジュレータの負荷となるクライストロンは、東芝電子管デバイス社製の E37202 を使用している。設計パービアンスは  $1.53 \mu\text{P}$  であり、定格時のインピーダンスは約  $1.1 \text{ k}\Omega$  である。

パービアンスのばらつきを図 5 (c)(d)に示す。

### 3.5 PFN コンデンサ・インダクタンス

PFN コンデンサは  $29.3 \text{ nF}$  のものがモジュレータ 1 台につき 16 個使用されている。全ての測定値が無いので、カタログ上のばらつき  $\pm 2.5\%$  を使用すると、 $1\sigma = 5\%/6 = 0.83\%$  となる。16 個使用するので、PFN 容量のばらつきは  $1\sigma = 0.83\% / \sqrt{16} = 0.2\%$  となる。インダクタンスに関しては、場所によって設計値が異なるが、同じ設計値では、平均値  $0.82 \mu\text{H}$ 、 $1\sigma = 3.3\%$  (サンプル数 51) という値が得られ、同様に 16 個使用するので、PFN 全体のインダクタンスのばらつきは  $1\sigma = 3.3\% / \sqrt{16} = 0.83\%$  となる。

### 3.6 モジュレータ出力電圧

充電電圧  $48 \text{ kV}$  における CVD 出力を図 6(a)(b)に

示す。また、その値に CVD 較正值を反映したモジュレータ出力電圧を図 6(e)(f)に示す。どちらのばらつきも同程度である。

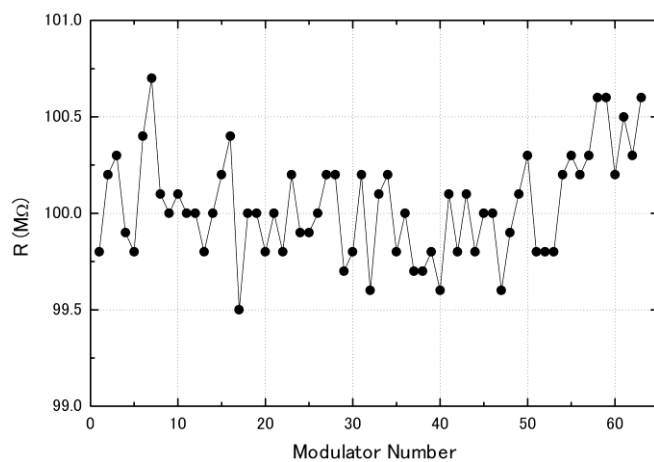
以上に述べた、各部品・モニタ値のばらつきを表 2 に示す。モジュレータ出力電圧に対する寄与が一番大きいのは CVD の較正值である。しかしながら、カタログ上の性能は満たしている。

## 4. まとめ

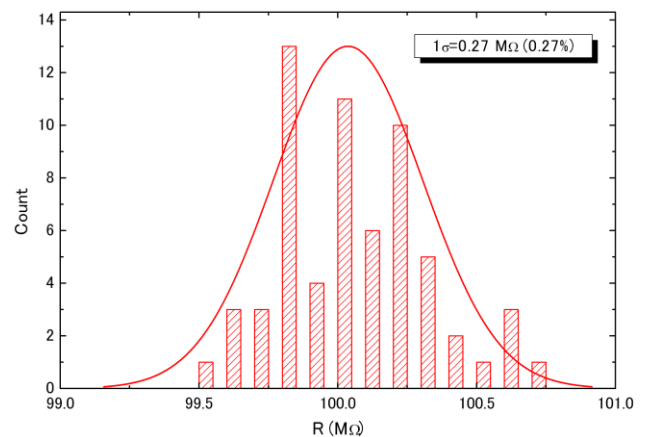
製作・現地設置が完了した XFEL/SPring-8 クライストロンモジュレータ量産機 60 台の性能のばらつきについて評価を行った。CVD で測定した  $48 \text{ kV}$  充電時の出力電圧のばらつきは  $1\sigma = 6.18 \text{ kV}$  (1.8%) であった。この値は CVD の精度と同等であり、製造したモジュレータの性能は CVD の精度内で均一であるといえることができる。

## 謝辞

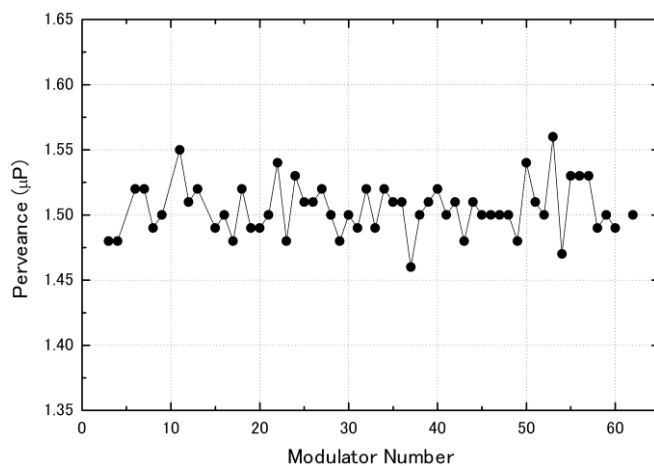
モジュレータ電源の製造はニチコン株式会社であ



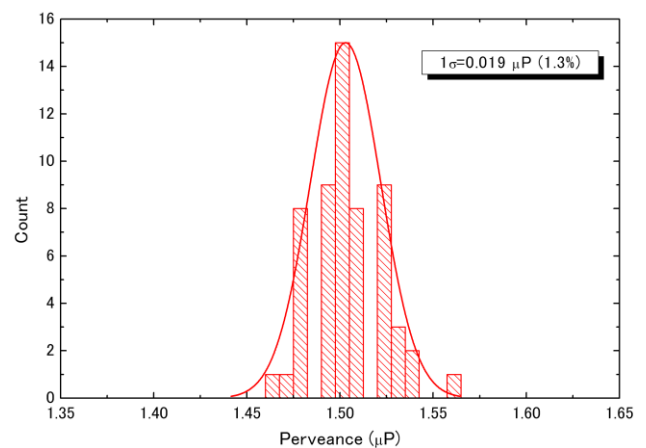
(a) 高電圧プローブ抵抗値



(b) 高電圧プローブ抵抗値のヒストグラム

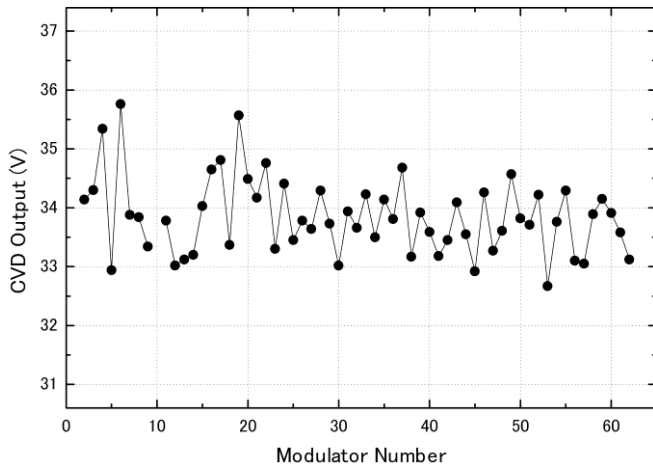


(c) クライストロンパービアンス

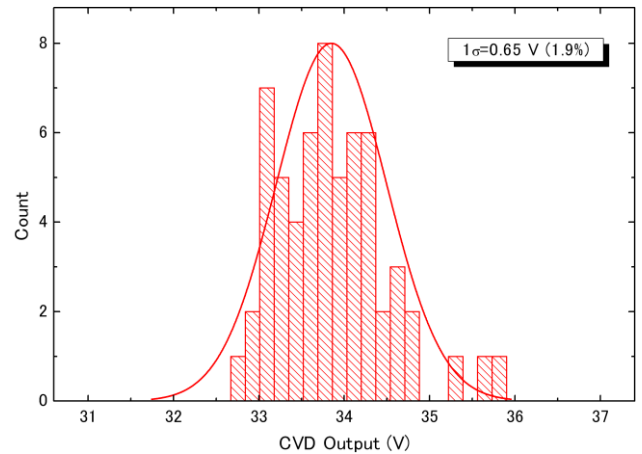


(d) クライストロンパービアンスのヒストグラム

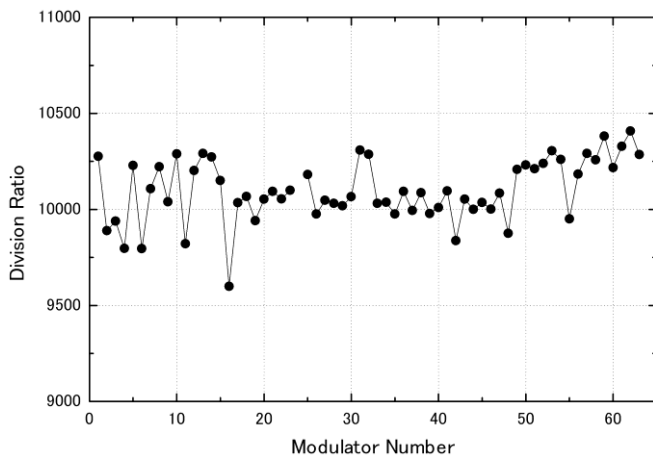
図 5: モジュレータ出力電圧に関連のある部品のばらつき。(a)(b):高電圧プローブの抵抗値。(c)(d):クライストロンのパービアンス。



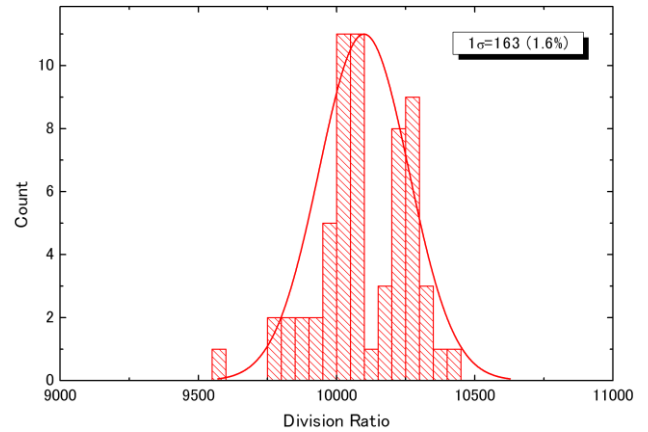
(a) 充電電圧 48 kV 時の CVD 出力



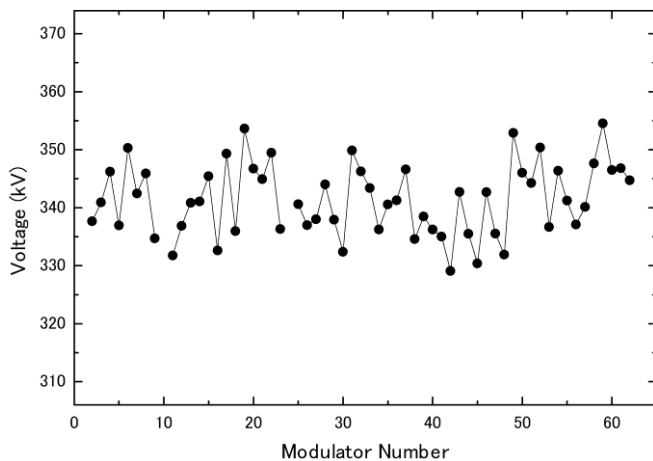
(b) 48 kV 充電時の CVD 出力のヒストグラム



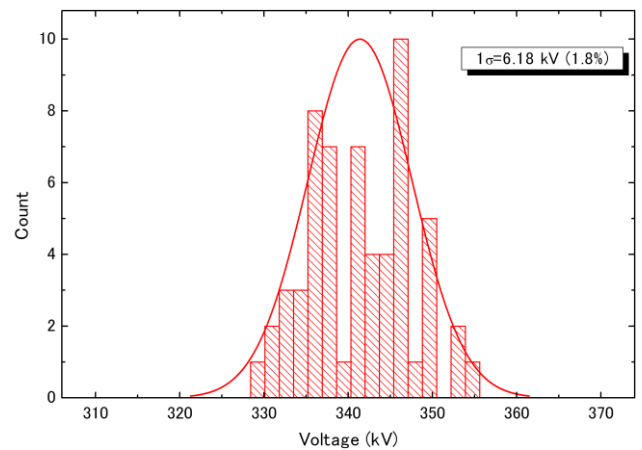
(c) CVD 較正值



(d) CVD 較正值のヒストグラム



(e) CVD 較正值を反映したモジュレータ出力電圧



(f) CVD 較正值を反映したモジュレータ出力電圧のヒストグラム

図 6: モジュレータ出力電圧に関するばらつき。グラフのフルスケールは全て±10%である。(a)(b):充電電圧 48 kV での CVD 出力。(c)(d):CVD の較正值。(e)(f):CVD 較正值を反映したモジュレータの出力電圧。

り、今回使用したデータは検査成績書から引用したものである。

### 参考文献

[1] K.Shirasawa, et al., "HIGH VOLTAGE PULSE TRANSFORMER FOR XFEL/Spring-8 USING 6.5% SILICON DOPED IRON CORE", Proceedings of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Higashihiroshima, Aug. 6-8, 2008

- [2] K.Shirasawa, et al., “PFN CURCUIT OPTIMIZATION OF THE XFEL/SPring-8 KLYSTRON MODULAOTR”, Proceedings of the 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tokai, Aug. 5-7, 2009
- [3] T.Shintake, et al., “Progress of XFEL/SPring-8 Machine Construction”, In this Proceedings
- [4] K.Okada, et al., “HIGH VOLTAGE PROBE FILLED FLUORINERT FOR XFEL/SPring-8”, Proceedings of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Higashihiroshima, Aug. 6-8, 2008