

## HIGH VOLTAGE PULSE TRANSFORMER FOR XFEL/SPring-8 USING 6.5% SILICON DOPED IRON CORE

Katsutoshi Shirasawa<sup>1,A)</sup>, Noriaki Umemura<sup>B)</sup>, Kazuyoshi Iwamoto<sup>B)</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

<sup>B)</sup> RISHO KOGYO CO., LTD., 4-2-37, Minami-Tsukaguchi, Amagasaki, Hyogo, 661-0012

### Abstract

We have developed a new pulse transformer for the XFEL/SPring-8 klystron pulse modulator. The pulse transformer is required to generate -350 kV, 310 A, 2.5  $\mu$ s flat top pulse to drive a C-band 50 MW klystron. We have adapted 6.5% silicon steel as the core, because this high-silicon steel have low core loss and low magnetostriction properties. The epoxy molded winding was developed by RISHO KOGYO CO., LTD. The winding has better mechanical strength and electrical properties than conventional one. In this paper, we report the result of the high voltage test and the pulse time-response measurement.

### XFEL/SPring-8用6.5%ケイ素鋼板を使用した エポキシ含浸型パルストランスの開発

#### 1. 序論

現在建設中のXFEL/SPring-8線型加速器では、主加速器の大電力RF源としてCバンド50 MWクライストロンを使用する[1]。今回開発したパルストランスは、このクライストロンを動作させるためのものであり、主なパラメータは、昇圧比1:16、パルス幅4.7  $\mu$ s(フラットトップ2.5  $\mu$ s)、2次電圧-350 kV、2次電流310 Aである。

このパルストランスは、従来のクライストロン用パルストランス[2]とは異なる特徴を2つ持っている。1つ目は鉄心である。構造自体は一般的なカットコアであるが、材料として6.5%ケイ素鋼板を使用した。通常用いられる方向性ケイ素鋼板(ケイ素含有率3%程度)よりも磁歪が小さく、高周波特性が良いという特徴を持っている。磁歪は、振動や騒音の原因となる。我々が開発しているクライストロン用パルス電源[3]では、PFN、サイラトロン、パルストランスなど全てのコンポーネントが、絶縁油を満たした同じ筐体内に収められる。そのため、磁歪を抑えなければ、鉄心の振動による衝撃波が絶縁油を伝わり、サイラトロンカソードなど振動に弱い部品を劣化させる可能性がある。2つ目は巻線である。1次、2次巻線共にエポキシ樹脂で真空含浸されており衝撃に強く、耐電圧も向上している。この巻線は利昌工業株式会社が持つ独自の金型真空含浸技術を用いて製作された。完成したパルストランスについて、パルスレスポンスとクライストロンを負荷とした高電圧試験を行った。

#### 2. 設計パラメータ

今回製作したパルストランスの主要なパラメータを表1に示す。

Primary Pulse	-22.0 kV, 5080 A, 4.7 $\mu$ s
Step up ratio	1 : 16 (n1 : n2 = 7 : 112)
Secondary Output Pulse	-350 kV, 310 A, 1.1 k $\Omega$
Primary Load Impedance	1.1 k $\Omega$ /16 <sup>2</sup> = 4.3 $\Omega$
Effective Core Sectional Area	0.92 $\times$ 128.25 = 118 cm <sup>2</sup>
Mean Magnetic Path Length	1.29 m
Assumed Effective Permeability	1000
Flux Swing	1.27 T
Primary Inductance	560 $\mu$ H
Leakage Inductance	2.5 $\mu$ H
Pulse Droop	1.8 %

表1, パルストランスの設計パラメータ

インダクタンス等は実効透磁率を1000と仮定して

<sup>1</sup> E-mail: kshira@spring8.or.jp

計算を行った。フラックススイングはスーパーコアのB25値1.4 T以下となるように、鉄芯の断面積に余裕を持たせて設計した。2次巻線は、従来のパルストランスと同じくリーケージインダクタンスを小さくするため、テーパがついている。図1にパルス電源タンク内に設置したパルストランスの写真を示す。運転時にはタンク内は絶縁油で満たされる。

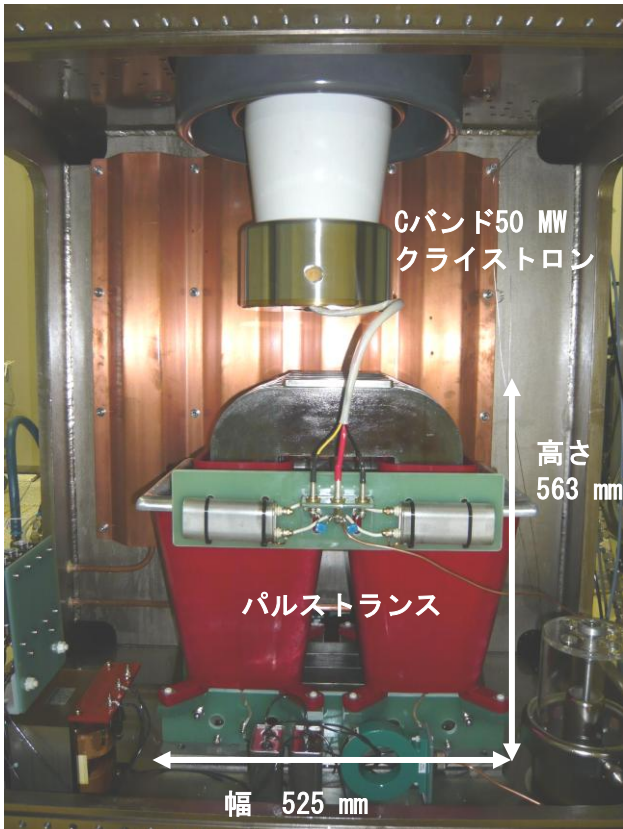


図1、一体型モジュレータに設置されたパルストランス。

### 3. 特徴

本パルストランスの特徴である6.5%ケイ素鋼板と、巻線に採用した金型真空含浸技術について説明する。

#### 3.1 6.5%ケイ素鋼板(JFEスーパーコア) [4]

従来のケイ素鋼板は、最高3.5%のケイ素が添加されており、このSi量を増やすと磁気特性が向上し、6.5%で最高になる。この高いケイ素含有率を実現しているJFEスーパーコアの特徴は、

- 低鉄損
- 低磁歪
- 高透磁率
- 無方向性

である。

今回はJFEスチール株式会社が製造しているSi含

有率6.5%の無方向性電磁鋼板10JNEX900を採用し、カットコアに加工して鉄芯とした。厚さは100  $\mu\text{m}$ である。

#### 3.2 金型真空含浸技術 [5]

利昌工業株式会社の製作するモールド変圧器は1次コイル、2次コイル共にガラス繊維で補強され、低粘度エポキシ樹脂による金型方式真空含浸法で製造されている。特徴としては耐水性、電氣的・機械的特性に優れていることが挙げられる。この技術で巻線を製作することにより、特に高電圧が発生する2次巻線の破損を防ぎ、信頼性の高いパルストランスを製造することが狙いである。

図1に示したパルストランスの写真で、巻線部が赤いのは着色されたエポキシ樹脂の色であり、巻線を強固に固定している。

### 4. 動作試験

#### 4.1 LCRメータによる測定

LCRメータ(NF回路ブロックZ2353)を用いて測定したパラメータを表2に示す。Leakage Inductanceは、ほぼ設計値と同じ値になったが、Primary Inductanceは設計値の約半分の値が得られた。LCRメータが内蔵している電源容量は小さいので、測定時の磁場が小さい。したがって、透磁率が計算で使用している値よりも小さく、初透磁率範囲で測定を行っている為だと考えられる。

Primary Inductance	290 $\mu\text{H}$
Leakage Inductance	3 $\mu\text{H}$
Capacitance (Primary-GND)	260 pF
Capacitance (Primary-Secondary)	160 pF

表2、LCRメータで測定したパルストランスのパラメータ。

#### 4.2 パルス応答

出力される波形について調べるため、小型のパルス電源を使用してパルス応答を測定した。測定時の機器構成を図2に示す。負荷などの条件は、実際にクライストロンを運転する状態を模擬した。得られた波形を図3に示す。立ち上り時間(10%-90%)0.8  $\mu\text{s}$ 、サグ1.6 %/ $\mu\text{s}$ であった。ともにフラットトップ2.5  $\mu\text{s}$ を得るのに問題ない値が得られた。

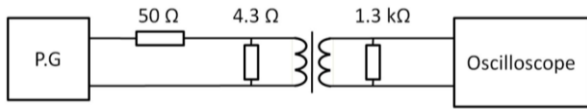


図2, パルス応答測定時の構成。パルスジェネレータの出カインピーダンスは50 Ω。1.3 kΩの抵抗はクライストロン(1.1kΩ)を模したものである。

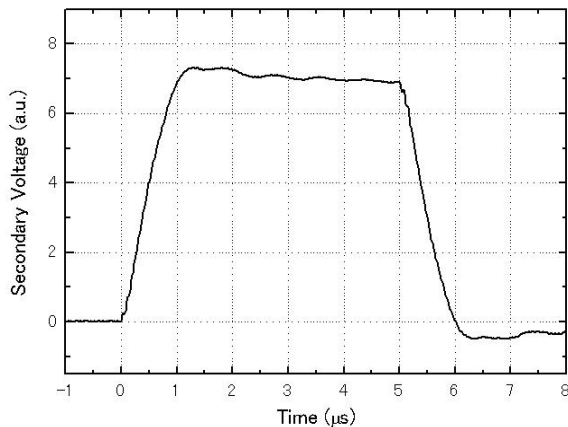


図3, パルス幅5 μsの矩形波に対する出力波形。立ち上がり時間(10%-90%)は0.8 μs, サグは1.6 %/μsであった。

#### 4. 3 高電圧試験

一体型モジュレータにパルストランスを組み込み、50 MWクライストロンを負荷として運転を行った。得られた電圧波形を図4に示す。電圧はCVD、電流はCTで測定した。電圧が飽和することもなく-350 kV, 310 A, 繰り返し60 ppsで運転することができた。この結果より、鉄芯の磁束がまだ飽和しておらず、設計にはまだ余裕があることが分かる。なお、今回の試験ではコアバイアス回路を削除して高電圧運転を行っている。フラットトップ部はサグもなく仕様値である2.5 μsを満たしているが、リングングが大きい。この理由はPFNが未調整であるためであり、今後改善する予定である。

#### 5. まとめ

低磁歪・低鉄損材料である6.5%ケイ素鋼板(JFEスーパーコア)を用いたパルストランスを製作した。巻線は機械的強度、電気的特性を向上させるため1次、2次共にエポキシ樹脂で金型真空含浸したものを使用した。Cバンド50 MWクライストロンを負荷として、定格電圧-350 kV、電流310 A、繰り返し60 ppsで問題なく運転できた。XFEL/SPring-8の主加速部クライストロン電源にはこのパルストランスが採用される。

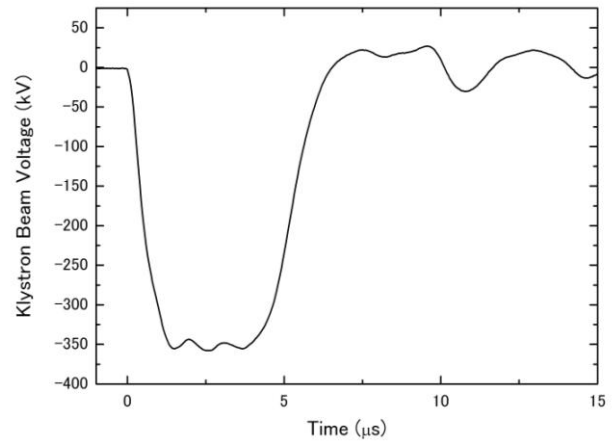


図4, クライストロンを負荷とした時の電圧波形。電圧が-350 kVのときクライストロン出力は50 MWとなる。フラットトップ部のリングングはPFNが未調整のため。

#### 参考文献

- [1] 稲垣隆宏 他, “XFEL/SPring-8 Cバンド主加速器の開発状況”, 本研究会ポスター発表
- [2] 例えば, R. B. Neal et al., “THE STANFORD TWO-MILE ACCELERATOR”
- [3] 近藤力 他, “XFEL/SPring-8 向けクライストロン用パルス電源の開発”, 本研究会ポスター発表
- [4] JFEスチール株式会社 電磁鋼板 <http://www.jfe-steel.co.jp/products/denji/index.html>
- [5] 利昌工業株式会社 <http://www.risho.co.jp/>