

JAERI-Tech

2004-022



JP0450293



機器保護用高速インターロックユニット試作機的设计

2004年3月

榊 泰直・中村 直樹・高橋 博樹・吉川 博

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問い合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2004

編集兼発行 日本原子力研究所

機器保護用高速インターロックユニット試作機的设计

日本原子力研究所東海研究所大強度陽子加速器施設開発センター
榊 泰直・中村 直樹・高橋 博樹・吉川 博

(2004年1月27日受理)

大強度陽子加速器施設(J-PARC)は、ピーク電流 50mA という陽子ビームを 50GeV まで加速し、様々な実験施設で併用する設計となっている。このような大電力陽子ビームが加速されると、そのパワーの強さから、電磁石トラブルなどでビームが加速器自身と衝突するようなトラブルが発生すると、加速器の材質表面に熱衝撃破壊を起こし、致命的な損傷を与えることが懸念される。

この報告書は、J-PARC で発生が懸念される、ビームによる熱衝撃損傷を回避するために必要な「機器保護用インターロック」の設計および、設計が反映された試作機について書かれたものである。

Design of the Prototype-unit for J-PARC Machine Protection System

Hironao SAKAKI, Naoki NAKAMURA, Hiroki TAKAHASHI and Hiroshi YOSHIKAWA

Center for Proton Accelerator Facilities
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 27, 2004)

In High Intensity Proton Accelerator Project (J-PARC), the peak current 50mA(max.) proton beam is accelerated to 50GeV. Therefore, when the magnet trouble etc. occurs, and the beam collides toward the accelerating structure, the thermal shock destruction is caused on the surface of the material of the structure.

This report shows the design policy of "Prototype-unit for the machine protection system" that is necessary to evade the thermal shock destruction.

Keywords: J-PARC, Machine Protection System, Interlock, Prototype-unit, Linear Accelerator, Design Policy

目次

1	はじめに	1
2	J-PARC 線形加速器	1
3	J-PARC での熱衝撃許容時間	2
3.1	J-PARC での熱衝撃許容時間の計算結果報告	2
3.2	高速インターロックによるビーム停止処理時間要求値	2
4	高速インターロックシステム設計	4
4.1	PPS と MPS	4
4.2	MPS の設計方針	4
4.3	ビーム挙動異常の高速検知	5
4.4	MPS 高速ビーム停止手順	6
5	MPS の詳細設計	8
5.1	高速応答性	8
5.1.1	MPS のハードウェア階層	8
5.1.2	MPS のインターフェース部分	9
5.2	MPS の汎用性・保守性	9
5.3	MPS の信頼性	10
5.3.1	インターロック信号電源の位置	10
6	MPS の線形加速器内インターロック応答予測時間	14
7	おわりに	15
	謝辞	15
	参考文献	16
	付録	
	付録 1	17
	付録 2	22

Contents

1 Introduction	1
2 J-PARC Linac	1
3 The Acceptable Time of Thermal Shock in J-PARC	2
3.1 The Report of Acceptable Time in J-PARC.....	2
3.2 Beam Stop Request Time by High-speed Interlock.....	2
4 Design of the Interlock System	4
4.1 PPS and MPS.....	4
4.2 Design Concept of MPS.....	4
4.3 High-speed Detection of the Abnormal Beam Behavior.....	5
4.4 Beam Stop Procedure by MPS.....	6
5 Detailed Design of MPS	8
5.1 High-speed Response.....	8
5.1.1 Hardware Hierarchy of MPS.....	8
5.1.2 Interface Part of MPS.....	9
5.2 Generality and Maintainability of MPS.....	9
5.3 Reliability of MPS.....	10
5.3.1 Position of the Interlock Signal Power Supply.....	10
6 MPS Response Prediction Time in the J-PARC Linac	14
7 Conclusion	15
Acknowledgment	15
References	16
Appendix	
Appendix 1	17
Appendix 2	22

1 はじめに

大強度陽子加速器では、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、加速コンポーネント表面付近にブラッグピーク¹による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(Spallation Neutron Source)で指摘されている。このような、高エネルギーの付与が加速構造体内表面で起こると、その表面は大きな熱衝撃を受け、構造体は致命的な放電を起こすような物理的な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、致命的な熱衝撃を回避するためにはどの程度の時間までビームが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。さらに、ビームが衝突した場合の熱衝撃ダメージからの保護・回避方法も試作機を製作するなどして十分に検討される必要がある。

本資料は、大電流陽子ビームによる熱衝撃から加速構造体などのコンポーネントを保護するために、J-PARC線形加速器で検討するべき「機器保護用高速ビームインターロックユニット試作機的设计」についてまとめられたものである。

2 J-PARC 線形加速器

J-PARC線形加速器の構成 [1] および加速パラメータをそれぞれ図1、表1に示す。

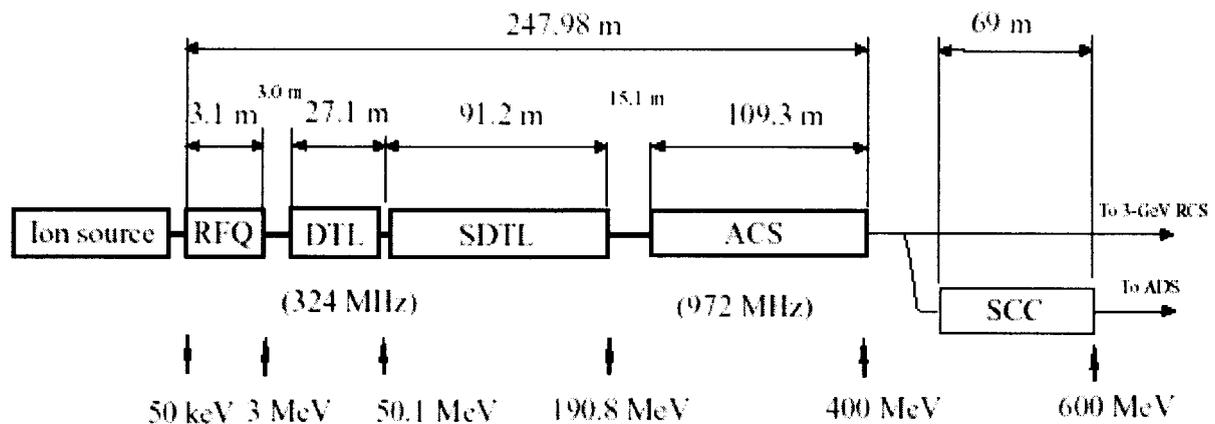


図1 J-PARC線形加速器の構成

詳細な設計パラメータ等は、J-PARCのテクニカルデザインレポート [2] を参照のこと。J-PARC線形加速器は、イオン源、RFQ (Radio Frequency Quadrupole)、DTL (Drift Tube Linac)、SDTL (Separated-type Drift Tube Linac)、ACS (Annular Coupled Structure) の加速構造で構成される。また、イオン源からRFQにビームが輸送されるLEBT(Low Energy

¹単一のエネルギーを持つ陽子線は、そのエネルギーに応じた定まった飛程を持ち、深部方向への線量付与は、表面で少なくその飛程末端でピークをもって急速に増加する。そして、急速に0に近づく(Sharp distal falloff)という極めて特徴的なパターンを示す。このエネルギーピークをブラッグピークという。

表 1 線形加速器の加速パラメータ

パラメータ	RFQ	DTL	SDTL	ACS
エネルギー	3	50	190.8	400
周波数 (MHz)	324	324	324	972
クライストロン数	1	3	16	21

Beam Transport) 部分、その他加速構造が変化する部分では、MEBT (Medium Energy Beam Transport) を用いて横方向および縦方向のマッチングを取るようになっている。なお、加速粒子は、後段加速器の 3GeV シンクロトロン (Rapid Cycling Synchrotron, RCS) への荷電変換入射のために負水素イオンであり、平均ビーム電流は $333 \mu\text{A}$ 、ピーク電流は 50mA 、ビームパルス幅は 0.5msec である。エネルギーは 400MeV までの加速で RCS に入射される予定であるが、将来の第 2 期計画では超伝導リニアックで更に加速し、長寿命放射性廃棄物の核変換実験 (Accelerator Driven Nuclear Transmutation System, ADS) にビームを利用する計画である。繰返し周波数は、RCS 入射時は 25Hz 、ADS との同時利用時で 50Hz である。

3 J-PARC での熱衝撃許容時間

3.1 J-PARC での熱衝撃許容時間の計算結果報告

SNS のレポートによれば、熱衝撃を避けるために $2.5\text{MeV} \sim 86\text{MeV}$ という比較的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 、 $2\text{mm} \times 2\text{mm}$ 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、 $5 \mu\text{s}$ 以下、さらに 87MeV 以上ならば $20 \mu\text{s}$ 以下の許容時間しかないと報告されている。

J-PARC 線形加速器では、ピーク値 50mA の陽子ビームの加速が予定されており、熱衝撃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、電子線形加速器で行われた同様な計算をもとに、J-PARC 線形加速器ビームでの熱衝撃許容時間の計算結果報告を得た (付録 1)。

3.2 高速インターロックによるビーム停止処理時間要求値

J-PARC 線形加速器での陽子ビームの熱衝撃破壊に対する許容時間は、付録 1 の計算報告によれば、図 2 のとおりであり、 3MeV まで加速する RFQ 直後においては $\sim 2 \mu\text{s}$ しか許容時間が無い。さらに、 50MeV まで加速される DTL においても、 $2 \sim 15 \mu\text{s}$ の許容時間と非常に厳しい時間制限を受ける。熱衝撃を避けるには、加速ビームは 1 ショットビーム内 (ビーム幅 $500 \mu\text{s}$) で停止させる必要があるということになる。

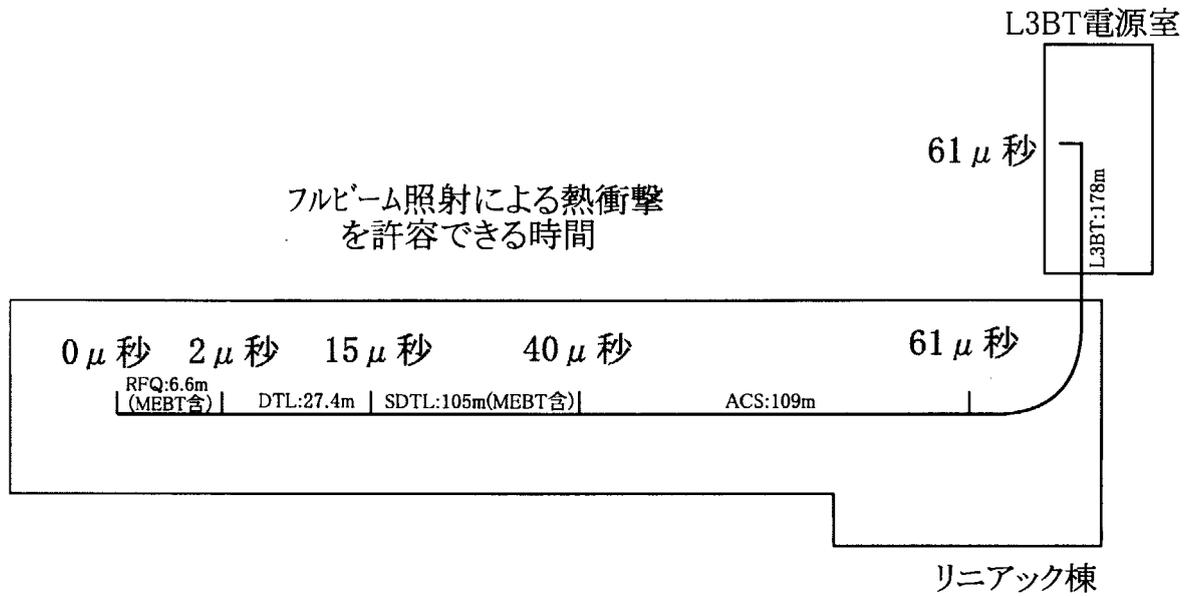


図 2 線形加速器内熱衝撃許容時間

この計算は、あくまで50mA 陽子ビームが2mmx2mm サイズで衝突することが想定されたものである。コミッショ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 線形加速器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 1.5μ 秒 に設定して本件インターロック装置を設計する。

4 高速インターロックシステム設計

4.1 PPS と MPS

加速器施設に於いて、インターロックシステムといえは、

- 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 (PPS)²
- 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 (MPS)³

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。よって、先の章で述べられたビームダメージからJ-PARC線形加速器を保護するためには、ビーム挙動異常が検知されると高速にビーム停止が可能なMPSの構築が要求される。

4.2 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が高いシステムにする。
- 汎用性、長期的なメンテナンス性が高いシステムを目指す。

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施設の運転時間を上げるためには、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。さらに、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悪影響を及ぼすために、「誤動作はほぼゼロ」になる様に十分な設計を行わねばならない。

また、本インターロックシステムを構成する部位はJ-PARC線形加速器のみで使用されるだけではなく、高速応答が求められない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。

²人員を放射線被曝から守るシステム。J-PARCではPersonal Protection Systemから、PPSと呼ぶ。

³Machine Protection SystemからMPSと呼ぶ。

4.3 ビーム挙動異常の高速検知

ビームによる熱衝撃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。J-PARC で使用が検討されている BLM は、J-PARC の機器設計レポートである、Accelerator Technical Design Report[2] の 3.1.5-9 ページによれば、

「ドライエア電離箱では、O₂ ガスのコンタミにより、イオン化された電子が吸収され、正プラス電荷のイオンが出力信号に寄与して、立ち上がり時間は 500 μ 秒になる。アルゴンガス充填電離箱では、イオン化電子が効率よく出力信号に利用されるので、その結果、立ち上がり時間 30n 秒が可能となる。」

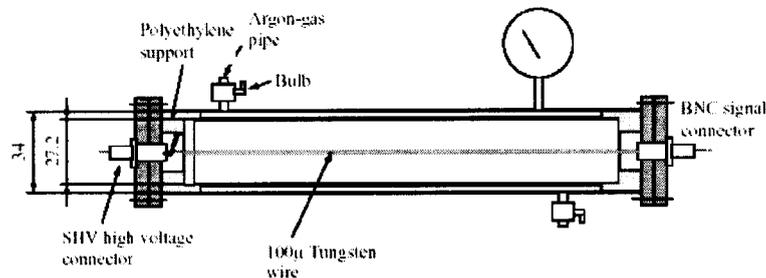


Figure 3.1.5.6.2. Argon gas filled ion-chamber beam loss monitor.

図 3 J-PARC で設計が進んでいるビームロスモニタ

と高速性を要求する場合には、アルゴンガス充填の電離箱を使うという内容が記載され、実際に、それらを使うことが決定されている。どのくらいのビームエネルギーに於いて立ち上がりが 30ns が可能であるかの詳細な記述は無いが、加速構造等にビーム衝突が発生したことを 30ns 程度という速度で検知できるということは、本件高速インターロックシステムを構築する上で、応答時間を確保できるモニタであることは間違いない。熱衝撃から機器を保護するには、BLM の応答性能に頼るしかない。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。

4.4 MPS 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。そして、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保守を容易にする。

最上流に近い部分に於いてビーム停止させる方法は、

- イオン源直後のファラデーカップやビームストッパを入れて物理的に遮断する
- イオン源のトリガタイミングを遮断する
- RFQ内のRFの位相を加速位相からずらし、RFQ内でビームを散乱させる
- ローレベルのPINダイオードスイッチを遮断することでRFQへの電力投入を停止させ、RFQ内でビームを散乱させる

などが上げられる。しかし、2章で述べられているように、ビームによる熱衝撃から機器を守るには、上流部分においては $\sim 2 \mu$ 秒程度しか時間的な猶予がないために、これらの停止方法の中でも、加速ビームを $\sim 1 \mu$ 秒程度で停止させることが出来ないという方法は、MPSが求めるビーム停止方法からは除外されることになる。

また、稼働率を向上させるために、ビーム運転再開において、再現性を確保するためにビーム調整をやり直すなどの操作時間などは可能な限り無くすようにしなければならない。ビーム停止時間の有無によりビーム特性が変化する可能性が大きな部分を、ビーム停止操作に使用することは好ましくない。

これらの条件を元に、ビーム停止操作の方法を検討すれば、項目1の物理的に遮断は、ストッパなどの応答時間の遅さから除外、項目2のイオン源のトリガタイミング遮断は、最も安定に動作させる必要があるイオン源を停止させることによるビーム特性の変化を考える(現状十分なデータがない)と除外、項目3のRFQの位相は、加速中の位相を変化させることによる反射異常などが考えられる上、RF位相調整のために何らかの計算機を経由する必要があり時間的動作保証がなく除外される。最後まで残る項目4はローレベルのPINダイオードスイッチをOFFする電気的な動作は、数百ナノ秒程度で可能であり、MPSの要求に十分に答えられるもので、高速ビーム停止手順として最有力となる。

だが、RFQの電力投入停止は、RFQに対して熱変化を与えるものであり、RFQの再現性に悪影響を与える可能性がある。よって、稼働率を確保するには、RFQのPINダイオードをOFFする動作と共に、イオン源直後のビームストッパを稼働させビームを物理的に遮断し、その後、RFQの熱変化を最小限にするために直ちにRFQのPINダイオードをONし、RFQへの電力再投入を行うという項目1と項目4との複合ロジックを組む必要がある。

よってMPSでは、このような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るよう設計する。

ビーム停止手順をまとめると、次の1～5の手順となる。

1. BLMによるビーム衝突イベント検知
2. MPSによるインターロックイベントの通知
3. 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
4. イオン源直後のビームストッパー投入
5. ビームストッパー投入後直ちにRFQにRF再投入

図4に、これらのRFQのPINダイオード停止手順を図示する。

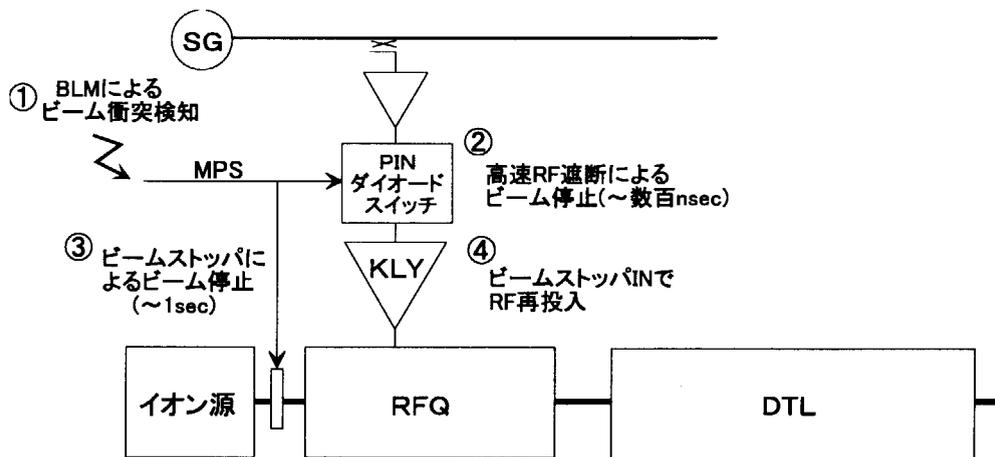


図4 RFQでの高速ビーム遮断手順

MPSでは、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必要がある。次の章では、これらのインターロック伝達に関する詳細設計を記述する。

5 MPSの詳細設計

5.1 高速応答性

5.1.1 MPSのハードウェア階層

MPSを高速に動作させるために、ハードウェアの階層を1階層にする。階層が深ければ深いほど、ロジックは複雑になり、高速動作応答が得られないためである。図5に、MPSの基本ハードウェア配置概念図を示す。

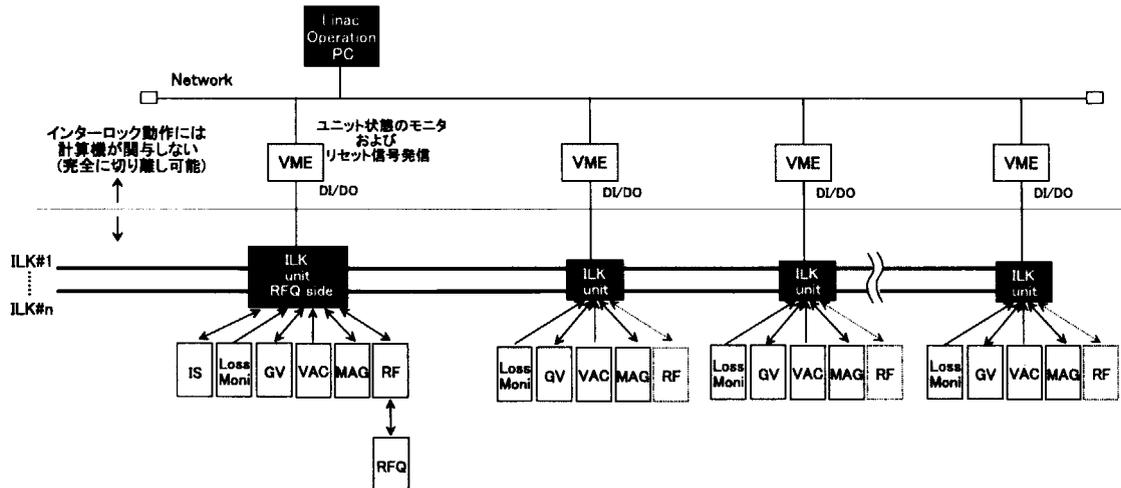


図5 MPSのハードウェア階層

MPSは、MPSを構成するハードウェア(インターロックユニット:ILKunit)のみが1階層に配置され、各ユニットに加速器構成機器が接続される。ILKunitは、CPUなどを介さずにインターロック信号を上流に伝送する。ILKunitを管理するCPUは、あくまで状態モニタとしか使用されず、CPUの判断はインターロックに介在しない。インターロックシステムと、CPUシステムは独立で完全に切り離されるように設計する。

さらに、信頼性を向上させるために、BLMによってビーム衝突が検出される系は、冗長性をもたせ、バックアップ用を含めて2系統のラインを上流まで配線することにする。

また、すべてのILKunitを1つの系として線形加速器全域でシリーズにつなぐことは避け

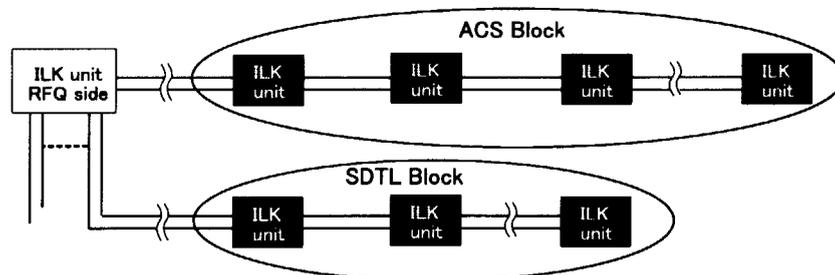


図6 ブロックイメージ

る。インターロックは、図6で示されるように、線形加速器の各部分に対応させたブロック単位でシリーズにまとめ、その単位別に上位にインターロックを伝送するようにする。図で示される様に、各ブロックはRFQ部分に集約されるように設置する。これは、ビーム停止をするために、RFQ部では図4で示されるような停止方法を用いるためである。

このように、ブロック化することで、高速性が得られると共に、故障リスクを分散させる⁴ことができ信頼性も向上される。

5.1.2 MPSのインターフェース部分

MPSのインターフェース部分は、高速性・信頼性(耐ノイズ)を考慮して、表2で示されるフォトカップラで取り合うことにする。このフォトカップラは、立ち上がり時間20n秒という高速応答が可能であり、かつ、耐ノイズ性も高くインターロック事象の発生を伝送するためのインターフェースとしては最適である。

表2 超高速ロジックゲート HCPL2400 の性能仕様

エミッタ	
順電圧 (typ.)	1.3V
順電流 (max.)	10mA
逆電圧 (max.)	5V
検出器	
V_{CEO} (max.)	10V
I_C (max.)	25mA
イネーブル電圧	10V
結合特性	
分離電圧	2500V rms
立上がり時間	20ns
下降時間	10ns

なお、ILKunitと各機器(加速器構成機器・MPS構成機器)間のロジックは「ノーマルクローズ」で定義され、機器が正常に動作している際には、電気的な信号が取り合える状態にする。よって、機器側の制御電源が投入されていない状態(電気的な出力がなされない)は異常状態として定義され、MPSは発報しビーム停止手順がとられるものとする。

5.2 MPSの汎用性・保守性

MPSは、高速かつ信頼性が求められるため、その性能に特化した処理回路が要求される。しかし、あまりにも特化してしまうと、汎用性が無くなり一部の機器の異常発生信号しか受け付けられなくなってしまう。MPSはJ-PARC線形加速器以外の機器を保護する目的でも使用されなければならない。また、MPSのILKunitを駆動させる電源、インターフェースのフォトカップラなどは消耗品であるので、定期交換を念頭において設計されるべきである。

⁴1 系統でシリーズにつなげた場合、伝送が途切れるとその故障部分の特定が難しい。さらに、ビーム停止情報も上流に伝送されない。

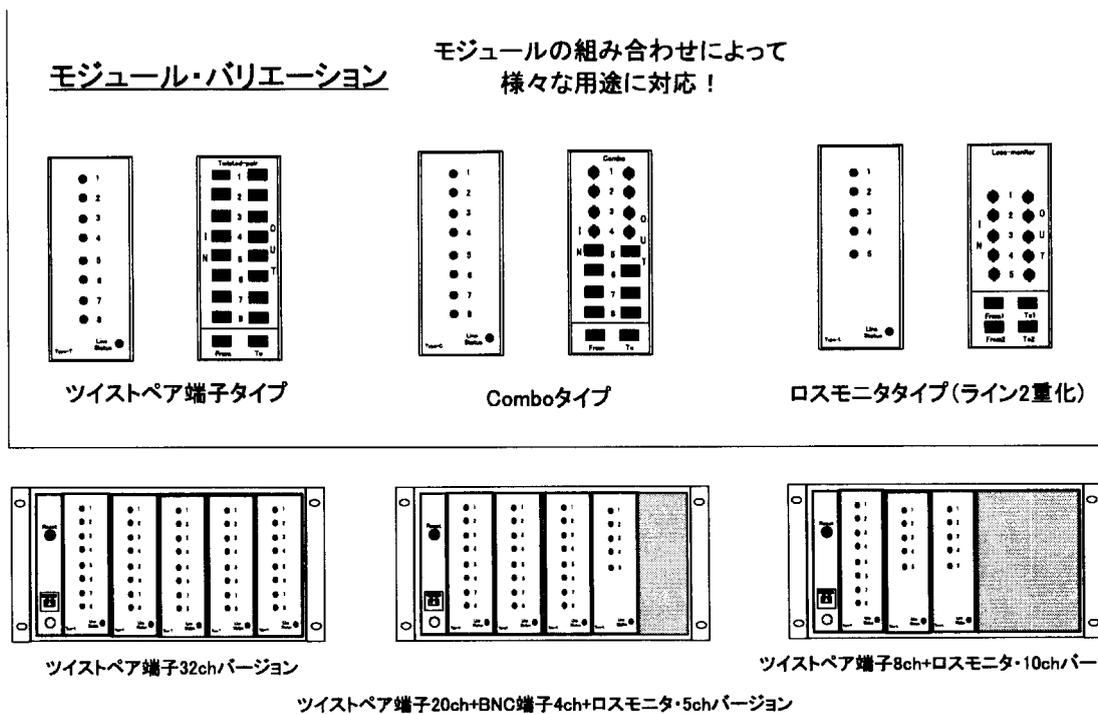


図 7 MPS 用処理回路のモジュール化

そこでMPSの汎用性・保守性を考えて、MPSの処理回路はモジュール化し、仕様に応じたインターロック構成や、容易な保守性が得られるようにする。

図7に、モジュール化されたイメージ図を示す。図中のモジュールは、電源モジュール、ロスモニタ用モジュールと、一般機器用の端子がBNC、端子台のものが描かれている。このように、使用される場所に適合したモジュール配置（ロスモニタの数が多い場合はそのモジュールを多く使用するなど）、モジュール種別を増やすこと等を可能とし、汎用性が向上されるように設計する。

5.3 MPSの信頼性

5.3.1 インターロック信号電源の位置

MPSは、高速性が求められるために少量でもノイズの回り込みなどによる誤動作が発生する可能性があり、信頼性にとってはかなりシビアな問題となる。よって、ILKunitと機器側でグラドループ(GND Loop)をつくってはならない。

さらに、機器とILKunit間の配線も容易でわかりやすい配線とし、信頼性の向上を図らねばならない。そこで、インターロック信号の電圧共に、インターロック信号を発生させる電源の位置を場合わけして検討し、GND Loopの可能性がなく、かつ配線効率が良いものを選択することにした。

図8に信号用5V電源をILKunit側に持たせた場合の回路構成、図9に信号用5V電源を検出器側に持たせた場合の回路構成を示す。図8では、星印で指摘されるように、Monitor機器側からの配線が3本必要となり配線効率が悪い。さらに、GNDが共通になる可能性がありLoopが懸念される。図9の①は、配線効率、また完全にILKunit内で絶縁されたGND構成のためにLoopともに問題はない。②は、配線が3本必要となり配線効率に問題がある。

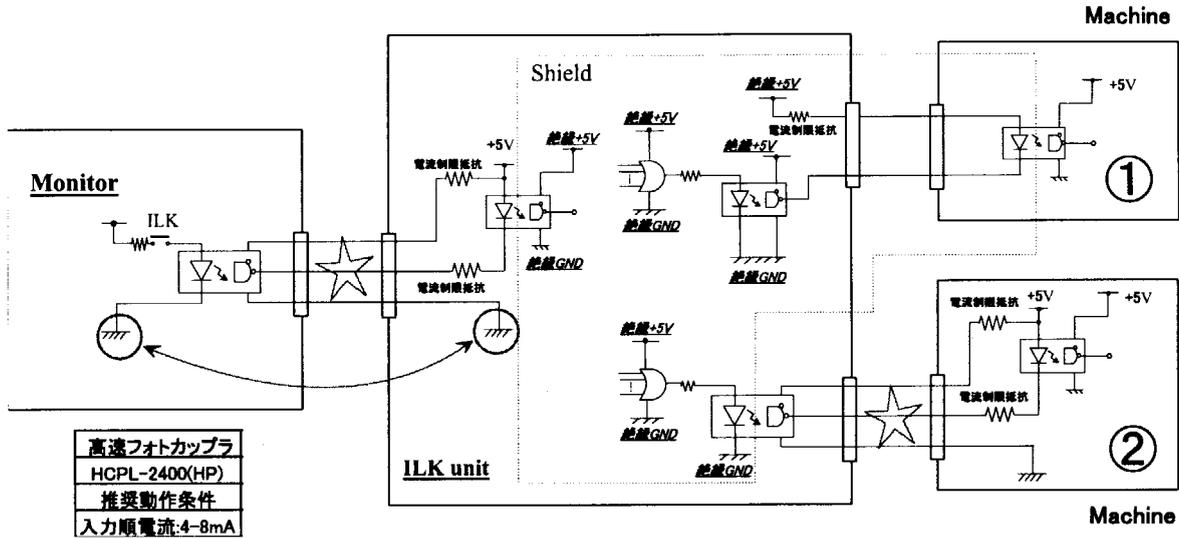


図8 信号用5V電源をILKunit側に持たせた場合

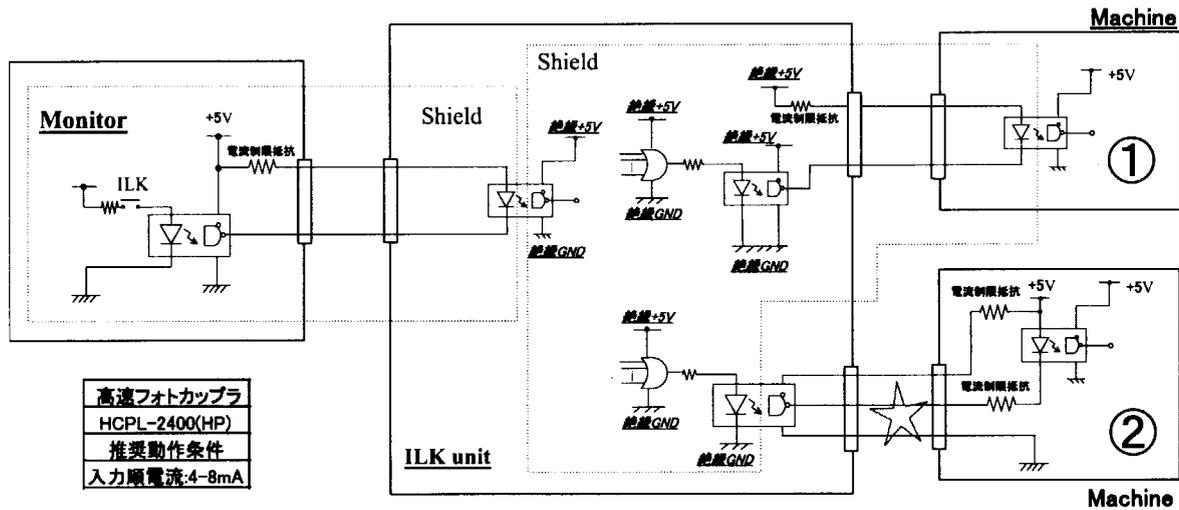


図9 信号用5V電源を検出器側に持たせた場合

図10に信号用24V電源をILKunit側に持たせた場合の回路構成、図11に信号用24V電源を検出器側に持たせた場合の回路構成を示す。図10では、ILKunitを経由してMonitor側Machine側のGNDが共通になり、もっともノイズに弱い配線になる。図11の①は、配線効率、Loopともに問題はないが、②は、GNDに問題がある。

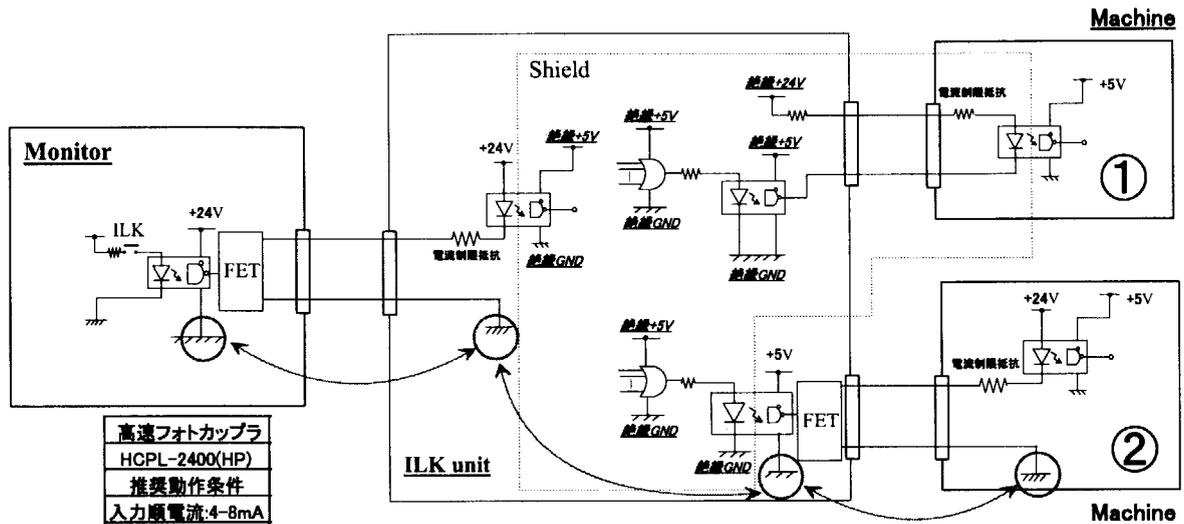


図 10 信号用 24V 電源を ILKunit 側に持たせた場合

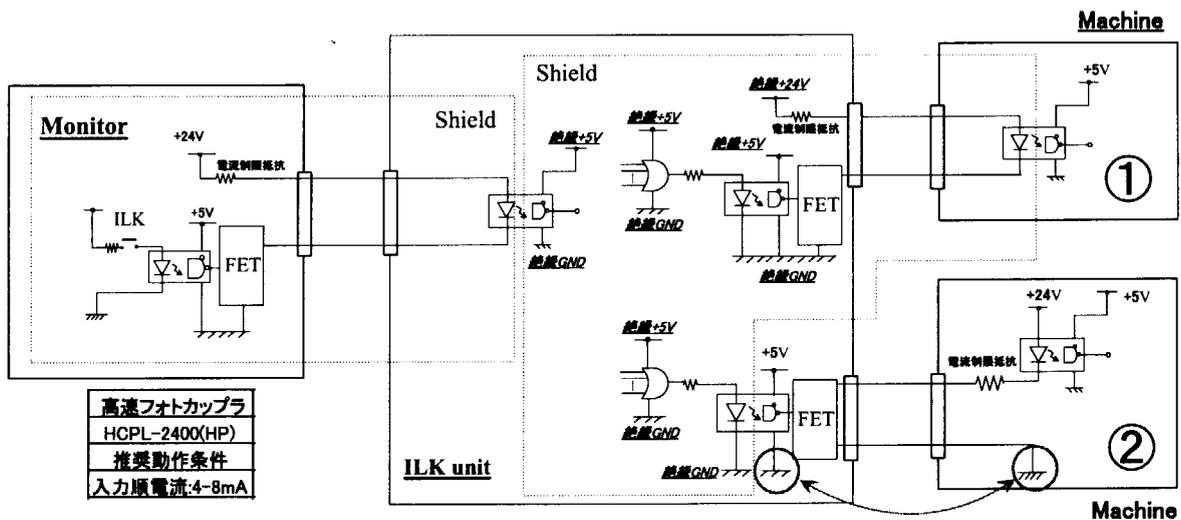
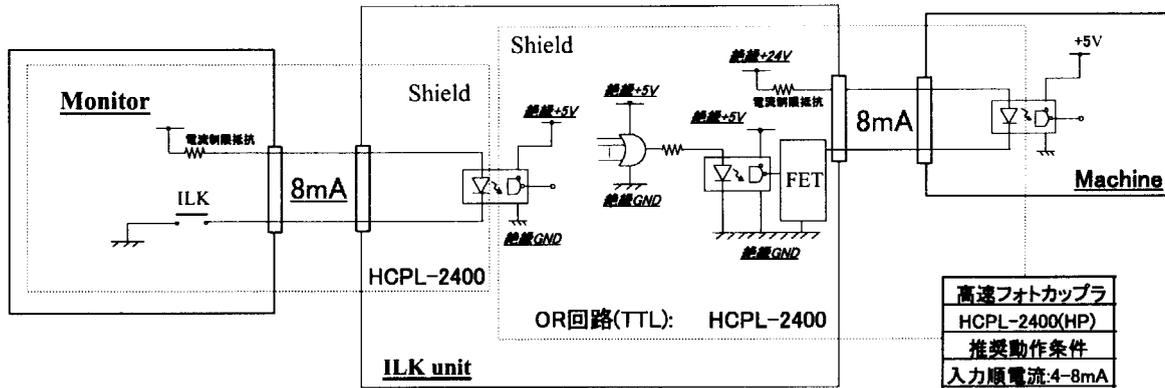


図 11 信号用 24V 電源を検出器側に持たせた場合

以上をまとめると、表3で示されるようになる。これより、インターロック信号用の電源は、5V・24Vともインターロックを通知する側に持たせることが最適であることが明らかとなる。5V・24V両者とも、電源を通知側に持たせることができると、電圧取り合いではなくフォトカップラへの電流取り合いという定義をすることが可能で、いっそうノイズに強い系となる。よって、高速停止を担うインターロック系統は「8mA」の電流取り合いで考える。

表 3 高速 ILK 信号伝送電圧および信号電源設置場所の評価

信号電圧	検出信号電源	機器停止信号電源	GND Loop	配線効率	総合評価
伝達信号電圧 (5V)	ILKunit 側	ILKunit 側	△	×	×
		Machine 側	△	×	×
	Monitor 側	ILKunit 側	○	○	◎
		Machine 側	○	×	×
伝達信号電圧 (24V)	ILKunit 側	ILKunit 側	×	○	×
		Machine 側	××	○	××
	Monitor 側	ILKunit 側	○	○	◎
		Machine 側	×	○	×



種別	ケーブル	フォトカプトラ	TTL	フォトカプトラ	FET	ケーブル	フォトカプトラ
素子名	30m (BNC:6nsec/m)	HCPL-2400	OR回路	HCPL-2400	2SK1590	5m (BNC:6nsec/m)	HCPL-2400
処理時間	180 nsec	60nsec(高CMR)	~20nsec	60nsec(高CMR)	190nsec	30 nsec	60nsec(高CMR)

ILK処理の予測時間：~600 nsec
(内ケーブル伝送210nsec)

図 12 設計された MPS のインターロック回路構成

電流取り合いで考えた MPS の回路構成を図 12 に示す。また、この回路構成でインターロックを伝送する場合に必要な処理時間を計算している。処理時間の総計は~600n 秒であるが、ケーブル伝送時間を除けば、ILKunit 内では 400n 秒程度で処理できることが見込める。

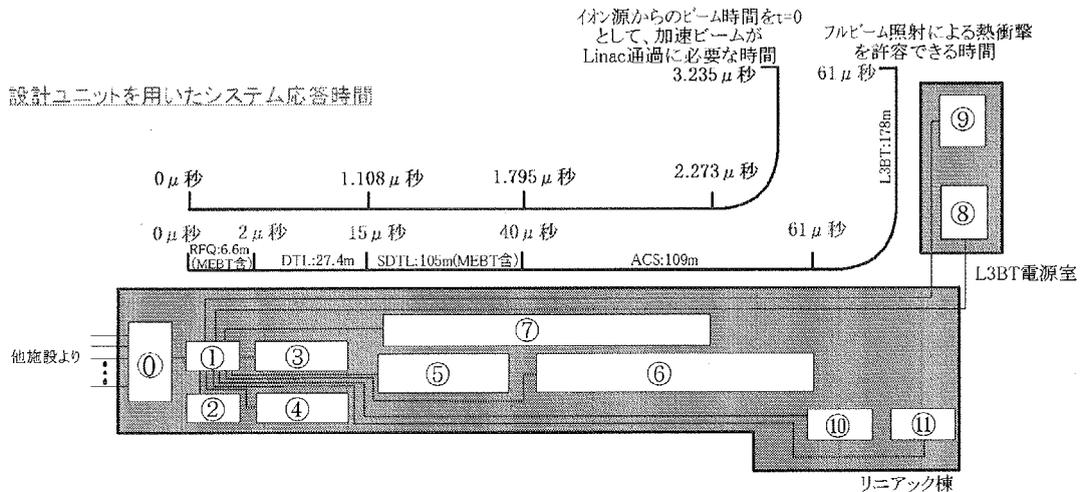
6 MPSの線形加速器内インターロック応答予測時間

MPSの設計方針として、「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1.5μ秒」と設定した。ここでは、図12の回路で、J-PARC線形加速器用にMPSを構成した場合、この目標値が確保できるか計算する。

図12では、MPSunitの予想処理時間は~400n秒であったが、系の中にILKunitを置いた場合、インターロック信号を隣のMPSunitに伝送する処理時間(100n秒)を考えて~500n秒の処理時間がかかるものとして計算する。

さらに、ロスモニタの検出処理時間については、現状ロスモニタの実験が不十分でその定量的な速度を見積もることが出来ないので、以下の仮定のもとで計算している。

- ビームがダクトに衝突した点から、検出ロスモニタヘッドは3.5m離れている。
- ロスモニタ内部でのイオン化に、200n秒かかる。
- ロスモニタの検出の立ち上がりは、50n秒である。
- 検出ヘッドから処理回路までのケーブル長は30mで、その伝送速度は6n秒/mである。
- 検出回路の処理時間は~250n秒である。



時間単位: μ秒

ブロック名称	経路	ブロックケーブル長(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)	ILKunit台数(I)	unit単位処理時間(II)	ブロック内unit総処理時間(β=I+II)	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	0.006	0.21	2	0.5	1	10	0.06	1.27	-	-	1.27	-
S&RFQ	①	0	RS-485	0.006	0	1	0.5	0.5	0	0.00	0.50	0.060	0.89	1.39	2.0
ISPS室	①→②	30	RS-485	0.006	0.18	1	0.5	0.5	0	0.00	0.68	0.060	0.89	1.57	2.0
DTL	①→③	20	RS-485	0.006	0.12	5	0.5	2.5	40	0.24	2.86	0.030	0.785	3.65	5.0
DTLQPS室	①→④	30	RS-485	0.006	0.18	5	0.5	2.5	40	0.24	2.92	0.030	0.785	3.71	5.0
ME1+SDTL	①→⑤	45	RS-485	0.006	0.27	18	0.5	9	170	1.02	10.28	0.020	0.75	11.04	15.0
ME2+ACS	①→⑥	150	RS-485	0.006	0.9	25	0.5	12.5	240	1.44	14.84	0.015	0.7325	15.57	40.0
RFFS室	①→⑦	80	RS-485	0.006	0.48	4	0.5	2	40	0.24	2.72	0.015	0.7325	3.45	15.0
L3BT1	①→⑧	460	opti	0.0035	1.61	2	0.5	1	10	0.04	2.65	0.010	0.715	3.36	61.0
L3BT2	①→⑨	480	opti	0.0035	1.68	2	0.5	1	10	0.04	2.72	0.010	0.715	3.43	61.0
SCL1	①→⑩	270	RS-485	0.006	1.62	1	0.5	0.5	0	0.00	2.12	0.010	0.715	2.84	61.0
SCL2	①→⑪	290	RS-485	0.006	1.74	1	0.5	0.5	0	0.00	2.24	0.010	0.715	2.96	61.0

図 13 線形加速器内インターロック応答予測時間

図 13 に、線形加速器内インターロック応答予測時間の計算結果を示す。各ブロックごとに、インターロックが発報してから RFQ 部分に伝送されるまでの経過時間が示される。この値には、RFQ の PIN ダイオード停止時間 (数百 n 秒) は計上されていないが、RFQ 部分において停止要求時間が 1.39μ 秒という予測時間が得られている。RFQ の PIN ダイオード停止時間を考慮すれば、目標となる 1.5μ 秒となることが予測される。

J-PARC では、これまでの設計方針を反映した「インターロックユニット」を試作し、設計の検証を行い、実用機の製作に反映させ、確実なシステムを構築することにする。

7 おわりに

これまでの章で書かれた設計方針を反映し、付録 2 に示される試作機の仕様書を作成した。試作機仕様書は、試作機を使った性能試験に必要と思われる、信号チェッカー、ケーブルなどを可能な限り入れ込んだ内容にした。

本試作機を使用して、十分な性能試験を行い設計上の問題点を明らかにしていくこととする。

謝辞

高速インターロック系の設計にあたり、大電流電子線加速器用ビームダンプの開発で、ビームの熱衝撃破壊を中心に計算・検討されてきた核燃料サイクル機構 大洗工学センター 武井早憲氏が、計算された J-PARC での熱破壊レポートは、SNS の熱破壊と比較されるなど非常に多くの情報を与えてくださるものでした。ここに、感謝いたします。

参考文献

- [1] 長谷川ら: “J-PARC 用リニアックの現状”, 第 28 回リニアック技術研究会予稿集, P66-68 (2003).
- [2] High-intensity Proton Accelerator Project Team, “Accelerator Technical Design Report for J-PARC”, JAERI-Tech 2003-044 または KEK Report 2002-13 (2003).
- [3] R.E.Shafer: “How Long a SNS Beam Pulse would Damage a Copper Accelerating Structure?”, SNS Home page rev. 4/20/01 (2001).
- [4] M.C.Ross et al: “SINGLE PULSE DAMAGE IN COPPER, XX International Linac Conference”, P47 (2000).

付録 1

熱衝撃による金属の破壊について¹

1 はじめに

陽子ビームが金属に照射された場合、局所的な温度上昇や熱荷重サイクルにより破壊に至ることが考えられる。本レポートは陽子ビームが突然金属に局所的に照射され、かつ材料的に破壊されない時間について報告する。

2 計算条件

金属が破壊されない時間を評価するために用いた計算条件を下記に示す。

1. 陽子ビームのエネルギーは 2.5 ~ 600 MeV、ピーク電流は 50 mA とする。
2. 陽子ビームのパルスは、幅 500 マイクロ秒、繰り返し 25 Hz とする。(358 ナノ秒のビーム形状は無視する。)
3. 陽子ビームの形状は、半径の円筒形とする。
4. 照射される金属の材質は無酸素銅、アルミニウムとする。
5. 金属における熱拡散は無視する。すなわち、陽子ビームが照射された部分は断熱状態とする。(熱伝導の影響が現れるのは照射後約十ミリ秒経過してからである。)
6. 金属内でのエネルギー損失は一定と仮定し、ブラッグピークは無いものとする。
7. 金属の破壊は熱衝撃によるものとする。

3 熱衝撃破壊

一般に、物体（金属）の表面が急激に加熱又は冷却されると、物体内部と表面の間の温度差により熱歪みを生じ、衝撃的な熱応力を生じる。この応力は一定時間で最大値に達し、材料によってはこの値が限界値を超えて破壊する場合がある。このように急激な非定常の熱応力が作用する現象を熱衝撃という。発生した熱応力の値が金属の破壊強度 S に等しいとして算出される限界の温度差 ΔT_{max} のことを熱衝撃破壊抵抗係数 R と呼び、熱衝撃破壊の目安となる。

$$R = \Delta T_{max} = \frac{S(1-\gamma)}{E\alpha} \quad (1)$$

ここで、 γ は金属のポアソン比、 E は金属の縦弾性係数、及び α は線膨張係数を表す。

この式に無酸素銅及びアルミニウムにおけるポアソン比、縦弾性係数、及び線膨張係数を代入すると、熱衝撃破壊抵抗係数 R [°C] は、破壊強度 S の関数として、

$$\begin{cases} R_{Cu} = 0.38S \\ R_{Al} = 0.41S \end{cases} \quad (2)$$

¹平成 14 年 2 月 27 日 サイクル機構 大洗工学センター 武井早憲

と表される。但し、破壊強度の単位は MPa である。

次に、破壊強度として、金属の降伏点及び引張りの強さを使用すると、熱衝撃破壊抵抗係数は表4の通りとなる。

表4 無酸素銅及びアルミニウムにおける熱衝撃破壊抵抗係数

金属名	熱衝撃破壊抵抗係数	
	降伏点	引張りの強さ
無酸素銅	6 ~ 350 MPa 2 ~ 130 °C	200 ~ 400 MPa 76 ~ 150 °C
アルミニウム	100 ~ 300 MPa 40 ~ 120 °C	200 ~ 400 MPa 82 ~ 160 °C

なお、表4に示した物性値は典型的な材質について調べたものであるため、物性値は加工条件、成分等により全く異なった値となるため、再度検討する必要がある。(物性値のデータとして <http://www.matweb.com/> などがある。) 従って、熱衝撃により、無酸素銅及びアルミニウムの融点 (1083 °C 及び 660 °C) よりも低い温度上昇で破壊されることがわかる。ところで、無酸素銅が熱衝撃により降伏点を超える温度上昇 (2 ~ 130 °C) は、0.8 ~ 50 (J/g) に相当しており、R.E.Shafer[3] が実験結果より設定した 62 (J/g) と同程度の値となる。

4 計算結果

陽子ビームが金属に照射されたとき、金属内に蓄積される単位温度上昇 (1 °C) 当たりの熱量は、

$$q = \frac{\pi \sigma_x \sigma_y c E_p}{\Delta E_p} \quad (3)$$

と表される。ここで、 σ_x, σ_y はビーム断面における x,y 方向の広がり (rms)、 c は金属の比熱、 E_p は陽子ビームのエネルギー、そして、 ΔE_p は金属内のエネルギー損失を表す。

従って、許容される温度上昇 ΔT_s まで照射できる時間 t_s は、

$$t_s = \frac{\Delta T_s q}{E_p I_p} = \frac{\pi \sigma_x \sigma_y c \Delta T_s}{I \Delta E_p} \quad (4)$$

となる。ここで、 I_p は陽子ビームのピーク電流を表す。

式(4)の ΔT_s に表1で得られた温度上昇を代入し、時間 t_s を求めると表5~7の通りとなる。

5 考察

5.1 SNS (R.E.Shafer) との比較

表8に示す、R.E.Shafer レポート [3] の Table1 と本レポートの表5を比較すると次のようなことがわかる。

1. R.E.Shafer の評価では無酸素銅の降伏点に対する付与エネルギー (62 J/g) を使用していると思われるが、本レポートに示した熱衝撃による降伏点の超えるような付与エネルギー

表 5 無酸素銅で許容される時間 t_s (SNS の場合)

エネルギー (MeV)	進入長 (m)	時間 t_s (μ s)	
		降伏点	引張り
2.5	4.0E-05	2.5E+00	2.9E+00
7.5	2.5E-04	5.2E+00	6.1E+00
10	4.1E-04	6.4E+00	7.4E+00
25	2.0E-03	1.3E+01	1.5E+01
50	6.9E-03	2.2E+01	2.5E+01
80	1.6E-02	3.1E+01	3.5E+01
100	2.3E-02	3.6E+01	4.2E+01
200	7.4E-02	5.7E+01	6.6E+01
300	1.4E-01	7.3E+01	8.4E+01
400	2.2E-01	8.4E+01	9.7E+01
600	3.8E-01	1.0E+02	1.1E+02

ここで、ピーク電流を 36 mA、ビーム半径を 2 mm × 2 mm、降伏点に対応する温度を 130 °C、引張りの強さに対応する温度を 150 °C とする。

表 6 無酸素銅で許容される時間 t_s (J-PARC の場合)

エネルギー (MeV)	進入長 (m)	時間 t_s (μ s)	
		降伏点	引張り
2.5	4.0E-05	1.8E+00	2.1E+00
7.5	2.5E-04	3.8E+00	4.4E+00
10	4.1E-04	4.6E+00	5.4E+00
25	2.0E-03	9.2E+00	1.1E+01
50	6.9E-03	1.6E+01	1.8E+01
80	1.6E-02	2.2E+01	2.5E+01
100	2.3E-02	2.6E+01	3.0E+01
200	7.4E-02	4.1E+01	4.8E+01
300	1.4E-01	5.2E+01	6.0E+01
400	2.2E-01	6.1E+01	7.0E+01
600	3.8E-01	7.2E+01	8.3E+01

ここで、ピーク電流を 50 mA、ビーム半径を 2 mm × 2 mm、降伏点に対応する温度を 130 °C、引張りの強さに対応する温度を 150 °C とする。

ギー (0.8 ~ 50 J/g) と同程度である。

2.5 に示した許容時間は、R.E.Shafer レポートの Table1 の第 3 列目の時間に相当しており、ファクター 2 程度の差が生じている。これは、R.E.Shafer レポート (2) 式の分子にある定数 2 に起因している。

従って、無酸素銅の降伏点が加工条件等により 2 桁程度大きく異なる点を考慮すると、R.E.Shafer レポートは妥当な結果と考える。なお、R.E.Shafer レポート (2) 式の分子にある定数 2 については検討が必要である。

5.2 J-PARC のケースについて

上記の比較、及び表 6、7 の結果を合わせて考えると次のようなことがわかる。

1. 今回の評価では、陽子ビームが無酸素銅 (又はアルミニウム) で一様にエネルギーを損

表 7 アルミニウムで許容される時間 t_s (J-PARC の場合)

エネルギー (MeV)	進入長 (m)	時間 t_s (μ s)	
		降伏点	引張り
2.5	9.9E-05	2.9E+00	3.9E+00
7.5	6.6E-04	6.5E+00	8.6E+00
10	1.1E-03	8.0E+00	1.1E+01
25	5.6E-03	1.6E+01	2.2E+01
50	1.9E-02	2.8E+01	3.8E+01
80	4.4E-02	4.1E+01	5.4E+01
100	6.5E-02	4.8E+01	6.4E+01
200	2.1E-01	7.7E+01	1.0E+02
300	4.0E-01	9.8E+01	1.3E+02
400	6.2E-01	1.1E+02	1.5E+02
600	1.1E+00	1.3E+02	1.8E+02

ここで、ピーク電流を 50 mA、ビーム半径を 2 mm \times 2 mm、降伏点に対応する温度を 120 $^{\circ}$ C、引張りの強さに対応する温度を 160 $^{\circ}$ C とする。

表 8 R.E.Shafer レポート [3] の Table1 で示された値 (無酸素銅)

エネルギー (MeV)	進入長 (m)	許容時間 t_s (μ s)
2.5	2.6E-05	6.0E+00
7.5	1.5E-04	1.3E+01
10	2.43E-04	1.6E+01
25	1.17E-03	3.2E+01
50	3.93E-03	5.4E+01
80	8.94E-03	7.6E+01

ここで、ピーク電流を 36 mA、ビーム半径を 2 mm \times 2 mm とする。

失したと仮定している。しかし、R.E.Shafer レポートにあるようなブラッグピークの影響や陽子ビームのビームプロファイルが均一でないことを考慮すると、表 6、7 に示した許容時間は限界値と認識しなければならない。このため、安全ファクターとして 10 以上は必要になると思われる。

- 今後使用する金属（特に、無酸素銅）の物性値を検討するとともに、設計思想としてどの程度の破壊までを許容するのかを明確にする必要がある。（例えば、弾性変形まで許容するのか、それとも塑性変形まで許容するのか。）
- もし、インターロックで無酸素銅への異常照射を防ぐ場合、 μ 秒よりも早い機能のものが必要になると思われる。

最後に、表 6 と表 8 の値をグラフ化したものを、図 14 と図 15 に示す。特に、図 15 では、J-PARC に設置される各加速構造体での、熱衝撃許容時間が分かるように、それぞれの位置および名称を記入した。なお、熱衝撃の影響を受け、致命的な損傷を起こしやすい加速構造体部分は、無酸素銅で製作されるために、表 7 のアルミに関するグラフは割愛する。

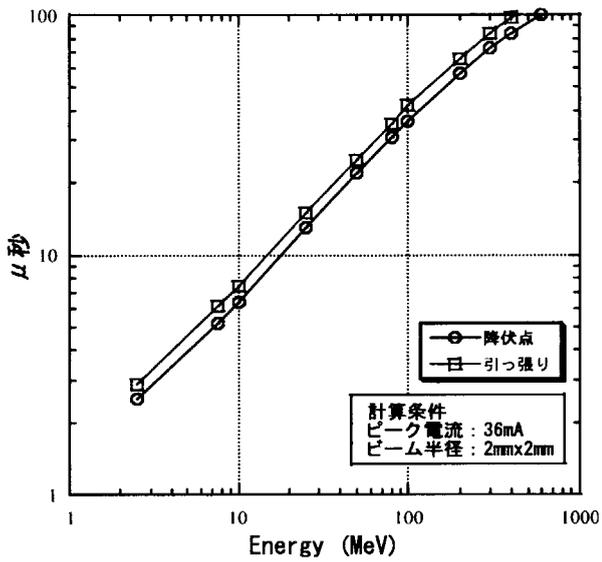


図 14 SNS の熱衝撃許容時間 (無酸素銅)

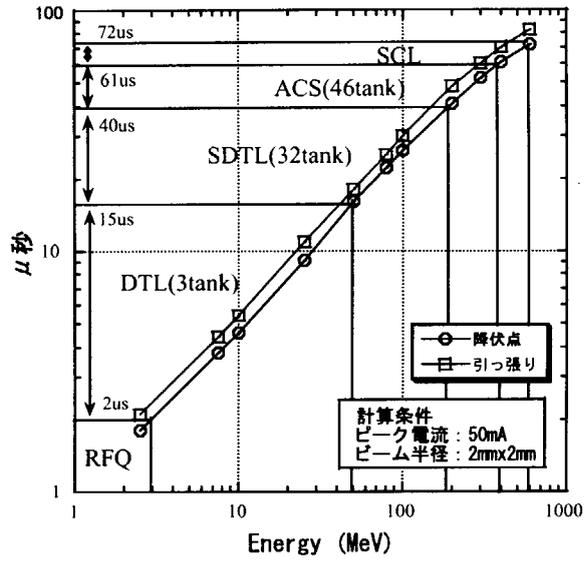


図 15 J-PARC の熱衝撃許容時間 (無酸素銅)

付録 2

大強度陽子加速器周辺機器異常時運転停止用 高速インターロックユニット仕様の内容²

1 一般仕様

1.1 概要

大強度陽子加速器は、日本原子力研究所(原研)と高エネルギー加速器研究機構(KEK)が共同で、原研東海研究所内に建設中の大型高エネルギー加速器施設であり、線形加速器施設、3GeV シンクロトロン施設、50GeV シンクロトロン施設および、陽子ビームを利用する実験施設から構成されるものである。本仕様書は、この大強度陽子加速器施設を安全に運転する上で必要となる、加速器周辺機器異常発生時の高速インターロックシステムの一部を製作することに関する仕様を記載したものである。

本件では、高速インターロックユニットの設計製作、およびそのユニットの正常動作をチェックするインターロックユニットチェッカーの設計製作の2点が要求される。高速インターロックユニットは、空間的に分散された加速器機器の状態を連係させて管理するもので、系統立てた運転を可能にするものである。また、チェッカーは高速インターロック系に何らかのトラブルが発生した際に、トラブルシューティングを容易にするものである。

1.2 目的

本件は、大強度陽子加速器施設の運転において、機器トラブルから発生する加速陽子ビームの制御不能状態を高速に回避、加速器機器を保護するシステムの一部、かつ加速器施設運転の状態を決定する重要なものである。このユニットを設置することで、機器の保護のために、各種インターロックレベルを設定でき、加速器の様々な運転モードに対して柔軟に対応できる。

²大強度陽子加速器施設開発センター 加速器グループ

2 機器仕様

2.1 運転停止用高速インターロックユニット

大強度陽子加速器は、上流部ではビーム運転に異常が生じ不本意な動作が起こったとすると、数 μ 秒で構成部位に熱衝撃によるダメージを与えることが懸念されている。ダメージを最小限にするためには、最も重要な部位では異常を検知してから、約2 μ 秒以下でビームを停止させる必要がある。高速インターロックユニットは、空間的に分散設置されている、加速器構成機器の異常状態を示すインターロック信号を検出し、反射的にビームを停止させるものである。

この様に、機器保護停止インターロックは、高精度にチューンアップされた加速器自身に与えるダメージを最低限にするために非常に重要なものであり、受注者は加速器停止に必要な高速性、信頼性の重要度を認識できる設計経験を有し、高速インターロックユニット設計に多くの技術的提案ができることが望まれる。具体的には、過去に国内外を問わず1.0 GeV以上に加速できる大型粒子加速器のインターロック構築を受注し、その設計、製作に関わった実績をもつことを望む。

2.2 ユニット構成および製作数量

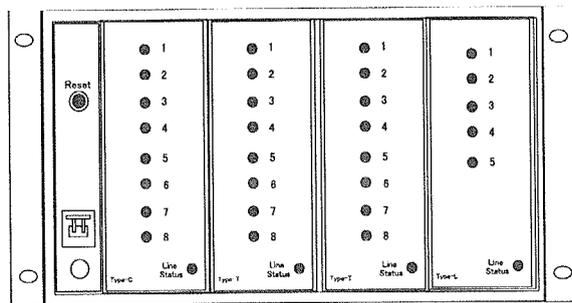
加速器は、停止する機器によって動作させるインターロック仕様（インターロックバスライン）が異なる。その異なりを考慮して、インターロックバスラインを複数準備できる構造とする（バスラインを1つのモジュールとして用いることで代用しても構わない）。また、高速インターロックユニットを横渡りするバスラインは、ツイストペアケーブルを用いること（バスライン用の入出力端子はM3端子台とする）。

モジュール種類

高速インターロックユニットは、発注者が用意するEIA標準19インチラックに収納することになるために、その旨を考慮したサイズにすること。ユニットは、図16に示されるような外観イメージにすること。また高さは7U以下にすること。

加速器の運転が始められた後、ユニットが設置される場所によっては、加速器の改造に伴ってユニットに接続される機器が増減する可能性がある。その様な増減に柔軟に対応するために、また故障が発生した際に効率的に対応可能なように、以下に記述される各種モジュールを用意し対応可能にすること。モジュールの全面パネルには、動作確認用LEDを各信号およびバスステータスに対して設置すること。また、部品交換が容易なように、駆動電源もモジュール化すること。ユニット内部の電源は、完全に他所と絶縁された電源を用い、ユニット内部論理回路部は他ユニット等からのループを無くした回路構成とすること。

- M3端子モジュール
信号入出力用M3端子が8ch分設置されたモジュール。
- BNC-M3端子コンボモジュール



高速インターロックユニット外観イメージ図

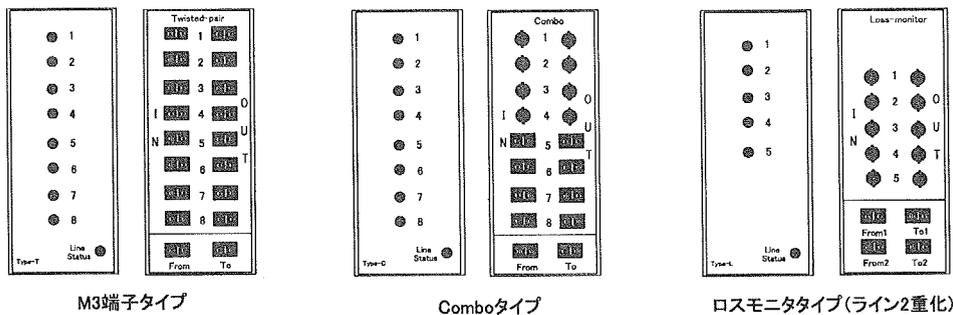


図 16 高速インターロックユニットおよび、モジュールバリエーション (イメージ)

BNC4ch、M3 端子 4ch 分用意されたモジュール。

● ロスモニタモジュール

ロスモニタイベント信号は、ビーム停止インターロックを発報する上で最も重要なイベント信号である。信頼性を持たせるためにこの信号は、入力を内部分岐し、処理回路を冗長させインターロックバスラインを2重化すること（内部回路も2重化する事が望ましい）。

● 電源モジュール

電源モジュールは、高速インターロックユニットに駆動電力を供給するものである。

加速器機器側からのインターロック信号は、パルスで出力されるものもあるために、製作モジュール側で全チャンネルラッチすること。ラッチされた信号は、現場リセットボタンおよびVME信号によって遠隔で一括リセットされるように設計すること。また、インターロック発報機器を特定するために、ラッチされた信号は、VMEを用いて遠隔でモニタ出来ること。これらの処理は、デジタルデータ出力用VMEボードで行われる。インターロックユニットに用意されるVMEボード用インターフェースMILコネクタは、現在加速器制御で用いられることが決定しているEPICSのドライバが、受注日現在で開発されており、動作実績のあるボードに対応させることとする。コネクタのピンアサインについては、発注者の指示により決定するものとする。

高速インターロックユニットの信号入力、出力は絶縁コネクタが採用されること。高速インターロックユニットは、ユニットが設置される場所によっては、ユニットの入力の数に余

裕が出る場合がある。この様な、機器からの電圧入力が無い場所では、インターロックが継続発報となり、加速器を運転可能な状態に移行させることが出来なくなる。この様な点をふまえて、ユニットに入力される信号は、機器が設置されない信号入力が存在しても、発注者が内部回路で短絡させることが出来る構造にし、加速器施設での実用面を十分ふまえて柔軟に対応できるようにすること。

高速インターロックユニットと周辺機器の信号取り合い

高速インターロックユニットとの信号は、図17で示される信号取り合いとする。この図中

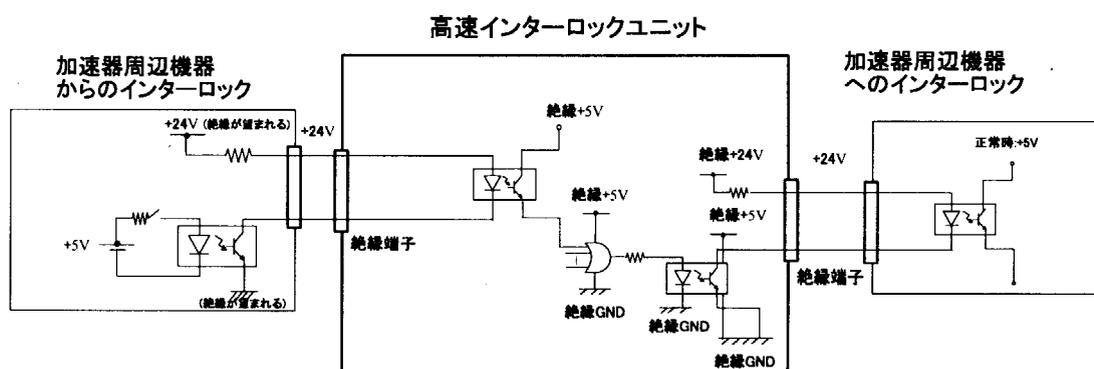


図 17 加速器周辺機器とのインターロックユニットの取り合い

の絶縁用フォトカップラは HCPL-2400(HP 製) 相当品を用い、応答速度を向上させること。なお、フォトカップラは、交換可能なように IC ソケット上に配置することが望ましい。フォトカップラの誤動作を防ぐために、インターロックユニット内の信号回路には、高速インターロックユニットの処理速度に大きく影響しない何らかのノイズ対策(ノイズフィルター)が施されること。

製作数量

- 高速インターロックユニット 3 台
- モジュール
 - 電源モジュール 3 台
 - M3 端子モジュール 3 台
 - BNC-M3 端子モジュール 3 台
 - ロスモニタ用モジュール 3 台

2.3 運転停止用インターロックユニットチェッカーおよびチェッカー付属部品

通常の加速器運転において、インターロックトラブルが発生し、ビーム停止状態が続いた場合、そのトラブル原因を早急に究明しなければならない。インターロックユニットチェッカーは、高速インターロックシステムの構築の際の検査用、またトラブルの際のシューティ

ングに用いるものである。ユニットチェッカーは、図18で示される様な外観イメージとする。

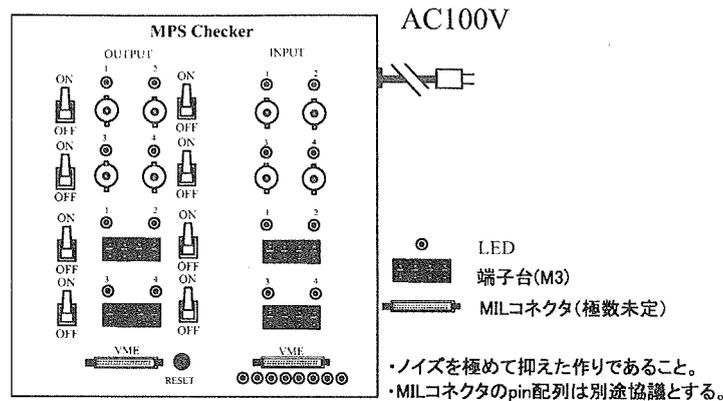


図 18 高速インターロックユニットチェッカー外観イメージ図

2.4 構成および製作数量

チェッカーは、信号入出力用絶縁BNCコネクタ、M3端子台、インターロック信号模擬用トグルスイッチ、リセットボタンスイッチ、VMEボード用コネクタなどを持ち、それ一台でインターロックユニットの試験、調整などが可能なようにするものである。入出力端子は、各2点以上確保すること。このチェッカーはAC100Vで駆動されること。

チェッカーは、VMEデジタルインプットボードの代わりとなって、インターロックユニットの1コネクタに対応するだけの、インターロック信号ビットをLED表示で確認できること。また、VMEデジタルアウトプットボードの代わりにリセット信号を模擬し、インターロックユニットでラッチされた信号をクリアできること。なお、チェッカに用意されるVMEコネクタは、インターロックユニットと同等のピンアサインとする。コネクタのピンアサインについては、発注者の指示により決定するものとする。

試験では100mのケーブルを用いて、遠方から機器インターロックを模擬する可能性がある。ノイズ対策の考え方は、高速インターロックユニットと同等にすること。

製作数量

- 高速インターロックユニットチェッカー： 1台 (30cm x 30cm x 20cm 以下)
- ユニットチェッカ用ケーブル
 - ① BNCケーブル (同軸)
 - 1m x 5本, 5m x 5本, 10m x 5本
 - ② M3端子ケーブル (ツイストペア)
 - 1m x 5本, 5m x 5本, 100m x 5本, 30m x 5本
 - ③ BNC-M3端子変換ケーブル (一方BNC、他方M3端子:同軸)
 - 0.5m x 5本, 1.0m x 5本

2.5 運転停止用インターロック接点変換器

加速器を構成している機器には、外部停止信号を 24V 電圧で受けるものもあれば、無電圧接点（加速器機器内に 24V 電源をもつ）ものもある。このような、外部無電圧接点をもつ機器に、高速インターロックユニットを対応させるために、外付けの無電圧接点変換器を製作すること。この変換器は、駆動電源を必要としない構造とし、入力用 M3 端子台、出力用 M3 端子をもつこと。無電圧接点をもつ機器は、時定数が大きな回路構成となっているために、変換器の処理時間は～10m 秒で十分である。変換器は、図 19 で示される様な、接続とする。

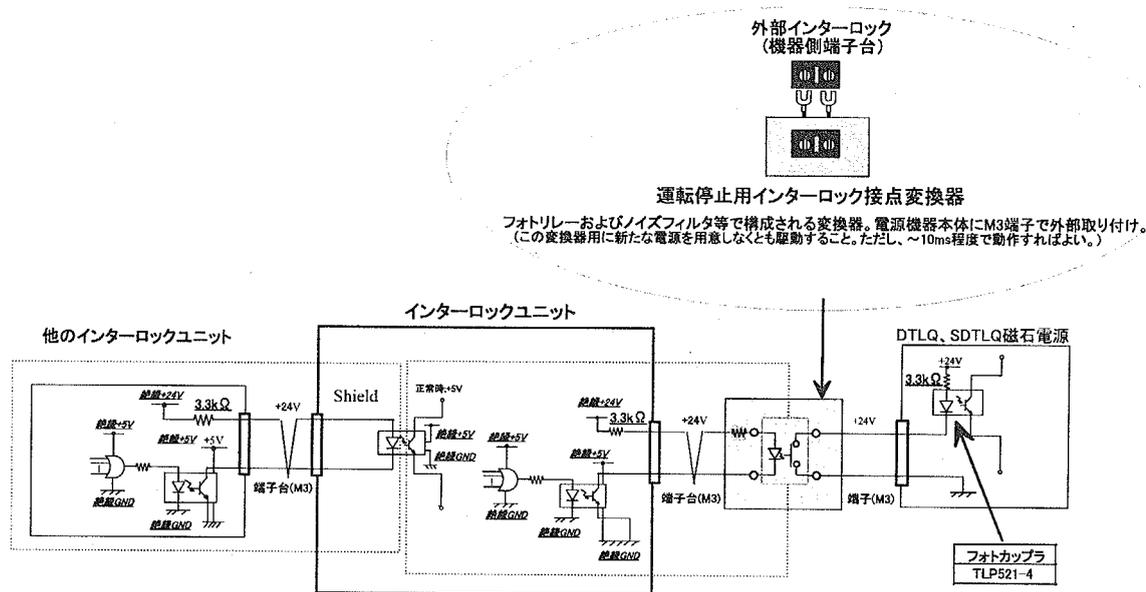


図 19 運転停止用インターロック接点変換器接続図

製作数量

- 運転停止用インターロック接点変換器 20 個

2.6 高速インターロックユニット、チェック共通事項

● 設置場所

ユニットは、加速器周辺機器コントローラが設置される場所付近に設置される。この設置場所は、+10～+35 度の室温、45～85%の湿度に保たれるため、この条件で動作すること。加速器特有の高電磁ノイズを発生させる機器近辺に設置されることもあり得るために、誤動作を発生させないために十分と思われる EMI 対策のアイデアをもって設計に反映すること。なお、ユニットは高放射線環境下で使われることはないために、放射線防護に対する条件は附加しない。また、インターロックユニットの誤動作で、加

速器構成機器を損傷する事があっても、受注者に非常に重大な過失が認められる以外は免責されるものとする。

- 使用電源
単相 AC100V 電源で駆動されること。単相電源から回り込むことが考えられる電磁ノイズに関しても十分対策しておくこと。

3 試験・検査

高速インターロックユニットの性能を保証するために、以下の試験・検査項目を実施すること。

- 寸法検査:
インターロックユニットは、EIA 標準 19 インチラック内に収まるサイズであること。
- 性能検査:
高速インターロックユニットチェッカーを用いてインターロックユニット単体内での処理速度が 2 μ 秒以下であることを検査する。また、3 台のユニットを各 100m ケーブルでリンクさせ、インターロック信号が伝播するのに要した時間が 10 μ 秒以下であること。運転停止用インターロック接点変換器が仕様どおりの性能を有すること。
- その他:
必要に応じて。(発注者が本仕様書記載の性能を有することの確認に必要と判断した場合)

なお、検査の詳細(検査立会い場所を含む)は別途協議の上決定することとするが、原則的に JIS に基づくものとする。これらの試験・検査に関しては試験検査要領書として承認を受けることとする。

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV=1.60218×10⁻¹⁹J
1 u=1.66054×10⁻²⁷kg

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m ²
放射線量	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	シーベルト	Sv	J/kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バール	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å=0.1nm=10⁻¹⁰m
1 bar=100fm²=10⁻²⁸m²
1 bar=0.1MPa=10⁵Pa
1 Gal=1cm/s²=10⁻²m/s²
1 Ci=3.7×10¹⁰Bq
1 R=2.58×10⁻⁴C/kg
1 rad=1cGy=10⁻²Gy
1 rem=1cSv=10⁻²Sv

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- E.C閣僚理事会指令ではbar, barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N (=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1Pa·s(N·s/m²)=10P(ポアズ)(g/(cm·s))

動粘度 1m²/s=10⁴St(ストークス)(cm²/s)

圧	MPa (=10bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062×10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322×10 ⁻⁴	1.35951×10 ⁻³	1.31579×10 ⁻³	1	1.93368×10 ⁻²
	6.89476×10 ⁻³	7.03070×10 ⁻²	6.80460×10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV	1 cal= 4.18605J (計量法) = 4.184J (熱化学) = 4.1855J (15°C) = 4.1868J (国際蒸気表) 仕事率 1 PS(仏馬力) = 75 kgf·m/s = 735.499W
	1	0.101972	2.77778×10 ⁻⁷	0.238889	9.47813×10 ⁻⁴	0.737562	6.24150×10 ¹⁸	
	9.80665	1	2.72407×10 ⁻⁶	2.34270	9.29487×10 ⁻³	7.23301	6.12082×10 ¹⁹	
	3.6×10 ⁶	3.67098×10 ⁵	1	8.59999×10 ⁵	3412.13	2.65522×10 ⁶	2.24694×10 ²⁵	
	4.18605	0.426858	1.16279×10 ⁻⁶	1	3.96759×10 ⁻³	3.08747	2.61272×10 ¹⁹	
	1055.06	107.586	2.93072×10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515×10 ²¹	
	1.35582	0.138255	3.76616×10 ⁻⁷	0.323890	1.28506×10 ⁻³	1	8.46233×10 ¹⁸	
	1.60218×10 ⁻¹⁹	1.63377×10 ⁻²⁰	4.45050×10 ⁻²⁶	3.82743×10 ⁻²⁰	1.51857×10 ⁻²²	1.18171×10 ⁻¹⁹	1	

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270×10 ⁻¹¹
	3.7×10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58×10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

機器保護用高速インターロックユニット試作機的设计

R100

古紙配合率100%再生紙を使用しています