

IFMIF/EVEDA 加速器の入射器試験における Pulse Duty 管理システムの開発

DEVELOPMENT STATUS OF PULSE DUTY MANAGEMENT SYSTEM FOR INJECTOR COMMISSIONING OF IFMIF/EVEDA ACCELERATOR

高橋博樹^{#, A)}, 成田隆広^{A)}, 宇佐美潤紀^{A)}, 榊泰直^{A)}, 小島敏行^{B)}

Hiroki Takahashi^{#, A)}, Takahiro Narita^{A)}, Hiroki Usami^{A)}, Hironao Sakaki^{A)}, Toshiyuki Kojima^{B)}

^{A)} IFMIF Accelerator Development Group, JAEA

^{B)} Gitec Co., Ltd.

Abstract

The Personnel Protection System (PPS) for Linier IFMIF Prototype Accelerator (LIPAc) manages the entering/leaving to/from the accelerator vault to protect the personnel against the radiation. On the other hand, the amount of D+ beam current from Injector has to be managed according to the government license. Then, in the LIPAc injector commissioning phase, PPS also manages the amount of D+ beam current by the measurement of D+ beam output time. Then, to measure and manage the D+ beam output time, Pulse Duty Management System (PDMS) was designed and developed as the PPS subsystem. And, the performance of PDMS was tested at the Injector commissioning with H+ beam. From the result of test, it is confirmed that the developed PDMS has the enough performance for safety to measure and manage the D+ beam output time.

The outline of PDMS, the result of performance test and the development status is presented in details.

1. はじめに

国際核融合材料照射施設 (IFMIF) に関する工学実証及び工学設計活動 (EVEDA) におけるプロトタイプ加速器 (Linear IFMIF Prototype Accelerator: LIPAc) は、9MeV/125mA の大強度 CW の重陽子ビームを生成する。LIPAc を構成する入射器、RFQ、SRF Linac、Beam Dump などは、それぞれが EU 側プロジェクト実施機関 (CEA、INFN、Ciemat) において開発された後、順次、日本の六ヶ所サイトに輸送され、機器の据付調整およびビームコミッショニング試験が実施されることとなっている[1]。

LIPAc の初段機器である入射器は 2013 年に日本に輸出され、据付調整が行われた後、2014 年 11 月より H+ビームによる入射器ビームコミッショニング試験が開始された。そして、2015 年 7 月には放射線障害防止法の施設検査に合格し、現在、D+ビームを用いた入射器ビームコミッショニング試験が行われている。

放射線障害防止法 (障防法) に基づく入射器運転においては、D+ビーム出力時間を管理することが許認可条件となっている。そのため、D+ビーム出力時間を管理するための Pulse Duty 管理システムを開発し、その機能を入射器の H+ビームを用いて確認した。

2. Pulse Duty 管理システム

2.1 D+ビーム出力時間の制限値

D+ビームを用いた入射器ビームコミッショニング

の試験計画においては、1% duty、10% duty および CW (Continuous Wave: 100% duty) の運転モードと、それぞれのモードが必要とする試験時間が想定されている (Table 1)。入射器のコミッショニング試験後に RFQ 等の据付作業が計画されていることから、入射器の放射化を最小限にする必要があるため、この想定される試験時間を、許認可上の制限値とすることが望ましいと判断した。一方、入射器においては、電流値を計測するためのモニター機器 (CT) が据え付けられていないため、正確な粒子数の計測が困難である。そのため、本許認可においては入射器の性能上の上限値 100 keV、250mA をビームパラメータとして用いることとした[2]。

以上の試験計画と入射器のモニター機器条件より、障防法の許認可条件として、入射器の D+ビーム出力時間を 3 ヶ月 (91 日) 当たり 58.4 時間、1 週間当たり 40 時間 (8 時間×5 日) を制限とする運転管理を行うこととした。そして、この運転管理を実現するために、Pulse Duty 管理システム (PDMS) を構築することとした。

Table 1: Operation Parameter for Injector Commissioning with D+ Beam

Operation mode	Beam Energy & Current	Duty	Limited Operation Time per 3 months
Pulse	100 keV , 250 mA (fixed)*	1 %	2.4 hours
		10 %	16.0 hour
CW		100 %	40.0 hour

*: government licensed condition

[#] takahashi.hiroki@jaea.go.jp

2.2 入射器のビームとタイミング信号の関係

入射器のビーム運転は(1) PPS beam permit、(2) タイミング信号出力、(3) ECR RF ON の手順で開始される。PDMS を設計するため、最初にこの手順において、入射器の運転モード (Pulse、CW) におけるビーム出力開始とタイミング信号の関係を H+ビームを用いて (電離則の下での入射器運転において) 計測した。Pulse モードにおける計測結果を Figure 1 に、CW モードにおける測定結果を Figure 2 に示す。Figure 1 より Pulse モードにおいてはタイミング信号 (RF ゲート信号) が出力されている時のみビームが出力されており、“タイミング信号の幅” = “ビーム出力時間” となっていることが分かる。また、タイミング信号出力状態の途中よりビームの出力が開始されていることから、ビーム出力開始はタイミング信号の立ち上がりエッジとは無関係であることも分かる。一方 Figure 2 より、CW モードにおいてはタイミング信号とは全く無関係にビームが出力されることが明らかとなった。

以上の結果より、Pulse モードにおいては、(1) PPS beam permit と(3) ECR RF ON の AND 状態において、

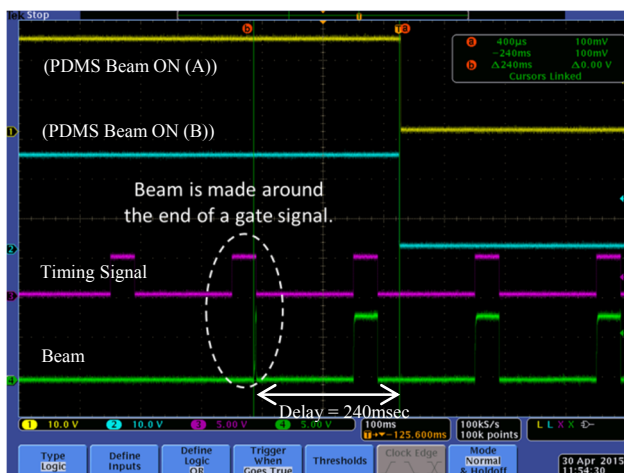


Figure 1: Relation between beam and timing signal (Pulse mode).

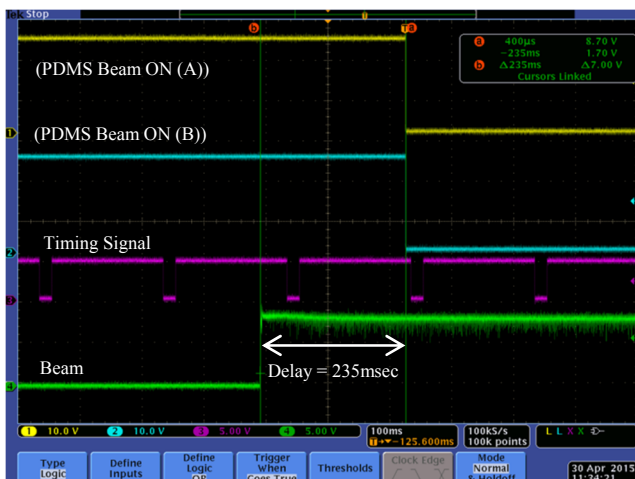


Figure 2: Relation between beam and timing signal (CW mode).

“タイミング信号の幅”をビーム出力時間として計測することとした。また、CW モードにおいては、タイミングゲート信号とは無関係にビームが出力されることから、(1) PPS beam permit と(3) ECR RF ON の AND 状態が成り立っている時間を、ビーム出力時間とすることとした。

2.3 Pulse Duty 管理システム (PDMS) の構成

LIPAc 制御系の PPS (Personnel Protection System) は、加速器室への人員の入退出を監視して放射線などの危険因子から人員を保護する機能、及び、加速器ビーム運転時の許認可に係る運転管理機能をもつ重要なシステムである[3]。従って、PDMS は入射器の運転管理の一部機能を担うことから、PPS のサブシステムとして設計・開発することとした。PPS はハードワイヤで信号を授受し、また二重化のシステム構成とすることを基本設計としていたことから、PDMS も同様の構成とした。PDMS の機能ブロック図 (Function Block Diagram) を Figure 3 に示す。

PDMS は GSC (Gate Signal Counter) と PLC-D (PLC Duty) から構成されており、何れも二重化 (A 系、B 系) されている。GSC は入射器のタイミング信号 (RF ゲート信号) の幅を計測する。タイミング信号の幅は、タイミングシステムと同じ基準クロック (12MHz) を用いて FPGA により計測している。一方、PLC-D は入射器が運転状態 (PPS beam permit と ECR RF ON の AND 状態) を判断し、運転状態においては GSC が計測したカウント値を積算する。これにより、2.2 の Pulse モードの計測ロジックを実現する。また、2.2 の CW モードにおいては PLC-D は GSC のカウント値ではなく、PPS beam permit と RF ECR ON 状態である時間を PLC-D の内部クロックにてビーム出力時間として計測する。何れの運転モードにおいても、PLC-D はビーム出力時間が制限値を越える場合には、Permit Cancel 信号を PPS の PLC に送信する。PPS PLC は Permit Cancel 信号受信後、直ちに入射器の運転許可信号 (PPS beam permit) をキャンセルし、入射器は速やかに停止される。

3. ビーム出力開始/停止ディレイ測定

ビーム出力時間管理においては、積算時間が過小にならないようにする必要がある。一方で、入射器の制御系機器には PLC が使用されているため、その設定やシーケンスによっては、(1) “実際のビーム出力開始時間” と “PPS がビーム出力されたと認識する時間 (ECR RF ON 信号受信)” および(2) “PPS がビーム停止信号出力 (PPS beam permit の Cancel) 後” と “実際にビームが停止される時間” において、それぞれ大きな遅延が生じる可能性が否定できない。そこで、開発した PDMS を組み込み、入射器の H+ビーム運転において遅延時間の測定を行った。

(1)については、2.2 の測定結果 (Figure 1 および Figure 2) において明らかであり、PPS がビーム出力開始を認識した時間 (PDMS Beam ON 信号が 1→0 になる) より約 240msec 前に入射器からビームが出力されていることが分かる。複数回測定を行った結

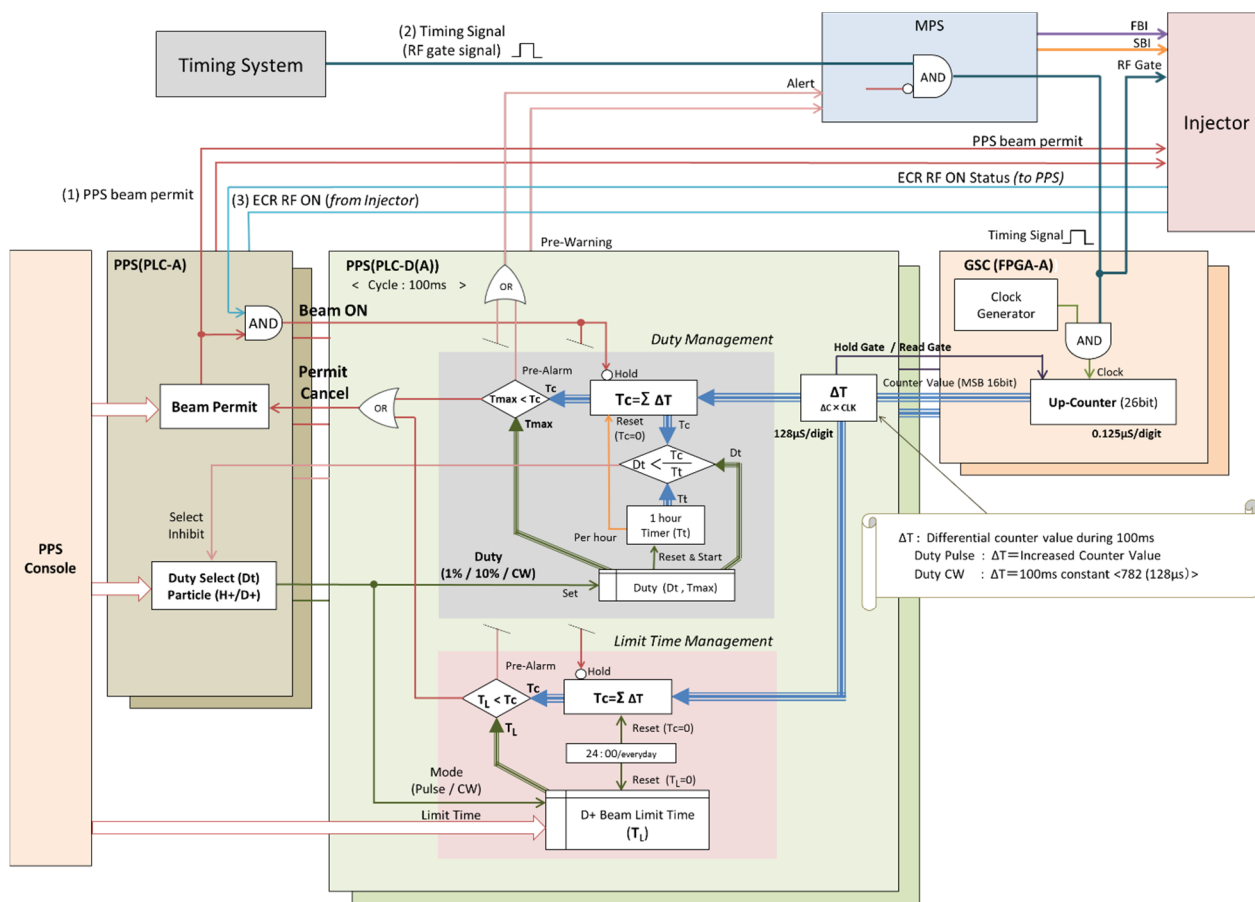


Figure 3: Functional block diagram for integrated time of D+ beam.

果、PDMS Beam ON 信号より 200msec~300msec 前にビームが出力されることが分かった。これはビーム開始時において、その都度ビーム出力時間が最大約 300msec 過小評価されることを意味する。

次に CW モード (HV:50 kV) において(2)を測定した結果を Figure 4 に示す。Figure 4 より、PPS のインターロック発報 (PDMS Beam ON 信号が 0→1 になる) から約 280msec 後にビームが停止していることが分かる。複数回測定を行った結果 200~350msec の

ディレイとなることが明らかとなった。これは PPS のインターロックによるビーム停止時に、その都度ビーム出力時間が最大約 350msec 過小評価されることを意味する。

以上より、ビーム出力時間が過小となることを避けるために、測定結果にマージン (実測定値の 2 倍 + α) を考慮し、

- ビーム出力開始 (ECR RF ON) 時にビーム出力時間を 1 秒加算
- ビーム停止時 (ECR RF OFF or Permit cancel 時) にもビーム出力時間を 1 秒加算

という 2 つのロジックを、PLC-D のビーム出力時間積算機能に組み込むこととした。なお、ビーム停止時においては、上述で加算される 1 秒および PPS PLC と PLC-D 間の信号伝達時間などを考慮し、ビーム出力制限時間の 1.5 秒前に PPS がインターロック発報するロジックとした。

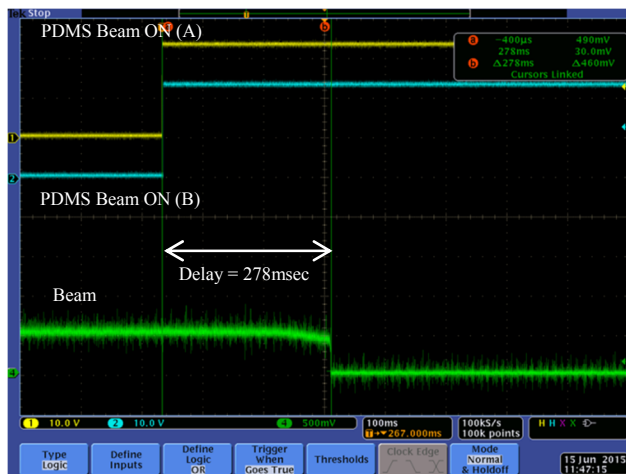


Figure 4: Relation between beam and PPS permit cancel.

4. PDMS 機能試験

「3.ビーム出力開始/停止ディレイ測定」におけるビーム出力開始時、停止時の加算時間を考慮した PDMS における機能試験を H+ビームを用いて実施した。機能試験においては

- ビーム出力開始時
PPS beam permit と ECR RF ON の AND 状態成

立時→ビーム出力時間が 1 秒加算される

ii) ビーム停止時:

PDMS Permit Cancel 後、1.5 秒未満でビームが停止する

こと確認し、ビーム発生時間が過小評価せず、且つ、ビームを制限時間以上出力させない、ビーム出力時間管理を本システムが実現することを確認した。

i)については、Pulse モードにおいてタイミング信号が出力されていない状態で試験を実施し、AND 状態成立とともにビーム出力時間が 1 秒となることにより、過小評価しないための機能を有していることを確認した。

次に ii)について行った機能試験の例として 10%運転時と CW 運転時の結果を Figure 5 と Figure 6 にそれぞれ示す。Figure 5 においては、PDMS Permit Cancel をキャンセル (1→0) した後約 300msec において、タイミング信号の立ち上がり同期してビームが出力された直後にビーム停止していることが分かる。また Figure 6 においては、PPS PLC-A と -B が非同期に動作しているが、PLC-A の方がより早く PDMS Permit Cancel をキャンセルし、その信号から約 260msec 後にビーム停止されていることが分かる。動作確認試験は 1%、10%および CW の各運転モードについて、様々な場合を想定して実施したが、全ての試験について PDMS Permit Cancel をキャンセルした後 1.5 秒未満でビームが停止することを確認した。以上の結果より、許認可の条件を満足するビーム出力時間管理が本システムにより実現されることが確認できた。

5. まとめ

入射器の D+ビームを用いたコミッショニング試験において、許認可に基づいた D+ビーム発生時間を管理するために、PPS のサブシステムとして Pulse Duty 管理システム (PDMS) を設計・開発し、その機能試験を入射器のコミッショニング試験において H+ビームを用いて実施した。その結果から、開発した PDMS が、PPS PLC と入射器 PLC 間の信号授受等による遅延時間を十分考慮していることを確認した。開発した PDMS により、ビーム発生時間が過小評価せず、且つ、ビームを制限時間以上出力させない、適切なビーム出力時間管理の実現に成功した。

これらの結果より、PDMS によるビーム発生時間管理機能は、2015 年 7 月の放射線障害防止法の施設検査に合格することができた。これにより D+ビームを用いた入射器ビームコミッショニング試験を開始することができた。

LIPAc の次の段階として 2016 年から RFQ のビームコミッショニング試験が予定されている。RFQ の試験においてはビーム電流による管理を行うことが想定されるが、本システムの経験を生かし、信頼性の高いビーム管理システムの設計・開発を行う予定である。

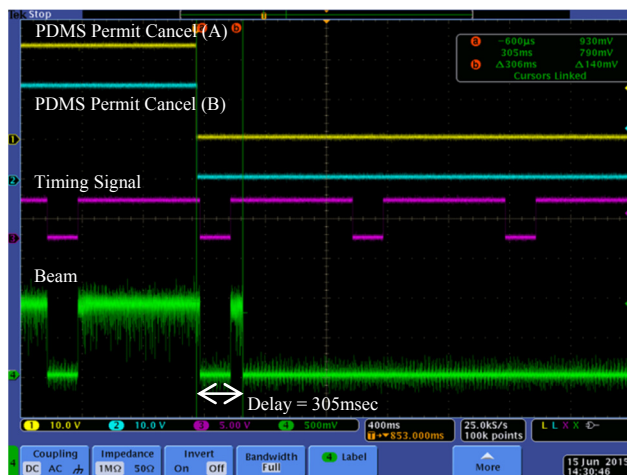


Figure 5: Result of PDMS performance test (10% mode).

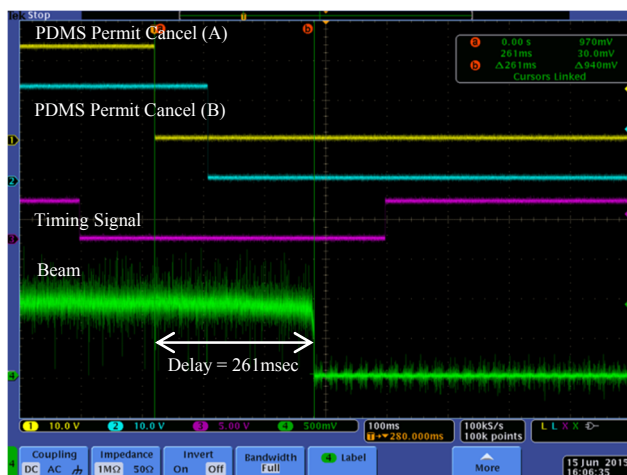


Figure 6: Result of PDMS performance test (CW mode).

参考文献

- [1] A. Mosnier et al., "Present Status and Developments of the Linear IFMIF Prototype Accelerator (LIPAc)", <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2012/papers/tpp075.pdf>
- [2] H. Takahashi, et al., "Safety managements of the linear IFMIF/EVEDA prototype accelerator", <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920379614001483>
- [3] T. Kojima, et al., "Development Status of Personnel Protection System for IFMIF/EVEDA Accelerator Prototype", <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/icaleps2011/paper/s/wepmu028.pdf>