

JAERI-Tech
97-062



JT-60U分光計測装置のノイズ調査と対策

1997年11月

永谷 進・鬼沢正美*・川井 勲*・仲田久夫*
久保博孝・杉江達夫

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（〒319-11 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公済会資料センター（〒319-11 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 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1997

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 (株)高野高速印刷

JT-60U分光計測装置のノイズ調査と対策

日本原子力研究所那珂研究所炉心プラズマ研究部

永谷 進・鬼沢 正美*・川井 勲*・仲田 久夫*

久保 博孝・杉江 達夫

(1997年11月4日受理)

臨界プラズマ試験装置 (JT-60U) では、負イオンを用いた中性粒子入射装置 (N-NBI) の運転を開始した。その加速電極間での放電破壊が発生すると、JT-60U周辺機器にノイズ障害が発生する。分光計測装置の一部もこのノイズによって、制御回路系が誤動作して正常にデータが取れなくなる状況が生じた。JT-60U運転中でのダイバータ斜入射分光測定装置の制御回路系内部のノイズを、光ファイバー・アイソレーション・システムを使って測定した結果、振幅15～18V^{P-P}周波数15MHzのノイズが観測された。コンデンサー、及び抵抗を回路系に付け加える等の対策を行ったが、制御回路系のノイズは低減せず、分光測定装置の制御回路系の誤動作も無くならなかった。最終的には、制御回路系に出入りするすべてのケーブルにフェライト・コアを取り付けることにより、伝導ノイズをほぼゼロ・レベルまで減少させることができ、分光計測装置の誤動作をほぼ完全に防止することができた。

Investigation and Measures to Noise on Spectroscopic Measurement System in JT-60U

Susumu NAGAYA, Masami ONIZAWA*, Isao KAWAI*, Hisao NAKATA*
Hirotaka KUBO and Tatsuo SUGIE

Department of Fusion Plasma Research
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received November 4, 1997)

Breakdown of a negative-ion-based neutral beam injection (N-NBI) has caused noise trouble to several systems. The control circuit of a spectroscopic measurement system had not well worked because of the noise. The noise has been measured by an optical-fiber isolation system during operation of JT-60U. The amplitude and the frequency were 15~18 V and 15MHz respectively. The transmission noise has been reduced by putting ferrite cores to all cables connecting with the control circuits. As a result, the trouble with the spectroscopic measurement system has completely been solved. Adding condensers and resistors to the circuit was not effective to reduce the noise.

Keywords : Noise, Noise Reduction, Ferrite Core, Electric Circuit Trouble, JT-60U, N-NBI,
Optical Fiber Isolation, Spectroscopic Measurement, Tokamak.

* Nihon Advanced Technology Corporation

目 次

1. はじめに	1
2. ノイズの発生の原因と伝播経路	1
3. ノイズ調査	5
4. ノイズ対策	10
4.1 ノイズ対策.....	11
4.2 フェライト・コアによるノイズ対策.....	14
5. ノイズ対策の結果	19
6. ま と め	20
謝 辞	21
参考文献	21

Contents

1. Introduction	1
2. Cause and Transmission Channel of Noise	1
3. Investigation of Noise	5
4. Measures to Noise	10
4.1 Measures to Noise	11
4.2 Measures to Noise by Ferrite-core	14
5. Result	19
6. Summary	20
Acknowledgments	21
References	21

1. はじめに

臨界プラズマ試験装置 (JT-60U) において、負イオンを用いた高エネルギー中性粒子入射装置 (N-NBI装置: 500 keV/10 MW/10 秒) の運転中にイオン源電極間で放電破壊 (-500 kV とアース間の短絡現象) が発生するとインパルス・ノイズが生じる。N-NBI装置コンデショニング運転は、30秒間に1ショットの連続運転で行われ、1ショット中に生じる放電破壊の回数は3回に達する場合もある。JT-60Uの真空容器の周囲には、数多くの計測装置が設置されており、その中で分光計測装置を含めいくつかの計測装置において、このノイズによる障害が発生した。JT-60U、及びN-NBI装置の運転中は、JT-60本体室に入室できないので、ノイズ対策のための本体室での作業は、サイクル点検日 (1週間につき1日) または実験休止期間に限られる。したがって、効率よくノイズ対策を行うためには十分なノイズ調査が必要である。本体室に設置してある計測装置のノイズ調査は、遠隔で実施しなければならない。このため、光ファイバー・アイソレーション・システムを使用し、ノイズ信号を本体室外へ光ファイバーで伝送し、JT-60U及びN-NBI装置運転中のノイズ測定を行った。その測定結果を踏まえてサイクル点検日にノイズ対策を集中的に行った。ここではダイバータ斜入射分光計測装置¹⁾ に対して行ったノイズ調査、対策、及びその結果について述べる。

2. ノイズ発生の原因と伝播経路

図2.1 にN-NBI接地線系統図を示す²⁾。N-NBIの放電破壊が発生すると、G1 (プラズマ電極, DC-500 kV) とG4 (直流接地系) 間が短絡し、①、②、③、④の接地電位がJT-60総合基準電極 (JT-60U装置の基準接地電位を云う) に対して大きく変動することによりノイズが生じ得る。JT-60組立室内のN-NBI直流接地系の接地電位変動は、設計時のサージ解析によると-80 kVにもなる。このように大きな電位変動は、サージ電流の流路を可能な限り直流接地系に押え込むことにより、N-NBI装置全体の安定性を保持する設計に起因する²⁾。

1. はじめに

臨界プラズマ試験装置 (JT-60U) において、負イオンを用いた高エネルギー中性粒子入射装置 (N-NBI装置: 500 keV/10 MW/10 秒) の運転中にイオン源電極間で放電破壊 (-500 kVとアース間の短絡現象) が発生するとインパルス・ノイズが生じる。N-NBI装置コンデショニング運転は、30秒間に1ショットの連続運転で行われ、1ショット中に生じる放電破壊の回数は3回に達する場合もある。JT-60Uの真空容器の周囲には、数多くの計測装置が設置されており、その中で分光計測装置を含めいくつかの計測装置において、このノイズによる障害が発生した。JT-60U、及びN-NBI装置の運転中は、JT-60本体室に入室できないので、ノイズ対策のための本体室での作業は、サイクル点検日 (1週間につき1日) または実験休止期間に限られる。したがって、効率よくノイズ対策を行うためには十分なノイズ調査が必要である。本体室に設置してある計測装置のノイズ調査は、遠隔で実施しなければならない。このため、光ファイバー・アイソレーション・システムを使用し、ノイズ信号を本体室外へ光ファイバーで伝送し、JT-60U及びN-NBI装置運転中のノイズ測定を行った。その測定結果を踏まえてサイクル点検日にノイズ対策を集中的に行った。ここではダイバータ斜入射分光計測装置¹⁾ に対して行ったノイズ調査、対策、及びその結果について述べる。

2. ノイズ発生の原因と伝播経路

図2.1 にN-NBI接地線系統図を示す²⁾。N-NBIの放電破壊が発生すると、G1 (プラズマ電極, DC-500 kV) とG4 (直流接地系) 間が短絡し、①、②、③、④の接地電位がJT-60総合基準電極 (JT-60U装置の基準接地電位を云う) に対して大きく変動することによりノイズが生じ得る。JT-60組立室内のN-NBI直流接地系の接地電位変動は、設計時のサージ解析によると-80 kVにもなる。このように大きな電位変動は、サージ電流の流路を可能な限り直流接地系に押え込むことにより、N-NBI装置全体の安定性を保持する設計に起因する²⁾。

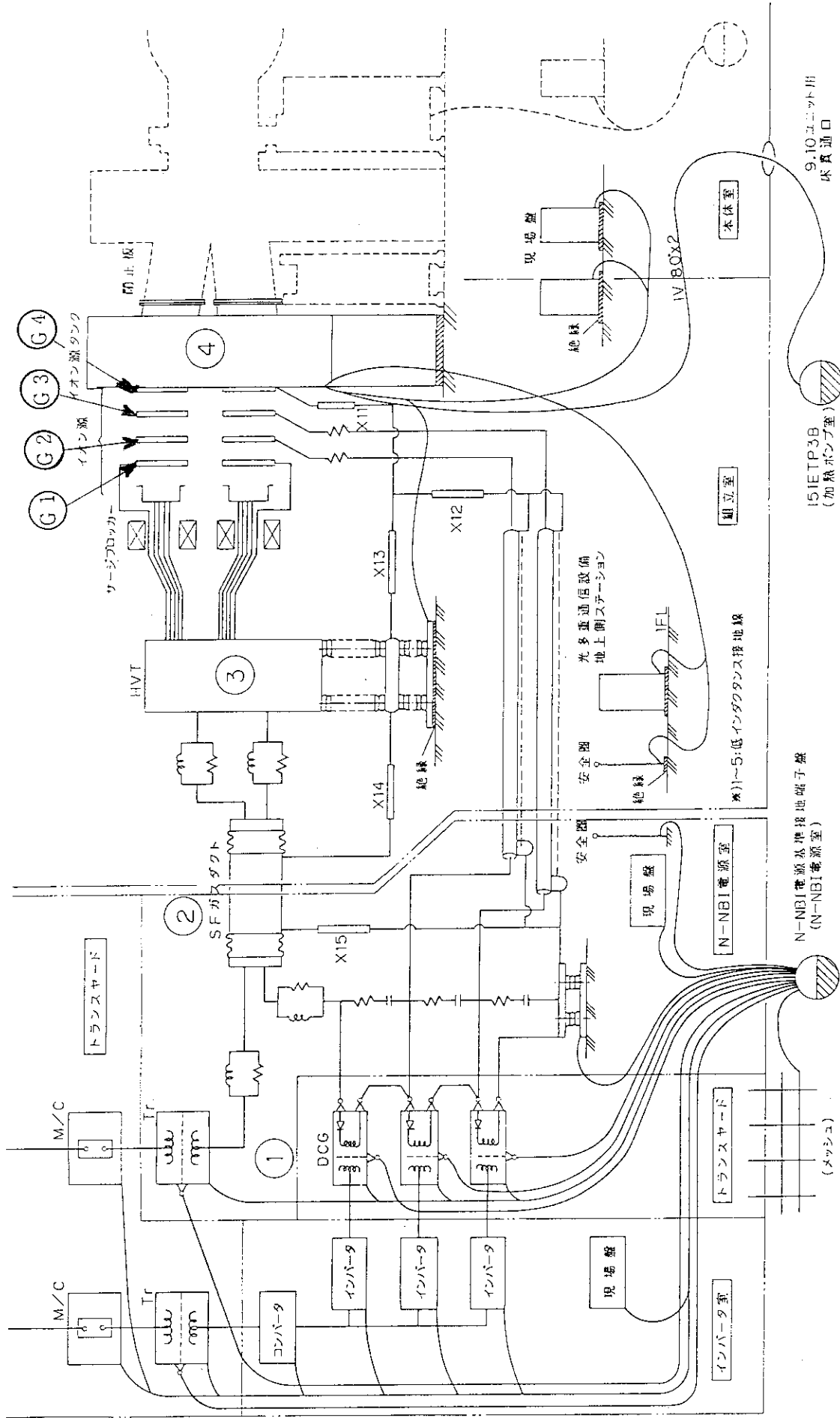


図 2.1 N-NBI 接地線系統図

ノイズの侵入経路は、構造物間の浮遊静電容量を通じて、静電誘導により直接被害器へ侵入する場合と、被害器へ接続されているケーブルを通じて侵入する場合がある。一般に侵入形態は静電誘導、電磁誘導、抵抗結合に分ける事ができる。N-NBI装置から発生するノイズは、構造物の浮遊静電容量による静電誘導により結合しているものと考えられる。静電誘導ノイズ結合の原理を、図2.2（静電誘導結合図）に示す。構造物1と構造物2を並行して配置したとき、 V_1 のコモン・モード・ノイズ（信号線と大地間に印加される変動電位をコモン・モード・ノイズと云う）を構造物1に印加すると、構造物相互間の静電容量 C_{12} 、構造物-大地間の静電容量 C_{1G} と C_{2G} により分圧された電圧 V_N が構造物2に静電誘導により誘起される。この場合の静電誘導等価回路図を図2.3に示す。この電圧 V_N は（2.1）式で表される³⁾。

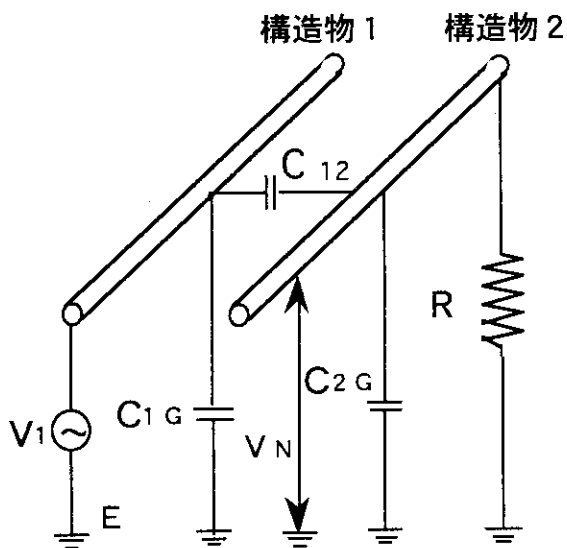


図2.2 静電誘導結合図

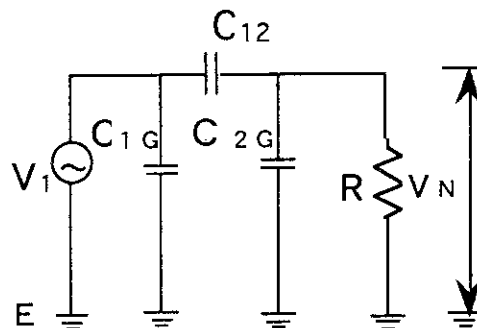


図2.3 静電誘導等価回路図

$$V_N = \frac{C_{12}}{C_{12} + C_{2G}} \frac{1}{1 - j \frac{1}{\omega R (C_{12} + C_{2G})}} V_1 \quad (2.1)$$

- C_{12} : 構造物1と2間の静電容量
- C_{1G} : 構造物1と大地間の静電容量
- C_{2G} : 構造物2と大地間の静電容量
- R : 構造物2側の対地インピーダンス
- V_1 : コモン・モード・ノイズ

$$R \ll \frac{1}{j\omega(C_{12} + C_{2G})}$$

のとき

$$V_N = j\omega C_{12} R V_1 \quad (2.2)$$

となる。

ノイズは、高電位のN-NBI直流接地系から低電位のJT-60総合基準電極、または建家接地系へと低インピーダンスの流路を選んで流れていると推定される。その一部は信号線にコモン・モード・ノイズの形態で侵入し、信号線と大地間にノイズを誘起する。さらに芯線間の不平衡インピーダンスによって、コモン・モード・ノイズは（図2.4参照）、ノーマルモードノイズ（信号線間に印加される変動電位をノーマルモードノイズと云う）に変換される。ノーマルモードノイズ E_{nm} は（2.3）式で表される。³⁾

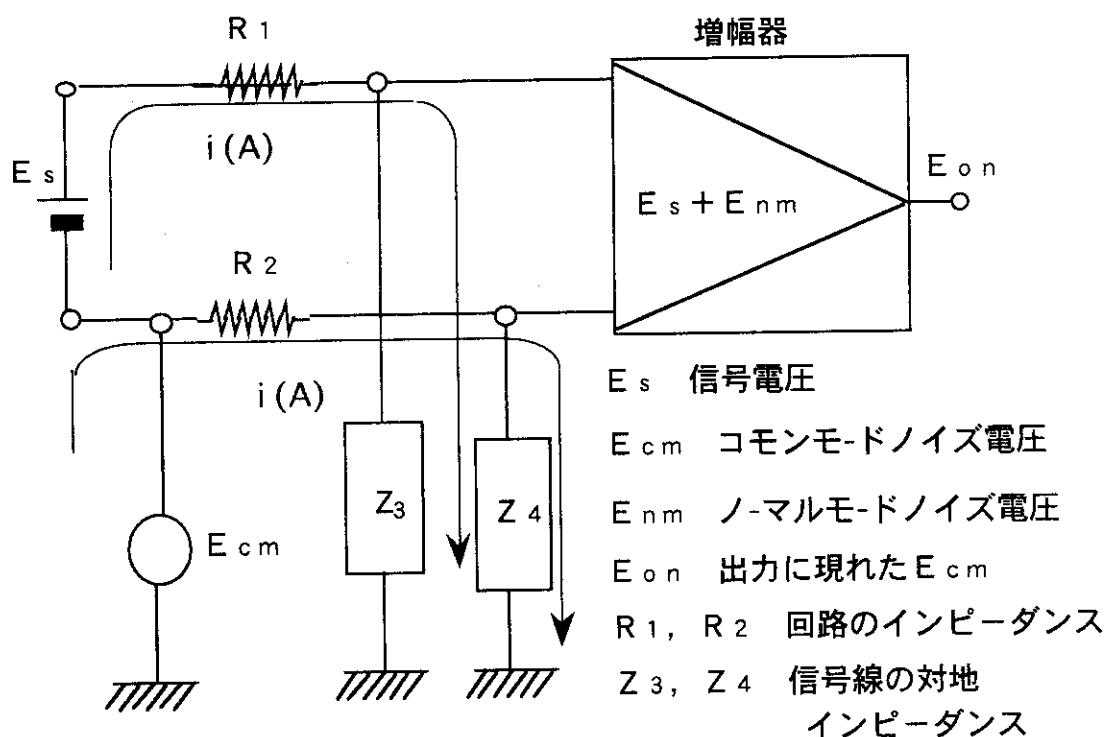


図2.4 コモンモード・ノイズからノーマルモード・ノイズへの変換等価回路

$$E_{nm} = \left(\frac{Z_3}{R_1 + Z_3} - \frac{Z_4}{R_2 + Z_4} \right) E_{cm} \quad (2.3)$$

信号線に誘起されたノーマル・モード・ノイズは、信号線を通じて基板に侵入し、ノイズ障害を発生させる。ノイズが静電誘導によって結合される流路は複雑多岐であり、ノイズ伝播径路を特定するのは困難である。

図2.5に計測装置の接地線系統図を示す。JT-60Uの計測装置は、個々に独立した接地系に接地され、計測装置間は直流的には絶縁されている。接地線はIV線による1点接地になっている。100[□]IV線の場合15MHz高周波に対しては数kΩ/100mの高いインピーダンスになる。IV線は人身の安全確保、機器の損傷を防ぐには十分であるがインパルス性の高周波ノイズを流す役目を果しておらず、構造物間の浮遊静電容量がノイズ伝播径路になり得る。即ち静的には接地線により同一の電位に固定されるが、高周波のサージに対しては低インピーダンスの浮遊静電容量で結合されるため、その電位は複雑に変化する。

3. ノイズ調査

図3.1にノイズ測定系の概略図を示す。また、図3.2に今回のノイズ対策の対象した分光計測装置の制御出力処理系統図を示す。

尚本装置はJT-60実験棟本体室 P-8IN2ヤグラ（計測装置の支持構造物）4階に設置されている。

高周波の測定には一般に次の点に注意する必要がある。⁴⁾

イ) 測定器相互間の接続導線は、そのインダクタンスが影響するのでできるだけ短くすること。直径1mm、長さ10cmの導線ではインダクタンスは10nH程度、インピーダンスは1MHzで約0.06Ωとなる。

ロ) 大地、その他の導線との静電容量を減じるため、なるべく細い線を使用する。イ)の導線を地上10cmにおいた場合、100kHzでインピーダンスは数MΩである。

サージ電流は高周波であるため小さな静電容量やインダクタンスに左右される。そのため測定器をハード・ワイヤーで接続すると正確にサージ電流を測定することが困難である。したがって、測定器はバッテリー内蔵の光アイソレーション・システム（テクトロニクス社製100MHz光ファイバー・アイソレーション・システム型式 A6906S）を使用し、サージ電流の流路を乱さないようにした。また、

$$E_{nm} = \left(\frac{Z_3}{R_1 + Z_3} - \frac{Z_4}{R_2 + Z_4} \right) E_{cm} \quad (2.3)$$

信号線に誘起されたノーマル・モード・ノイズは、信号線を通じて基板に侵入し、ノイズ障害を発生させる。ノイズが静電誘導によって結合される流路は複雑多岐であり、ノイズ伝播径路を特定するのは困難である。

図2.5に計測装置の接地線系統図を示す。JT-60Uの計測装置は、個々に独立した接地系に接地され、計測装置間は直流的には絶縁されている。接地線はIV線による1点接地になっている。100[□]IV線の場合15MHz高周波に対しては数kΩ/100mの高いインピーダンスになる。IV線は人身の安全確保、機器の損傷を防ぐには十分であるがインパルス性の高周波ノイズを流す役目を果たしておらず、構造物間の浮遊静電容量がノイズ伝播径路になり得る。即ち静的には接地線により同一の電位に固定されるが、高周波のサージに対しては低インピーダンスの浮遊静電容量で結合されるため、その電位は複雑に変化する。

3. ノイズ調査

図3.1にノイズ測定系の概略図を示す。また、図3.2に今回のノイズ対策の対象した分光計測装置の制御出力処理系統図を示す。

尚本装置はJT-60実験棟本体室 P-8IN2ヤグラ（計測装置の支持構造物）4階に設置されている。

高周波の測定には一般に次の点に注意する必要がある。⁴⁾

イ) 測定器相互間の接続導線は、そのインダクタンスが影響するのでできるだけ短くすること。直径1mm、長さ10cmの導線ではインダクタンスは10nH程度、インピーダンスは1MHzで約0.06Ωとなる。

ロ) 大地、その他の導線との静電容量を減じるため、なるべく細い線を使用する。イ)の導線を地上10cmにおいた場合、100kHzでインピーダンスは数MΩである。

サージ電流は高周波であるため小さな静電容量やインダクタンスに左右される。そのため測定器をハード・ワイヤーで接続すると正確にサージ電流を測定することが困難である。したがって、測定器はバッテリー内蔵の光アイソレーション・システム（テクトロニクス社製100MHz光ファイバー・アイソレーション・システム型式 A6906S）を使用し、サージ電流の流路を乱さないようにした。また、

P8側建屋電源10.5V系②
(P8IN2+Vグラ)
H5.4.6

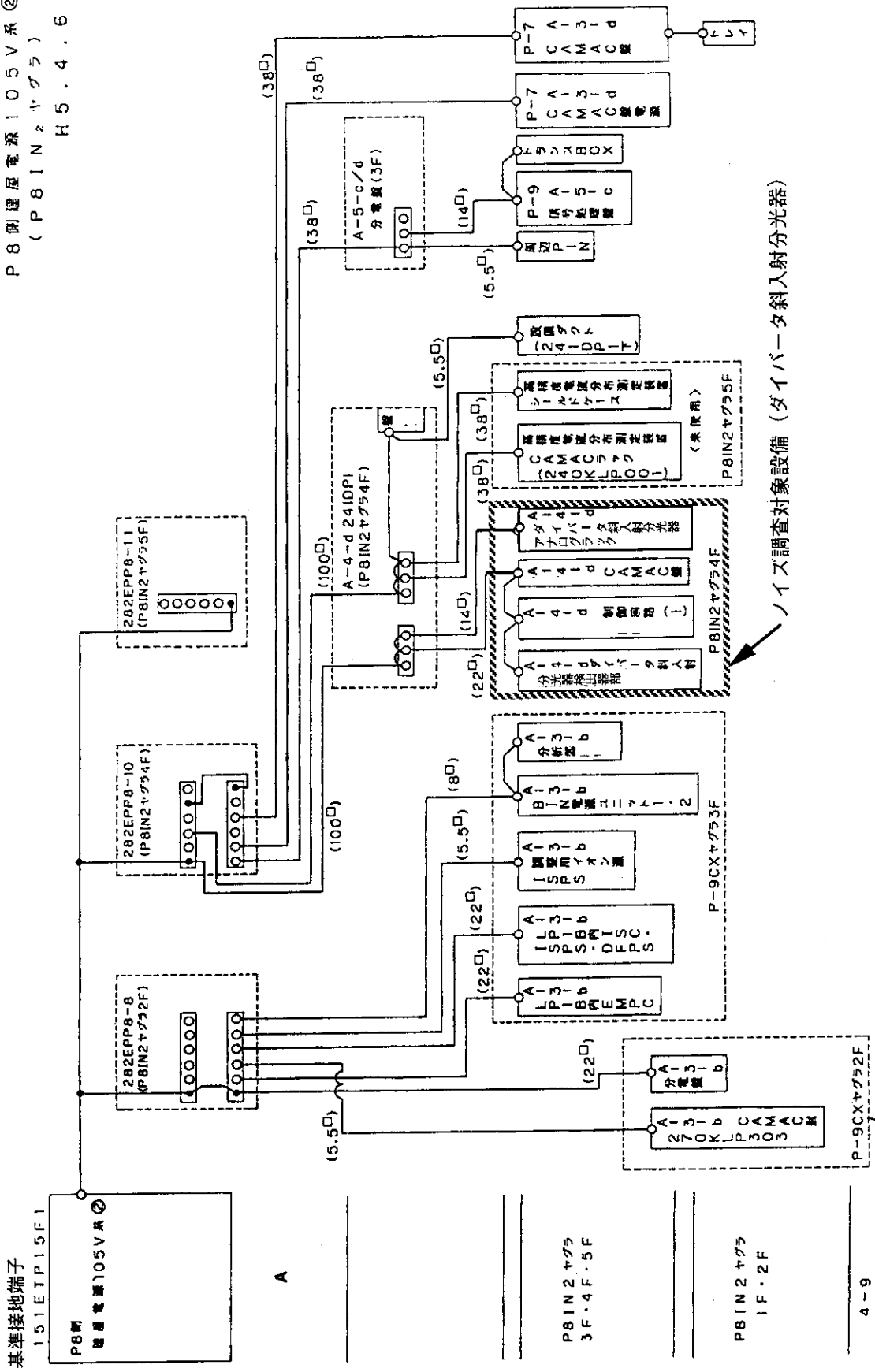


図 2.5 計測装置接地線系統図

プローブは浮遊静電容量の影響を避けるためアースから浮かして使用した。さらに、本体室外へ光ファイバーで送信し、JT-60U運転中にノイズの測定ができるようにした。

また、N-NBIの加速電圧・電流波形をデジタルオシロスコープでモニターした。

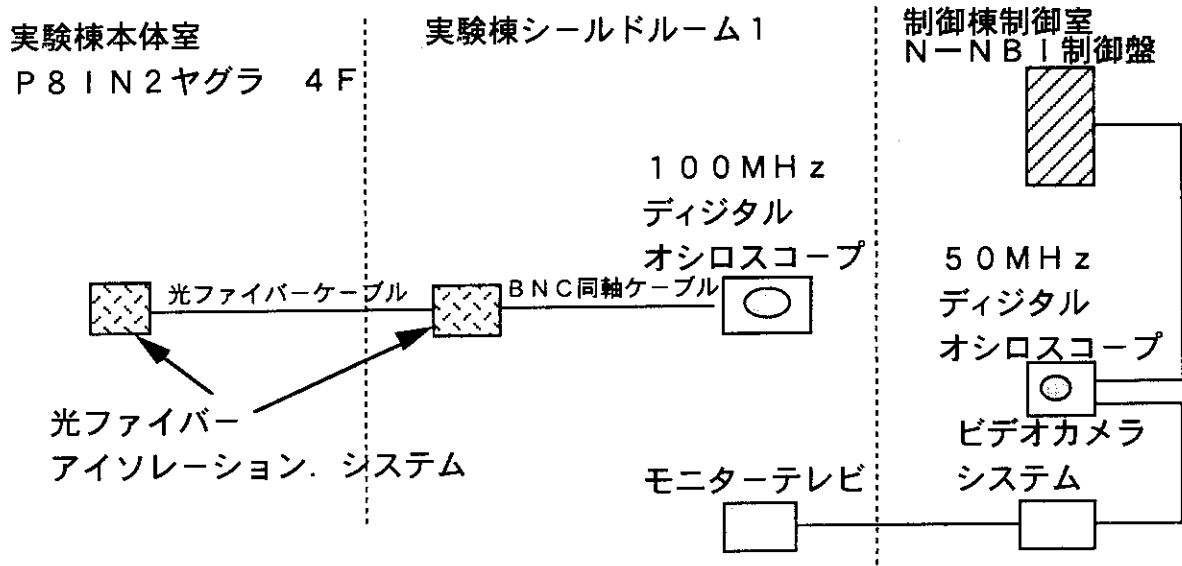


図3.1 ノイズ測定系の概略図

分光計測装置の制御出力処理系統を図3.2に示す。実験棟シールド・ルーム内のCAMACモジュールと実験棟本体室内のCAMACモジュール間の通信は、光ファイバーケーブルを使用して行われている。また、実験棟本体室内のCAMACラック、アナログラック、分光器本体間の通信は多芯シールド・ケーブル①、②により行われている。アナログラックの中には、独立した接地系で接地されたコントロール・ユニットが設置され、CAMACからの信号をD/A変換、あるいはA/D変換し、分光器の制御、あるいは設備間の情報交換を行っている。ノイズによる誤動作はコントロール・ユニット内のデジタル信号部で発生している。コントロール・ユニットへは③の電源ケーブル、接地線が接続されている。

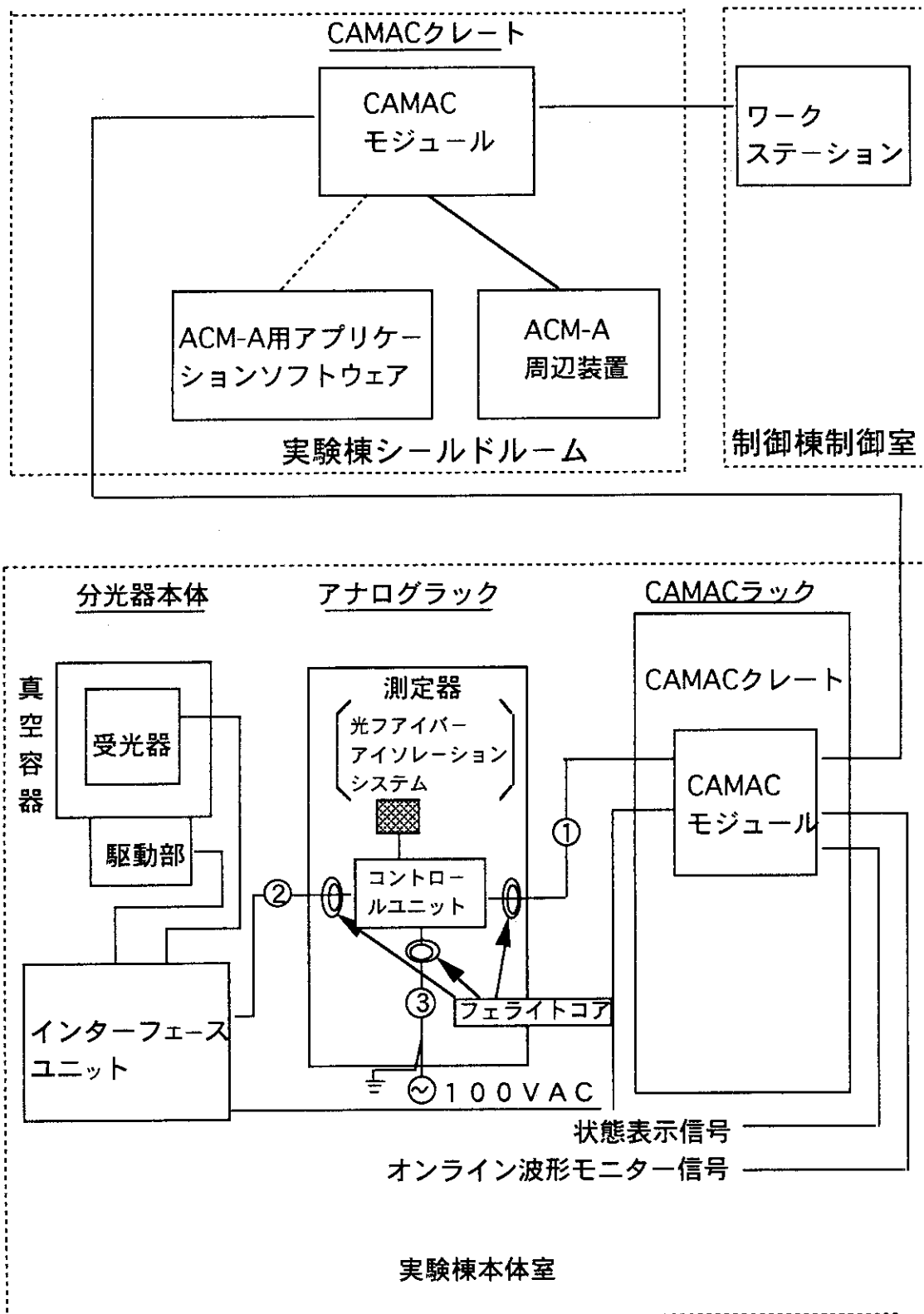


図 3. 2 分光計測装置の制御出力処理系統図

3. 1 測定準備

測定器の健全性を確認するために、ノイズ測定前に以下の試験を行った。

イ) 光ファイバー・アイソレーション・システム磁場エラー試験

定常磁場中で光ファイバー・アイソレーション・システムの動作試験を実施し、 550 wb/cm^2 までの磁場に対して正常動作することを確認した。

ロ) 光ファイバー・アイソレーション・システムの周波数特性試験

プロブ込で55 MHzまで正確に測定できることを確認した。

ハ) 光ファイバー・アイソレーション・システム単体ノイズ試験

分光計測装置制御回路が収納されているアナログラックの中にDC 1.5 V (乾電池) を光ファイバー・アイソレーション・システムに入力し、N-NBI 放電破壊時の輻射ノイズが、 $850 \text{ mV}^{\text{p-p}}$ であることを確認した。これは測定すべきノイズの電圧に比べて十分に小さな値である。

3. 2 測定方法

ノイズ源から分光計測装置のコントロール・ユニットへ流れ込むサージ電流の流路は、図3. 2の①、②、③のケーブルを通じて侵入する場合と静電誘導ノイズ、及び輻射ノイズ(ノイズ源から空中を飛んで直接被害器へ侵入するノイズを云う)で侵入する場合がある。また、測定器を接続すると測定器自身が流路となり、サージ電流の流路を乱すのでサージ電流の直接測定は困難である。そこで、コントロールユニットの中で最も誤動作が多かった回路のICの出力電圧を測定することとした。また、コントロール・ユニットに接続された信号ケーブルを抜き差しすることで、この信号ケーブルを流路としてコントロール・ユニットへ流れ込む、または流出するサージ電流の相対値を求めた。

サージ電流の相対値を求めるには、サージ・エネルギー源が一定であることである。そこで、ビーム加速電圧、電流、が同一のパターンを持った、放電破壊を選択し、IC出力回路のサージ電圧を測定した。

コントロール・ユニットのケーブルをすべて差し込んだ場合、伝導ノイズ(電流の良導体である導線路や構造物の中を流れて侵入するノイズを云う)と静電誘導ノイズ、及び輻射ノイズが測定され、コントロールユニットに接続された信号ケーブルをすべて引抜くことで静電誘導ノイズ、及び輻射ノイズが測定できる。

3. 3 ノイズ測定の結果

サージ電圧測定時のN-NBI加速電圧は-350 kV、加速電流は20 A~40

Aであった。

周波数 15 MHz のノイズが測定された。すべてのケーブルを接続した場合、N-NBI 放電破壊と連動して、図 3. 3 に示すように $15\text{ V}^{\text{P-P}}$ から $18\text{ V}^{\text{P-P}}$ のサージ電圧が観測された。

電源ケーブル以外のケーブルを引き抜いた場合には、すべてのケーブルを接続した場合と比べて約 $1/3$ にサージ電圧が減少している。(図 3. 4 参照) 電源ケーブル以外のケーブルをすべて抜いた場合のサージ電圧は、静電誘導ノイズと輻射ノイズによるものであると推定される。

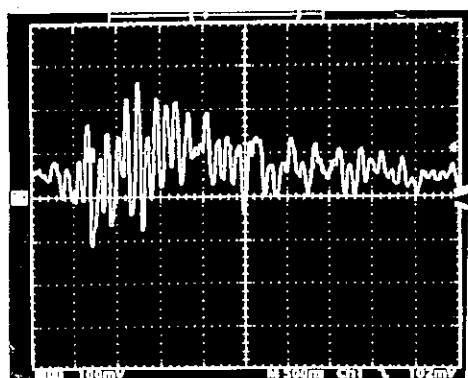


図 3. 3 すべてのを接続した場合のノイズ波形。

5 V / div

0.5 μsec / div

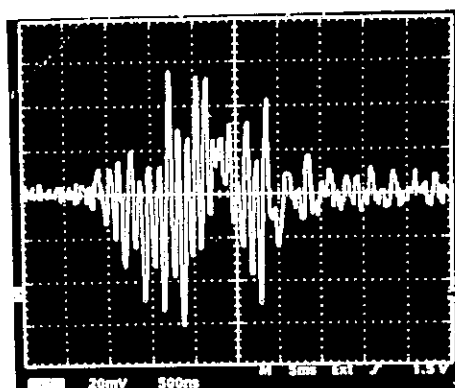


図 3. 4 電源ケーブル以外のケーブルを引き抜いた場合のノイズ波形。

1 V / div

0.5 μsec / div

4. ノイズ対策

ノイズ対策には、ノイズ源の抑制、結合径路の対策、装置自体の耐ノイズ性能向上を基本に総合的に進める必要がある。

分光計測装置の運転が始まった昭和 60 年当時は正イオン NBI 装置から発生するインパルス性ノイズで誤動作が多発した。その時には、結合径路の対策、装置自体の耐ノイズ性能向上を総合的に進め、正常な運転ができるようになった。主なノイズ対策は、4. 1 節の 1) 項から 5) 項に対応するものであった。今回 N-NBI によるノイズにより分光計測装置の誤動作が再発したので、これまでに実施されてきたこれらのノイズ対策をより強化した。さらに、電源回路にノイズカットトランスを取り付けると共に、信号ケーブル、電源ケーブル、接地線にフェライトコアを取り付け、サージのブロックを実施した。

Aであった。

周波数 15 MHz のノイズが測定された。すべてのケーブルを接続した場合、N-NBI 放電破壊と連動して、図 3. 3 に示すように $15\text{ V}^{\text{P-P}}$ から $18\text{ V}^{\text{P-P}}$ のサージ電圧が観測された。

電源ケーブル以外のケーブルを引き抜いた場合には、すべてのケーブルを接続した場合と比べて約 $1/3$ にサージ電圧が減少している。(図 3. 4 参照) 電源ケーブル以外のケーブルをすべて抜いた場合のサージ電圧は、静電誘導ノイズと輻射ノイズによるものであると推定される。

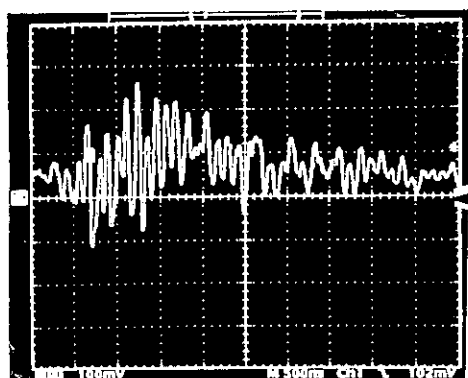


図 3. 3 すべてのを接続した場合のノイズ波形。

5 V / div

0.5 μsec / div

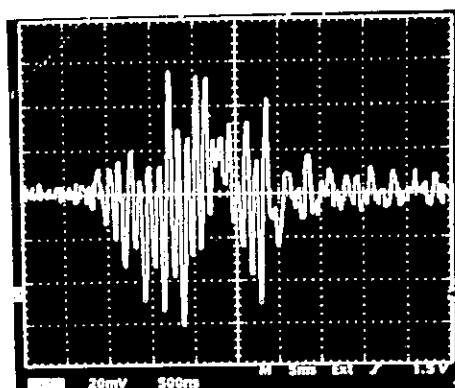


図 3. 4 電源ケーブル以外のケーブルを引き抜いた場合のノイズ波形。

1 V / div

0.5 μsec / div

4. ノイズ対策

ノイズ対策には、ノイズ源の抑制、結合径路の対策、装置自体の耐ノイズ性能向上を基本に総合的に進める必要がある。

分光計測装置の運転が始まった昭和 60 年当時は正イオン NBI 装置から発生するインパルス性ノイズで誤動作が多発した。その時には、結合径路の対策、装置自体の耐ノイズ性能向上を総合的に進め、正常な運転ができるようになった。主なノイズ対策は、4. 1 節の 1) 項から 5) 項に対応するものであった。今回 N-NBI によるノイズにより分光計測装置の誤動作が再発したので、これまでに実施されてきたこれらのノイズ対策をより強化した。さらに、電源回路にノイズカットトランスを取り付けると共に、信号ケーブル、電源ケーブル、接地線にフェライトコアを取り付け、サージのブロックを実施した。

4. 1 ノイズ対策

1) セラミック・コンデンサーの取り付け

ノイズで誤動作するコントロール・ユニットの入力部、出力部、制御基板に $0.003\mu\text{F}$ 桁数のセラミック・コンデンサーが取り付けられてあった。今回はさらにD/A変換器前のラッチICのCLK信号回路に $0.1\mu\text{F}$ のセラミックコンデンサーを取り付けた。しかしサージ・エネルギーが大きいためノイズ抑制効果はなかった。ノイズによる誤動作も継続して発生した。図4. 1は $0.1\mu\text{F}$ のセラミックコンデンサーを取り付けた時のラッチ回路ICのCLK信号波形である。さらにコンデンサー容量を大きくすると正規の信号が伝達されなくなり回路が正常に動作しなくなる。

2) ノイズ・カット・フィルタの取り付け

昭和60年当時、電源ケーブルからのサージ電流の侵入を防ぐためにコントロール・ユニットの交流100V電源回路にノイズカットフィルタ(TDK NOISE FILTER 型式2G1203-11、ノイズ抑制周波数帯域： $0.1\text{MHz}\sim 30\text{MHz}$ 、減衰率： 10MHz でコモンモードで -45dB 、ノーマルモードで -65dB)が設置された。また、この上流側にも絶縁トランス(0.5MHz 以下のノイズカット)とノイズカットフィルター(0.5MHz 以上のノイズカット)が設置された。しかし図4. 2に示すように直流15V電源回路に -5V^{P} のノイズが観測され、ノイズによる誤動作も継続して発生した。

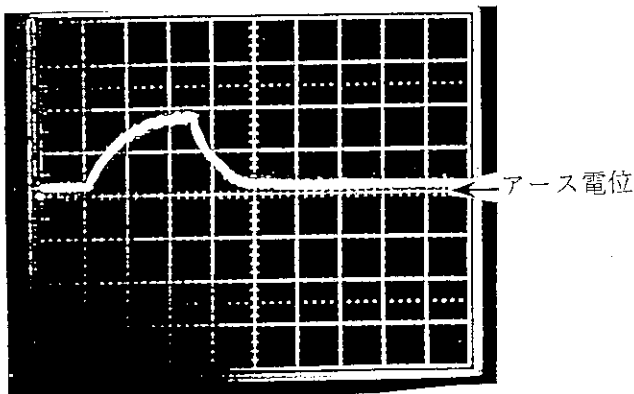


図4. 1 パルス巾 $50\mu\text{sec}$ 、波高値 3.9V^{P} のCLK信号回路に $0.1\mu\text{F}$ のコンデンサーを取り付けた波形。

$2\text{V} / \text{div}$
 $10\mu\text{sec} / \text{div}$

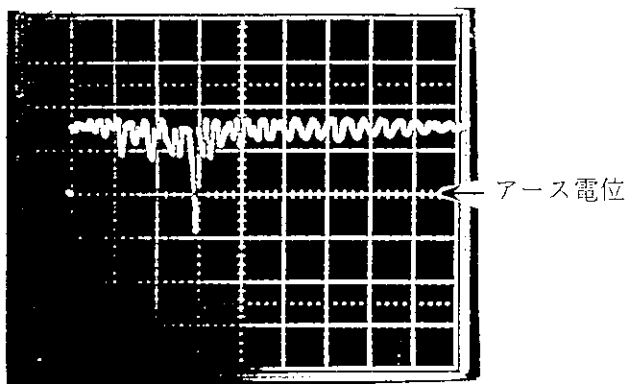


図4. 2 ノイズカットフィルターを取り付けたにもかかわらず直流15V電源回路に -5V^{P} のノイズが観測された。

$2\text{V} / \text{div}$

$10\mu\text{sec} / \text{div}$

3) 制御回路の改造

昭和60年当時はノイズ対策として、ロジックの改造や保護回路の切り離しを行った。今回は、検出器の高圧印加用高圧電源(HV)のコントロール・リミッター回路に定電圧ダイオードを取り付け、ノイズに起因する検出器への過電圧印加の防止をはかった。

4) 信号ケーブルの遮蔽強化

昭和60年当時分光器本体の受光器とインターフェス・ユニット間及びインターフェス・ユニットとアナログ・ラック間(図3.2参照)にジッパーチューブを取り付けたが機器の誤動作は継続して発生した。(ジッパーチューブ接地線はコントロール・ユニットのフレームに接続した。)

5) 接地線の切り離し

接地の目的は、機器動作の面からは、ノイズを大地に積極的に早く流して機器の安定動作を保つ目的がある。しかし、接地電位に変動があると接地線からノイズが侵入する可能性がある。今回、アナログ・ラック、コントロール・ユニット、インターフェス・ユニット、分光器本体、CAMACラック、の接地線を切り離すことを試みた。しかし、機器の誤動作は抑制できなかった。ノイズの流路として接地線以外に信号ケーブル、電源ケーブル等が考えられる。

6) 接地箇所の変更

分光計測装置の接地箇所を基準接地端子盤(図4.3参照)から切り離し、すぐ近くにある浮遊静電容量が大きいIN2ヤグラに低インピーダンス線で接続し、図4.3のように接地箇所を変更をした。IN2ヤグラの浮遊静電容量が大きいので、ノイズ抑制効果を期待したが、ノイズによる機器誤動作は継続した。

7) 電源回路へのノイズ・カット・トランスの取り付け

ノイズ・カット・トランス(ノイズ抑制周波数帯域 0.5MHz~100MHz、減衰率は、10MHzでコモンモード -58dB、ノーマルモード -51dB)をコントロール・ユニットの交流100V電源回路に取り付けた。しかし機器の誤動作を防止できなかった。信号ケーブルや接地線からのノイズ侵入が考えられる。

8) フェライト・コアの取り付け

フェライト・コアを取り付けることによって、N-NBIの放電破壊時における機器の誤動作を防止することができた。これについては詳しく次節4.2で述べる。

4.2 フェライト・コアによるノイズ対策

コントロール・ユニット、の入出力部のケーブルにフェライト・コアを取り付け(図3.2参照)、サージ電流の流入、流出をブロックすることにより、制御回路のノーマル・モード・ノイズを抑制し、機器誤動作の防止をはかった。

1) フェライトコアによるノイズの減衰原理

ケーブルに交流電流が流れると電流周波数で変化する磁界がケーブルの周りに発生する。このケーブルにフェライト・コアを取り付けると、ケーブルの周りにできる空間磁界が透磁率の高いフェライト・コアによって収束され、高周波ノイズが磁気エネルギーを経て熱エネルギーに変換される。従って高周波のノイズを減衰させることができる。

2) フェライト・コアの選択

N-NBIによるノイズ周波数が15MHz程度であることから、フェライト・コアとして、TDKノイズ・サプレッション用フェライト・コア、型式HF60T38、T60を使用した。

下記にこのフェライト・コア性能を示す。

材質	:	HF60	
初透磁率	:	900	H/m
初透磁率の相対温度係数	:	1~3	
飽和磁束密度	:	300	mT
キュリー温度	:	>100	℃
体積抵抗率	:	10	Ω-m
ノイズ抑制周波数帯域	:	5MHz~100MHz (ただし、コイルの巻き回数によって低周波側に移動する。)	
インピーダンス	:	ケーブルの巻き回数によって変化する	
		HF60T38	1MHz (1回巻き) : 16 Ω
		HF60T60	1MHz (1回巻き) : 21 Ω

インピーダンスは、フェライト・コアの枚数に比例し、ケーブルの巻き数の2乗に比例する。図4.4にフェライト・コア取り付け概念図を示す。ただし、インピ

インピーダンスのピーク（共振点）は、巻数を増加すると低周波側に移動する。インピーダンスのピーク（共振点）をノイズ周波数に近づけることにより効果的なノイズ低減ができる。

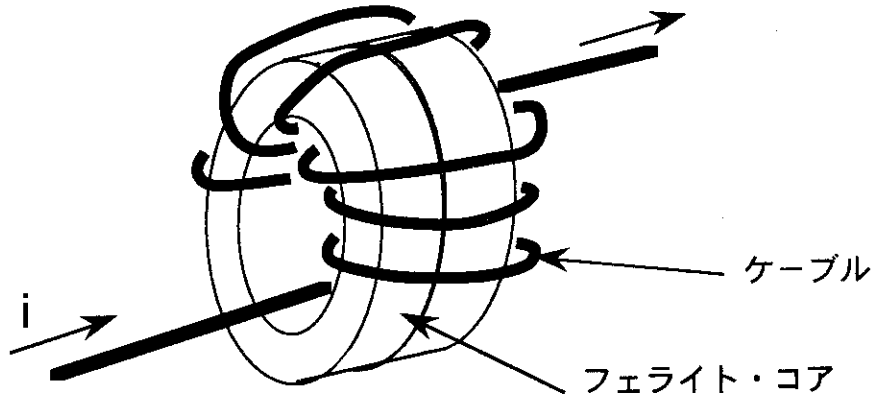


図 4. 4 コア取り付け概念図

図 4. 5 に示す回路に対して、回路インピーダンスとフェライト・コア・インピーダンスによるノイズ減衰量の関係式は

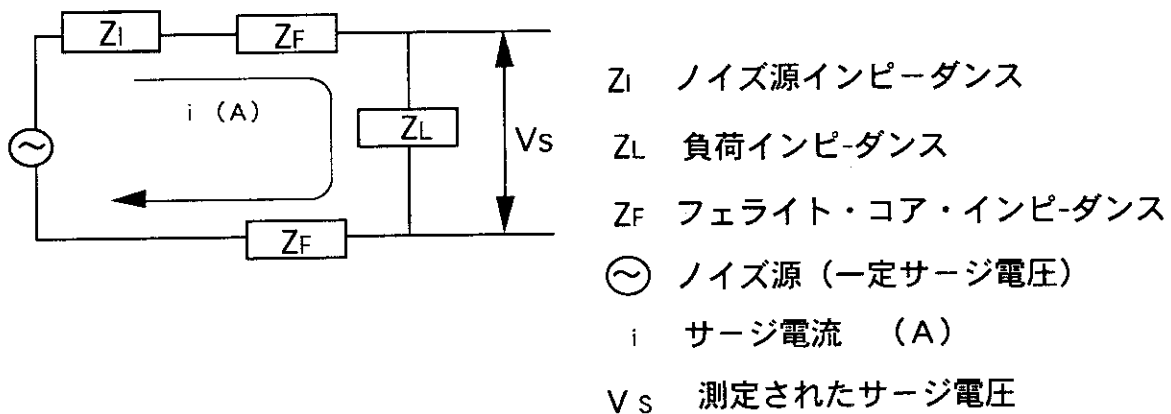


図 4. 5 減衰量計算の等価回路図

$$\text{減衰量(dB)} = 20 \cdot \log_{10} \frac{Z_i + Z_L + Z_F}{Z_i + Z_L} \quad (4. 1)$$

のようになる。

3) フェライト・コアによるノイズ抑制効果試験

図4. 5の試験回路でイ). ロ). ハ)の試験を実施した.

イ) フェライト・コアのノイズ抑制効果と枚数、及び巻数、の関係試験
分光計測器の負荷インピーダンスを $3.7\text{ k}\Omega$ に想定し、 15 MHz 、 5 V^{P} のパルスを印加し、フェライト・コアの枚数、巻数を変化させてノイズ抑制効果を試験した。

(図4. 6 ノイズ抑制効果と巻数、枚数、の関係試験結果参照) 8ターン以上ではノイズ抑制効果の変化はなくなった。ケーブル巻数が1の時、フェライト・コア出力電圧が入力電圧より大きいのは、反射波の影響と思われる。

ロ) 負荷インピーダンス依存性試験

15 MHz 、 5 V^{P} パルスを模擬負荷に印加し、模擬負荷インピーダンスを 50Ω から $1.4\text{ k}\Omega$ まで変化させた時のノイズ抑制効果を試験した。ノイズ抑制効果はほぼ一定であった。(図4. 7 ノイズ抑制効果の負荷インピーダンス依存性試験結果参照)

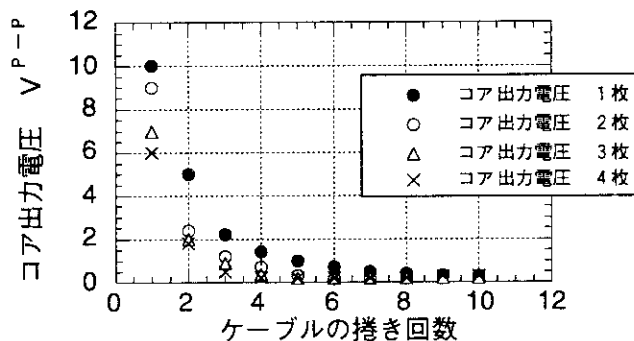


図4. 6 コア抑制効果と枚数、及び巻き数、関係試験
(15 MHz 、 5 V^{P} のパルスを印加した時のコア出力電圧)

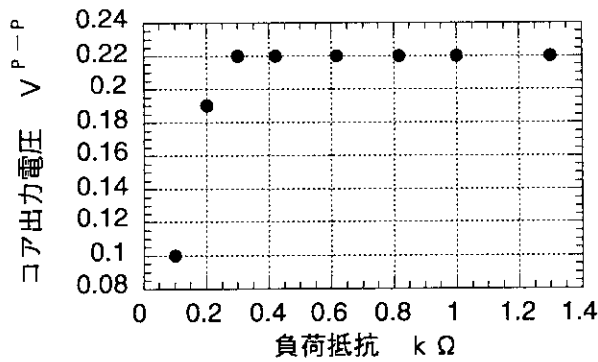


図4.7 負荷インピーダンス依存性特性試験結果
(15 MHz、5 V^Pのパルスを印加した時のコア出力電圧)

ハ) フェライト・コアの周波数特性試験

フェライト・コアの巻数が1巻きから7巻き、模擬負荷インピーダンスが3.7 kΩの場合について、周波数が100 kHzから20 MHz、5V^Pのパルスを印加したときの周波数とノイズ抑制効果を調べた。図4.8 (a)の巻数2では、15 MHzでノイズが1/3に減少している。図4.8 (b)の巻数5では10 MHzで約1/2に減少している。図4.8 (c)の巻数7では、4 MHzで約1/2以下に減少している。このようにフェライト・コアの巻数が多くなるとノイズ抑制周波数帯域が低周波側に移動する。

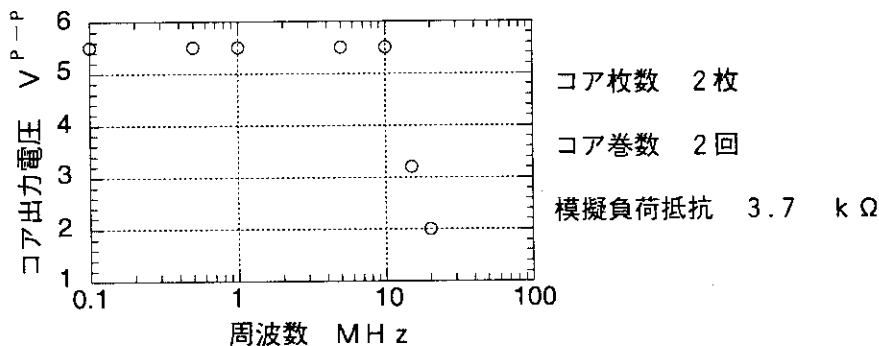


図4.8 (a) 周波数特性試験
(15 MHz、5 V^Pのパルスを印加した時のコア出力電圧)

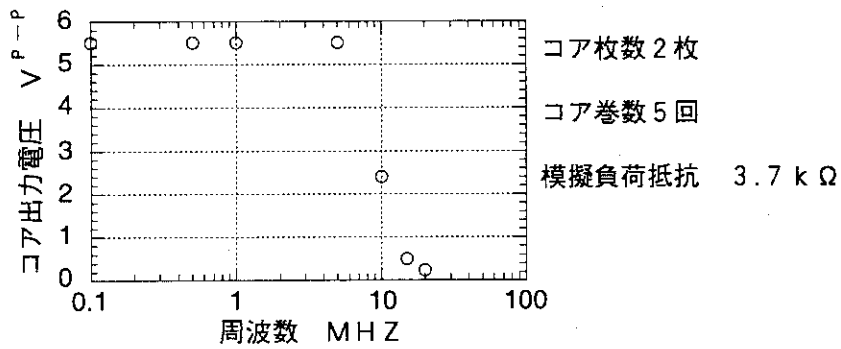


図 4. 8 (b) 周波数特性試験
 (1.5 MHz、5 V^Pのパルスを印加した時のコア出力電圧)

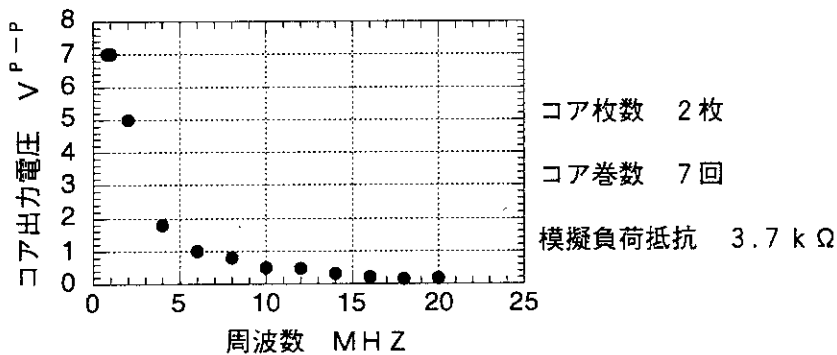


図 4. 8 (c) 周波数特性
 (1.5 MHz、5 V^Pのパルスを印加した時のコア出力電圧)

以上イ) ~ハ) の試験結果から、使用するフェライトコアの枚数を2枚、巻数を7ターンに決定した。

4) フェライトコアの取り付け方法

コントロール・ユニットの入力部、出力部ケーブルにフェライト・コアを取り付けることにより、導線を通じて侵入または流出するノイズが抑制できる。ノーマル・モード・ノイズを抑制するため、信号線、電源線、接地線を極性毎にグループ分け

し、フェライト・コアは下記のように取り付けた。

信号線 (多芯ケーブル) :

+信号線、-信号線、コモン線、(接地線も含む)の3グループに分けて、各々のグループにフェライト・コア(材質、型式、HF60T38)2枚ずつ、巻数7で取り付けた。

電源線:

R相、T相に分けて、各々フェライト・コア(材質、型式、HF60T60)を2枚、巻数7で取り付けた。

接地線:

フェライト・コア(材質、型式、HF60T60)を2枚、巻数7で取り付けた。

5) フェライトコア取り付け後の試験

フェライトコアを取り付けたことによって電源波形及び、信号波形に歪みが生じていないか確認した。

電源波形についてはフーリエ変換によって解析した結果、下記のように周波数成分に変化はなかった。

ダイバータ斜入射分光装置 交流100V電源回路のフーリエ変換による解析結果
(負荷電流 R相 3A S相 3A)

	基本波	3次	5次	7次
コア有り	42.5 dB	-2.3 dB	4.87 dB	1.57 dB
コアなし	42.5 dB	-2.3 dB	4.87 dB	1.57 dB

信号波形については、周波数帯域がフェライトコアのノイズ抑制の周波数帯域から離れているので、波形歪みはなかった。

5 ノイズ対策の結果

図5. 1にフェライト・コア取り付け前と後のノイズ振幅を示す。明らかにフェライト・コアを取り付けることによりサージ電圧値(ノイズ振幅)が減少していることが解る。これはフェライト・コアを取り付けることによって、ケーブルを通じたサージ電流が流入しないことを示す。また、コントロール・ユニットに出入るケーブルを全部引き抜いた(電源ケーブルはフェライト・コアとノイズ・カット・トランスを設置し、接続した。)場合と、コントロール・ユニットに出入るケーブルを全部コアでブロックした場合のノイズ振幅がほぼ同じであった。これは静電誘導ノイズ、

し、フェライト・コアは下記のように取り付けた。

信号線 (多芯ケーブル) :

+信号線、-信号線、コモン線、(接地線も含む)の3グループに分けて、各々のグループにフェライト・コア(材質、型式、HF60T38)2枚ずつ、巻数7で取り付けた。

電源線:

R相、T相に分けて、各々フェライト・コア(材質、型式、HF60T60)を2枚、巻数7で取り付けた。

接地線:

フェライト・コア(材質、型式、HF60T60)を2枚、巻数7で取り付けた。

5) フェライトコア取り付け後の試験

フェライトコアを取り付けたことによって電源波形及び、信号波形に歪みが生じていないか確認した。

電源波形についてはフーリエ変換によって解析した結果、下記のように周波数成分に変化はなかった。

ダイバータ斜入射分光装置 交流100V電源回路のフーリエ変換による解析結果
(負荷電流 R相 3A S相 3A)

	基本波	3次	5次	7次
コア有り	42.5 dB	-2.3 dB	4.87 dB	1.57 dB
コアなし	42.5 dB	-2.3 dB	4.87 dB	1.57 dB

信号波形については、周波数帯域がフェライトコアのノイズ抑制の周波数帯域から離れているので、波形歪みはなかった。

5 ノイズ対策の結果

図5. 1にフェライト・コア取り付け前と後のノイズ振幅を示す。明らかにフェライト・コアを取り付けることによりサージ電圧値(ノイズ振幅)が減少していることが解る。これはフェライト・コアを取り付けることによって、ケーブルを通じたサージ電流が流入しないことを示す。また、コントロール・ユニットに出入るケーブルを全部引き抜いた(電源ケーブルはフェライト・コアとノイズ・カット・トランスを設置し、接続した。)場合と、コントロール・ユニットに出入るケーブルを全部コアでブロックした場合のノイズ振幅がほぼ同じであった。これは静電誘導ノイズ、

及び輻射ノイズの成分であると考えられる。このようにフェライト・コアを使用することによって伝導ノイズをほぼ0レベル近くまで抑制できた。この対策後分光計測器のN-NBIノイズによる誤動作は発生していない。

サージ電圧測定時の、N-NBIの加速電圧は-350 kV、加速電流は20 A～40 Aであった。

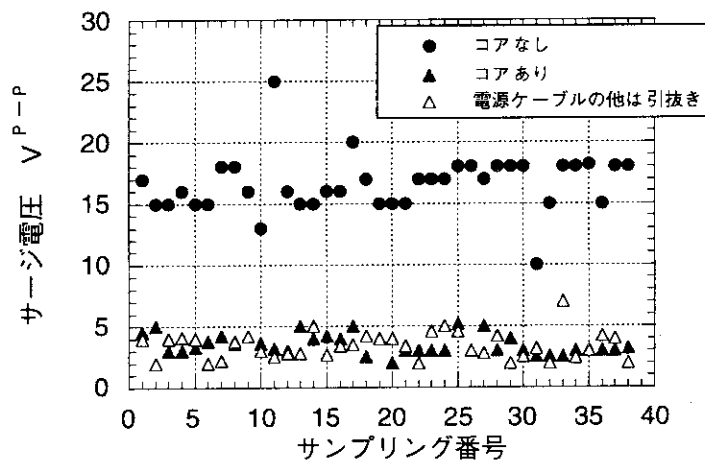


図5.1 サージ電圧測定データ

6. まとめ

N-NBI装置によるノイズの影響で、誤動作を起こしていた、ダイバータ斜入射分光器に対して、その制御回路内の適当な箇所にコンデンサー、及び抵抗を追加する等の対策を施したが、誤動作を抑えることはできなかった。そこで、ノイズ対策のための基礎データを得るために、光ファイバー・アイソレーションシステムを使い、その制御回路内のノイズの周波数、及び振幅を測定した。

ノイズの周波数が、15MHzの高周波であることから、制御回路に出入りするケーブルにフェライトコアを取付ける対策を行うことにした。その際、正規の信号には影響しない範囲で、効率よくノイズの振幅を減少させることができるフェライトコアとケーブルの巻数を決定し、制御回路に出入りしている信号線すべてに、フェライトコアを取付けた。

その結果、制御回路系内の伝導ノイズをほぼ完全に抑制することに成功し、ダイバータ斜入射分光器の誤動作を抑えることができた。

今後、ここで述べてきた例が、ノイズに悩まされているその他システムのノイズ対策の参考になることを願っている。

及び輻射ノイズの成分であると考えられる。このようにフェライト・コアを使用することによって伝導ノイズをほぼ0レベル近くまで抑制できた。この対策後分光計測器のN-NBIノイズによる誤動作は発生していない。

サージ電圧測定時の、N-NBIの加速電圧は-350 kV、加速電流は20 A～40 Aであった。

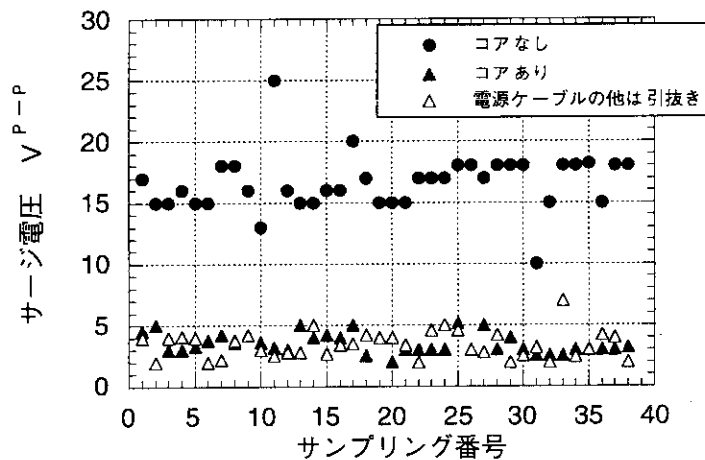


図5.1 サージ電圧測定データ

6. まとめ

N-NBI装置によるノイズの影響で、誤動作を起こしていた、ダイバータ斜入射分光器に対して、その制御回路内の適当な箇所にコンデンサー、及び抵抗を追加する等の対策を施したが、誤動作を抑えることはできなかった。そこで、ノイズ対策のための基礎データを得るために、光ファイバー・アイソレーションシステムを使い、その制御回路内のノイズの周波数、及び振幅を測定した。

ノイズの周波数が、15MHzの高周波であることから、制御回路に出入りするケーブルにフェライトコアを取付ける対策を行うことにした。その際、正規の信号には影響しない範囲で、効率よくノイズの振幅を減少させることができるフェライトコアとケーブルの巻数を決定し、制御回路に出入りしている信号線すべてに、フェライトコアを取付けた。

その結果、制御回路系内の伝導ノイズをほぼ完全に抑制することに成功し、ダイバータ斜入射分光器の誤動作を抑えることができた。

今後、ここで述べてきた例が、ノイズに悩まされているその他システムのノイズ対策の参考になることを願っている。

謝辞

本報告書を纏めるに当り、ご支援を頂いた森雅博炉心プラズマ第1実験室長、芳野隆治炉心プラズマ第2実験室長に感謝します。またノイズ調査に際して、御指導および御協力を頂きましたNBI装置試験室の方々、JT-60運転チームおよびニコンの関係者の皆さんに感謝します。

参考文献

- 1) 杉江 他：“JT-60の不純物空間分布測定システム”，核融合研究，第59巻別冊，157（1988）。
- 2) 秋野昇 他：“JT-60U用負イオンNBI装置の設計検討”，日本原子力研究所報告JAERI-M94-072，（1994）。
- 3) 石橋普史 他：“デジタルシステム耐ノイズ設計ガイド”，社団法人計測自動制御学会，（昭和63年）。
- 4) 山本博：“高周波測定”，コロナ社，（昭和47年）。

謝辞

本報告書を纏めるに当り、ご支援を頂いた森雅博炉心プラズマ第1実験室長、芳野隆治炉心プラズマ第2実験室長に感謝します。またノイズ調査に際して、御指導および御協力を頂きましたNBI装置試験室の方々、JT-60運転チームおよびニコンの関係者の皆さんに感謝します。

参考文献

- 1) 杉江 他：“JT-60の不純物空間分布測定システム”，核融合研究，第59巻別冊，157（1988）。
- 2) 秋野昇 他：“JT-60U用負イオンNBI装置の設計検討”，日本原子力研究所報告JAERI-M94-072，（1994）。
- 3) 石橋普史 他：“デジタルシステム耐ノイズ設計ガイド”，社団法人計測自動制御学会，（昭和63年）。
- 4) 山本博：“高周波測定”，コロナ社，（昭和47年）。