

DESIGN STUDY OF THE RESONANCE TYPE ELECTROSTATIC CURRENT MONITOR FOR J-PARC RCS H0 DUMP BEAM MONITORING

Kenichirou Satou and Takeshi Toyama
 High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801 Japan

Abstract

The electrostatic current monitor (ESM) has been installed at the H0 dump line to monitor the dump beam intensity. The bunched beam from linac is injected every $1.07 \mu\text{s}$ (0.938MHz). It shows that the signal to noise ratio (S/N) is about 0.03, however, as for the frequency region from 0.9MHz to 1.0MHz, noise level is about one order smaller than the 0.938MHz signal. To improve the S/N, we have studied narrow band response circuit using LCR resonator. In this article, the design study of the resonance type electrostatic current monitor (rESM) is described.

J-PARC RCS H0 ダンプビーム測定のための共振タイプ静電誘導電流モニタの設計

1. はじめに

J-PARC RCS では荷電変換入射を採用している。リニアックからの 181/400MeV Hビームを入射部の炭素荷電変換フォイルと反応させ、陽子ビームに変換しリングに入射する。

荷電変換効率はフォイル厚に依存するが典型的には 99.7%である。一部の変換されない H0、H成分は下流にある炭素荷電変換フォイルにより陽子に変換され、H0 ダンプライン最下流の H0 ダンプに廃棄される。

この H0 ダンプラインに設置されているモニタのもっとも重要な役割は、廃棄ビーム量を十分な精度で測定することである。H0 ダンプの容量は 4kW であり、その容量を超えないように廃棄ビーム量を精度よく監視が必要である。また、荷電変換フォイルの変換効率は精度よく求めることは、フォイルの寿命を予測するためにも重要である。H0 ダンプモニタについては先に佐藤らによる報告がある[1]。

我々はビーム電流測定のため、カレントトランスフォーマ(CT)および静電誘導型電流モニタ(ESM)を使用している。ともに、当初の計画では、波形観測のため広帯域な周波数特性になっていたが、信号対ノイズ比(S/N)が悪く、波形がノイズに埋もれてしまっていた。CT においては生信号を周波数分析し、RCS 入射基本周波数成分(0.983MHz)を参照することにより廃棄ビーム量を測定している[2]。

2. H0 ダンプビーム

現在の RCS では入射エネルギー181MeV、ハーモニックナンバーh=2、入射中間バンチ周波数0.938MHz、出力 300kW で運転している。H0 ダンプビーム量の見積もりを表1に示す。

上記荷電変換効率は炭素膜を交換した直後のものであり、実際には効率が 97%になるまで使用する。よって、バンチ電荷は 26pC 程度から 260pC まで変

動する。

ピーク電流は、線電荷密度を矩形かつ 50%duty とすると、 $49 \mu\text{A}$ となる。

表 1 : 300kW 運転時の H0 ダンプビーム強度

周回ビーム 1 バッチ当たりの電荷	$Q_0=4 \mu\text{C}$
RF 周波数(h=2)	$f_0=\omega_0/2\pi=0.938\text{MHz}$
最大入射時間	$T_{inj}=500 \mu\text{s}$
中間バンチ入射回数	$N_{inj}=T_{inj}f_0=469$
中間バンチ電荷	$Q_{inj}=Q_0/N_{inj}=8.5 \mu\text{C}$
荷電変換効率	$\epsilon=99.7\%$
ダンプビームのバンチ電荷	$Q_D=(1-\epsilon)Q_{inj}=26\text{pC}$
ダンプビームのピーク電流 (矩形を仮定)	$I_D=49 \mu\text{A}(\text{duty}=50\%)$

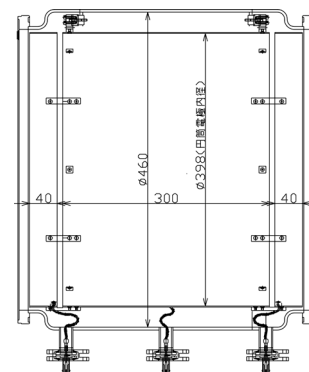


図 1 : ESM 本体の外形図

3. 現行 ESM のパフォーマンス

3.1 ESM 本体について

静電誘導型ビーム位置モニタ (BPM) と同様に

ESM は同心円筒 2 重構造を持ったモニタであるが、電流を測定するため、電極分割はない。図 1 に ESM の外形図を示す。

円筒電極をビーム軸方向に、幅 40mm のものを上・下流に、幅 300mm のものを中心に設置している。中心電極で信号をピックアップする。上下流の電極は、入射部および H0 ダンプより流入する二次電子を抑制するため、高電圧を印加する用途で設置したが、現在は使用していない。

中心電極の静電容量は 267pF であり、上下流電極は 36pF、上下流電極・中心電極間は 2.02nF である。

3.2 信号処理系

現在の信号処理系のブロック図を図 2 に示す。真空管入り口での信号強度は、ESM (267pF)、1m 同軸ケーブル(100pF)、真空管アンプ(279pF)の入力静電容量の合計静電容量 C_T を用いて、

$$V_{in} = (\Delta Z / c \beta T)(Q_D / C_T) \dots (1)$$

である。ここで ΔZ は電極幅を、 T はバンチの幅をあらわす。バンチ幅を $1/2f_0$ と仮定すると、信号レベルは 0.15mV である。このような微弱な信号を増幅するため、図のようにアンプを 3 台使用している。

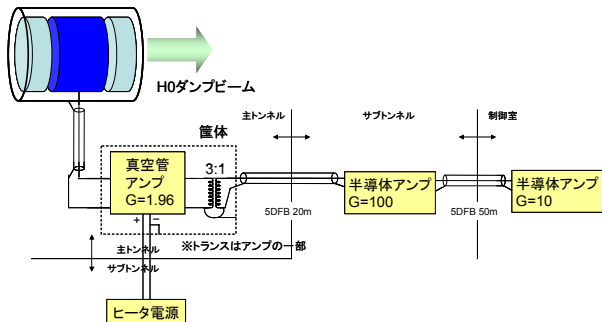


図 2：信号処理系のブロック図

ESM ヘッドの信号を直下の真空管アンプで受け、20m の同軸ケーブルでサブトンネルまで伝送し、ゲイン 100 の半導体アンプで増幅し、さらに 50m の同軸ケーブルで伝送し、地上階の制御室でゲイン 10 の半導体アンプで増幅している。高い耐放射線性を期待し真空管アンプを使用している。全系の周波数特性は真空管アンプで制限され、6.7kHz～10.2MHz である。

図 3 に 300kW 運転時の ESM 出力と RCS 入射直前の BPM (I-BPM) で測定したリニアックビームの測定結果を示す。サブトンネルにある半導体アンプの出力を $Z_{in}=1M\Omega$ 、200MHz 帯域のオシロスコープで測定した。図 4 は ESM 信号を周波数解析したものである。

図 3 より、S/N が悪く有意な信号強度が得られていないことがわかる。図 4 の周波数特性から、入射周波数 0.938MHz にマッチした有意な信号が得られていることがわかる。0.938MHz 信号は真空管アンプ入力換算で 0.20mV_{pp} であり、S/N は 0.03 程度で

あることがわかる。

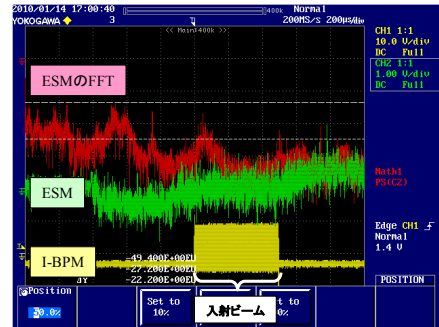


図 3：現行 ESM の出力信号

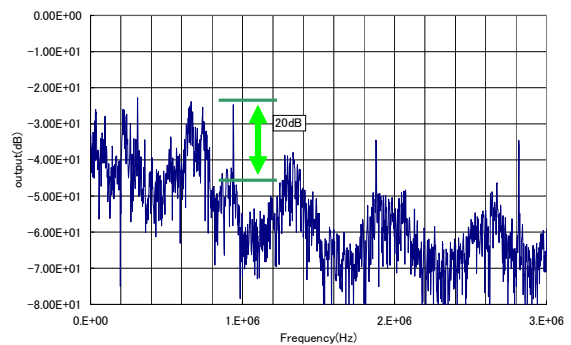


図 4：現行 ESM 出力の周波数特性

4. 共振タイプの ESM (rESM)

4.1 信号処理系

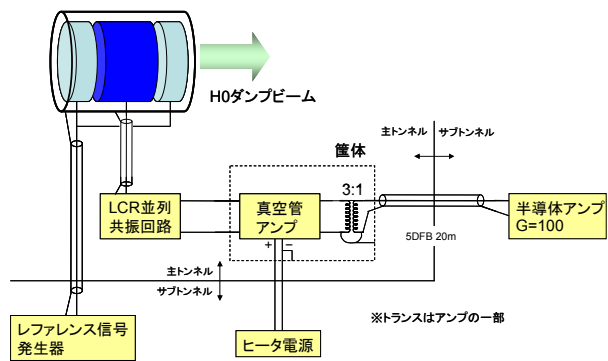


図 5：rESM の信号処理ブロック図

信号強度の増強およびノイズ成分の削減のため、図 5 のように ESM と真空管アンプの間に LCR 並列共振回路を挿入することを考える。共振は 0.938MHz に合わせ、共振時のインピーダンスを高くすることにより信号強度を高め、さらに低損失 (High Q) 回路にすることにより共振周波数以外のノイズ信号を低減できる。また、制御室の半導体アンプは信号レベルが十分高くできるため使用しない。さらに、ESM の上・下流の電極より基準信号を入力することにより、共振状態の監視およびキャリブレーションができるように改良する。図 6 には等価回路を示す。

共振回路、真空管アンプ、同軸ケーブル(20m)、半導体アンプの入力インピーダンス $50\ \Omega$ まで含めたインピーダンスを $Z(\omega)$ とし、電流入力 $I_{in}(\omega)$ 、半導体アンプゲイン $G(\omega)$ とすると、半導体アンプ出力 $V_{out}(\omega)$ は、

$$V_{out}(\omega) = G(\omega)Z(\omega)I_{in}(\omega) \text{ ----(2)}$$
 となる。

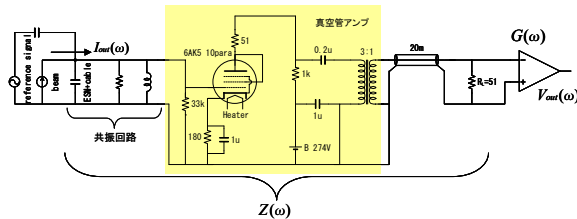


図 6：等価回路

4.2 共振回路

テストした共振回路を図 7 に示す。RCS トンネル内の温度変動により透磁率が変化し、共振周波数が変動すること防ぐため、インダクタには空芯コイル $24.9\ \mu\text{H}$ を使用した。調整用にはセラミックコンデンサー計 474pF 、微調整用に 50pF 可変タイトバリャブルコンデンサーを使用している。実際には真空管アンプの静電容量 279pF も含めて、共振周波数を 0.938MHz に調整した。共振時に 0.938MHz のインピーダンスが真空管アンプの入力抵抗 $33\text{k}\Omega$ と合わせて、 $7.7\text{k}\Omega$ になりように金属皮膜抵抗 $10\text{k}\Omega$ を使用した。

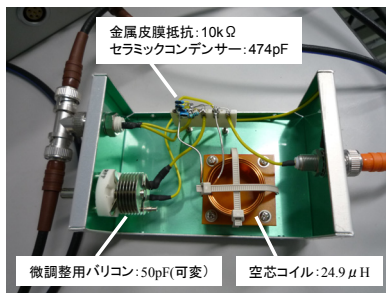


図 7：共振回路の写真

4.3 インピーダンス測定

共振回路を組み込み、ESM と等価のコンデンサ +1m 同軸ケーブル+共振回路+真空管アンプ+20m 同軸+ $50\ \Omega$ 終端抵抗の全インピーダンス $Z(\omega)$ を測定した。測定には NF 回路ブロック社製 Frequency Response Analyzer : FRA5097 を使用した。FRA5097 の発信機出力を $10\ \Omega$ 抵抗を介して共振回路に入力し、終端の $50\ \Omega$ に誘起する電圧を測定した。入力電流は $10\ \Omega$ 抵抗に誘起する電圧から求めた。

得られたインピーダンスを図 8 に示す。共振周波数 0.94MHz 、共振時の抵抗 $1.80\text{k}\Omega$ 、Q 値 3.9 であった。共振時の抵抗は設計値 $7.7\text{k}\Omega$ とのずれが

大きく、想定より損失の大きい回路である。この原因については現在調査中である。

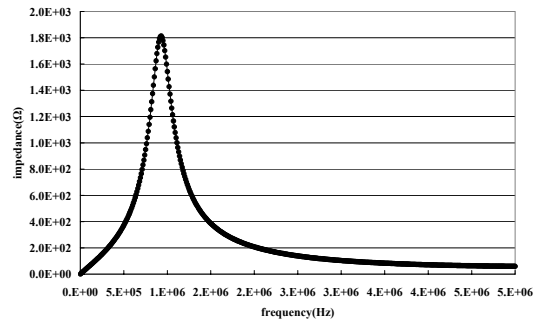


図 8：インピーダンス測定結果

4.4 出力信号

上記共振回路を組み込んだ場合の半導体アンプ出力信号を図 4 に示したデータをもとに解析した。図 4 データからモニターヘッド出力換算の電力を求め、共振回路を組み込んだ場合の出力信号を求めた。図 9 は得られた信号と図 4 のデータを比較したものである。 200kHz 近辺のノイズは $1/10$ 程度に減少するが、 700kHz 近辺のノイズの減少は $1/2$ 程度である。

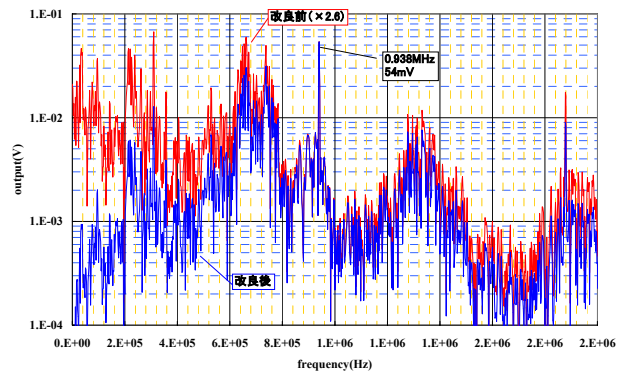


図 9：改良前と改良後の信号強度。改良前のデータは 0.983MHz の信号強度が改良後のデータと一致するように規格化している

5. まとめ

ESM の信号強度の増強と S/N の改善のため、LCR 並列共振回路を組み込んだ狭帯域システム rESM をテストした。試験で使用した共振回路は $Q=3.9$ 、共振時の抵抗が $1.8\text{k}\Omega$ であった。 0.938MHz 信号は 2.6 倍に増幅され、 200kHz ノイズは対信号比で $1/10$ に低減できることがわかった。一方 700kHz ノイズの低減にはさらに低損失な共振回路の設計が必要である。本結果は rESM システムが信号強度と S/N の改善に有効であることを示唆している。

参考文献

- [1] K. Satou *et al.*, "Injection and dumo line monitor system of J-PARC RCS", Proceedings of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Wako, aug. 2007.
- [2] S. Hatakeyama *et al.*, THPS076, in this proceedings.

