

J-PARC LINAC用高速インターロックシステムの設計

榎 泰直^{1,A)}、中村直樹^{A)}、吉川 博^{A)}、上田晋司^{B)}

A) 日本原子力研究所 大強度陽子加速器施設開発センター
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方 2-4

B) 三菱電機株式会社 電力・産業システム事業所 磁気応用先端システム部
〒652-8555 神戸市兵庫区和田崎町 1-1-2

概要

大強度陽子加速器線形加速器では、その強烈なビームパワーにより、ビームトラブルが発生した際には最上流部では2 μ 秒以下でビーム停止動作を完了しなければならない。このような要求から、我々は今回機器保護のための高速ビーム停止インターロック系を設計するに至り、インターロック動作時間を確認するための試作機製作をおこなった。試作機実測による、ビーム停止処理動作予測時間は $\sim 1.05\mu$ 秒と非常に高速であり、実機での高速ビーム停止動作を確保できる目処を立てることができた。

1. はじめに

大強度陽子加速器(J-PARC)では、加速陽子ビームが加速器コンポーネントに衝突するようなイベントが発生した場合、コンポーネントに大きなエネルギー付与が行われる可能性があることが、米国の大強度陽子加速器プロジェクトであるSNS(Spoliation Neutron Source)で指摘されている^[1]。このような、高エネルギーの付与が加速構造体表面付近で起こると、その表面は大きな熱衝撃損傷を受け、構造体は致命的な物理的ダメージを受けかねない。SNSと比較してさらに大電流を加速するJ-PARC線形加速器において、致命的な熱衝撃損傷を回避するためにはどの程度の時間までビームを構造体に衝突させて良いのかという許容時間が、非常に大きな問題となる。そのような経緯から、ビームが衝突した場合の熱衝撃損傷ダメージからの保護・回避方法するインターロックシステムの設計を行うことになった。

2. J-PARC/LINACでの熱衝撃損傷許容時間

SNSのレポートによれば、熱衝撃損傷を避けるために2.5MeV \sim 86MeVという非常に低いエネルギー領域において、高速応答性が求められる。ここでは、通常運転時ビーム(ピーク電流36mA、2mm \times 2mmサイズ)のエネルギーが7.5MeV以下ならば、ビーム衝突許容時間は、3 μ 秒以下、さらに87MeV以上ならば13 μ 秒以下の時間しかない許容されないと報告されている。

J-PARC/Linacでは、最大50mAのピーク電流の加速

が予定されており、熱衝撃損傷許容時間はいっそう厳しいものになることが予想される。そこで、電子線形加速器で同様な計算を行ってきた核燃料サイクル開発機構の武井氏に、J-PARC/Linacでの熱衝撃損傷許容時間の計算を依頼^[2]した。J-PARC/Linacにおいて、陽子ビームの熱衝撃損傷に対する計算結果は、図1のとおりであり、3MeVまで加速するRFQ直後においては $\sim 2\mu$ 秒という非常に厳しい許容時間となる。

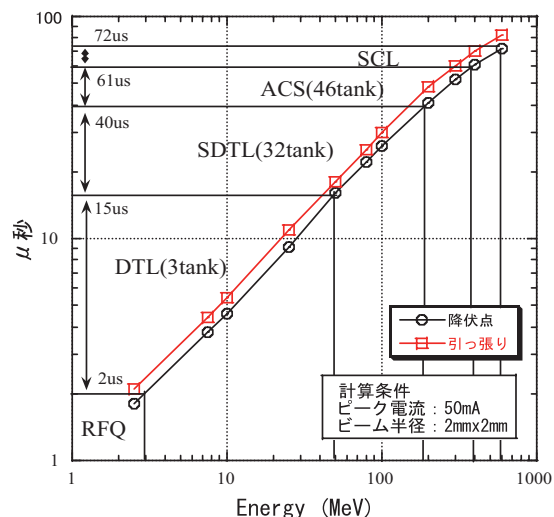


図1: J-PARC/Linacでの最大熱衝撃損傷許容時間

さらに、50MeVまで加速されるDTLにおいても、2 \sim 15 μ 秒の許容時間と非常に厳しい時間制限を受ける。よって、熱衝撃損傷を避けるには、加速ビームは1ショットビーム内(ビーム幅500 μ 秒)で停止させる必要があるということになる。この計算は、あくまで50mA陽子ビームが2mm \times 2mmサイズで衝突することが想定されたものである。コミッシュニングなどのビーム条件が緩やかな場合はこの応答速度は要求されないとと思われるが、最悪の場合を考えて検討すると、安全をみてRFQ近辺でのビーム停止処置は、 $\sim 1.5\mu$ 秒程度以下で行われる必要がある。

以上から、J-PARC/Linacの機器保護用インターロックに要求される、RFQ近辺でのビーム衝突イベントからビーム停止までの応答時間の目標値を1.5 μ 秒にする方針とした。

¹ E-mail: sakaki@linac.tokai.jaeri.go.jp

3 . 高速インターロックシステム設計

3.1 PPSとMPS

加速器施設に於いて、インターロック系といえば、

- ・放射線発生装置による放射線障害防止に関する法令(いわゆる障防法)上求められる最低限の人的安全管理用インターロックシステム(J-PARCではPersonnel Protection Systemから、PPSと呼ぶ)。
- ・加速器施設構成機器を高エネルギービーム衝突によるダメージから守る、機器保護用インターロックシステム(J-PARCではMachine Protection Systemから、MPSと呼ぶ)。

の2点が挙げられる。

PPSは、法律上放射線安全申請が義務づけられたシステムであり、人員の安全確保のために特化した独立性・冗長性・信頼性が高いシステムが要求される。それに対してMPSは、PPSとは完全に切り離された従属システムであり、PPSの成立があって始めてビーム運転が可能となり、ビームによるダメージから機器を保護するMPSが成り立つことになる。先の章で述べられたビームダメージからJ-PARC/Linacを保護するためには、ビーム挙動異常が検知された時、高速にビームを停止させるMPSが必要である。

3.2 MPSの設計方針

機器保護のみを考慮したMPSの設計は、以下の方針で行うことにする。

- ・MPSでは、ビーム挙動異常が検知されると、高速にビームを停止させる動作のみを行う。
- ・ビーム停止後の運転再開は待ち時間が短く、ビーム特性の再現性を高くする。
- ・誤動作が少ない信頼性の高いシステムにする。
- ・長期的な保守性、汎用性が高いシステムにする。

MPSは、インターロックを検知した際にビームを停止させる動作のみを行うが、J-PARC加速器施設の稼働率を上げるためには、MPSでビームが停止した後(インターロック要因の復旧後)、直ちに再現性よくビーム運転が開始されなければならない。また、インターロック系に、高速性を追求すると、ノイズによる誤動作が起こりやすくなることは否めない。誤動作は、信頼性を落とすだけでなく、運転時間の確保にも影響するために、「誤動作はほぼゼロ」になる様な設計を行わねばならない。

本インターロックシステムを構成する部位はJ-PARC/Linacのみで使用されるだけでなく、高速応答が求められる他施設でも使用されると思われる。よって、リレー接点など低速応答性にも対応可能なように、汎用性が考慮された設計にする。

3.2 ビーム挙動異常の高速検知

ビームによる熱衝撃損傷から機器を保護するには、とにかく高速にビーム衝突が発生しているというイベントを捕らえなくてはならない。一般に、加速ビームが加速構造体などに衝突していることを検知するには、ビームロスモニタ(BLM)と呼ばれるモニタが使用される。そこで、MPSでは、モニタグループが開発しているBLMの高速応答性能(数百ナノ～数μ秒)をもって、インターロックシステムを構築していくことにした。

3.3 高速ビーム停止手順

ビーム停止による機器保護だけでなく、施設全域の稼働率を向上させるためには、BLMによるビーム衝突検知が行われた際、ビーム停止させるにはどのように対応するのが最適であるかが問題となる。言わずとも、ビームはエネルギーの低い最上流で完全に遮断し停止させることが、放射化を最低限に抑えられ後々の加速器機器の保守を容易にする。

よってMPSでは、以下のような ~ のビーム停止ロジックを取り、インターロック要因が解除されると直ちに運転が再開され、施設の稼働率が向上するように設計する。

- ・ BLMによるビーム衝突イベント検知
- ・ MPSによるインターロックイベントの通知
- ・ RFQ部クライストロンローレベルのPINスイッチ遮断によるビーム加速停止
- ・ イオン源直後のビームストップ投入
- ・ ビームストップ投入後直ちにRFQにRF再投入

このような動作を実行するには、BLMの検出結果を高速かつ信頼性高くRFQのPINダイオードまで伝達するMPS装置の開発が必要となる。

3 . 試作インターロックユニットの製作

BLMからのインターロック情報を高速に伝送するために、信号伝送用のインターロックユニットを製作した。このユニットは、MPSの設計方針である汎用性と保守性が考慮されたものであり、用途による交換等が容易なようにモジュール化されている。また、高速性を求めるために、モジュール内でのインターロック処理速度は、0.5μ秒程度になるように目標値を設定している。



ノイズ対策としては、フォトカップラ絶縁によって外部と内部処理回路を切り離す対策を施している。このユニットの写真を、図2に示す。

4. 試作インターロックユニット試験

製作された試作ユニットを用いて、その動作応答時間を計測した。図3に計測結果の1例を示す。これは、2台のインターロックユニットを75mのケーブルで接続し、一方にインターロック模擬信号を入れてから、他方でその信号が検知されるまでの経過時間を計測したものである。

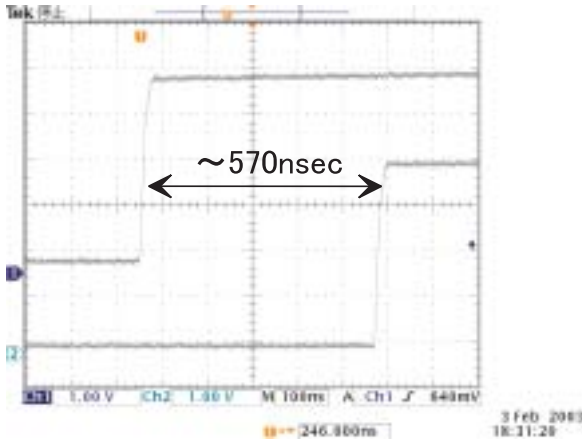


図3: 75mケーブルを使った伝送処理時間

ケーブル長を様々に変えて、経過時間を計測し、

モジュールの処理速度等を求めたところ、

インターロック信号cable伝送速度: 4.7n秒/m
1モジュール内処理速度: 130.7n秒

という数値を得た。

この試作機の応答から得られた結果を考慮して、J-PARC/Linac内のインターロック処理時間予測を求めると、図4で示されるような結果となった。

これによれば、システムの応答は最高速が要求されるRFQ・DTL部分付近において、~1.05μ秒であり、目標設計値の~1.5μ秒を下回り熱衝撃損傷に耐えられる速度が達成できることが分かる。

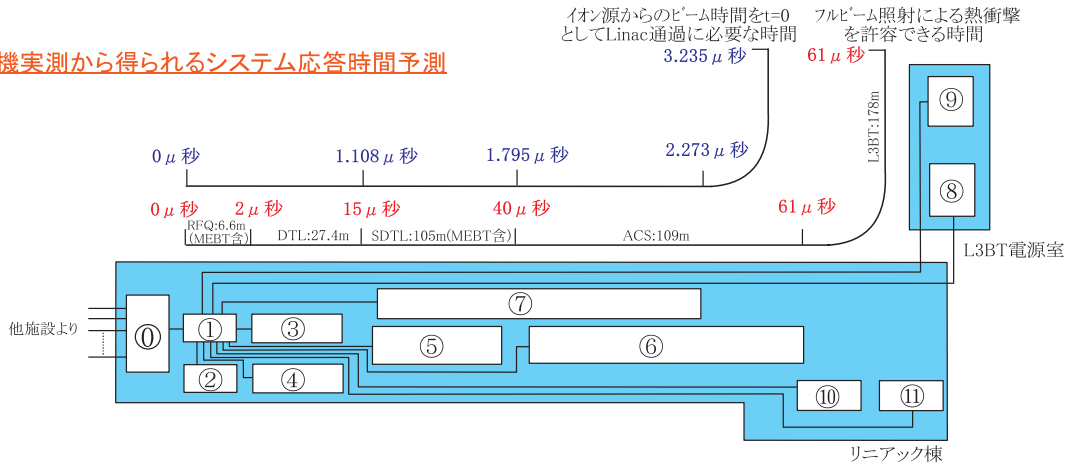
6. まとめ

高速ビーム停止用のインターロックモジュールを試作し、その試作機が非常に厳しい停止要求時間に応じられることが確認された。今後は、これらのモジュールを組み合わせて、効率的な加速器施設の運転が可能となるシステムを設計し、平成17年に稼動する実機の運転に用いることとなる。

参考文献

- [1] R.E.Shafer, "How Long a SNS Beam Pulse would Damage a Copper Accelerating Structure?", SNS Home page rev. 4/20/01 (2001).
- [2] 武井, "熱衝撃による金属の破壊について", 私信, 2002.

試作機実測から得られるシステム応答時間予測



時間単位: μ秒																
ブロック名称	経路	ブロック間ケーブル長 (m)	ケーブル種別	単位長当たり伝送速度 (μ秒/m)	ブロック間伝送時間(α)	unit単位処理時間 (I)	ILKunit台数(II)	RS-485単位処理時間(III)	ブロック内unit総処理時間 (β=I+II*III)	ブロック内ケーブル長 (m)	ブロック内ケーブル総伝送時間(γ)	ILKunit総処理時間 (α+β+γ)	陽子速度 (μ秒/m)	ロスモニタ検出処理時間(δ)	総処理時間 (α+β+γ+δ)	熱許容時間
Control室	①-⑩	35	RS-485	0.005	0.175	0.13	2	0.03	0.19	10	0.05	0.42	-	-	0.42	-
IS&RFQ	①	0	RS-485	0.005	0	0.13	1	0.03	0.16	0	0.00	0.16	0.060	0.89	1.05	2.0
ISPS室	①-②	30	RS-485	0.005	0.15	0.13	1	0.03	0.16	0	0.00	0.31	0.060	0.89	1.20	2.0
DTL	①-③	20	RS-485	0.005	0.1	0.13	5	0.03	0.28	40	0.20	0.58	0.030	0.785	1.37	5.0
DTLQPS室	①-④	30	RS-485	0.005	0.15	0.13	5	0.03	0.28	40	0.20	0.63	0.030	0.785	1.42	5.0
ME1+SDTL	①-⑤	45	RS-485	0.005	0.225	0.13	18	0.03	0.67	170	0.85	1.75	0.020	0.75	2.50	15.0
ME2+ACS	①-⑥	150	RS-485	0.005	0.75	0.13	25	0.03	0.88	240	1.20	2.83	0.015	0.7325	3.56	40.0
RFPS室	①-⑦	80	RS-485	0.005	0.4	0.13	4	0.03	0.25	40	0.20	0.85	0.015	0.7325	1.58	15.0
L3BT1	①-⑧	460	opti	0.0035	1.61	0.13	2	0.03	0.06	10	0.04	1.71	0.010	0.715	2.42	61.0
L3BT2	①-⑨	480	opti	0.0035	1.68	0.13	2	0.03	0.06	10	0.04	1.78	0.010	0.715	2.49	61.0
SCL1	①-⑩	270	RS-485	0.005	1.35	0.13	1	0.03	0.16	0	0.00	1.51	0.010	0.715	2.23	61.0
SCL2	①-⑪	290	RS-485	0.005	1.45	0.13	1	0.03	0.16	0	0.00	1.61	0.010	0.715	2.33	61.0

図4: 試作されたインターロックユニットから得られたLinac内処理時間予測結果