

## ONLINE MONITORING OF THE H0 DUMP BEAM CURRENT DURING USER OPERATION OF J-PARC RCS

Shuichiro Hatakeyama<sup>\*A)</sup>, Pranab Saha<sup>A)</sup>, Masahiro Yoshimoto<sup>A)</sup>, Kazami Yamamoto<sup>A)</sup>, Naoki Hayashi<sup>A)</sup>, Kenichirou Satou<sup>B)</sup>,

<sup>A)</sup> Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

2-4 Shirane Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195 Japan

<sup>B)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801 Japan

### Abstract

In J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex), the negative hydrogen ions (H<sup>-</sup>) accelerated by LINAC are converted to protons (H<sup>+</sup>) by the charge stripping foil before injecting into RCS (Rapid Cycling Synchrotron). About 99.6% of H<sup>-</sup> are stripped its two electrons by the 1st foil. The rest of H<sup>0</sup> and H<sup>-</sup> are converted to H<sup>+</sup> by 2nd and 3rd foils and abandoned into H<sup>0</sup> dump. Monitoring of the fraction of beam current into the H<sup>0</sup> dump gives useful information for the stable beam supply during accelerator user's operation. This report describes the method of online monitoring to estimate the beam current of the H<sup>0</sup> dump line.

### J-PARC RCS 供用運転時の H<sup>0</sup> ダンプビーム電流のオンラインモニター

#### 1. はじめに

J-PARC は LINAC (負水素イオン線形加速器)、RCS (早い繰り返しの 3GeV 陽子シンクロトロン)、MR (主リング 30GeV 陽子シンクロトロン) とそれらを繋ぐビーム輸送ラインから構成される。実験施設は、RCS からの 3GeV ビームを利用する MLF (物質生命科学実験施設) と MR からの 30GeV ビームを利用するニュートリノ、ハドロン原子核素粒子実験施設がある。RCS では二つの RF バケツの中に幅 600ns に切り分けられた多数の中間ビームバンチを重複して入射することによりビーム強度を最大 1MW (現在供用運転中は 120kW) まで増大させる。このとき入射ビーム (H<sup>-</sup>) は荷電変換フォイル<sup>[1]</sup> (平均厚み 196 $\mu$ g/cm<sup>2</sup> の炭素膜) によって H<sup>+</sup> に変換される。荷電変換されない粒子は H<sup>0</sup> ダンプに捨てられるが、その電流を測定するために CT (電流モニター、以下 H<sup>0</sup>CT と呼ぶ) と ESM (静電誘導型モニター)<sup>[2]</sup> の 2 種類のモニターが設置されている。本稿では、H<sup>0</sup>CT を用いて H<sup>0</sup> ダンプに流れるビーム電流を常時モニターするための手法を述べる。

#### 2. RCS 入射ビームライン概要

図 1 に RCS の入射・周回ビーム軌道を上方から眺めた概念図を示す。LINAC からビーム輸送ライン (L3BT) を経由して来た H<sup>-</sup> と、周回軌道の H<sup>+</sup> はシフトバンパ (SB1, SB2) の磁場によって対照的に内側に偏向され同一軌道に乗る。入射された H<sup>-</sup> は第 1 荷電変換フォイルで約 99.6% が電子を 2 つ剥ぎ取られ H<sup>+</sup> となりシフトバンパ (SB3, SB4) によって周回ビームと同じ方向に偏向される。一方、第 1 荷電変換フォイルで変換されずにわずかに残った H<sup>0</sup>、H<sup>-</sup> は、第 2、第 3 フォイルによって H<sup>+</sup> に変換された後、H<sup>0</sup> ダンプラインに導かれダンプされる。この図では H<sup>0</sup> ダンプラインにある H<sup>0</sup>CT 以外の機器は省略してある。RCS では入射ビームを位相空間上に一様に分布させるペイント入射を行っており、

実際には入射軌道は周回軌道に対してオフセットと角度を持っている。1 サイクル分のビームが入射されると、フォイルとの多重散乱によるビームロスをなくすためにシフトバンパの磁場はゼロになり周回ビームは加速され、キッカー電磁石で MLF と MR に向け取り出される。以上のサイクルが 25Hz で行われる。

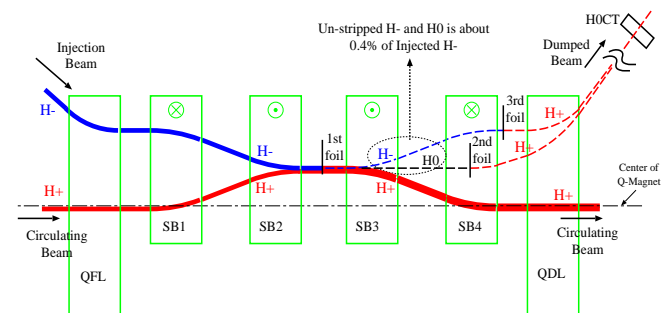


図 1: RCS 入射・周回軌道の概念図

#### 3. H<sup>0</sup>CT 測定系

H<sup>0</sup>CT は H<sup>0</sup> ダンプの直前に設置された電流モニターで、コアには比透磁率  $2.3 \times 10^4$  ( $f < 1$  kHz), 内径 245mm, 外径 285mm, 厚さ 75mm のファインメットを用い、20 ターンのコイルを巻き付けてある。測定系を図 2 に示す。H<sup>0</sup>CT の信号は加速トンネルから分離されたメンテナンス用のトンネルにあるゲイン 100 倍のプリアンプで増幅され、地上部の制御室にあるバッファアンプに接続される。バッファアンプの出力は 3 系統に分かれ、そのうち 2 系統は積分器を通った後、H<sup>0</sup> ダンプの容量 (4kW) を越えないためのインターロックとして使用される。残りの 1 系統は、オシロスコープに接続され、EPICS<sup>1</sup> の IOC (Input Output Controller) によって波形が読み込まれる。

<sup>1</sup>ANL, LANL で開発された加速器や大型測定装置のための分散型制御システム及びソフトウェア開発環境

\* hatake@post.j-parc.jp

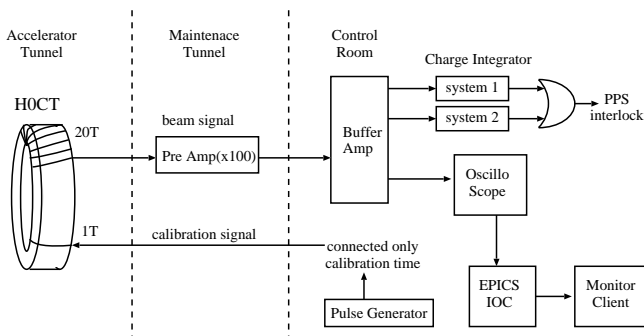


図 2: HOCT 測定系

#### 4. 波形生成器を用いた HOCT の校正

HOCT には 1 ターンの校正用のコイルが巻いてあり、それに任意波形生成器からビームの模擬信号として幅 600ns、繰り返し 0.94MHz (RCS 181MeV 入射時の RF 周波数) の矩形パルス信号を送って校正を行った。図 3 は模擬波形 (下段: 黄色) と HOCT の出力波形 (上段: 青色) のスクリーンショットである。

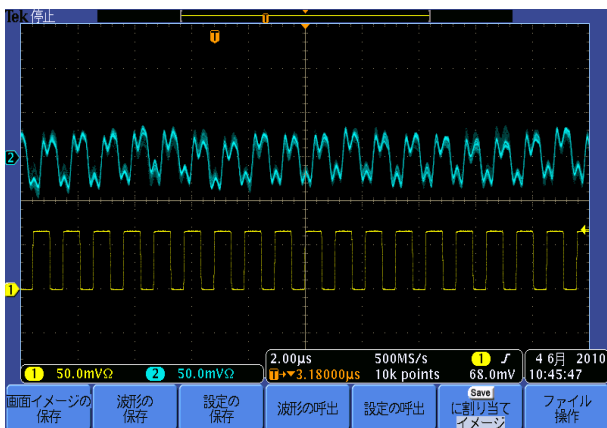


図 3: 校正用模擬信号 (下) と HOCT 出力波形 (上)

図 4 は HOCT への入力波高が 265mV のときの HOCT の出力信号をオシロスコープで 1024 回平均したときの波形である。上のグラフが時間領域、下が周波数領域で表示している。周波数領域への変換は、EPICS でデータ取得後、式 (1) の離散フーリエ変換を行った。

$$Y_m = \sum_{n=0}^{N-1} W_n \cdot X_n \cdot e^{-2\pi i \frac{m \cdot n}{N}} \quad (1)$$

ここで  $Y_m$  は  $m \times 5\text{kHz}$  の周波数領域での振幅、 $X_n$  は  $n \times 10\text{ns}$  の時間領域での振幅、 $i$  は虚数単位、 $N=20000$  である。離散フーリエ変換のツールとして、MIT で開発されたフリーソフトである FFTW (ver.3.1.2) を用いた。また FFTW には窓関数が実装されていないので、自前で式 (2) の Blackman 関数を当てはめ使用した。

$$W_n = 0.42 - 0.5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) + 0.08 \cos\left(\frac{4\pi n}{N}\right) \quad (2)$$

図 4 の周波数領域の波形の 4 つのピークは、それぞれ 0.94MHz の基本波、2、3、4 倍の高調波である。

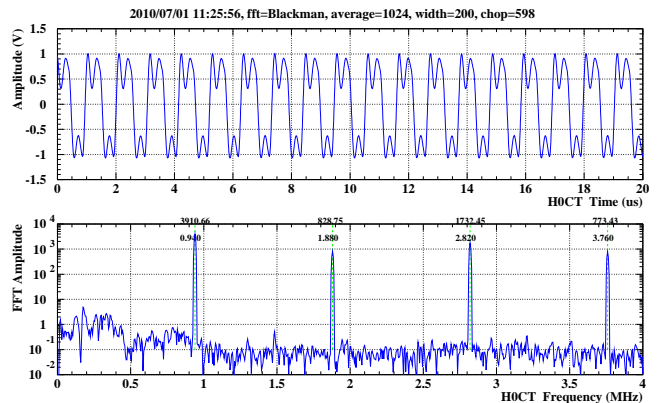


図 4: 入力 265mV : HOCT 出力波形

図 5 は入力波高が 1.5mV のときの HOCT の出力波形である。時間領域表示では外来ノイズにより歪んで見えるが、周波数領域では 0.94MHz の基本波のピークがはっきりと見える。J-PARC の供用運転時に予想される HOCT の出力波高は LINAC からのビーム電流が 16mA として 10mV 程度であるので十分検波可能である。

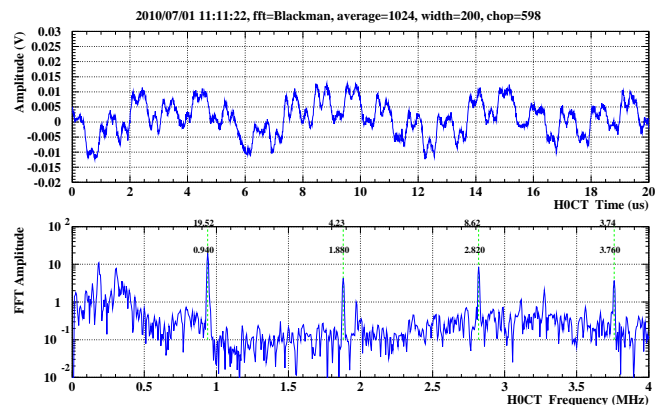


図 5: 入力 1.5mV : HOCT 出力波形

図 6 の上のグラフは、横軸が入力波高 (mV)、縦軸が HOCT の 0.94MHz の基本波を検波したときの振幅 (単位はカウント数) である。1 点につき 10 回データをとっており、誤差棒は標準偏差を  $\sigma$  として、 $\sigma/\sqrt{10}$  である。青い線は直線でフィットしたときの結果で傾きは 14.89 count/mV となった。図 6 の下のグラフはデータの平均値とフィットした直線の相対的なずれを表しており、1mV 以上では  $\pm 1\%$  以下の精度であっている。

#### 5. 入射ビームを用いた電流値の規格化

HOCT で測定されるビーム電流の絶対値を規格化するために第 1 荷電変換フォイルをビームライン上から抜き 100% H0 ダンプにビームが行く状態で測定した。図 7 はそのときの HOCT の波形である。入射ビームの条件は MLF 行きの供用運転と同じく、イオン源のマクロパルス幅が 200µs、チョップされた中間バンチのパルス幅が

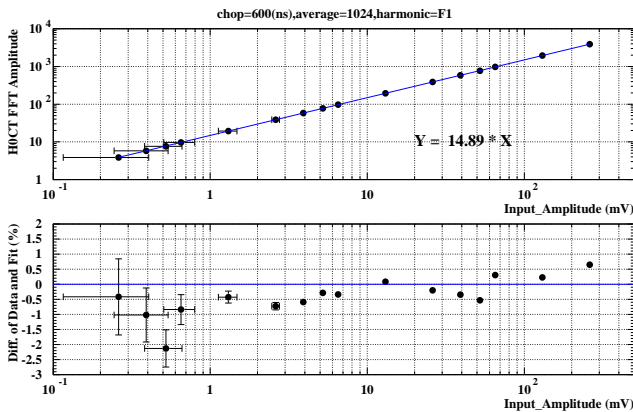


図 6: 入力波高と出力波高 (FFT) の線形性

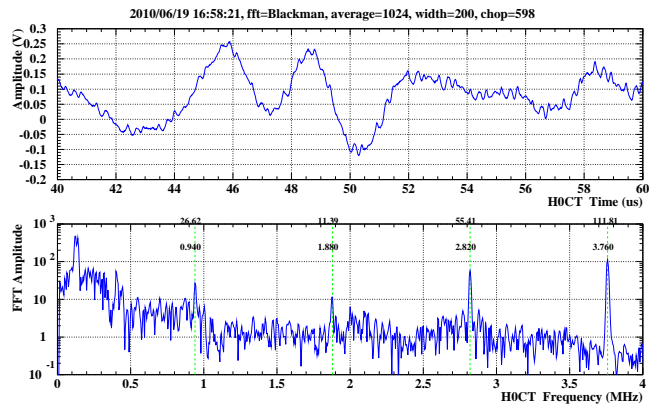


図 8: MLF 供用運転中の H0CT 波形

600ns、横方向ペイント 150π、縦方向ペイントありで、繰り返しはダンプの容量を越えないように 1Hz で 32 サイクル分の波形の平均値を取った。0.94MHz の基本波の振幅は 7680 カウントであった。このときの RCS に入射する直前のビーム電流は L3BT に設置された SCT76 の電流値を用いて測定され、平均値で 16.85mA であったので 456count/mA という結果となった。

図 9 に今年の 6/17 から 6/24 の 7 日間の MLF 行き H0CT(上段: 緑) と L3BT-SCT76(中段: 青) の電流値の変化を示す。下段の赤いプロットは H0CT と L3BT-SCT76 の電流値の比率で、およそ 0.2~0.3% で安定して推移している。一部大きく変動しているところは、試験中で中間バンチ数を間引いたりパルス幅を変えたりして基本波のピークの規格化が適用できなかったところである。

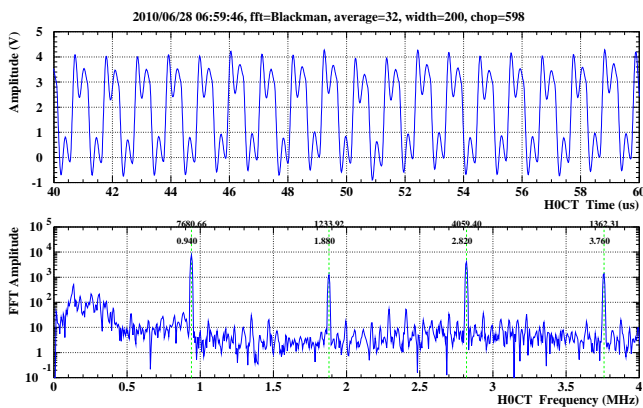


図 7: 100% ダンプさせたときの H0CT 波形

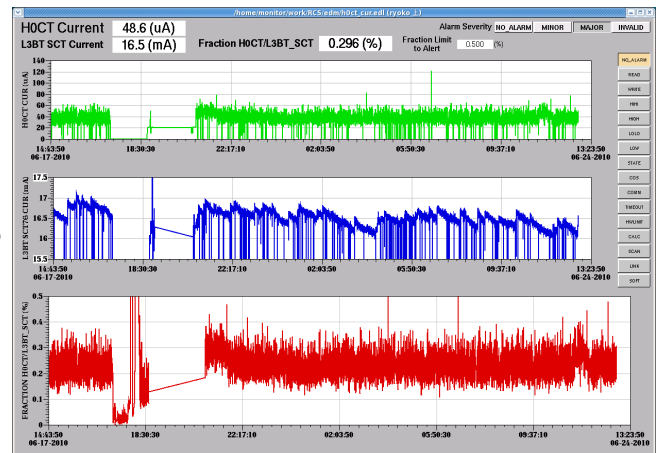


図 9: 7 日間の H0CT(緑)、L3BT-SCT76(青) の電流値と比率 (赤) の変化

## 6. 供用運転中の H0CT の電流値の変化

今年の 6 月の供用運転中はマクロパルス幅と繰り返し、MLF 行きが 200μs/25Hz、MR ニュートリノ行きが 500μs/0.284Hz であった。H0CT の電流モニターは S/N をよくするために、1024 回波形を平均するため、25Hz の MLF 行きのビームのみ選んで電流値のモニターを行った。

図 8 に MLF 供用運転中の H0CT の波形を示す。入射電磁石機器からのノイズが信号線にのっているため時間領域では中間バンチの波形は殆ど見えない。周波数領域では 0.94MHz の基本波がかろうじて検波できる。3.76MHz の 4 倍高調波のピークは基本波より 4 倍近く高いがスケールが比例直線にのらないので、ビーム電流測定には基本波の方を用いることにした。

## 7. まとめ

J-PARC の MLF 供用運転中の H0CT の電流値を連続的にモニターした。入射ビーム電流に対する比率は約 0.2~0.3% で安定して推移している。これからの課題として入射機器のノイズ対策をして測定精度を上げていきたい。

## 参考文献

- [1] M.Yoshimoto, et al., "Improvements of the Charge Exchange System at the 3GeV RCS in J-PARC", Proceedings of IPAC10, Kyoto, May 2010.
- [2] K.Satou et al., "Injection and dump line monitor system of J-PARC RCS", Proceedings of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Wako, Aug. 2007