

JAERI-Tech
2003-025



JP0350114



BATAN多目的研究炉RSG-GASの
燃料破損検出システムの改修

2003年3月

春山 満夫・薮 肇・中村 清

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, 2003

編集兼発行 日本原子力研究所

BATAN 多目的研究炉 RSG-GAS の燃料破損検出システムの改修

日本原子力研究所東海研究所エネルギーシステム研究部

春山 満夫・薮 肇⁺・中村 清⁺

(2003年1月30日受理)

原研とインドネシア原子力庁(BATAN)との取決め「付属書 III 炉物理及び技術の分野における協力」に基づく技術協力の一環として、燃料破損検出システム(FFDS)の改修が多目的研究炉 RSG-G.A.Siwabessy(RSG-GAS)においてジョイントワークにより実施された。システムは遅発中性子検出法を採用している。正常状態では、製造工程における微量な核燃料物質の燃料板表面汚染に起因する核分裂生成物(FP)から一次冷却材中に放出されるグロスの遅発中性子濃度をバックグラウンドとして計測する。燃料被覆に破損が起これば、FPは燃料芯材から一次冷却材中に漏洩する。システムは正常時より高い指示を示し、燃料破損を初期段階で検出し、原子炉施設及び環境への損害を最小限にし得る。

最初のシステムは1994年11月に設置され、以来炉運転に運用されている。しかし最近、市場での部品入手難及び予備ユニット不足のため、システムのメンテナンスが難しくなっている。FFDSの改修は同炉の安全・安定運転のために必要なものである。

改修に対する設計上の要求は、

- ・現用システムのユニット及び手持ちの予備品を出来るだけ長く使うこと、及び、
- ・メンテナンスの困難なユニットをメンテナンスの容易なものまたは市場で入手容易なもの置き換えること、

である。

改修したシステムでは、従来のものより約2倍高い遅発中性子感度とともに多重監視を可能とすることによって、より高い信頼性を実現した。本報告では改修したシステムの仕様、設置、調整方法及び特性並びに高出力炉運転におけるFFDSとしての運用方法を本紙で述べる。

Modification of Fuel Failure Detection System at Multi-purpose Reactor
RSG-GAS, BATAN

Mitsuo HARUYAMA, Hajime SHITOMI⁺ and Kiyoshi NAKAMURA⁺

Department of Nuclear Energy System
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 30, 2003)

As one of the technical cooperation activity based on the Annex III, the Cooperation in the Area of Reactor Physics and Technology, of the Arrangement between the National Nuclear Energy Agency (BATAN) and the Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI), the modification of the Fuel Failure Detection System (FFDS) was carried out by the joint work at the Multi-purpose Reactor RSG-GA. *Siwabessy* (RSG-GAS). The system takes the delayed neutron detection method. In normal state, as the background, it measures the gross delayed neutron concentration emitted in the primary coolant from the fission product (FP) nuclides, which are resulted from a very small amount of fissile material contamination on the fuel plate surface at the fabrication process. When a failure happened at fuel cladding, FP leaks from the fuel meat into the primary coolant. The system shows so higher indication than at normal state, then, the fuel failure can be detected at the early stage and be minimized the damages to the reactor facility and to the environment.

The system has been installed at first since November 1994 and applied for reactor operation. However, recently it is not easy to maintain the system for aging degradation and shortage of the spare units and the parts difficult to find in the markets. The modification of FFDS is required for safe and steady reactor operation.

The design requirements of the modification are,

- To save the system units currently used and the spares on hand as long as practicable, and / or
- To replace the system units with those easy to maintain or to obtain at the markets.

The modified system obtained around twice of higher sensitivity for delayed neutron detection than before and more reliable monitoring possibility with redundancy. The specification, installation, adjustment methods and characteristics of the modified system and the modus operandi of FFDS at high power reactor operation are described in this paper.

Keywords : Fuel Failure, Detection System, BATAN, GRS-GA, Modification

⁺ Department of Research Reactor

目 次

1. 序 論	1
2. 背 景	1
3. 新燃料破損検出システム(FFDS)のインストール	2
3.1 提供機器	2
3.2 信号・高圧ケーブル敷設	3
3.2.1 信号ケーブル及び高圧ケーブル仕様	3
3.3 電子回路の仕様	3
3.3.1 プリアンプ	3
3.3.2 メインアンプ	3
3.3.3 ディスクリミネーター	3
3.3.4 カウントレートメーター	3
3.3.5 カウンター/タイマー	3
3.4 電子回路系の接続結線	5
3.5 電子回路系の調整試験	5
3.5.1 プラト特性試験	5
3.5.2 プリアンプ波形観測	5
3.5.3 メインアンプの GAIN 調整	8
3.5.4 Timing Single Channel Analyzer ORTEC 551 の機能	9
3.5.5 ディスクリ特性試験	11
3.6 総合性能試験	13
4. 旧 FFD 計装システム	14
4.1 計数不安定の調査	14
4.2 既存 FFD 計装システム最適設定	14
5. 炉運転における運用	15
5.1 FFDS 運用体制・手順	15
5.2 バックグラウンド計数率	15
付録 I 中性子検出に関する基礎知識	21
付録 II プリアンプの詳細仕様	24

Contents

1. Introduction	1
2. Background	1
3. Installation of New Fuel Failure Detector System(FFDS)	2
3.1 Offered Instrument	2
3.2 Setting of Signal and High Voltage Cable	3
3.2.1 Specification of Signal and H.V Cables	3
3.3 Specification of Electric Circuit	3
3.3.1 Pre-amplifier	3
3.3.2 Main-amplifier	3
3.3.3 Discriminator	3
3.3.4 Count Rate Meter	3
3.3.5 Counter/Timer	3
3.4 Connection of Electric Circuit System	5
3.5 Adjustment of Electric Circuit System	5
3.5.1 Examination of Plateau Character	5
3.5.2 Observation of Pulse Shaping from Pre-amplifier	5
3.5.3 Gain Adjustment of Main-amplifier	8
3.5.4 Function of Timing Single Channel Analyzer ORTEC 551	9
3.5.5 Examination of Discriminator Character	11
3.6 Total Performance Test	13
4. Current Used Fuel Failure Detector System(FFDS)	14
4.1 Investigation of Unstable Count Rate	14
4.2 Optimum Adjustment of Current Used FFDS	14
5. Modus-operandi on Reactor Operation	15
5.1 FFDS Modus-operandi Scheme and Procedure	15
5.2 Counts Rate of Back-ground	15
Appendix I Fundamental Knowledge on Neutron Counting	21
Appendix II Detailed Specification of Pre-amplifier	24

1. 序 論

BATAN 研究炉における現燃料破損早期検出システムは、研究炉の安全運転を確保するためのナビゲータとして重要な役割を果たす測定機器であるが、経年使用による性能劣化が進み、また、故障に伴うメンテナンスが難しくなっているのが現状である。これらの問題を解決し、信頼性の高い燃料破損早期検出システムとするため、新たに2系統の遅発中性子測定系を設置する。

この支援活動は JAERI-BATAN 協力取決め「付属書 III」に基づく BATAN 研究炉技術開発センターとのジョイントワークにおいて、多目的研究炉 RSG-GAS の一次冷却水中の遅発中性子濃度測定及び燃料破損早期検出に関する技術協力・指導を行うものである。

本報告は、原研の研究炉部からの要請を受けて BATAN 研究炉技術開発センター center for development of research reactor technology(P2TRR)において実施した燃料破損早期検出に関する技術協力・指導活動の内容及び成果に関するものである。

2. 背 景

研究炉部は燃料破損早期検出システム(以下 FFDS)の研究炉安全運転における重要性及び BATAN の技術・経済的事情に鑑み、文部科学省研究者交流制度(MEXT-SEP)や JAERI-BATAN 協力取決め「付属書 III」により、その運用・保守・整備に協力・支援を行ってきた。

しかし、同 FFDS の多くのシステムユニットは当時部内各炉施設で保有していた「JAERI モジュール」の遊休品等の供出により構成されているため、現在ではかなり老朽化し、且つ市場から予備ユニット及び部品の入手が困難となっているため、同 FFDS の保守・整備を極めて困難なものにしている。

この状況を改善するために、BATAN 研究炉技術開発センター「炉システム課」の責任者及び研究炉部派遣の専門家等が検討・協議を重ねた結果、同システムの各ユニットを「同等の機能・性能を持ち、且つ部品が市場で入手可能なもの」と置換する方策で意見の一致をみた。同センターは炉の保守・整備計画にこの方策を重要項目として採り入れ、実施することになった。

3. 新燃料破損検出システム(FFDS)のインストール

現使用のFFDSの老朽化に伴い、新たに2チャンネルのFFDシステムをインストールする。インストールに必要な検出器・電子回路及び信号ケーブル等は原研における遊休品等を調達し提供する。提供した電子機器等とBATANで所持する予備品とを組み合わせ、新たに2チャンネルのFFDシステムを構築・設置する。

新FFDシステムのインストールでは、信号・高圧ケーブル敷設、電子回路の設置の接続配線、電子回路系の調整試験及びFFDシステムの総合性能試験を行う。

3.1 提供機器

今回の協力・支援において以下の表-1に示す計測機器類を提供した。

表-1 提供したFFDシステム用計測機器類

No	Description of Goods		proviso
	Item	Quantity	
1	He-3 Neutron Counter CENTRONIC 100 He3/304/25D	4 pieces	
2	Pre-amplifier, model 240	3 units	
3	Bin 4001A	1 unit	
4	Bin Power Supply Monitor JAERI-RIL-H07-2	2 units	
5	Count Rate Meter Log/Lin TENNELEC TC 527	1 unit	
6	Amplifier, TENNELEC TC 244	1 unit	
7	Counter, ORTEC 872	1 unit	
8	Oscilloscope, TEKTRONIX 2445	1 unit	
9	Timing Single Channel Analyzer ORTEC 551	2 units	
10	Polyethylene Sleeve	4 pieces	
11	Cables and Connectors	1 set	

3.2 信号・高圧ケーブル敷設

現使用の FFDS 計測系とは別に FFDS を新たにインストールするため、検出器を取り付ける 1 次冷却水配管のあるプライマリーセル(primary cell) 1 階からメインアンプ、ディスクリミネーター、カウントレートメーター等を設置するマルセリングキオスク(Marshalling Kiosk) 4 階まで、約 130m の信号ケーブル 2 本および高圧ケーブル 2 本の合計 4 本のケーブル敷設を行った。

3.2.1 信号ケーブル及び高圧ケーブル仕様

信号ケーブル

線種：3C2V インピーダンス：50Ω コネクター：BNC

高圧ケーブル

線種：59U インピーダンス：90Ω コネクター：SHV

3.3 電子回路の仕様

3.3.1 プリアンプ

東洋電子社製 防湿型 Pre-amplifier, model 240

検出器 He-3 側入力端子：HN コネクター

出力信号・TEST 入力端子：BNC コネクター

高圧入力端子：SHV コネクター

他、詳細は APPENDIX II を参照。

3.3.2 メインアンプ

TENNELEC 社製 Amplifier model TC 244

入出力信号端子：BNC コネクター

出力信号型式：Bipolar Unipolar 選択

出力信号極性：Positive、Negative 選択

3.3.3 ディスクリミネーター

ORTEC 社製 Timing Single Channel Analyzer model 551

入出力信号端子：BNC コネクター

出力信号極性：Positive、Negative 両極性同時出力可

3.3.4 カウントレートメーター

TENNELEC 社製 Count Rate Meter Log/Lin model TC 527

入出力信号端子：BNC コネクター

出力信号極性：Positive、Negative 両極性同時入力加算可

表示：Log/Lin 同時表示可

3.3.5 カウンター/タイマー

ORTEC 社製 Counter/timer model 872

入出力信号端子：BNC コネクター

This is a blank page.

入力信号端子数：3口(2~3ch) 1chはPreset Timer

入力信号極性：Positive、Negative 両極性とも入力可

3.4 電子回路系の接続結線

He-3 検出器、プリアンプ、メインアンプ、ディスクリミネーター、カウンター、カウントレートメーター及びHV パワーサプライを図-6 に示すように接続結線する。

3.5 電子回路系の調整試験

調整試験では、最適な状態で使用できるようにプラトー特性試験、プリアンプ波形観測、メインアンプのGAIN 調整及びディスクリ特性試験を行った。

3.5.1 プラトー特性試験

プラトー特性試験は、CENTRONIC 社製 He-3 Neutron Counter 100 He3/304/25D 型をプリアンプ(東洋電子社製 Pre-amplifier, model 240)、メインアンプ(Amplifier, TENNELEC TC 244)、ディスクリミネーター(ORTEC 社製 Timing Single Channel Analyzer model)及びカウンター(ORTEC 社製 Counter model 872)に接続し、Am-Be 中性子線源を用いた中性子計数状態において、高圧印加電圧を変化させ、その電圧に対する計数値の変化を把握することによって最適印加電圧を決定する。印加電圧は、

1000V から 1260V まで変化させ、得られたプラトーデータを図-1 に示す。図から、No.1~6 の検出器すべてが 1210V までは同じ傾向を示すが、1220V で No.4 の検出器の計数値が急激に増加し、他の検出器とは違った傾向を示す。このような場合、同時使用することを考慮すれば、No.4 検出器を除くのが良であろう。したがって、今回提供した He-3 計数管は、No.1~3 及び No.5 の 4 本とした。

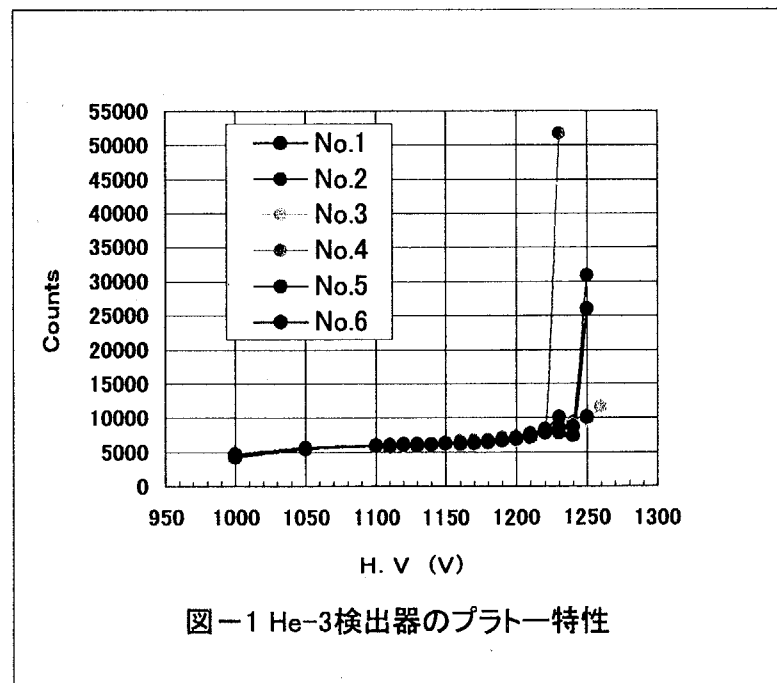


図-1 He-3検出器のプラトー特性

特性試験の結果、印加電圧

の変動による計数値の変動を抑えて安定した計数値を得るためには、プラトー特性カーブから高圧印加電圧を 1150V に設定するのが最適であると判断できる。

3.5.2 プリアンプ波形観測

プリアンプ model 240 に He-3 検出器を接続し、1150V の電圧を印加すると中性子パルスが発生する。オシロスコープで観測すると、プリアンプ model 240 の出力信号は、図-2 に示すように、最大波高約 100mv、波長 300 μ sec のユニポーラー波形で出力されることがわかる。

This is a blank page.

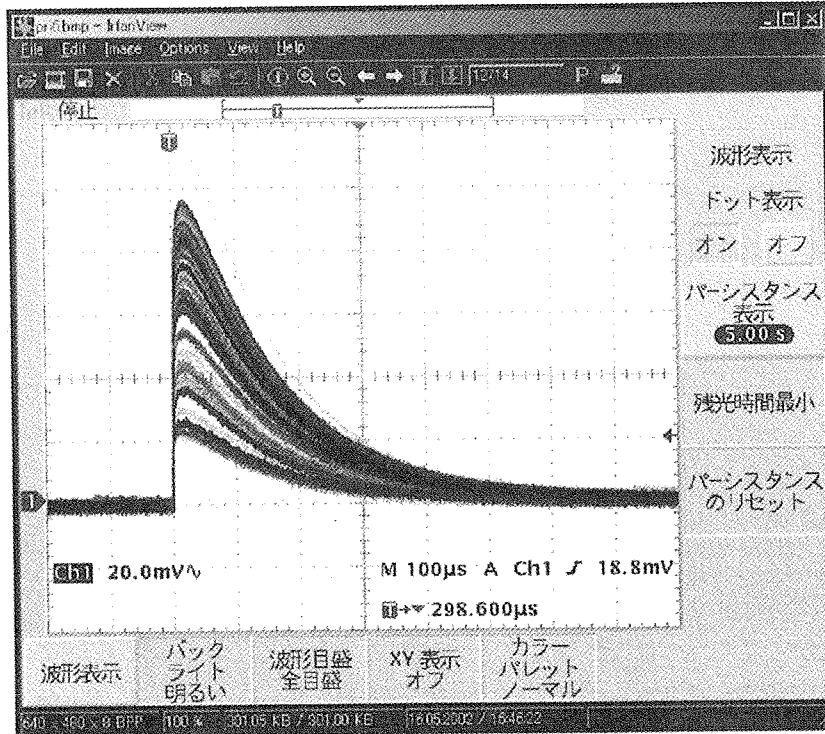


図-2 プリアンプ model 240 の中性子出力波形

3.5.3 メインアンプのGAIN 調整

プリアンプ model 240 の出力信号を TENNELEC 社製 Amplifier model TC 244 に入力し、下記観測条件で FINE GAIN, COARSE GAIN, Peaking Time をセッティングして、オシロスコープにより波形を観測すると図-3 に示すように、最大波高 6V、波長 1 μ sec の出力波形が観測できる。

「メインアンプ出力波形 観測条件」

ゲイン設定値	オシロスコープスケール	プリアンプ	He-3 検出器
FINE : 5	V : 2V/div	Ser. No : 5866	No : 2
COARSE : 200	H : 4 μ s/div		H · V : 1150
Peaking Time : 0.75 μ s			

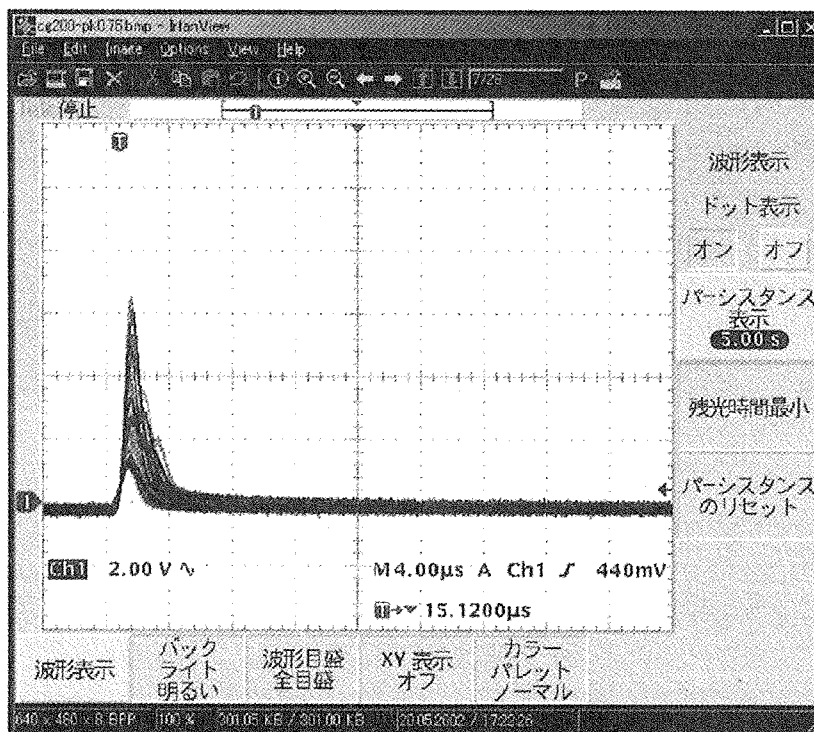


図-3 メインアンプ model TC 244 の出力波形

3.5.4 Timing Single Channel Analyzer ORTEC 551 の機能

図-4 は、TENNELEC 社製 Amplifier model TC 244(Main Amp)の出力信号とその信号を入力したときに Timing Single Channel Analyzer ORTEC 551(Timing SCA)からの出力信号をオシロスコープ観察により同時観測したものである。Timing SCA はユニポーラーで入力した波高 2V、波長 2 μ sec の Main Amp 出力信号を波形処理によって波高 5V、波長 1 μ sec の矩形波に規格化する機能を持っている。また、Timing SCA は Low Level Discriminator(LLD)及び Upper Level Discriminator (ULD)を装備しており、LLD の調整によりノイズと中性子信号を弁別することができるディスクリ機能を有している。したがって、LLD 及び ULD のフィルターを通過した信号は、入力信号の波高や波長には関わらず一定規格の矩形波パルスに変換して出力する。すなわち、本 FFD システムのように、カウンターやカウントレートメーター等、検出数だけを把握する計数法の入力信号として必要な波形処理である。

「メインアンプ出力波形 観測条件」

ゲイン設定値	オシロスコープスケール	プリアンプ	He-3 検出器
FINE : 5	V : 1V/div (ch2)	Ser. No : 5866	No : 2
COARSE : 100	H : 400ns/div (ch2)		H · V : 1150
Peaking Time : 0.5 μ s			

TSCA 設定値	オシロスコープスケール
ULD : 0	V : 5V/div (ch1)
LLD : 1.8	H : 400ns/div (ch2)
Delay : 1	

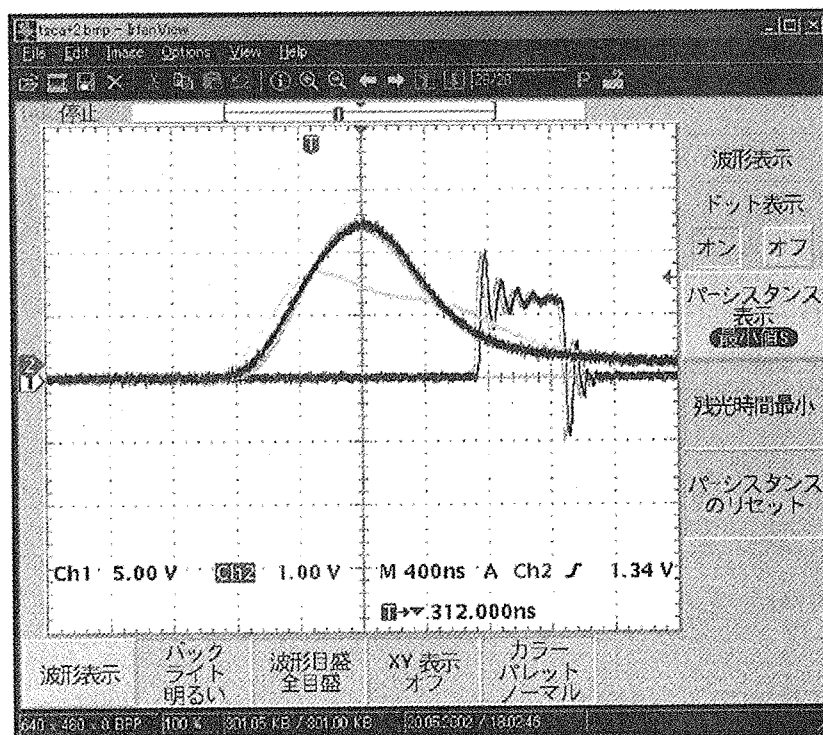


図-4 メインアンプ model TC 244 の出力信号波形とディスクリ ORTEC 551 からの出力信号波形

This is a blank page.

3.5.5 ディスクリ特性試験

プリアンプやメインアンプの出力信号には、その電子回路自身から発生するノイズ(いわゆるホワイトノイズ)と中性子パルスが混在する。したがって、本来の中性子信号とホワイトノイズを分離しなければならない。S/N分離手法の一つとして、ディスクリ特性試験がある。ディスクリ特性は、積分波高分布測定により行う。すなわち、ULDを10Vに固定し、LLDのみを一定電圧を変化させ、その電圧に対応する計数値を調べることによってノイズとシグナルとの弁別点、すなわちディスクリ値を決定する。

図-5は、高圧印加電圧1150Vで、Timing SCAのLLDを0.1Vから0.1V毎に2.5Vまで昇圧させ、その計数値をカウンターで測定した積分波高分布である。

取得した積分波高分布データは、2成分指数関数の和として現われる。その内の減少割合が大きい第1成分がノイズであり、減少割合が小さい第2成分が中性子シグナルである。

したがって、図-5から新FFDSチャンネル1及びチャンネル2のノイズを弁別するためのLLD値は、ホワイトノイズレベルが低く、0.9Vで十分であった。一方、現使用のFFDSではホワイトノイズがかなり高く、少なくとも1.8Vの設定が必要であった。この値はディスクリ設定値としてはかなり高いものである。

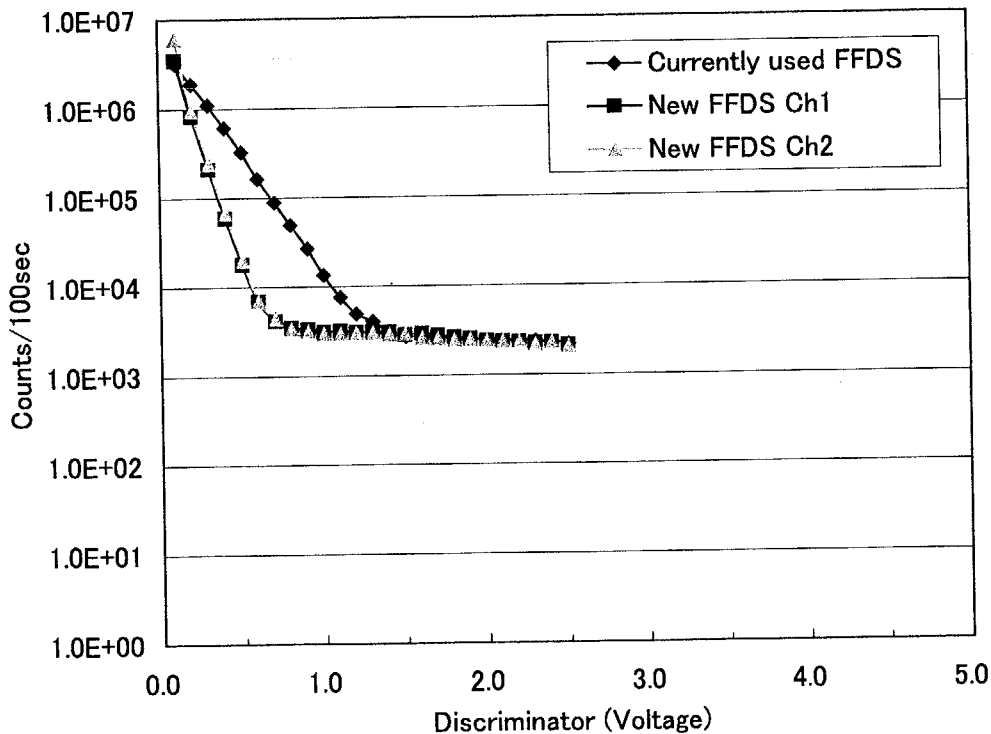


図-5 BATAN FFDSの積分波高特性曲線

This is a blank page.

3.6 総合性能試験

既存の FFDS に加え、新に 2 チャンネルの FFDS のインストールを行うため、約 130m の信号ケーブル及び高圧ケーブル総計 4 本の通線を行い、He 検出器、プリアンプ、メインアンプ、ディスクリミネーター及びカウントレートメーターを設置し、接続配線を行った。

接続完了後、新 FFDS の各部分が正常に差動することを目視及びオシロスコープによる波形観測で確認し、基本設定を行った。

当研究炉技術開発センターでは、中性子線源を所有していないとのことで、中性子検出確認には原子炉起動による 1 次冷却系の遅発中性子を測定するしか手段がなかった。そのため原子炉の起動を待ち、出力 15MW 運転時の中性子を利用することで各電子回路の最適値の詳細設定を行った。詳細設定において、高圧印加電圧の設定ではプラトーデータを取得し、最適印加電圧を決定すると共に、プラトー特性の取得意味や最適印加電圧の決定法について実技指導を行った。

メインアンプの GAIN 設定では、オシロスコープによる中性子パルス波形観測により最適 GAIN 設定値を決定し、その手法を教授した。

Low Level Discriminator(以下 LLD)値の決定は、ノイズ信号と中性子信号を分離し、中性子パルスだけを分離抽出する電子回路部で、信頼性の高い計数値を得るために重要な手法である。そのため、実際に積分波高分布データを取得させ、そのデータをグラフ化させることによって S/N 弁別点を決定させた。LLD 値は、0.9V で十分ノイズを弁別できる結果を得たが、本 FFD 計装システムでは高感度検出よりも長時間にわたる安定計数を優先すべきであると考え、誘導ノイズ等の外部ノイズ混入の影響を完全に回避するためには 2.0V に設定するのがより良いことを指導した。

これら測定系の調整後、Discriminator OUT の出力信号をカウントレートメーターに入力することによって冷却水中の遅発中性子の測定を実施し、中性子計数指示値を観測した。現在使用している FFD システムの計数値 13cps であったが、今回設置した FFD 計装システムは 23cps を示し、約 2 倍の感度をもつことが分かった。この要因として、現使用の FFD 計装システムに比べプリアンプの S/N 特性の良さ及び適正な中性子モデレータの使用によるものと考えられる。

今回設定した、新 FFD 計装システムの印加 HV 電圧、メインアンプの GAIN 及びディスクリ値等について整理したものを表-2 に示す。

4. 旧 FFD 計装システム

旧 FFD 計装システムは、図-7 に示すように JAERI-module で構成したもので、かなりの年月を経ており老朽化が進んでいる。また、特殊な部品の使用もあり World Standard にはなっていない点も今後のメンテナンスに支障を来す原因ともなりうる。

4.1 計数不安定の調査

滞在期間中に 15MeV の一定出力で原子炉運転中での中性子計数値観察中に、以下のような現象が起こった。

① 計数値が段階的(13cps→40cps→75cps)に上昇する現象が起きた。

この原因を調査したところ、ディスクリミネーターM-179A の不良によるノイズの発生であることが判明した。予備のディスクリミネーターと交換したところ正常指示値に戻った。

② 原子炉スタート時 20 分間指示値が乱高下し、不安定な現象が起こった。

プリアンプ出力波高をオシロスコープにより観察した結果、新 FFD システムに使用しているプリアンプに比べホワイトノイズが高い値(1.5V 程度)にあり、S/N 比がかなり悪い状態であった。また、メインアンプの GAIN の調整不良(オーバーGAIN)と LLD 設定値の設定不良が見うけられ、これらが計数値の異常指示や不安定の原因と考えられた。ホワイトノイズの波高が高くなった理由として、経年変化によるプリアンプの劣化が考えられる。

4.2 既存 FFD 計装システム最適設定

前項 4.1 の調査の結果、メインアンプの GAIN は 2 から 1 に調整し、取得した LLD は積分波高分布の結果から 1.8V で十分と思われたが、プリアンプのホワイトノイズの増加や外部ノイズによる異常指示を回避して安定した指示値を得られるように 2.5V に設定した。このような状況を事前に回避するためには、頻繁(例えば; 運転サイクル毎)に積分波高分布特性を取り、中性子信号パルスとノイズを弁別するための最適なディスクリ値を更新決定することが望ましい。今回設定した、既存 FFD 計装システムの印加 HV 電圧、メインアンプの GAIN 及びディスクリ値等について表-3 に整理した。

5. 炉運転における運用

5.1 FFDS 運用体制・手順

炉運転中の炉内装荷燃料の破損(以下燃料破損)及び燃料からの核分裂生成物(FP)漏洩(以下 FP 漏洩)を早期段階で検出するため、MW オーダー以上の高出力運転を実施する場合は炉の起動時に FFDS を測定状態にする。システムユニットのパラメーター設定は表-2 及び 3.5.1 で指定する値を採る。

新しい計測チャンネルは、中性子検出器をポリエチレン円筒でカバーすることにより、従来のものに比べてほぼ 2 倍の感度を持つので、2 個の計測チャンネルから得られる計数率を加算することなく独立して制御室の 2 ペン式記録計で同時連続監視する方式を採る。これによりシステムに多重性・独立性を付与し、従来の片方のチャンネル故障による指示値半減、正常に復帰後指示値倍増等の不都合を回避できる。

当面、炉運転中の出力依存バックグラウンド(BG)レベルを継続的に測定観察し、正常時の指示特性を把握する。次項で述べる BG 計数率の変動を考慮し、異常状態を検出した場合は以下の手順に従う。

- ① FFDS 指示値が BG 計数率の 2 倍以上に達した場合、これを「調査レベル」とし、燃料からの「FP 漏洩の可能性」を念頭に所定の調査を開始する。
- ② 1 次冷却材中に有意な FP 濃度を検出した場合、高出力炉運転を停止し、約 3 昼夜後、自然循環冷却体制で低出力炉運転を行い、オン・パワー・シッピング法及びガンマ線スペクトロメトリにより「FP 漏洩燃料要素」を特定・隔離する。
- ③ FFDS 指示値が BG 計数率の 10 倍以上に達した場合、直ちに炉運転を停止し、②に準ずる手順により「破損燃料要素」を特定・隔離する。

5.2 バックグラウンド計数率

BG 計数率は炉出力以外に燃料交換、炉内照射物及び炉運転時間により影響を受ける。

燃料交換は 1 炉心あたり燃料要素 5 体(1 体当たり燃料板表面積約 22,000cm²)及び制御要素 1 体(同表面積約 16,000cm²)を入れ替える。燃料製作時の燃料板表面核燃料物質汚染密度の許容値は 1 μ gU-235/100cm² 以下であるが、製作バッチにより大幅な変動があるため炉内に装荷した場合、BG レベルに有意な影響を及ぼすことがある。

照射物の内、核燃料物質を取り扱うのは核分裂法により Mo-99 を製造する場合で、最大で数グラムの 93%濃縮ウランをステンレス鋼カプセル内面に塗布・密封したものをを用いる。カプセル表面の核燃料物質汚染密度の許容値は燃料板に比べ桁違いに高く、15MW で同カプセルの炉内照射時に、FFDS 計数率が 20-30cps 程度上昇することが観察されている。

炉運転時間依存の BG レベル変化は、1 次冷却材の炉心から中性子検出器までの到達時間変動による。上で述べた表面汚染核燃料物質は炉心内で中性子照射され、遅発中性子先行核を含む FP が 1 次冷却材中に溶出する。計測目標先行核を Br-87 とし、半減期の短い Br-88 及び I-137、並びに非 FP である N-17 からの影響を抑えるため、中性子検出器は 1 次冷却材が 60 秒後に到達する位置(容量 80m³の遅延槽の下流)に設置してある。1 次冷却材は炉心で加熱され、遅延槽に流入すると溶存空気を分離・放出する。空気は炉運転時間につれて遅延槽内迷路に蓄積され、冷却材流路を狭め、遅延効果を低下させる。遅延槽はポンプ吸込側に設けられており、ポンプ運転中は常に負圧であるため、排気できず、空気は炉運転時間経過と共に蓄積し、体積が増加する。1 次冷却材の中性子検

出器までの到達時間は徐々に短縮されるので、計数率は単調に増加する。

炉運転中の燃料破損・FP 漏洩監視のため、上の状況を斟酌し、正常時の指示データ蓄積・解析を行い、BG 計数率を設定する必要がある。

表-2 新 FFD 計装システム設定値 [New FFD System]

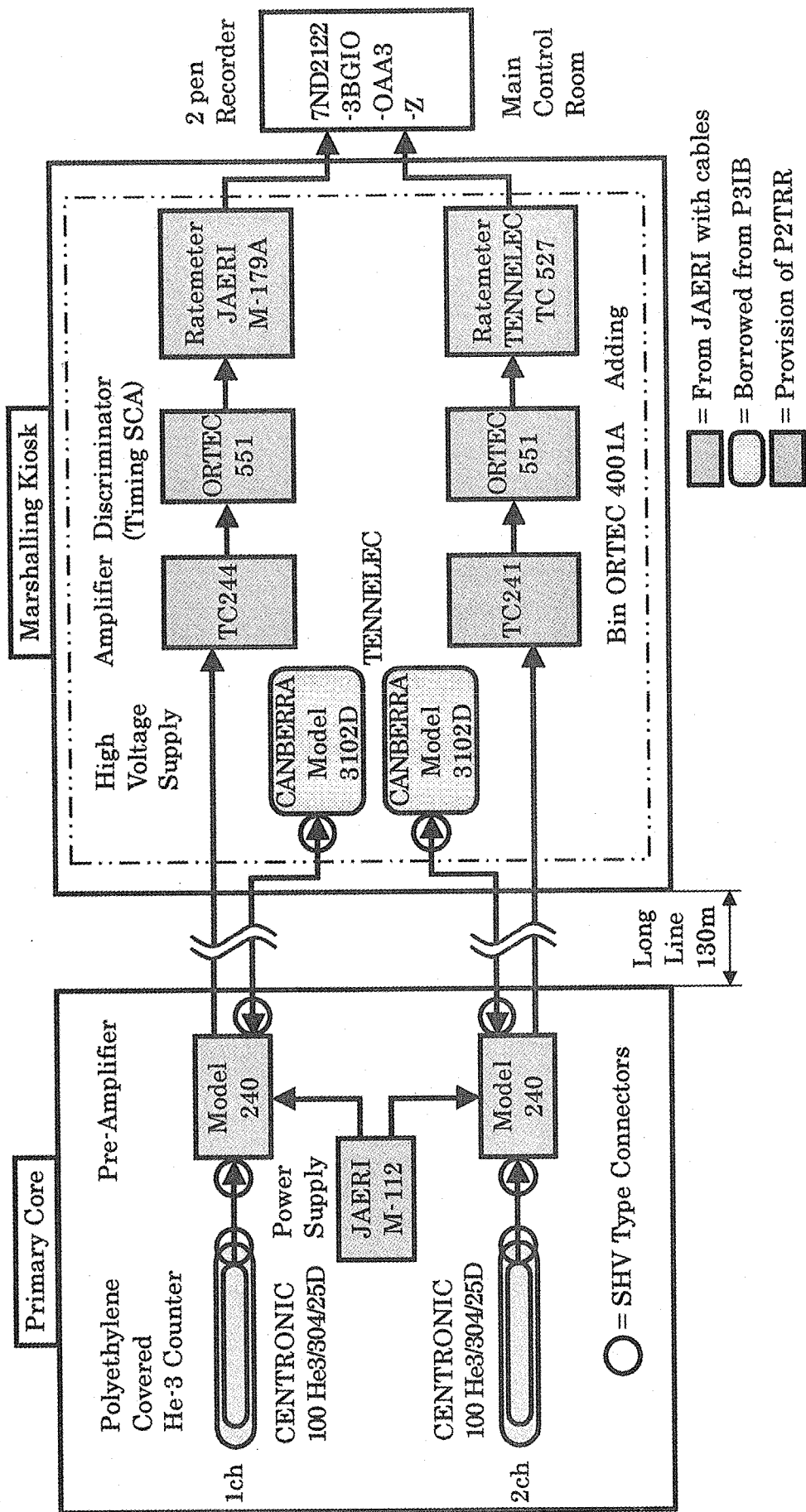
2002.07.06

Channel	No. 1	No. 2
Main. Amp	TENELEC TC 244	TENELEC TC 241
Fine Gain	0.5	0.5
Coarse Gain	200	200
Peaking Time	0.75 μ s	—
Shaping Time	0.35 μ s	—
Input Signal	Posi	Posi
Output Signal	uni	uni
Pileup Rejecter	neutral	—
Discriminator	Timing SCA ORTEC Model 551	Timing SCA ORTEC Model 551
Upper Level	10.0V	10.0V
Lower Level	2.0V	2.0V
Input	DC	DC
Output	Nega put	Posi put
Fast Counter	Quad counter / timer. ORTEC 872	
Connection	Timer	
1ch		
2ch	No. 1 Signal from Timing SCA Nega out	
3ch	No. 2 Signal from Timing SCA Posi out	
4ch	Any Exp. Output from OLD FFD system.	
Rate meter	TENELEC. TC 572	
Rang	100cps	
Time constant	30	
Recorder output	0 — 1.0V	
Input	Nega Signal from No. 1 Timing SCA	
	Posi Signal from No. 2 Timing SCA	

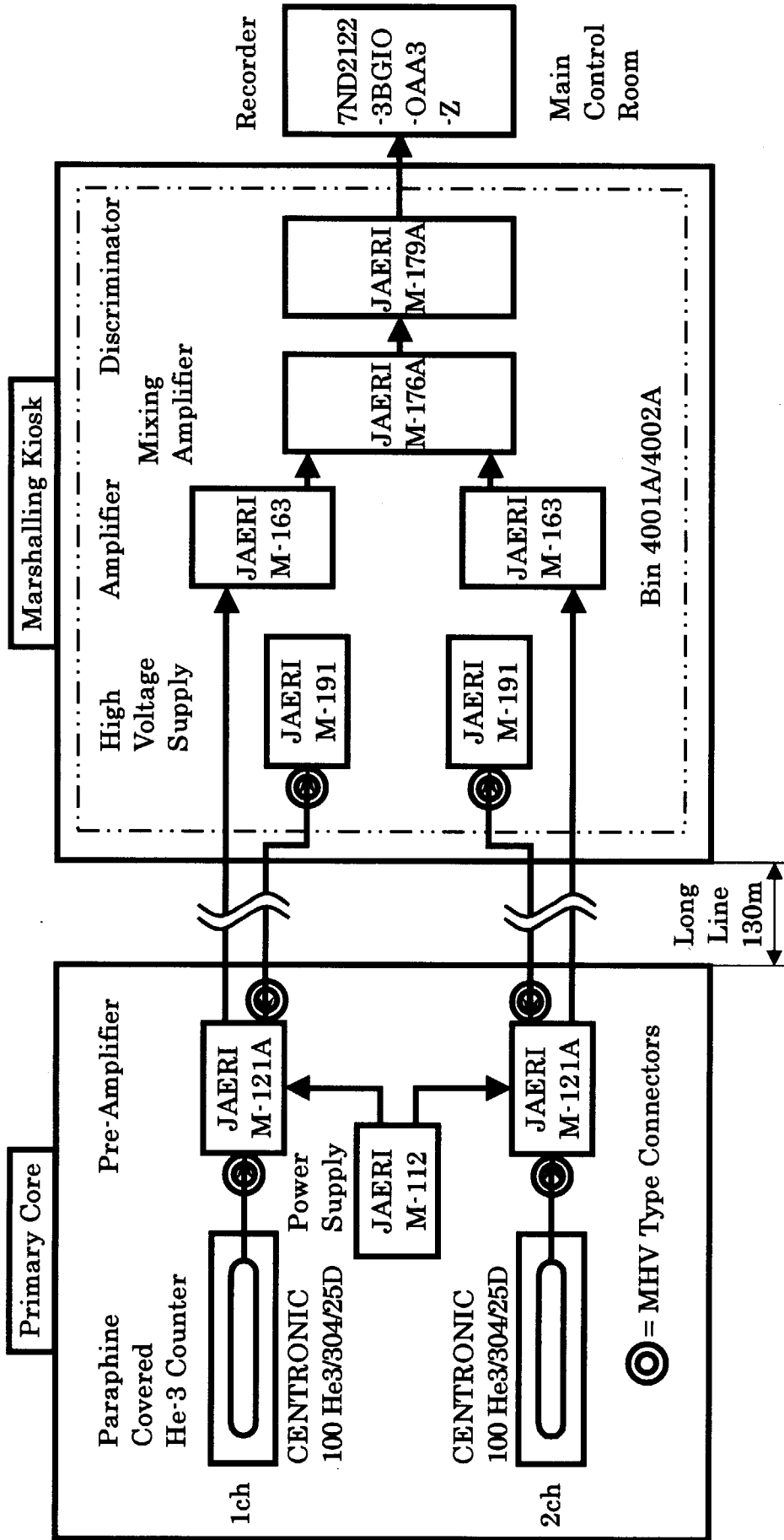
表-3 旧 FFD 計装システム設定値 [Conventional FFD System]

2002.07.06

Channel	No. 1	No. 2
Main. Amp	JAERI Model 163 LINEAR AMPLIFIER	JAERI Model 163 LINEAR AMPLIFIER
Gain	1	1
Shaping Time	0.8 μ s	0.8 μ s
Input	Nega (unip) from preamplifier	Nega (unip) from preamplifier
Output	Dir Output	Dir Output
MIXER	JAERI Model 176A	JAERI Model 176A
Output	Posi 93 Ω	Posi 93 Ω
Discriminator	JAERI Model 1798	
Upper Level	10.0V	
Lower Level	2.5V	
Input	Signal from mixer Output	
Rate meter	JAERI Model 161A	
Rang	100cps	
HV	1400V 1350V	



☒ - 6 MODIFIED FFD SYSTEM



☒ - 7 FFD SYSTEM CURRENTLY USED

APPENDIX I 中性子検出に関する基礎知識

1. He-3 検出器の中性子検出原理

He-3 検出器は Fig-1 に示すような構造となっている。ステンレス鋼チューブの中には ^3He ガスが充填されている。ステンレス鋼チューブ中心を縦に走る陽極線(アノードライン)はステンレス鋼チューブと絶縁された状態で仕込まれている。

He-3 検出器に入射した中性子はある確率で ^3He 原子核と衝突し(n, p)反応を起こし、 ^3He はプロトン(P)を放出しトリチウム(^3H)になる。放出されたPは、 ^3He ガス中を飛行する際 ^3He ガスをイオン化する。イオン化された+/-ヘリウムガスはその逆の電極へ移動する。イオンの移動による微弱電流を電圧変換し、中性子パルスとして捕らえている。

2. He-3 検出器の仕様性能および検出特性

FFDS で今回使用する He-3 検出器は、 ^3He ガス 4 気圧が充填されており、その感度は $1000 \text{ cps} \cdot \text{nv}$ である。 ^3He の中性子エネルギー反応特性は Fig-2 に示すように、熱中性子領域の中性子に対して反応断面積が最大となる特性をもっている。

そのため、速中性子を熱中性子まで減速してから検出した方が圧倒的に中性子検出確率が高くなる。したがって、発生した中性子を効率良く検出しようとする熱領域のエネルギーまで巧く減速することが重要となる。

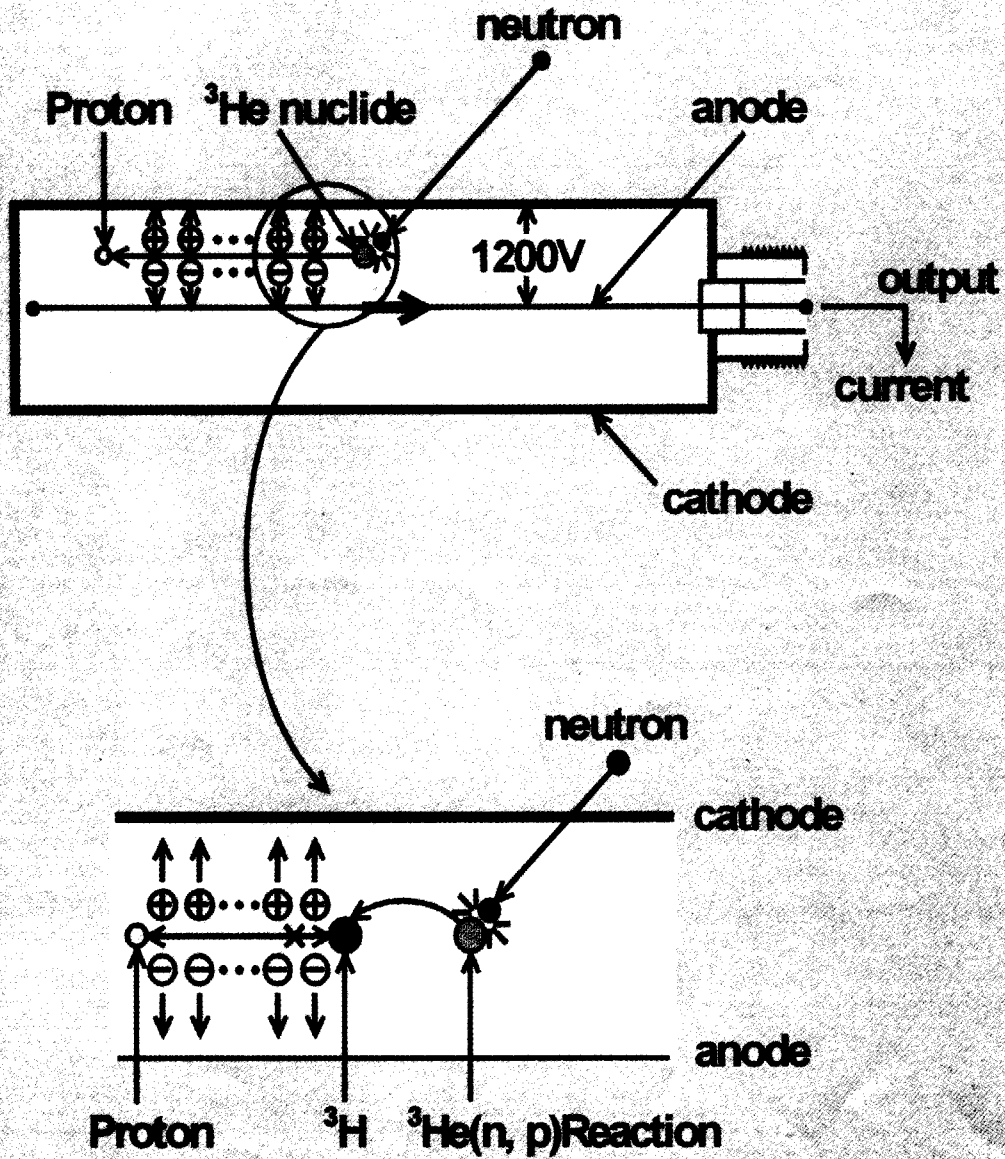
3. 冷却水中の遅発中性子減速材

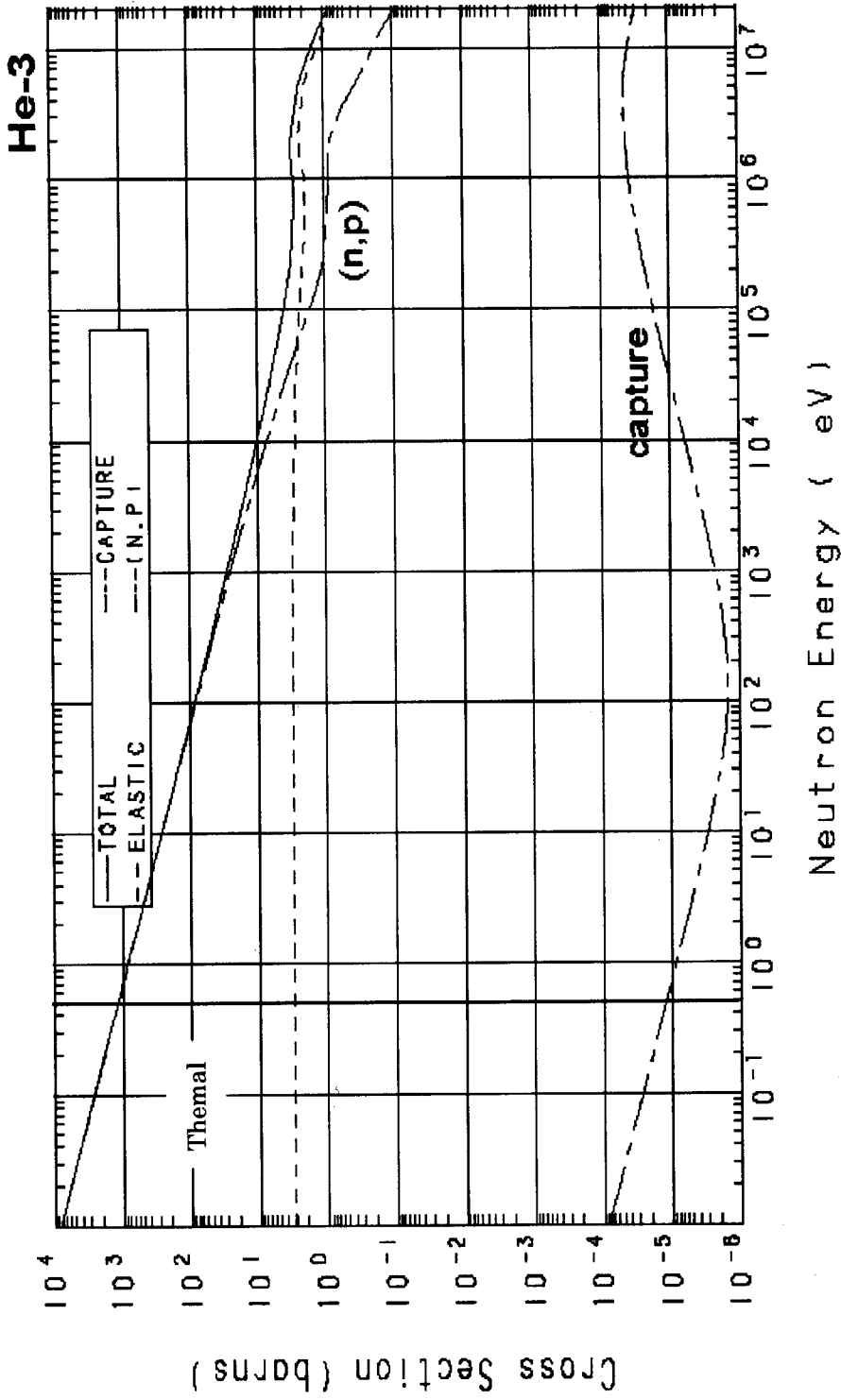
冷却水中の遅発中性子を効率良く検出するためには、速中性子を熱中性子領域まで減速させる方法を探る。その方法として、He-3 検出器を減速材で被うことが考えられる。使用物質としてパラフィン、グラファイト等、いくつかの物質が挙げられるが、今回はポリエチレンスリーブを使用している。ポリエチレンは、C 及び H の化合物で中性子減速材として良く使われ、その厚さを変えることで減速能を調整できる。

検出対象とする 1 次冷却配管中で発生する遅発中性子は、冷却水自身によりある程度減速されているので、厚い減速材を必要としないと考えられる。減速材が厚すぎると逆にポリエチレン中の H の吸収作用が多くなり感度は下がる結果となる。ちなみに、モンテカルロシミュレーション結果では、この場合 10~15mm が最適な厚さと(推測)されている。

Fig-1 Principle of counting neutron by He³ Detector.

Utilized ${}^3\text{He}(n, p)$ reaction. ${}^3\text{He} + n \rightarrow {}^3\text{H} + p$





(Typical th neutron ; 0.5eV, 5440barn)

Fig-2 He-3(n, p)Cross Section depends on Neutron Energy

APPENDIX II プリアンプの詳細仕様

本FFDSに使用した240型 窒息防止機能付 チャージアンプは、原研センシング技術研究室で設計製作したものであるため詳細仕様を付録として添付する。

I. 概 要

本器は、オーバーロード時にプリアンプにチャージされた電荷をある一定時間ディスチャージすることにより、プリアンプのオーバーロード状態から作動状態に速く回復する回路を設けた電荷型プリアンプである。

II. 仕 様

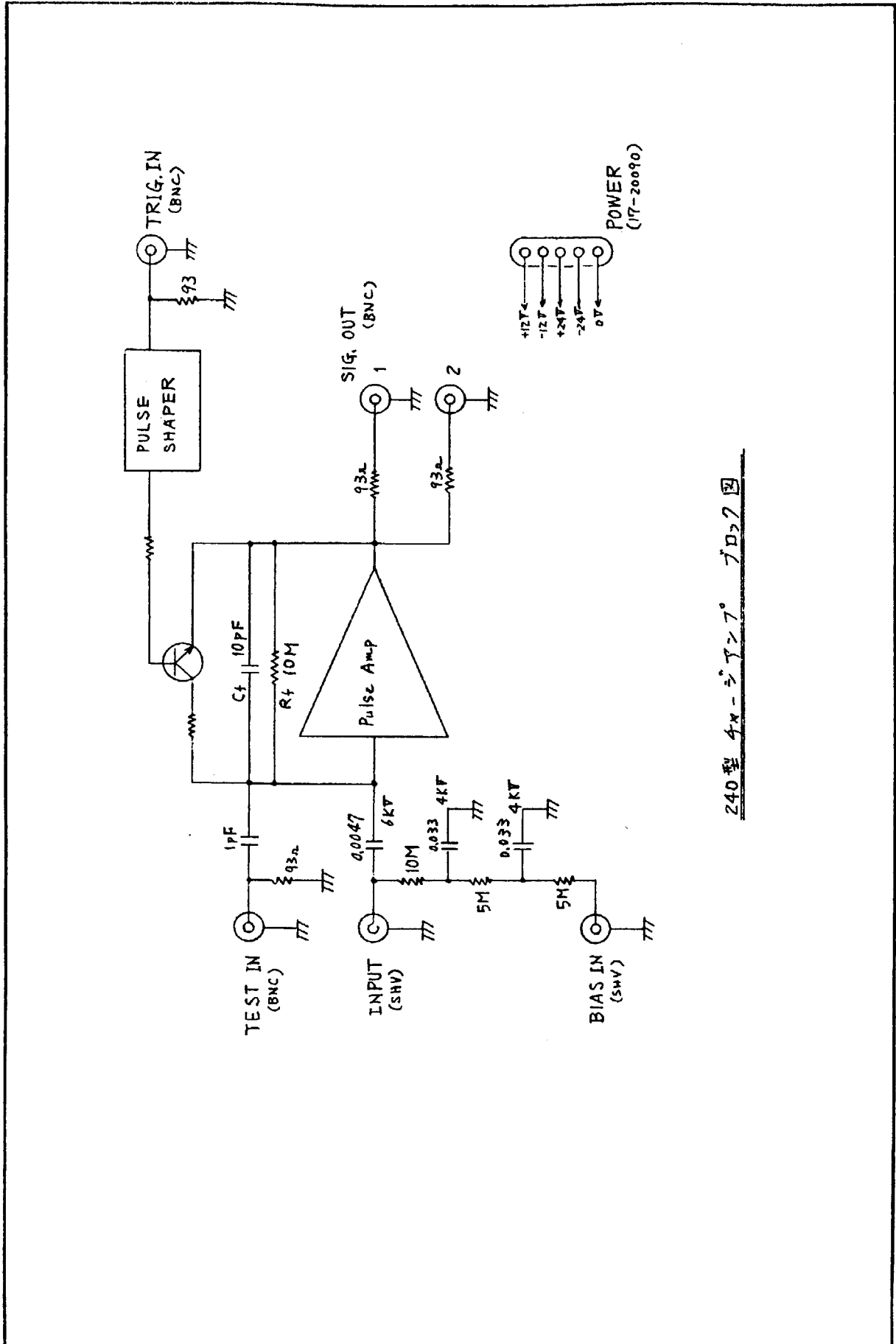
- | | |
|---------------------|---|
| 1. オーバーロード時特性 | |
| ディスチャージ時間 | 入力パルス幅に依存 |
| トリガ信号 | +2.5V~+5V |
| 2. HV 入力 | $\leq \pm 2000$ VDC |
| 3. 信号出力 | +3V (オープン時) |
| 4. 出力立下り時定数 | 1m Sec |
| 5. 出力インピーダンス | 93 Ω |
| 6. 積分非直線性 | $\leq \pm 0.04\%$ +3V 出力に対して |
| 7. ゲイン・ドリフト | $\leq \pm 0.005\%/^{\circ}\text{C}$ 5 ~ 45 $^{\circ}\text{C}$ |
| 8. 電荷感度 | 約 0.1V/pC |
| 9. ノイズ | <0.19 mV (C in = 1000pF) |
| 10. 出力立上り時間 | <30n sec (C in = 1000pF) |
| 11. 電源コネクタ | Amphenol 17-20090 |
| 12. Sig. INPUT コネクタ | SHV |
| HV INPUT " | " |
| Sig. OUTPUT " | BNC |
| TEST INPUT " | " |
| TRIG. INPUT " | " |
| 13. サイズ | 100(W) × 50(H) × 150(D) |

III. 操作説明

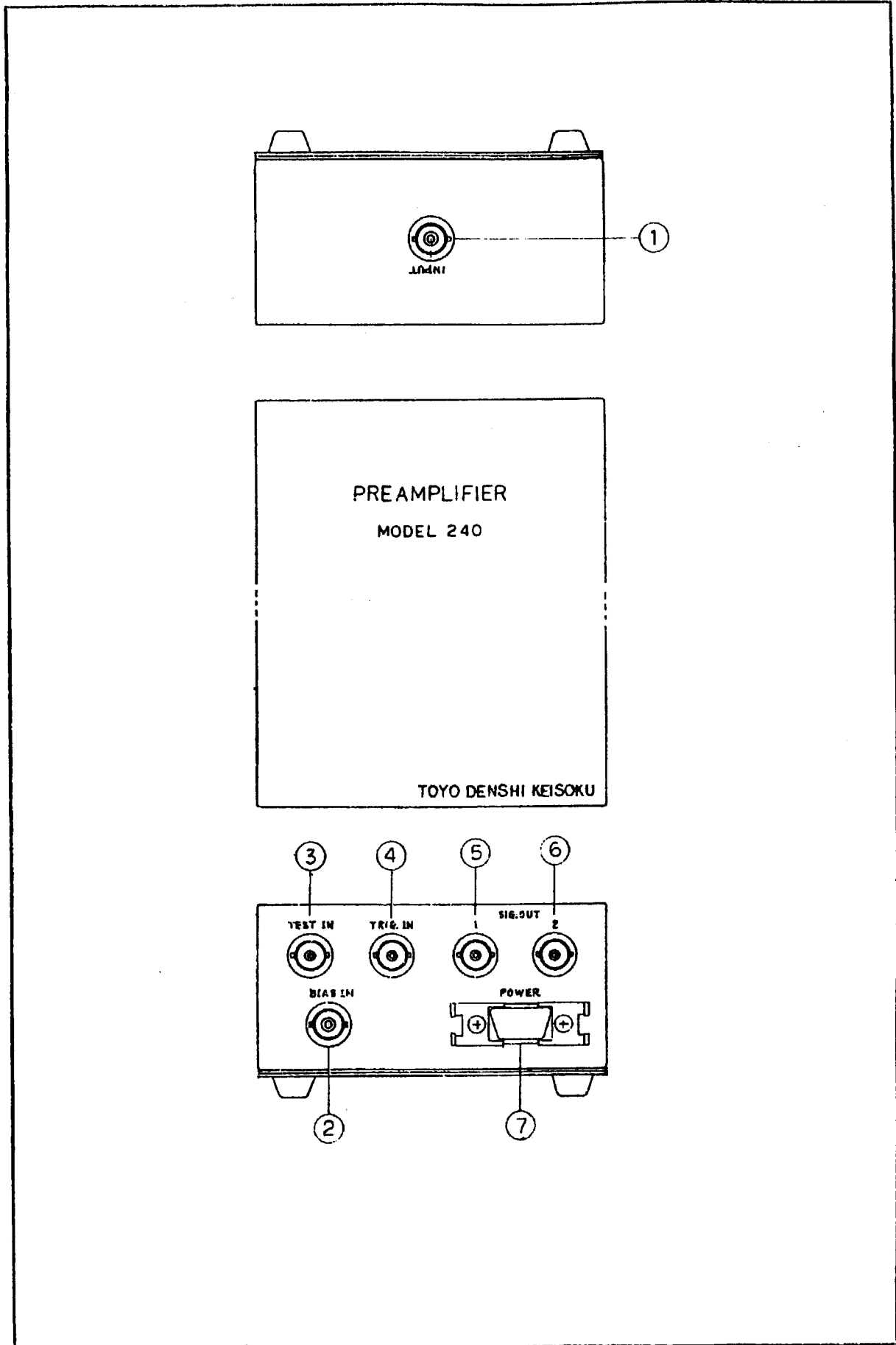
- ① INPUT 検出器接続コネクタ (SHV)
検出器を接続する。
- ② BIAS IN バイアス接続コネクタ (SHV)
最大印加電圧 200V
- ③ TEST IN テスト信号入力コネクタ (BNC)
信号振幅-1Vの時、1ピコクーロンに相当
- ④ TRIG. IN 窒息防止回路トリガー信号入力コネクタ (BNC)
アンプ機能を一時停止させる為の信号を入れる。
停止時間は、入力パルス幅で決定する。
振 幅 : +2.5V~+5V
パルス幅 : 1 μ Sec 以上
- ⑤ ⑥ SIG. OUT 信号出力用コネクタ (BNC)
1, 2 出力振幅 : 最大+3V (オープン時)
出力インピーダンス : 93 Ω
- ⑦ POWER 電源接続コネクタ (17-20090)
- | | | |
|--------|---|-------|
| ピン No. | 1 | 0V |
| | 2 | N. C |
| | 3 | N. C |
| | 4 | +1.2V |
| | 5 | N. C |
| | 6 | -2.4V |
| | 7 | +2.4V |
| | 8 | N. C |
| | 9 | -1.2V |

IV. 取扱注意事項

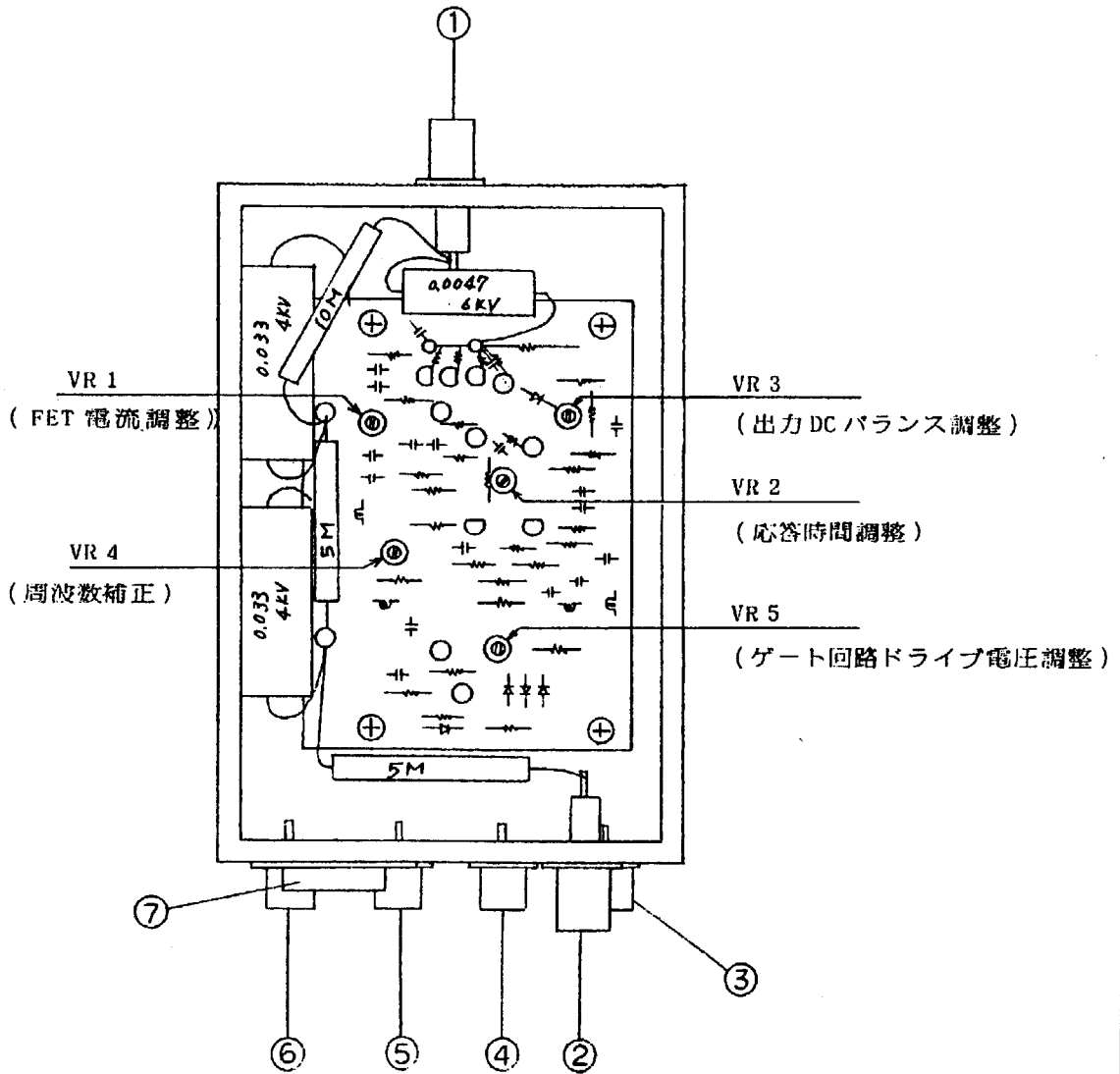
検出器、バイアス電源ケーブル等を着脱する時は、必ずバイアス電源及びアンプ電源を切ってから行う。



240型 4W-31777° プログラム図



部 品 配 置 図



This is a blank page.

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	
光束	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 bar = 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, ヘクト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。
- 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 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) = 4.184 J(熱化学) = 4.1855 J(15 °C) = 4.1868 J(国際蒸気表)
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻²	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 ⁶	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	仕事率 1 PS(仏馬力) = 75 kgf·m/s = 735.499 W
	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

BATAN多目的研究炉RSG GASの燃料破損検出システムの改修

R100

古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています。