

JAERI-Tech
2004-021



JP0450287



機器保護用高速インターロックユニット試作機
の性能試験

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。

入手の間合わせは、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, Ibarakiken 319-1195, Japan.

機器保護用高速インターロックユニット試作機の性能試験

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
榑 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)では、大電力陽子ビームが加速されるために、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、最速数 μ 秒以下でビームを停止させねば、加速器の材質表面に熱衝撃破壊を起し、致命的な損傷を与えることが懸念される。

我々は、熱衝撃損傷を避けるために、機器保護用高速インターロックシステム用ユニットの試作機を製作し、その試験を行った。

この報告書は、機器保護用インターロック用ユニットの試作機の性能試験結果について書かれたものである。

Performance Test 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 high-power proton beam is accelerated. If the beam in J-PARC is not stopped at a few micro seconds or less, the fatal thermal shock destruction is caused on the surface of accelerating structure, because of the high-power proton beam.

To avoid the thermal shock damage, we designed the high-speed machine protection system. And, the prototype unit for the system was produced.

This report shows the result of its performance test.

Keywords: J-PARC, Machine Protection System, Interlock, Prototype-unit, Linear Accelerator, Performance Test

目次

| | | |
|-------|------------------------------|----|
| 1 | はじめに | 1 |
| 2 | MPS 高速インターロック試作機 | 1 |
| 2.1 | 高速インターロックモジュール | 1 |
| 2.2 | インターロックモジュール動作確認用チェッカ | 5 |
| 3 | インターロック信号伝送速度試験 | 6 |
| 3.1 | 速度試験用処理回路 | 6 |
| 3.2 | 速度計測および結果 | 7 |
| 4 | 長時間安定動作確認試験 | 12 |
| 5 | 誤動作要因究明 | 13 |
| 5.1 | 放電ノイズ(静電ノイズ)要因 | 13 |
| 5.2 | 放電ノイズの定量評価 | 16 |
| 5.3 | 伝導ノイズ(ラインサージ・ノイズ)要因 | 18 |
| 5.3.1 | ラインサージ対策装置の性能評価 | 20 |
| 6 | 高性能 DC 用 EMI 除去フィルタを加えたノイズ対策 | 23 |
| 6.1 | 放電ノイズ対策 | 23 |
| 6.2 | サージノイズ対策 | 26 |
| 6.3 | 総合的ノイズ対策 | 28 |
| 6.3.1 | FPGA による発報待ち時間 | 28 |
| 6.3.2 | 実機 ILK ユニットで入れるべき電磁ノイズ対策 | 29 |
| 7 | その他の問題 | 31 |
| 7.1 | ツイストペアケーブル用端子台 | 31 |
| | 参考文献 | 32 |

Contents

| | |
|--|----|
| 1 Introduction | 1 |
| 2 High Speed Interlock Prototype for MPS | 1 |
| 2.1 High-speed Interlock Module..... | 1 |
| 2.2 The Checker for the Interlock Module..... | 5 |
| 3 The Speed Test of Interlock Signal | 6 |
| 3.1 Processing Circuit for Speed Test..... | 6 |
| 3.2 Measurement and Result..... | 7 |
| 4 Running Test for a Long-time | 12 |
| 5 Malfunction Factor Investigation | 13 |
| 5.1 Discharge Noise (Electrostatic Noise) Factor..... | 13 |
| 5.2 Quantitative Evaluation of Discharge Noise..... | 16 |
| 5.3 Conduction Noise (Line Serge Noise)..... | 18 |
| 5.3.1 Performance Evaluation of the Line Serge Device..... | 20 |
| 6 Noise Measures with the High Performance EMI Removal Filter | 23 |
| 6.1 Discharge Noise Measures..... | 23 |
| 6.2 Serge Noise Measures..... | 26 |
| 6.3 Synthesized Noise Measures..... | 28 |
| 6.3.1 Waiting Time by FPGA..... | 28 |
| 6.3.2 Noise Measures which should be Put with the Real Unit..... | 29 |
| 7 Other problems | 31 |
| 7.1 Twisted-pair Cable External Terminal..... | 31 |
| References | 32 |

1 はじめに

大強度陽子加速器施設 (J-PARC) では、同様施設の米国 SNS[1] が指摘するように、ビーム衝突が発生した場合の熱衝撃による金属破壊を懸念する必要がある。特に、線形加速器の最上流部近辺では、スポットビームの場合 1μ 秒程度以下でのビーム停止が提唱されている。

今回、これら2点の資料から、J-PARC・加速器制御グループではこれらの要求に最大限に応えられるように、「機器保護高速インターロックシステム (Machine Protection System:MPS)」として、インターロックシステムを構築する。このシステムは、加速器主要機器に於いてインターロックが発生した場合、その信号を高速に伝達する様に設計された「インターロックユニット」から構成される。超高速なインターロックシステムが確実な信頼性をもって達成されるには、十分な設計を考慮した試作機を作成し、その性能試験を行う必要がある。

本報告書は、平成14年度に「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」として発注された、試作機の試験結果がまとめられたものである。

2 MPS 高速インターロック試作機

2.1 高速インターロックモジュール

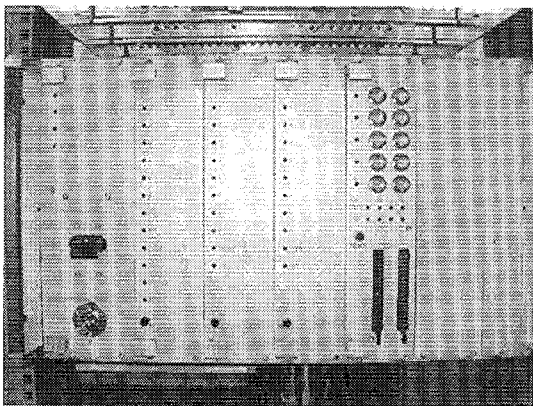


図1 MPSユニット全景

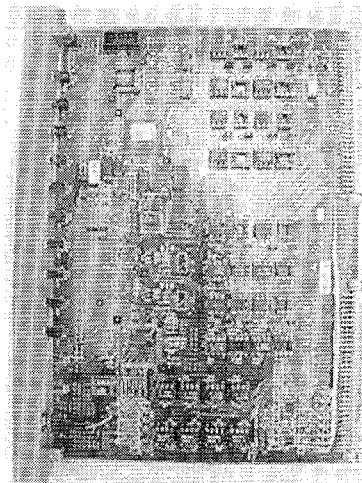


図2 標準ILKモジュール

試作された MPS 高速インターロック¹ユニットの全景を、図1に示す。左から、MPS ユニット電源モジュール、初期型ロスモニタモジュール、標準ILKモジュール2式、そして、新型ロスモニタモジュール、ブランクパネルの順に挿入されている。1台のユニットには、標準モジュールが5台挿入可能である。

ILKユニットと、上位計算機とのインターフェースは、背面に用意された、MILフラットケーブル端子部分および、Dサブ9ピン端子により行われる。また、ILKユニット間をシリーズに接続させてシステムを組む際も外部に用意された端子から、信号を取り合うことになる。

¹インターロック：Inter Lock を断りのない限り ILK と表示する

図2には、標準ILKモジュール基板を側面から見た写真を示す。基板は、外部回路との絶縁をフォトカップラで行う為に、図右半面部にICソケットに挿入された高速・広帯域ノイズフォトカップラが配置されている。このインターフェース部分で、受けた信号はFPGA(Field Programmable Gate Array)でロジック判断、ラッチされてILK発報信号として背面より出力される。図3、図4にはILKモジュールの処理回路の概略図を示す。加速器構成機器側

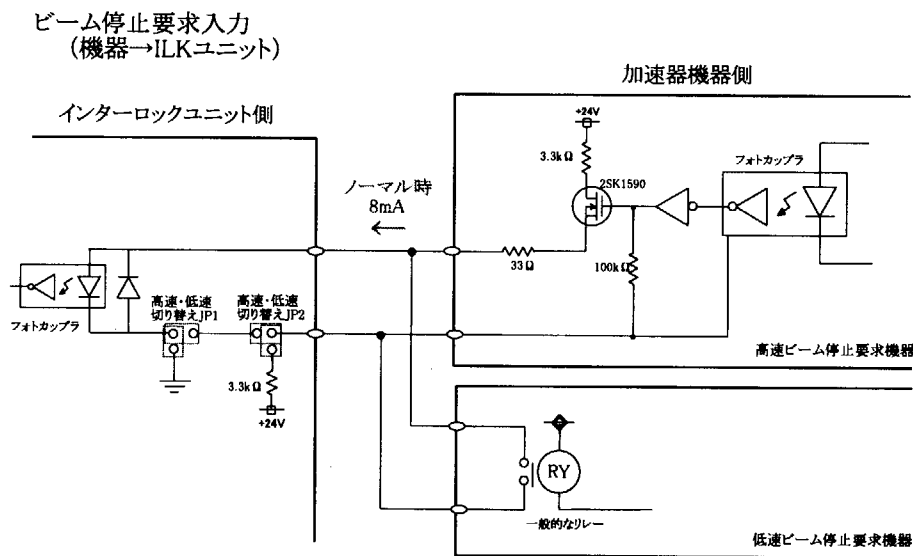


図3 ILKモジュール内回路入力部

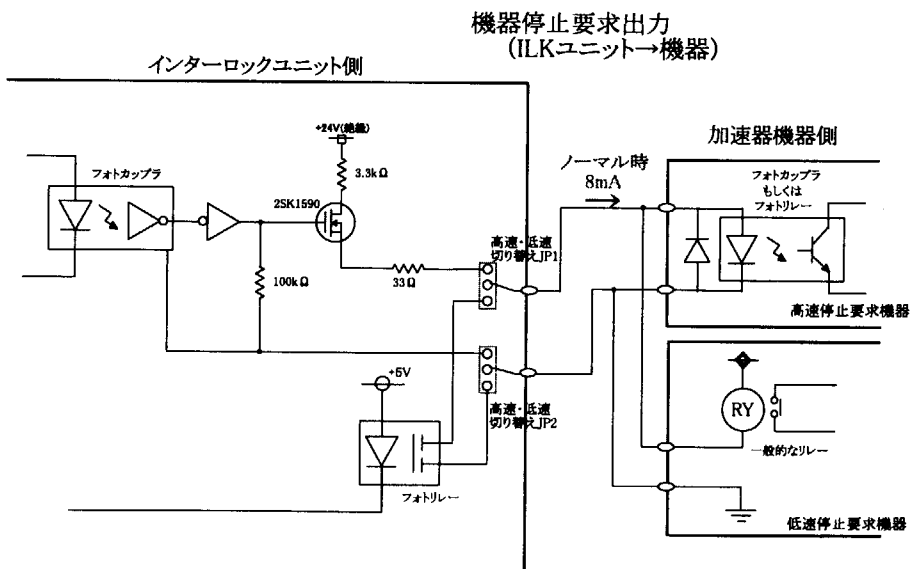


図4 ILKモジュール内回路出力部

において、何らかのトラブルが発生し、超高速ビーム停止を要求する場合は、図3に示すよ

うに、ノーマル時8mAの電流を流している状態から、その電流をゼロにすることでILKユニット側のフォトカップラの点灯をOFFする。FPGAは、フォトカップラ出力OFFによって、ILK状態と判断する。ノーマルクローズにしているために、加速器構成機器がILK以外にも、制御電源がOFFされているような状態でも、ILKは発報する。

加速器構成機器のILK発報が電流出力ではなくリレーによる場合は、ILKモジュール内のジャンパピンの切り替えによってその切り替えを行い、加速器機器側の異常時リレーブレイクによって、ILKが発報する。

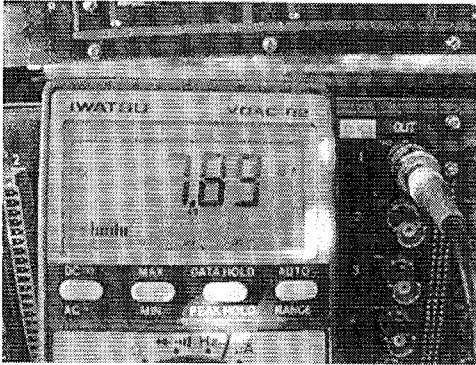


図5 ILKモジュールOUT端子発報前電流

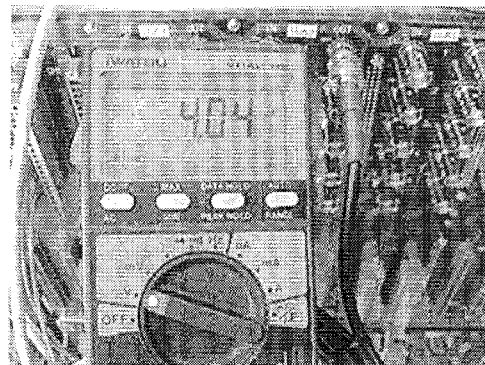


図6 ILKモジュールOUT端子発報前電圧

図5、図6に、ILKユニット背面の高速ILK発報設定時の端子(BNC)の初法前電流・電圧出力を示す。この端子は、このユニットが単体で直轄管理する機器を停止するために用いる端子であり、ビーム停止に直接関わるものではない。図5は、発報前の電流値であり、正常時8mA通電の仕様どおり、約8mAの電流が流れている。また、図6はその時の電圧である。電流量8mAの仕様であるために、モジュール内部で使用しているFETの2SK1590ILKによる電圧値となり、24Vとは成らない。

ビーム停止要求のために上流に伝送される信号もまた、ILKユニット背面から出力される。このビーム停止要求のILK信号は、RS-485規格の信号でシリーズにユニット間を渡され、上位ビーム遮断ロジック機器までリレーされる。RS-485はEIA²が制定した規格である。これは平衡型³で信号伝達を行うので、より長距離(ケーブルの最大長は1.2km)、高速な通信(最高通信速度は10Mbps)が可能で、比較的ノイズに強い⁴ため工場などで用いられるRS-422と上位互換のシリアルインターフェースとなっている⁴。RS-422と非常に似た特性を有しているが、大きく異なる特徴として、マルチポイント接続(多対多)に対応している点が上げられる。表1に、RS-485規格の電気特性を示す。

²Electronics Industries Association 米国電子工業会：アメリカの電気機器等の規格を検討、制定する団体

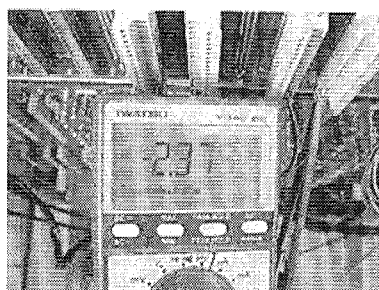
³ディファレンシャルとも呼ばれる。対の信号線を使い、その電位差で信号を表す。グラウンドレベルに左右されずノイズに強い

⁴RS-422とRS-485間に利用できる機器も多く見られる

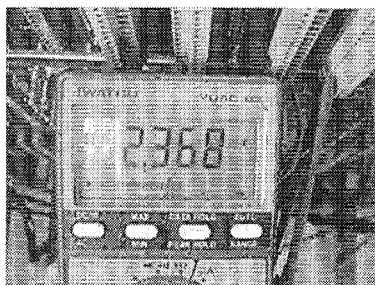
表 1 RS-485 の電氣的特性

| RS-485 | | 電氣的特性 |
|---------|------------|-------------------|
| ドライバ | 無負荷時の出力電圧 | (出力間) $\leq 6V$ |
| | 負荷時の出力電圧 | (出力間) $\geq 1.5V$ |
| | 短絡時の出力電流 | $\leq 250mA$ |
| レシーバ | 入力抵抗 | $\geq 12k \Omega$ |
| | 入力ヒステリシス電圧 | $\pm 0.2V$ |
| | 入力最大電圧 | $-7V \sim 12V$ |
| 最大ケーブル長 | | 1.2km |
| 最大伝送速度 | | 10Mbps |
| 動作方式 | | 平衡 |
| 終端処理 | | 伝送路の両端 |

また、図7には、RS-485を使用したビーム停止 ILK ラインの To 信号端子の発報前、発報後の電圧を示す。RS-485 信号は、対信号線の電位差を見て信号を伝送するために、図右端に書かれたように、発報前・発報後で各信号線の電圧値が変化し、その差分により信号を認識していることが分かる。



発報前 TO端子電圧



発報後 TO端子電圧

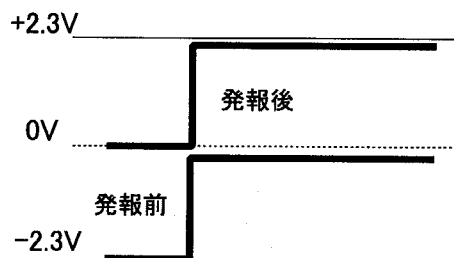


図 7 ILK ライン (RS-485) の To 端子電圧

2.2 インターロックモジュール動作確認用チェッカ

試作機試験を行うために、インターロックモジュール動作確認用チェッカも同時に製作した。チェッカは、今回製作した試作機 ILK ユニットの試験を、効率的に行えるように、ILK を入出力させる加速器構成機器を擬似的にしたものである。また、このチェッカは、接続が予定されている上位計算機 VME とのピンアサインを同じにした端子を有し、VME との信号やり取りも試験できるようになっている。図 8 に、今回製作したチェッカの写真を示す。

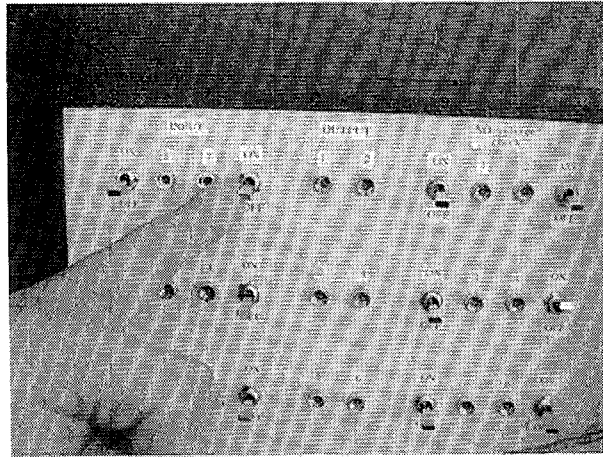


図 8 チェッカ

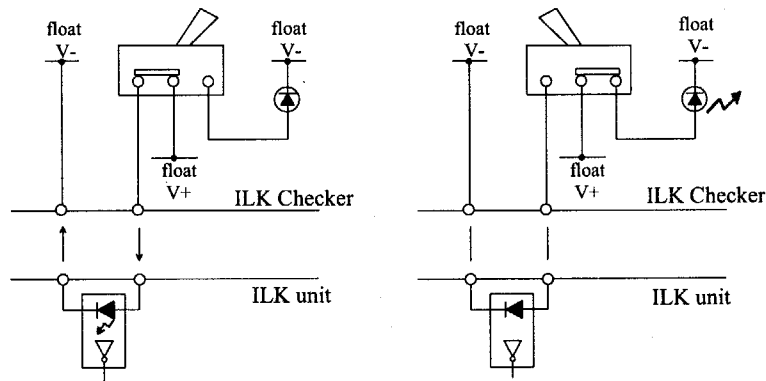


図 9 チェッカ内スイッチ部回路

チェッカは、機器側の ILK 発報のシミュレートをするために、盤面上にスイッチを持つ。スイッチの入り切りによって、ILK の発報の有無を表現する。なお、チェッカ内部のスイッチ部の回路は、図 9 の通りである。

チェッカの出力は、高速 ILK 応答要求機器の取り合いである「8mA 電流出力」としているが、出力電圧は FET でドライブされる ILK モジュールの OUT 端子電圧の場合とは異なり、24V の電圧を利用して 8mA を作り出す回路構成になっている。

3 インターロック信号伝送速度試験

3.1 速度試験用処理回路

この章では、試作機試験で最も重要な性能評価項目である、ILK 信号伝送試験について述べる。性能評価には、これまでに説明してきた ILK ユニット (標準 ILK モジュール) とチェッカを用いる。つまり、チェッカから出力される 8mA の電流を、標準 ILK モジュールの ILK 信号入力として利用する。

ただし、高速な電流変化を高性能 CT (Current Transformer) で直接検出する手段が準備出来なかったため、試験評価用に図 10、図 11 で示す回路を用意した。この回路は、チェッカからの電流を、ILK モジュールで使用されている高速フォトカップラ (HCPL2400) を経由させることで計測開始の TTL トリガをつくりだし、そして、もう 1 個のフォトカップラで検出する ILK モジュールからの OUT 信号 TTL 電圧との時間差を計測するようにしている。

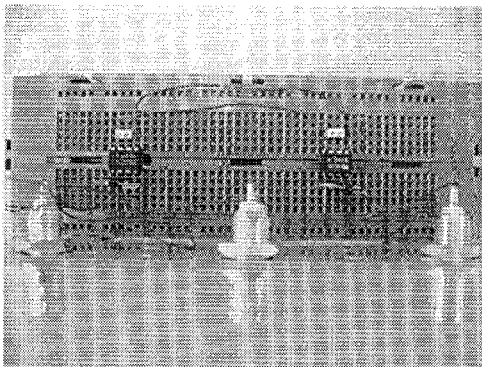


図 10 電流/電圧変換用高速フォトカップラ回路

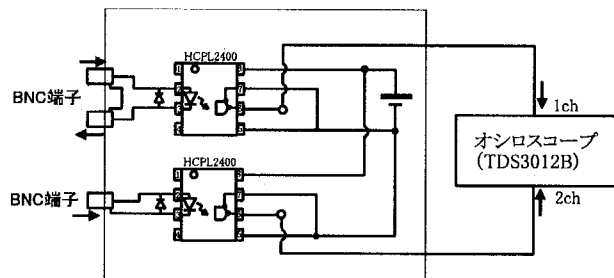


図 11 伝送速度試験測定用フォトカップラ回路図

図 10 は、用いた回路の写真、図 11 は、その回路図の詳細である。オシロスコープで検出される回路上の 2 個のフォトカップラの発報信号の時間差が、伝送時間となる。

つまり、伝送速度試験は、「モジュールに ILK 信号が入ってから、その信号が FPGA で内部処理・ラッチされて、ILK 信号が入ったモジュールの OUT 出力端子から信号が出力されるまで」の時間を計測することで求められる。

ILK は、負論理で動作する設計であるために、ILK モジュール間をシリーズにつなぐ From-To 端子や、ILK 信号が入力されていないモジュール端子があると、ILK が継続的に発報することになり、伝送速度試験を行うことが出来ない。よって、図 12 のように ILK モジュール間をシリーズにつなぐ From-To 端子はショートし、実際に ILK 信号が入らないモジュールのチャンネルは、内部に実装されているジャンパピンでマスクする。

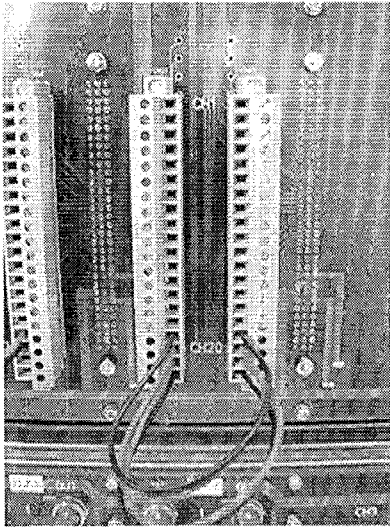


図 12 モジュール側 From-To ショート

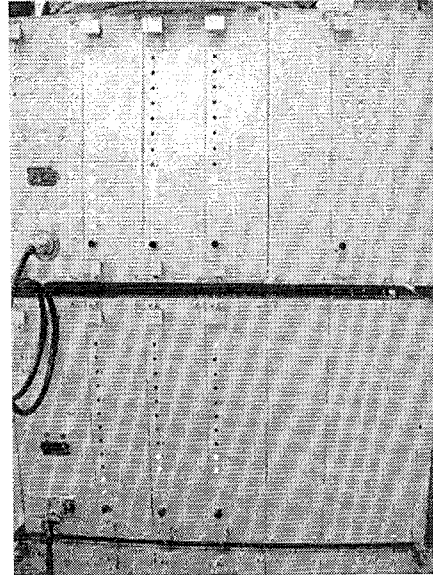


図 13 ILK ユニット 2 台連結試験

3.2 速度計測および結果

速度試験は、先の節で述べられた処理回路を用いて行われた。試験用 ILK 信号は、チェッカを出発点に以下で示される流れで伝送される。

チェッカ⇒5mBNCcable⇒処理回路⇒5mBNCcable⇒ILK ユニット系⇒10mBNCcable⇒処理回路

計測される伝送時間は、上記の下線部分通過に要した時間である。つまり、試験模式図の図 14、図 16、図 18、図 20 に書かれた①-②間の時間となる。また、この計測から 1 ユニット内での処理時間も得られるよう図 13 に示すように、複数台のユニットを経由させて、「ユニット内処理時間」の計測精度を上げるようにしている。

計測は、次の伝送距離で行った。伝送距離のうち、信号を ILK モジュールに入出力する 15m が BNCcable で、モジュール間を伝送する残りの距離がツイストペア線とした。

- 15m (内 15m が BNCcable)
- 45m (内 15m が BNCcable)
- 75m (内 15m が BNCcable)
- 245m (内 15m が BNCcable)

以上の条件で計測されたオシロスコープ (OSC) 上の処理応答は、図 15、図 17、図 19、図 21 に示され通りであった。

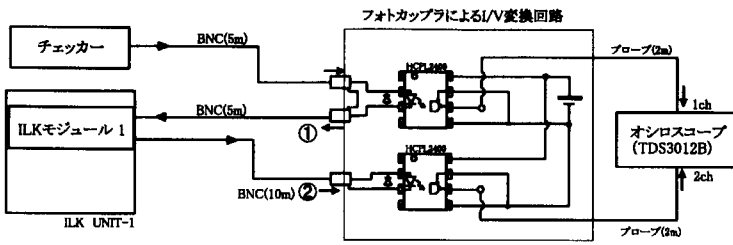


図 14 15m 伝送距離測定

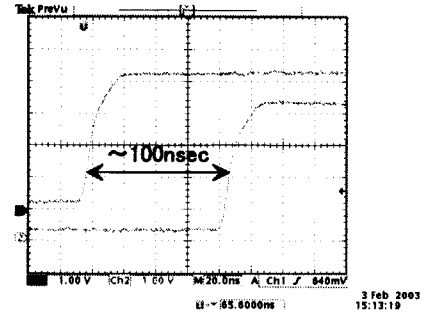


図 15 15m 伝送距離測定の結果

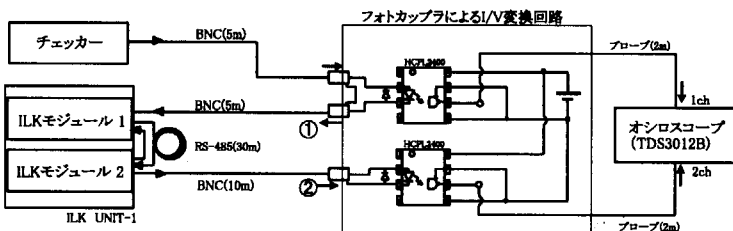


図 16 45m 伝送距離測定

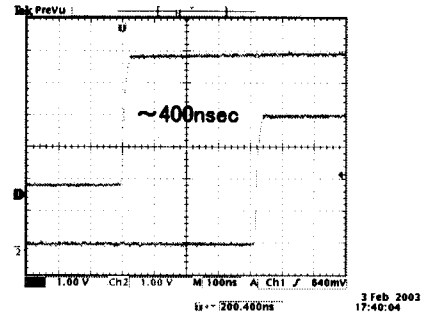


図 17 45m 伝送距離測定の結果

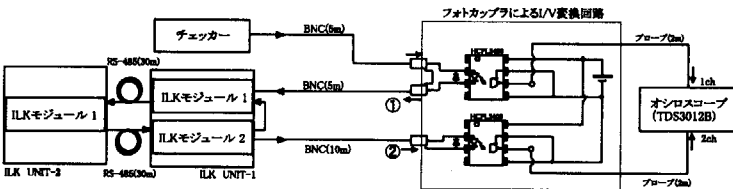


図 18 75m 伝送距離測定

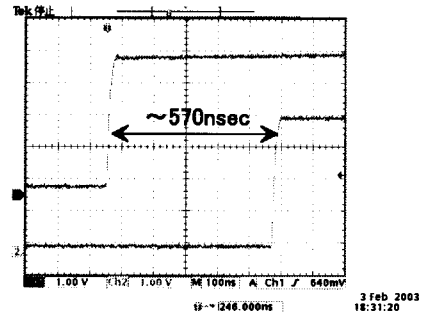


図 19 75m 伝送距離測定の結果

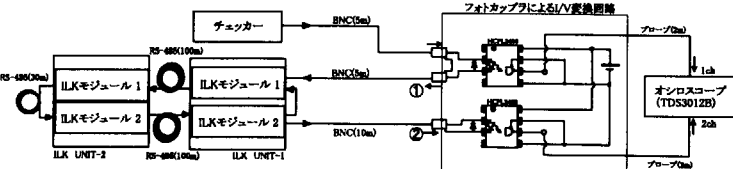


図 20 245m 伝送距離測定

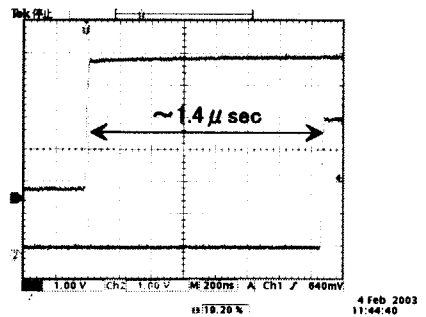


図 21 245m 伝送距離測定の結果

表2に、各伝送距離(モジュール数)での、伝送時間をまとめる。今回の試験では、伝送距離を60m以上の時より、ユニット数を増やすようにした。

表2 伝送試験結果

| 信号伝送距離 | ユニット数 | モジュール数 | 応答時間 |
|--------|-------|--------|-----------------|
| 15m | 1 | 1 | ~ 100 n sec |
| 45m | 1 | 2 | ~ 400 n sec |
| 75m | 2 | 3 | ~ 570 n sec |
| 245m | 2 | 4 | ~ 1.4 μ sec |

表2の結果から、1モジュールあたりのILK入力処理速度を x 、ケーブル伝送速度を y 、1モジュールあたりのRS-485処理速度を z とにおいて、連立方程式を立て、それらを求める。45m、75m伝送時と、245m伝送時のデータから方程式は(1)式となる。

$$\begin{cases} x + 45y + 2z = 0.4 \\ x + 75y + 3z = 0.57 \\ x + 245y + 4z = 1.4 \end{cases} \quad (1)$$

これを解いて、 x 、 y 、 z を求めると、

$$\begin{cases} x = 0.13073 \\ y = 0.00471 \\ z = 0.02857 \end{cases} \quad (2)$$

よって、ケーブル伝送単位時間およびモジュール内ILK処理、モジュール内RS-485処理単位時間は表3にまとめられる。

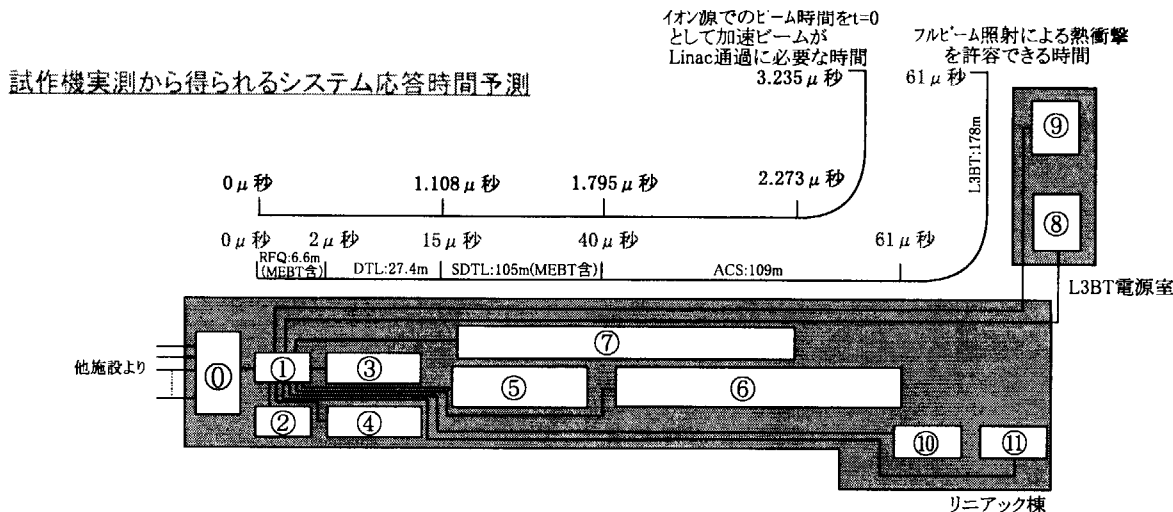
表3 ケーブル伝送単位時間およびモジュール内処理単位時間

| 処理部位 | 処理時間 | 単位 |
|----------------|--------|--------------|
| ケーブル伝送速度 | 4.71 | n sec/m |
| モジュール内ILK処理 | 130.73 | n sec/module |
| モジュール内RS-485処理 | 28.57 | n sec/module |

なお、図14の測定系では、~100nsecの処理時間が観測された。これは、信号が15m伝送される時間(15 x 4.71nsec=70.65nsec)と、このとき、モジュールが1モジュールしか使われておらず、ILK信号がフォトカップラで処理された後そのままスルーでOUTされた時間(~20nsec)の積算によるものである。

ILKユニットの目標設計値として、伝送速度を5nsec/m、1モジュールあたりの処理時間を500nsecとしていたので、非常に高速応答を持ったモジュールが出来上がっているといえる。

以上の結果を用いて、試作機による応答から得られた線形加速器内の高速ILK応答時間予測を計算し、図22に示す。



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) | 電子速度 (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 | 0.18 | 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 | 480 | 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 22 試作機による応答から得られた線形加速器内の高速 ILK 処理時間予測

応答時間速度によって得られた、各パラメータ「ケーブル伝送速度、モジュール内 ILK 処理、モジュール内 RS-485 処理」を、「単位長当たりの伝送速度 (μ秒/m)、unit 単位処理時間、RS-485 単位処理時間」として、それぞれ「0.005(μ秒/m)、0.13(μ秒)、0.03(μ秒)」として、試作機を用いて線形加速器の高速インターロックシステムを構築した場合に、期待できる応答速度を計算した。なお、ロスモニタの検出処理時間であるが、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ため、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ダは 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。
- 検出ヘッダ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。

図 22 で示される様に試作機によるシステムの応答は、最高速が要求される RFQ・DTL 部分

近辺において、 $\sim 1.05 \mu$ 秒であり(ロスモニタの反応速度が不確定の為に予測でしかない)、目標設計値の $\sim 1.5 \mu$ 秒を下回り熱衝撃に耐えられる速度が達成できることが分かる。

4 長時間安定動作確認試験

次に、各ユニットを使用して長時間安定動作を確認することにした。ILKユニットがノイズに弱く、ILK信号の有無に関わらず自ら自発してしまうと、信頼性を完全に失うためである。

長時間安定試験は、図23のように「チェッカ出力をILKモジュールを単体に入力する試験」、及び図24のように「チェッカ出力を1台のILKモジュールに入力し、さらにそのOUT出力を別ユニットのILKモジュールに入力する試験」の2つ条件で行った。そして各条件に於いて、チェッカで「ILK無し(8mA供給)状態」を作り、その状態を維持し続ける方法を取り、自発誤動作が発生するまで継続した無発報継続時間を記録した。

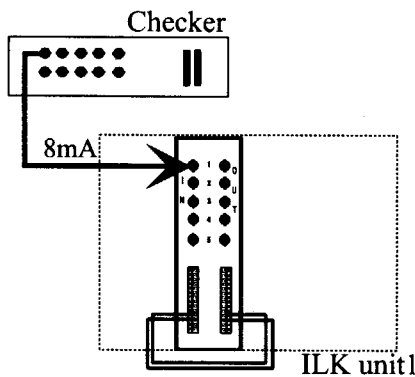


図23 1ユニットモジュールでの長時間運転試験

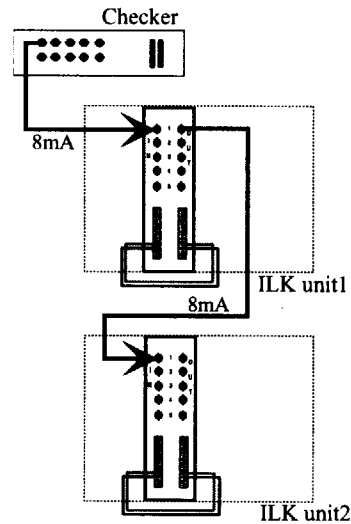


図24 2ユニットモジュールでの長時間運転試験

表4に、図23での継続時間、表5に、図24での継続時間を示す。ILK信号を操作してい

表4 1モジュール長時間試験結果

| 発報回数 | 無発報継続時間 | 平均時間 |
|------|----------|----------|
| 1回目 | 126時間 | 平均 111時間 |
| 2回目 | 96時間(強制) | |

表5 2モジュール長時間試験結果

| 発報回数 | 無発報継続時間 | 平均時間 |
|------|---------|---------|
| 1回目 | 69時間 | 平均 44時間 |
| 2回目 | 26時間 | |
| 3回目 | 19時間 | |
| 4回目 | 3時間 | |
| 5回目 | 16時間 | |
| 6回目 | 129時間 | |

ないので、理想的にはどのような条件下でも無発報が起こらない、もしくは、自発が起こるとしても無発報状態が最低868時間(1ヶ月)程度の持続が望まれたが、平均で111時間、44時間とその値とは程遠いものであった。この誤動作に関して十分な原因究明を行わねば、ノイズ環境が最悪の実現場では使い物にならないと思われる。

5 誤動作要因究明

先の章の「長時間安定動作確認試験」の結果では、ノイズ環境が悪い現場ではこのままでは使いものにならないということが分かった。本章では、その原因究明の過程を記載する。

5.1 放電ノイズ(静電ノイズ) 要因

誤動作の原因究明を行っていくうちに、SW を ON/OFF しなくとも図 25 のようにチェッカの SW に触れるだけで発報することに気づいた。手で触れるだけでなく、テスターなどの金属棒で触れても同様に、ILK モジュールが発報した。

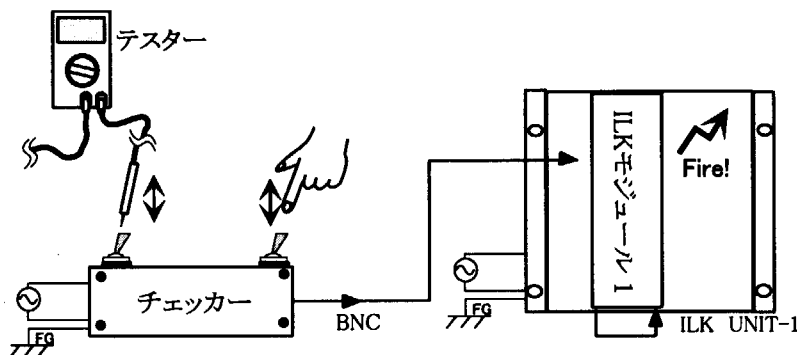


図 25 チェッカを触るだけで ILK が発報

そこで、まずは ILK モジュール内のフォトカップラ部分で、どのような挙動をしているのか確認するために、図 26 で示すように伝送速度試験のときに用いた回路を用いて、フォトカップラ出力を観測した。観測結果を、図 27 に示す。この図で示されるように、フォトカッ

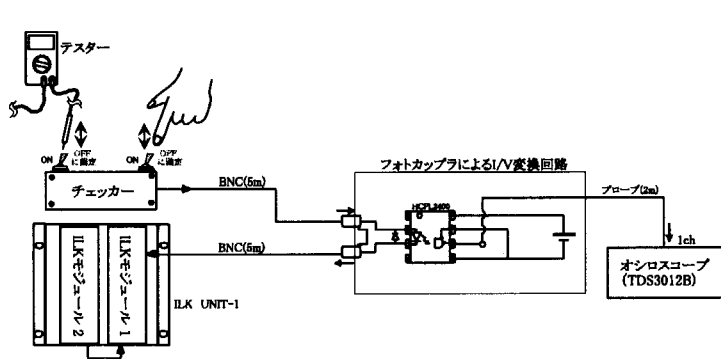


図 26 チェッカ接触によるノイズ計測

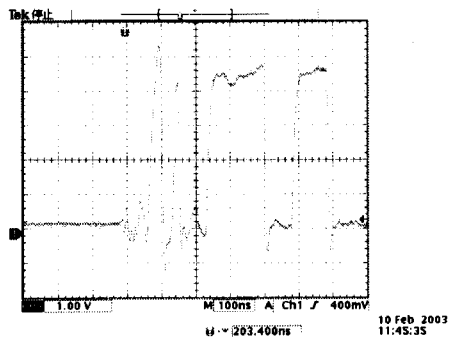


図 27 図 26 におけるインターロック発報波形

プラ出力はチェッカに接触するだけで明らかに 200nsec 程度 TTL-HI レベルを維持する時が観測された。つまりチェッカの出力電流が、接触により瞬間的にゼロにふれていることが分かる。

そこで、これはチェッカと ILK ユニット間でのフレームグラウンド (FG) レベルの違いから発生するのではないかと考え、図 28 で示すように、両者の FG を導線によって接続した

が、導線を接触させるだけでも、図 29 のように発報した。なお、両者の FG 間を接続したまま、人間がチェッカに接触することも行ったが、発報頻度は低下するものの発報が無くなる事は無かった。

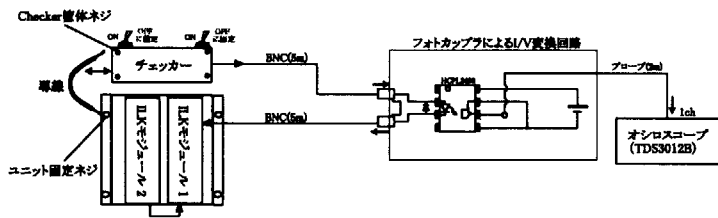


図 28 チェッカ・ユニット間 FG 接触によるノイズ

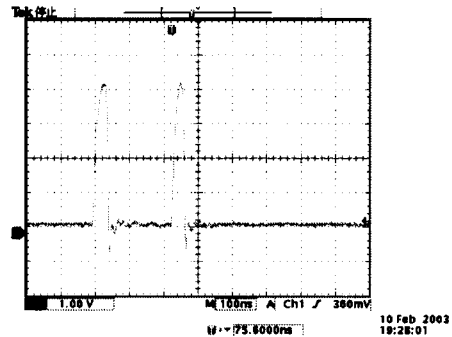


図 29 図 28 におけるインターロック発報波形

実際、フォトカプリアが誤動作していることは分かったが、チェッカ出力がどの程度変化しているのかを確認するために、チェッカ出力電流をそのまま計測することにした。図 30 に示すように、チェッカからの出力は、100 Ω の抵抗によって電圧に変換された上で、OSC で計測した。計測結果は、図 30 の右に示されるが、8mA(OSC で 800mV) で一定だった波形が、接触によって瞬時にプラス側に 24mA(OSC で 2.4V) 振れたり、マイナス側に 13mA(-1.3V) 振れたり、接触によって電流が数百ナノ秒間不安定になっている様子が良くわかる。

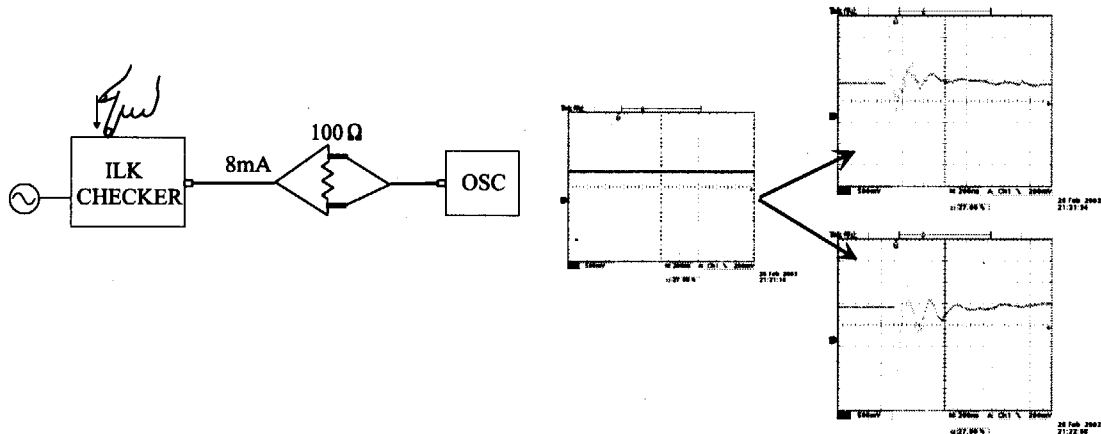


図 30 チェッカ出力電流直接計測系

このような、「接触による電源電流の不安定挙動」はチェッカ製作で用いたスイッチング電源が、接触による静電気に極めて弱いという固有の性能であるために起こりえた現象かどうか疑問が生じてきた。そのため、他の一般的な市販スイッチング電源でもこのような現象が起こりえるのか確認した。市販電源は、一般的に販売されている+5V・10Aの金属カバーで覆われたものを用いた。

図 31 に、その計測時の写真と計測結果を示す。図で示されるように、市販電源のコンセ

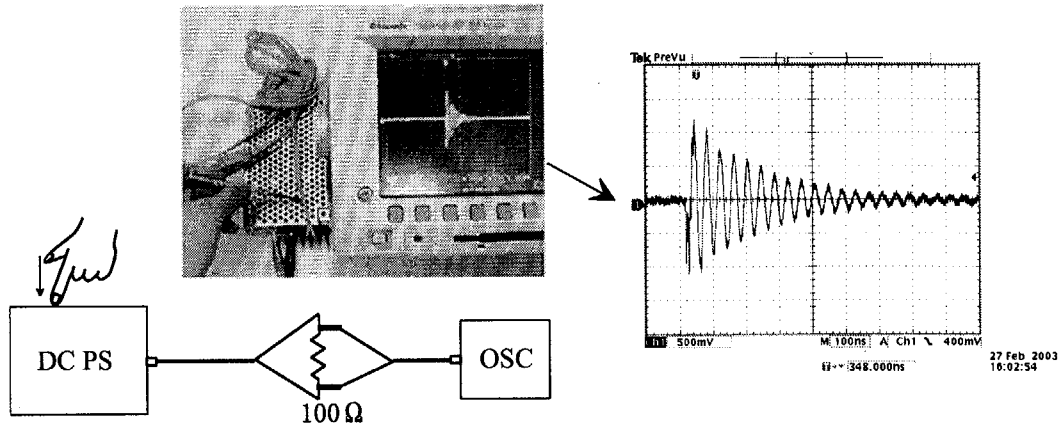


図 31 市販スイッチング DC 電源を使った出力電流測定

ントプラグを抜いた状態で接触した場合でさえ、電流 (100 オームで電圧に) が振れる。そして、内部回路の特性と思われる 1μ 秒近い減衰振動が持続していた。今回用いた電源だけでなく、一般的な電源すべてにおいて、接触などによって同様な静電気ノイズが発生することが確認された。

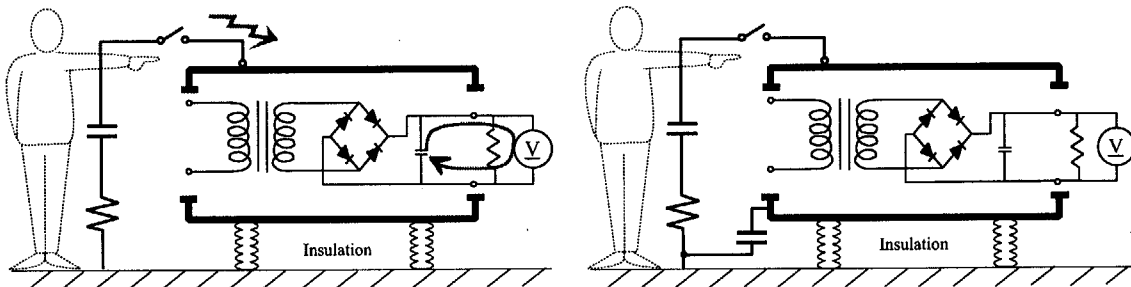


図 32 人間の接触によって放電ノイズが発生 図 33 同電位にすると放電ノイズは発生しない

なお、市販電源試験は、電源自身を図 32 のようにグラウンドから絶縁して行った。この際、接触させるもの (例えば人間) と、電源自身を導線によって同電位にした場合は、当然ではあるが放電ノイズは発生しなかった (図 33)。

5.2 放電ノイズの定量評価

この節までで、チェッカの誤動作はその内部電源が静電気による放電ノイズで瞬時に変動するためであることが分かった。そこで、ILKユニット電源モジュールに対して、出来るだけ同程度量の放電ノイズを繰り返し与えられるように、ライターを用いた放電ノイズ試験を行った。

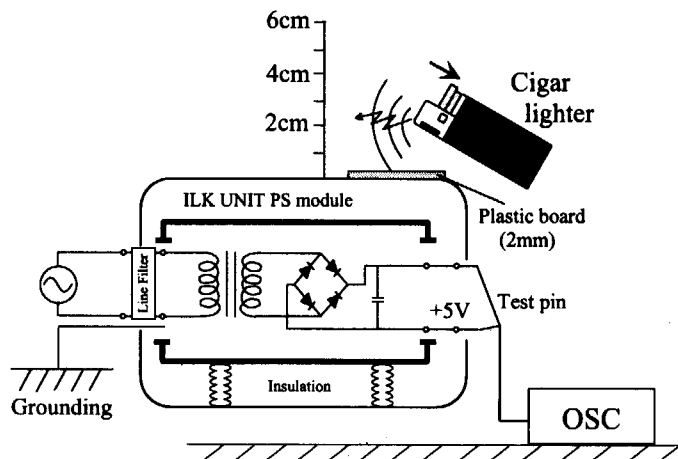


図 34 ライターを用いた放電ノイズ計測システム

図 34 に、ライターによる放電計測系を示す。電源モジュールの+5V テストピンに OSC のプローブを付けて観測している。計測条件は、①ライターを直接電源モジュールに接触放電、②2mm のプラスチックを置いてその上から放電、③2mm プラスティックを置きライターを2cm 離れた上で放電、④2mm プラスティックを置きライターを5cm 離れた上で放電の4通りである。AC 成分の揺らぎを拡大して計測するために、OSC は AC カップリングモードで使用した。

図 35 ～図 38 に、OSC での計測結果を示す。

図 35 ～図 38 で得られた結果を、縦軸に放電ノイズのプラス側電圧ピーク、横軸にライター距離をとったグラフ(図 39)で表す。十分に定量的な評価が出来る結果ではないが、ライターを接触させた時以外はほぼ同じピーク電圧であり、接触放電ノイズを電源モジュールに与えない限りは ILK の誤動作は起こりにくいものと考えられる。

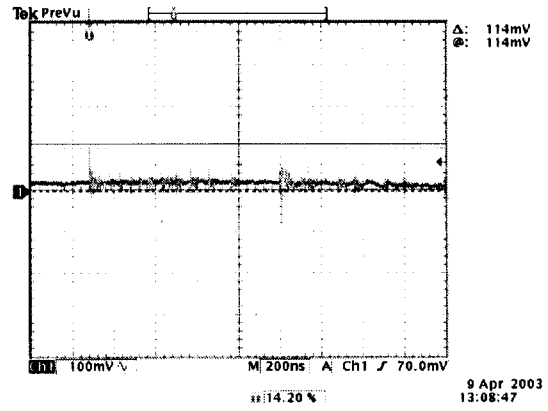
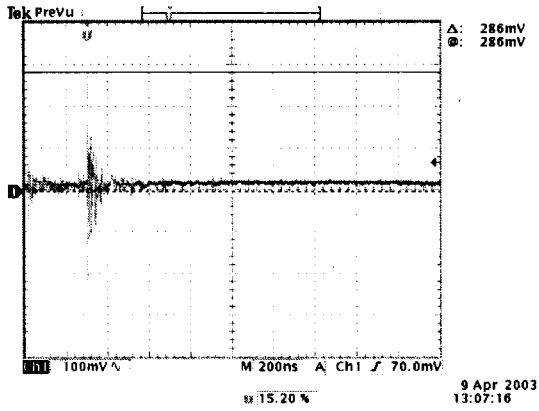


図 35 プラスチックを置かずに PS モジュールにライターを直接接触 図 36 プラスチックを置いて PS モジュールにライターを直接接触

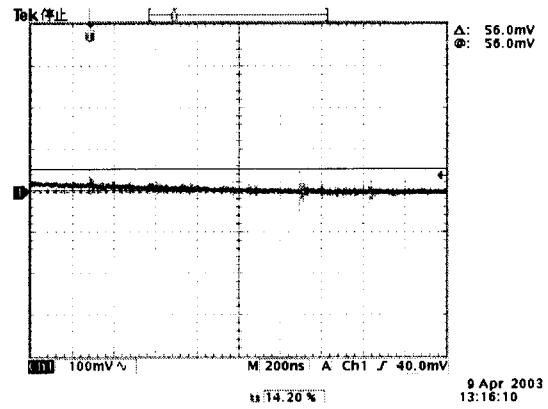
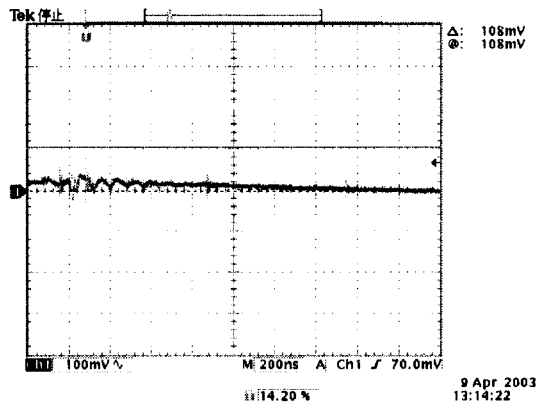


図 37 プラスチックを置いてさらにライターを 2cm 離す 図 38 プラスチックを置いてさらにライターを 5cm 離す

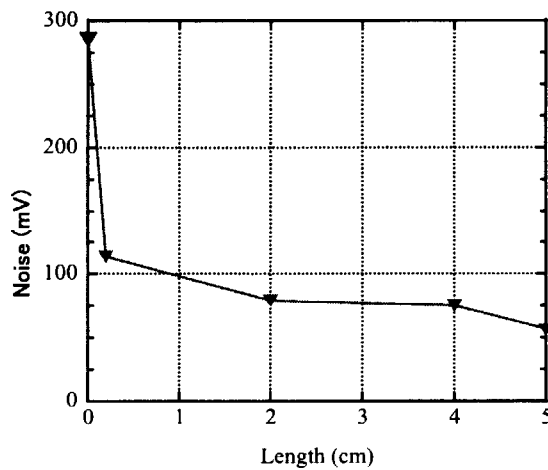


図 39 ライター距離と放電ノイズ量の変化

5.3 伝導ノイズ(ラインサージ・ノイズ) 要因

先節では、ILK モジュールが誤動作を一つ目の要因を調査した。本節では、もう一つの要因である伝導ノイズについて調査していく。

ILK ユニットの誤動作試験を行っているうちに、OSC を ILK ユニットの電源を取っているものと同じコンセントにつなぐと、ILK ユニットが発報することがあることに気づいた(図 40)。これは、明らかに電源ラインからの伝導ノイズ(サージノイズ)であると理解できた。

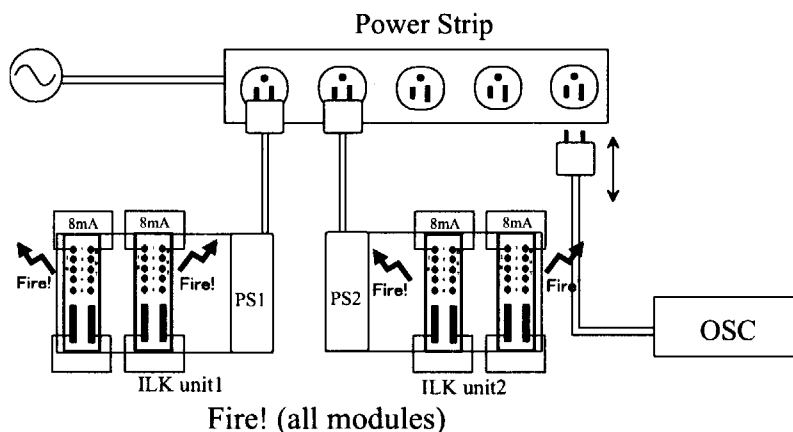


図 40 コンセントに計測器をつなぐと ILK 発報

直ちに、ILK ユニットの電源モジュール回路を確認し、どこでそのノイズを検知して ILK が発報しているのか確認することとした。図 41 に、ILK ユニット電源モジュールの回路図を示す。

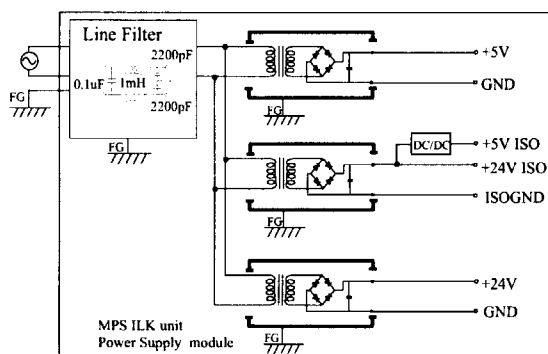


図 41 ILK ユニット電源モジュール回路

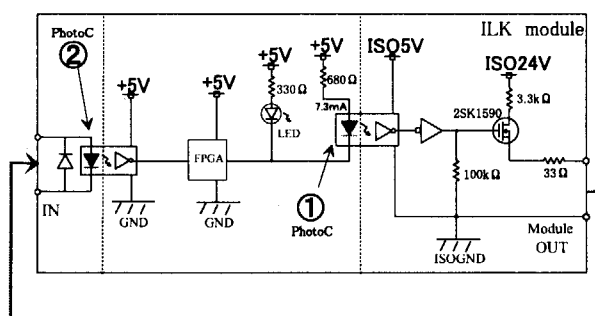


図 42 ILK モジュール内フォトカップラ

電源モジュール回路は、モジュール入り口にラインフィルターを持ち、フィルタリングされたラインは3個(5V、24V x 2台)の電源に接続されている。24V 電源の一つは、DC/DC ダウンコンバータが接続されており、24V ⇒ 5V を作り出している。この系は、ISO 系と呼ばれて ILK モジュール内・外部の処理回路に用いられている。電源がサージにより変動すれ

ば、図 42 で示される ILK ユニット内の①、②のフォトカップラに供給する電流を変動させる。よって、①、②が駆動される+5V もしくは、ISO24V ラインの変動がサージにより大きく変動されていることが推測される。

まずは、サージによる電源モジュール内電圧および ILK モジュール OUT 端子電流がどのように変化するかを確認した。ILK モジュール OUT 端子電流は、これまでの計測と同じように、100 Ω の抵抗を入れることで電圧に変化させている。また、サージノイズは、ILK ユニットがつながれているコンセントと同じコンセントに、OSC のコンセントを挿抜することで発生させた。なお、AC 成分の揺らぎを拡大して計測するために、OSC は AC カップリングモードで使用し、計測は 64 回のアベレージモードで行っている。

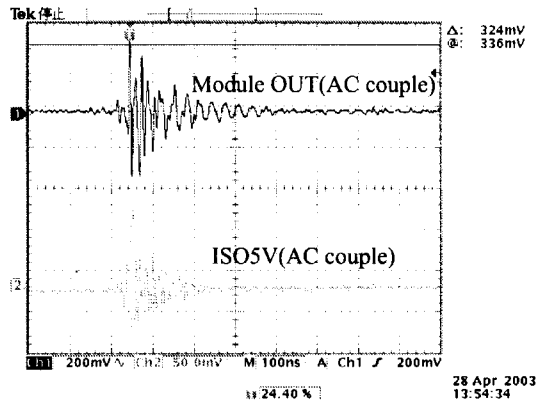
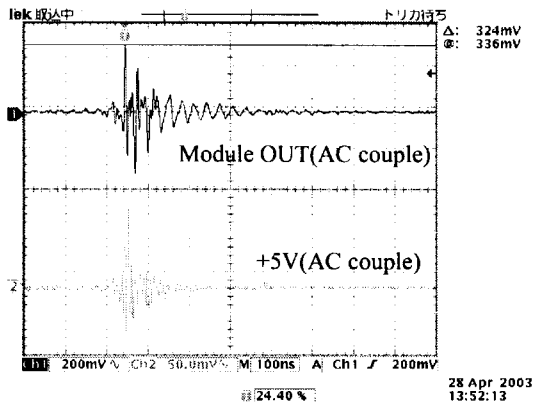


図 43 ILK モジュール OUT と電源モジュールの +5V 電圧上のサージ

図 44 ILK モジュール OUT と電源モジュールの ISO5V 電圧のサージ

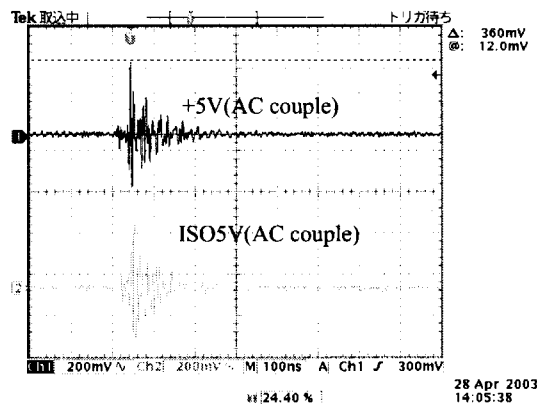
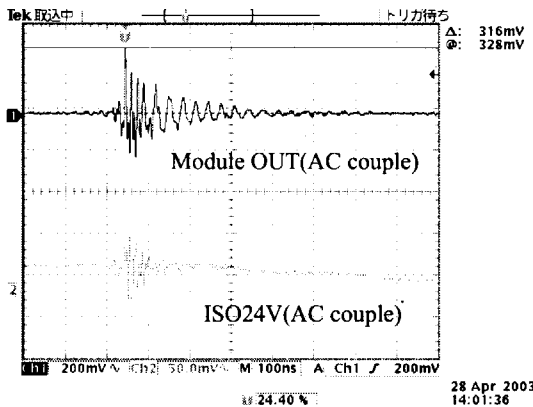


図 45 ILK モジュール OUT と電源モジュールの ISO24V 電圧のサージ

図 46 電源モジュールの 5V 電圧と ISO5V 電圧のサージ

図 43～図 46 に、計測結果を示す。電源モジュール電圧と OUT が比較される図 43、図 44、図 45⁵を見比べても、一見する限りにおいては OUT 出力にどの電圧が寄与しているかは分からない。

⁵図 45 では、アベレージモードで平均化されているために 50mV 程度としか見れないが、1 サンプルモードでのピークは約 500mV あった。変動率では、0.2 % と他の電圧と同等

特定の場所の電圧変化によって発報するのではなく、サージによる各電源ラインの総合的な電圧変動によって発報が起こるものと考えられる。

5.3.1 ラインサージ対策装置の性能評価

ラインサージから機器を守るためには、一般にトランスや、瞬間的な電圧低下を予防するためのUPSが用いられる。そこで、本件の場合のサージ対策に、どの程度の効力を発揮するか性能評価を試みた。

評価方法は、図47～図50に示されるように、ILKユニットの電源が取られているラインに、ノイズカットトランス(電研精器研究所：NCT-I型 100V15A)と汎用UPS(APC：Smart-UPS)、およびその組み合わせを入れ、それらが挿入されている電源コンセントに、OSCのコンセントを挿抜きサージを発生させる。発生したサージを、ILKユニットの5V及びISO5Vのテストピンで計測した。なお、AC成分の揺らぎを拡大して計測するために、OSCはACカップリングモードで使用し、計測は64回のアベレージモードで行っている。

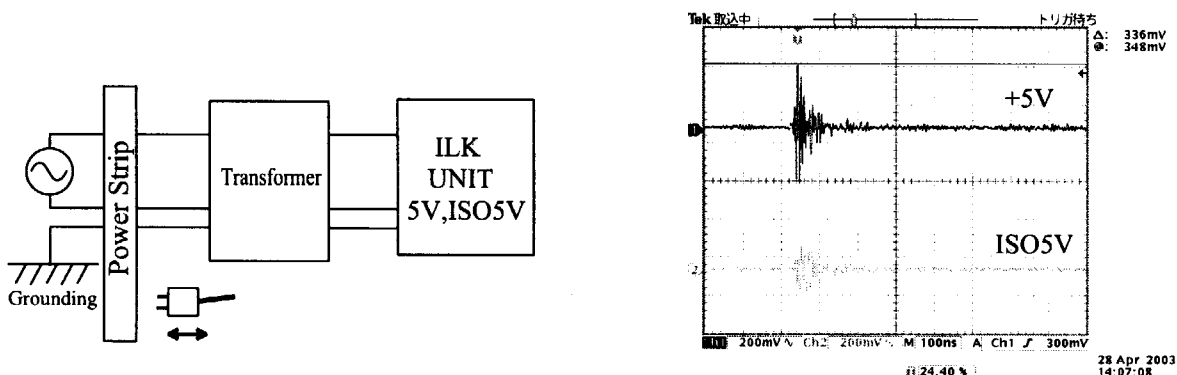


図 47 コンセント後にトランスのみ設置時のサージ

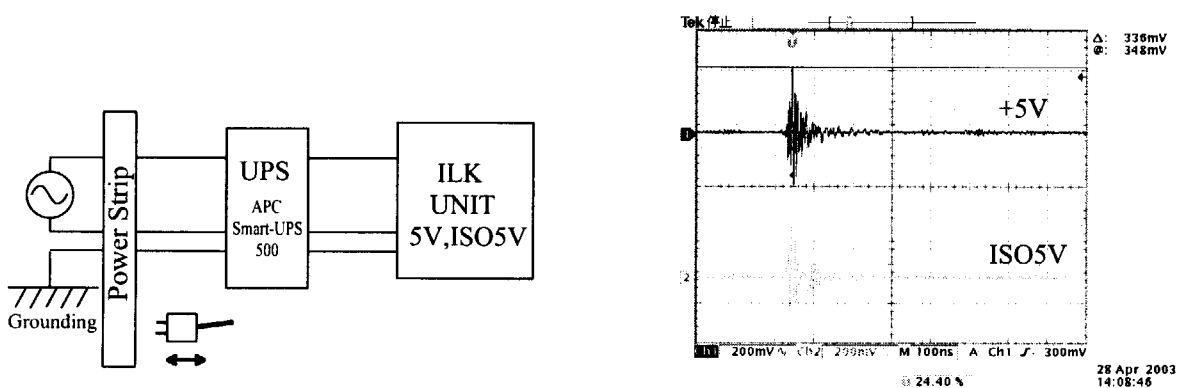


図 48 コンセント後に UPS のみ設置時のサージ

ノイズ対策装置を設置しない場合の、5V・ISO5Vラインのサージは図46で示される様に、5V・ISO5Vともにピーク・形ともほぼ一致する。このときの5Vのピーク電圧は、図の右上

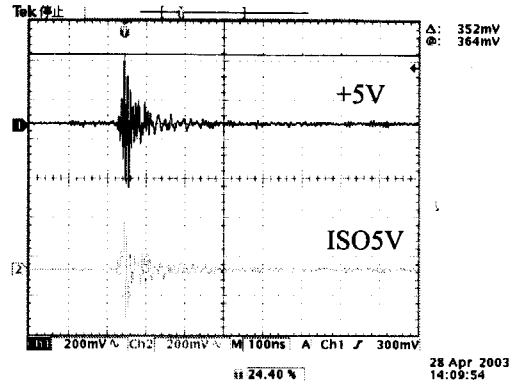
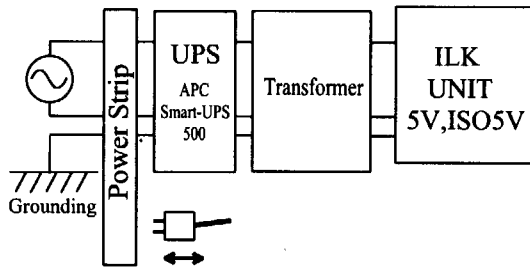


図 49 コンセント後に UPS とトランスの順で設置時のサージ

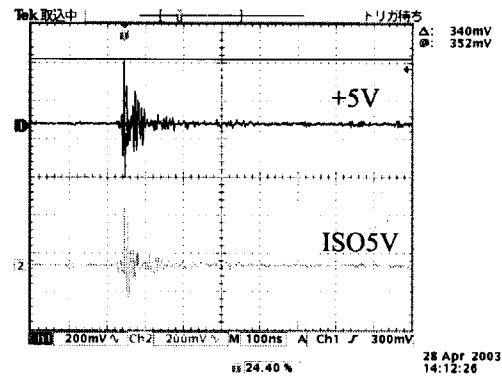
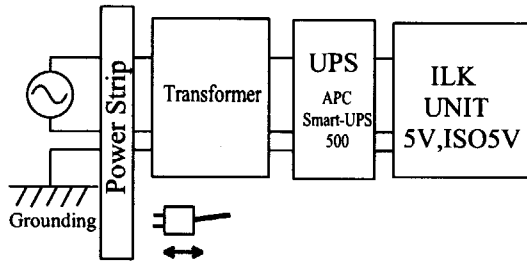


図 50 コンセント後にトランスと UPS の順で設置時のサージ

Δで示される様に、360mV がある。

トランス・UPSを入れる(図 47、48)と、まず、5V ピーク電圧が 340mV 近辺まで 1 割近く低減されることが分かる。また、ISO5V に関しては、図 47 ではピーク電圧が 5V の半分以下として観測されたり、図 50 のように、変動時間幅が 5V と比較して大きく低減されることも見て取れる。

実際、このようなサージ対策装置による効果によって、ILK ユニットの発報頻度はどの程度改善されるかについても評価した。計測方法は各条件とも、まず OSC を AC 成分モードに、そしてトリガレベル電圧を 2.5V に設定した上で、サージを与えて、ユニットの 5V ラインのサージが計測されるかを確認する。サージのピークが 2.5V 以上の高さであれば、そこでトリガレベルを越えるため、OSC で計測される事となる。2.5V 以下ならば計測されないため、OSC はトリガ待ちを維持する。このように、トリガレベル電圧を変化させながら、各レベルでサージを 20 回与え、そのうち何回 OSC で計測されるかを計数し、その頻度分布(20 回とも計測されたときは 1 に規格化)を描かせることで、ノイズ対策装置の効果を評価することにした。

図 51 にその結果を示す。この図に描かれている数字 0.82V、1.03V は、それぞれトランスのみが設置されたとき (TRANS)、対策が行われていないとき (NONE) のサージ電圧の期

待値である。このように、対策が施されることで明らかにサージ電圧が2割程度低減されていることが分かる。ただし、本トランスはその発熱量が大きく(表面温度で50℃程度)、19インチラック内に設置するには、ラック内に設置される他の装置の温度を上昇させ、寿命を下げるリスクがある。このリスクは非常に大きいものとする。

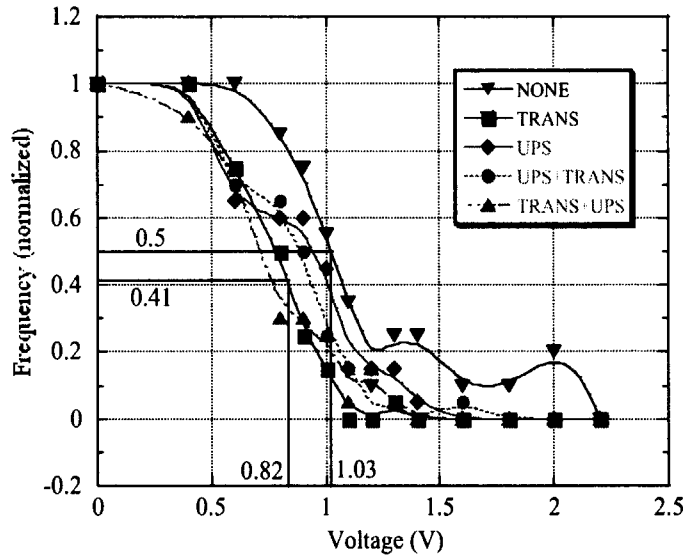


図 51 ILK ユニット内 5V 電源ラインで観測されるサージ電圧の電圧頻度

また、UPS のノイズ応答性能特性からか、「UPS のみ」の時や「UPS+トランス」の順で設置される際は、サージ電圧が0.8-1.2V 近辺ではそのノイズ低減効果を発揮できていないこともわかる。UPS は、瞬停などの電圧降下に対して高い効果があるが、長期保守性などでの不安がある。

表 6 に、簡単にトランス・UPS についての対応をまとめる。

表 6 トランスと UPS の比較

| 装置名 | 値段 | ノイズ対策性能 | 停電 | 長期保守性 | 発熱量 |
|-------|----|---------|----|-------|-----|
| TRANS | △ | ◎ | × | ◎ | ×× |
| UPS | ○ | ○ | ◎ | × | ○ |

6 高性能 DC 用 EMI 除去フィルタを加えたノイズ対策

この章では、これまでに試作機試験で問題としてきた「放電ノイズ」と「サージノイズ」による誤動作を、「DC 用 EMI 除去フィルタ」を加えることで、いっそう信頼性が高められることが確認できたのでその結果をまとめる。

6.1 放電ノイズ対策

5.2 節において、放電ノイズに関しては距離をとることが対策の一つであると示した。しかし、実機運転では、ILK ユニットへの人的な接触など、距離をとることの出来ない直接放電ノイズが与えられることがありえる。その様な場合は、DC 電源電圧はノイズによって大きく変動されてしまうことが避けられず、どうしても誤動作の確率が高くなる。

このような検討を行っていたところ、高性能な「DC 用 EMI 除去フィルタ」の存在を知った。そこで、DC 電源ラインに「DC 用 EMI 除去フィルタ」を入れることを試し、その性能を評価する。ここでは、市販スイッチング DC 電源に対して直接放電 (ライター使用) ノイズを与えた時、EMI 除去フィルタがノイズをどの程度除去できるのかを計測する (図 52)。

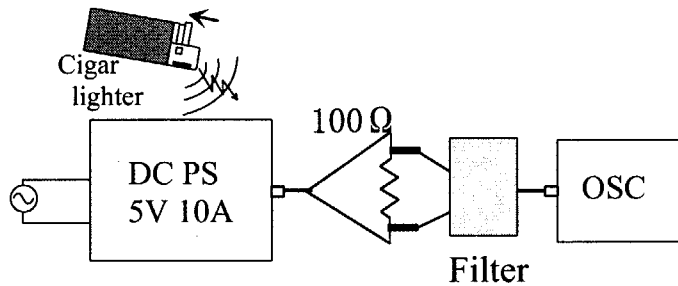


図 52 直接放電ノイズ対策試験計測系

「DC 用 EMI 除去フィルタ」は、村田製作所の BNX002 (図 53) と BNP002 (図 54) を用いた。

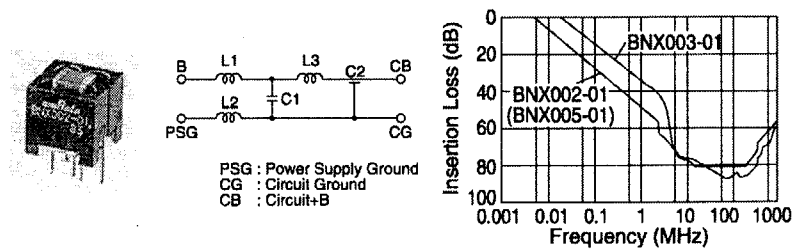


図 53 村田製作所 EMI 除去フィルタ BNX002 仕様

まずは、フィルタの有無に関して、放電ノイズピーク電圧がどの程度変化するかを計測した。ここでは、AC 成分の揺らぎを拡大して計測するために、OSC は AC カップリングモードで使用し、さらに 64 回のアベレージモードで行っている。図 55～図 58 に、フィルタ有無で

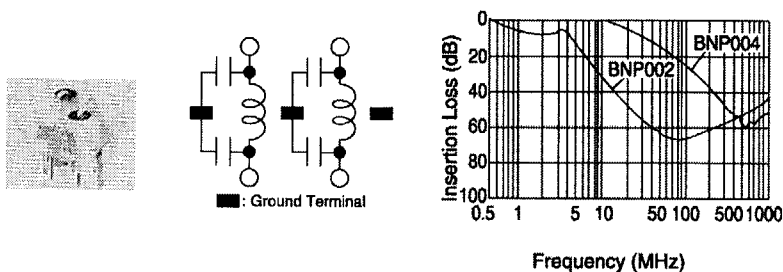


図 54 村田製作所 EMI 除去フィルタ BNP002 仕様

の放電ノイズのピーク電圧を示す。フィルタによって明らかに、放電ノイズ波形が改善されていることが見て取れる。さらに、フィルタ無の時は1.4Vであったピーク電圧が、BNX002を入れた時は1.0Vまで改善されている。BNX002のみ時(図56)と、BNX002+BNP002と2個入れた時(図58)を入れた場合の定性的な比較は大きな異なりは無く、BNX002のみで十分な性能を発揮することが分かる。

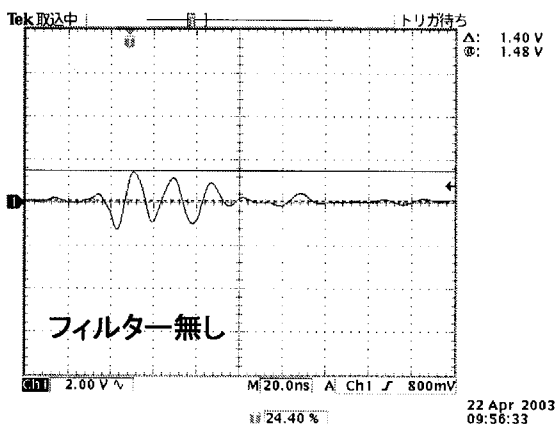


図 55 放電ノイズ対策 ノイズ対策無

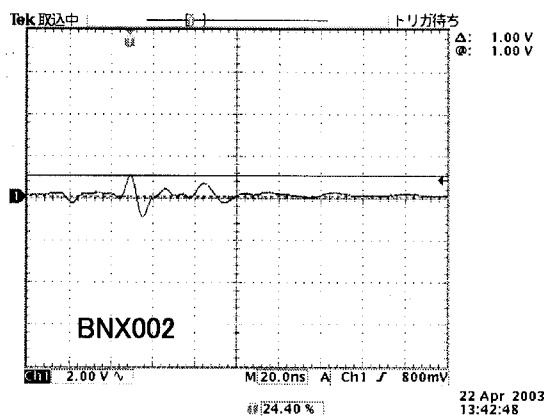


図 56 放電ノイズ対策 BNXのみ

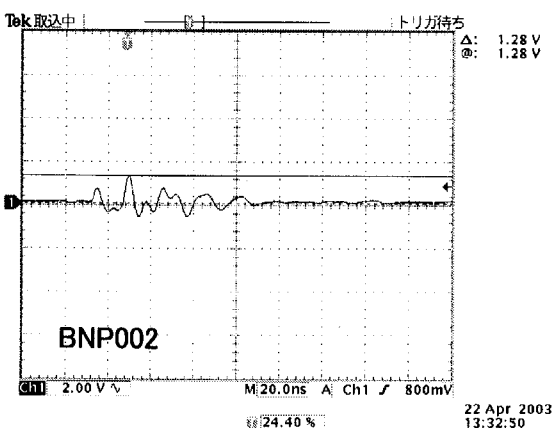


図 57 放電ノイズ対策 BNPのみ

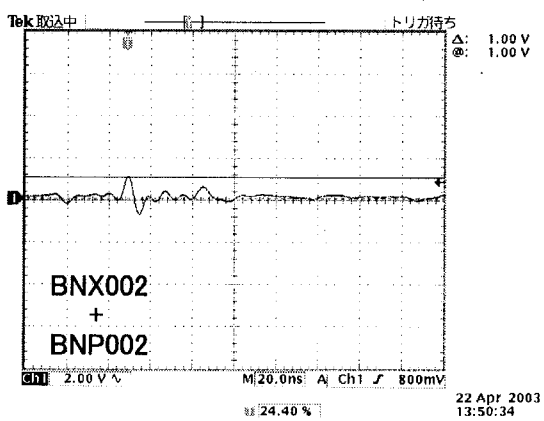


図 58 放電ノイズ対策 BNX+BNP

さらに、定量的な評価を行うために、先の章でサージ対策装置による効果を評価を行った

様に、発報頻度はどの程度改善されるかについても評価した。先と同じように、トリガレベル電圧を変化させながら、各レベルで直接放電ノイズを20回与え、そのうち何回OSCで計測されるかを計数し、その頻度分布(20回とも計測されたときは1に規格化)を描かせることで、評価することにした。

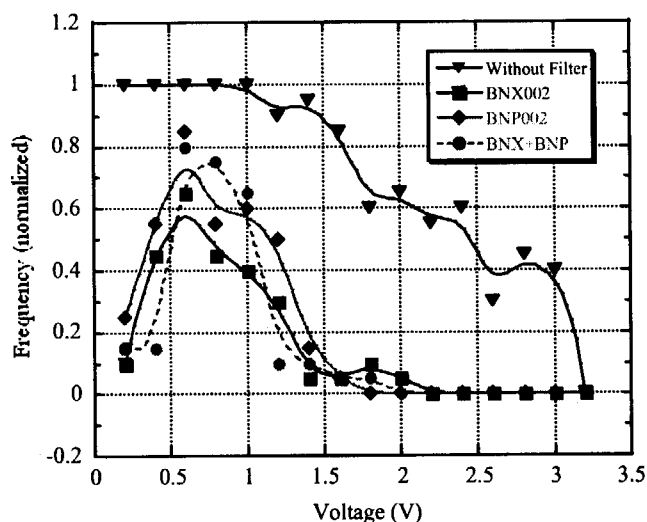


図 59 放電ノイズ対策 電圧頻度結果

図 59 に、市販スイッチング DC 電源での DC フィルタを用いた直接放電ノイズ対策結果を示す。DC フィルタを入れないときには、電圧ピークが 3V 以上の時もあるが、DC フィルタを入れると、その最大ピークは 2V 以下となり、又 OSC で計数される頻度も下がる。図 56 のときと同じく、BNX002 のみを使った時が最もノイズ対策として効果が出ていることが分かる。

以上の結果から、直接放電対策として、実機では DC 電源ラインに「BNX002」を加えておくべきである。

6.2 サージノイズ対策

サージノイズに関しても、「DC用 EMI 除去フィルタ」を加えることによって、信頼性が向上できるかを確認する。先の節で、「BNX002」を DC ラインに入れることで、直接放電ノイズ対策が向上することを述べた。このフィルタはサージノイズの対策として位置づけても十分であるかどうか確認するべきである。サージノイズ対策としては、トランスもしくは、UPS によって効果が得られることが分かっている。BNX002 とこれらの組み合わせで、サージノイズはどのように対策されるかを計測する。図 60 に、テスト系の概略図を示す。図で

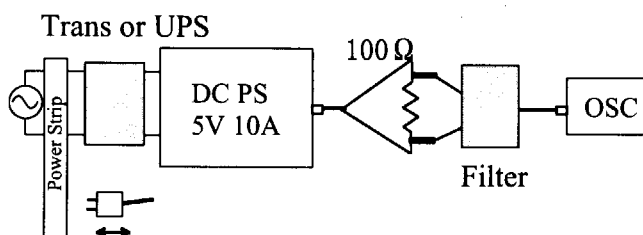


図 60 サージノイズ対策 電圧頻度結果

示される様に、市販 DC 電源にトランス、UPS を入れた上で、DC 電源出力に「BNX002」を入れて、サージノイズに対する効果を計測する。ここでも、AC 成分の揺らぎを拡大して計測するために、OSC は AC カップリングモードで使用し、さらに 64 回のアベレージモードで行っている。

図 61～図 64 に、計測結果を示す。図 61 は、市販電源に何もサージノイズ対策を施さずに計測した結果、図 62 は BNX002 のみを入れた結果、図 63 は UPS と BNX002 を入れた場合の結果、図 64 はトランスと BNX002 を入れた結果である。

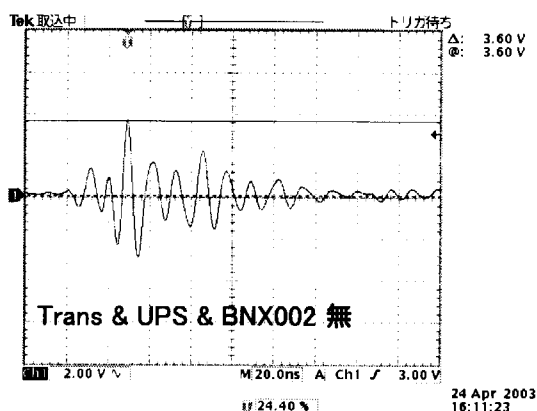


図 61 サージノイズ対策 対策無

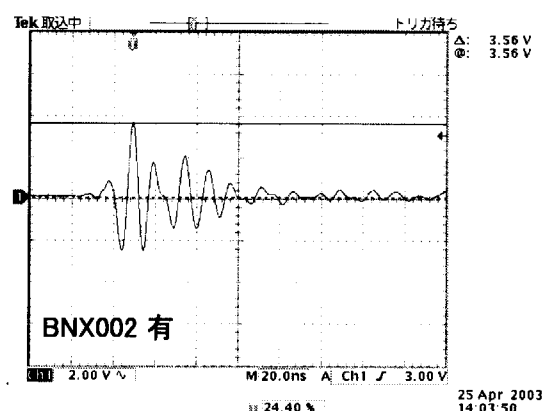


図 62 サージノイズ対策 BNX のみ

定性的に見て、波形に大きな異なりは見られないが、電圧ピークに関しては、図 64 が 6 %程度他者より低い。

さらに、定量的な評価を行うために、これまで同様に発報頻度はどの程度改善されるかについても評価した。先と同じように、トリガレベル電圧を変化させながら、各レベルで直接

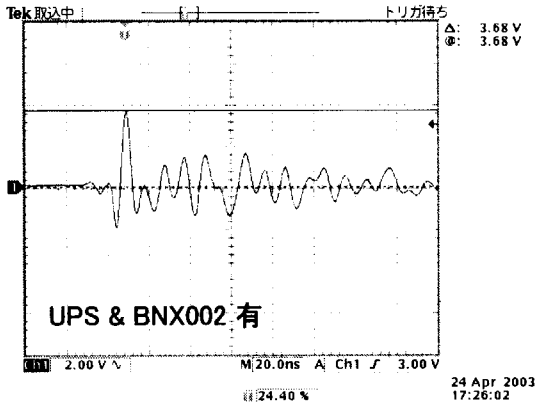


図 63 サージノイズ対策 UPS+BNX

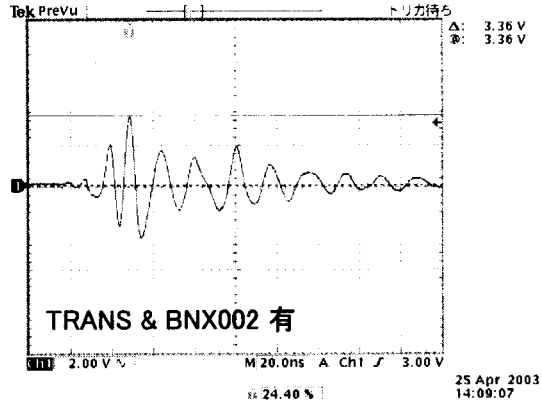


図 64 サージノイズ対策 TRANS+BNX

放電ノイズを 20 回与え、そのうち何回 OSC で計測されるかを計数し、その頻度分布 (20 回とも計測されたときは 1 に規格化) を描かせることで、評価することにした。

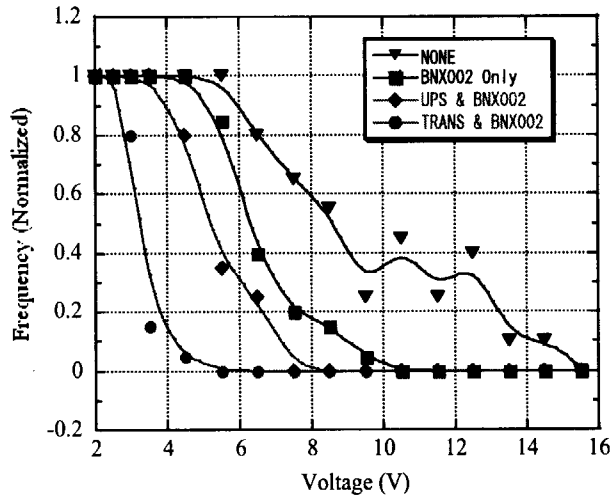


図 65 サージノイズ対策試験 電圧頻度結果

図 65 に、計測結果を示す。市販 DC 電源でのサージ電圧頻度は、ILK ユニット電源モジュールの 5V 電源ラインでのサージ電圧頻度計測の時に比べて、サージ電圧ピークが非常に大きい⁶。これは、単に ILK ユニット電源モジュールには、電源ラインにラインフィルタ (LF) が、設置されているために、初期段階からサージノイズがカットされているためである。BNX002 のみが用いられた際のピーク電圧頻度は、何もノイズ対策が施されないときに比べて高い効果を発揮していることが見て取れる。また、UPS を加えることでもいっそうノイズ低減が計れることが分かる。

以上の結果から、サージノイズ対策としても、実機では DC 電源ラインに「BNX002」を加えておくべきである。

⁶ILK ユニットでは、最大 2V だったが、市販 DC 電源は 14.5V

6.3 総合的ノイズ対策

6.3.1 FPGA による発報待ち時間

ここで、図 44 を再び図 66 として示すが、サージノイズは、ILK モジュール OUT 電流を最大 400nsec 程度の変動を引き起こす。この時間内は、ILK 動作かどうかの判断が不定となるために、「一定時間内は ILK 発報を待つ」というロジックが FPGA に加われば、いっそうノイズに対して耐えられる構造になる (図 67)。

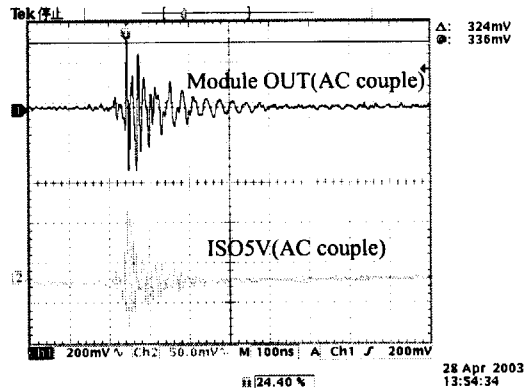


図 66 ILK モジュール OUT と電源モジュールの ISO5V 電圧のサージ

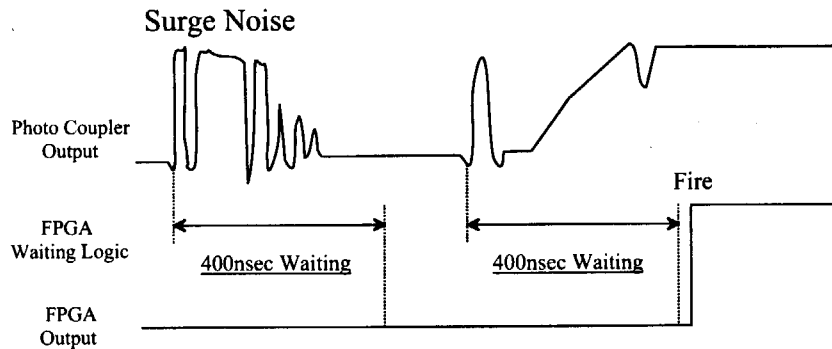


図 67 FPGA の発報待ち時間ロジックのイメージ

そこで、「静電ガン」を用いて、一定待ち時間でどの程度の放電ノイズに耐えられるのかを、試作機を製作した三菱電機が調査した。

表 7 静電ガンによる放電ノイズ試験

| 発報待ち時間 | 静電気量 |
|--------|--------|
| 180ns | 6.19kV |
| 200ns | 6.88kV |
| 220ns | 7.21kV |

その結果を表7に示す。このデータから、180nsecの待ち時間を加えれば、約6.2kV、220nsecでは約7.2kVの放電ノイズに耐えられるということが分かった。一般に、人間が発生させる静電気は、最大で10kV程度になることもあるために、50%の安全係数を見て15kV程度までの静電気ですべて誤動作が起こらないようにすれば、十分な対策になると考えられる。三菱電機の調査では、試験機に於いては「発報待ち時間400nsで直接放電、気中放電とも15kVの静電気まで誤作動しない」ことが分かった。

よって、「最大で400nsecの発報待ち時間ロジック」を持たず対策も加えることにする。

6.3.2 実機 ILK ユニットで入れるべき電磁ノイズ対策

これまでの電磁ノイズ対策をまとめると、図68で示される①～④の対策を実機に施すこととなる。

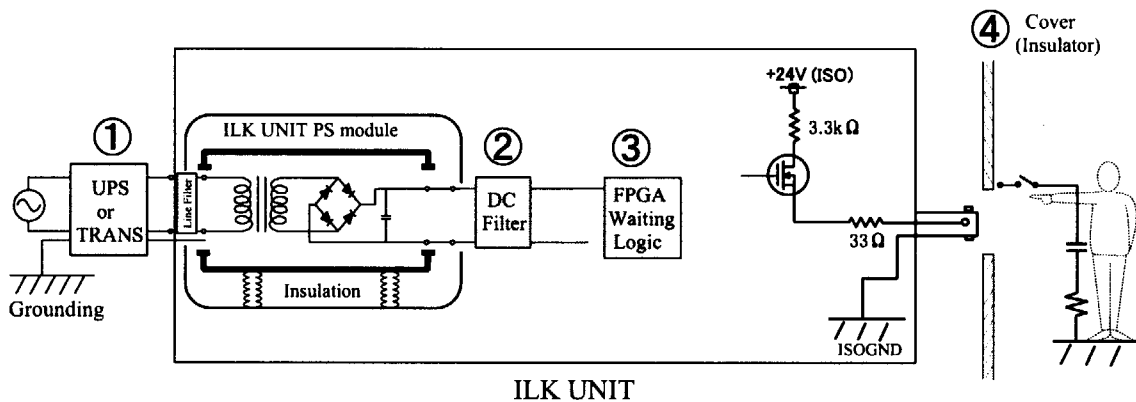
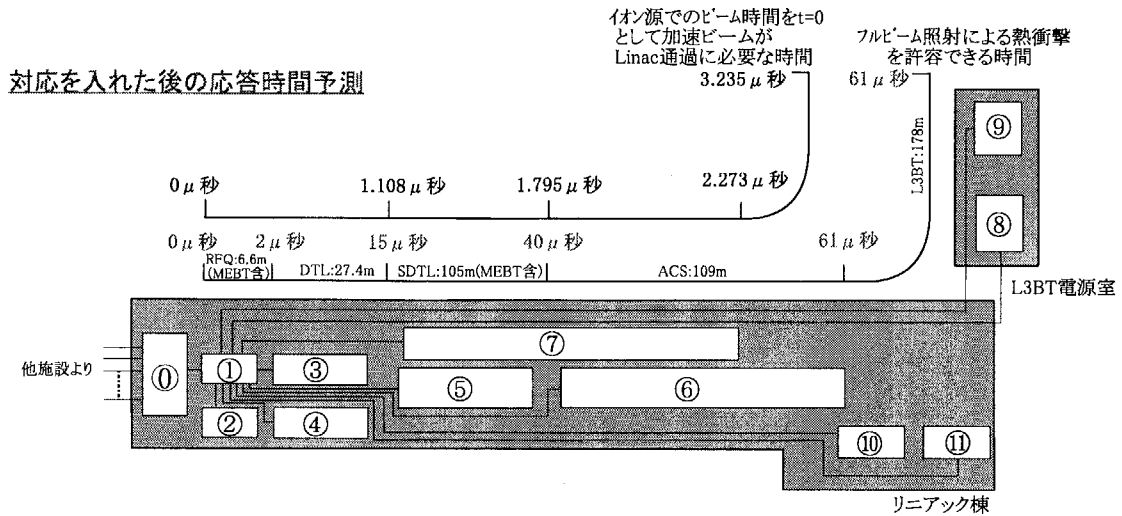


図 68 実機でのインターロックユニット電磁ノイズ対策

- ①: ILK ユニットの電源ラインにサージノイズ対策としてUPS もしくは、トランスを入れる。
- ②: 電源モジュールの出力を、サージ、放電の各ノイズから守るために DC フィルタを入れる。
- ③: サージ、放電の各ノイズによる誤動作を防ぐために、ロジック用 FPGA に「発報待ち時間判断ロジック」を入れる。
- ④: 人間などの放電ノイズ源から、ILK ユニットの電源ラインを守るために、ユニットの電源ラインがむき出し部分を出来るだけ絶縁物で保護するようにする。



| 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 | 単位長当たりの伝送速度 (μ 秒/m) | ブロック間伝送時間(α) | unit単位処理時間 (1) | ILKunit台数(II) | RS-485単位処理時間(III) | ブロック内unit総処理時間 ($\beta = I \cdot II + III$) | 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 ($\alpha + \beta + \gamma$) | 電子速度 (μ 秒/m) | ロスモニタ検出処理時間(δ) | 総処理時間 ($\alpha + \beta + \gamma + \delta$) | 熱許容時間 |
| Control室 | ①-① | 35 | RS-485 | 0.005 | 0.175 | 0.55 | 2 | 0.03 | 0.61 | 10 | 0.05 | 0.84 | - | - | 0.84 | - |
| IS&RFQ | ① | 0 | RS-485 | 0.005 | 0 | 0.55 | 1 | 0.03 | 0.58 | 0 | 0.00 | 0.58 | 0.060 | 0.89 | 1.47 | 2.0 |
| ISPS室 | ①-② | 30 | RS-485 | 0.005 | 0.15 | 0.55 | 1 | 0.03 | 0.58 | 0 | 0.00 | 0.73 | 0.060 | 0.89 | 1.62 | 2.0 |
| DTL | ①-③ | 20 | RS-485 | 0.005 | 0.1 | 0.55 | 5 | 0.03 | 0.7 | 40 | 0.20 | 1.00 | 0.030 | 0.785 | 1.79 | 5.0 |
| DTLQPS室 | ①-④ | 30 | RS-485 | 0.005 | 0.15 | 0.55 | 5 | 0.03 | 0.7 | 40 | 0.20 | 1.05 | 0.030 | 0.785 | 1.84 | 5.0 |
| MEI+SDTL | ①-⑤ | 45 | RS-485 | 0.005 | 0.225 | 0.55 | 18 | 0.03 | 1.09 | 170 | 0.85 | 2.17 | 0.020 | 0.75 | 2.92 | 15.0 |
| ME2+ACS | ①-⑥ | 150 | RS-485 | 0.005 | 0.75 | 0.55 | 25 | 0.03 | 1.3 | 240 | 1.20 | 3.25 | 0.015 | 0.7325 | 3.98 | 40.0 |
| RFPS室 | ①-⑦ | 80 | RS-485 | 0.005 | 0.4 | 0.55 | 4 | 0.03 | 0.67 | 40 | 0.20 | 1.27 | 0.015 | 0.7325 | 2.00 | 15.0 |
| L3BT1 | ①-⑧ | 460 | opti | 0.0035 | 1.61 | 0.55 | 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 | 0.55 | 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 | 0.55 | 1 | 0.03 | 0.58 | 0 | 0.00 | 1.93 | 0.010 | 0.715 | 2.65 | 61.0 |
| SCL2 | ①-⑪ | 290 | RS-485 | 0.005 | 1.45 | 0.55 | 1 | 0.03 | 0.58 | 0 | 0.00 | 2.03 | 0.010 | 0.715 | 2.75 | 61.0 |

図 69 ノイズ対策が加えられた後の線形加速器内の高速 ILK 処理時間予測

以上の「ノイズ対策」方法を考慮に入れて、試作機による応答から得られた線形加速器内の高速 ILK 応答時間予測と同様に、システムの処理速度を計算し、図 69 に示す。各パラメータ「単位長当たりの伝送速度 (μ 秒/m)、unit 単位処理時間、RS-485 単位処理時間」を、それぞれ「0.005(μ 秒/m)、0.55(μ 秒)、0.03(μ 秒)」として、ノイズ対策が施されたユニットを用いて線形加速器の高速インターロックシステムを構築した場合に、期待できる応答速度を計算した。なお、ロスモニタの検出処理時間であるが、図 22 で計算した条件をそのまま採用している。図 69 で示される様に試作機によるシステムの応答は、最高速が要求される RFQ・DTL 部分近辺において、 $\sim 1.47 \mu$ 秒であり、試作機による速度よりは遅くはなるが、このノイズ対策が施されたこのシステムでも、目標 1.5μ 秒を何とか達成できることが分かる。以上により、高速応答および信頼性が確保されたシステムが構築できる目処つけられた。

7 その他の問題

7.1 ツイストペアケーブル用端子台

ILK モジュールに、機器用や、ILK 用のツイストペアケーブルを接続するために、試作機では「PHOENIX CONTACT」社製の「FRONT-MC 1,5/18-STF-3,81」という端子台(図 70)を使用している。この端子は、端子台のピッチが3.81mm と非常に細かく、ケーブルを端末処理せずに直接ネジ接続できる。さらに、端子台自身がプラグとなっているために、ILK モジュール側に配置されたソケットから取り外すことが容易となっている。

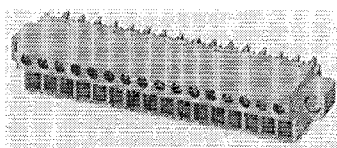


図 70 試作機で使用している端子(プラグ)

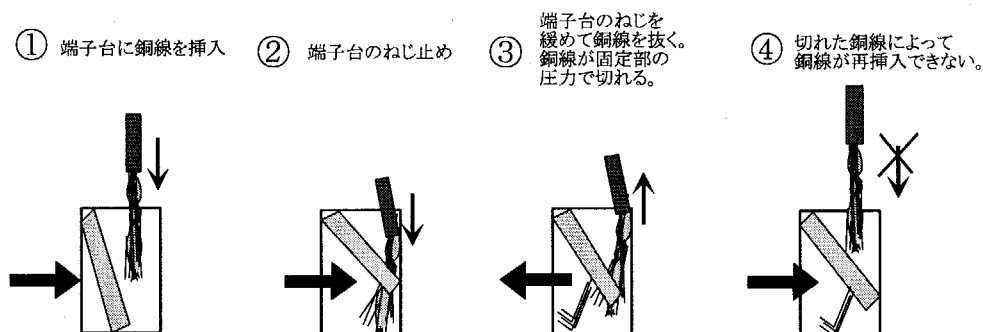


図 71 端子台問題

しかしこの端子台は、図 71 の①～④で描かれるような、構造上の問題を持っている。そのため、18 極あるプラグ端子のうち、1 極でもこのようなトラブルが発生すれば、そのプラグは使用出来なくなってしまう。

端子に挿入される導線は、金属ピンで端末処理(もしくは半田処理)された上で使用されるべきである。

参考文献

- [1] http://www.sns.gov/projectinfo/ics/192/1923/MPS%20-%20FDR/Copper_damage_limit21.doc.

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 |
| 物質質量 | 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 | |
| 光度 | ルーメン | lm | cd·sr |
| 照射度 | ルクス | lx | lm/m ² |
| 放射能 | ベクレル | Bq | s ⁻¹ |
| 吸収線量 | グレイ | Gy | J/kg |
| 線量当量 | シーベルト | Sv | J/kg |

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 × 10⁻¹⁹ J

1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ 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 | b |
| 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 = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m

1 b = 100 fm² = 10⁻²⁸ m²

1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa

1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²

1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq

1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg

1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy

1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

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 |

(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, 1 eV および 1 u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のカテゴリに分類されている。
- EC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 1 Pa·s (N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

| 圧 | MPa (=10 bar) | 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 = 4.18605 J (計量法) |
|-------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-------------------------|
| | 1 | 0.101972 | 2.77778 × 10 ⁻⁷ | 0.238889 | 9.47813 × 10 ⁻⁴ | 0.737562 | 6.24150 × 10 ¹⁸ | = 4.184 J (熱化学) |
| | 9.80665 | 1 | 2.72407 × 10 ⁻⁶ | 2.34270 | 9.29487 × 10 ⁻³ | 7.23301 | 6.12082 × 10 ¹⁹ | = 4.1855 J (15 °C) |
| | 3.6 × 10 ⁶ | 3.67098 × 10 ⁵ | 1 | 8.59999 × 10 ⁵ | 3412.13 | 2.65522 × 10 ⁶ | 2.24694 × 10 ²⁶ | = 4.1868 J (国際蒸気表) |
| | 4.18605 | 0.426858 | 1.16279 × 10 ⁻⁶ | 1 | 3.96759 × 10 ⁻³ | 3.08747 | 2.61272 × 10 ¹⁹ | 仕事率 1 PS (仏馬力) |
| | 1055.06 | 107.586 | 2.93072 × 10 ⁻⁴ | 252.042 | 1 | 778.172 | 6.58515 × 10 ²¹ | = 75 kgf·m/s |
| | 1.35582 | 0.138255 | 3.76616 × 10 ⁻⁷ | 0.323890 | 1.28506 × 10 ⁻³ | 1 | 8.46233 × 10 ¹⁸ | = 735.499 W |
| | 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の性能試験



古紙配合率100%
白色度70%の再生紙を使用しています