

HIGH VOLTAGE PROBE FILLED FLUORINERT FOR XFEL/SPring-8

Koichi Okada^{1A)}, Tetsuya Ogawa^{A)}, Chikara Kondo^{B)}, Takahiro Inagaki^{B)}, Tsumoru Shintake^{B)}
^{A)} Japan Finechem Company, Inc.

5-3-7, Higashi-yawata, Hiratsuka-shi, Kanagawa 254-0016 Japan

^{B)} SPring-8 Joint-Project for XFEL/RIKEN

1-1-1, Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198 Japan

Abstract

In XFEL project at SPring-8, the high stable rf power is required. The stability of the rf power and phase strongly depends on the stability of the PFN voltage. Our PFN high voltage charger has a feedback control of the PFN voltage. We have developed the high voltage probe which has fast response and low thermal dependence. In order to improve the response speed, we change the resistor of the probe from 1 G ohm to 100 M ohm. Because the lower resistance leads larger heat dissipation, we developed the pipe shaped resistor with low thermal coefficient, and the fluorinert-filled case with the cooling water pipe. In order to compensate the distributed capacitance, we develop the new impedance matching circuit using OP-amp. The new probe has been confirmed the low thermal fluctuation of the resistor, and the fast response in the frequency band of DC – 10^4 Hz.

XFEL/SPring-8向けフロリナート充填型高電圧プローブの開発

1. はじめに

XFEL/SPring-8では、安定したX線自由電子レーザーを発振させるため、電子ビームエネルギーの安定化が重要となる。それには、クライストロン用パルス電源のPFNコンデンサの充電電圧(定格:45kV)を、100ppmという高い精度で安定化することが要求される^[1]。そこで、充電電圧を測定し、充電器にフィードバックをかける手法を用いるが、それには高電圧を高速かつ高精度で測定できる高電圧プローブが必要であった。そこで、新たにフロリナート充填型高電圧プローブP100-Fを開発した。

従来に比べ入力抵抗を低く設定することで、プローブ本体や信号ケーブルの静電容量による応答の遅れを小さくすることにした。それには、入力抵抗を小さくした事による抵抗器本体の発熱の増大に対応するため、低温度係数の特殊抵抗器を開発する必要があった。また、プローブ内部をフロリナートで充填し、これを冷却水配管によって冷却することで、抵抗値の温度変化を極力抑えられる構造にした。更に、OPアンプを用いたインピーダンスマッチング回路を用いることで、信号ケーブルがもつ静電容量の大きさに影響されずに、より高速な応答特性を持つ測定系を実現した。

2. 開発・試作

2.1 特殊抵抗器の開発

本プローブには、0.2pF程度の静電容量があり、従来の高電圧プローブの抵抗値1GΩの場合では、このRC回路の時定数は約1.3ms程度となる。一方、充

電電圧をフィードバックするために必要な時定数は、フィードバック制御を行う充電器のスイッチング周波数などから決まり、数十~数百μs程度である。そこで、プローブの入力抵抗を100MΩと小さくすることで、応答を高速化し、より安定なフィードバックを行えるようにした。入力抵抗を小さくした場合、抵抗器の自己発熱が増加し、温度変化も大きくなる。この温度変化に起因する抵抗値の変化を抑えるため、温度係数の低い特殊抵抗器が必要であった。そこで、温度係数が±10ppm/°Cという特殊抵抗器を開発した(図1)。また、抵抗器の形状は円筒状とすることで、抵抗器内部に冷媒が通り易くし、冷却効率を高められる構造とした。



図1. 抵抗器外観。上：開発した特殊抵抗器
下：従来型に使用している抵抗器

¹ E-mail: okada-koichi@jfine.co.jp



図2. フロリナート充填型高電圧プローブ外観

2.2 フロリナート充填型プローブの開発

従来の高電圧用プローブの入力抵抗は1GΩ前後であるのに対し、新たな抵抗器の抵抗値は100MΩに設定した。抵抗値を100MΩにしたことにより、電圧45kVをかけた際の電力消費は約20Wとなった。定格電力20Wクラスの抵抗器の場合、大気中における表面温度の上昇は $\Delta t=40^{\circ}\text{C}$ 程度になる。この場合、抵抗器の温度係数が $\pm 10\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$ であっても、抵抗値の変動は400ppmにもなる。よって、変動幅をさらに小さく抑えるためには、抵抗器を積極的に冷却し温度変化を小さくする必要がある。

従来型の高電圧プローブはガスによる絶縁方式を採用しているが、その冷却効率は高くない。そこで良好な絶縁を確保し、かつ抵抗器を効率良く冷却するため、3M社のフロリナートを冷媒として充填する方式をとった。さらに、容器の内部に冷却配管を配し、フロリナートを積極的に冷却することで、より高い温度の安定化を目指した。

プローブ本体の材質は、ブッシング部はアルミナ、本体はステンレス製とし、真空用フランジを用いることで全体を気密構造とした。また、冷却配管として、本体内側に $\phi 4$ の銅パイプをらせん状に配置した。試作したプローブの外観を図2に示す。また、プローブの主な電気的仕様を表1に示す。

最大使用電圧	60 kV (pk-pk)
抵抗値	100 MΩ ± 1%
抵抗器温度係数	± 10 ppm/°C
内部絶縁体	フロリナート(水冷)

表1. 高電圧プローブの主な仕様

3. 温度安定性

実際の運転時におけるプローブの温度変化を推定するため、運転時に近い条件下でのプローブ各部における温度を測定した。まず、試作したプローブの各部に温度センサ(熱電対)を配置し、通電時の各

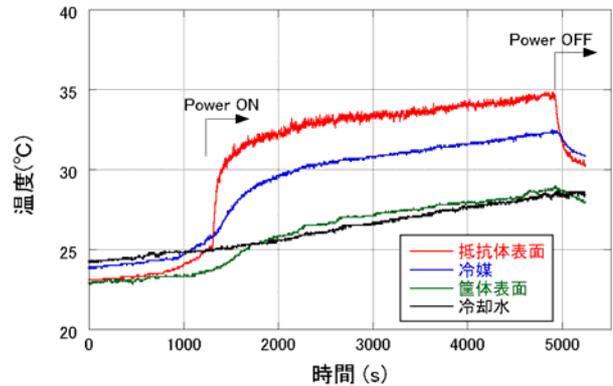


図3. 抵抗器を約20Wで発熱させたときの、プローブの各箇所における温度変化

部の温度変化をモニタした。センサの位置は、1). 抵抗器表面(中央部)、2). 冷媒中(液面下約20mm)、3). 冷却水配管IN側の表面、4). プローブ外面(液面下約20mm相当の位置)の4箇所配した。試験を低電圧で行うために、高電圧用の100MΩと同形状で抵抗値が100Ω程度の抵抗器を製造し使用した。抵抗器には消費電力20Wに相当する電圧を印加し、定格運転時における発熱を再現した。このとき、各部の温度をモニタした結果を図3に示す。発熱が始まってから、抵抗器や冷媒の温度は、5分程度でほぼ一定になり、その後、冷却水の温度と共に変化するようになった。この時、冷却水と抵抗器表面の温度差は約7°Cでほぼ一定に保たれている。これより、運転時に充電電圧や繰返し数が変わり、熱的な負荷が変化した場合においても、抵抗値の変動は最大でも70ppm程度に収まり、充電電圧を安定的に測定できる。

4. マッチング回路の改良

高電圧の測定原理は、入力電圧を2つの抵抗器で分圧し、低電圧に変換して測定するものである。そのため、入力電圧 V_{in} と出力電圧 V_{out} としたとき、周波数応答特性 $G(f)$ は1次側抵抗のインピーダンス $Z_1(f)$ と2次側抵抗のインピーダンス $Z_2(f)$ の比で決まり、

$$G(f) = \frac{V_{out}(f)}{V_{in}(f)} = \frac{Z_2(f)}{Z_1(f) + Z_2(f)}$$

で表される。ここで、 f は周波数である。この応答特性が高い周波数領域まで一定であれば、プローブは速い入力パルスに対しても正しい応答を示すことになる。そのためには、1次側抵抗器と同じ周波数特性をもつ回路を2次側に入れる必要があり、このような回路をマッチング回路という。だが、この2次側のインピーダンスには、一般的にはプローブ内部で筐体との間にできる浮遊容量や、信号ケーブルの静電容量なども含まれるため、ケーブル長などが制限される。

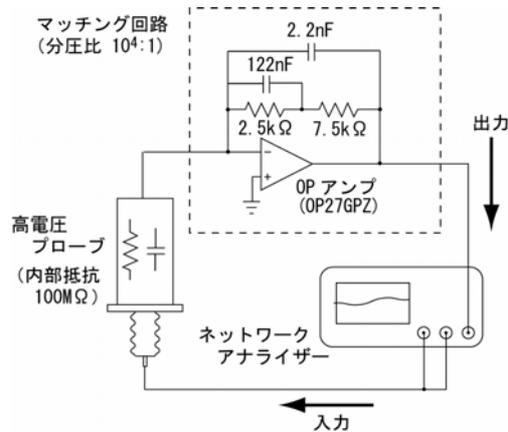


図4. プローブの周波数特性の測定概略図

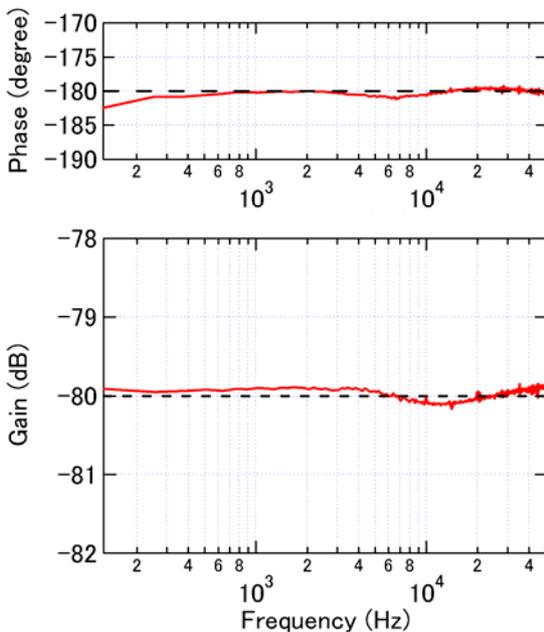


図5. 周波数特性の測定結果(BODE線図)。破線は理想的な場合の特性を示す。

そこで、新たにOPアンプの負帰還回路をマッチング回路に用いる方法を開発した。これは、図4のように、プローブの出力をOPアンプの負入力端子に接続し、バーチャルショートをつくり、負帰還回路にインピーダンス Z_B の回路を入れる。このとき、OPアンプの出力電圧は、

$$G(f) = -\frac{Z_B(f)}{Z_1(f)}$$

となり、分圧比はプローブの1次側のインピーダンスと、負帰還回路のインピーダンスのみによって決まるため、2次側のインピーダンス(信号ケーブルの静電容量など)を無視できるようになる。

実際に、プローブの1次側のインピーダンスを測定し、それに合うようなマッチング回路(分圧比

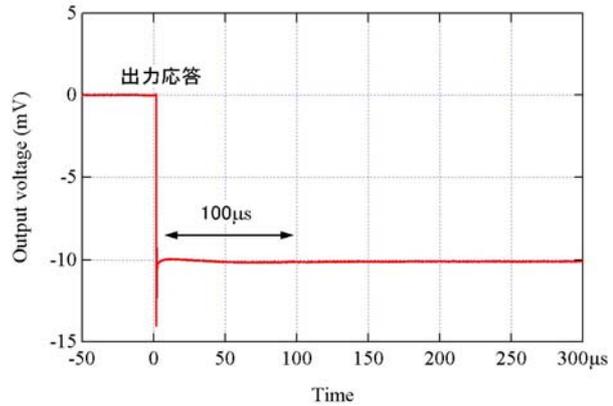


図6. OPアンプ型マッチング回路を使ったときのステップ応答波形。入力は+100Vのステップ入力。

$10^4:1$)を作った。そして、図4のような回路にて応答特性の測定を行ったところ、図5のような結果を得た。これより100Hzから50kHzの測定範囲全体において、位相、ゲインともほぼ一定になっており、良好な応答特性となっていることが分かる。ここで、位相が -180° となっているのは、OPアンプが反転出力をするためである。

また、このマッチング回路を使ったときの、ステップ応答波形を図6に示す。+100Vのステップ入力に対し、出力波形は $100\mu\text{s}$ 以内で静定しており、高速な応答が実現されていることを確認した。

5. 高電圧運転試験

開発したプローブを一体型モジュレータ電源^[2]に装着し、PFN充電電圧の安定化試験を行った。このとき、マッチング回路はPFN充電器内の制御回路に組み込み^[3]、回路定数はフィードバック系が最も安定するように調整した。

このような調整を行った後に、定格運転(充電電圧:45kV, 繰り返し数:60pps)にて運転を行ったところ、充電電圧のジッターは50-60ppm(pk-pk)であり、非常に高い安定度が実現された。

また、2007年11月より高電圧運転を行っており、2008年7月末時点において放電などのトラブルは起こっていない。

6. まとめ

100MΩの抵抗器を用いた、フロリナート充填型高電圧プローブの開発を行った。このプローブは、低温度係数の特殊抵抗器を用い、また内部のフロリナートを水配管で冷却しており、運転時の熱負荷などに対して抵抗値が安定したプローブである。さらに、OPアンプを用いたマッチング回路により、高速な応答特性を実現した。

参考文献

- [1] 田中均,他 “XFEL/SPring-8のバンチ圧縮性能に及ぼすRF機器変動の影響評価”,第4回加速器学会, TP66, 2003年, 和光
- [2] 近藤力,他 “XFEL/SPring-8向けクライストロン用高電圧パルス電源の開発”, 本学会, WP107
- [3] 川崎敦志,他 “XFEL/SPring-8向け高電圧充電器の開発”, 本学会, WP111