

JAERI - M
85-193

高温用核分裂計数管型電離箱の開発研究

1985年11月

若山 直昭

JAERI-M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、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11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。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-
mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1985

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 いばらき印刷㈱

高温用核分裂計数管型電離箱の開発研究

日本原子力研究所 東海研究所 原子炉工学部

若山直昭

(1985年10月28日受理)

高性能で600℃の高温耐熱性をもつ核分裂計数管型電離箱を開発し目標の性能を得ることができた。

開発研究においては、早い計数ガスと構造金属材料との関連において、電離箱のパルス出力性能と高温耐熱性の両立化の検討を行ない、アルゴン94%、窒素5%、ヘリウム1%から成る計数ガスと、ニッケル約75%、クロム16%及び若干の鉄から成る電極及び構造金属部品を組合わせて使用することによって、従来、高性能の計数管型電離箱の動作が高温下で不安定になる問題点を克服した。また、750℃を越える高温に耐えるメタルセラミックシールや高温において狭い電極間隔を正しく維持することを可能にする電極保持構造など各種の耐熱部品や耐熱構造も開発した。

以上の成果をもとに数種の核分裂計数管型電離箱を試作し、試験により、これらの核分裂計数管型電離箱は600℃までのすべての温度で大変安定に作動するとともに、例えば2.6μAの大きな中性子パルス電流や、43nsの短い電荷収集時間など、高い作動性能を有していることを確認した。また原子炉内試験を通して、試作電離箱は原子力プラントの核計装のセンサーとして10桁にも及ぶ原子炉運転範囲を監視できる能力をもち、又600℃で少なくとも $6.5 \times 10^{18} \text{ n/cm}^2$ の中性子の照射に耐えることを実証した。更に又、試作電離箱は事故後監視(PAM)模擬試験において、800℃まで安定に作動するとともに、3年4カ月にわたる600℃での炉内長期実作動試験に耐えた。

Development of High-Temperature Fission Counter Chambers

Naoaki WAKAYAMA

Department of Reactor Engineering
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received October 28, 1985)

High-performance and 600°C heat-resisting fission counter-chambers have been developed in which a fast counting gas is used, and satisfactory results have been obtained.

The compatibility of the pulse output performance with the high-temperature resistivity of the chamber was investigated in connection with fast counting gases and structural metals, and the instability problem of the high-performance counter-chamber at high temperature was overcome using the combination of a mixed counting gas of 94% argon, 5% nitrogen and 1% helium and the electrodes and structural metal-components made of a nickel alloy containing about 75% nickel, 16% chromium and some iron.

The relevant works were performed successfully also in development of heat-resisting components and structures such as a metal-ceramic seal to be able to withstand the temperatures over 750°C and an electrode supporting structure to enable to keep a narrow spacing between electrodes at high temperatures.

Several types of such chambers have been made and tested to confirm their performance and operating stability at high temperatures. The test results showed that these fission counter-chambers operate quite stably at temperature up to 600°C and have high-performance characteristics such as a very large neutron pulse current, e.g. of 2.6 μA and a short collection time, e.g. of 43ns.

It was also proved through the tests that the chambers have the ability to monitor about 10 decades of reactor operating range as a sensor of the nuclear instrumentation system of the nuclear power plant and withstand at least 6.5×10^{18} n/cm² of neutron irradiation at 600°C.

Further, the chamber operated stably up to 800°C in a post-accident monitoring(PAM) condition and withstood a long-term real-time in-reactor operating test at 600°C for 3.3 years.

Keywords: High-Temperature, Fission Counter, Neutron Detection,
Nuclear Instrumentation, Output Pulse Current, Collection time

目 次

概 要	1
1. 緒 言	3
2. 高温用核分裂計数管型電離箱の開発及び設計に関する基本的諸量の検討, 考察	6
2.1 核分裂計数管型電離箱におけるパルス電流・電荷と信号伝送モードの選択	6
a) 核分裂計数管型電離箱内で生ずる誘導電流	6
b) 電圧パルス増幅器又は電荷増幅器による増幅パルス波形	9
c) 電流パルス伝送増幅方式による増幅パルス波形	11
2.2 電極間静電容量の影響	12
2.3 核分裂片による電離電荷の大きさ	15
2.4 核分裂計数管型電離箱のパルス電荷の波高分布	17
2.5 中性子感度	19
2.5.1 計数モードにおける中性子感度	19
2.5.2 電流モードにおける中性子感度	22
2.5.3 キャンベルモードにおける中性子感度	22
2.6 印加電圧	23
2.7 ガス中の電子の挙動に対する温度の影響	26
3. 各部構成要素に関する技術的検討と研究	27
3.1 各部構成要素の必要条件の抽出, 現状及び問題点の研究	27
3.1.1 金属材料に対する必要条件と問題点	27
a) 電極及び構成材料	27
b) バネ材料	29
3.1.2 絶縁材料に対する必要条件と現状	29
3.1.3 MIケーブルに対する必要条件, 問題点と対策	30
3.1.4 メタルセラミックシールに対する必要条件, 問題点と高温耐熱化の研究	31
3.1.5 電極保持構造及び電極間間隔	33
3.1.6 電極長の短縮方法	35
a) 必要な電極表面積と電極長	35
b) 電極長の直径増加による電極長の短縮	37
c) ウラン塗布厚の増加による電極長の短縮	38
d) 両電極塗布による電極長の短縮	38
3.1.7 濃縮ウランの選択について	42

3.1.8	電離箱ガスの問題点とその検討	43
3.1.9	電離箱容器の高温耐圧	44
4.	設計と製作	49
4.1	基本概念設計	49
4.1.1	MIケーブルとその設計電圧	49
4.1.2	使用電離箱ガス	50
4.1.3	使用金属材料	50
4.1.4	電極間間隔とガス圧の設計値	50
4.1.5	核分裂計数管型電離箱諸特性の設計計算	50
4.1.6	メタルセラミックシール部の高温高圧保護対策	51
4.1.7	二重電気遮蔽	52
4.1.8	電離箱容器と陰極の分離	53
4.1.9	概念設計検討のまとめ	53
4.2	試作	54
4.2.1	構成材料及び部品	54
(a)	金属部品及び処理	54
(b)	絶縁部品及びメタルセラミックシール部	56
4.2.2	電離箱ガスとその充填	56
4.2.3	濃縮ウランの塗布	56
4.2.4	MIケーブルの取付	56
4.2.5	工程途中検査	58
4.2.6	型名と試作仕様の対応	58
4.2.7	外観等	60
5.	試作高温用核分裂計数管型電離箱の炉外特性試験	61
5.1	出力パルス電流波高分布と最頻値	62
5.1.1	測定装置	62
5.1.2	分布及びその最頻値の測定結果	68
5.2	出力パルス電荷の波高分布と最頻値	76
5.2.1	測定装置	77
5.2.2	測定結果	77
5.3	電荷収集時間	79
5.4	印加電圧プラトー特性	80
5.5	中性子感度	84
5.5.1	標準中性子検出器の校正	84
5.5.2	感度測定場の中性子束分布と補正係数	86
5.5.3	中性子感度測定	87
5.5.4	直流モード及びキャンベルモードに対する中性子感度	91
5.6	ガンマ線感度	92

5.7	高 γ 線下における中性子測定試験	94
5.7.1	試験装置及び測定系	95
5.7.2	測定方法	95
5.7.3	測定結果	96
5.7.4	高 γ 線下作動特性の評価方法	103
6.	炉内特性試験	105
6.1	原子炉出力測定試験	105
6.1.1	直線性測定試験準備	105
6.1.2	パルス計測系及びキャンベル計測系	107
6.1.3	試験方法	108
6.1.4	波高弁別レベルの設定とパルスプラトー特性	108
6.1.5	試験結果	109
6.2	第1次 照射加速寿命試験 (JMTR)	112
6.2.1	試験方法	113
6.2.2	照射試験	113
6.2.3	試験結果の検討	116
6.3	第2次 照射加速寿命試験 (JRR-3)	117
6.3.1	試験方法	117
6.3.2	350℃における照射試験	117
6.3.3	550℃における照射試験	119
6.3.4	600℃における照射試験	119
6.4	800℃作動試験	119
6.4.1	目的	119
6.4.2	試験方法及び結果	122
6.5	長期原子炉内実作動試験	124
6.5.1	試験装置	125
6.5.2	試験方法及び結果	127
7.	結 言	132
	謝 辞	136
	参考文献	137
	付 録	141

LIST OF TABLES

- 表 2.1 電離箱出力時定数 ($\tau_o = C_d \cdot r_o$) による出力パルス電流の振幅の減少
- 表 2.2 アルゴンを 1 とした場合の各種ガスの比電離能 dE/dx の比
- 表 2.3 $i/i_o = 1.1$ となる E/p ($v/cm \cdot mmHg$) 及び印加電圧 V_H
- 表 3.1 濃縮ウラン中の同位元素の組成
- 表 3.2 各種温度における電離箱の内圧
- 表 4.1 高温用核分裂計数管型電離箱の基本的特性の設計値
- 表 5.1 各種試作核分裂計数管型電離箱の出力パルス電流波高の最頻値
- 表 5.2 各種試作核分裂計数管型電離箱の出力パルス電荷の最頻値
- 表 5.3 各種試作核分裂計数管型電離箱の電荷収集時間
- 表 5.4 中性子感度測定手順及びデータ
- 表 5.5 試作核分裂計数管型電離箱の各種の中性子感度
- 表 5.6 試作核分裂計数管型電離箱の γ 線感度
- 表 5.7 各種の γ 線バックグラウンドレベルにおける中性子測定の Figure of merit
—パルス整形時定数の関数として—
- 表 7.1 開発した高温用核分裂計数管型電離箱の各種モデルの諸特性の設計値と測定結果一覧
- 表 7.2 開発した高温用核分裂計数管型電離箱の各種モデルの主要特性値

LIST OF FIGURES

- 図 2.1 核分裂計数管型電離箱電極間内の核分裂片によるイオントラック
- 図 2.2 電界をかけた電極間に生じたイオントラック中の電子及びイオンの移動によって生ずる誘導電流
- 図 2.3 核分裂計数管型電離箱の誘導電流 $i(t)$ の代表的波形
- 図 2.4 電圧パルス増幅と電荷パルス増幅
- (a) 電圧パルス増幅
- (b) 電荷パルス増幅
- 図 2.5 電圧増幅又は電荷増幅モードの出力波形
- 図 2.6 電流パルス伝送増幅方式によるパルス増幅
- 図 2.7 電極間静電容量 C_d とケーブルの特性抵抗 r_c との時定数 τ_c が核分裂計数管型電離箱の出力パルス電流 $i(t)$ に及ぼす影響
- 図 2.8 重粒子による電離と飛程
- 図 2.9 核分裂片の飛行距離に対するエネルギー
- 図 2.10 核分裂計数管型電離箱電極間核分裂片によるイオントラック (計算モデル)
- 図 2.11 出力パルス電荷の波高分布の計算推定
- 図 2.12 各種核分裂計数管の単位ウラン塗布面積当たりの中性子感度
- 図 2.13 濃縮酸化ウラン (U_3O_8) の塗布厚の中性子感度に及ぼす影響
- 図 2.14 キャンベルモードにおける核分裂計数管型電離箱の出力信号の周波数帯域とスペクトル密度
- 図 2.15 電離箱の印加電圧プラトー
- 図 3.1 メタルセラミック封着構造
- (A) 円筒型封着構造
- (B) 新考案の耐熱封着構造
- 図 3.2 試作メタルセラミック封着構造の高温熱サイクル試験結果 (a)
32% Ni-17% Co-Fe 使用の場合
- 図 3.3 試作メタルセラミック封着構造の高温熱サイクル試験結果 (b)
29% Ni-17% Co-Fe (コバルト) 使用の場合
- 図 3.4 試作メタルセラミック封着構造の高温熱サイクル試験の方法
- 図 3.5 電極中心保持構造の概念図
- 図 3.6 電極の歪による電極間間隔の誤差
- (a) 軸方向の曲り
- (b) 真円度の変化
- 図 3.7 濃縮ウラン塗布面の極性がパルス出力特性に及ぼす影響
- 図 3.8 ウラン塗布電極の極性のパルス電荷波高分布特性に対する影響
- 図 3.9 電離箱外殻耐圧容器の高温耐圧試験
- 図 3.10 高温耐圧試験で生じた応力腐蝕割れ

- 図 3.11 高温耐圧試験によるラブチャ時間の推定 (外挿)
- 図 4.1 基本概念設計で検討すべき構成要素の関係図
- 図 4.2 試作核分裂計数管型電離箱の原理的構造
- 図 4.3 差動モード (Push-Pull) 型信号伝送, 増幅
- 図 4.4 試作核分裂計数管型電離箱の構造概念図
- 図 4.5 試作核分裂計数管型電離箱の詳細断面図
- 図 4.6 ガス精製充填装置
- 図 4.7 型名と設計値との対応
- 図 4.8 試作核分裂計数管型電離箱の写真
- 図 4.9 トライアキシャルコネクタ部の写真
- 図 5.1 パルス電流波高分布測定システムの構成
- 図 5.2 高速電流パルス増幅器の回路図
- 図 5.3 高速パルス型整形増幅器
- 図 5.4 高速ストレッチャ
- 図 5.5 電流パルス較正回路の構成
- 図 5.6 中性子検出器高温試験用加熱器内蔵中性子減速体系
- 図 5.7 中性子検出器高温試験用加熱器用温度制御装置
- 図 5.8 試作核分裂計数管型電離箱 FX-2D ($d=1\text{ mm}$, $P=4\text{ atm}$) の $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ におけるパルス電流波高分布
- 図 5.9 FX-2D の各種印加電圧に対するパルス波高分布
- 図 5.10 FX-2D の $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及び $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ におけるパルス波高電流の積分波高分布 (Integral bias curve)
- 図 5.11 FX-2D の各種印加電圧に対するパルス電流の積分波高分布 (Integral bias curve)
- 図 5.12 狭い電極間々隔の試作核分裂計数管型電離箱 FX-2A ($d=0.5\text{ mm}$, $P=7\text{ atm}$) の $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及び $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ におけるパルス電流波高分布
- 図 5.13 FX-2A の各種印加電圧に対するパルス電流波高分布
- 図 5.14 FX-2A の $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ における出力パルス電流の積分波高分布 (Integral bias curve)
- 図 5.15 FX-2A の各種印加電圧 (50 V , 70 V , 100 V , 150 V , 200 V) に対する積分波高分布
- 図 5.16 FX-3 の出力パルス電流波高分布, 測定温度 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及び $550\text{ }^{\circ}\text{C}$
- 図 5.17 FX-3 の出力パルス電流の積分波高分布 (Integral bias curve), 測定温度 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及び $550\text{ }^{\circ}\text{C}$
- 図 5.18 パルス電荷の測定に使用した測定系のブロック図
- 図 5.19 FX-3 の常温及び $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ における出力パルス電荷の波高分布
- 図 5.20 印加電圧プラトー測定系の構成 (i)
(パルス電流増幅モード)
- 図 5.21 印加電圧プラトー測定系の構成 (ii)
(パルス電荷増幅モード)

- 図 5.22 FX-3 のパルス電流増幅モードにおける印加電圧に対するプラトー特性
- 図 5.23 FX-3 のパルス電荷増幅モードにおける印加電圧プラトー特性
- 図 5.24 図 5.22 に示した FX-3 と同種の試作計数管電離箱で波高弁別レベルが 20% 高い場合の電流増幅モードの印加電圧プラトー特性
- 図 5.25 図 5.24 と同じ FX-3 で波高弁別レベルの設定値を図 5.23 の場合より約 3.2% 小さくして測定した電荷パルスモードにおける印加電圧プラトー特性
- 図 5.26 感度校正に使用した BF3 計数管のパルス波高分布と波高弁別器設定点
- 図 5.27 校正用 BF3 計数管用計数回路系の構成
- 図 5.28 試作核分裂計数管型電離箱の中性子感度測定における中性子検出器, 中性子源, 減速反射体の配置
- 図 5.29 中性子感度測定場の中性子束密度分布の測定結果
- 図 5.30 γ 線感度試験に用いたコバルト 60 照射ケーブル中の線源, 検出器及び計測機器の概要
- 図 5.31 線源と供試核分裂計数管型電離箱の配置
- (a) 線源のみの場合の γ 線量率の校正点
- (b) 供試核分裂計数管型電離箱の位置
- 図 5.32 高 γ 線バックグラウンドの下での中性子計測(1)
FX-2A のインテグラルバイアス曲線に与える γ 線バックグラウンドの影響
($\bar{\phi}_\gamma = 1.7 \times 10^6 \text{ R/h}$)
- 図 5.33 高 γ 線バックグラウンドの下での中性子計測(2)
FX-2D のインテグラルバイアス曲線に与える γ 線バックグラウンドの影響
($\bar{\phi}_\gamma = 1.7 \times 10^6 \text{ R/h}$)
- 図 5.34 高 γ 線バックグラウンドの下での中性子計測(3)
FX-3 のインテグラルバイアス曲線に与える γ 線バックグラウンドの影響
($\bar{\phi}_\gamma = 1.3 \times 10^6 \text{ R/h}$)
- 図 5.35 Co-60 照射ケーブル内における γ 線源, 供試核分裂計数管型電離箱, 中性子源等の配置
- 図 5.36 波形整形時定数 10 ns, 20 ns, 50 ns に対する FX-3 の α パルスの積分波高分布
 $\phi_n = 0, \phi_r = 0, T = 350^\circ\text{C}$
- 図 5.37 波形整形時定数 10 ns, 20 ns, 50 ns に対する FX-3 の中性子パルスの積分波高分布
 $\phi_n = 0, T = 350^\circ\text{C}$
- 図 5.38 γ 線バックグラウンド $\phi_r = 2.3 \times 10^4 \text{ R/h}$ における FX-3 の出力パルス電流の積分波高分布
- 図 5.39 γ 線バックグラウンド $\phi_r = 1.4 \times 10^5 \text{ R/h}$ における FX-3 の出力パルス電流の積分波高分布
- 図 5.40 γ 線バックグラウンド $\phi_r = 5.9 \times 10^5 \text{ R/h}$ における FX-3 の出力パルス電流の積分波高分布
- 図 5.41 パルス整形時定数 10 ns の場合の FX-3 の積分波高分布に与える γ 線バックグラウンドの影響
- 図 5.42 パルス整形時定数 20 ns の場合の FX-3 の積分波高分布に与える γ 線バックグラウンドの影響
- 図 5.43 パルス整形時定数 50 ns の場合の FX-3 の積分波高分布に与える γ 線バックグラウンドの影響

- 図 6.1 JRR-4, No.1 プール内に設置した炉内試験用キャプセル
- 図 6.2 原子炉出力に対する直線性測定試験に使用したパルス系の構成
- 図 6.3 原子炉出力に対する直線性測定試験に使用したキャンベル系の構成
- 図 6.4 直線性測定試験時の波形整形時定数 (5 ns) 及び波高弁別レベル設定値に対する印加電圧プラトー特性 (破線は比較参考のため時定数 20 ns の場合の値を示したものである)
- 図 6.5 原子炉出力に対する直線性 (1)
(測定温度 350 °C)
- 図 6.6 原子炉出力に対する直線性 (2)
(測定温度 30 °C)
- 図 6.7 パルス系とキャンベル系を同時に接続する場合の入力回路
- 図 6.8 JMTR 照射キャプセルの概要
- 図 6.9 高中性子束照射中の高圧印加とこれによるガス電離イオン電流のモニタ
- 図 6.10 高中性子束照射中の各種印加電圧に対する電離イオン電流
- 図 6.11 試作核分裂計数管型電離箱 FX-2 の JMTR 炉心内 600 °C 照射試験におけるパルス電流積分波高分布の安定性
- 図 6.12 350 °C 照射試験の照射前及び照射後における FX-3 の出力パルス電流波高分布
(測定温度: 常温)
- 図 6.13 350 °C 照射試験の照射前及び照射後における FX-3 の出力パルス電流の積分波高分布
(測定温度: 常温)
- 図 6.14 350 °C 照射試験の照射前及び照射後における FX-3 の出力パルス電流波高分布
(測定温度: 350 °C)
- 図 6.15 350 °C 照射試験の照射前及び照射後における FX-3 の出力パルス電流の積分波高分布
(測定温度: 350 °C)
- 図 6.16 550 °C 照射試験の照射前及び照射後における FX-3 の出力パルス電流波高分布
(測定温度: 常温)
- 図 6.17 550 °C 照射試験の照射前及び照射後における FX-3 の出力パルス電流の積分波高分布
(測定温度: 常温)
- 図 6.18 550 °C 照射試験の照射前及び照射後における FX-3 の出力パルス電流波高分布
(測定温度: 550 °C)
- 図 6.19 550 °C 照射試験の照射前及び照射後における FX-3 の出力パルス電流の積分波高分布
(測定温度: 550 °C)
- 図 6.20 600 °C 照射試験の照射前, 中間試験時及び照射後における FX-3 の出力パルス電流波高分布 (測定温度: 常温)
- 図 6.21 600 °C 照射試験の照射前, 中間試験時及び照射後における FX-3 の出力パルス電流の積分波高分布 (測定温度: 常温)
- 図 6.22 600 °C 照射試験の照射前, 中間試験時及び照射後における FX-3 の出力パルス電流波高分布 (測定温度: 照射前 600 °C, 照射後 600 °C, 650 °C, 700 °C)
- 図 6.23 600 °C 照射試験の照射前, 中間試験時及び照射後における FX-3 の出力パルス電流の積分波高分布 (測定温度: 照射前 600 °C, 照射後 600 °C, 650 °C, 700 °C)
- 図 6.24 JRR-3 照射試験により $1.4 \times 10^{18} \text{ n/cm}^2$ の照射後に行った事故時対応 800 °C 試験における FX-3 の, (a)出力パルス波高分布, 及び(b)積分波高分布

- 図 6.25 黒鉛パイル中で行った事故時対応高温長時間試験の温度履歴
- 図 6.26 黒鉛パイル中で行った 800 °C 試験における FX-3 の (a) 出力パルス波高分布, 及び, (b) 積分波高分布
- 図 6.27 長期原子炉内実作動試験における実験装置の概要
- 図 6.28 長期原子炉内実作動試験に使用した温度制御装置, 連続監視装置等の構成
- 図 6.29 長期炉内試験に使用した出力パルス電流波高分析装置
- 図 6.30 長期炉内実作動試験における 600 °C 加熱試験期間, 原子炉運転期間, 及び詳細特性試験実施日
- 図 6.31 一週間各日における原子炉運転時間のパターン
- 図 6.32 長期炉内実作動試験の初期試験 (1979 年 1 月 12 日) 及び第 4 回詳細特性試験 (1981 年 2 月 5 日) に測定した FX-2A の出力パルス電流の積分波高分布の比較
- 図 6.33 初期試験 (1978 年 12 月 21 日) と第 4 回詳細特性試験 (1981 年 2 月 5 日) で測定した FX-3 の出力パルス電流の積分波高分布の比較
- 図 6.34 第 5 回詳細特性試験で測定した FX-2A の出力パルス電流の積分波高分布 (×印) と初期測定値 (1979 年 1 月 12 日, □印) との比較 (プラトーはわずかに残っているが, 出力パルスの電流波高の減少がみられる)
- 図 6.35 第 8 回詳細特性試験 (1982 年 4 月 8 日) において測定した FX-3 の出力パルス電流の積分波高分布 (×印) と初期特性試験 (1978 年 12 月 21 日, □印) の比較
- 図 7.1 各国の代表的な原子炉計装用核分裂計数管型電離箱の最高作動温度と出力パルス波高値 (最頻値)

概 要

欧米諸国においては、大型高速増殖炉、大型高温ガス炉、あるいは溶融塩トリウム増殖炉等の開発計画にもとずき核計装用高温中性子検出器、特に起動領域から出力領域までの計測範囲をカバーできる500～600℃の耐熱性と50～100 nsの短い電荷収集時間を持つ核分裂計数管電離箱の開発が永年にわたり精力的に続けられている。

しかし、電子ドリフト速度の速い高性能電離ガスは、炭酸ガス又は窒素などの多原子分子を含むので、電極にステンレス鋼を用いても高温、高放射線のもとで安定に使用方法のメドが出たず、核分裂計数管電離箱の「耐熱性・高温作動の安定性」と「高性能作動特性」とは450℃以上では両立し得ないことが定説となりつつあり、450℃以上では電離ガスに純粋なアルゴンガスを用いるなど作動性能を大幅に犠牲にする形で開発が進められてきた。また高温耐熱性のメタルセラミック封着部の開発、高温における狭い電極間隔の保持方法等も大きな研究課題であった。

これに対し筆者は高速炉、多目的高温ガス炉等の我国の新型炉開発研究の一環として本研究に着手し、上記欧米の実験結果や定説にとらわれずに将来計画に必要な「600℃以上の耐熱性と高性能作動特性が両立する核分裂計数管型電離箱」の実現方法を追求し、(i)高ニッケル含有率のニッケル・クロム・鉄合金の電極材料と窒素5%-アルゴン94%-ヘリウム1%混合の電離ガスの使用によって、いわゆる速い計数ガスが、高温、高放射線下で安定に使用できる道を開き、更に(ii)外テーバ柔構造による高温耐熱メタル・セラミック封着方法、(iii)柔構造の封着部を保護する二重圧力容器構造、(iv)高温バネの不要な高温熱膨張差吸収電極保持構造、などの構造上の工夫によって、600℃で安定に作動すると同時に電荷収集時間43 nsないし100 ns、出力パルス電流波高最頻値が1.6 μ Aないし2.6 μ A等の高度の作動特性を有する高温高性能の核分裂計数管型電離箱の開発に初めて成功した。

試作した高温核分裂計数管型電離箱の各種の基本性能の試験を行うと同時に、原子炉計装用検出器としての諸性能を試験し、約10桁の炉出力範囲を1本の検出器で測定できることを確認すると共に、100万R/h以上の高い γ 線バックグラウンドのもとで数n/cm²s程度の中性子が測定可能であることを確認した。さらに同核分裂計数管電離箱を材料試験炉(JMTR)に挿入し、600℃の高温下で 6.5×10^{18} n/cm²の中性子及び 7.2×10^{10} Rの γ 線の重畳照射加速寿命試験を実施し、高温の原子炉内で使用しても電離箱ガスに変化が無いことを確認するとともに、核計装用中性子検出器として10年以上の照射量に耐えることを確認した。また研究用原子炉(JRR-3)に於いても350℃、550℃及び600℃の各種温度で合計約 1.4×10^{18} n/cm²の照射試験を行い、種々の温度で使用する場合でも問題がないことを確認しその照射耐性を実証した。更にまた、各々照射前及び照射試験後の2本の試作高温核分裂計数管型電離箱について800℃までの高温作動試験を行い、800℃においても常温～600℃の作動特性と有意の差異なく安定に作動し、この様な高温下でも1～10 n/cm²s程度の低レベル中性子束を確実に測定できることを確認した。更にひきつづき研究炉(JRR-4)において2本の試作核分裂計数管型電離箱について約3年4カ月にわたって、600℃における原子炉内長期実時間作動試験を行い、その耐熱長期安定性を確認した。

本研究によって、欧米諸国において永年にわたり研究が続けられていながら、良い結果が得られていなかった、極めて高い高温耐熱性と優れた作動特性が両立する核計装用高温核分裂計数管型電離箱の開発上の諸問題が克服され実用の見通しが得られた。また本開発研究の成果は世界の1990年代の各種の新型動力炉計画における核計装検出器に対する高度な要求にも充分対応できるものと考えられる。

1. 緒 言

近年世界各国における AGR, FBR, HTR など炉内温度の高い動力炉開発において、高温耐熱高性能の核分裂計数管型電離箱の開発が要請されている。これらは AGR, HTR においては PCRV の採用、大型 FBR においてはタンク型原子炉構造の採用により、核計装用中性子検出器の原子炉容器内設置が必要になり、原子炉内の高温条件や高い γ 線バックグラウンドの環境のもとで炉内中性子を計測し、安全に原子炉を起動、運転する必要が生じてきたためである。

英国の AGR の開発では 350°C ないし 550°C の高温下で作動する核計装用核分裂計数管を必要とし Winfrith 研究所の Goodings らは 550°C に耐える P7A 型核分裂計数管を開発した(1)。米国における FBR 開発計画では 1000°F (538°C)~1200°F (649°C) に耐え 800 F (427°C)~1000°F (538°C) の高温下で作動可能で、 $10^6 \sim 10^7$ R/h の γ 線バックグラウンドのもとで、原子炉シャットダウン時 10 counts/s の測定と full-power 時のモニタリングが出来る核分裂計数管の開発を目標として AEC (現 DOE) の資金 funded-program として、HEDL, ANL, ORNL, GE-BRD が分担して開発が進められた。GE-BRD の起動系用核分裂計数管の設計目標仕様では

- a) 高温におけるパルスブレイクダウンノイズ (PBN) を抑制するため 200 V ないし 400 V の低い印加電圧で作動すること。
- b) γ 線弁別を高めるため電荷集収時間は 50 ns 以下にすること。
- c) 巻上可能でまた PBN の影響を減らすため高圧と信号用の 2 本の M1 ケーブルを設け
- d) またケーブルの電気容量の影響を最小にするため電流モードの高速パルス増幅作動が可能であることを目標としている(2)。

またオークリッジ国立研究所 (ORNL) を中心とした熔融塩増殖炉 (MSBR) 開発計画においては 1000°F (538°C) 以上で作動する中性子検出器の開発をその開発過程の一つとして示している(3), (4)。

またフランスでは FBR の開発の一環として高温用核分裂計数管型電離箱の開発をすすめ CFDU-12 などの高温核分裂計数管型電離箱を製作した(5)。

これら欧米各国における研究で、構造面では高温耐熱のメタルセラミック封着技術、高温において可能な限り狭い電極間隔を維持する技術、高温における電極や圧力容器等の熱膨張差及び熱応力を吸収可能な電極等の保持構造、等の開発研究が精力的に続けられているが、これら研究の成果としての技術情報はほとんど公開されていない現状である。

更にまた各国ともに核分裂計数管型電離箱の耐熱化と同時にパルス出力特性の改善に大きな力をそそいでいる理由は、S/N 比を損うことなく出力パルスを極めて小さい時定数のパルス整形回路で整形し、パルス幅を狭くすることによってガンマ線によるパルスのパイルアップ確率を低下させ、高い γ 線バックグラウンドのもとで核計装の中性子源領域モニタ (SRM) を確実に作動させるためである。これはプラント異常による原子炉のトリップ直後の高 γ 線バックグラウンドのもとでも SRM がガンマ線パルスのパイルアップのためブラインドになることなく確実に未臨界状態を監視し、また必要に応じてすみやかに再起動するなど安全上、並びにプラント運転機能上極

めて重要である。

更に核分裂計数管型電離箱のパルス出力特性、例えば出力パルス電流波高値が $1/n$ となるとこの中性子検出器を用いた核計装線源領域モニタの γ 線バックグラウンドの許容値は $1/n^2$ に低下してしまう(Appendix 1.1)。このため原子炉容器内に核計装中性子検出器を設置する大型動力炉では検出器の耐熱性と共にその出力特性は極めて重要で、特に炉停止後一次系ナトリウムの γ 線レベルの高い大型 FBR では深刻な問題である。

この様に欧米原子力先進各国において将来の動力炉開発に重要な一つのコンポーネントとして高温核分裂計数管型電離箱の開発を国の事業として推進して来ているが、その研究開発の推進方法は二種類に分かれている。

その一つは、英国に代表されるもので、早急に AGR で使用すべき必要性から、永年の研究の結果、パルス出力特性の低下はある程度止むを得ないとして電離ガスに純不活性ガスを用い、とにかく第1ステップとして、Wilfa 等改良型コルダール型動力炉用として 450°C 仕様の、第2ステップとして AGR 用として 550°C 仕様の核分裂計数管の開発に成功した(1)。しかし電極間隔を1mmと従来の数分の1とし封入ガス圧を7気圧とするなど構造上の大幅な改良がなされているが、電離箱ガスとして純不活性ガスを用いている関係上電荷集収時間は250~300 ns、出力パルス電流波高値は約 $0.7\ \mu\text{A}$ (最頻性)と常温用核分裂計数管型電離箱の各々数分の1の特性となっている。このためひきつづき FBR 用としてそのパルス出力特性の改良研究に努力している(1)(6)。フランスも英国と同様な研究のすすめ方をしており(5)性能面でも改良努力を続けている(7)。これに対し米国では当初から高温耐熱性とパルス出力特性の両立を目標にかかげ開発をすすめていることが特徴的である。

何れの国に於ても高性能なパルス出力特性が得られているのは 350°C ないし 450°C 迄である(6)(8)(9)(5)。

450°C を越える温度仕様の高温用核分裂計数管型電離箱で、常温用核分裂計数管型電離箱程度のパルス出力特性を得るように設計できない理由は、電離箱ガスと電極等の金属の両立性が高温で維持できないためである。

一般に通称、速い計数ガス(fast counting gas)又は、速い電荷集収のガス(fast electron collection gas)といわれる電離箱ガスは、アルゴン等の不活性ガスに適当量の多原子分子のガス、例えばメタン(CH_4)、炭酸ガス(CO_2)、窒素(N_2)などを混入しそのガス中の電子のドリフト速度が純不活性ガス中の速度に比べて数倍から数十倍に高めたものであるが、これらの混入した多原子分子は、一般に高温中で特に放射線による電離状態では電極等の金属と反応を起し易く不安定で、高温では使用できないことがほぼ定説となっていた。例えば D. J. Mobbs は英国で開発された高温核分裂計数管 P 7 A にアルゴン+窒素等の速い電荷集収ガスを充填すれば、50 ns 程度のパルス幅の狭い出力パルスが得られ高速の計数と高い許容バックグラウンドの性能が得られるが、窒素が電極等のステンレス金属に吸収されるので最大作動温度が 450°C になる(P 7 A は純アルゴンの場合 550°C)と報告しており(6)、また同時に、アルゴン+メタン、アルゴン+炭酸ガスは放射線による劣化があることや、後者は完全に温度依存性の特性を示すことを報告している。

以上に述べた如く高温用核分裂計数管型電離箱の開発研究分野ではその高温耐熱化の研究と同時

に、欧米でも未解決の問題として、450°C～600°Cの高温下で長期に使用でき、かつ短い電荷収集時間を持ち、出力パルス電流の大きい核分裂計数管型電離箱を実現する方法を得ることが、本研究において克服すべき最大の目標課題であった。

本研究においては、前述のような高温用核分裂計数管型電離箱開発研究に対する原子炉開発計画からの要求に対応するため、高温用核分裂計数管型電離箱の開発着手に当り「開発目標」の概要を以下の如く設定した。

1) 高温耐熱性と同時に常温用核分裂計数管型電離箱と同等又は同等以上の性能を有する核分裂計数管型電離箱を開発する。

2) 第1目標として、耐熱温度650°C、長期炉内作動温度600°Cとするが、可能な限り設計温度は800°Cとする。

3) FBR, HTR等の原子炉容器内に直接設置できるものとし、核計装用中性子検出器として中性子源領域から出力領域まで約10桁 $3 \text{ n/cm}^2 \text{ s} \sim 3 \times 10^{10} \text{ n/cm}^2 \text{ s}$ の範囲を測定し監視できるものとする。

4) 中性子検出用核分裂物質は濃縮ウランとする。

5) 開発する核分裂計数管型電離箱の中性子感度は核計装検出器として通常要求される感度値と、性能阻害要因(たとえば、濃縮ウランからの α 線バックグラウンド、電極容量等)の両面から勘案し、 $0.1 \text{ cps/n/cm}^2 \text{ s}$ 前後及び $0.3 \text{ cps/n/cm}^2 \text{ s}$ 前後のもの2種類とする。

6) 出力パルス特性は電荷収集時間50 ns～100 ns、出力パルス電流波高値は $1.5 \mu\text{A}$ 以上とする。またこれらは電極間静電容器、検出器からのケーブル約10mによるパルス幅の拡大及びパルス振幅の減衰も含めた値として達成することを目標とする。

7) MIケーブルの高温におけるパルスブレイクダウンノイズ(PBN)の発生を防ぐため高圧印加電圧200V以下で上記6)の性能を得ること。

8) 供用期間は2年(2年たてば定期点検時に交換)と設定するが信頼性余裕を得るため設計値は3年以上を目標とする。

9) 許容熱中性子照射量は原子炉の定格出力範囲迄をモニタする場合、最大中性子束密度($3 \times 10^{10} \text{ n/cm}^2 \text{ s}$)と設計供用期間(3年)を勘案し、 $3 \times 10^{18} \text{ n/cm}^2$ とする。

本報告書は、以上の目標を達成するための、基本的定量的検討(2章)、構成要素レベルにおける問題点の検討と研究開発(3章)、これらをもとに立てた高温高性能核分裂計数管型電離箱の研究開発のstrategyと試作(4章)、試作核分裂計数管型電離箱の炉外、炉内試験による開発研究成果の検証(5章、6章)等の成果をとりまとめ公開するものである。

2. 高温用核分裂計数管型電離箱の開発及び設計に関する基本的諸量の検討、考察

本章では、前章で述べた開発目標の核分裂計数管型電離箱の開発設計検討のために行った基本的諸量に関する検討考察の結果を述べる。

本検討の目的は目標とする性能の高温用核分裂計数管型電離箱を開発するため

- (1) どの様な信号伝送モードで設計を進めるべきか？を検討しこれを決定すると共に、
- (2) また要求される性能の実現の可能性を探り、如何なる検出器構造とすべきか、設計の見通しを得るため、電極間間隔、使用電離ガスの種類や圧力、印加高圧電圧等の設計上の選択パラメータと、これによって得られる出力パルス波高、電荷収集時間等の核分裂計数管型電離箱の諸性能の関係を、理論的あるいは先駆者の実験データを用いて、定量的に求める方法を確認し、開発研究過程における実験のパラメータを最小限にとどめることを目標としている。

2.1 核分裂計数管型電離箱におけるパルス電流、電荷と信号伝送モードの選択

a) 核分裂計数管型電離箱内で生ずる誘導電流

核分裂計数管型電離箱は、よく知られている様に、電極表面に濃縮ウラン等の核分裂物質を塗布し、入射した中性子によって生じた核分裂片によって、電離箱ガスが電離されて発生したパルス状電荷を、電極間に印加した電界によって電極に収集し計数することを特徴とする中性子検出器である。

通常の原子炉計装用核分裂計数管では陰極側に核分裂性物質を塗布すると共に、電極間間隔は核分裂片の飛程より小さく設計されるのが普通である（図 2.1）。このため核分裂によるイオントラックのほとんどは、図 2.1 又は図 2.2 に示すように電極間に橋をかけた様な形となるが、これによって電極間が短絡されるわけではなく、図 2.2 に示す如く、イオントラックの発生と同時にそのイオン及び電子は夫々陰極及び陽極に向かって夫々のドリフト速度 W_i 及び W_e でガス中を移動し、この移動により電極に誘導電流 $i(t)$ が流れる。

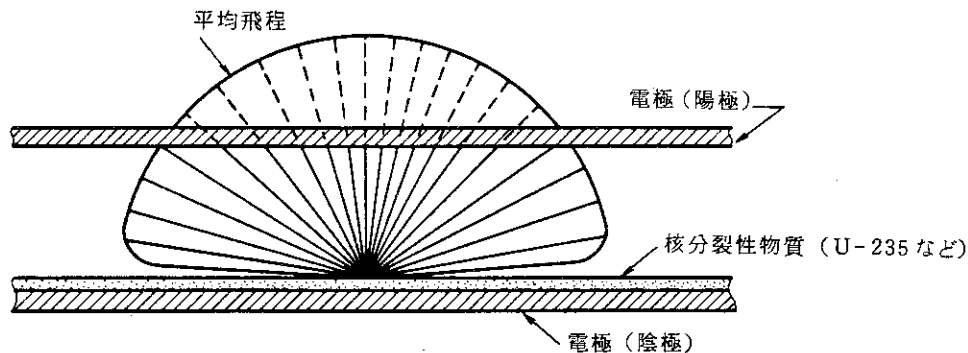


図 2.1 核分裂計数管型電離箱電極間内の核分裂片によるイオントラック

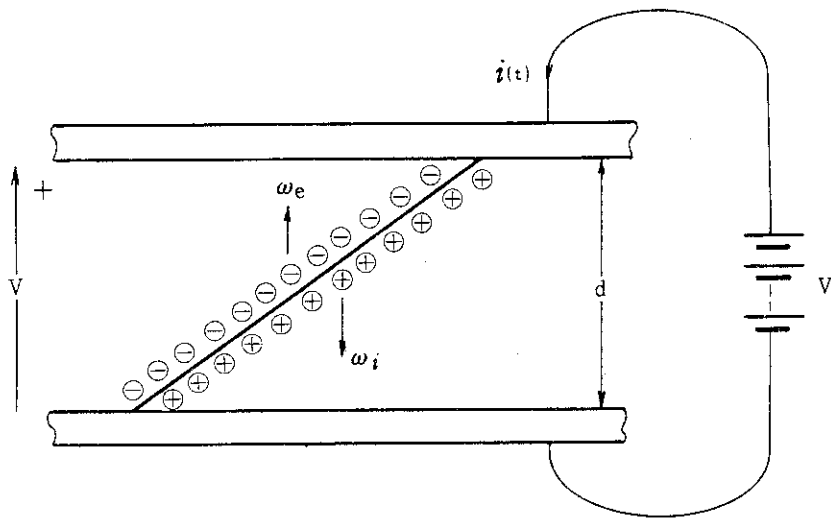


図 2.2 電界をかけた電極間に生じたイオントラック中の電子及びイオンの移動によって生ずる誘導電流

いま図 2.2 に示すような平行電極の核分裂計数管モデルに於て誘導電流 $i(t)$ の大きさはイオンによる誘導電流と電子による誘導電流の和であり、

$$\begin{aligned}
 i(t) &= i_i(t) + i_e(t) \\
 &= \frac{1}{d} \{ q_i(t)w_i + q_e(t)w_e \} \tag{2.1}
 \end{aligned}$$

で与えられる。

ここに $q_i(t), q_e(t)$ は夫々時間 t における電極間にあるイオン及び電子電荷の総量、 d は電極間間隔である。

ここで、発生時のイオントラック中のイオンおよび電子の密度は、位置によらず一定と仮定すると、電極間のイオン及び電子は時間と共に一定の割合で陰極及び陽極に衝突し中和されていくので、

$$\left. \begin{aligned}
 q_i(t) &= q_i(0) \left(1 - \frac{w_i t}{d} \right), & (t \leq \frac{d}{w_i}) \\
 &= 0 & (t > \frac{d}{w_i})
 \end{aligned} \right\} \tag{2.2}$$

$$\left. \begin{aligned}
 q_e(t) &= q_e(0) \left(1 - \frac{w_e t}{d} \right), & (t \leq \frac{d}{w_e}) \\
 &= 0 & (t > \frac{d}{w_e})
 \end{aligned} \right\} \tag{2.3}$$

となるから、ここで

$$|q_i(0)| = |q_e(0)| = q(0) \text{ と置くと、 } i(t) \text{ は}$$

$$\begin{aligned}
 i(t) &= \frac{q(o)}{d} w_i \left(1 - \frac{w_i}{d} t\right) - \frac{q(o)}{d} \left(1 + \frac{w_e}{d} t\right) \\
 &= i_{oi} \left(1 - \frac{w_i}{d} t\right) + i_{oe} \left(1 + \frac{w_e}{d} t\right) \\
 &= i_{oi} \left(1 - \frac{t}{T_i}\right) - i_{oe} \left(1 - \frac{t}{T_e}\right)
 \end{aligned}
 \tag{2.4}$$

となる。

ここに

$$i_{oi} \equiv \frac{q(o)}{d} w_i, \quad i_{oe} \equiv -\frac{q(o)}{d} w_e
 \tag{2.5}$$

$$T_i \equiv \frac{d}{w_i}, \quad T_e \equiv \frac{d}{w_e}
 \tag{2.6}$$

であり、また (2.2), (2.3) 式から、(2.4) 式の右辺第1項は

$t \geq d/w_i$ で0となり、第2項は

$t \geq -d/w_e$ で0となる。

従って (2.5) 式は夫々イオン及び電子の誘導電流の尖頭値、(2.6) 式はイオン及び電子の電荷収集時間を与える。 $i(t)$ を図示すると図 2.3 の如くなる。即ち理論的には極めて立上りの速いパルス電流が流れる (立ち上がり時間はイオントラックの生成時間できまり、FP の場合、約 30 ps - 200 ps である)。

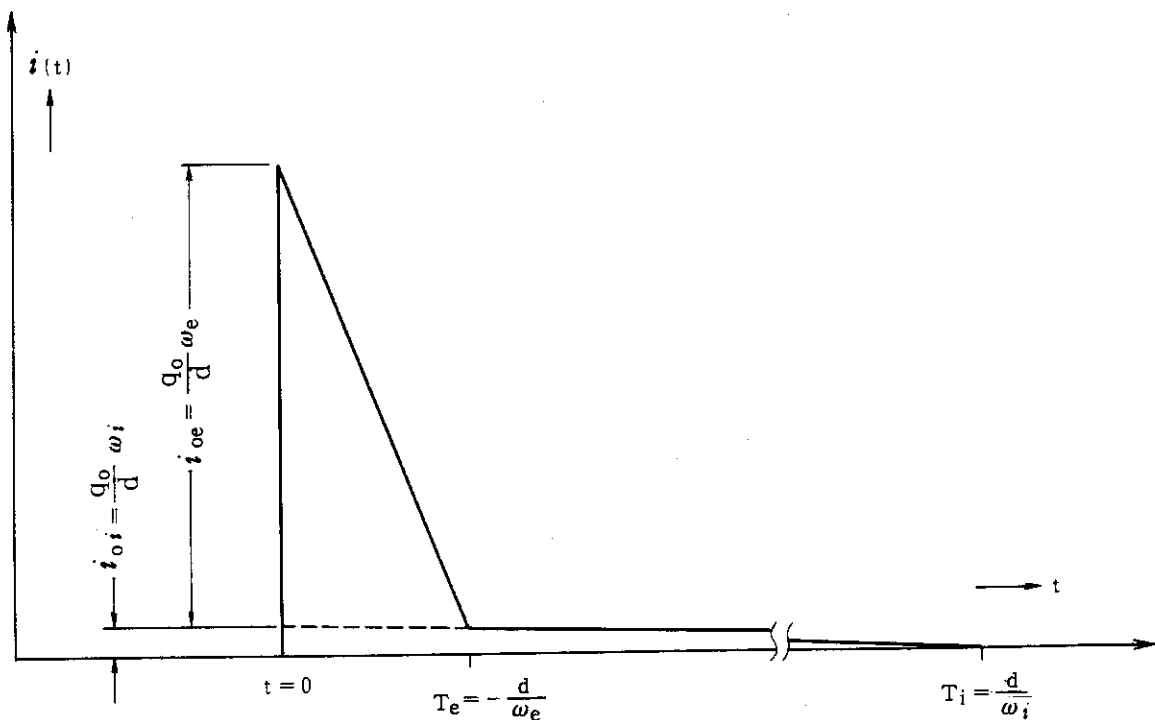


図 2.3 核分裂計数管型電離箱の誘導電流 $i(t)$ の代表的波形

通常の電離箱ガスでは電子のドリフト速度はイオンのその約 1000 倍程度であるから

$$i_{oe} \gg i_{oc}$$

となり、イオン電荷収集時間に近い即ち $100 \mu\text{s} \sim 1 \text{ms}$ 程度の時定数で積分をしない限りイオン電荷による誘導電流は無視できることがわかる。

従って (2.4) ~ (2.7) 式から

$$\left. \begin{aligned} i(t) &\simeq q_0 \frac{1}{T_e} \left(1 - \frac{t}{T_e}\right) & (t \leq T_e) \\ &\simeq 0 & (t > T_e) \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

電子によるパルス当りの電荷総量 q_e は

$$\begin{aligned} q_e &= \int_0^{T_e} i(t) dt \\ &= \int_0^{T_e} \frac{q_0}{T_e} \left(1 - \frac{t}{T_e}\right) dt = \frac{q_0}{2} \end{aligned} \quad (2.9)$$

b) 電圧パルス増幅器又は電荷増幅器による増幅パルス波形

電圧パルス増幅及び電荷パルス増幅では図 2.4 (a), (b) に示すように核分裂計数管内で発生した誘導電流 $i(t)$ は検出器及び信号ケーブルの電気容量 C に流れ込み積分され C の両端に電位が発生し電圧出力が得られる。

即ち電気容量 C の両端に発生する電圧 $e(t)$ は (2.4) ~ (2.7) 式から

$$\begin{aligned} e(t) &= \frac{q_0}{C} \int \left\{ \frac{1}{T_i} \left(1 - \frac{t}{T_i}\right) (t \leq T_i) \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{T_e} \left(1 - \frac{t}{T_e}\right) (t \leq T_e) \right\} dt \\ &= \frac{q_0}{C} \left\{ \frac{1}{T_i} \left(t - \frac{t^2}{2T_i}\right) (t \leq T_i) + \frac{1}{T_e} \left(t - \frac{t^2}{2T_e}\right) (t \leq T_e) \right\} \end{aligned} \quad (2.10)$$

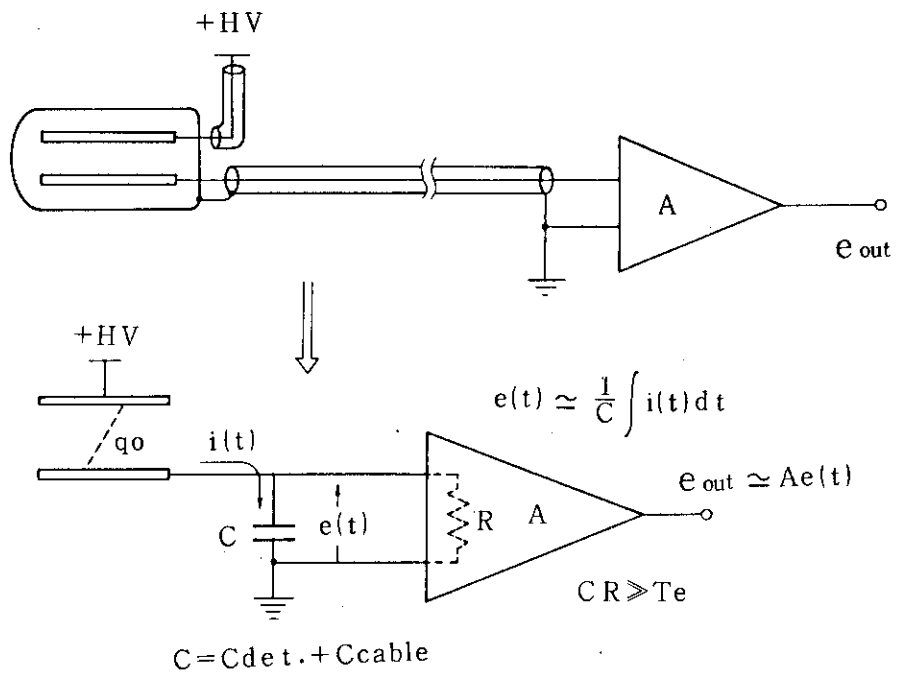
いま $T_e \ll CR \ll T_i$ とすると第 1 項は無視できるので

$$e(t) \simeq \frac{q_0}{C} \frac{1}{T_e} \left(t - \frac{t^2}{2T_e}\right) \quad (t \leq T_e) \quad (2.11)$$

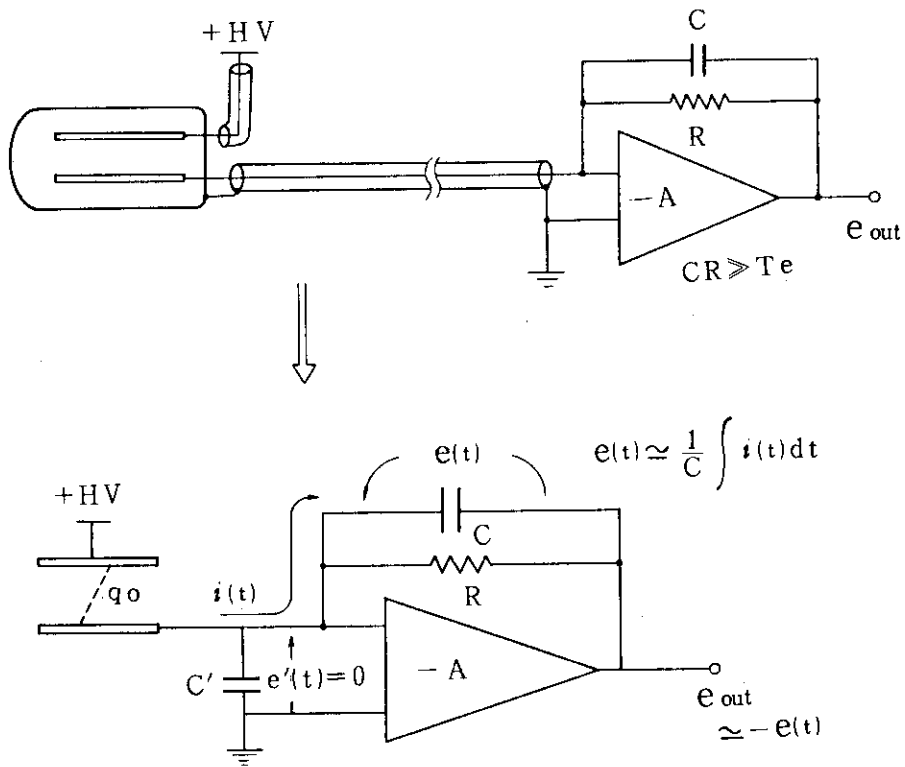
となりその立ち上がり部分は t の 2 次式で与えられ、図示すると図 2.5 の如くなる。

また $t = T_e$ とすると

$$\begin{aligned} e(T_e) &= \frac{q_0}{C} \frac{1}{T_e} \left(T_e - \frac{T_e^2}{2T_e}\right) \\ &= \frac{q_0}{2C} \end{aligned} \quad (2.12)$$



(a) 電圧パルス増幅



(b) 電荷パルス増幅

図 2.4 電圧パルス増幅と電荷パルス増幅

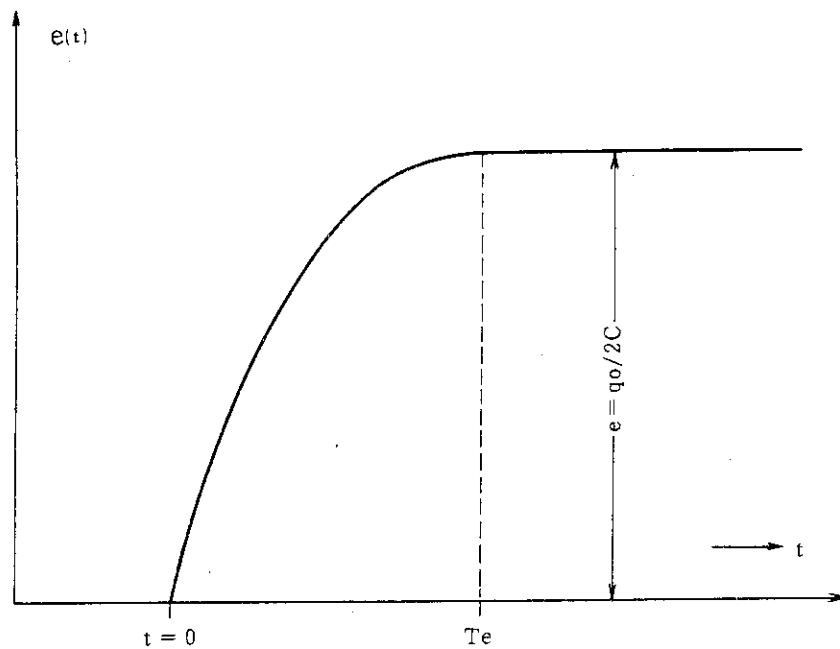


図 2.5 電圧増幅又は電荷増幅モードの出力波形

即ち立ち上りを大略電子の電荷収集時間 T_e とする振幅 $q_0/2C$ の電圧の信号となる。実際のパルス増幅では、ここで適当な時定数の微分を行ってパルス整形を行うわけであるが、パルスの立ち上がり時間の $1/2$ 以下のパルス幅に整形することは S/N 比の点で望ましくない。

c) 電流パルス伝送増幅方式による増幅パルス波形

核分裂計数管の出力を信号に対して完全に短絡すれば短絡電流は図 2.3 に示す誘導電流に等しくなるので、その出力電流として、極めて立ち上がりが速く ($t_r < 200$ ps) また狭いパルス幅 (FWHM = $T_e/2$) の信号を得ることができるが、この場合短絡のため信号を増幅器まで伝送することができない。しかしほぼ短絡に近い状態で、かつ高速パルス信号を伝送線路と整合させた状態で電流増幅器に送り込むことができる方式が電流パルス伝送方式である(10)(11)(12)(13)。

図 2.6 は電流パルス伝送増幅方式によるパルス増幅の概要を示したもので信号ケーブルの特性抵抗 r_0 と検出器電極容量 C_d の積 τ_0 は電圧増幅方式とは逆に T_e に比べて出来るだけ小さく選ぶことにより出力短絡とほぼ同じ出力パルスが得られる。伝送ケーブルは終端整合状態で使用するので電圧増幅のようにケーブルの容量の心配をする必要はないが高周波損失の少ないケーブルを用いる必要がある。

このような電流パルス伝送増幅方式では検出器出力周りの時定数は図 2.6 b) の等価回路に示す様にケーブルの長さには関係なく電極間静電容量 C_d とケーブルの特性抵抗 r_0 の積で決まり、 $C_d = 100$ pF, $r_0 = 33 \Omega$ の場合、パルスの立ち上がり時定数は、 $\tau_0 = C_d \cdot r_0 = 3.3$ ns となるので、5 ns 程度の時定数のパルス整形を有効に実施でき、電圧増幅または電荷増幅の場合に比べて、バックグラウンド γ 線パルスのパイルアップを極めて大幅に低減することができる。以上の観点から開発する高温用核分裂計数管型電離箱は電流パルス伝送増幅モードで使用するものとし、核分裂計数管型電離箱の設計は、電子電荷による誘導パルス電流波高値と電荷収集時間を中心に行う。

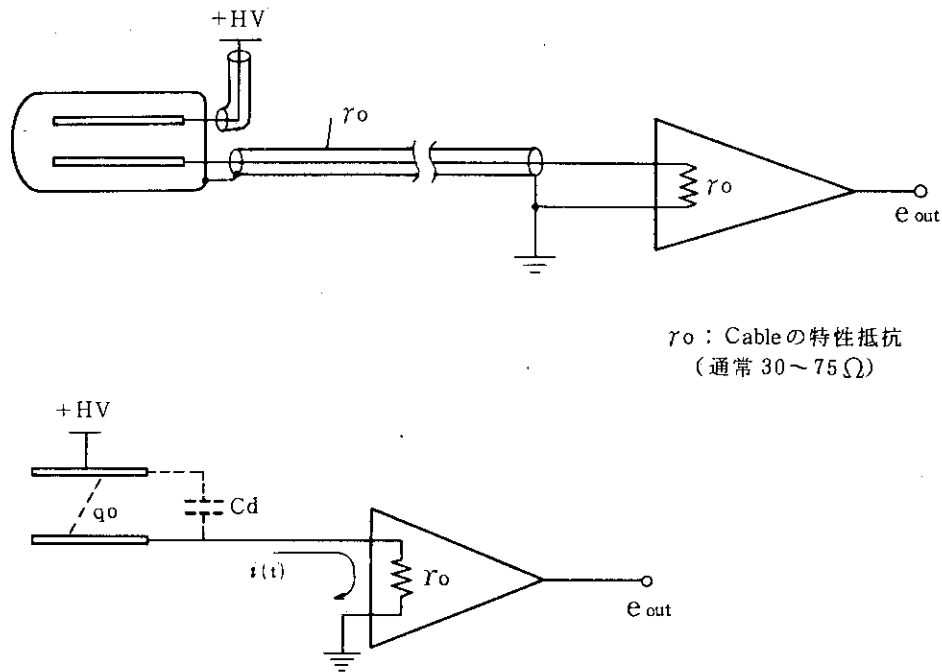


図 2.6 電流パルス伝送増幅方式によるパルス増幅

2.2 電極間静電容量の影響

核分裂計数管型電離箱の設計によっては電流パルス伝送方式における信号ケーブルの特性抵抗 r_0 と検出器の電極間静電容量の積 (時定数) τ_0 が電荷収集時間 T_c に比べて無視できないほど大きくなる場合がある。

これは核分裂計数管型電離箱の電荷収集時間を短かくしかつ出力パルス電流を大きくするための方法として、電離箱ガス圧を高くし、電極間間隔を極端に狭くした設計を行った場合に生ずる。

マグネシアを絶縁物として用いた同軸ケーブル (MI ケーブル) では、ケーブルの特性抵抗 r_0 が 33 Ω 前後になるよう設計すると、高周波の伝送損失が最も小さくなる性質があり、高温中性子検出器用 MI ケーブルでは r_0 を 30 ~ 35 Ω で設計するのが普通でこの特性抵抗値を極端に小さく設計することは困難である。

これに対して核分裂計数管型電離箱の電荷収集時間を短かく設計するために電極間隔 d を小さくすると電極間静電容量は d に逆比例して大きくなるので、場合によっては電極間静電容量 C_d とケーブルの特性抵抗 r_0 との時定数 τ_0 が核分裂計数管型電離箱の電荷収集時間 T_c に近い値になることもある。

この様な場合核分裂計数管の電荷収集時間を短かくし、パルス出力電流を大きく設計したとしても、図 2.7 に示すようにケーブルの方に伝送されるパルス信号は時定数 τ_0 で積分されてパルス幅が広がり、振幅が低下してしまうので、電荷収集時間を苦勞して短かくした意味が失なわれてしまう。

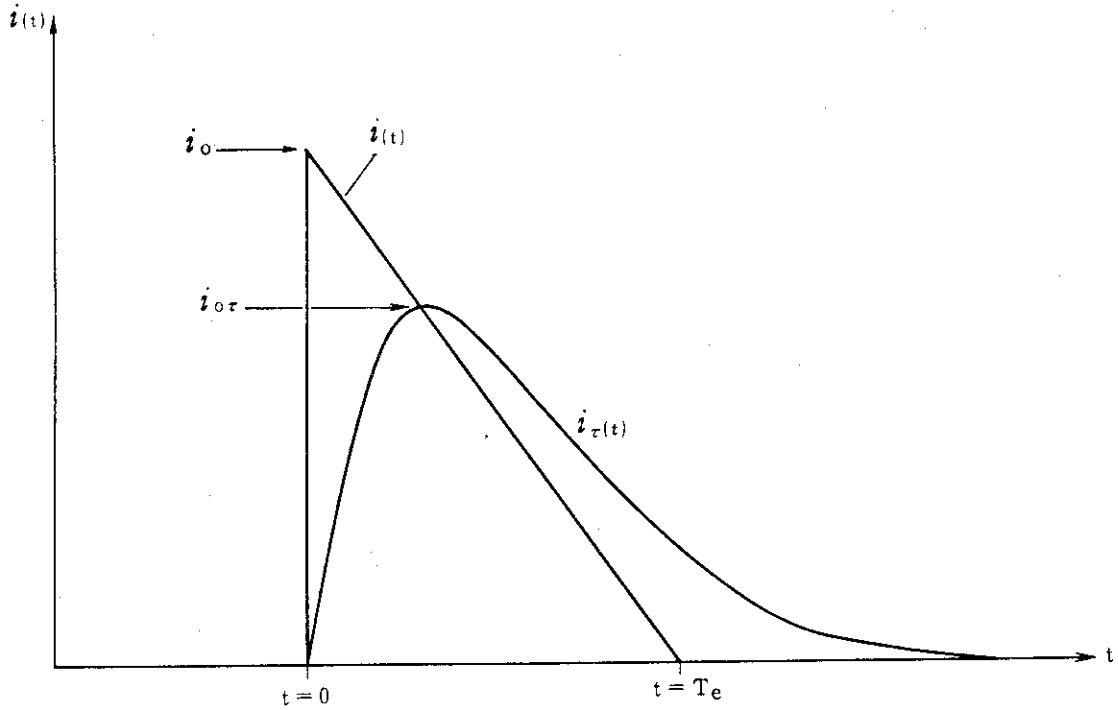


図 2.7 電極間静電容量 C_d とケーブルの特性抵抗 r_o との時定数 τ_o が核分裂計数管型電離箱の出力パルス電流 $i(t)$ に及ぼす影響

このような報われぬ無駄な設計を防止するため、検出器の誘導電流 i_o が時定数 $\tau_o = C_d \cdot r_o$ の影響によってどれだけ小さくなるか、常に計算によってチェックを行いつつ最適設計をすすめる必要がある。

いま (2.8) 式で示された電子電荷の移動による誘導電流 $i(t)$ を時定数 τ_o の積分回路を通すと出力パルス電流即ちケーブルに流れる電流 $i_\tau(t)$ は、

$$\left. \begin{aligned} i_\tau(t) &= \frac{q_o}{T_e} \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau_o}} \left(1 + \frac{\tau_o}{T_e} \right) - \frac{t - \tau_o}{T_e} \right] \quad (t < T_e) \\ i_\tau(t) &= \frac{q_o}{T_e} \left[-e^{-\frac{t}{\tau_o}} \left(1 + \frac{\tau_o}{T_e} \right) + \frac{\tau_o}{T_e} e^{-(t - T_e)/\tau_o} \right] \quad (t > T_e) \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

となる。ここで $\tau_o = C_d \cdot r_o$

また、 C_d 、及び r_o は、文献 (14) によれば、

$$\left. \begin{aligned} C_d &= \frac{L}{2 \ln(d_2/d_1)} \times \frac{10^{-11}}{9} \quad [\text{F}] \\ &\quad \text{(同軸円筒電極の場合)} \\ r_o &= \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad [\Omega] \\ &\quad \text{(同軸ケーブルの場合)} \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

で与えられる。

$i_\tau(t)$ を t で微分して 0 とおき $i_\tau(t)$ の極大値 $i_{o\tau}$ を求めると

$$t = \tau_o \ln \frac{\tau_o + T_e}{\tau_o} \quad (2.15)$$

で $i_r(t)$ は極大になり、

$$i_{or} = \frac{q_o}{T_e} \left(1 - \frac{\tau_o}{T_e} \ln \frac{\tau_o + T_e}{\tau_o} \right) \quad (2.16)$$

となる。

即ち電極間静電容量 C_d と信号ケーブル特性抵抗 r_o との時定数 $\tau_o = C_d \cdot r_o$ によって、ケーブルへの出力パルス電流波高値 i_{or} は電極間の電荷の移動によって生ずる誘導電流パルスの波高値 i_{oe} に比べて小さくなり、その比は、

$$\frac{i_{or}}{i_{oe}} = 1 - \frac{\tau_o}{T_e} \ln \frac{\tau_o + T_e}{\tau_o} \quad (2.17)$$

となる。表 2.1 に τ_o / T_e に対する i_{or} / i_{oe} の値を示す。

例えば τ_o が T_e の 3% では、 i_{or} は i_{oe} の 90%、5% では 85%、10% で 76% になり τ_o / T_e が 40% では振幅は 50% になってしまう。

しかし、この場合時定数 τ_o がいくら大きくなっても、信号ケーブルに流れ込む電流パルスの立上り時間は (2.1) 式に示された電荷増幅形の場合のパルス電圧の立上り時間を越えることはない。

表 2.1 電離箱出力時定数 ($\tau_o = C_d \cdot r_o$) による出力パルス電流の振幅の減少 (T_e は電荷収集時間)

τ_o / T_e	i_{or} / i_{oe}
0.02	0.921
0.03	0.894
0.05	0.848
0.1	0.760
0.2	0.642
0.3	0.560
0.4	0.499
0.5	0.451
0.6	0.412
0.7	0.379
1.0	0.307
1.5	0.234
2.0	0.190

2.3 核分裂片による電離電荷の大きさ

核分裂計数管型電離箱の開発研究のため、目標とする出力パルス電流波高を得るために必要な電極間隔、ガス圧等を決めるためのパラメータサーベイを行うとき、核分裂片による電離電荷の大きさは基本的な値として重要である。

いま図 2.8 のようにエネルギー E_1 の重粒子がガス中に入射し電離を起こしつつ、飛程 $R(E_1)$ を飛んだ時、エネルギー E の時の単位距離当りの Energy loss (Stopping Power) を

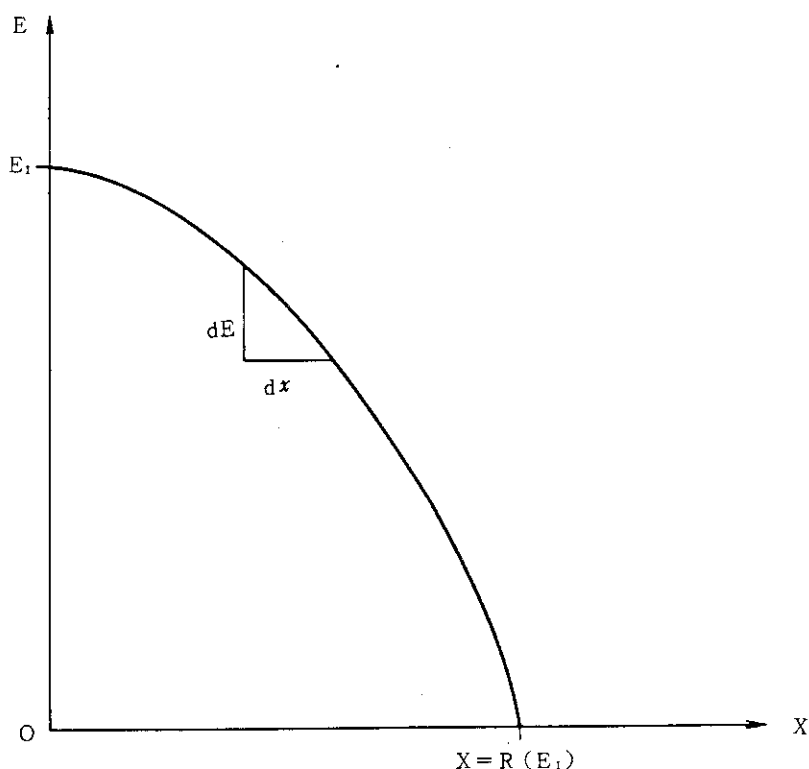


図 2.8 重粒子による電離と飛程

$$\alpha = -dE / dx \quad (2.18)$$

とすると飛程 $R(E_1)$ は、

$$R(E_1) = \int_0^{E_1} dx = - \int_0^{E_1} \frac{dE}{\alpha} \quad (2.19)$$

で与えられ J. M. Alexander らによれば、次の実験式が 10% 程度の精度であてはまるという (16)。

$$R(E_1) = KE_1^{2/3} \quad (2.20)$$

ここで K は空気に対して

$$K(\text{Air}) = 0.14 \text{ mg/cm}^2 \text{ MeV}^{2/3} = \frac{0.114}{P} \text{ cm/MeV}^{2/3} \quad (2.21)$$

の実験値が得られている。

(2.18), (2.20) 式を (2.19) 式に代入し E で微分して

$$\frac{dE}{dx} = -\frac{3}{2K} E^{1/3} \quad (2.22)$$

これをxで積分して

$$E = \left(E_1^{2/3} - \frac{x}{K} \right)^{3/2} \quad (2.23)$$

但し $E \geq 0$, $x \leq R(E_1)$

を得る。

空気以外のガスに対するKの値の実験値が既存データの中には見当たらないので、(2.20)式で与えられた飛程とKの値の関係から推定する必要がある。重イオン粒子としては α 粒子の飛程に関する測定値は古くからあり、空気以外のガスのKの値を求めるため Whaling のまとめた各種のガス中の α 粒子の飛程の関係を利用するものとする(17)。

また核分裂片のエネルギーと比電離能 dE/dx の関係については、粒子速度がほぼ同じ α 粒子の値と比較的よく一致していると云われており、この関係を利用して重いグループの核分裂片のガス中の電離のふるまいは約2 MeV、軽い方のそれは約4 MeVの α 粒子とほぼ同じと考える。

更にまた α 粒子の空気中と他のガス中の飛程の比は粒子エネルギー1 MeV ~ 10 MeVではほぼ一定であるから核分裂片と α 粒子のエネルギーの対応づけが、かなり違っていても結果的にはほとんど誤差が生じないと推定ができる。

アルゴン (Ar) を1とした場合の各種のガスの比電離能 dE/dx の比を α 線のエネルギー2 MeV ~ 4 MeV 相当として、その飛程から求めると表2.2の如くなる。

表2.2 アルゴンを1とした場合の各種ガスの比電離能 dE/dx の比

ガスの種類	He	N ₂	Ne	A	Kr	Xe	Air
比電離能の比	0.2	1.1	0.6	1	1.2	1.7	1.0

(2.23)式の中のK及びxの単位を mg/cm^2 から $Atm \cdot cm$ に換算すると、0℃ P気圧の空気及びアルゴンガス中の核分裂片のエネルギーは、位置xの関係として、

$$E(x) = \left\{ E_1^{2/3} - \frac{P(Atm) \cdot x(cm)}{0.114 (cm/MeV^{2/3})} \right\}^{3/2} \quad (2.24)$$

となる。図2.9は(2.24)式を用いて軽い核分裂片及び重い核分裂片の飛行距離に対するエネルギーをグラフで表したもので軽い核分裂片の飛程2.5 cm、重い核分裂片の飛程1.9 cm (共に1 atm, Air中) という Boggild らの報告(18)と良い一致を示しており、核分裂計数管の設計のために導いた(2.24)式はほぼ妥当であるといえることができる。

従って核分裂計数管の陰極から飛出したエネルギー E_0 の核分裂片が圧力P気圧(0℃)のガス中をd (cm) 飛行する間に電離生成するイオン対の電荷Qは

$$Q = 1.6 \times 10^{-19} \left\{ E_1 - \left(E_1^{2/3} - \frac{Pd}{0.114} \right)^{3/2} \right\} / w \quad (2.25)$$

で与えられる。

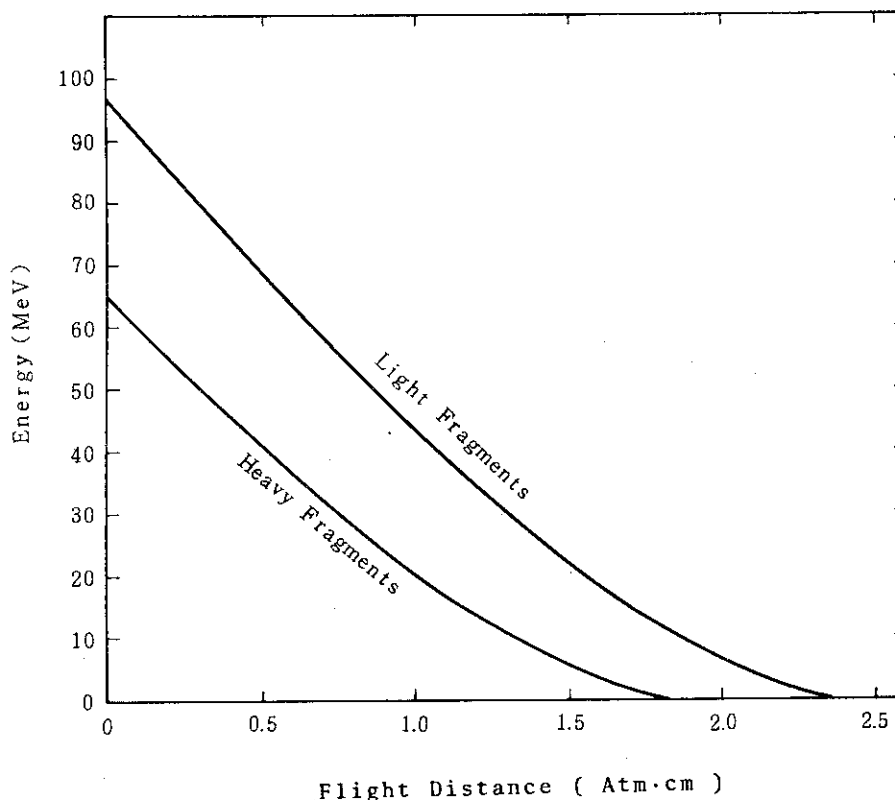


図 2.9 核分裂片の飛行距離に対するエネルギー

ここに w は 1 イオン対を作るのに費やされるエネルギーで、Po-210 の α 粒子に対してアルゴンガスの場合 26.4 eV, 空気の場合 35.5 eV で一般のガスに対して 30 eV 前後の値である(19)。

2.4 核分裂計数管型電離箱のパルス電荷の波高分布

いま図 2.10 に示す様に電極が平行板でその電極間隔を d とし、陰極表面のウラン膜上的一点 P から核分裂片が飛出したとする。いま核分裂片の比電離能 dE/dx が一定と仮定し核分裂片の飛出す確率はどの方向に対しても同じとするとパルス電荷 Q の確率分布 $h(Q)$ は

$$\left. \begin{aligned} h(Q) &= 0 && (Q < Q_0) \\ h(Q) &= Q_0/Q^2 && (Q_0 \leq Q < Q_R) \\ h(Q) &= \delta\left(\frac{Q_0}{Q_R}\right) && (Q = Q_0) \end{aligned} \right\} \quad (2.26)$$

となる(図 2.11)。ここに Q_0 は電極に直角に飛出した長さ d のイオントラックの全電荷で Q_R は核分裂片の全飛程の電荷である。

図 2.10 と図 2.11 を見比べてわかる様に、パルス電荷の最頻値は電極に直角に飛出した核分裂片が電極間隔 d の間にイオン化する電荷 Q_0 であり、それ以上の大きさの電荷 Q の確率は Q^2 に反比例して小さくなる。従って核分裂計数管の設計の際には全方向にわたって電荷の分布確率を求める必要はなく代表値として電極間隔 d に対応する最頻値 Q_0 を(2.25)式から求めればよいことがわかる。通常核計装などに用いる核分裂計数管では核分裂物質の塗布膜厚が充分薄いわけ

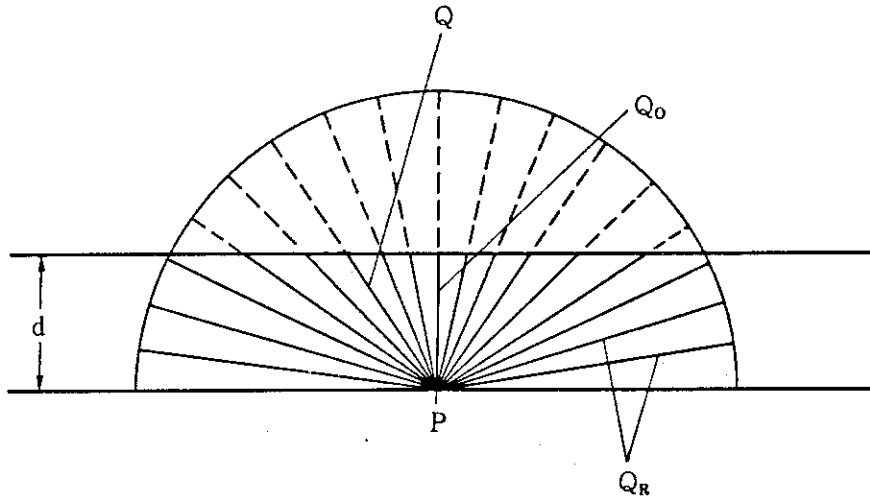


図 2.10 核分裂計数管型電離箱電極間内核分裂片によるイオントラック (計算モデル)

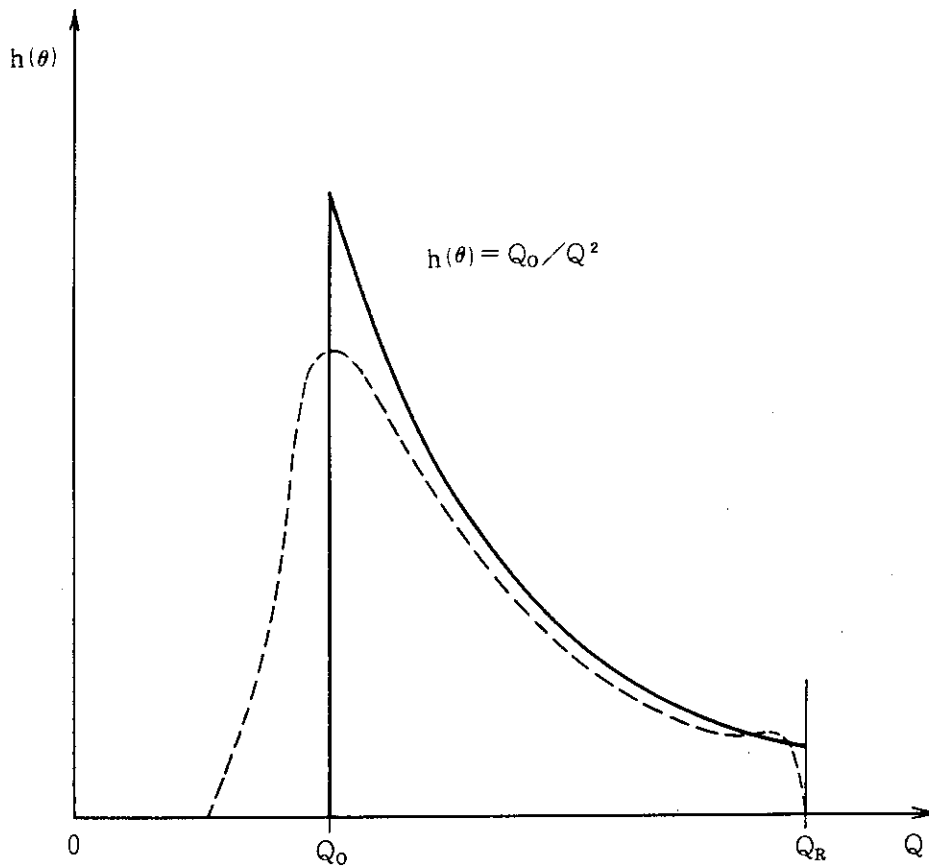


図 2.11 出力パルス電荷の波高分布の計算推定

ではないので、核分裂片の核分裂物質自体の中で引き起す電離損失のため、実際の核分裂計数管では電荷の波高分布が図 2.11 の点線で示されるように Q_0 より小さい位置にもずれ込んで来る。

以上によって電極間で生じるパルス電荷の代表値が求められたので既に述べた (2.6), (2.8), (2.9) 式より電荷収集時間 T_e , 電子による誘導パルス電流 $i_e(t)$ とその最頻値及びパルス電荷の最頻値 q_e を設計段階で容易に計算することができる。

2.5 中性子感度

2.5.1 計数モードにおける中性子感度

最初に総重量 $m = 1 \text{ mg}$ の極薄の U-235 膜を用いた理想的な核分裂計数管の中性子感度 S_0 を計算してみると、計数率は単位時間当りの核分裂数 $\times 2$ であるから

$$\begin{aligned} S_0 &= \frac{2a_v m}{A} \sigma_f \\ &= \frac{2 \times 6.025 \times 10^{23} \times 0.001 \text{ (g)}}{235 \text{ (g)}} \times 577 \times 10^{-24} \\ &= 3.0 \times 10^{-3} \text{ cps/n/cm}^2\text{s} \end{aligned} \quad (2.27)$$

となる。ここに a_v はアボガドロ数、 A は質量番号、 σ_f は核分裂断面積である。

電極上に核分裂物質を塗布した場合は核分裂片はその半分しか表面から出て来ないので、

$$S'_0 = S_0 / 2 = 1.5 \times 10^{-3} \text{ cps/n/cm}^2\text{s} \quad (2.28)$$

となる。

また 93% 濃縮ウランの酸化物 (U_3O_8) 1mg に対しては

$$S_{ox} = S'_0 \times 0.93 \times 0.84 = 1.18 \times 10^{-3} \text{ cps/n/cm}^2\text{s} \quad (2.29)$$

一方具体的な核分裂計数管の中性子感度は、現実には核分裂性物質の電極上への塗布厚、計数管の構造、使用材料の熱中性子吸収等によって影響される。その感度の近似計算は解析的計算手法では困難で、計算コードを用いるか、実験値を用いて実験式を作るかどちらかを選択する必要があったが、ここでは既に実用されている多数の常温用核分裂計数管の実用検出器のデータを知ることができたので、これらのデータを用いて中性子感度設計の近似計算法を得る方法を試みた。

図 2.12 は容器や電極にステンレス鋼を用い 1 mg/cm^2 の厚さで 93% 濃縮の U_3O_8 を塗布した 17 種類の既製の核分裂計数管について単位塗布面積当りの中性子計数感度を求め図にプロットしたものである。対象とした検出器感度が $10^{-4} \text{ cps/n/cm}^2\text{s} \sim 0.5 \text{ cps/n/cm}^2\text{s}$ まで広範囲にわたっているにも拘らず数値はかなり良くまとまっており、 1 mg/cm^2 厚の塗布では 93% 濃縮塗布ウラン酸化物 1mg 当りの平均感度は $0.71 \times 10^{-3} \text{ cps/n/cm}^2$, U-235 1mg 当り $0.90 \times 10^{-3} \text{ cps/n/cm}^2$ の値が得られている。ステンレスの容器及び電極を用いた円筒型中性子検出器では電極厚さ 1.3 mm について熱中性子の吸収が大まかに云って約 10% 前後あると云われているので、いま検出容器及び電極厚さを合計 2 mm と仮定してその吸収を補正すると、93% 濃縮ウランの酸化物 (U_3O_8) 1 mg/cm^2 厚の 1 cm^2 に対して

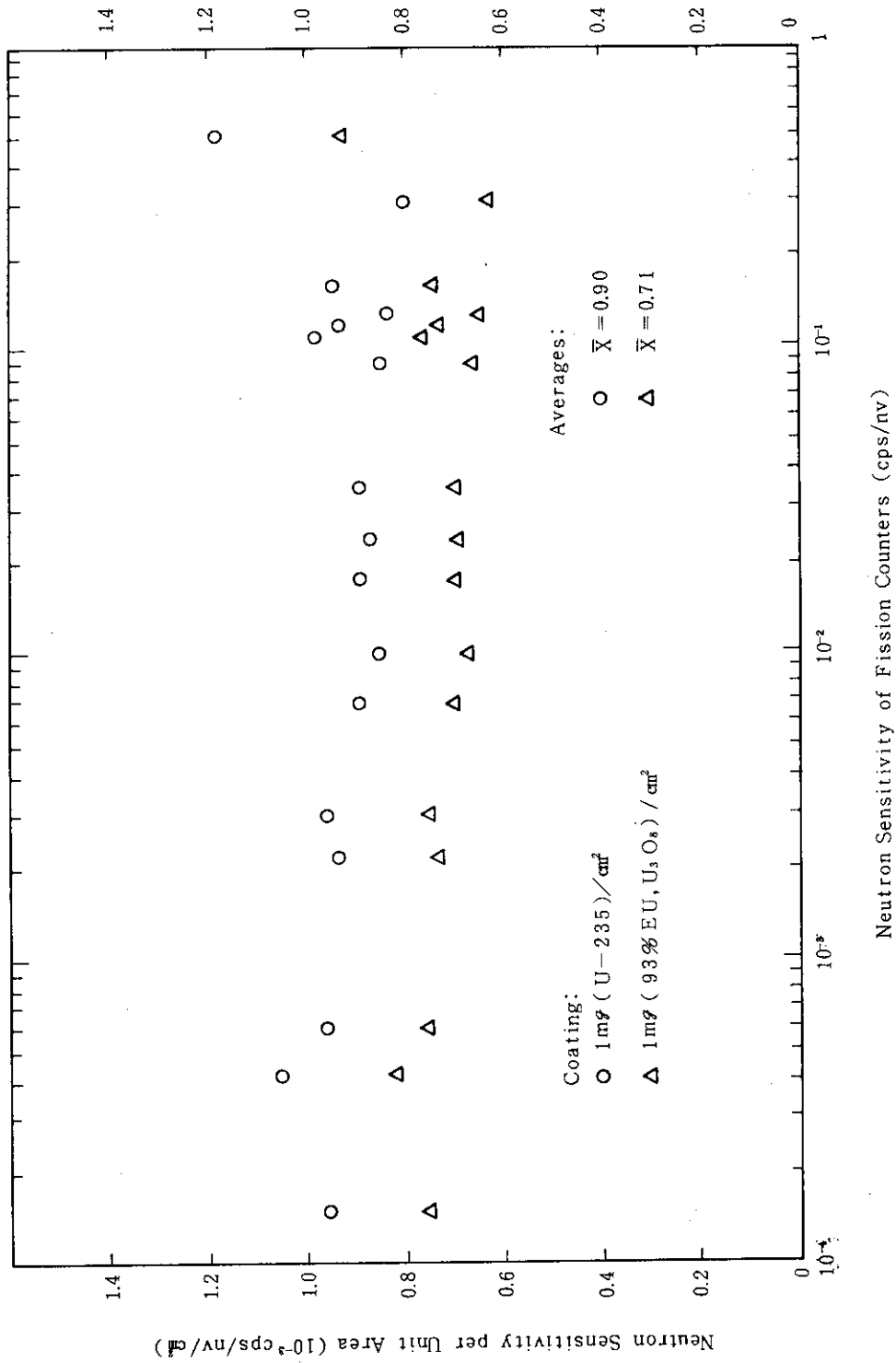


図 2.12 各種核分裂計数管の単位ウラン塗布面積当たりの中性子感度

$$\begin{aligned}
 S_u &= 0.71 \times 10^{-3} \text{ cps/n/cm}^2\text{s} \div 0.9 \frac{2(\text{mm})}{1.3(\text{mm})} \\
 &= 0.84 \times 10^{-3} \text{ cps/n/cm}^2\text{s}
 \end{aligned}
 \tag{2.30}$$

となる。

この値は(2.29)式による理想状態の場合の計算値に比べてやや小さいが、W. Absonらによれば 1mg/cm^2 の厚さに濃縮酸化ウランを塗布した場合、極薄膜の場合に比べて中性子感度は約1.4分の1となる(20)ので(2.29)式による極薄膜の計算値を1.4で割ると丁度 $0.84 \times 10^{-3} \text{ cps/n}$ となり、(2.30)式の実在核分裂検出器から求めた濃縮 U_3O_8 の 1mg/cm^2 厚塗布の単位感度推定値と極めて良く一致する。従って核分裂計数管型電離箱の感度計算には(2.30)式を適用することとした。

一方 U_3O_8 の塗布厚が 1mg/cm^2 と異なる場合の設計値についてはW. Absonらの実験データ(20)を用いて感度を補正することができる。この補正係数を図2.13に示す。

電極上のウランの塗布厚が増加すると U_3O_8 自身による核分裂片の吸収が増加し、塗布厚を増加させても感度は比例して大きくなりばかりでなく、自己吸収によりガス中に出て来る多数の核分裂片のうちエネルギーの小さいものが増加するので、出力パルスの波高分布が小さい方にくずれて来ることが予測できる。

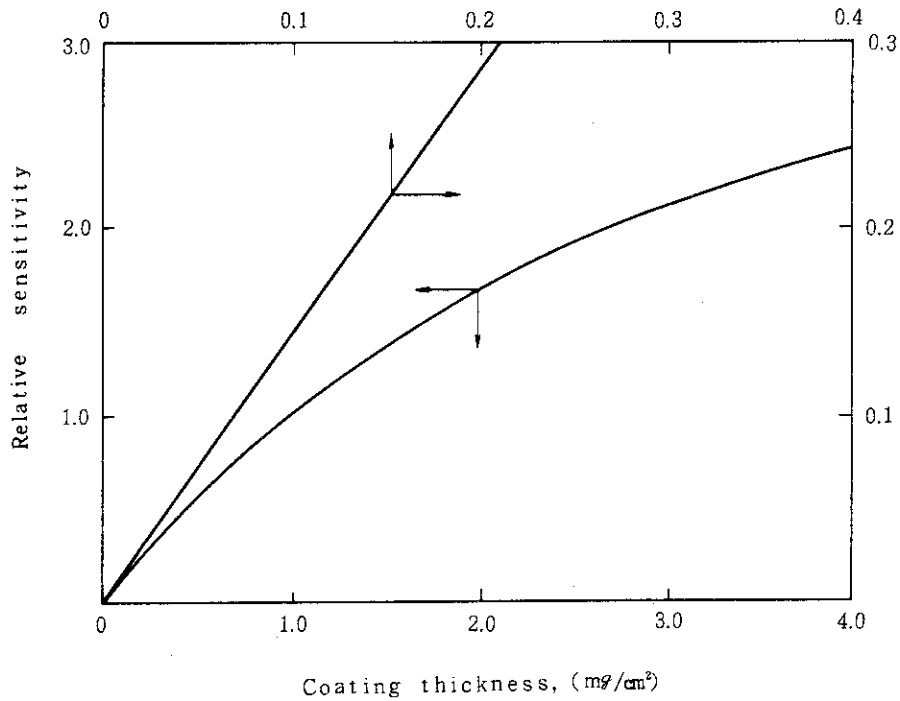


図 2.13 濃縮酸化ウラン (U_3O_8) の塗布厚の中性子感度に及ぼす影響

2.5.2 直流モードにおける中性子感度

直流モードで測定した印加電圧に対するプラトー領域においては電子により誘導されたパルス電荷とイオンにより誘導されたパルス電荷の値は等しい。従って中性子検出器から出力される電流の平均値即ち直流出力電流 I_0 は、パルス計数率を N_{cps} 、イオン及び電子のパルス電荷の平均値を q_e 、 q_i とすると

$$\begin{aligned} \bar{I}_0 &= N_e q_e + N_i q_i = 2 N q \\ \therefore N_e &= N_i \equiv N, \quad q_e = q_i \equiv q \end{aligned} \quad (2.31)$$

S_c を熱中性子計数感度、 ϕ_n を熱中性子束密度とすると

$$N = S_n \phi_n \text{ であるから}$$

直流モードにおける中性子感度 S_{dc} は

$$S_{dc} = \bar{I}_0 / \phi_n = 2 q S_c \quad (2.32)$$

で計算できる。

2.5.3 キャンベルモードにおける中性子感度

いま中性子の計数率を N 、パルス電荷の2乗平均値を q 、電子の電荷収集時間を T_e 、熱中性子感度を S 、熱中性子束密度を ϕ_n とすると、核分裂計数管出力パルス電流の2乗平均値は

$$\sigma^2 = i_{rms}^2 = \frac{Nq^2}{3T_e} = \frac{q^2}{3T_e} S_c \phi_n \quad (2.33)$$

であたえられる。(59)

この2乗平均値は全周波数帯域の信号スペクトルを含む場合である。この信号を特定の周波数帯域をもつ増幅器で増幅するためには信号の等価周波数帯域など周波数帯域当たりの2乗平均値(スペクトル密度)を知る必要がある。

信号の等価周波数帯域は

電子のドリフト波形に対して

$$f_e = \frac{2}{3T_e} \quad (2.34)$$

イオンのドリフト波形に対して

$$f_i = \frac{2}{3T_i} \quad (2.35)$$

また信号のスペクトル密度は

周波数 $0 < f < f_i$ に対して

$$i_{rms}^2 / f = 2 N q^2 = 2 q^2 S_c \phi_n \quad (2.36)$$

$f_i < f < f_e$ に対して

$$i_{rms}^2 / f = Nq^2 / 2 = q^2 S_c \phi_n \quad (2.37)$$

$f_e < f$ に対して

$$i_{rms}^2 / f = 0 \quad (2.38)$$

で与えられる。

以上の関係をモデル化して図示すると図 2.14 のごとき関係となる。

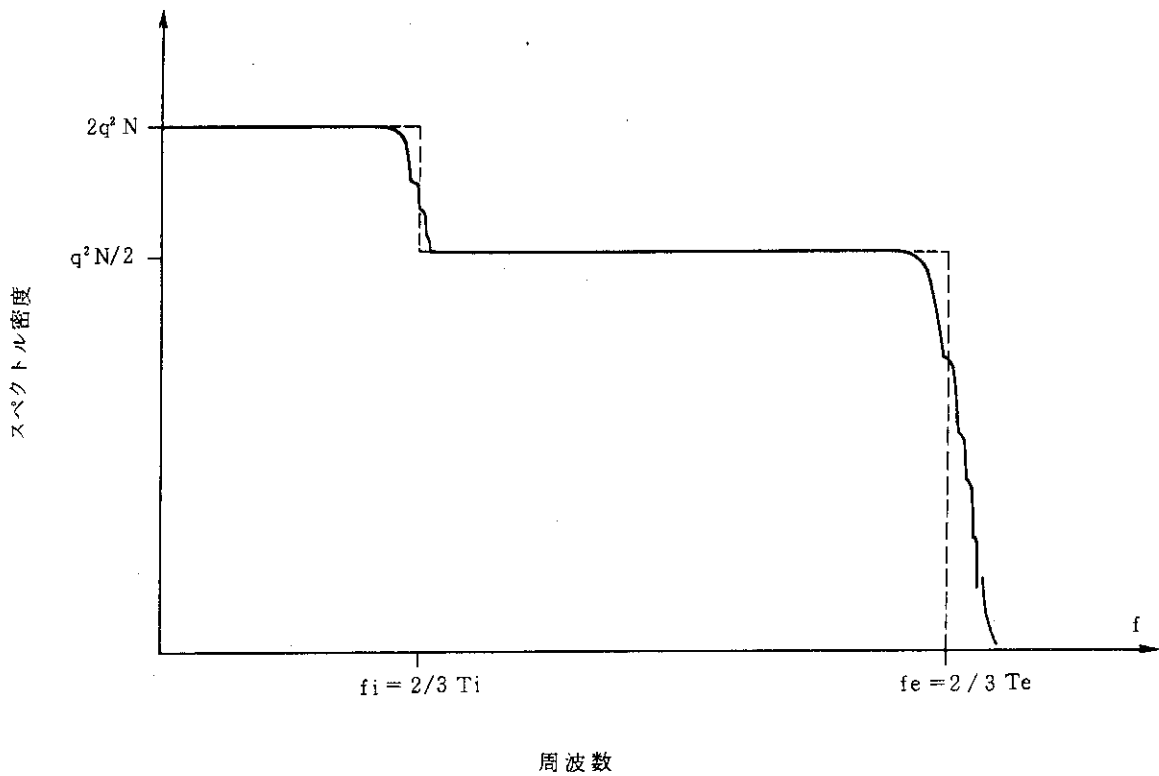


図 2.14 キャンベルモードにおける核分裂計数管型電離箱の出力信号の周波数帯域とスペクトル密度

2.6 印加電圧

高温核分裂計数管のパルス出力電流を大きくし、また電荷収集時間を短くするために電子のドリフト速度 W を大きくすることが有効であることは (2.4) ~ (2.8) 式で明らかであり、このドリフト速度は印加電界とガス圧の比即ち、 E/P の $1/2$ ないし 1 乗に比例することが知られている。計数管の電極間隔 d を一定と仮定すれば電界 $E (= V/d)$ は印加電圧 V に比例するので印加電圧を高く設計すれば計数管の特性を向上させることができる。

一方、高温核分裂計数管の高圧印加電圧は高温下における絶縁材料等のパルスブレイクダウン電圧等の技術的要因によって制限されると共に、パルス電離箱としてのプラトー上限という物理的要因によっても制限される。電離箱領域のプラトーの上限はガス圧当りの印加電界 E/P が大

きくなってガス中の電荷の増倍が始まるために生ずるもので、図 2.15 に示すように印加電圧の増加により電極間の電荷又は電離箱電流の増加が起る。核分裂計数管型電離箱は電離箱領域で作動させる必要があるので設計計算ではこのガス中電荷の増加が 110%となる点を許容印加電圧上限 V_H として設計上の目安とし一つのチェックポイントとした。

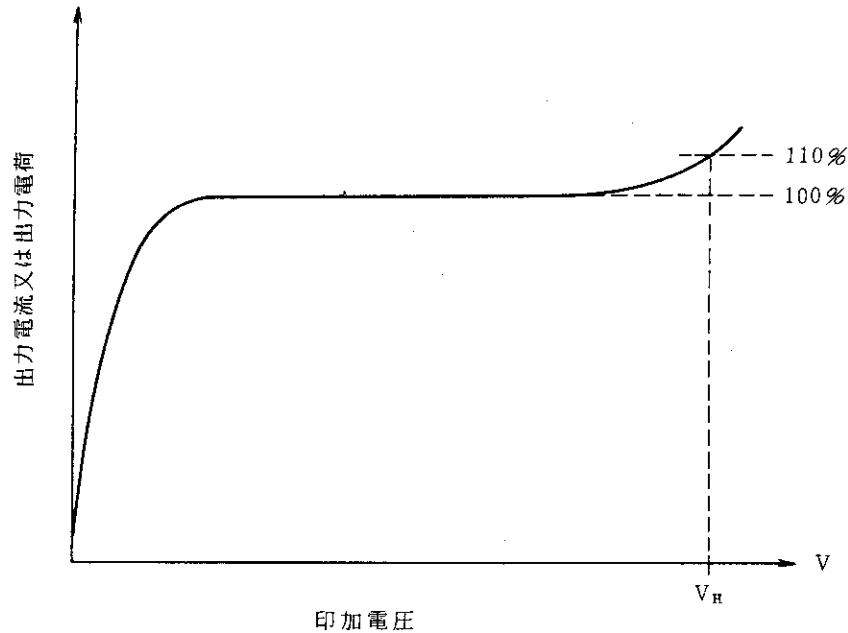


図 2.15 電離箱の印加電圧プラトー

電極間における電子の増倍は電極間の強い電界で加速された電子が他の原子又は分子に衝突し電離を起すことによる。いま α をタウンゼント第 1 電離係数、 d を電極間間隔とすると

$$i = \frac{1}{\alpha d} (e^{\alpha d} - 1) i_0 = 1.1 i_0 \quad (2.39)$$

αd について解くと

$$\alpha d = 0.19 \quad (2.40)$$

ガス圧 P を導入し、(2.40) 式を変形すると

$$\alpha/P = 0.19/Pd \quad (2.41)$$

各種ガスに対する α/P と E/P の関係は文献(21)(22)(23)に図で示されているので、 P 、 d を各々 1, 3, 5, 7, 10 気圧及び 0.5, 1, 1.5 mm に選び(2.41)式の左辺の値が右辺に等しくなるような E/P を各ガスについて前記の図 (Appendix 図 A 2.1) から求めると夫々のガス及び P 、 d に対する E/P 及び印加電圧 V_H は表 2.3 の如くなる。

表 2.3 $i/i = 1.1$ となる E/P ($v/cm \cdot mmHg$) 及び印加電圧 V_H

電極間隔 (mm)	0.5										1.0										1.5									
	He	Ne	Ar	Kr	Xe	H ₂	N ₂	He	Ne	Ar	Kr	Xe	He	N ₂	He	Ne	Ar	Kr	Xe	H ₂	N ₂	He	Ne	Ar	Kr	Xe	H ₂	N ₂		
1	5.3	4.5	9.5	11	15	20	40	4.5	3.6	8.2	9.3	13	17	38	4.3	3.3	7.6	8.5	13	(16)	(36)	4.3	3.3	7.6	8.5	13	(16)	(36)		
3	201	171	361	399	570	741	1520	342	272	623	707	988	1290	2890	490	376	866	969	1480	1820	4100	490	376	866	969	1480	1820	4100		
5	4.3	3.3	7.6	8.5	13	(16)	(36)	3.8	2.8	6.3	7.2	11	-	-	3.5	2.0	5.7	6.3	10	-	-	3.5	2.0	5.7	6.3	10	-	-		
7	490	376	866	969	1480	(1820)	(4100)	866	638	1440	1640	2510	-	-	1100	684	1950	2160	3420	-	-	1100	684	1950	2160	3420	-	-		
10	4.0	3.0	7.0	7.7	12	(15)	(35)	3.5	2.0	5.6	6.2	10	-	-	-	1.8	5.2	5.8	9.4	-	-	-	1.8	5.2	5.8	9.4	-	-		
7	760	570	1330	1460	2190	(2850)	(5650)	1330	760	2130	2360	3800	-	-	-	1030	2970	3310	5340	-	-	-	1030	2970	3310	5340	-	-		
7	3.7	2.7	6.0	7	11	-	-	-	1.8	5.2	5.9	9.5	-	-	-	1.7	5	5.5	9	-	-	-	1.7	5	5.5	9	-	-		
10	984	718	1600	1860	2790	-	-	-	958	2770	3140	5050	-	-	-	1357	3990	4390	7180	-	-	-	1357	3990	4390	7180	-	-		
10	3.5	2.0	5.6	6.2	10	-	-	-	1.7	5	5.5	9.0	-	-	-	(1.4)	4.6	5.2	8.6	-	-	-	(1.4)	4.6	5.2	8.6	-	-		
10	1330	760	2130	2360	3800	-	-	-	1230	3800	4180	6840	-	-	-	(1600)	5440	5930	9800	-	-	-	(1600)	5440	5930	9800	-	-		

上段: E/P , 下段: EPEP 電圧

2.7 ガス中の電子の挙動に対する温度の影響

以上の各種設計に必要な諸データの検討は常温において行って来たが、これらを高温において適用できるか、それとも温度の補正が必要か検討してみる。

2.1で述べた様に核分裂計数管型電離箱のパルス出力特性は電子の挙動によって左右される。核分裂計数管など電離箱領域の条件下における電界中の電子のエネルギーは不活性ガス中の場合で大略1～12 eV、これに多原子分子を混入した場合で1～2 eVである。これに対して加熱による電子の最頻エネルギー ($3/2 KT$) は、800 °C (1073 °K)でも0.14 eVと極めて小さいので温度が上昇しても気体の密度が同じに保たれ、衝突確率に変化がなければガス中の電子のドリフト速度やプラトー電圧もほとんど変わらないと考えることができる。従って高温下におけるガス中の電子の挙動に関する諸量は1000 °K以下では理論的には常温における値と大略同じと考えて検出器の設計をすすめてよいということができる。

尚、600 °Kを越す混合ガス中の電子の各種挙動については実測のデータは全く見あたらないのでこれらの測定は将来の興味ある課題である。

3. 各部構成要素に関する技術的検討と研究

緒言で述べた様に高温耐熱でかつ高性能の核分裂計数管の開発については、過去20年にわたり欧米で研究が行われながら今だに実現しなかった事実からみて従来の技術の延長線上では容易に実現できそうも無いことが想像できる。また性能を犠牲にして開発された高温核分裂計数管についてさえ、その高温耐熱化の諸技術は全く公開されない現状である。

このため目標とする性能の核分裂計数管を新しく開発するに当り、その目標を実現するための材料、構造、使用ガス、メタルセラミックシール等の諸部品等、関係するすべての項目にわたって(1)必要条件を抽出し、(2)次いでこれらの必要条件を満たすことができる材料及び現状技術を調査すると共に、(3)現状技術では解決できない問題点を明確にした。また(4)明確化した問題点に焦点をしばり研究を行った。

つづいて以上の各構成要素に関する研究成果をもとに目標とする高温核分裂計数管の総合概念設計をすすめ、この中で前記の個々の要素の研究で解決できなかった問題点は、多数の石塊を積上げて作った石橋の様に、使用する技術の組合せによって全体として問題が解決されるような方法を検討考案し、これにより開発試作すべき高温核分裂計数管の設計上の骨組即ち概念設計に成功した。

3.1 各部構成要素の必要条件の抽出、現状及び問題点の研究

3.1.1 金属材料に対する必要条件と問題点

a) 電極及び構造材料

目標とする高温核分裂計数管の電極や検出器容器などの構造部品に使用する金属材料に要求される必要条件是、

- 1) 高温強度及び耐蝕の両面から、必要とする高温耐久性がある。
- 2) ボロン、カドミウム等の熱中性子吸収物質を多量に含まないこと。
- 3) マンガン、タンゲステン、コバルトなど放射化断面積が大きく中性子照射によって強い放射能を生ずる元素や長半減期の放射能を誘導する元素を多量に含まないこと。
- 4) 材料加工、溶接が工業的に困難でないこと。
- 5) 電離箱ガス中の多原子分子ガス例えば CH_4 、 CO_2 、 N_2 等のうちいずれか一つと高温、高放射線下の電離状態で両立性があること。

以上の(1)～(4)の仕様をほぼ満足する金属材料としては、SUS-304、SUS-321、Incoloy 800、Nimonic 75、Inconel 600等がある。いずれの場合もCoの含有量は仕様に記されていないが、分析の結果、実際には夫々0.1～0.5%のコバルトを含有しているので必要に応じて含有量の少ない素材を選ぶか低コバルトのものを特注する必要がある。ステンレス鋼はMobbsらが指摘(6)している様にアルゴン+窒素、アルゴン+メタン、アルゴン+炭酸ガス等の速い電離箱ガスとの両立性がないと云われている。筆者の経験でも電極にSUS-

304及びチタンを用いた二つの場合について、ヘリウムに微量の窒素を混合してプラトーを高圧側に延したインコアチェンバーを試作し原子炉内の中性子束 $6 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \text{ s}$ 位置で照射し、約 1 mA の電流を流したところ両方とも数時間で Appendix 図 A 3.1 に示す如く純ヘリウムを充填した場合と同じプラトー曲線となってしまうことがある。

メタンなどの有機ガス及び炭酸ガスは高温下で各種金属との炭化・浸炭を起し、ガス自体安定に金属と共存することがむずかしいことがわかり、高温核分裂計数管の電極に使用できる金属を市場にある金属材料の中から見つけることは出来なかった。このためこれらの有機ガスを混合した電離箱ガスの使用の試みは金属材料の点で放棄せざるを得ない様である。

一方、窒素混合ガスを使用する場合に対しては、窒化炉の構造材に使用される金属材料の分野を調査した。この結果、高ニッケル含有量の耐熱合金が窒化耐蝕性が高く、検討の余地があることがわかった。

文献(24)に示された各種ステンレス鋼及び耐熱鋼のアンモニア窒化(水素混合窒素)による窒化深さと窒化層の硬さを示す図表 Appendix 図 A 3.2 を見ると、硬さで測れた窒化層の厚さは Ni の含有率の増加に伴って薄くなっており、550 ~ 560 °C 90 時間の窒化で 26.5 % Ni 含有率の耐熱では 0.05 mm 程度の厚さとなっている。また J. J. MORAN らの研究(25)によれば、490 ~ 550 °C アンモニア (NH₃) 雰囲気中 1540 ~ 29164 時間試験で 20 ~ 80 % Ni 合金はかなりの耐窒化性があるとしており 76 % Ni - 14 Cr 表面研磨材で 0.03 mm/yr となることを報告している。

また Appendix 図 A 3.3 ~ A 3.5 (25) は各種高温アンモニアによる窒化雰囲気中における耐熱合金の腐蝕率に対するニッケル含有量を示すもので、高温耐熱合金中の Ni の含有率が 50 % を越えると腐蝕率は大変小さくなることがわかる。

従って 70 ~ 80 % のニッケルを含む Ni - Cr - Fe 合金では表面に形成される窒化層は薄く、またその窒化層が内部に進転する割合は大変少いと云うことができる。以上の窒化に関するデータは窒化鋼など表面硬化のためのいわゆる窒化させることを目的とした雰囲気中(アンモニアは高温では水素・窒素混合雰囲気となり耐熱鋼が腐蝕を起し易い還元雰囲気となる)で測定されたものであるから、水素を含まない窒素中では窒素腐蝕率は更に大幅に低下することが期待できる。

更にまた水素が存在しないことによって窒化腐蝕が進行しないとか、窒化層が金属内部に進展しないならば合金表面を十分に窒化しておくことによって、放射線でたたかれても、イオン化した窒素が衝突しても窒素の吸収と放出は大略平衡を保たせることができるはずであり、この推論をもとに若し電離箱ガスとしてアルゴン+窒素の混合ガスを使用する時には、核分裂計数管型電離箱の電極及び構造材料にはニッケルを 75 % 前後含有する Inconel 600 又は Nimonic 75 合金相当品を用いることとした。

放射化断面積が小さい高温耐熱材料としては他にチタンがあり、高温真空中あるいは高純度不活性ガスで使用するには大変優れた材料であるが、チタンはゲッター材料として使われていることからわかる様に窒素、酸素をはじめ各種の多原子分子ガスを吸収する性質があるので多原子分子を混合した電離ガスとは併用できない。

b) バネ材料

一方高温による熱膨張や収縮を吸収するために使用するバネ材料についても広く調査を行い、候補材料としてS 816, A 286, Inconel X を取上げた。Appendix 図 A 3.6 は上記材料等で製作したコイルバネのリラクゼーションについて夫々 425 °C, 540 °C, 650 °C で 500 時間試験した結果を示すもので(26), S 816 はコバルト基耐熱合金, A 286 は鉄基耐熱合金で, Inconel X は広く知られているニッケル基耐熱合金で組織は同図上部に示す通りである。S 816 はコバルトの含有率が 40 % 程度もあり, タングステンの含有率も数%あるので特別に小さな部品以外には放射化の面から検出器に使いたくない材料である。この点 A 286 は S 816 より高温リラクゼーションが若干大きくマンガンの含有率がやや多い(～ 1.35 %) 不満はあるが, 650 °C では Inconel X に比べて特性が大幅に優れており, 短期的には高温で充分使用できる材料と云える。またバネの形状について検討を行うため A 286 でコイルバネ及び皿バネを工作工場で作試し高温でのリラクゼーションの試験を深草らが行った結果, 皿バネの形をとれば 600 °C で十分長期に使用できる見通しをえた。しかし 800 °C 程度の高温のもとでは, バネとしての性質はほとんど期待できないのでこのような高温下でバネを必要とする部分には別の対策が必要である。

3.1.2 絶縁材料に対する必要条件と現状

絶縁材料に対する必要条件は

- 1) 高温における固有抵抗が大きいこと。
- 2) 高温における材料的強度が大きいこと。
- 3) 高温において検出器の構造, 金属との反応, 共晶合金の生成をひき起さないことと共に金属の腐蝕を促進させることが無いこと。
- 4) 製作, 加工が困難でないこと。
- 5) 電離箱ガスとの両立性があること。

である。

種々の温度における各種酸化物絶縁材料の固有抵抗値や照射の影響について文献(27)(28)(29)(30)(31)等に多数報告されており, この中から 800 °C 迄の範囲で上記の必要条件を満たす材料としてアルミナを選択した。

ベリリアは熱伝導率もよくアルミナより優れた性質があるが, 労働安全衛生上の問題で製造入手が困難になってきたので使用を取り止めた。また無機物絶縁ケーブル(MIケーブル)の絶縁材料には充填後の気密性が高いマグネシアを採用した。

欧米では高温用中性子検出器の絶縁材として単結晶アルミナ(人工サファイア)を使用している場合もあるが, 高価でかつ加工性が良くないので, 高温における機械的応力が単結晶の使用を必要としない範囲で検出器の構造設計を行うこととした。

3.1.3 MIケーブルに対する必要条件、問題点と対策

高温核分裂計数管の信号を取出すためのケーブルは少なくとも接続部付近においては高温核分裂計数管型電離箱と同等の耐熱性を有するものでなければならない。またその信号の伝送特性は信号に大きな損失を与えない良好なものである必要がある。従ってその必要条件は、

- 1) 核分裂計数管の目標温度と同じ温度仕様であること
- 2) 信号の伝送、高圧電圧の印加に支障の無い程度に絶縁抵抗が高いこと
- 3) 仕様温度におけるパルスブレイクダウン電圧が検出器に必要な高圧印加電圧より高いこと
- 4) 高周波の信号の伝送損失が小さく、立上り数 ns パルス幅 50 ns 前後のパルス伝送が可能なこと
- 5) 外部からの電磁気誘導雑音障害に対する感度が低いこと
- 6) 充填した絶縁物の充填率が高く、気密性が高いこと
- 7) 適当な可とう性 (flexibility) を有し、必要に応じてケーブルが曲げられること

等である。

2)項については最高使用温度例えば 800 °C で 1 MΩ 程度の絶縁抵抗があれば使い方によってはパルス系及びキャンベル系検出器ケーブルとして充分使用可能である。この値はインコネル合金の芯線及びシースを用いてマグネシア又はアルミナを絶縁体とすれば 600 °C 程度では比較的容易に得られる値であるが、このように耐熱合金の芯線及びシースを用いた場合には、材料の固有抵抗が大きいことが問題となり、山岸らの計算(32)によれば 33 Ω の特性抵抗をもつ 10 m のケーブルで約 12.5 db (10 MHz) ~ 39.5 db (50 MHz) の損失が生じ電流伝送モードでは使用に耐えないことが判明した。(4)項の条件を満たさない)

また 5)項の外部電磁気誘導雑音の大きさは前田ら(33)の報告によればシースの導体抵抗の大きさに比例し大きくなるので従来同軸ケーブルシースとして用いられて来た銅に比べて固有抵抗が 42 倍 (ステンレス) ~ 58 倍 (インコネル) も高い耐熱合金材料のケーブルの場合、外部から誘導される雑音感度は大変大きくこれに対して信号の高周波損失が大きいので高周波即ち速いパルスモードに於ける使用は実用が困難であることがわかった。

これに対して英、仏では精力的に研究が行われ(1)(34)(35)、英国の Goodings 及び McMinn は製造上の幾多の困難を解決し、芯線及び第 1 シース (内シース) が純銅で第 2 シース (外シース) がチタン安定化ステンレス鋼のトライアキシャル MI ケーブルの開発に成功し、MI ケーブルによる速いパルス信号伝送の道を開き、本問題はほぼ解決されたかにみえた。

外径 4.8 mm の英国製のトライアキシャルケーブルの試料を用いて各種の実験を行った結果、気密性については He を用いた場合 1 時間当り大略 1 m 程度の移動速度で、リーク率は $10^{-6} \sim 10^{-5}$ Atm cc/sec のオーダーであり 6)項の気密性はほぼ満足すべきものがあり、また 7)項の可とう性も通常使用では問題がなかった。しかし実際に銅芯線の MI ケーブルを使ってみると端末加工後の高温試験では、パルスブレイクダウン電圧が、例えば 600 °C で 250 ~ 300 V 程度迄低下することが判明した。この原因について試料を調べてみると、絶縁体表面に銅、亜酸化銅の蒸着が認められ、各種の端末処理方法を試みたが大幅な改善は得られなかった。国内で数次にわたり行った銅芯線-銅内部シースのトライアキシャルケーブルの試作結果もほぼ同じ結果であった。従って銅芯線-銅内部シースの MI ケーブルを実際に使用する場合のパルスブレイクダウン電圧

の仕様は当面 250 V 程度にせざるを得ないとの結論に達した。

3.1.4 メタルセラミックシールに対する必要条件、問題点と高温耐熱化の研究

メタルセラミックシールは電離箱内部電極への高圧電圧の印加及び信号の取出しに不可欠である。本開発研究におけるメタルセラミックシールに対する要求事項は

- 1) 電離箱の設計仕様温度のもとで長期間耐えるだけでなく、常温から仕様温度までの熱サイクルに対してガスの漏洩が生じないこと
- 2) 電気絶縁抵抗が高いこと
- 3) 高温においても電離箱ガスの圧力に耐え漏洩を生じないこと
- 4) 可能な限り放射化断面積の小さい材料で構成されていること

である。

開発検討の段階におけるメタルセラミックシールの技術調査の結果では、本分野における国内専門業者が保証可能なメタルセラミックシールの温度は 450 °C、長期使用温度 350 °C であった。

セラミックスとしてはメタライズの最も行い易い 92 % 程度の純度のアルミナセラミックスにモリブデン・マンガンのメタライズを行いニッケルメッキをした上で封着金属コバルト (29 % Ni - 18 % Co - Fe 合金) を銀ロー付したものである。

コバルトは 450 °C 以上の高温ではアルミナと大きく熱膨張率が異なってくるのでこれより高温での使用は困難である。このためコバルトに代る各種の封着合金を調査したが 800 °C 程度までの温度範囲でアルミナセラミックと膨張係数が一致する適当な封着合金は見付からなかった(36)(37)。Appendix 図 A 3.7 に各種の封着合金の熱膨張特性を示す。

一方、単一素材の金属として比較的アルミナセラミックと膨張係数の近いものにチタン、ニオブ、タンタルがある。しかしこれらはいずれも高温で窒素を吸収するのでアルゴン・窒素混合ガスを電離箱ガスとして使用することができなくなる。従って高温用メタルセラミックシールは従来と別の考え方を導入して新しく開発を行う必要があることがわかった。

このため各種の可能性を検討し、次の様なメタル・セラミック封着構造を考案し(38)、常温から 750 °C 迄の急熱急冷の温度サイクル試験にも合格するメタルセラミックシールの開発に成功した。

一般に耐熱性が要求される場合は図 3.1 (a) に示す様に円筒形セラミックスの外周部に円筒形の封着金属を封着した構造が最も優れていると云われている。この理由はニッケルメッキしたメタライズ層と封着金属をロー付けするとき、高温のロー付け温度で封着金属が膨張した状態でローが流れこみ、冷却と共にアルミナセラミックより膨張係数の大きい封着金属がより大きく収縮し、セラミックをしっかりと締付けるためと説明されている。一般にアルミナセラミックは圧縮強度が強いので封着金属円筒の肉厚が適当の場合はこわれることはないが、封着金属の肉厚が厚い場合、熱サイクルによる応力によってメタライズ層付近が破壊されガスの漏洩が生ずる。

また一方、封着金属の肉厚が薄い場合は、金属側の接着部付近に破損が生じて漏洩を生ずる。

これに対して図 3.1 (b) に示すように封着金属円筒の先端部の肉厚を徐々に厚くする構造にして実験を行ったところ、封着金属とセラミックの熱膨張係数が金属のキューリー点以上でかなり違っていても漏洩が生じないことがわかった(38)。

この理由については封着金属部分の厚さが薄い先端から徐々に厚くなっているため、セラミック

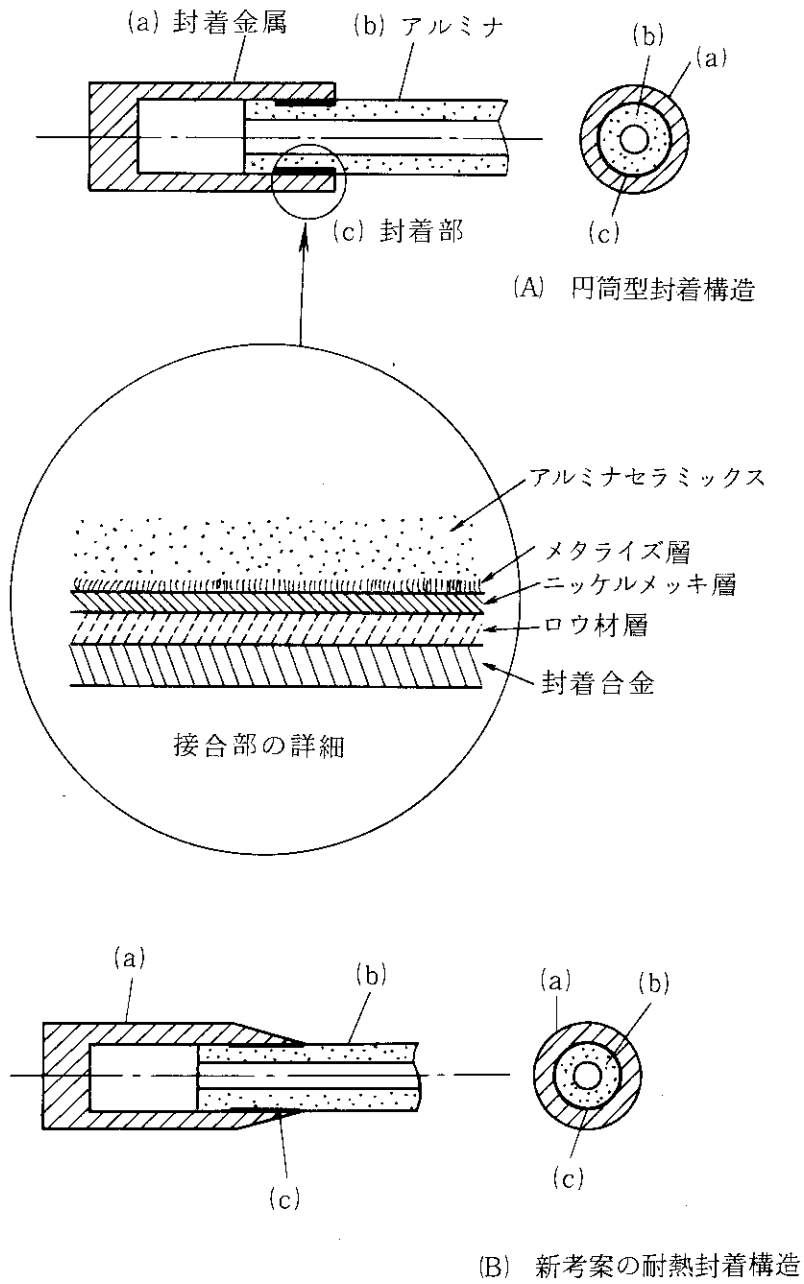


図3.1 メタルセラミック封着構造

クスと封着金属の熱膨張差が大きく現れる温度において、塑性変形する部分、弾性限界内で伸縮する部分などがこの肉厚変化内のどこかに連続的に作りつけることができ、生ずる熱応力を連続的に分散させるためと推定される。

図 3.2 及び図 3.3 は従来型のストレート円筒形の封着金属を用いた場合と、上記のテーパをつけた円筒形封着金属を用いた構造のメタルセラミックシールの耐熱性試験の結果を示すものである。

図 3.2 は封着金属に 32%Ni-17%Co-Fe 合金を用いた場合である。この合金は Appendix 図 A 3.7 に示すようにキュリー点 500℃ 迄はアルミナセラミックスと比較的近い熱膨張係数を有する様に作られた合金である。相手のセラミック円筒の直径は 3mm, 中心穴 0.5mm で封着金属側は 0.5mm 厚のストレートのもの(A)と先端部に長さ 3mm にわたって先端部厚さ約 0.1mm から 0.5mm (封着金属円筒の厚さ) 迄一定勾配のテーパをつけたもの(B)に対する熱サイクル試験の結果である。封着金属円筒の先端の形状が(A)(B)と異なる以外は構成材料、寸法、製作工程は全く同じであり、耐熱性試験も同一条件で同時に行ったものである。試験では図 3.4 に示すように、常温から指定温度まで急加熱し指定温度で 20 分間保持したのち常温まで急冷する熱サイクルを 10 回繰返したのち、ヘリウム漏洩試験 (合格規準 10^{-7} atm cc/sec 以下) を行い、漏洩が生じたものを除去し、合格したものは更に高い指定温度に対して同じ手順で温度サイクル試験を行い、試験後の正常品残存数を記録した。図 3.2 はこの正常残存数を試験温度に対してプロットしたもので同図の A 及び B のグラフからも明らかなように従来の構造の金属・セラミック封着端子 (グラフ A) は 700℃ で不良が発生し 750℃ では半数以上が不良となったが、本発明の構造の封着端子 (グラフ B) では 750℃ の試験後も全数正常であった。

図 3.3 は通常広く用いられているコバル合金 (29%Ni-17%Co-Fe) を用いた場合で、アルミナセラミックスとの平均の熱膨張差が図 3.2 の例より大きい封着金属を用いた金属・セラミック封着端子で形状、試験条件は図 3.2 の場合と同一である。セラミックスとの熱膨張差が大きな封着金属を用いているので従来構造の封着端子 (グラフ A) 及びテーパ型の封着金属を用いた封着端子 (グラフ B) とともに図 3.2 に示された場合よりも低い温度で不良が発生しているが、この場合も従来構造のもの (グラフ A) とテーパ型のもの (グラフ B) とを比較して明らかに封着金属にテーパをつけた封着端子の方が破壊しにくいことがわかった。

従ってこの様な高温耐熱メタルセラミック封着構造物を得ることに成功したキーポイントは、(1)平均の温度係数を合せるのではなく、キュリー点までの熱膨張係数がアルミナセラミックスとほぼ同じ合金を選択し、かつ (2)封着金属先端にテーパをつけたことの 2 つの条件の選択の相乗作用によるものと思われる。

3.1.5 電極保持構造及び電極間間隔

高温用核分裂計数管の外径を 38mm (1.51 インチ) 程度に仕上げるとすると円筒上電極の直径は 30mm 程度になる。金属電極を保持するアルミナセラミックスの熱膨張率は $5 \sim 7.9 (40 \sim 800^\circ\text{C}) \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 程度で、Ni 系耐熱合金やステンレス鋼のそれは夫々 $16.2 (0 \sim 816^\circ\text{C}) \sim 18.7 (0 \sim 650^\circ\text{C}) \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 程度であるので、高温用中性子検出器の設計の際円筒状の金属電極を内側からセラミックスで保持する時は高温で金属・セラミック間に熱膨張差による間隙が生じ、また金

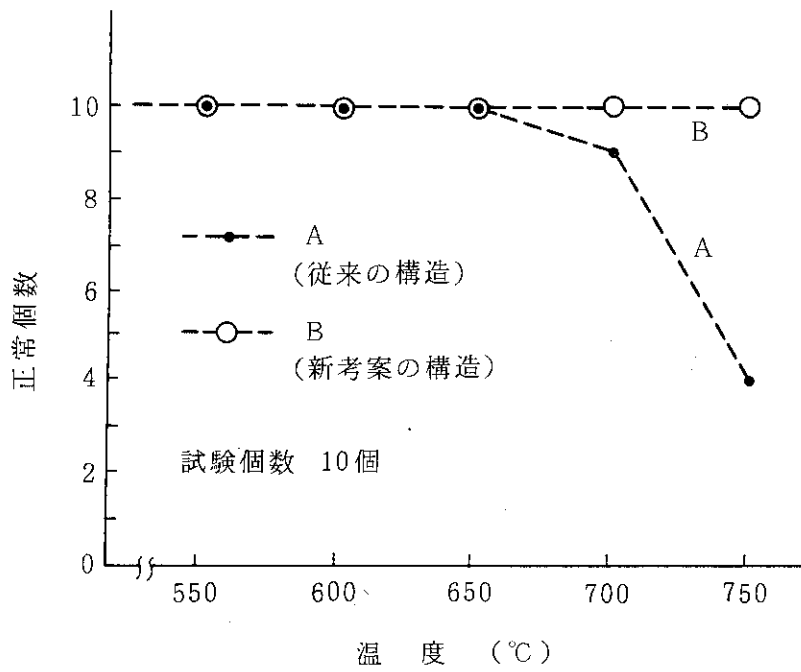


図 3.2 試作メタルセラミック封着構造の高温熱サイクル試験結果 (a)
32% Ni-17% Co-Fe 使用の場合

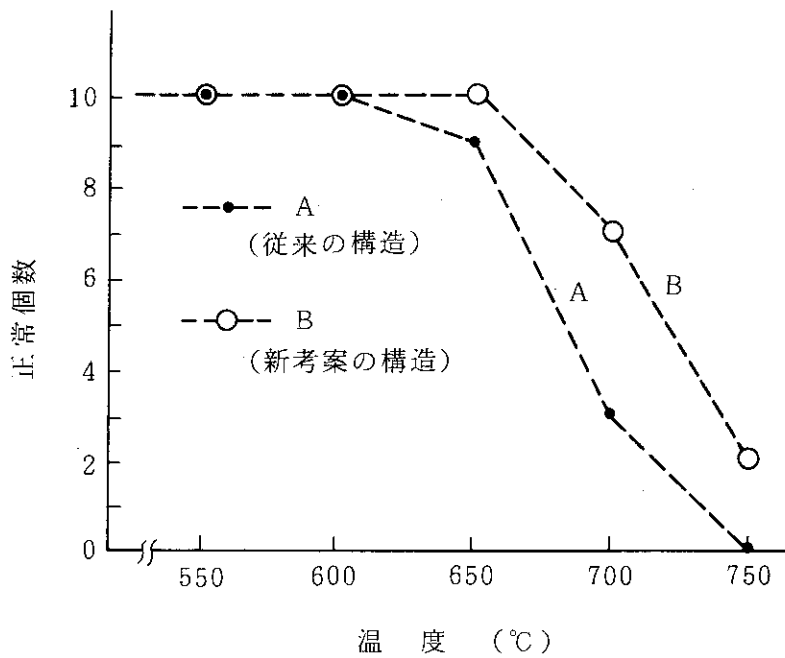


図 3.3 試作メタルセラミック封着構造の高温熱サイクル試験結果 (b)
29% Ni-17% Co-Fe (コバルト) 使用の場合

属円筒の外側から保持するときは高温下で金属電極の熱膨張によってセラミック保持構造物が割れない様に常温ではあらかじめ必要な間隙を用意しておかなければならない。

常温から 800℃ 程度までの温度変化に対する金属電極とセラミックスの熱膨張の差は前記の値を使用して計算した場合 0.7% 程度になるので直径 30 mm の電極の場合 0.21 mm となり仮に一つのセラミックス絶縁体で 2 つの電極即ち陽極と陰極をその円筒の一端で保持した場合で、工作誤差が 0 であったとしても半径方向に相対的に 0.42 mm もの間隙によるガタ即ち相対的位置のずれが生じることを避けることが出来ない。これは電極間間隔の精度に直接影響するので電極間間隔許容誤差を 20% とすると最低 2.1 mm の電極間間隔を必要とする。しかしこの様な広い電極間間隔では後に述べる様に核分裂計数管として高性能な特性は得られない。

この温度変化による電極ガタを解決するため図 3.5 に示すような田中等の考案による電極保持構造を採用した(39)。

この構造の原理は電極 A, B の両端に夫々 A', B' の端板をつけ端板の中心に穴をあげこれが細い円筒状セラミック C の上で保持されている。セラミック円筒 C の直径は電極の直径に比べて数分の 1 にすることができるので温度変化による電極間間隔の誤差も 0.1 mm 以下にすることができる。

この方法の採用によって開発する核分裂計数管型電離箱の電極間間隔を最小 0.5 mm 程度に設計する目通しを得た。

3.1.6 電極長の短縮方法

核分裂計数管電離箱の作動性能を向上させるため電極間間隔を狭くすることが必要であり、これは円筒状の電極の中心軸に近い位置でセラミック絶縁材で保持することにより 0.5~1 mm の間隔で保持が可能であることを既に前節で述べた。

しかし前節における検討は「電極の両端においてその程度の電極間間隔の保持が可能である」ことを示したもので、例えば電極の両端以外の部分で高温下で曲ったり、歪んだりした場合は、その電極間間隔が変化したり、場合によっては接触してしまうような場合も生ずる可能性がある。(図 3.6 (a) 及び (b))

このため電極全体にわたって電極間間隔を一定に保持するには、電極長を短かくすることが有効である。

a) 必要な電極表面積と電極長

目的とする中性子感度 S_n を得るために必要な電極の表面積 A_1 は (2.30) 式を用いて A_1 を計算すると

$$A_1 = 1.19 \times S_n \times 10^3 \text{ (cm}^2\text{)} \quad (3.1)$$

(但し 93% 濃縮ウラン (U_3O_8) 塗布量 1 mg/cm^2 の場合)

となる。

また更に耐熱合金の熱中性子吸収は 1.3 mm 当り約 10% と云われているので耐熱合金の検出器容器及び電極の厚さを t_a (mm) とすると熱中性子が濃縮ウランに達する迄の効率 K は

$$K = (0.9)^{t_a \text{ (mm)} / 1.3} \quad (3.2)$$

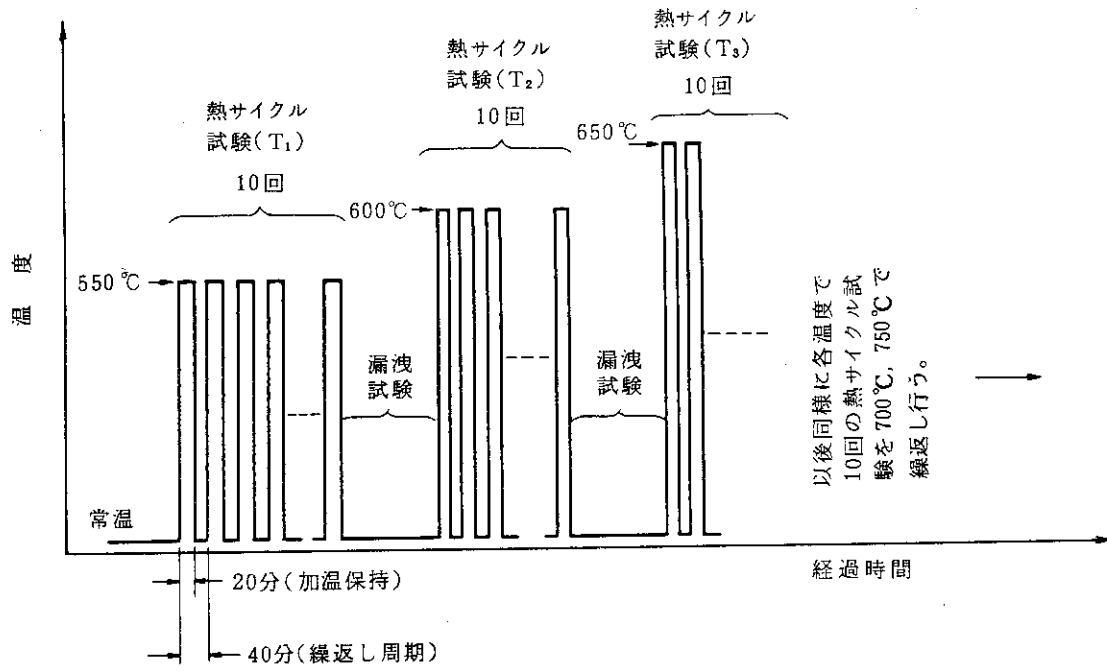


図 3.4 試作メタルセラミック封着構造の高温熱サイクル試験の方法

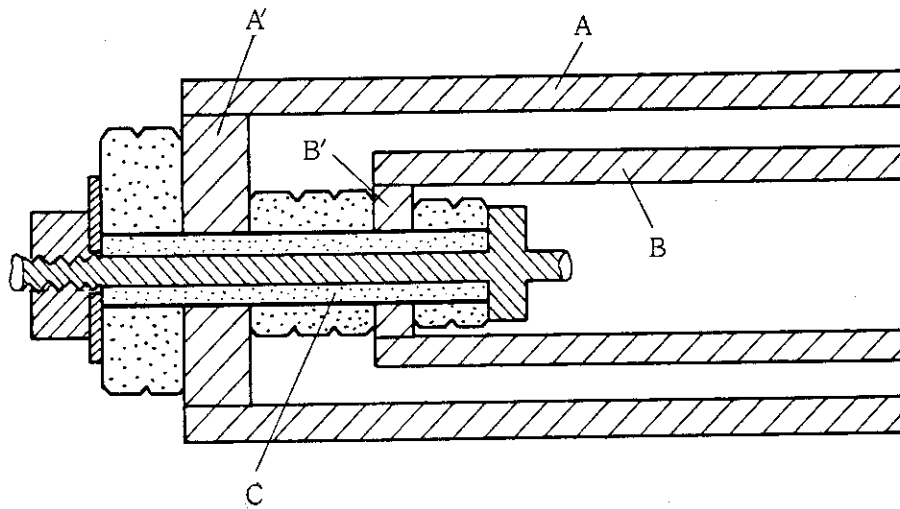
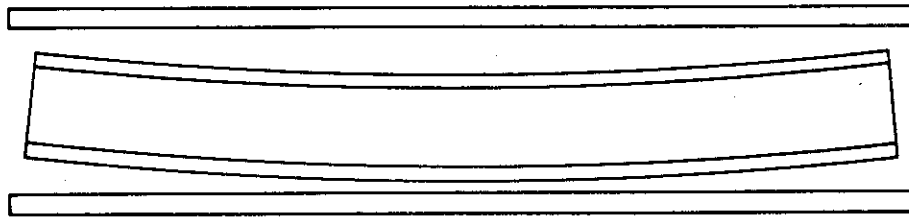
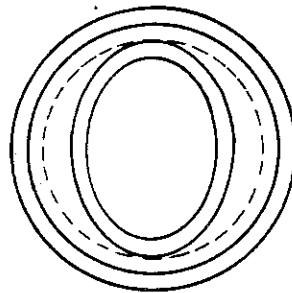


図 3.5 電極中心保持構造の概念図



(a) 軸方向の曲り



(b) 真円度の変化

図 3.6 電極の歪による電極間間隔の誤差

で与えられる。

従って核分裂計数管外部容器表面の熱中性子に対する中性子感度を S_n とすると、必要なウラン塗布電極表面積 A_2 は

$$A_2 = 1190 \times S_n \times 0.9^{-t_a(\text{mm})/1.3} \quad (3.3)$$

いま中性子感度 S_n を $0.12 \text{ cps/n/cm}^2 \text{ s}$ 、 t_a を 6 mm (外部圧力容器 3 mm 、内部容器兼内部遮蔽 1 mm 、電極厚さ $1 \text{ mm} \times 2$) とし円筒電極のウラン塗布面の直径を 22 mm とすると、電極長 L_e は (3.3) 式を用いて

$$L_e = \frac{1190 \times S_n \times 0.9^{-t_a(\text{mm})/1.3}}{2.2 \pi} = 33.5 \text{ (cm)} \quad (3.4)$$

熱中性子感度 S_n が $0.3 \text{ cps/n/cm}^2 \text{ s}$ のときは同様に

$$L_e = 83.7 \text{ cm} \quad (3.5)$$

となる。

32 cm の長さの電極を両端で保持して高温下で 1 mm の電極間間隔に保つことも容易ではないと考えられるが更に 83.7 cm の電極長のものは不可能と言わざるを得ない。

b) 電極の直径増加による電極長の短縮

電極長を短縮するために電極直径を増すことは容易に考えられる事である。直径を倍にすれば電極長は $1/2$ で等価な表面積となる。しかしこの場合、検出器外殻の耐熱耐圧容器の直径

が大きくなるので同じ高温耐圧力に設計しようとするとき容器の肉厚は半径にほぼ比例して厚くする必要があり肉厚増加に伴い熱中性子感度が低下する。従ってこの感度低下を補うためせうかく2分の1にした電極長を増加させねばならない。

例えば容器の肉厚を3mm増す毎に長さを約28%増加させる必要がある。更にまた、電極直径を増やすと高温における歪等による電極の真円からのずれの絶対値も増加する。従って核分裂計数管のように電極間隔を狭く設計することが望ましい中性子検出器にあっては電極直径を増加させることによって電極長を短縮する手法は有効とは云えない。

c) ウラン塗布厚の増加による電極長の短縮

ウランの塗布厚を厚くすると核分裂片のエネルギーがウラン塗布膜中で消費される割合が多くなり図2.12でみるように $1\text{mg}/\text{cm}^2$ で効率71%、 $2\text{mg}/\text{cm}^2$ で59%と報告されている。 $1\text{mg}/\text{cm}^2$ の塗布は広く用いられて居り、また妥当なパルス波高分布が得られている。 $2\text{mg}/\text{cm}^2$ の塗布は一部の米国製核分裂計数管で用いられており、 $1\text{mg}/\text{cm}^2$ の塗布に比べて約1.65倍の感度上昇が期待できるがAppendix 図A.3.8に示すように波高分布が大変Poorな特性となることもあり、波高弁別器の設定レベルの合せ方次第では1.5倍以内の感度上昇しか得られない場合も出て来る。

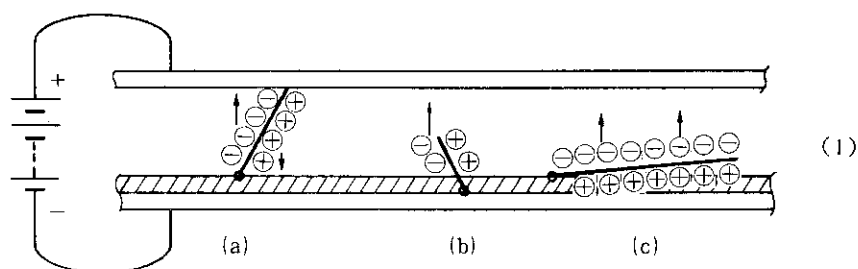
このため、ウラン塗布厚 $1\text{mg}/\text{cm}^2$ と $2\text{mg}/\text{cm}^2$ の中間の $1.5\text{mg}/\text{cm}^2$ の塗布について検討した。

$1.5\text{mg}/\text{cm}^2$ の塗布では $1\text{mg}/\text{cm}^2$ の塗布に対して中性子感度は約1.4倍となる。一方パルス波高分布は後節の各種の試験結果が示すように電極間隔とガス圧の積が小さくかつ速い電流増幅回路を用いた場合は $1\text{mg}/\text{cm}^2$ 塗布の場合に比べてあまり大きな劣化がないことが実験的に判明した。このため塗布厚は $1.5\text{mg}/\text{cm}^2$ を採用することに決定した。これにより電極長は濃縮 U_3O_8 を $1\text{mg}/\text{cm}^2$ 塗布した場合に比べて1.4分の1とすることができ大略30%短縮できた。

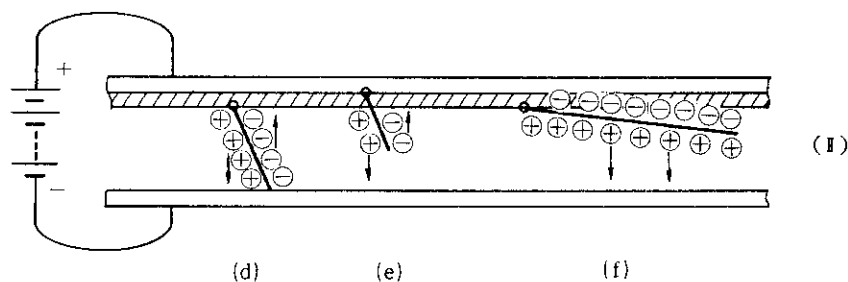
d) 両電極塗布による電極長の短縮

核分裂計数管における核分裂物質ウランは、陰極側に塗布した場合優れた波高分布特性が得られるが、陽極に塗布した場合はパルス出力特性が劣化すると云われている。この理由は既に2.1節で述べたように核分裂計数管の出力パルスは主として電離された電子の移動によるもので、イオンはほとんどその振幅には寄与しないことによる。図3.7に示すようにウラン塗布膜の中の方から出て来た核分裂片が電極間をブリッジするようなイオントラックを作ることができない場合(図中(I)の(b), (c))でもウランが陰極に塗布してあり(図中(I))陰極近くで電離作用が起ればその電子は陽極に向かって長い距離移動し、ある程度パルス電流を電極間に誘導することが出来るのに対して、陽極側にウランを塗布した場合(図中(II))、その表面に少し頭を出した核分裂片により電離された電子(e), (f)はすぐ近くの陽極に到着してしまい大きな出力にならないし、また陽イオンは長い時間をかけて陰極に到達するがこれは速度が遅すぎて有意なパルス電流とならない。

また核分裂片がウランの表面から放出されて両電極にまたがるイオントラックを作る場合(図中の(a)(c)の場合)においても2.3節(2.22)式に示すように電離の初期の方がイオントラックの単位長当りの密度が若干大きい。従ってこの場合でも核分裂片が陰極側から発生した



(A) 陰極にウランを塗布した場合



(B) 陽極にウランを塗布した場合

図 3.7 濃縮ウラン塗布面の極性がパルス出力特性に及ぼす影響

方が大きなパルス電流が得られる。このため優れた出力特性を有する核分裂計数管はほとんど陰極側のみにウランが塗布されている。また、米国系の核分裂計数管に多く見られるように両面塗布核分裂計数管の場合感度の向上は得られるがパルス出力特性がわるく波高分布が Poor となることは広く知られている。

しかし、従来この内容について同一条件で実験的に比較し確かめられた報告がないのでその様子を実験的に調べた。この結果電極間間隔と電離箱ガスの圧力の積 (Pd) があまり大きくない場合は、何とか使いものになる波高分布が得られることを実験で確認した。

実験に用いた核分裂計数管は一方のみの電極に 1 mg/cm^2 の濃縮ウランが塗布され、電極間間隔 1.5 mm 、封入ガスは $2\% \text{ N}_2 - \text{Ar}$ 混合ガスを 3 気圧 で充填したものである。印加電圧は 300 V である。

測定器はプリアンプには電荷増幅型の ORTEC 109PC、リニアアンプには JAERI 131A マルチモードアンプを使用し、微分時定数 $0.5 \mu\text{S}$ 、積分時定数 $0.5 \mu\text{S}$ である。波高分析器は ND-50/50 + PDP-8/L である。

図 3.8 (a) はウランが塗布された電極側を陰極として負電圧をかけ、塗布されない側の電極に正の電圧を印加した場合のパルス電荷の波高分布である。横軸は波高で縦軸は横軸の波高に相当するパルスの計数率である。下方の矢印は各々 $1 \times 10^{-13} \text{ C}$ 及び $2 \times 10^{-13} \text{ C}$ 校正点である。

図 3.8 (b) は全く同じ核分裂計数管型電離箱を使用し、印加する電圧の極性のみを逆にした場合である。

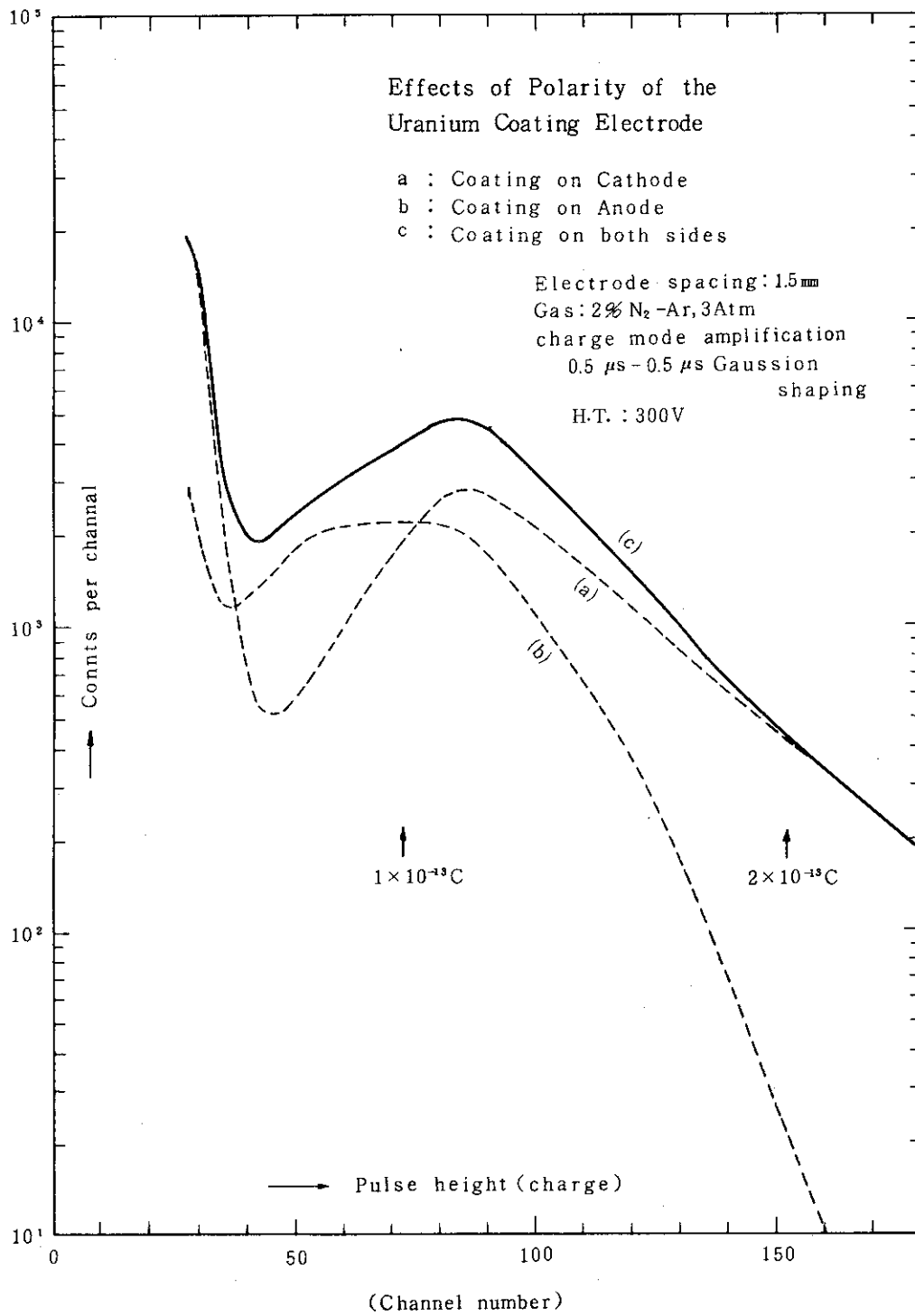


図 3.8 ウラン塗布電極の極性のパルス電荷波高分布特性に対する影響

即ちウランを塗布した電極をアノードとしてに正の電圧を印加しウランを塗布しない側の電極に負の電圧を印加した場合のパルス波高分布を示す。実験前の予想では左の α 線パルスの立上り部分と中性子パルスのピークの間の谷の部分が浅くなる程度と考えていたが、Pbが4.5 Atm \cdot mm程度であるにもかかわらずウランの塗布側と印加電圧の極性の関係でこんなに大きな差が出るとは実際に大きな驚きであった。

これら2つの曲線(a)(b)を比較してみるとウラン塗布の電極を陰極とした場合きれいなピークを作っていた中性子パルス電荷の波高分布は、塗布側を陽極にした場合ピークの部分の多くのパルスが小さい方に(左の方に)ずれ込んでいる。この点からみてウラン塗布厚1mg/cm²の場合電極間で核分裂片が作ったイオントラックのかなりのものが対向している電極迄とどいていないことを意味している。

また逆の極性の場合、波高分布の右の方が下へ曲ってくるのは図3.7の(c)と(f)の違いで斜めに放出されたイオントラックの多量の電子が遠い方の電極まで移動するか近くですぐ吸収されてしまうかの差によるものと考えてよいであろう。客観的にデータを観察するのはこのぐらいにして、次にこの様な問題がある陽極側のウラン塗布が実用上実施可能か検討した。

いわゆる両電極にウランを塗布すると言うことは陰極塗布の場合図3.8(a)と、陽極塗布の場合の曲線(b)のパルス電荷波高分布を重畳させたものと考えてよい。同図(c)は(a)と(b)の計数値を加え合せたパルス電荷の波高分布を示したものである。従って(c)は両面塗布の場合のパルス電荷の波高分布に相当する。

この和の波高分布を見ると波高分布自体は、(a)と比べ谷の部分が浅くなるが(b)の波高分布より大変良い。また(a)曲線の谷相当の位置へ波高弁別レベルを設定した場合(b)の波高分布のうち小さい側のパルスの約5%がカットされるが、正常な片面塗布に比べて両面合計で195%程度の感度となる。この様に両電極塗布によって、従来の米国型核分裂計数管のように、波高分布を大幅に劣化させることなく約2倍の中性子感度の向上か、あるいは感度が同じでよいときは電極長を約1/2に短縮できることが可能であることがわかった。更にまたウランの両電極への塗布により単位対向電極面積当りの感度を向上させることは、(a)電極長を短縮し高温における電極間間隔の維持に有利なばかりでなく、(b)同じ中性子感度でも電極間静電容量が約2分の1となり、出力電流パルスの立上り時間が短くなると同時にその振幅(尖頭値)も大きくなること、および(c)電極間の電離箱部分の体積が片面塗りの場合に比べて約2分の1となるため γ 線の感度が約2分の1となりn- γ 比が大幅に向上することなど各種の大きなメリットが得られた。

以上の検討の結果、両電極へのウランの塗布は、陰極上のみ塗布の場合より、波高分布の劣化は若干あるが、電極長の短縮、電極間静電容量及び γ 線感度の低減などの利点が多いので高温核分裂計数管型電離箱の開発試作には全面的に採用することとした。

以上の検討の結果、核分裂計数管型電離箱の電極長は濃縮ウランの塗布厚を1mg/cm²から1.5mg/cm²に増加させることで約0.71倍に短縮でき、更に両電極への塗布により約0.51倍に短縮できることがわかったので、中性子感度0.12 cps/n/cm²s及び0.30 cps/n/cm²sの核分裂計数管で前述の電極直径22mmの場合(3.4)式及び(3.5)式の長さに夫々0.36(=0.71 \times 0.51)をかけて電極長は

$$\left. \begin{aligned} L_e(0.12) &= 33.5 \text{ cm} \times 0.36 = 12.1 \text{ cm} \approx 12 \text{ cm} \\ L_e(0.3) &= 83.7 \text{ cm} \times 0.36 = 30.1 \text{ cm} \approx 30 \text{ cm} \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

となった。

以上の検討により核分裂計数管の電極長を大幅に短縮して高温における電極間間隔を0.5ないし1mm迄狭く保持出来る見通しを得た。

3.1.7 濃縮ウランの選択

核分裂計数管の α パルスによる波高分布を検討中に、 α パルスが主としてU-235の α 崩壊によるものとする、測定された α パルスの計数率は予想値より約30倍も大きいことがわかった。この理由を究明した結果、濃縮ウランを用いた核分裂計数管の α パルスのほとんどはU-235から出るものではなく、濃縮ウラン中に含まれるU-234によるものであることが判明した(40)。

従って核分裂計数管電離箱の波高分布の中性子パルスによるピークとその左側の α パルスによる立上り部分の分離を良くし、深い谷の部分を作るには、 α 線の放出率の大きいU-234の含有率の小さい濃縮ウランを使用することが重要であることが判った。

表3.1は核分裂計数管製作に購入した幾種かの濃縮ウランの同位体の分析結果である。試料のうちA, Bは90%濃縮ウランで、C~Fは93%濃縮ウランである。

表中の最下段には各種試料のU-234とU-235の重量比が示してある。U-234は天然に0.00574%存在する同位体がU-235の濃縮過程で濃縮されたものと考えられガス拡散法による多段カスケード濃縮の原理的な計算によれば93%濃縮ウランは90%濃縮ウランに比べてかなり多くのU-234を含有するものと予想されたがU-234の含有率は実際には濃縮度の違いによる差異よりも個々の試料の差の方が大きいと云う結果であった。測定した試料では90%濃縮のBの試料のU-234の含有比が最も少く、93%濃縮のFの試料(NBS分析用標準試料)のU-234の含有率が最も大きくそのU-234の含有率の比は2倍以上もあった。

このため優れたパルス波高分布を有する(波高弁別特性の優れた)核分裂計数管を製作するためにはU-234の含有率の少ない濃縮ウランを入手して使用することが重要である。

表 3.1 濃縮ウラン中の同位元素の組成

試料 同位元素	同位元素比 (wt %)					
	A	B	C	D	E	F
U - 234	0.620	0.49	0.58	0.612	0.73	1.081
U - 235	89.945	89.83	93.22	93.134	93.16	93.337
U - 236	0.318	0.32	0.41	0.424	0.28	0.2027
U - 238	9.116	9.36	5.79	5.830	5.83	5.380
U-234/U-235 ($\times 10^{-3}$)	6.89	5.54	6.22	6.57	7.84	11.58
備 考						NBS 標準分析 試 料

3.1.8 電離箱ガスの問題点とその対策

欧米において温度仕様 500 °C 以上の高温用核分裂計数管の電離箱ガスとして使用されているのは全て純不活性ガスであることはすでに述べた。また直流モード用クリプトン使用の電離箱 1 種を除き、全て純アルゴンガスが用いられている。

純アルゴンガスは、従来常温用の核分裂計数管に広く用いられている「アルゴン+多原子分子ガス」の混合ガスに比べるとその電子ドリフト速度 W は、 $1/5$ (Ar+N₂) ~ $1/30$ (Ar+CH₄) 程度しかない。(42)(43)(44)(45)(48)

一方混合する多原子分子ガスとしてメタン (CH₄)、炭酸ガス (CO₂) は高温並びに強い放射線によってイオン化された状態では電極等の金属と共存できないことは広く知られている。窒素 N₂ も高温下で通常のステンレス鋼等を窒化し吸収されることが広く知られているが、一種類の原子から成るガスなので他のガスに比べた場合最も安定で 450 °C 程度の温度までは混合ガスとして使用できることが知られており、製作又は試作品も作られている (5)(8)(46)(47)。

何らかの方法で多原子分子ガスの混合ガスの使用を考えるとすれば混合ガスとしては窒素を除いて他に候補は考えられない。今後の検討に必要なので Appendix 図 A 3.9 ~ A 3.13 に English & Hanna, Bortner et al., Klema & Allen らの測定による純アルゴンおよび窒素・アルゴン混合ガス中の電子のドリフト速度のグラフを示す。ガスの単位圧力に対する印加電界 E/P を横軸にとり、これに対する電子のドリフト速度 W の大きさ (縦軸) を窒素の混合比をパラメータとして示してある。

いま電離箱ガスを純アルゴンとし、電極間隔 1 mm、ガス圧 7 Atm (0 °C) を使用し、200 V の高圧電圧を印加した場合の核分裂計数管の出力特性について本グラフの電子ドリフト速度 W と (2.25)(2.5) 式及び (2.6) 式を用いて計算すると

$$\left. \begin{array}{l} \text{出力パルス電荷の平均値 } q = 1.1 \times 10^{-13} \text{ C} \\ \text{電荷収集時間 } T_e = 300 \times 10^{-9} \text{ s} \\ \text{出力パルス電流波高 } i_o = 0.73 \times 10^{-6} \text{ A} \end{array} \right\} \quad (3.7)$$

となり、この諸元で純アルゴンガスを用いた場合 1 章に示した目標性能に程遠いことがわかる。

いま電離箱ガスのアルゴン中に 1 % の窒素 N₂ を混合した場合について同一構造、圧力、印加電圧で計算すると、出力パルス電荷は同じであるが、

$$\left. \begin{array}{l} \text{電荷収集時間 } T_e = 83 \times 10^{-9} \text{ s} \\ \text{出力パルス電流波高 } i_o = 2.6 \times 10^{-6} \text{ A} \end{array} \right\} \quad (3.8)$$

となり、目標仕様を満たす。但し、これには窒素混合ガスを 500 °C 以上で使用できる条件即ち電極金属との両立性を得ることに成功する必要がある。

一方純アルゴンガスを用いて (3.8) 式の特性を得ることが出来ないかどうか構造上の諸元即ち電極間隔 d 、ガス圧 P を変えて計算してみると (印加電圧は同じ 200 V とする)、同一の特性を得るための d 及び P の値は

$$\left. \begin{array}{l} \text{電極間隔 } d = 0.28 \text{ mm} \\ \text{アルゴンガス圧 } P = 25.3 \text{ Atm (0 °C)} \end{array} \right\} \quad (3.9)$$

となる。

常温で 25.3 気圧アルゴンガスは 800 °C では 94.3 気圧となり、検出器容器は検出器としては常識外の大変肉の厚いものを必要とするばかりでなく、必要な電極間隔 0.28 mm を常温から高温迄の広範囲にわたり維持することは、既に 3.1.5 で述べた理由で実現は大変むずかしいと考えられる。

以上に述べた如く電離箱ガスの面からみた目標達成に対する必要条件は

1) 高温中で Ar + N₂ 混合ガスと両立する金属材料を探し出すか、両立させる技術を考案すること、あるいは

2) 常温から高温にわたってかつ長時間にわたり電極間隔を 0.28 mm 前後に維持する技術を考案すること

のどちらかを実現することであるが、後者は総合的に考えると技術的に実現が困難と考えられるが、前者は既に 3.1.1 で検討したように金属材料の選択と表面処理により可能性が残されていると考えられる。

アルゴン以外の不活性ガスと窒素との混合ガスも夫々興味ある性質を有しているが、いずれもアルゴンと比べて短所があり、アルゴン窒素混合ガスに代え得るものはない。即ち、ヘリウム (He) は Atomic mass が小さく核分裂片の Stopping range が長くなり、必要なイオン電荷を得るために電極間隔又はガス圧を大きくしなければならないのでパルス出力特性が劣化する。またネオン (Ne)、クリプトン (Kr)、キセノン (Xe) は Neutron Cross Section が He (≈ 0), Ar (≈ 0.62 barn) に比べて大きく (Ne ≈ 2.8 , Kr ≈ 28 , Xe ≈ 35 barn) 中性子吸収の点で不利である。

3.1.9 電離箱容器の高温耐圧

2.1 節及び 3.1.8 で述べたように核分裂計数管の特性は、電極間隔を現実的に可能な限り狭くし、かつ間隔に逆比例して電離箱ガスの圧力を高くすることによって高度なものとすることができる。

このため 4.1.5 節表 4.1 に示すように、電極間隔の維持の限界を考慮しつつ、試作電離箱の設計ガス圧を 4~7 気圧 (標準状態) 程度に選んだ。

更に高いガス圧の使用も考えられないことはないが、ガス圧を高くすると電離箱容器の胴部側壁の厚さが厚くなり、これによる熱中性子の吸収のため中性子の検出感度が低下する問題が生ずる。

上記範囲のガス圧を使用した場合でも、中性子感度の低下をまねかないよう胴部の厚さを必要最小限の厚さとする必要がある。

電離箱の容器が密閉構造の場合、上記各種設計ガス圧に対する高温下のガス圧を、設計上の目安のため表 3.2 に示す。

いま核分裂計数管の長期耐熱温度を 650 °C、原子炉事故時対応作動温度を 800 °C として検討をすすめると溶体化処理したインコネル 600 合金の諸特性 (47) において、Tensile strength の 1/4, 10⁸ cycles Fatigue strength, 0.01% / 1000 h creep, Yield strength (0.2% offset) の 2/3, 10⁵ h Rupture のうち最も小さい値は 650 °C において 3.2 kgf/mm² (0.01

表 3.2 各種温度における電離箱の内圧

標準状態ガス圧 (0°C, Atm)	各温度における圧力 (Atm)			
	500°C	600°C	700°C	800°C
1	2.83	3.20	3.56	3.93
4	11.3	12.8	14.3	15.7
5	14.2	16.0	17.8	19.7
7	19.8	22.4	24.9	27.5

%/1000 h Creep), 800°Cにおいて2.2 kgf/cm²(同上)である。

従って内径32 mm, 0°Cで7 Atmの内圧(23.7 Atm = 24.5 kgf/cm² at 650°C, 27.5 Atm = 28.4 kgf/cm² at 800°C)に耐える容器の円筒胴の厚さtは接手効率を0.9とすると夫々,

$$\begin{aligned}
 t(650) &= \frac{PD_i}{200 S_\eta - 1.2 P} \\
 &= \frac{24.5 (\text{kgf/cm}^2) \times 32 (\text{mm})}{200 \times 3.2 (\text{kgf/cm}^2) \times 0.9 - 1.2 \times 24.5 (\text{kgf/cm}^2)} \\
 &= 1.43 (\text{mm}) \tag{3.10}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 t(800) &= \frac{28.4 (\text{kgf/cm}^2) \times 32 (\text{mm})}{200 \times 2.2 (\text{kgf/cm}^2) \times 0.9 - 1.2 \times 28.4 (\text{kgf/cm}^2)} \\
 &= 2.51 (\text{mm}) \tag{3.11}
 \end{aligned}$$

となる(50)。

800°C対応を考慮しても胴部厚さtは現実的に可能な値であるから、+0.5 mm(+20%)の余裕を加えてt=3 mmで設計をすすめることとした。

この厚さの胴部側面による熱中性子吸収は大略20%と考えられこの感度損失も許容できる大きさである。

一方胴部両端に取付られる鏡板相当部分即ち電離箱の先端部及びMIケーブル取付部の形状は複雑で溶接部強度を含めた詳細な高温耐圧計算は容易でないこと、厚さの中性子感度に与える影響は胴部程大きくない等の理由でこの部分の肉厚は充分厚くとると共に溶接部を含めて高温耐熱強度試験を実施した。

高温耐熱強度試験

4.2節図4.5に示す設計した高温核分裂計数管型電離箱の検出部外殻(耐圧容器)の部分を製作し、MIケーブル取付部には、これに相当するインコネル細径パイプを取付け加圧管とし、これを1個1個防爆性の電気炉に挿入し図3.9に示すような配線、配管を行って試験を行った。供

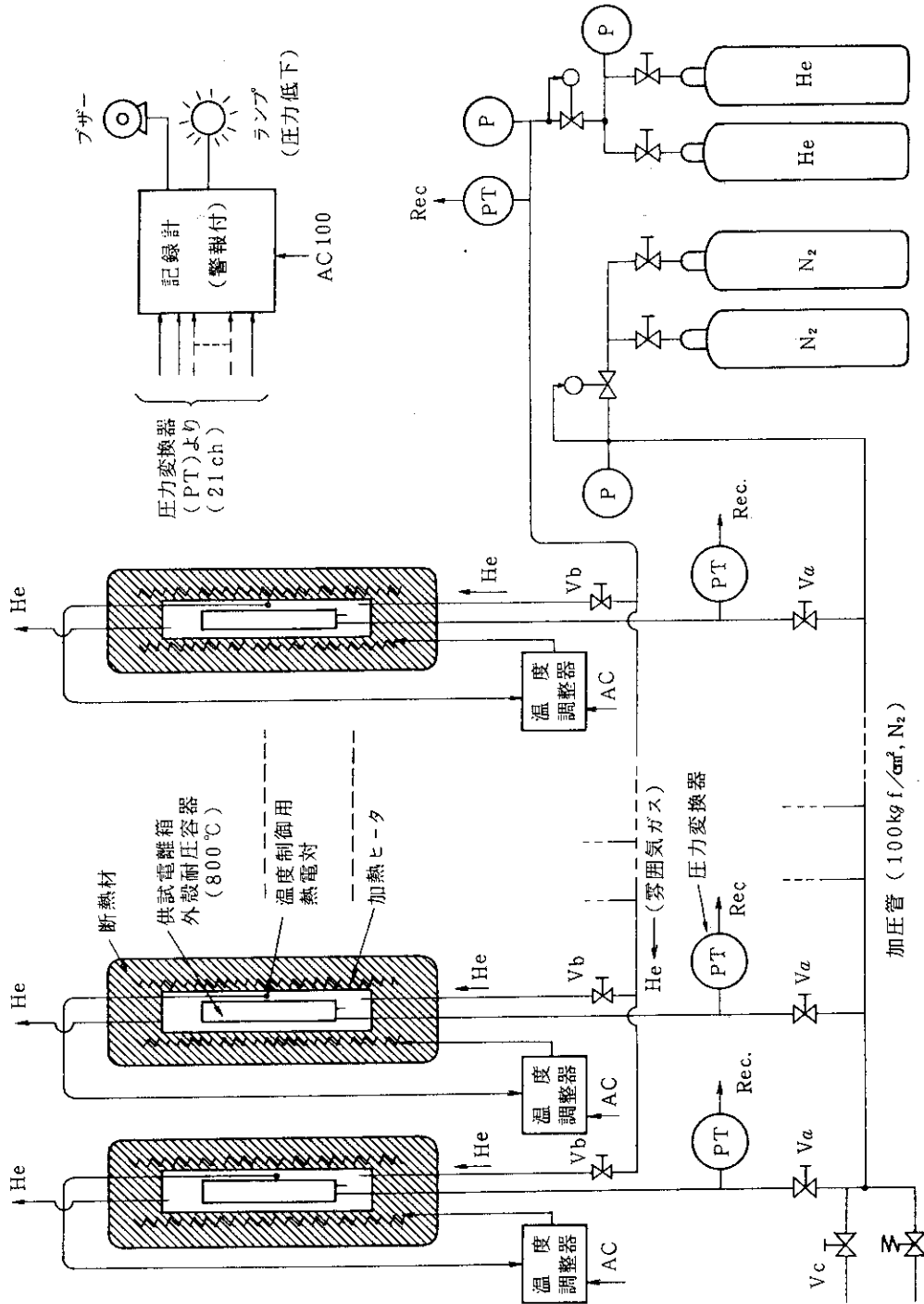


図 3.9 電離箱外殻耐圧容器の高温耐圧試験

試験電離箱耐圧容器は固溶化熱処理したインコネルインゴットから削り出して胴部を製作したもの10個、インコネル管材を一度固溶化熱処理を行った後、目的寸法に削り出し仕上げて胴部を製作したもの10個で、両端部分（鏡板相当部分）はいずれもインゴットから削り出して製作したものである。

試験は加熱炉内をHeで置換後温度を800℃に上昇させ、次いでVaを開き加圧管を通して100 kgf/cm²の加圧（N₂）を行い記録計で確認の後Vaを再び閉じ、Vcを開放する。

このときVaが閉じているので夫々の供試験電離箱耐圧容器内圧力は100 kgf/cm²（800℃）に保たれておりこれが圧力変換器を通して記録計に記録されているが、供試験耐圧容器に破損・漏洩が生じた場合は内部圧力が低下し90 kgf/cm²以下になった時点で警報が鳴り、試験は打ち切られる。また1日につき1%の圧力低下は大略 3×10^{-5} Atm・cc/secの漏洩に相当し、これ以内の漏洩はバルブ及び配管継手部分等の漏洩と考えられるので毎日の点検時にわずかの圧力低下のものについては加圧して補正を行い、常時100 kgf/cm²が印加されるようにした。第1回試験は加圧パイプ取付溶接構造設計のミスで失敗、第2回試験は先端部鏡板上のチップオフ管プラグ台座の根本部分の加工が図3.10の如くrがつけて無かったので、ここに内圧による応力が集中し応力腐蝕割れを生じた。これらの失敗は見落していた問題点を明確にし補正された点で極めて有用であった。結局3回目の試験により目的の試験を終了することができた。

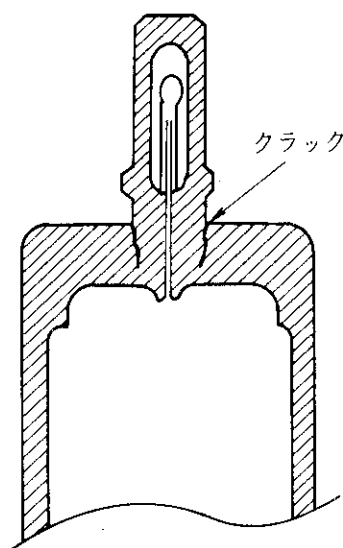


図3.10 高温耐圧試験で生じた応力腐蝕割れ

試験（800℃，100 kgf/cm² 長期加圧試験）の結果，

1) 耐圧容器の破損部分は胴部の Creep rupture によるもの（材料的限界）であり、従って溶接構造設計等はほぼ満足できることが確認出来た。

2) インコネルインゴットから削り出して製作した胴部と、パイプ材を固溶化熱処理した後、削り出して作製した胴部の高温 Rupture に対する強度には有意の差異が無かった。

3) すべての供試体について Rupture に至った時間は solution treated（1121℃/2h AC）のインコネル600の Stress 対 Rupture Life 曲線の上側にあり、材料強度的に若干の余

裕があることがわかった。材料データを用いた計算では 800 °C, 内圧 100 kgf/cm² では 175 h となるが実験では最小のものでも 330 h であった。

4) 内圧が 800 °C 27.5 Atm に対して Rupture time は約 56 万時間と推定される。これは図 3.11 に示すように 10, 10², 10⁴, 10⁵ hr の Rupture Streas のデータより外挿したものである。また Streas 又は内圧に 20% の安全余裕をとった場合でも約 18 万時間である。

以上の計算及び検証実験により、核分裂計数管型電離箱の外殻容器の高温耐圧強度、構造の設計の妥当性を確認できた。

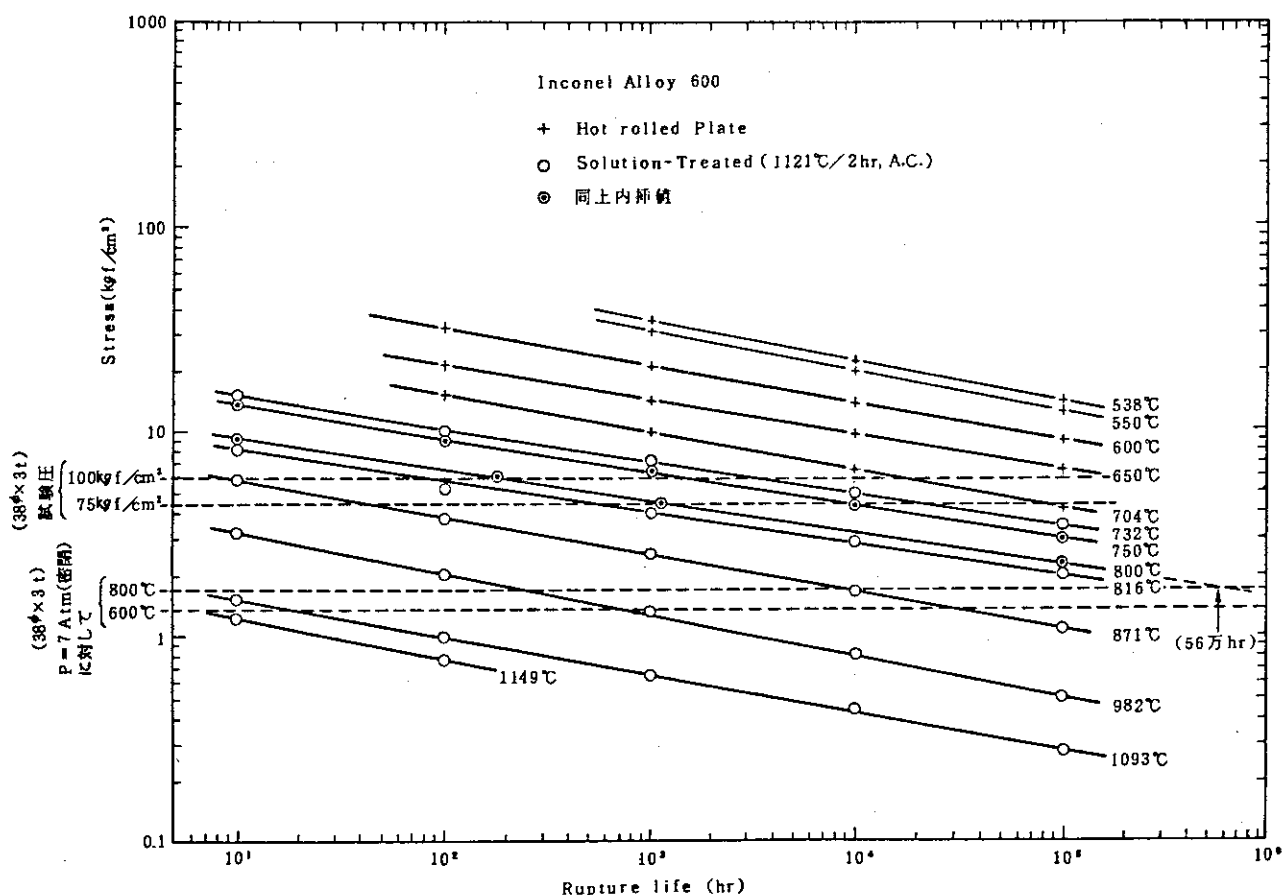


図 3.11 高温耐圧試験によるラプチャ時間の推定 (外挿)
 (Lupatur Lifeの基本データは International Nickel Company 社のデータによる)

4. 設計と製作

4.1 基本概念設計

本章では前章までに調査、検討および研究を行った高温用核分裂計数管型電離箱の構成要素（材料、部品）に関する諸データをもとに、目標とする高温用核分裂計数管型電離箱の設計が成立するかどうか、また残された問題（不明な問題も含む）がある場合どのような組み合わせが最も困難性のポテンシャルを下げ得るか等について基本的な検討を行った。

検討すべき構成要素の関係図を図 4.1 に示す。

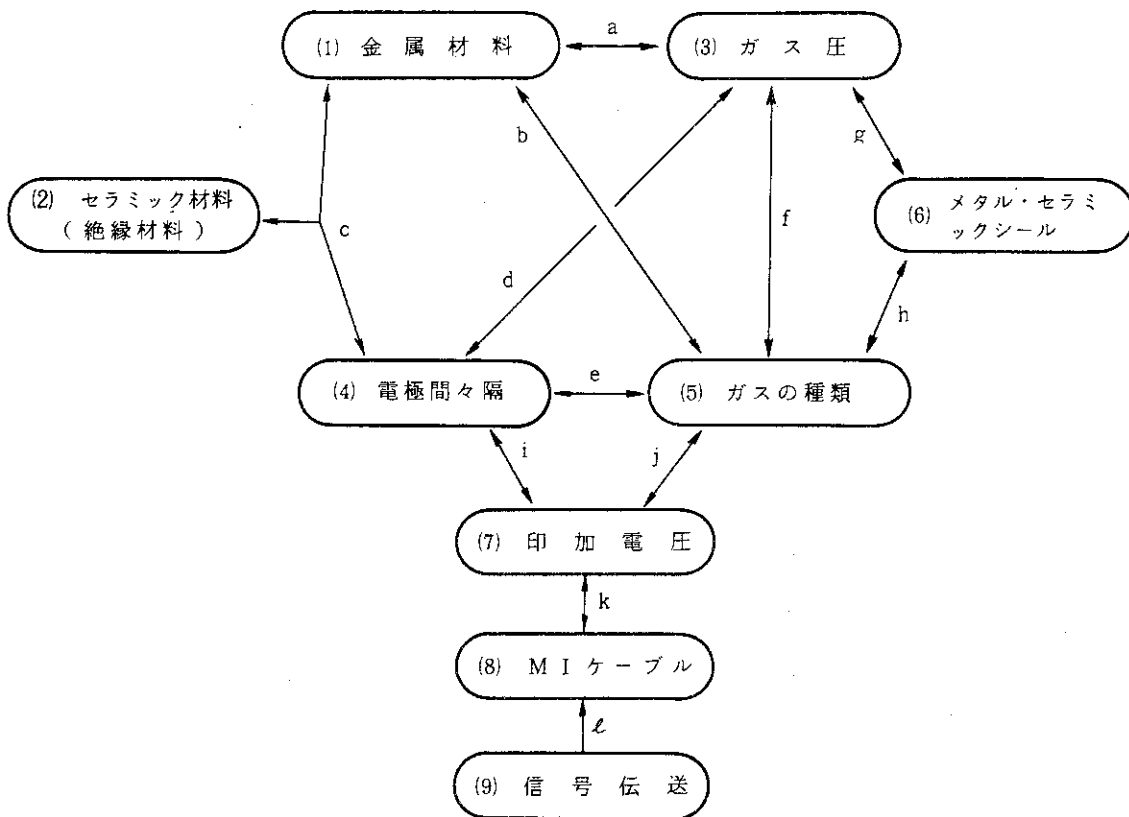


図 4.1 基本概念設計で検討すべき構成要素の関係図

検討手順と個々の結論は以下のごとくである。

4.1.1 MI ケーブルと設計電圧

3.1.3 で述べたように高温で目標性能の核分裂計数管からの出力パルス信号を伝送⑨するために内部導線及び内部シースが銅のMI ケーブルを用いざるを得ない(1)。

この場合パルスブレイクダウンを生じない範囲で使用するためのMI ケーブル⑧の耐印加電圧は 250 V 程度であるので設計印加電圧⑦は余裕をとって 200 V 程度に選ぶことが妥当である(k)。

4.1.2 使用電離箱ガス

1) ガスの種類⑤の選択の可能性として(1)純アルゴンガスの場合と(2)アルゴン+窒素の2種類があることを既に3.1.8で述べた。

印加電圧を200Vとし、純アルゴンを用いた場合は、目標とする性能を得るため電極間隔④を0.28mm(関係e)、ガス圧③を0℃で25.3Atm、800℃で94.3Atmにする必要があるが(関係f)、電極間隔0.28mmを満たすことは金属と絶縁用セラミックスの熱膨張係数の差(関係c)の点からみて困難でかつこれを実現できる見通しが無い(3.1.5)。従ってガスの種類⑤はアルゴン+窒素とせざるを得ない。

2) 3.1.8のAppendix中の図A3.9～A3.13から見ると窒素1%のアルゴン混合ガスを用いた場合最も大きい電子ドリフト速度を得ることができる。しかしこの場合若干の窒素濃度の減少で大幅に電子ドリフト速度が低下すると考えられる。

3) このため窒素の混合比を若干増加し、窒素の減少に対する電子ドリフト速度の変動があまり大きくないように、また窒素が電極の金属に吸収されて若干減少してもドリフト速度は初めは大きい方へ変化し寿命を延ばすよう考えて、アルゴン中の窒素の混合比を5%に選んだ。(51)～(54)

4.1.3 使用金属材料

電離箱ガスの種類⑤としてアルゴン+窒素混合ガスを採用するとすると金属材料①は耐酸化性の大きい高ニッケル含有耐熱合金のうちコバルト、マンガン含有率の比較的少ないインコネル600合金又はNimonic 75合金又はその相当品が適している(関係b)。(51)～(54)

4.1.4 電極間隔とガス圧の設計値

ガスの種類⑤としてアルゴン+窒素混合ガスを採用した場合、印加電圧200Vで電極間隔④は0.5mm～1mm程度(関係e)、ガス圧は標準状態(0℃)で4～7気圧、800℃で14.9～26.1気圧で目標とする特性が得られ(関係f)寸法構造的に実現可能な範囲である。

4.1.5 核分裂計数管型電離箱諸特性の設計計算

核分裂計数管型電離箱の設計における基本的諸性能を計算する式及び図表は、既に2章及び3章で用意した。

即ち出力パルス電荷の最頻値は2章(2.25)式、ガス中の電子のドリフト速度はAppendix図A3.9～A3.11、電子電荷収集時間は(2.6)式、出力電流波高の最頻値は(2.5)式、単位塗布面積及び塗布厚さに対する中性子感度は(2.30)式及び図2.13に示してある。

また、電極間静電容量は(2.14)式、電極間静電容量、MIケーブルの特性抵抗を考慮した場合のMIケーブルへ出力される出力パルス電流の波高値は(2.16)式で計算することができる。これらの式、図表を用いて5つのケースについて基本的特性の試設計を行なった。試設計の結果得られた諸特性一覧を表4.1に示す。

計算では印加電圧は200V、MIケーブルの特性抵抗 r_0 は33Ωとした。また出力パルス電荷 Q_e は軽い核分裂片による生成電荷 q_e と重い核分裂片による生成電荷 q_h の平均値として計算した。

表 4.1 高温用核分裂計数管型電離箱の基本的特性の設計値

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
d (mm)	0.5	1	1	1	1
p (atm abs.)	7	7	5	5	4
W_e (10^6 cm/s)	1.91	0.96	1.34	1.34	1.67
T_e (ns)	26	105	75	75	60
Q_e (10^{-13} C, mode)	0.58	1.09	0.81	0.81	0.65
i_p (μ A, mode)	4.4	2.08	2.16	2.16	2.17
S_n ($\text{counts} \cdot \text{s}^{-1}$) / ($n \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.12	0.12	0.12	0.3	0.12
C_d (pF)	175	100	100	220	100
i_{od} (μ A, mode)	2.73	1.85	1.86	1.65	1.82
Remarks:	(FX-2A)	(FX-2)	(FX-2C)	(FX-3) & (FX-2B)	(FX-2D)

印加電圧 200 V

MIケーブル特性抵抗 (r_0) 33 Ω

電極間間隔は 1 mm を選定したが、更に高性能の核分裂計数管型電離箱の試作を試みるため、この種の電極サイズでは限界と考えられる 0.5 mm の電極間間隔の場合についても計算した。

表 4.1 の Case 2, 3, 4, 5 を比較してみると、電極間間隔が同じならば、封入されるガス圧や電子ドリフト速度が異っていても、電極に誘導されるパルス電流波高 i_p は同じ大きさで、また電極から MI ケーブルに対して出力されるパルス電流波高 i_{od} もほぼ等しいと云うことができる。

従ってパルス出力電流が同じで電荷収集時間が短い方がよい時は単にガス圧を低下させればよいことがわかる。しかしこの場合出力パルス電荷は当然小さくなるので、中性子感度を上げるため電極面積を大きくして、電極間静容量が大きくなったときは MI ケーブル側に実際に出力される電流の大きさ i_{od} と電極間の電子電荷による誘導電流 i_p との比はガス圧が低い程小さくなる。

中性子感度を大きくしたときは、 i_p は変わらなくても i_{od} が小さくなる。これは電極間静容量の増加に伴うものでその例は Case 3, Case 4 である。電極間間隔を 0.5 mm に設計した Case 1 では $T_c = 26$ ns, $i_p = 4.4$ μ A と大変優れた計算値が得られているが電極間間隔が狭くなったため電極間静容量 C_d も 2 倍近くまで増加し C_d と r_0 の積できる時定数による積分によってケーブル側に出力される出力電流の振幅は 2.73 μ A まで減少してしまうことがわかる。

4.1.6 メタルセラミックシール部の高温高圧保護対策

メタルセラミックシール⑥は 3.1.4 で述べた如く常温から 750 $^{\circ}$ C の温度サイクルに耐える構造のものを開発したが、この構造においては 3.1.4 で説明した如くメタル部分の厚さを厚くできな

いので高温で大きな耐圧性を持たせることは困難である。そこで、高温における気密性と耐圧性の要求を分離するよう工夫し次の如き電離箱の構造とした。

図 4.2 にその原理的構造図を示す。

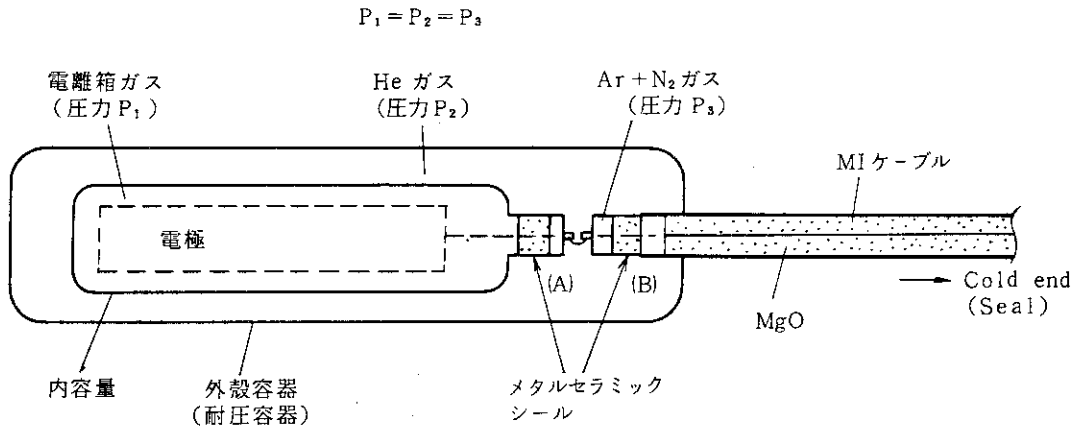


図 4.2 試作核分裂計数管型電離箱の原理的構造

核分裂計数管型電離箱の検出器内容器中に電極がありこの電極のリードがメタルセラミックシール(A)を通して引出されている。内容器中には P_1 の圧力の電離箱ガスが充填されている。このままで内容器が高温になれば内部圧力 P_1 が上昇し、またメタルセラミックシール金属部の強度が高温下で低下しメタルセラミックシール部の破損が生じるが、図に示すように内容器の外側に更に一重の高温耐圧性の外容器を取付け内容器と外容器間に He 等のガスを圧力 P_2 で充填し、 $P_2 = P_1$ にする。これにより常温でも高温でもメタルセラミックシール(A)の内側と外側の圧力差は 0 となるからメタルセラミックシールは耐圧性を必要としない。

更に MI ケーブル側に取付けられたメタルセラミックシール(B)の場合も同様にその内側に $P_3 = P_2$ の圧力を充填してから Tip off しておけば、マグネシアの高密度充填の MI ケーブルは先に 3.1.3 で述べた如くガスの透過率は極めて少いので、大略 $P_3 = P_2$ に保つことができる。

この様にメタルセラミックシールには耐漏洩性のみを要求し高温耐圧性を要求しない構造にすることによって、高温メタルセラミックシールの開発の困難性を克服することができた。(55) ~ (59), (62) (63)

4.1.7 二重電気遮蔽

また上述の内容器と外側の耐圧容器から成る二重容器構造を更に積極的に活用した。即ち内容器と外側圧力容器間の必要個所に電気的絶縁物を挿入して絶縁すると同時に、2重シールド型の MI ケーブル即ちトライアキシャル型 MI ケーブルを取付けて、内容器は MI ケーブルの内シースへ接続して High quality ground とし、外側圧力容器は MI ケーブルの外シースに溶接する。この様に電離箱全体を MI ケーブルも含めて 2重シールド構造にすることによって外部からの電気障害雑音を大幅に低減できる構造とした。

4.1.8 電離箱容器と陰極の分離

従来の核分裂計数管型電離箱は構造を簡単化し製造を容易にするため陰極と容器が共通となっていることが多いが、本開発ではパルス信号と dc 信号,あるいは,パルス信号とキャンベリング信号を,同時に別々の信号線から取出したり,また図 4.3 に示すよう差動モード (Push-Pull) で使用することによってコモンモードの外來雑音を除去すると共に増幅器の S/N 比も $\sqrt{2}$ 倍向上できるなど実用上多大の有用な使用方法ができる可能性を持たせるために陰極電極は内部容器とも分離して設置する構造とした。

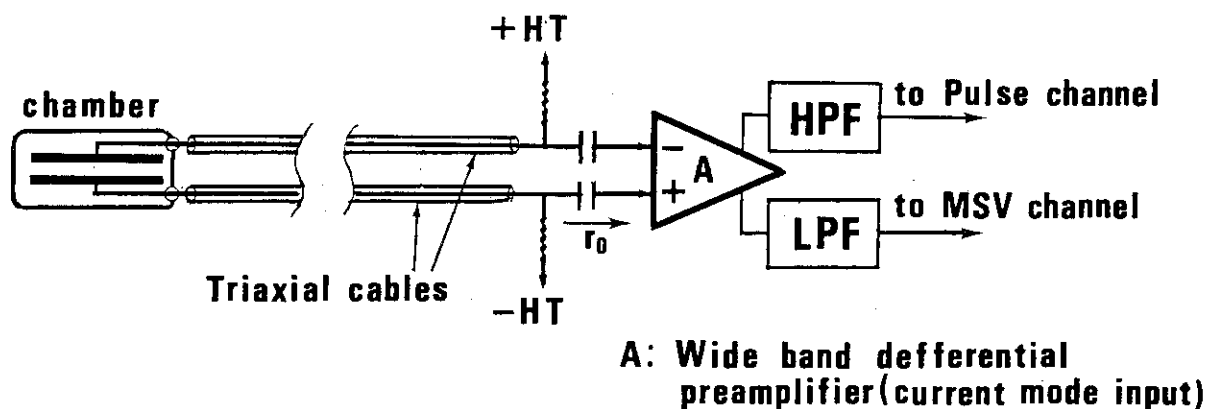


図 4.3 差動モード (Push-Pull) 型信号伝送, 増幅

4.1.9 概念設計検討のまとめ

以上の検討結果を要約すると

1. MI ケーブルには銅芯線-銅内シース-SUS 321 又はインコネル 600 の外シースのトライアキシャルケーブルを使用する。
2. 核分裂計数管型電離箱の使用印加電圧は 200 V とする。
3. 電離箱ガスは 5%窒素+アルゴンの混合ガスとする。
4. 電極, 電極保持構造物, 電離箱容器に使用する金属材料はインコネル 600 又は Nimonic 75 相当のニッケル系耐熱合金とする。
5. 絶縁用材料には高純度アルミナセラミックスを使用する。
6. 電極間間隔は 0.5 ~ 1 mm の間で設計する。
7. 電離箱ガスの圧力は 4 Atm ~ 7 Atm (15.7 Atm ~ 27.5 Atm at 800 °C) とする。
8. 電極上への塗布ウランは 93%濃縮ウランを用いるものとし塗布厚は 1.5 mg/cm² とする。
9. メタルセラミックシールは 3 章 3.1.4 で述べた新開発の形状のものを使用する。
10. メタルセラミックシールの高温における圧力負荷を軽減しその健全性を維持するため, メタルセラミックシールのついている電離箱の内容器の外側に耐圧容器を設け内容器と外容器の間に He ガスを充填しその圧力を内容器を同じ圧力にする。
11. 同技術を MI ケーブルの電離箱側端末の封止にも使用する。
12. 2 重容器構造を更に有効に利用し, 両容器間を電氣的に絶縁することによって電氣的に 2

重シールド構造とする。

13. 陰極は容器と独立に設け差動モード (Push-Pull モード) の作動も可能とする。

これらの結果を総合することによって、基本的概念として高温耐熱性でかつ高性能の核分裂計数管型電離箱が実現できるおおよその見通しが得られたわけである。

しかし窒素混合アルゴンガスと金属材料との高温高放射線下の両立性については、その様な環境試験を部品段階で行うことは実験上困難があり、結局電離箱を作って試験することとなるので、この段階では現状における“Best”の組合せを選び試作試験を通して研究を進めることとした。

4.2 試作

1章から4章4.1にわたって述べた計算あるいは実験による検討によって、目標とする性能の高温核分裂計数管型電離箱を具体的に製作する進路と大体的見通しが得られたので、その試作を行った。

試作では基本概念設計の結果を全面的に採用した。図4.4には試作核分裂計数管型電離箱の主要部分の概念的構造図を、図4.5には実際の試作電離箱の詳細断面図を示す。

4.2.1 構成材料及び部品

(a) 金属部品及び処理

特殊部品を除きすべての金属部品はインコネル600又は低コバルトインコネル600相当合金を使用して製作した。

3章3.1.9で述べた様に電極及び容器胴部は固溶化熱処理をした管材から加工しても、固溶化熱処理をしたムク材から加工することも大差がない結果が得られているが、通常市場では希望するサイズ、厚さのインコネル600管材の必要な量をいつでも入手できると云う環境がないので、数回にわたる試作のほとんどは、すべての部品について固溶化熱処理したインコネル600のムク材から切出し、削り出し又はくり抜き等の加工によって製作した。

加工後の部品は有機溶媒による洗滌脱脂後窒素雰囲気中の焼鈍炉で950℃、3時間のアニールを行った後再び寸法検査を行い、許容誤差内の部品即ち焼鈍による歪みを含めて許容値以内であったもののみを使用した。

当初は、アンモニア窒化炉で全部品の表面の窒化を実施する予定であったが、あいにく利用できる窒化炉がなく、インコネル合金はドライな窒素中ではほとんど窒化が起らないと云われていることも勘案して、止むを得ず特別な表面窒化処理を行わずに試作をすすめ、後述の如く各種の試験を行い、封入ガス中の窒素に関する特性の変化を観察した。

この結果、インコネル600を用いた場合特に窒化処理工程を入れなくてもN₂-Ar混合ガスを用いた核分裂計数管型電離箱は高温でも安定に作動することが明らかとなり、当初概念設計で考えたシナリオの中から窒化工程を取除いた。(49)(50)(51)(56)(57)

電離箱中に使用したバネはただ1個でこれは図4.5の左方の外側容器鏡板つけ根で内部容器を押し込んでいる部分に用いており、A286合金で作った皿バネである。この皿バネは組立時に押えとえとして用いているが使用中にへたってきたりしても次に述べる理由で全く問題が生じない構造となっている。

Conceptual structure of the FX-2 series counter-chambers

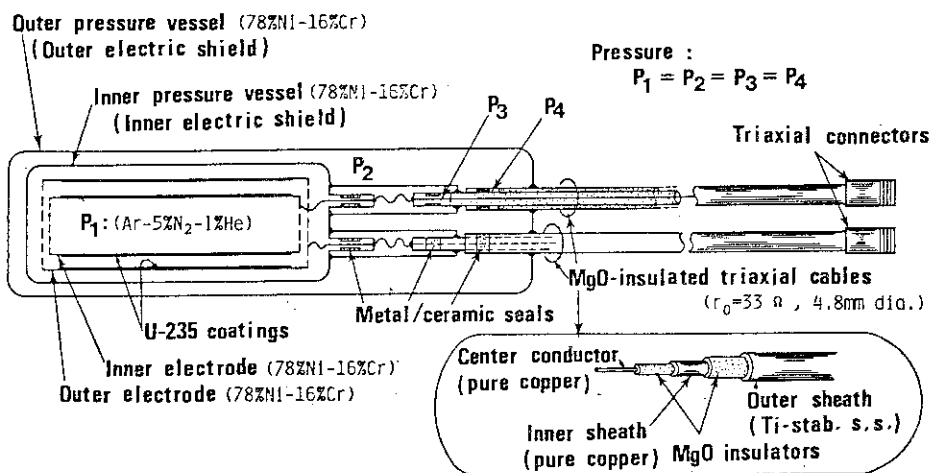


図 4.4 試作核分裂計数管型電離箱の構造概念図

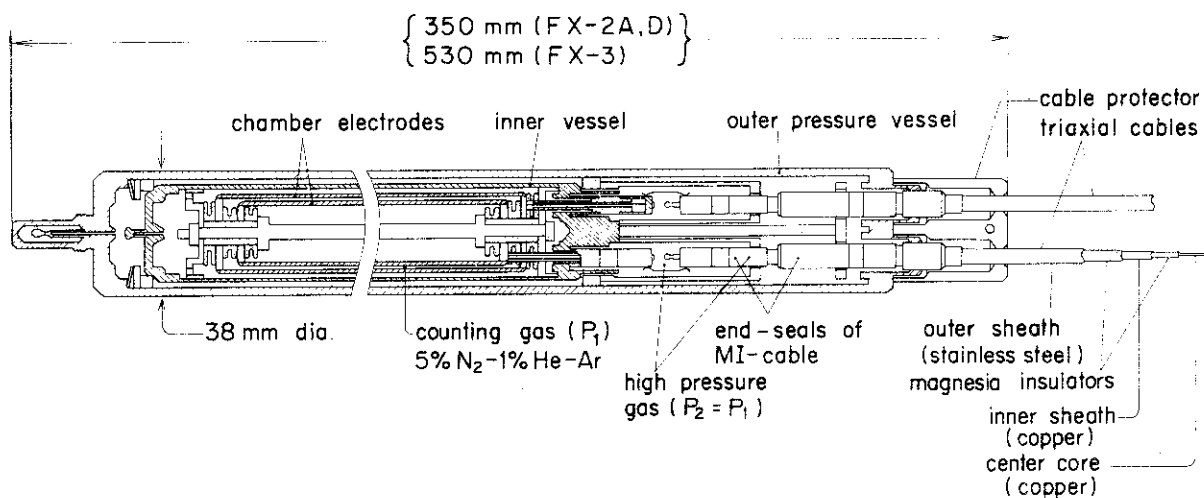


図 4.5 試作核分裂計数管型電離箱の詳細断面図

電離箱内の2つの電極、内部容器、外部容器、電極保持中心棒などは金属等に比べて熱伝導率のあまり良くない内部ガスを間にはさんで組立られており、電離箱外側の温度が上昇又は下降する際、夫々の部品間に温度的に温度差が生じるので、この温度差による熱膨張の差によって各々の部品長が違ってくる。この軸方向の膨張差は長さ20 cm、温度差200℃の場合で0.6 mmにも達する。この膨張差を逃すため部品は軸方向に対して、どちらか一端のみで固定保持し別の一端をスライド構造にすることにより、全くスプリングを用いることなく問題を解決している。(52)(53)(54)(56)

(b) 絶縁部品及びメタルセラミックシール部

絶縁部品はMIケーブル内部のマグネシア充填物を除きすべて99.5%純度のアルミナで製作した。

内部容器及びMIケーブル端末のメタルセラミックシールは3.1.4で述べたテーパ型封着金属を用い、その封着金属材料は32%Ni-17%Co-Fe合金を使用した。取付前の封着金属部の熱処理温度は900℃ 1hr、1100℃ 1/4hr (H₂中)である。

メタルセラミックシール部のセラミックスは92%アルミナでメタライズはMo-Mnである。

4.2.2 電離箱ガスとその充填

電離箱内に封入したガスは既に述べた5%窒素混合のアルゴンガスであるが、実際にはこれに1%のHeガスを混合して、5%N₂-1%He-Arガスを用いた。

この1%混合のヘリウムは電離箱ガスの諸特性を損うことなくかつ、内部容器にガスを充填し、チップオフした後にチップオフ部も含めてヘリウムリーク試験の実施を可能とするもので製作工程管理を容易にし、製品の歩留り及び信頼性の格段の向上を可能にするものである。

封入用電離箱ガスの混合、精製、充填を行うために製作した装置の概要を図4.6に示す。

電離箱の内部容器と外部容器はアルミナセラミックスのスペーサで電氣的に絶縁すると共に容器間の空間にはヘリウムガスを内部容器内電離ガスと同圧で充填した(53)(54)(55)(56)(57)。ヘリウムガスを用いた理由は、ガスのうちでは熱伝導率が大きく、雰囲気温度変化に対して外殻容器と内部容器及び部品の温度差が若干は小さくなると共に、高出力レベルでは濃縮ウランや電極の自己加熱の熱を外部へ放出しやすいことによる。また完成後のHeリーク試験も容易である。

ヘリウムガス充填後の外部容器先端のチップオフ管保護のため図4.5に示すように先端部にプロテクタを溶接している。

4.2.3 濃縮ウランの塗布

電極上へのウランの塗布は、硝酸ウラニル溶液を使用しそれを電極上へ表面張力を利用して塗布し、乾燥後850℃で酸化焼成を行いU₃O₈に転換している。ウラン塗布厚の測定管理はSSD (Silicon Surface Barrier Detector)を用いたα線測定によって行い、塗布厚誤差±5%を目標に管理した。

4.2.4 MIケーブルの取付

MIケーブルは3.1.3に述べた芯線-銅、内シース-銅、外シース-インコネル又はSUS-321、

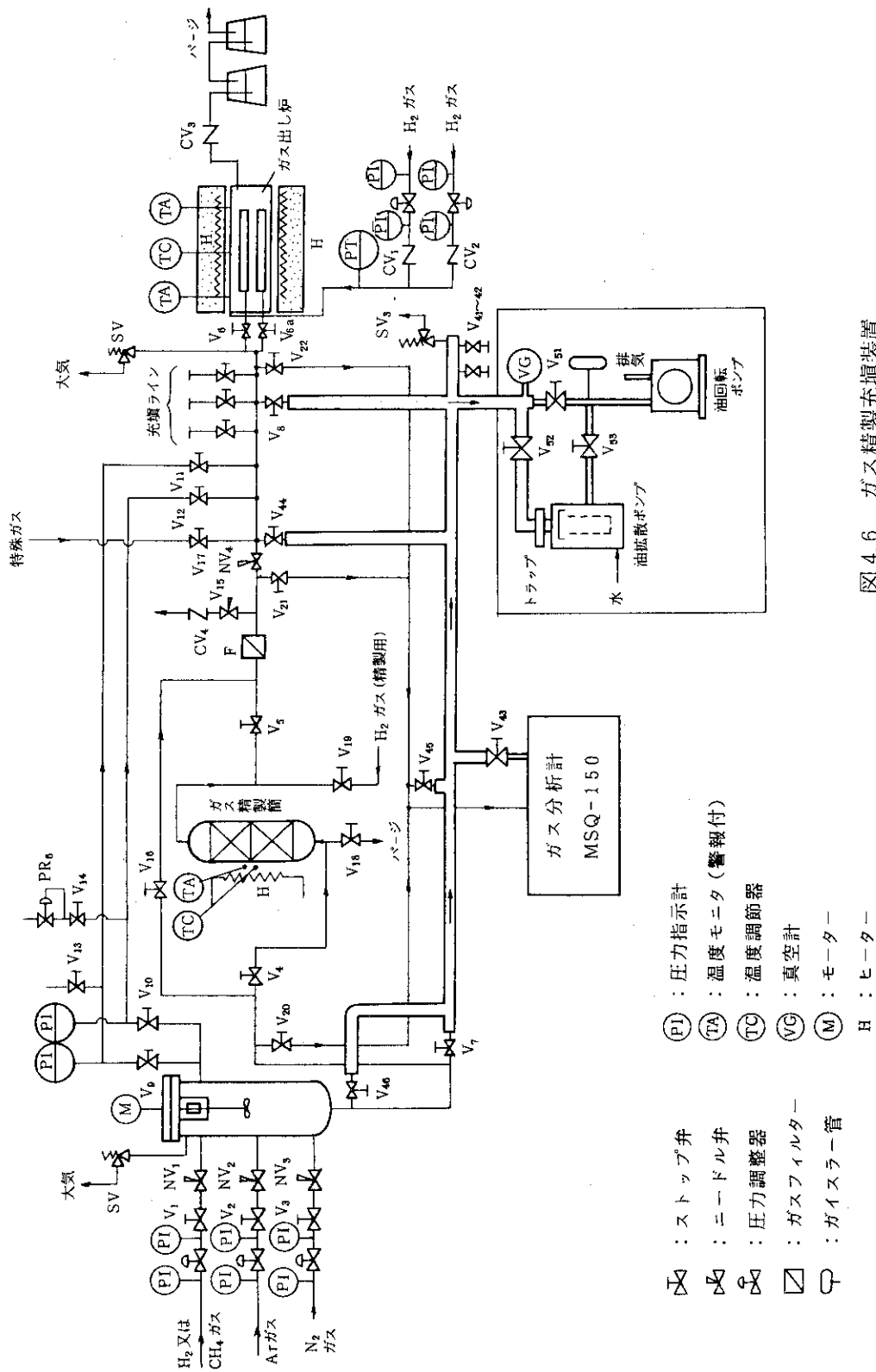


図 4.6 ガス精製充填装置

- ⊗ : ストップ弁
- ⊘ : ニードル弁
- ⊕ : 圧力調整器
- ⊚ : ガスフィルター
- ⊚ : ガイスラ-管
- (PI) : 圧力指示計
- (TA) : 温度モニタ (警報付)
- (TC) : 温度調整器
- (VG) : 真空計
- (M) : モーター
- H : ヒーター

外径 4.8 mm のトライアキシャル型 MI ケーブルを電離箱の一端に溶接で取付けて使用した。

また電離箱の MI ケーブルとの溶接取付部には MI ケーブルの曲げによって大きな力がかかるので、MI ケーブルのつけ根の疲労破損を防ぐため図 4.5 の右寄りに示すようなプロテクタを取付けてこれを保護した。

4.2.5 工程途中検査

試作工程の途中の各々の部品の完成した時点で個々の部品について検査を行い、設計通りに仕上がっているかどうか確認した後、次の工程をすすめた。

溶接部の検査は全数 X 線による検査を行うと共に、既に 4.2.2 で述べたようにあらかじめ内部に封入又は混入した He によってヘリウムリーク試験を行い漏洩の無い事を検査した。

また静電容量の測定によってリードの接続状況及び電極間間隔の確認を行った。

MI ケーブルの特性インピーダンスはリフラクトメータを使用し全長にわたって $33\Omega \pm 3\Omega$ であることを検査した。

検出器及び MI ケーブルの絶縁抵抗及び漏洩直流電流は、本高温核分裂計数管型電離箱が直流モードで使用することを目的としていないので必要以上の抵抗値があればあまり重要ではないが、製造工程のチェックポイントとして極めて有用なので対接地絶縁抵抗が $10000\text{ M}\Omega$ 以上（常温）及び $1\text{ M}\Omega$ 以上（ 600°C ）を検査の目安とした。但し、MI ケーブルの内シース、外シース間は電位差ゼロで使用するのであまり高い絶縁は必要なく、常温で $1000\text{ M}\Omega$ 以上を合格とした。

信号電極-高圧電極間の漏洩電流も直流モードで使わない限りあまり重要ではないがこれも工程管理上の意味から常温で 0.1 nA 、 600°C で $0.2\text{ }\mu\text{A}$ 以下を規準とした。この漏洩電流はウランからの α 線電流（飽和領域では印加電圧によらず一定）が重畳しているので飽和領域の範囲で 2 点の電圧で電流を測定しその差をとってもとめる。

パルスブレイクダウンノイズは 250 V で 0.1 cps 以下を判定規準とした。

以上の製造工程管理にかかる電氣的チェックポイント以外は次章に述べる試作後の性能試験の項で詳しく述べる。

4.2.6 型名と試作仕様の対応

型名と試作仕様との対応は図 4.7 に示す如くである。尚、略号は次の通りである。

L : 検出器長	ℓ : 電極長
d : 電極間間隔	P : ガス圧
S : 中性子感度	

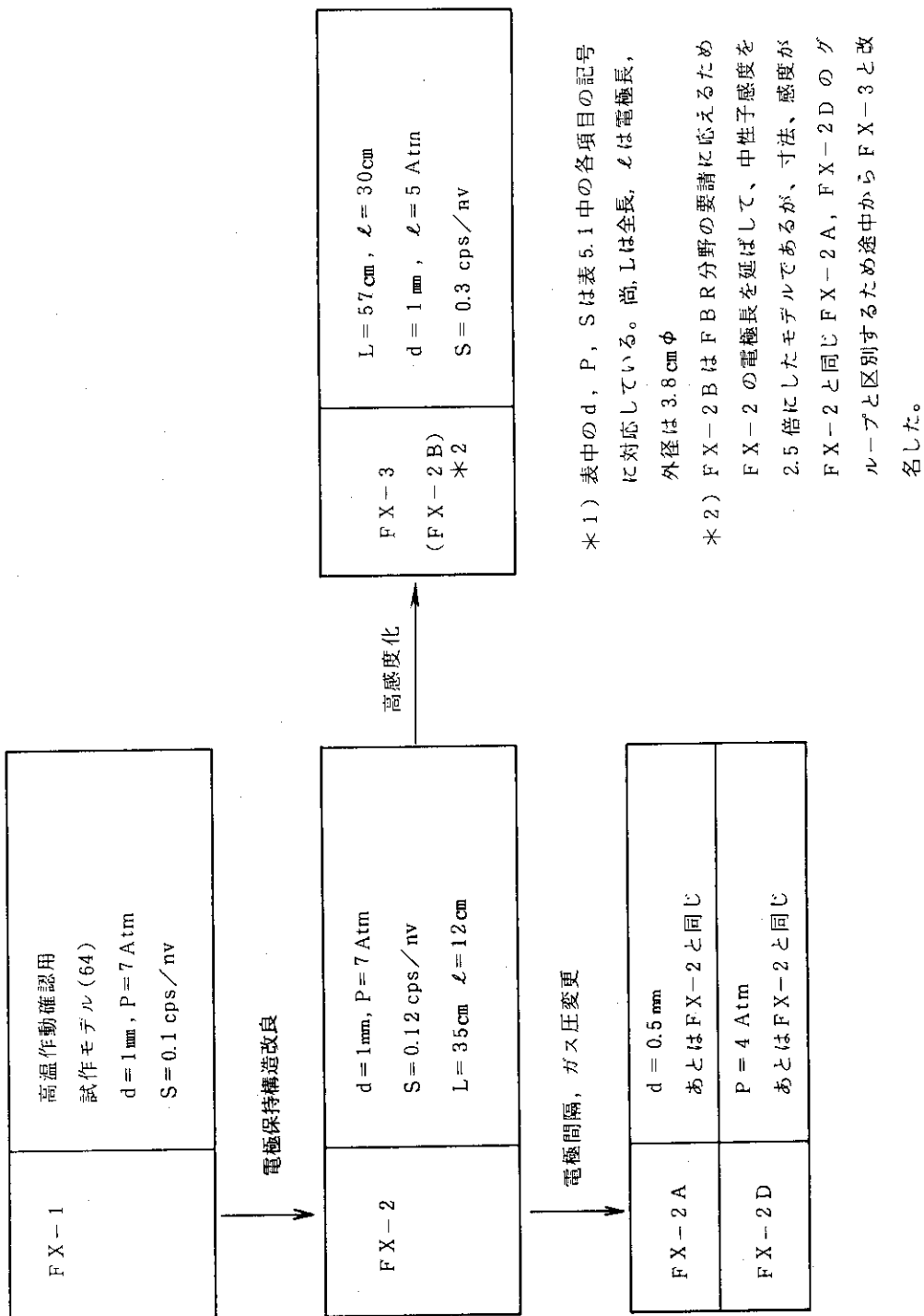


図 4.7 型名と設計値との対応

4.2.7 外観等

図4.8に試作した各種高温用核分裂計数管型電離箱の外観写真を示す。

図4.9はMIケーブルの端末（コールドエンド）に取付けたトライアキシャルコネクタの写真である。

試作した各種高温核分裂計数管型電離箱の表面はインコネルであるから銀色の光沢があるのが普通であるが写真では赤褐色をしている。この理由は、完成時高温試験を空気中で行っているため着色したものである。

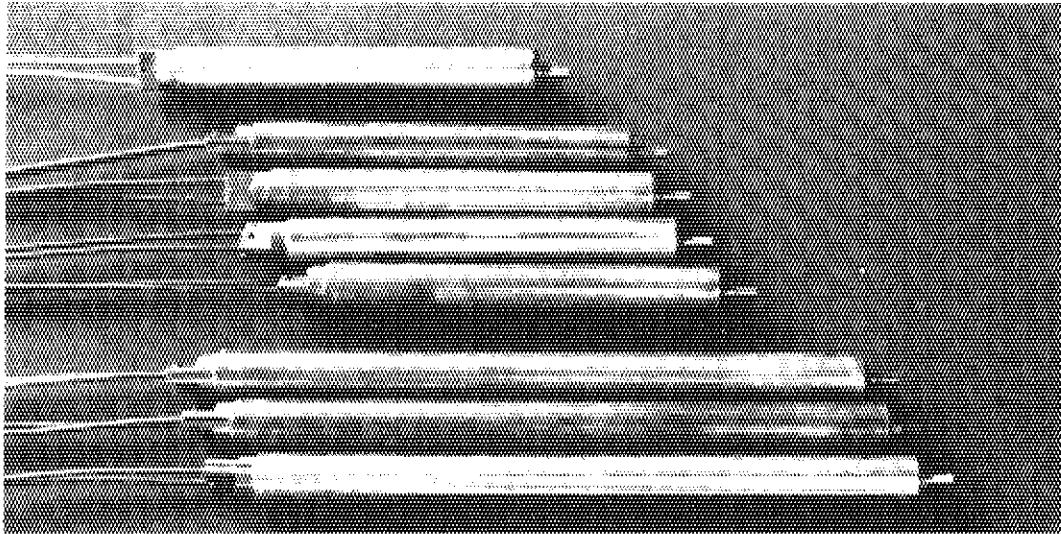


図4.8 試作核分裂計数管型電離箱の写真
上からFX-2, FX-2A(2本), FX-2D(2本), 及びFX-3(3本)

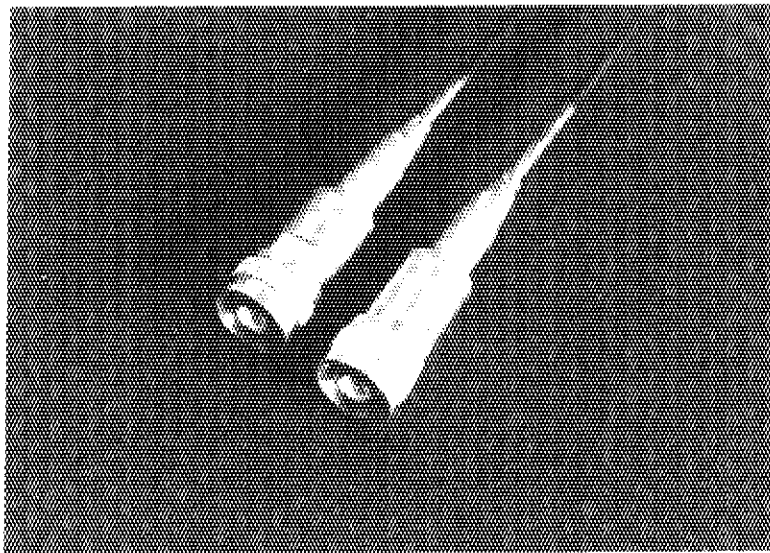


図4.9 トライアキシャルコネクタ部の写真

5. 試作高温用核分裂計数管型電離箱の炉外特性試験

本特性試験の主要な目的は、試作を通して高温用核分裂計数管型電離箱の開発が各々の目標項目毎にねらい通り成功したかどうかを順を追って確認することである。即ち、

- 1) 試作した核分裂計数管型電離箱は600°C以上の高温雰囲気で作動するか
- 2) 高温雰囲気で目標とする特性（パルス電流波高、パルス電荷波高、電荷収集時間、信号対雑音（S/N）比、中性子感度等）が得られるか
- 3) 上記特性について、常温～高温までの目標とする全温度範囲で、実用上問題となるような温度依存性が無いか
- 4) 高温、照射等に対して特性は変動又は劣化しないか
- 5) 原子炉の核計装用中性子検出器として必要な性能が得られるか
- 6) 原子炉核計装中性子検出器として目標の作動環境で長期間安定に作動するか

等の各項目についてステップバイステップで試験し確認することが必要である。

これらは一般製品の完成試験とは全く目的を異にしているので、その目的に適合した試験方法を立案する必要がある。

すなわち、一般製品の完成試験は個々の基本的な性能は、工程書通り製作すれば問題が無いことがあらかじめ判っているので、総合的な特性試験即ち印加電圧に対するプラトー特性や特定の中性子源に対する計数率等製造の結果をチェックするいくつかの特性を計れば充分であるが、各々の必要項目について全数の製品の試験を行う必要がある。

これに対して開発試験では総合的性能を左右する個々の要因が未知のものでありまだ不確実であるため、すべての重要な基本的要因について個々に詳しく測定し、その成果又は問題点を的確に評価しなければならない。

しかし一方個々の試験される要因に独立性があるときは、一つの要因が確認又は実証されれば原理的な事項については次の試作試験では再び同一の項目については再測定せず、変化させたパラメータのみについて試験、検証すればよいと考えられるので、これによって試験計画を合理化し、個々の測定を詳しく行うよう諸実験をすすめた。

ある種の試作モデルでは試験してあっても、他の試作モデルでは試験されない項目があるのはこのためである。

主要な試験項目は以下の通りである。

- i) 出力パルス電流波高分布
 パラメータ：温度、印加電圧
 電極間間隔／ガス圧等
- ii) 出力パルス電荷波高分布
 パラメータ：同上
- iii) 電荷収集時間
- iv) 中性子感度

- V) γ 線感度
- vi) プラトー特性 (対印加電圧)
- vii) 高温炉内照射挙動 (加速寿命試験)
- viii) 過熱時特性 (事故時対応)
- ix) 炉内長期実作動挙動

これらの特性については、現在迄に局部的な試験結果を国際会議、学会誌、原子力学会口頭発表、研究業務報告書 (JAERI-memo 等) などにより報告してきたが、ここで全体的にとりまとめて炉外試験については本章で、炉内試験については次章で主要な項目について報告する。^{(62)~(76)}

5.1 出力パルス電流波高分布と最頻値

既に1章および2章2.1節で述べたように最近では核計装起動系の性能を向上させるため、中性子計数管の出力信号は、立上り時間の速い電流パルスそのまま伝送し、増幅し、更に検出器電流パルスのパルス幅より狭いパルス幅に整形して計数する方法が使用される。これによって一昔前に核計装に用いられた電荷増幅又は電圧増幅の場合の立上り時間より短いパルス幅に整形されるのが普通である。

しかし、この様な狭いパルス幅の信号を取り扱うことができるパルス系は広い周波数帯域を必要とし当然のことながら増幅器雑音パワーも帯域に比例して増加するので計数管のパルス電流が大きくなければ信号の増幅系において十分な信号対雑音比は確保できない。

従って、最近の技術においては、起動系に使用する計数管の、信号の大きさを示す指標は従来のようにパルス電荷ではなく、パルス電流の大きさである。

このためパルス電流の大きさとその安定性は核分裂計数管型電離箱を評価する上で極めて重要な試験項目である。

5.1.1 測定装置

図5.1にパルス電流波高測定システムの構成を示す。核分裂計数管型電離箱からの信号はトライアキシャルMIケーブルで伝送され、更に5mのポリエチレン絶縁のトライアキシャルケーブルで電流パルス増幅器 (CPA) に伝送される。CPAの出力信号はパルス整形回路 (PSA) で整形し、高速ストレッチャー (FS) および通常のストレッチャー (LGS) で多重波高分析器に受け入れ可能な500 nsのパルス幅の矩形波に整形している。

使用した電子回路機器名は図中にしめしてある。システム中には市販品にはない高性能又は特殊な電子回路をいくつか使用している。図中の "Current pulse amplifier" は本核分裂計数管型電離箱の試験のため開発した低雑音広帯域のパルス増幅器で、立ち上がり時間約5 nsである。

高性能の核分裂計数管型電離箱と言ってもその出力電流パルスの最頻値は尖頭値で1.5 μ A ~ 2.6 μ A程度であり、増幅器の入力抵抗はケーブルと整合のため、その値は33 Ω であるから入力信号電圧としては20 μ V ~ 100 μ V P-Pと極めて小さい。例えば33 Ω の理想抵抗が発生する熱雑音 $V_{rms} = \sqrt{4kTR\Delta F}$ は帯域 $\Delta f = 50$ MHz ($tr \simeq 7$ ns) で52.3 μ Vrmsあり、上記信号の広帯域増幅の困難さは容易に想像できよう。

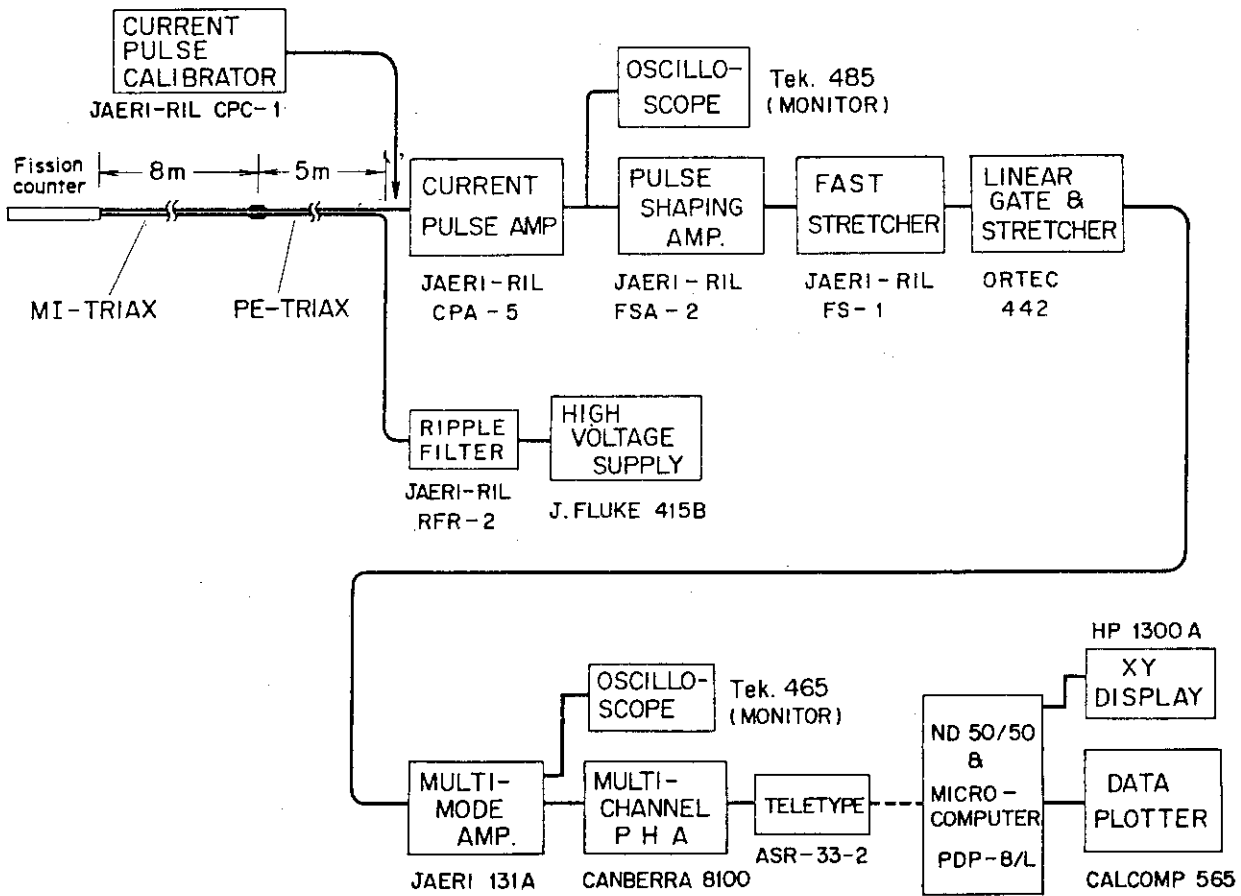


図 5.1 パルス電流波高分布測定システムの構成

図 5.2 に本目的のために設計製作した高速電流パルス増幅器の回路図をしめす。本増幅回路の入力抵抗は入力トランジスタのエミッタ抵抗がそのエミッタ電流によって調節できることを利用し、 VR_1 によって Tr_1 のエミッタの直流電流を調節して完全に信号用同軸ケーブルの特性抵抗値と整合を取るようにになっている。また高速パルス整形増幅器 (Pulse shaping amplifier) も極めて小さい時定数で擬似ガウシアン波形整形 (微分 1 段, 積分 3 段) が可能なもので $2\text{ ns} \sim 50\text{ ns}$ の間で時定数が選択可能なものである。その回路図を図 5.3 に示す。

また波高分布の測定を行う際に、この様な狭いパルス幅の信号を受入れることができる多重波高分析器が世の中に存在しないので、そのパルス幅を広げるためのパルスストレッチャを必要とする。しかし通常の市販のパルスストレッチャを用いても $5 \sim 10\text{ nsec}$ のパルス幅を積分せずに正しくホールドすることは不可能なので、パルス整形増幅器の出力幅を広げて通常のストレッチャに渡してやるため高速ストレッチャ (Fast stretcher) を新たに製作する必要がある。図 5.4 にその回路図を示す。この高速ストレッチャの最小入力パルス幅は 3 ns である。

電流パルス校正回路 (Current pulse calibrator) は核分裂計数管型電離箱のパルス波形をシミュレートした立ち上がり時間 $1 \sim 2\text{ ns}$ の三角パルス電流を発生させる電子回路でパルス電流は $0.1\text{ }\mu\text{ A} \sim 100\text{ }\mu\text{ A}$ の間を $DC \sim 1000\text{ MHz}$ のアッテネタを用いて 1 db ステップで調節でき、又電荷収集時間は 20 ns から 300 ns まで可変設定できるものである。この回路は特異なものではないのでその構成概要を図 5.5 に示す。このキャリブレーションによって出力されるパルスの波高分布と

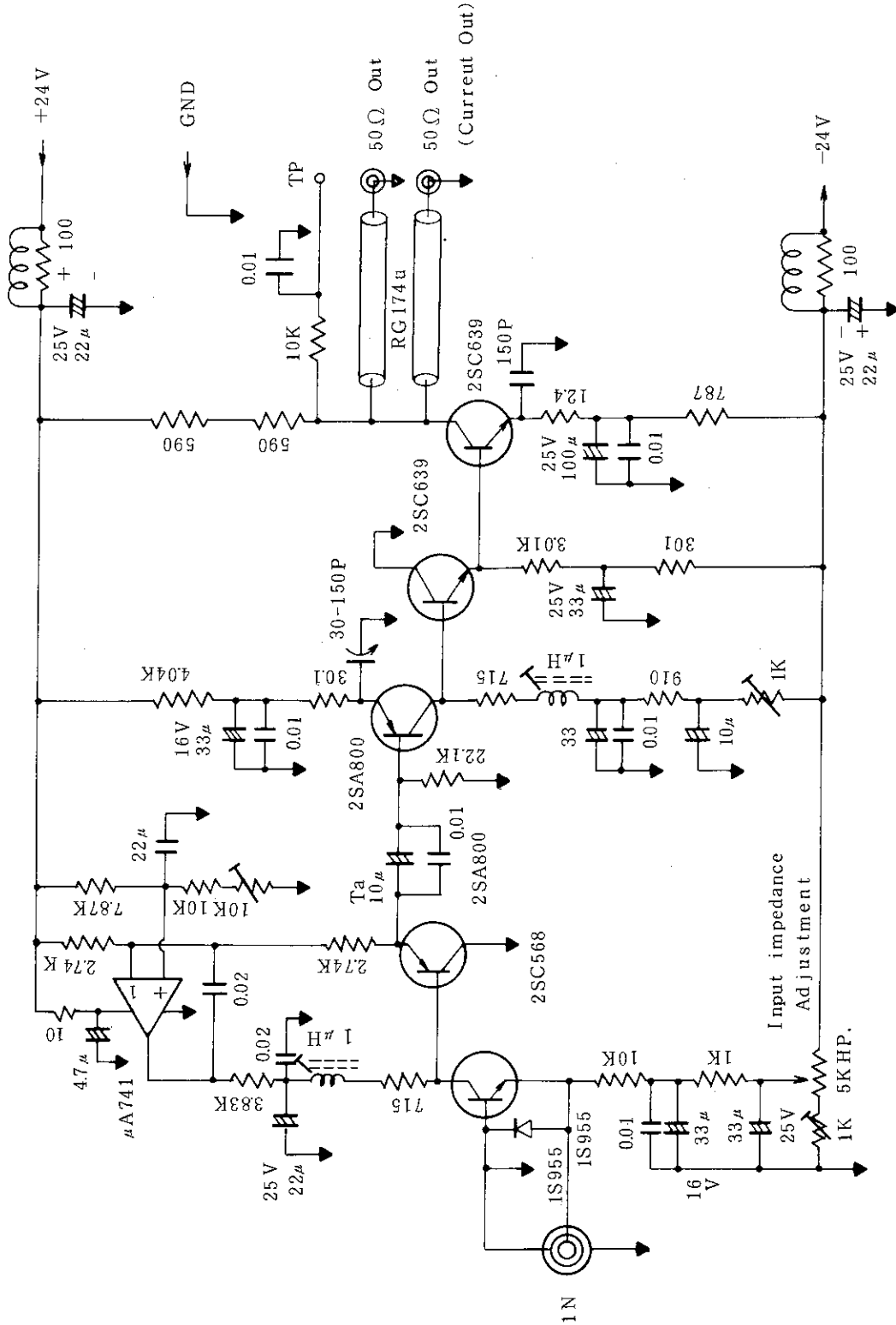


図 5.2 高速電流パルス増幅器の回路図

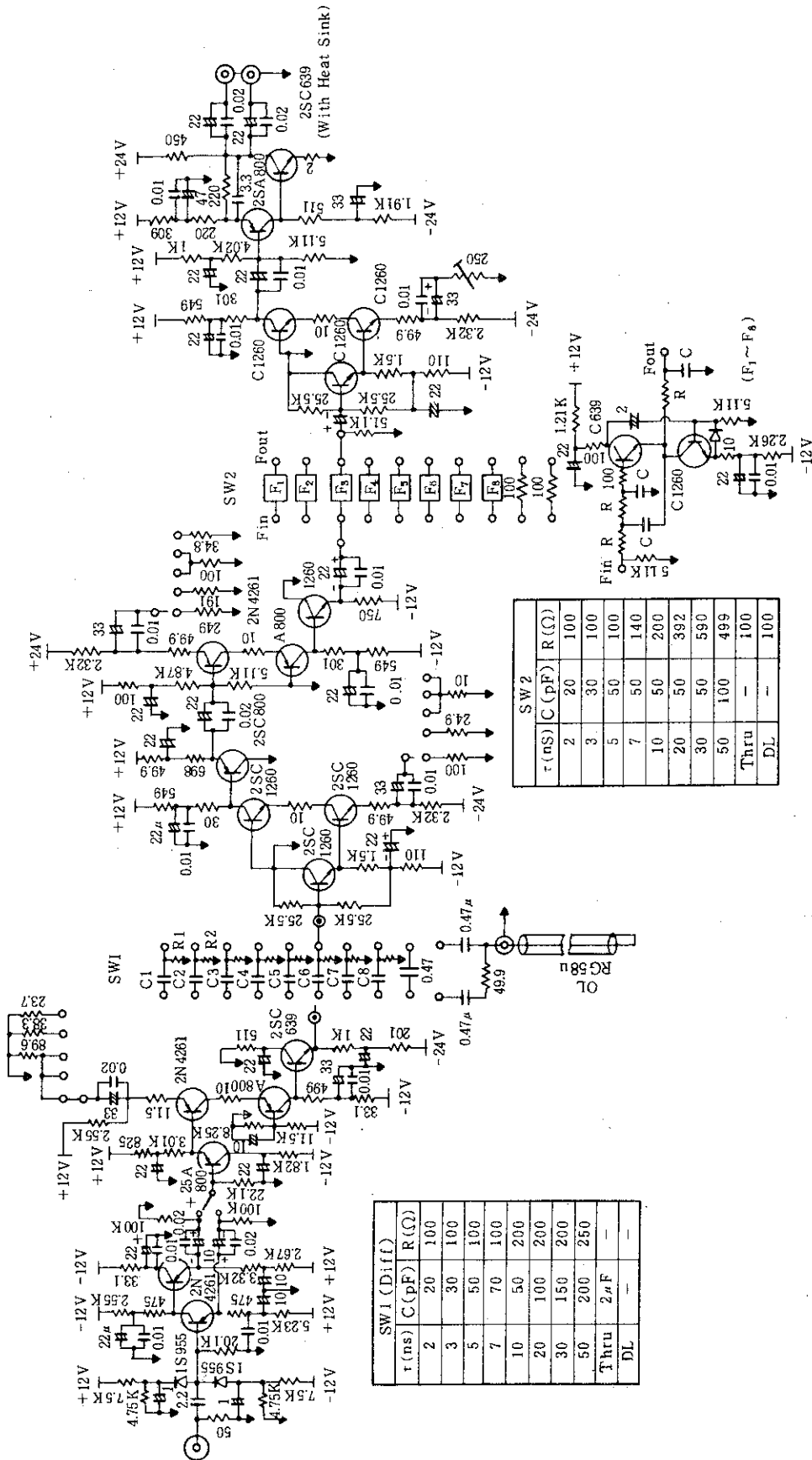


図 5.3 高速パルス型整形増幅器

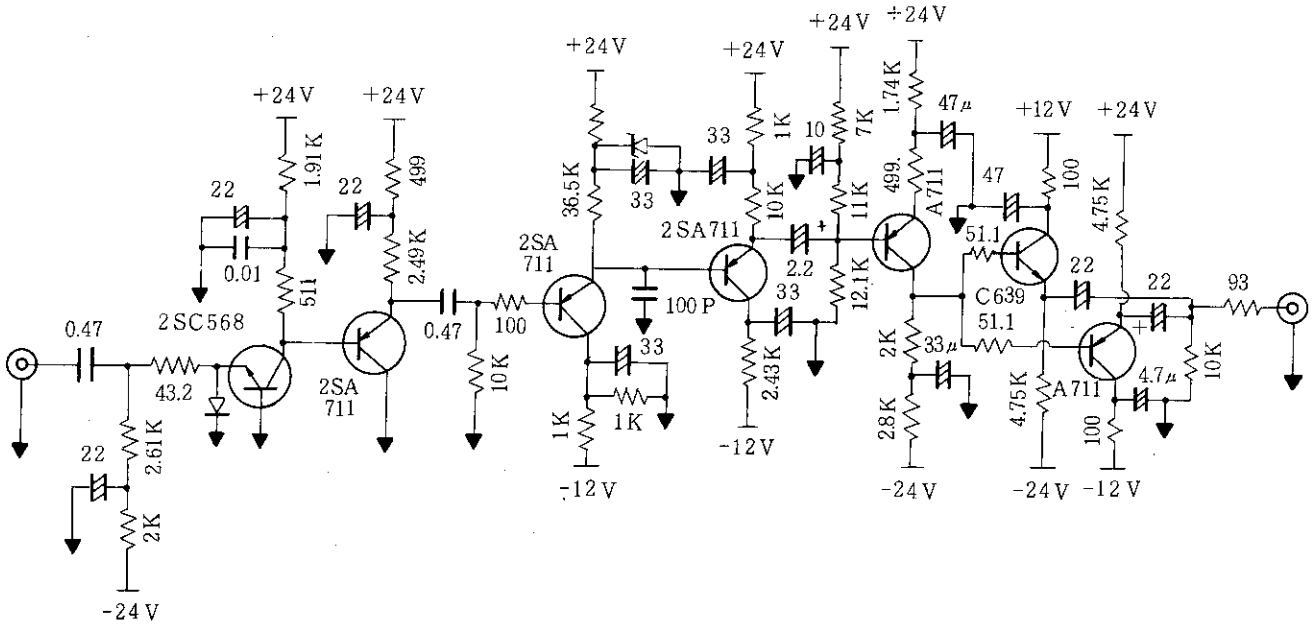


図 5.4 高速ストレッチャ

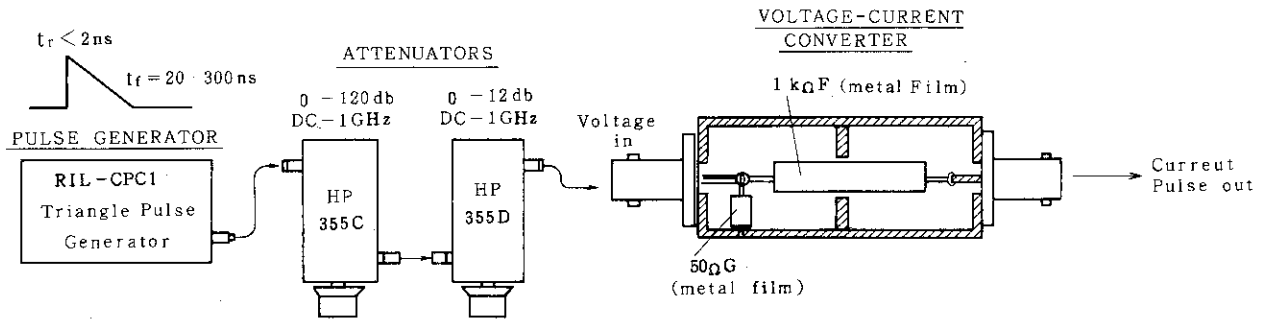


図 5.5 電流パルス校正回路の構成

核分裂計数管型電離箱からの出力パルスの波高分布の比較によって電流パルス波高の較正を行うことができる。

図 5.6 及び図 5.7 に試作核分裂計数管型電離箱のパルス電流波高分布の温度依存性を測定するために使用した加熱炉内蔵の中性子減速体系及び加熱回路を示す。

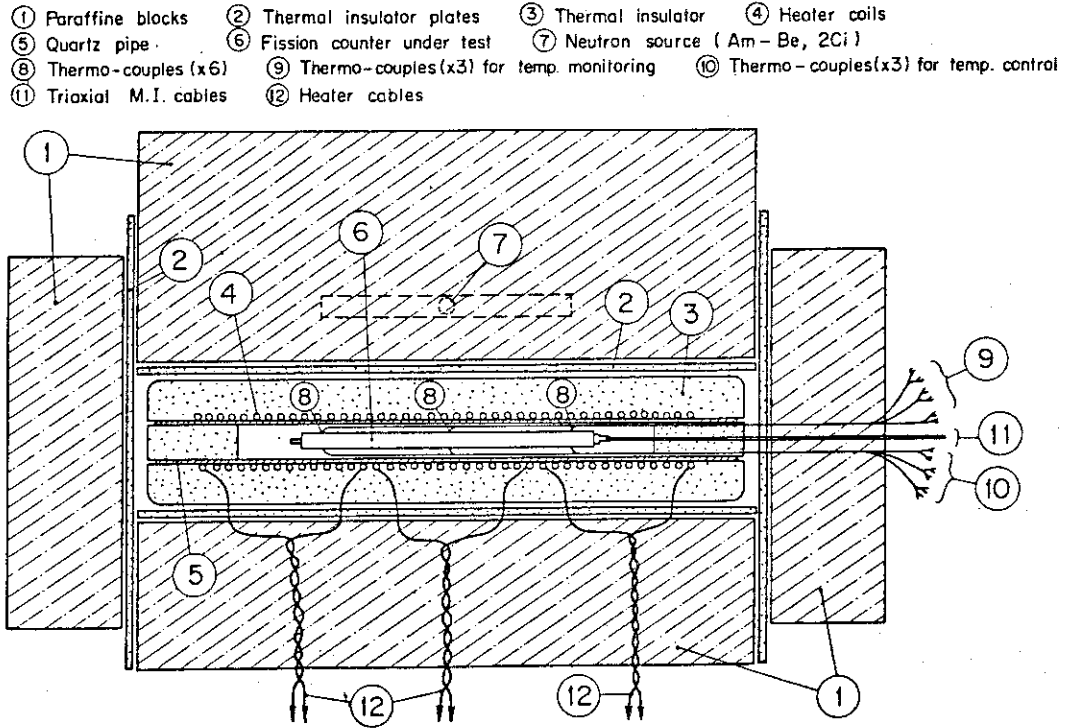


図 5.6 中性子検出器高温試験用加熱器内蔵中性子減速体系

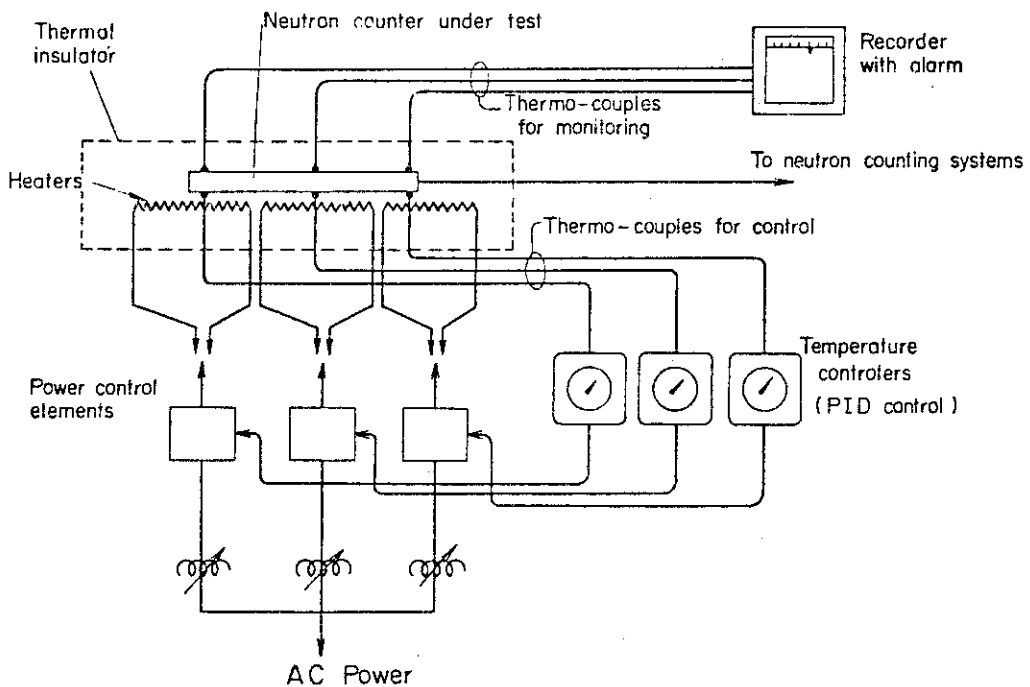


図 5.7 中性子検出器高温試験用加熱器用温度制御装置

減速体は初期にはパラフィンを使用したが最近ではグラファイトを使用している。また加熱装置では核分裂計数管型電離箱の加熱が均一に行われるよう充分厚い断熱材（アルミナセラミックファイバーウール）を使用すると共に軸方向に3つに分割したヒータを使用して温度分布が平坦になるよう3回路の温度コントローラで制御している。

使用している中性子源は2 Ci のAm-Be である。

5.1.2 分布及びその最頻値の測定結果

FX-2D

図5.8はFX-2Dの25°C, 300°C, 600°Cにおけるパルス電流波高分布を示す。

FX-2Dは4章の表4.1に示すように電極間隔(d)が1mm, 5% N₂-1% He-Ar混合ガスのガス圧4気圧, 電極長120mmの試作核分裂計数管で, パルス電流波高測定の際に使用した波形整形は時定数5nsecの擬似ガウシアン整形である。一番左側に示されたカーブは印加電圧ゼロの場合でこれは作動していない検出部, ケーブル, 増幅回路から発生している雑音の波高分布である。

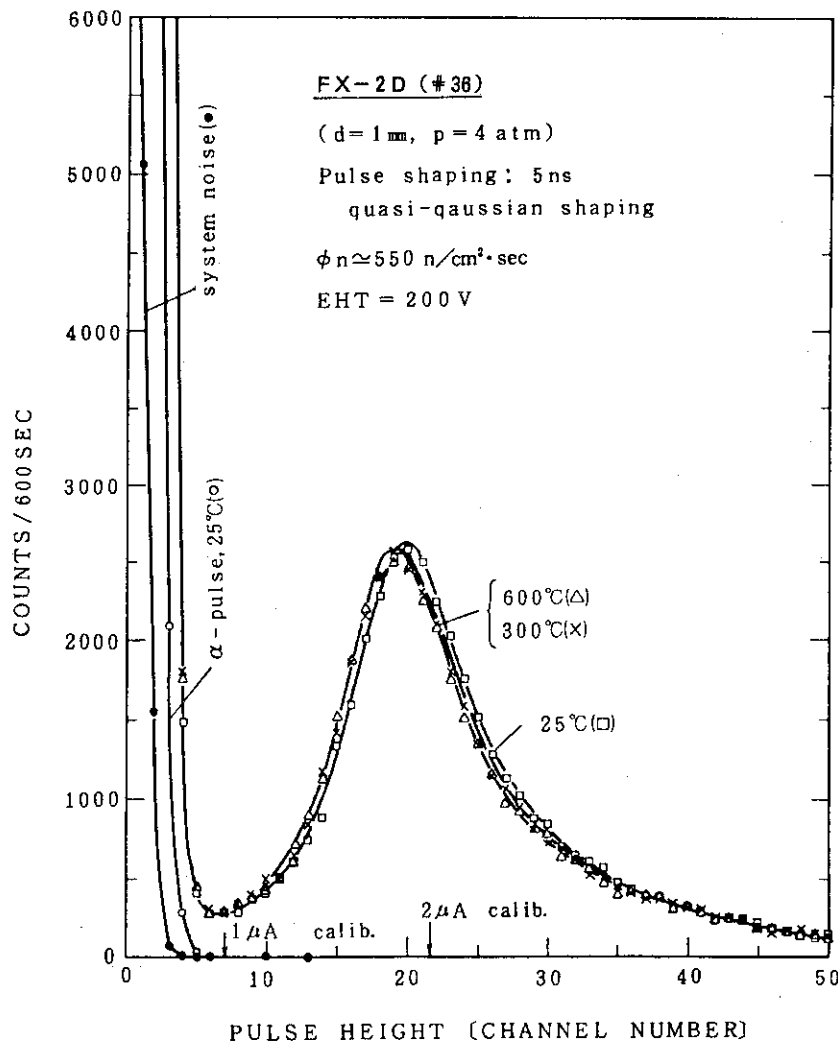


図5.8 試作核分裂計数管型電離箱FX-2D (d=1mm, P=4 atm) の25°C, 300°C, 600°Cにおけるパルス電流波高分布

次いで α -pulse と示された曲線は中性子源を取除いて 200V を印加したときの波高分布で濃縮ウランからの α パルスによるものである。

中心部にピークを作っているのが中性子パルスで印加電圧 200 V, 測定温度は夫々 25°C, 300°C 及び 600°C である。下方の横軸に 1 μ A calib, 2 μ A calib と示された矢印は, 前記の Pulse calibrator によって 1 μ A, 2 μ A の擬似パルスを入れて較正した較正点である。この 2 つの較正点によって入力パルス電流波高 0 の点が約 7.5 チャンネルほど左側 (マイナス側) にずれていることがわかるが, これはあまり小さい信号迄分析しようとするとき小さい信号は計数が多く波高分析器は常に busy となって, 数のすくない中性子パルスはほとんど分析不可能となるため, 適当量のバイアスをかけて微小な雑音分をカットしているためである。

この波高分布を比較してみる限り, FX-2D では温度による電流パルス波高及び波高分布の変化はほとんど無いと言うことができるが, 高温では中性子計数の総計がわずかに少なくなっている。パルス波高の最頻値は約 1.9 μ A で設計値表 4.1 の i_{od} とよく一致している。

図 5.9 は同 FX-2D のパルス電流波高分布に対する印加電圧の依存性を示したもので, 測定印加電圧は 100 V, 150 V, 200 V である。測定温度は 600°C である。Appendix の図 A 3.9 ~ A 3.11 に示したように 5% N₂ - Ar 混合ガス中の電子のドリフト速度が印加電界によって変化するのを反映して印加電圧の増加と共にパルス電流波高値も大きくなっている。

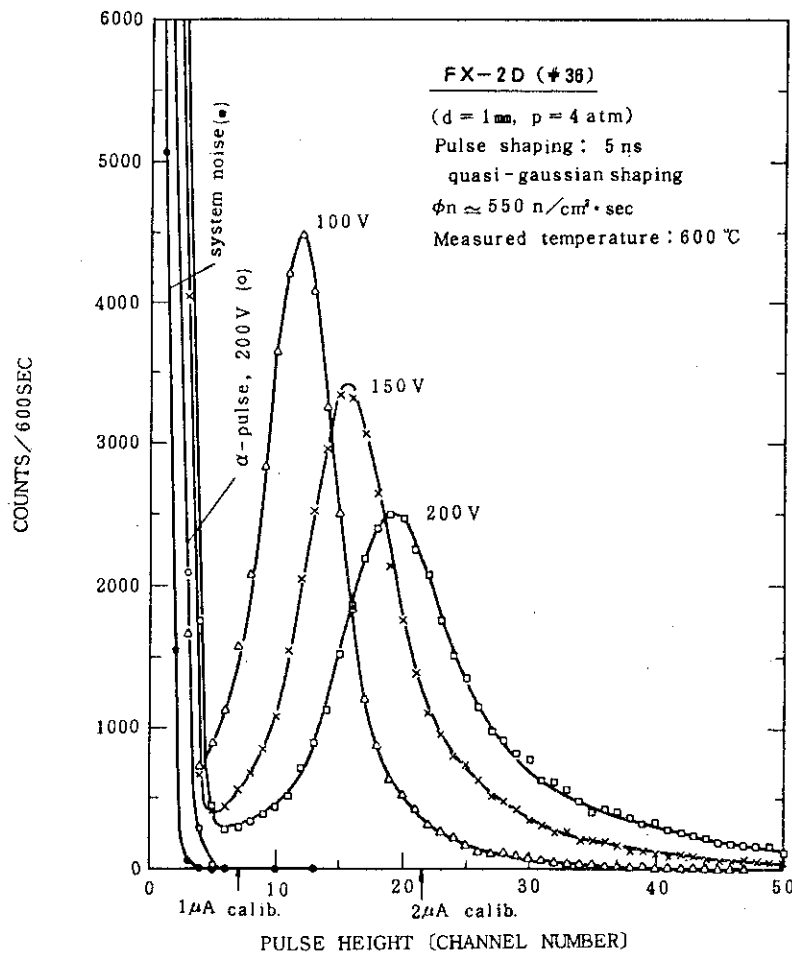


図 5.9 FX-2D の各種印加電圧に対するパルス波高分布

印加電圧が低い程波高分布の頂点が高くなり分布も一見シャープに見えるが、この理由は、全体的にパルス電流の振幅は小さくなくても合計の計数値は同じなので1チャンネルに入る計数値が多くなって、分布の高さが高く見えるものであって、印加電圧が低い程特性が良くなるわけではない。

この図から見るとFX-2Dは印加電圧100Vでも充分に実用できることがわかる。

積分波高分布(Integral pulse-height distribution)は別名インテグラルバイアス曲線(Integral bias curve)と呼ばれ、前記の通常のパルス波高分布の或るチャンネルより大きい波高のパルスのすべての計数値の総計をその波高値のチャンネルの計数値としたものである。実際に核分裂計数管型電離箱を核計装パルス系に使用する場合、雑音や α パルスの計数誤差と中性子感度の両方をにらみながら的確に最適な波高弁別レベルを決定することができる。また、インテグラルバイアス曲線は中性子パルスのプラトーが広く、雑音及び α パルスは出来るだけ小さい波高弁別レベルでカットされることが望ましい。

図5.10は上記試作FX-2Dの25°C、300°C及び600°Cにおけるパルス電流のインテグラルバイアス曲線で図5.8のパルス波高分布と対応するものである。図の左側の2本の線は夫々印加電圧を0とした場合のシステムノイズ及び印加電圧200Vの際の α 線パルスの積分波高分布である。(中性子源なし)

FX-2Dのプラトーは大変広く図5.10から見て波高弁別器の設置レベルは横軸の4ないし10のどのあたりに設定しても問題はない。

図5.11は同FX-2Dにおいて600°Cにおいて印加電圧を200V→150V→100Vに減少させた場合のインテグラルバイアス曲線である。印加電圧100Vの場合は200Vの場合に比べてプラトーは狭くなるが波高弁別レベルを横軸の4ないし6の位置に設定すればプラトー領域内であり150~200Vの場合と変わりなく安定な計数動作をすることが図5.9から見るよりも良くわかる。

FX-2A

図5.12は試作したFX-2A型核分裂計数管型電離箱の25°C、300°Cにおけるパルス電流の波高分布である。FX-2Aは電極間隔0.5mm、5%N₂-1%He-Arのガス圧を7気圧として設計した高性能核分裂計数管型電離箱で、測定の際の波形整形の時定数はFX-2Dの場合と同じ5nsec、測定温度は600°Cである。

本FX-2Aは電極間隔が狭く、ガス圧が高く設計されているので出力パルス電流は大変大きく、図の較正点と波高分布のピーク値から計算した最頻値は25°Cで2.5 μ A(2.45 μ A)、300°Cで2.6 μ A(2.58 μ A)、600°Cで2.6 μ A(2.6 μ A)である。この値は表4.1に示したCase 1の設計値とほぼ合致している。この点から見て電極間隔0.5mmの場合でも電極間隔等の構造的寸法が何とか正しく保持されたと言えよう。

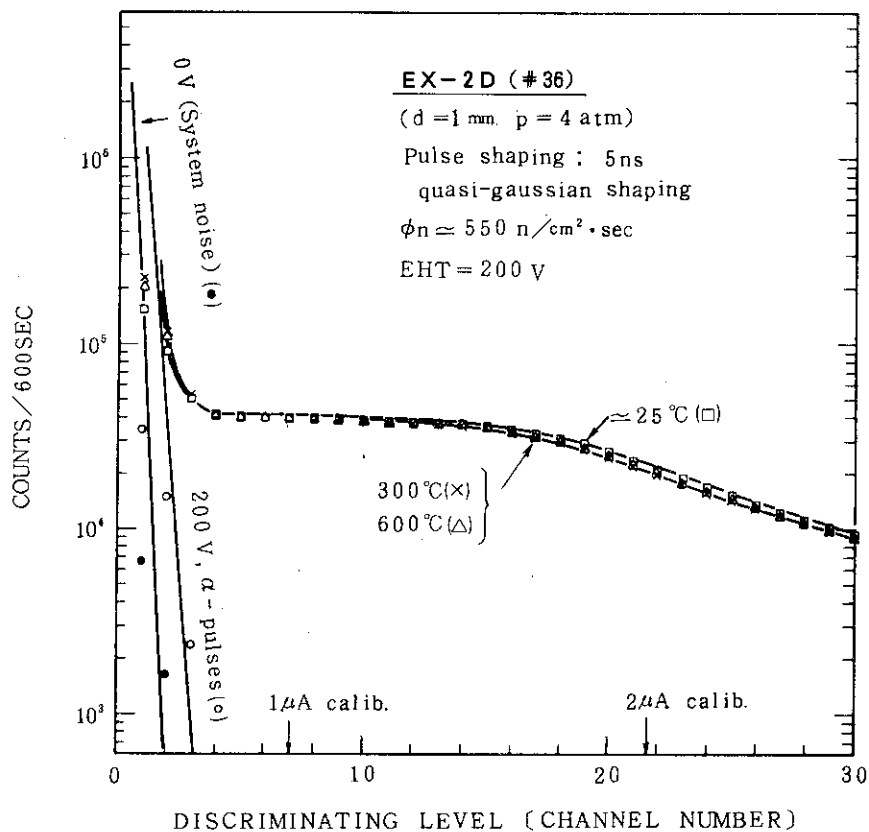


図 5.10 FX-2D の 25°C, 300°C 及び 600°C におけるパルス波高電流の積分波高分布 (Integral bias curve)

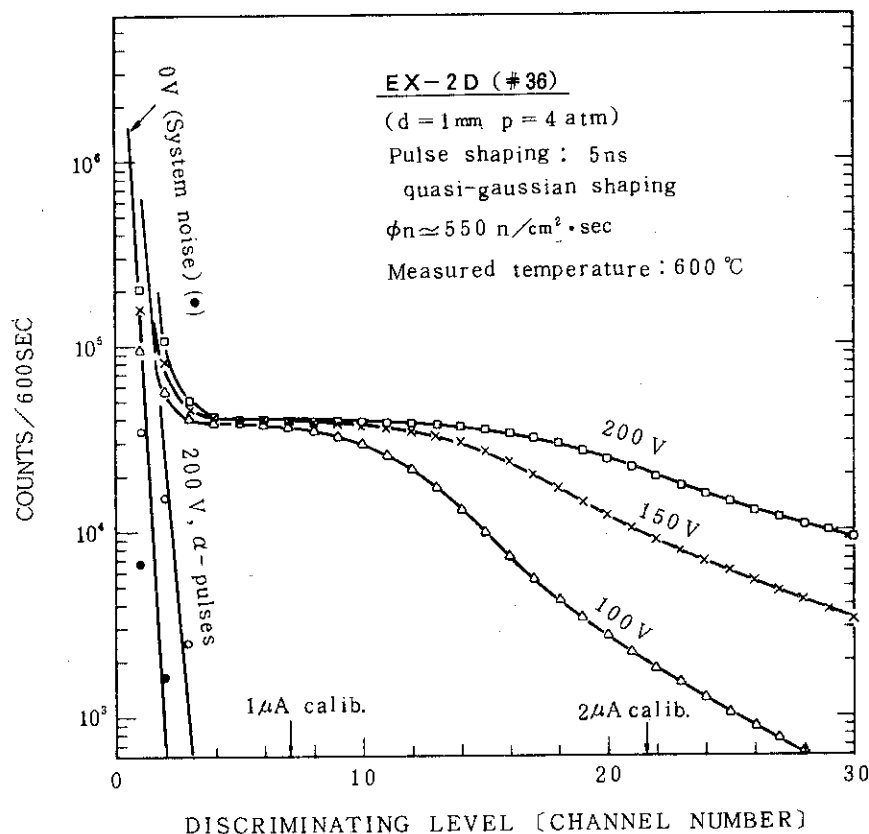


図 5.11 FX-2D の各種印加電圧に対するパルス電流の積分波高分布 (Integral bias curve)

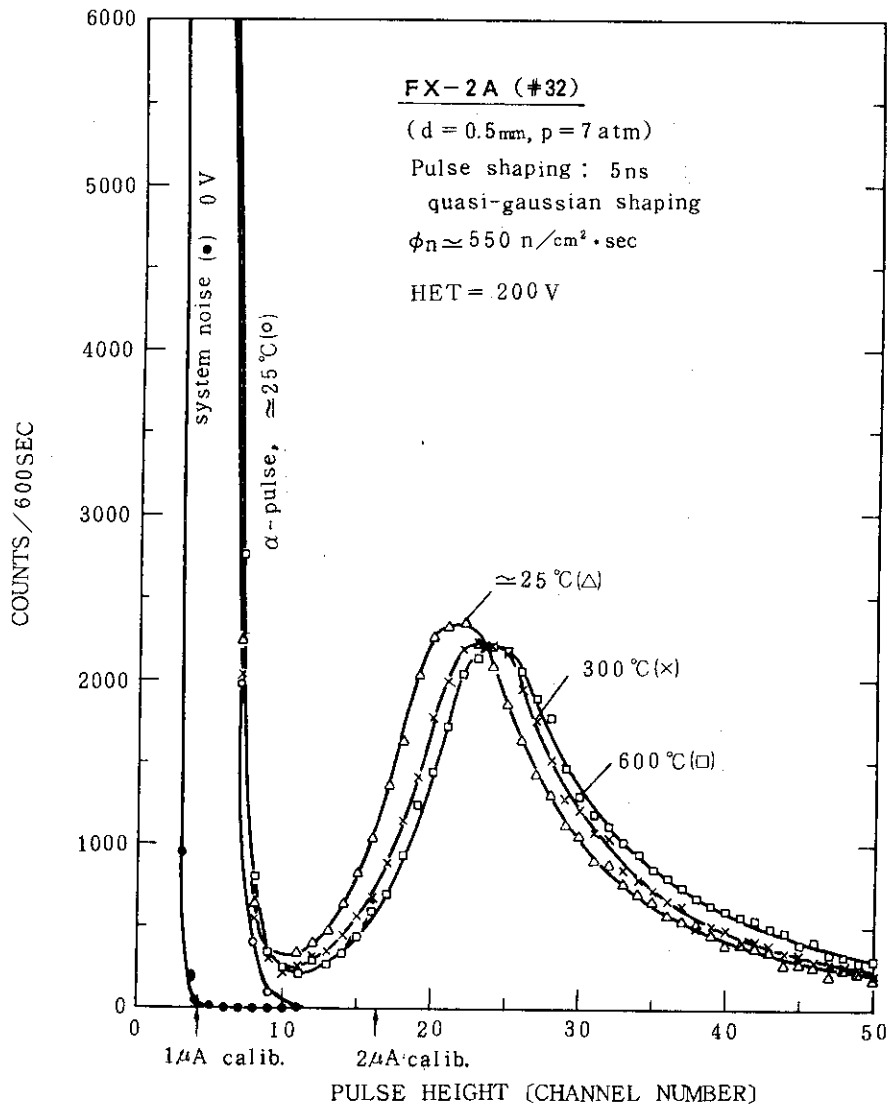


図 5.12 狭い電極間々隔の試作核分裂計数管型電離箱 FX-2A (d=0.5mm, P=7 atm) の 25°C, 300°C 及び 600°C におけるパルス電流波高分布

また FX-2A の高温におけるパルス電流波高値は常温の場合より数%大きくなる事が観測されている。この若干の温度依存性は後述の照射試験, 長期炉内試験等を通して試作電離箱の欠陥又は不安定作動につながるものではないことが明らかとなっているが, 原因についての明確な理由は現在のところ不明で今後の研究課題として興味あるところである。

図 5.13 は FX-2A の各種印加電圧にたいするパルス電流波高分布である。測定温度は 600°C である。この試作モデルの場合, 印加電圧を 70 V 程度まで下げても波高分布のピーク・バレー比はあまり小さくならず 50V でも 2 以上の比である。

図 5.14 は同 FX-2A の 25°C, 300°C 及び 600°C における積分波高分布である。プラトー部が十分広く波高弁別レベルは横軸目盛りで 8 から 17 程度のどこに設定してもよく, また図 5.12 の微分波高分布では少し目立った温度による若干のパルス波高の変化も, 正常な範囲に波高弁別レベルを設定した場合には計数値には全く影響を与えないことがこのプラトー部を見れば理解できよう。

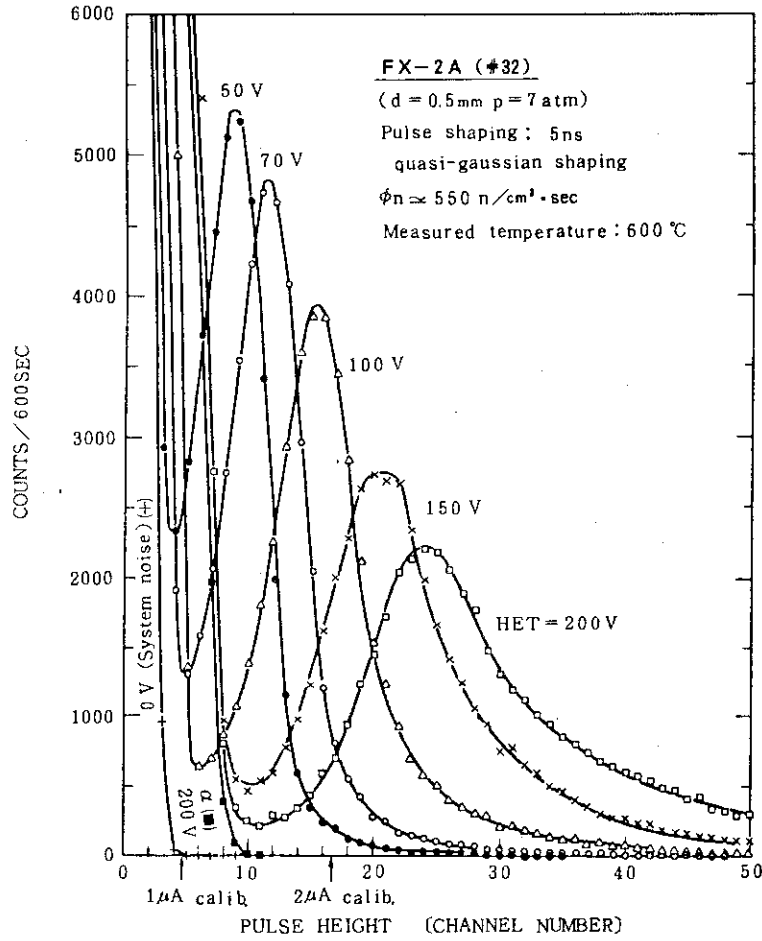


図 5.13 FX-2A の各種印加電圧に対するパルス電流波高分布

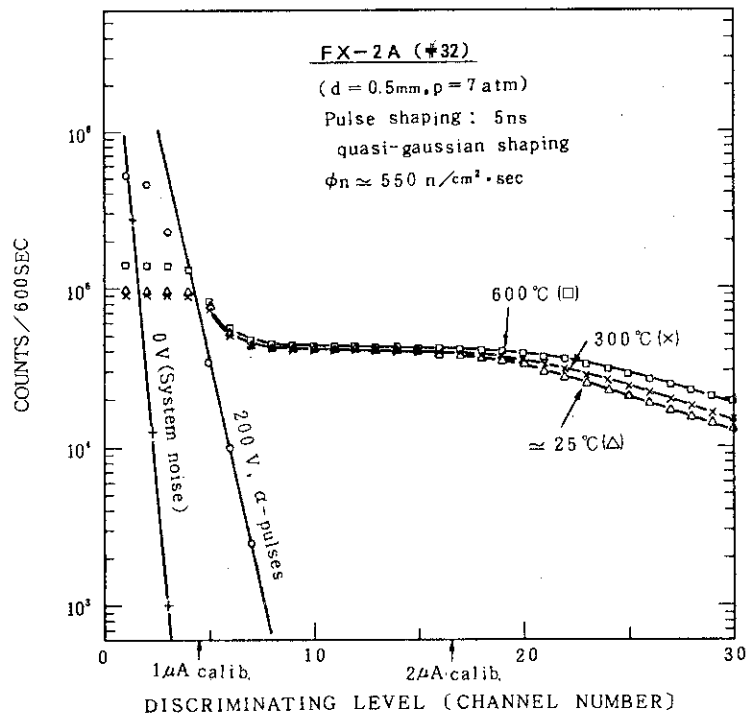


図 5.14 FX-2A の 25°C, 300°C, 600°C における出力パルス電流の積分波高分布 (Integral bias curve)

図5.15は600°CにおけるFX-2Aパルス電流の積分波高分布で印加電圧によってプラトー領域が広がってゆく様子がわかる。FX-2Aの場合電極間隔が狭いので50Vの印加電圧でも従来の常温用核分裂計数管型電離箱を300Vないし500Vで作動させた場合に相当するプラトーが得られている。図の左端の曲線は印加電圧0の際のシステムノイズで、また印加電圧200Vの際の α 線の積分波高分布(中性子源なし)も示されている。

FX-2Aの場合、先に述べたように出力パルス電流が印加電圧200Vで $2.6\mu\text{A}$ (最頻値)と大きいので、積分波高分布のプラトーが極めて広くかつ平坦で、波高弁別レベルをかなり高くとっても中性子感度は損なわれない。これは高 r 線場でガンマ線パルスのパイルアップがかなり大きくなって波高弁別器で中性子感度を低下させることなく、パイルアップパルスを切り落とすことができることを意味している。

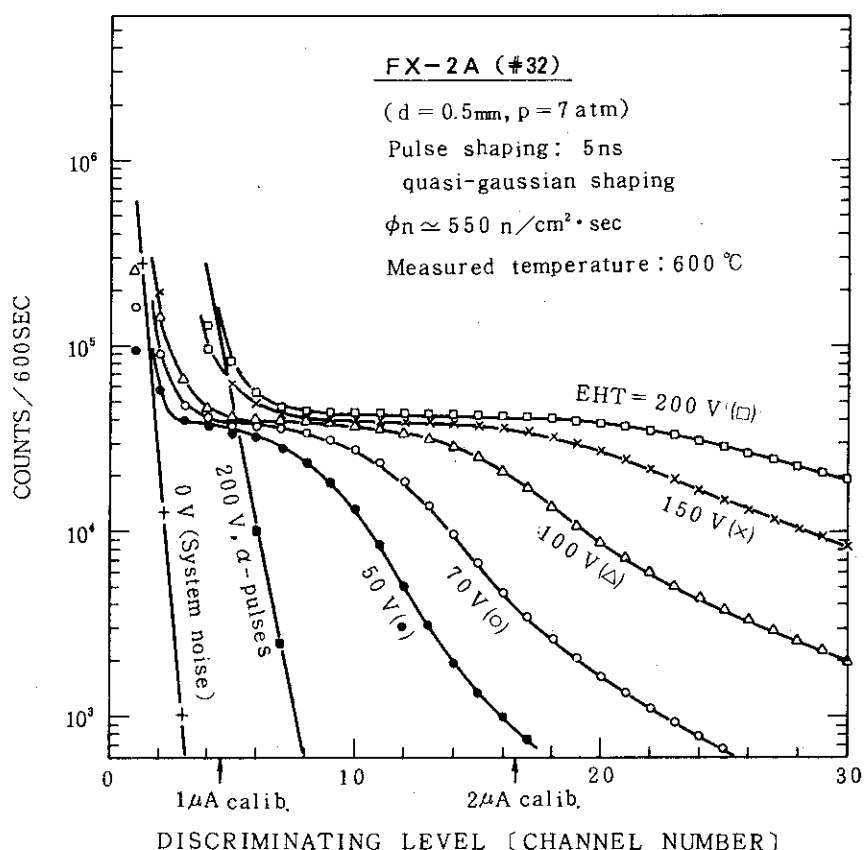


図5.15 FX-2Aの各種印加電圧(50V, 70V, 100V, 150V, 200V)に対する積分波高分布

FX-3

FX-3は電極間隔(d)1mm, 5% N_2 -1% He-Ar ガスの充填圧力5気圧, 電極長300mm, 中性子感度 $0.3 \text{ cps/n/cm}^2 \cdot \text{s}$ の試作核分裂計数管型電離箱である。(旧型名FX-2B)。図5.16及び図5.17にFX-3の出力パルス電流波高分布及び積分波高分布をしめす。測定温度は35°Cと550°Cであり印加電圧は200Vである。測定に使用した波形整形時定数は20ns(擬似ガウシアン)である。FX-3でも高温になるとパルス波高がわずかに大きい方へシフトすることが両図からわかるが、積分波高分布を見るとわかるようにプラトー部分が平坦であるから、波高弁別レベルを極端に高くしない限り若干のパルスの振幅の変化が計数率に影響を与えることはない。

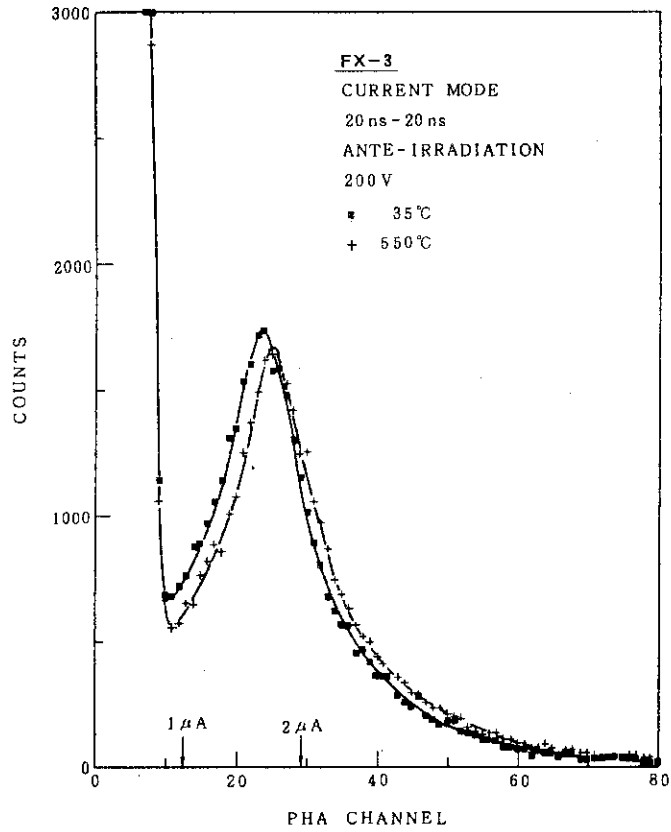


図 5.16 FX-3 の出力パルス電流波高分布, 測定温度 35°C 及び 550°C

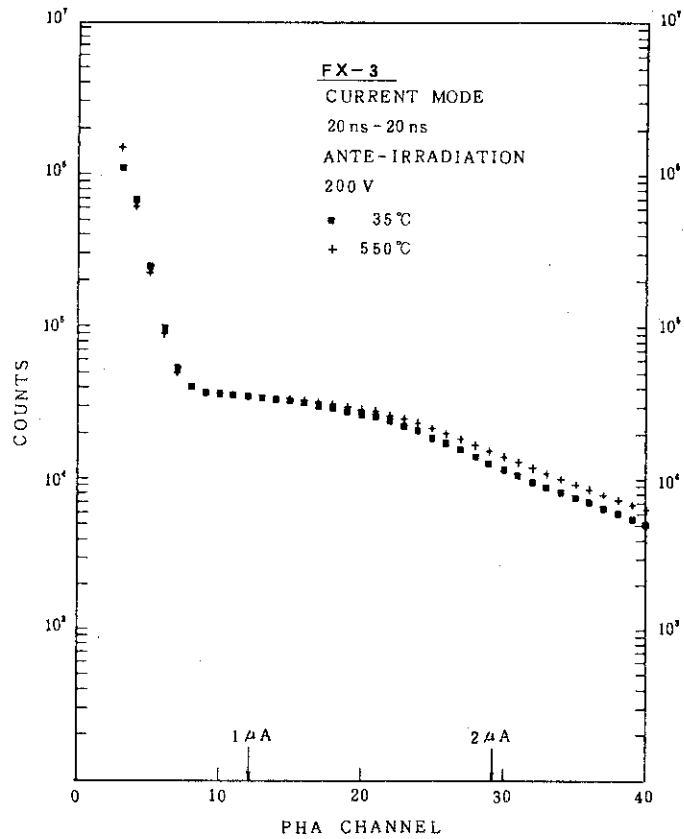


図 5.17 FX-3 の出力パルス電流の積分波高分布 (Integral bias curve), 測定温度 35°C 及び 550°C

一方、差がわずかなので積分波高分布曲線を見てもあまり明確に出ていないが、微分波高分布の各チャンネルの計数の差から予想されるように、総計の中性子計数が550°Cの方が若干小さくなっている。この積分波高分布曲線の平坦部の高さ（計数率）の変化は温度による中性子感度の変化を示すものであるが、この中性子感度の変化は中性子検出器の技術的問題ではなく高温において熱中中性子のエネルギースペクトルが高い方へシフトするために中性子受感物質の平均反応断面積が減少することに起因して生じているものと考えられる。但し熱中中性子温度が検出器温度と等しくなると仮定した場合程には中性子感度が低下しない理由は、試験状態で高温なのは断熱材内部の電気ヒータと中性子検出器周辺のみであり、その外側の減速材、反射材は常温であるため中性子検出器に入射する平均の中性子温度は常温に近いと考えられる。

図5.8～5.17に示した様に5 ns 又は20 ns という極めて短いパルス整形時定数を用いているにも拘らず、これらの図に示されているように優れた波高分布曲線が得られている理由は開発した高温核分裂計数管型電離箱の出力パルス電流が従来の耐熱性核分裂計数管型電離箱に比べて大変大きいことによるもので、入力パルス電流が大きいので短い時定数の広帯域のパルス増幅器を用いても必要十分な信号対雑音比が得られるためである。表5.1にパルス電流波高分布の測定値から求めた各種試作核分裂計数管型電離箱の中性子パルス電流の最頻値（波高分布のうち最も計数頻度の多いパルスの波高値）を温度の関数として示す。

表 5.1 各種試作核分裂計数管型電離箱の出力パルス電流波高の最頻値

測定温度 \ 型名	FX-2	FX-2D	FX-2A	FX-3
常 温	1.9	1.9	2.5	1.6
300°C	2.1	1.9	2.6	1.8
600°C	2.2	1.9	2.6	1.8

単位：μA，印加電圧：200 V，ケーブル出力端

5.2 出力パルス電荷の波高分布と最頻値

出力パルス電荷の大きさ及びその波高分布は、先に述べたように最近の核計装起動系の設計に関するパラメータとしてはさほど重要な指標ではないが、核分裂計数管型電離箱の研究開発の上ではパルス出力電荷の波高分布の測定結果はたくさんの内部情報を提供してくれるのでその測定は有用である。パルス電荷の測定値が提供する情報は次の如くである。

- 1) 出力パルス電荷に変化が無いにもかかわらず出力パルス電流が変化した場合、電離箱ガスが変質したことを示す。
- 2) パルス電荷が小さくなり、電極間静電容量に目立った変化が無い場合は、電離箱ガスが漏洩し圧力低下があったことを示す。
- 3) パルス電流波高測定値と併せて電荷収集時間を計算できる。
- 4) パルス電荷がわかれば計数モードの中性子感度から直流モード及びキャンベルモードの中性子感度を計算できる。

5.2.1 測定装置

図 5.18 に出力パルス電荷の測定に使用した測定系のブロック図を示す。使用した電子回路モジュール及び計測器名は図中に示した。電荷測定の場合は、計数管の出力パルス電流が電荷増幅器 (CSA) で積分され測定されるので、パルスの立ち上がり時間は計数管の電荷収集時間に近い値となる。従ってあまり高速の増幅系は必要なく、100 ns ~ 200 ns 程度の時定数の波形整形ができるので、通常の γ 線スペクトル測定用 NIM モジュールを利用して測定系を構成することが出来る。

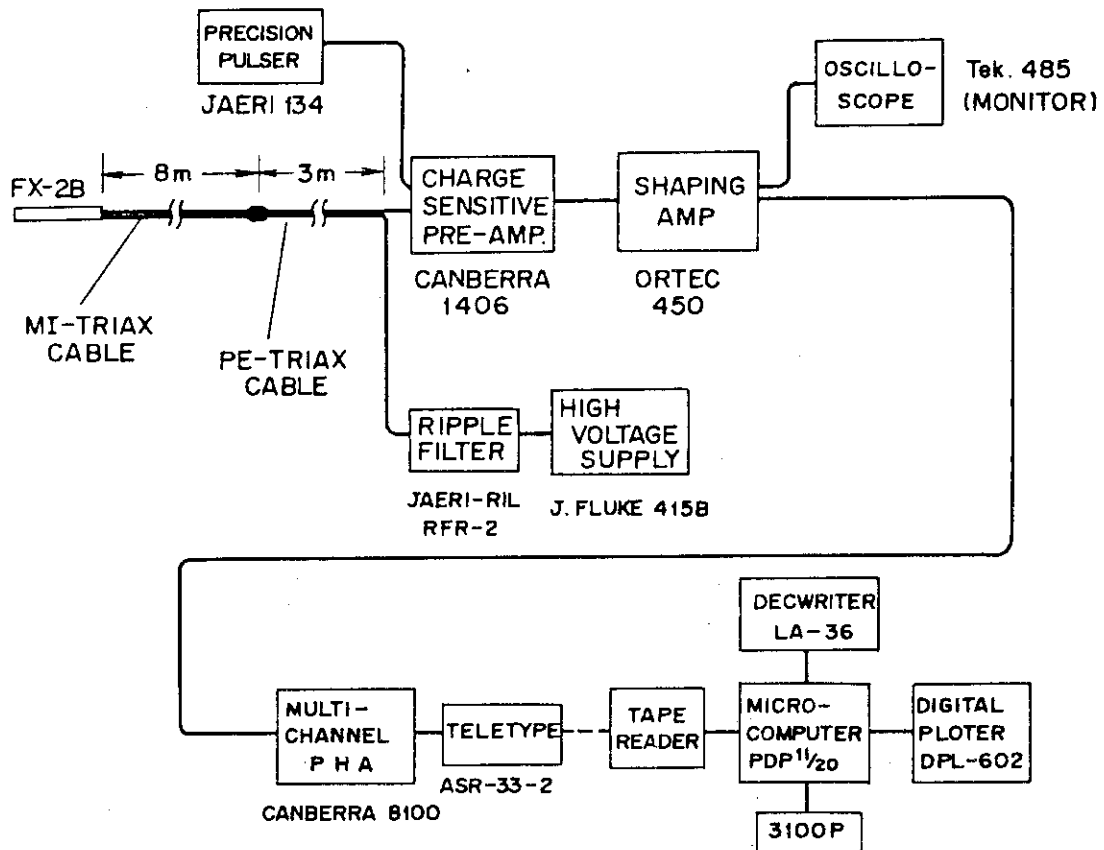


図 5.18 パルス電荷の測定に使用した測定系のブロック図

本試験において電荷測定に用いたパルス整形の時定数は 100 ns (擬似ガウシアン) である。この時定数では多重波高分析器の入力信号として若干パルス幅が狭い恐れがあったが、実際に同等の狭いパルス幅の信号で直線性を試験してみたところ、積分値としては比例性があり、本測定に必要な直線性は確保できることが認められたので、パルスストレッチャは使用しなかった。

5.2.2 測定結果

図 5.19 に試作核分裂計数管型電離箱 FX-3 の 35°C 及び 550°C における出力パルス電荷の波高分布を示す。図中横軸に示された 0.05 pC, 0.1 pC の矢印はパルス電荷の較正点である。

FX-3 のパルス電荷の波高分布においても、高温になるとわずかながらパルス波高分布が大きき方ヘシフトする傾向がある。また、温度を下げればもとへもどる再現性がある。

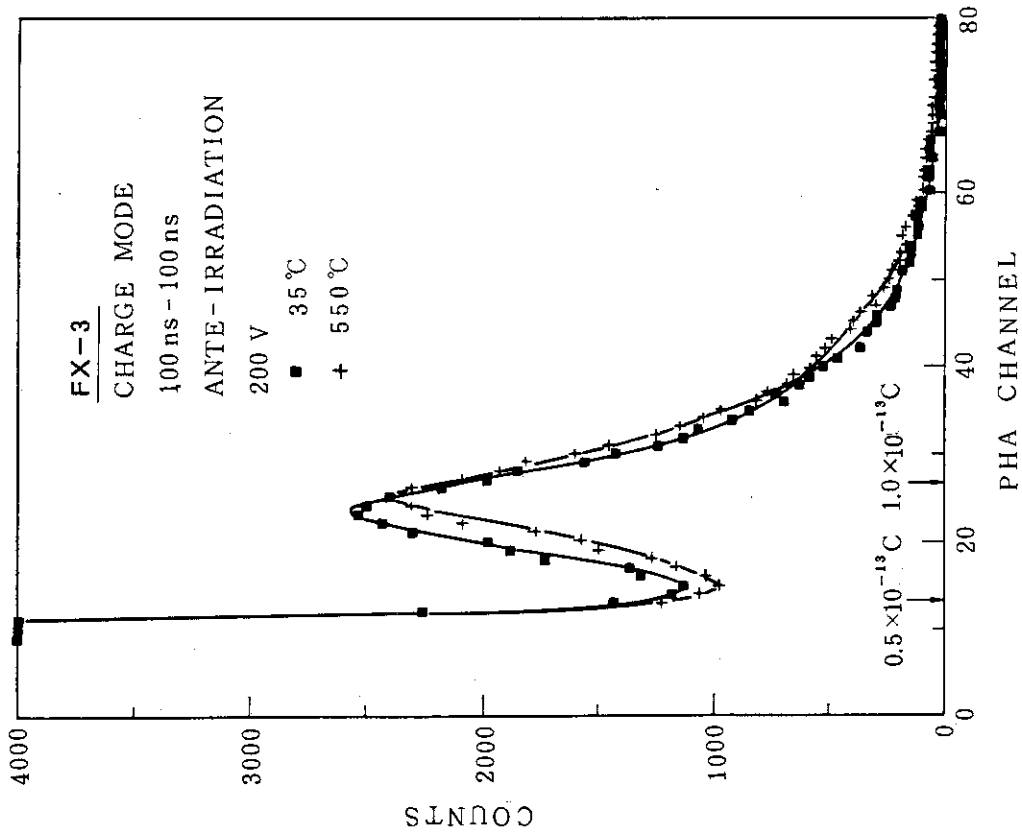
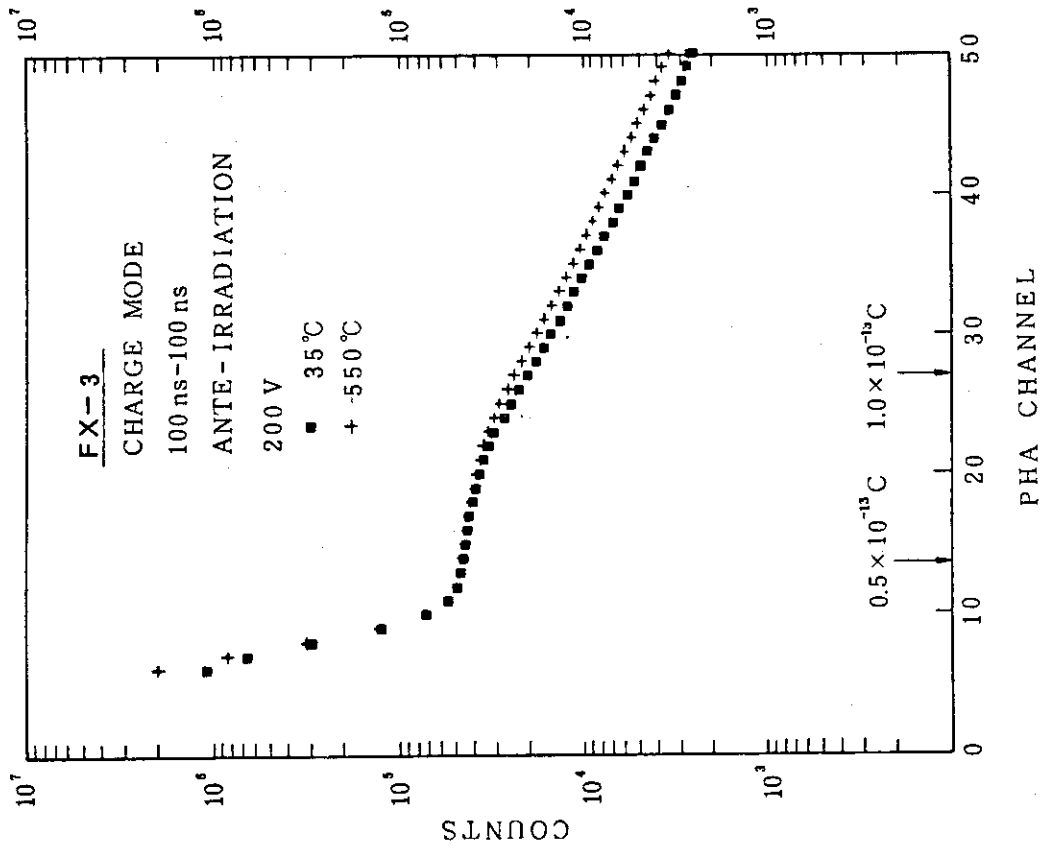


図 5.19 FX-3 の常温及び 550°C における出力パルス電荷の波高分布

パルス電荷が温度によって変化する原因としては電極間間隔の増加や単位体積当りのガス分子数の増加等が検討の対象となる。

しかし、前者は電極の熱膨張係数から計算した場合、電極間間隔の温度変化は600°Cの変化に対して1%未満であり、7%近いパルス電荷変動の原因とは考えられない。また一方、後者は電極等の金属からの炭酸ガス等の放出と吸収によって起ると言う説があるが、この様な大量の多原子分子ガスの放出や吸収があった場合、パルス出力電流が温度によって大きく変動するはずであるが、その様な現象は観察されない。

従って、現在迄その原因は不明のままであるが、パルス電流波高の場合と同様中性子パルス計数の上で実用上支障のある問題ではないので検討は今後の課題としたい。

各種試作モデルについてパルス電荷波高分布の最頻値から求めたパルス電荷を表5.2に示す。測定温度は常温で印加電圧は200Vである。

表 5.2 各種試作核分裂計数管型電離箱の
出力パルス電荷の最頻値

型名	FX-2A	FX-2	FX-3	FX-2D
パルス電荷 ($10^{-13}C$)	0.54	0.95	0.68	0.64

印加電圧：200V

5.3 電荷収集時間

電荷収集時間は核分裂計数管型電離箱の出力パルス電流を100MHz程度の広帯域の電流増幅器で増幅しオシロスコープで波形を調べることによって原理的には可能である。しかしその場合増幅器の周波数特性の影響や、それにも増して各種の波高のパルスが混在しているためにオシロスコープ上のトリガ点の変動や、雑音の影響等によってオシロスコープ上のトレースが太くなって10%以内の精度では読取困難である。

しかし既に2章で述べたよとに、核分裂計数管型電離箱では、最頻値を与えるような大きさの電流パルスは、ほとんどすべて三角波形のパルスとなり、それが電荷パルスの最頻値に対応しているので、パルス電流の最頻値とパルス電荷の最頻値から電荷収集時間を計算で求めた方がオシロスコープの場合より高い精度が得られる。

この方法により表5.1に示したパルス電流の最頻値の測定値と表5.2に示したパルス電荷の最頻値の測定値から求めた各種の試作核分裂計数管電離箱の電荷収集時間を表5.3に示す。

表 5.3 各種試作核分裂計数管型電離箱の電荷収集時間

	FX-2A	FX-2	FX-3	FX-2D
電荷収集時間 (ns)	43	100	85	67

印加電圧：200V，ケーブル出力端にて

5.4 印加電圧プラトー特性

高圧印加電圧に対する中性子計数管のプラトー特性は(1)波高弁別器の設定レベルによって変ること(またプラトー測定の際、波高弁別器の設定レベルは何を基準に決めるかも明確でない)、(2)核分裂計数管でも比例計数管でも積分時定数を電荷収集時間より充分大きくとれば、プラトー特性は良くなる(プラトー電圧範囲が広がる)が、積分時間が大きく、パルス幅の広いパルス整形は中性子計測系の性能向上(γ 線パルスのパイルアップ低減、広い中性子計数率範囲)と相反するものである。(例えば高性能の電流パルス伝送、5 ns 程度の短い波形整形時定数の電流パルス増幅方式のパルス系よりも旧式の電荷増幅器を用い0.5~1 μ s 程度の大きな時定数の波形整形をしたパルス系の方が印加電圧プラトーのみから見れば広くて良さそうに見える。)(3)最近では高圧電源の安定性や増幅器の安定性が極めて良くなり、印加電圧に対するプラトーは必ずしも広い必要は無くなった。

この様にパルス電離箱や比例計数管の印加高圧電圧に対するプラトー特性は、直流電離箱やGM管の場合と異なり、もはや検出器の性能の良さを表わす指標にはならなくなってきた。また印加電圧プラトーは波高弁別レベルを変えると変わってしまうから、先に波高弁別レベルを決めないと最適な印加電圧を決めるガイドにならないが、印加電圧を決めないと波高弁別レベルが決らないと言う矛盾がある。

高温用核分裂計数管電離箱の場合(1)高圧印加電圧はパルスブレイクダウンノイズ(PBN)などによって制限され高温下でも確実にPBNが起らない印加電圧、例えば200 Vに初めから大体決められてしまうこと、(2)また、波高弁別レベルは各々の印加電圧に対する出力パルスの積分波高分布から状況に応じて適確に求め得る。従って何のために印加電圧プラトー特性を測定するかはなはだ目的が明確ではないが、測定系全体からみて、決定した印加電圧と波高弁別レベルが適正であったかどうかの目安の一つとなることは確かであり、また、従来から何故かなじみ深い試験項目なのでいくつかの測定を行った。

図5.20および図5.21にプラトー測定に使用した電子回路のブロックダイアグラムを示す。前者はパルス電流増幅モードの測定システムで後者は電荷増幅モードのシステムである。

パルス電流増幅モードの場合のパルス整形時定数は微分20 ns(1段)、積分20 ns(3段)で、電荷増幅モードの場合は夫々100 ns(1段)及び100 ns(3段)である。

プラトー測定に使用した波高弁別レベルは、夫々200 Vで α パルス+回路雑音の積分波高分布を測定しその分布より、 α パルス+回路雑音による計数率が0.1 cpsとなる波高弁別レベルより10~20%高いきりのよい値に選んでいる。

図5.22及び図5.23にそれぞれ試作核分裂計数管型電離箱FX-3のパルス電流増幅モードの印加高圧電圧に対する中性子計数率のプラトー特性及びパルス電荷増幅モードのプラトー特性を示す。図中には室温及び550°Cにおける測定値を示した。

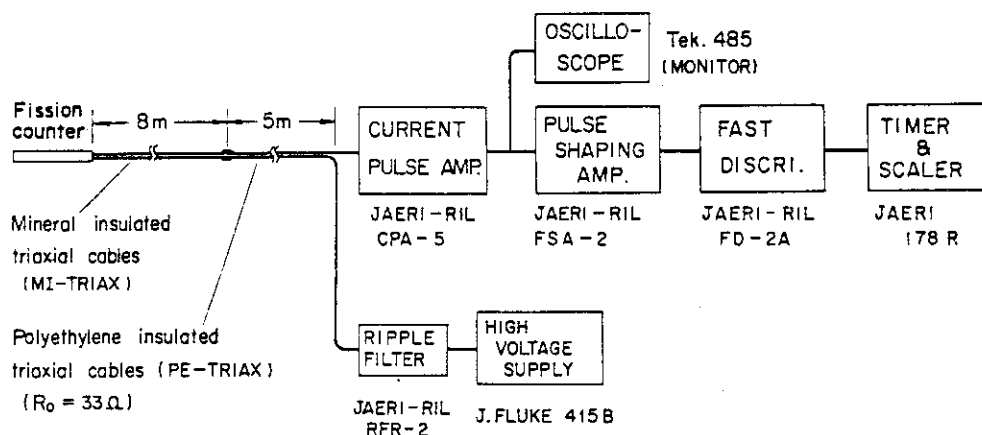


図 5.20 印加電圧プルトー測定系の構成(i)
(パルス電流増幅モード)

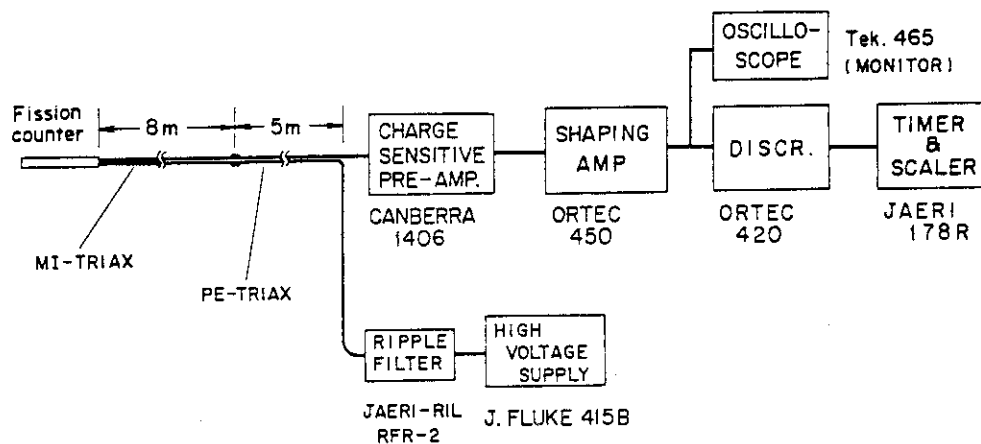


図 5.21 印加電圧プルトー測定系の構成(ii)
(パルス電荷増幅モード)

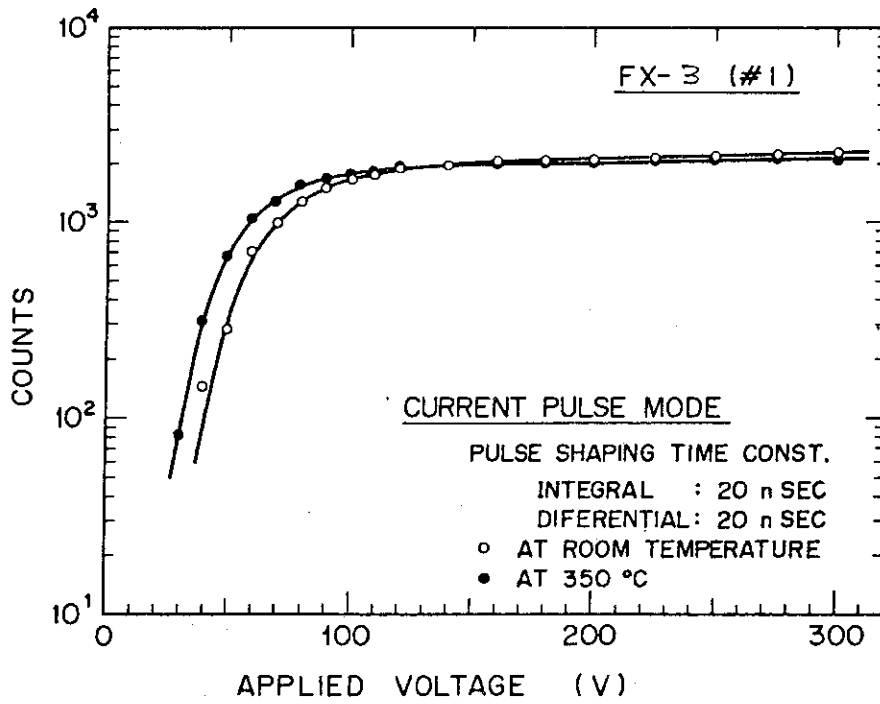


図 5.22 FX-3 のパルス電流増幅モードにおける印加電圧に対するプラトー特性

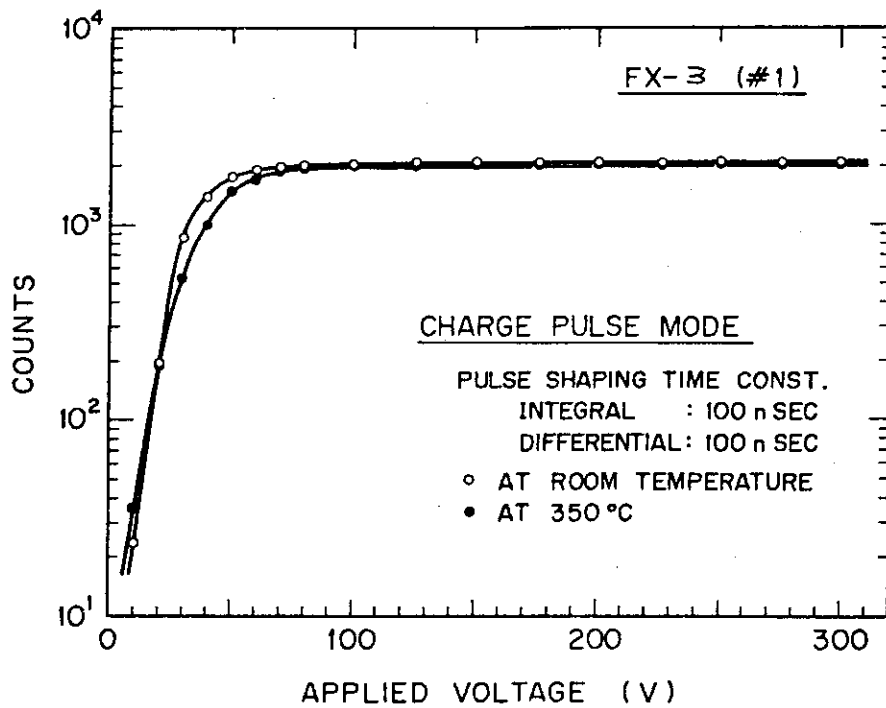


図 5.23 FX-3 のパルス電荷増幅モードにおける印加電圧プラトー特性

この二つの図を比較すると先述の如く、電荷パルスモードの方が明らかに優れたプラトーを有しており、一見優れて性能を有しているように見えてしまうので注意を要する。図 5.24 及び図 5.25 に同種の試作核分裂計数管型電離箱について、電流パルス増幅モードでは波高弁別レベルを 20% 高くし、一方電荷パルスモードでの測定の際は波高弁別レベルを約 3.2% 小さくして測定したプラトー特性を示す。

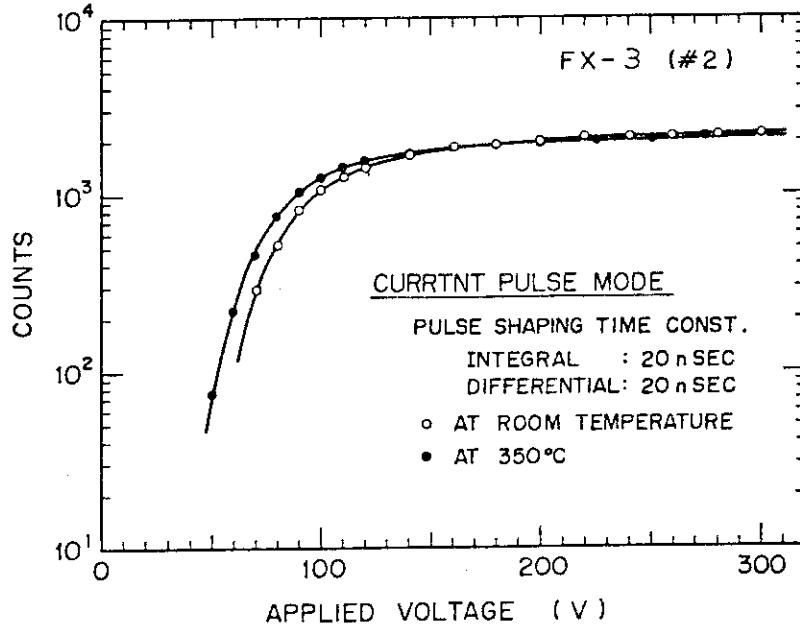


図 5.24 図 5.22 に示した FX-3 と同種の試作計数管電離箱で波高弁別レベルが 20% 高い場合の電流増幅モードの印加電圧プラトー特性

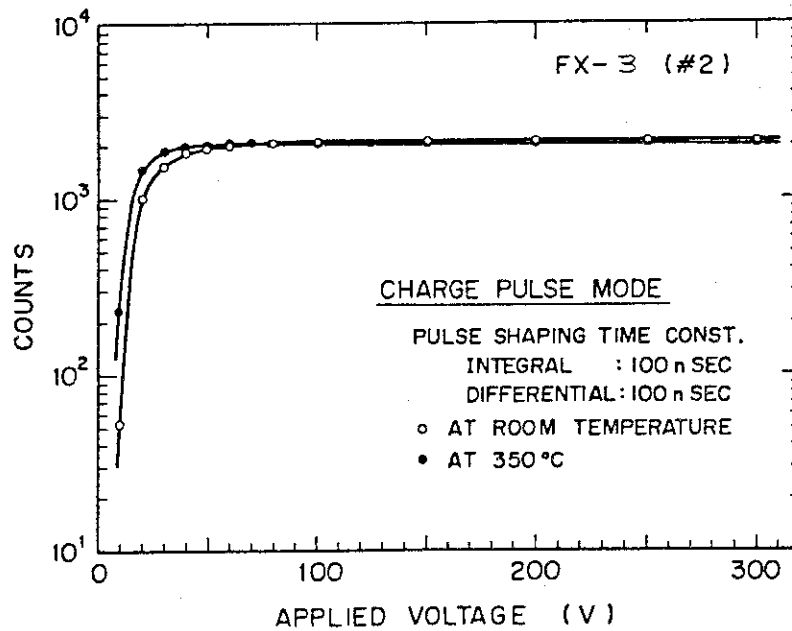


図 5.25 図 5.24 と同じ FX-3 で波高弁別レベルの設定値を図 5.23 の場合より約 3.2% 小さくして測定した電荷パルスモードにおける印加電圧プラトー特性

電流パルスモードの場合図 5.24 の場合はプラトー電圧が高くなり検出器の特性が図 5.22 の場
 に比べて大変悪い様に見えるがこれは波高弁別レベルの設定値の違いによるものである。

また図 5.25 の電荷モードの場合、大変低い電圧迄平坦なプラトーとなっているがこれも波高
 弁別レベルをわずかに下げた結果である。

尚、温度が高い場合、一般的に低印加電圧側では常温の場合よりも計数率が高く出ている理由
 は、図 5.16 の波高分布の温度依存性から見られるように、パルスの大きさが高温でわずかなが
 ら大きくなるために生ずるもので、又、印加電圧が高い場合は逆に高温の場合の方が常温のカー
 プより下に来ている理由は FX-3 の積分波高分布の項で述べた様に高温測定下では平均熱中
 性子温度がわずかに上昇し中性子感度が若干低下するためと考えられる。

5.5 中性子感度

中性子検出器の感度は中性子のエネルギーや周囲の物質が何であるかなど、いろいろな要因の
 影響を受けるので、その定義及び測定法について国際的にも論議があるところであり、IECの原
 子炉用放射線検出器に関する規格においても中性子検出器の感度については Perturbed Sensi-
 tivity か Unperturbed Sensitivity を明記せよとの勧告にとどまっている。

試作した核分裂計数管型電離箱の熱中性子感度の測定においては、できる限り Unperturbed
 Sensitivity が測定できる様な線源、減速材、検出器の配置を行い感度測定を実施した。

試作した核分裂計数管型電離箱の中性子感度の測定に用いた方法は、原理的には標準中性子検
 出器との置換比較法である。あらかじめ、工業技術院電子技術総合研究所の標準パイルで中性子
 感度を校正した標準用比例計数管を定位置に設置し計数を求め次いで、同位置に試作計数管を設
 置し同様に計数を求めて計数率の比と標準中性子検出器の中性子感度の値から試作核分裂計数管
 の中性子感度を求めた。中性子検出器の感度は、その印加電圧、パルス増幅器の増幅モード及び
 増幅度、波高弁別器の弁別レベル等により変化するので、以下の如くその相互関係を明確にし再
 現性のある測定をこころみた。

5.5.1 標準中性子検出器の校正

使用中の BF₃ 計数管の中からパルス電荷波高分布特性*及び安定度の優れた計数管 1 本を選
 び出し、更に最適な印加電圧、波形整形時間、波高弁別レベルを決定するため以下の手順によっ
 て測定を行った。

- a) 図 5.26 に示す BF₃ 計数管計数システムを構成し、メーカー推薦の印加電圧の上下にわたり、
 1600V, 1700V, 1800V の 3 点の印加電圧を選び、更に夫々の電圧に対して波形整形時定数
 1.0 μ s, 2.0 μ s (微分 1 次, 積分 3 次の擬似ガウシアン) の 2 ケースを組合せて、合計 6
 条件で BF₃ 比例計数管の波高分布特性を測定した。この測定の結果印加電圧 1700V, 波
 形整形時定数 2 μ s で、半値幅と壁効果による波高分布の尾に関して最も良い波高分布が得ら
 れたが、時定数については 1 μ s と 2 μ s との間あまり大きな差はなかったので実際に使
 用する印加電圧を 1700V 波形整形時間を短い方の 1 μ s と決定した。

* 比例計数管の出力パルスは主としてイオンの移動によって得られ、そのパルス幅やパルス電流波高は一
 定でなくパルス電流の時間積分値としてはじめて電離されたイオンペアの総量に比例する性質がある。こ
 のため良いパルス波高分布を得るためには電荷増幅を必要とする。

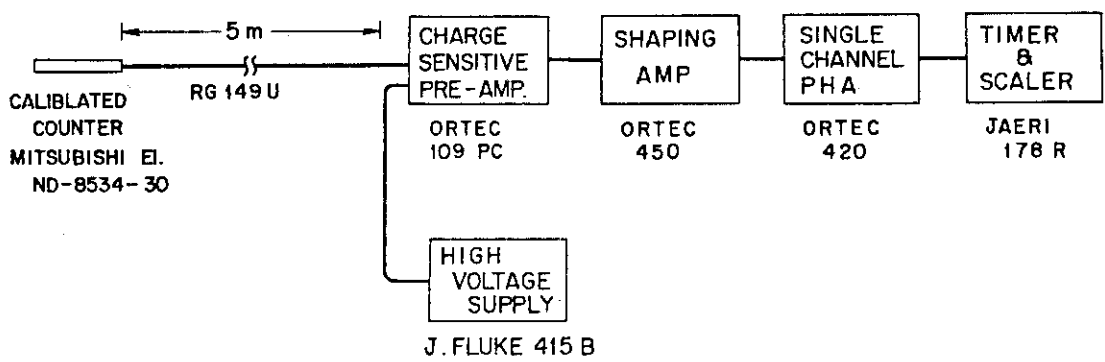


図 5.26 感度校正に使用したBF₃ 計数管のパルス波高分布と波高弁別器設定点

- b) 波高弁別レベルは波高分布曲線のうち回路雑音と壁効果による計数の尾の間の計数率がほとんど0の点の尾寄りに設定した。図 5.27 に校正用BF₃ 計数管の波高分布及び波高弁別設定点を参考迄に示す。
- c) この測定系の設定条件で、BF₃ 計数管を電総研の標準バイル中に挿入し計数誤差が0.5%以下となる計数時間で測定を行い、更に検出器の挿入位置の確度、バイル自体の較正確度等を含めて用意したBF₃ 計数管の中性子感度は $2.88 \text{ count/n cm}^{-2} \pm 3\%$ の評価がされた。

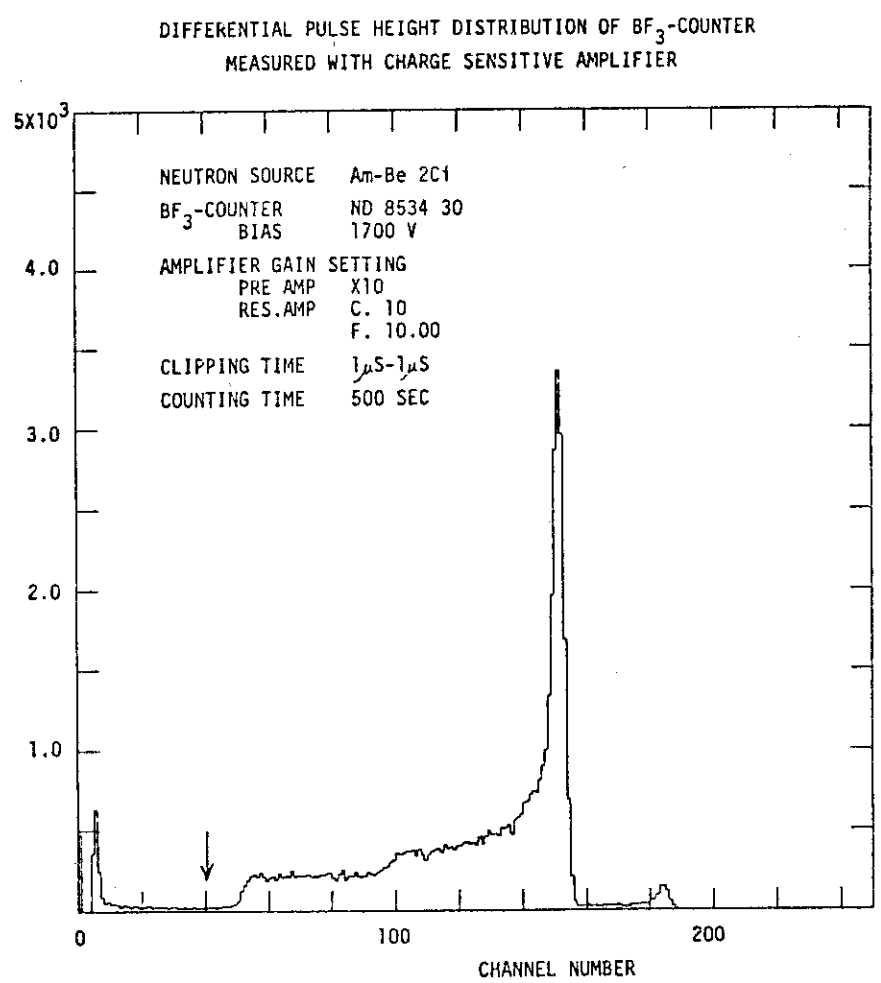


図 5.27 校正用BF₃ 計数管用計数回路系の構成

5.5.2 感度測定場の中性子束分布と補正係数

図 5.28 に試作中性子検出器の中性子感度測定における中性子検出器，中性子源，減速反射体の配置及び相互間の寸法を示す。この測定体系においては較正用中性子検出器の軸方向に無視し得ない中性子束密度の分布が生じていると思われるので，較正用標準中性子検出器と供試試作核分裂計数管の受感長が異なる場合その補正を行う必要がある。

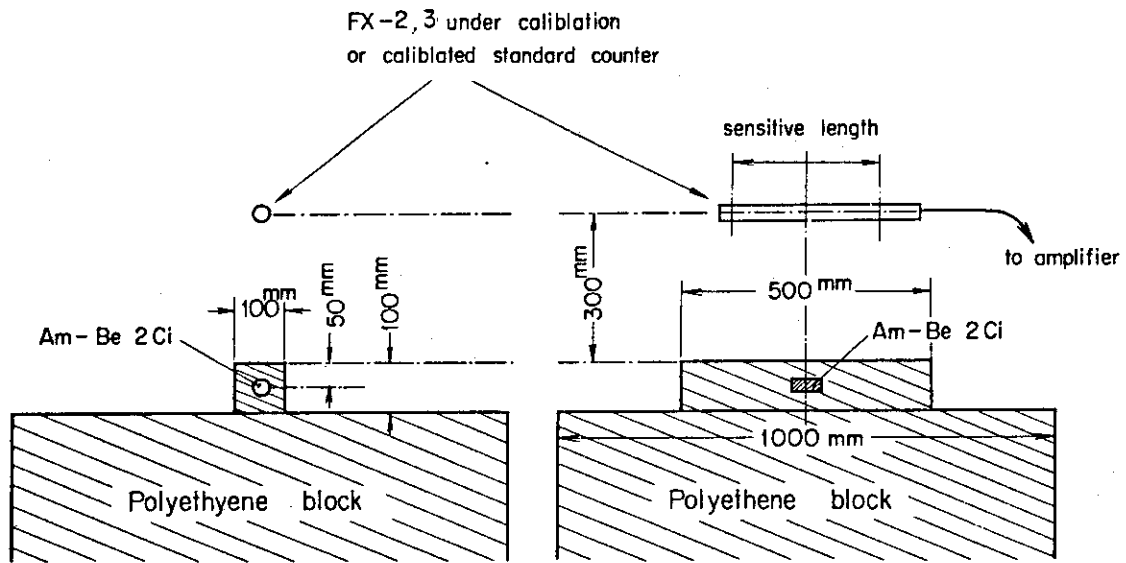


図 5.28 試作核分裂計数管型電離箱の中性子感度測定における中性子検出器，中性子源，減速反射体の配置

このため計数管設置位置の軸方向の中性子束密度分布の測定を⁶LiF及び⁷LiFのTLD素子を用いて行った。中性子束密度分布の測定結果を図 5.29 に示す。また測定の詳細をAppendix 5.1 に示す。

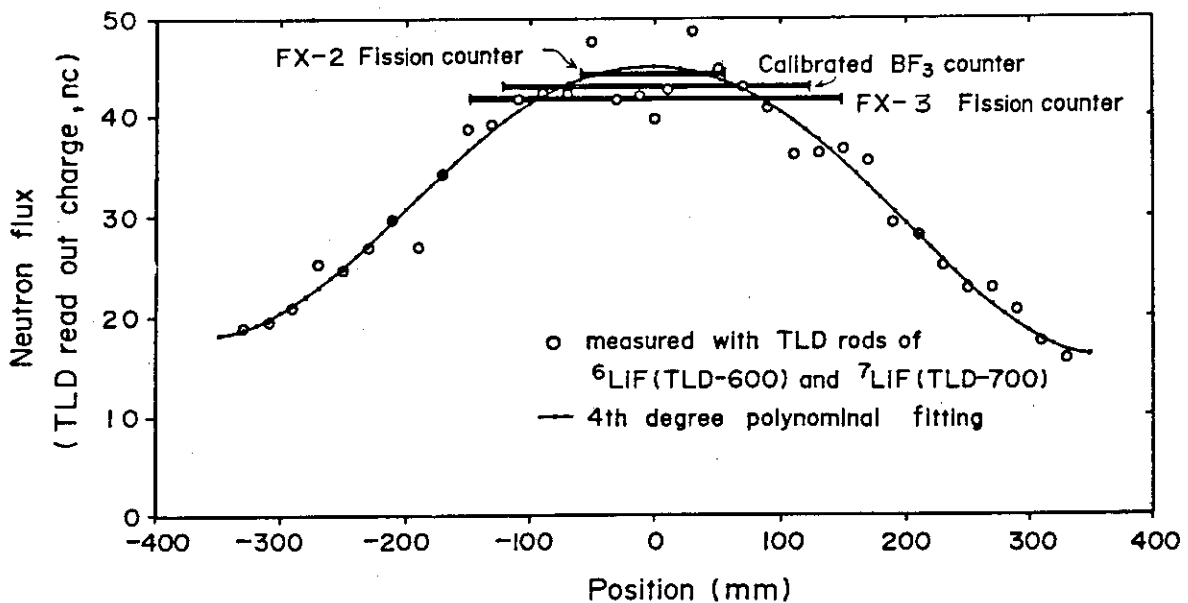


図 5.29 中性子感度測定場の中性子束密度分布の測定結果

4次多項式の形にフィッティングを行った中性子束分束 $f_n(x)$ は

$$f_n(x) = 1.781 \times 10^{-5} x^4 + 7.469 \times 10^{-6} x^3 - 4.453 \times 10^{-2} x^2 - 3.780 \times 10^{-2} x + 4.513 \quad (5.1)$$

でこの式から、較正用標準BF₃ 計数管（受感長 241 mm）、に対する平均中性子束 F_s とFX-2（FX-2A, FX-2D 共に、受感長 120 mm）及びFX-3（FX-2B, 受感長 300 mm）に対する平均中性子束 F_2 及び F_3 の比を夫々求めると

FX-2, FX-2A, FX-2D に対して

$$\frac{F_2}{F_s} = \frac{\frac{1}{b_2 - a_2} \int_{a_2 = -60}^{b_2 = 60} f(x) dx}{\frac{1}{b_s - a_s} \int_{a_s = -120.5}^{b_s = 120.5} F(x) dx} = 1.036$$

補正係数 $K_2 = F_s / F_2 = 1 / 1.036 = 0.966$ (5.2)

$$\frac{F_3}{F_s} = \frac{\frac{1}{b_3 - a_3} \int_{a_3 = -150}^{b_3 = 150} f(x) dx}{\frac{1}{b_s - a_s} \int_{a_s = -120.5}^{b_s = 120.5} f(x) dx} = 0.975$$

補正係数 $K_3 = F_s / F_3 = 1 / 0.975 = 1.0256$ (5.3)

となる。

従って標準BF-3計数管と置換えて測定した夫々の試作核分裂計数管型電離箱の中性子感度に上記の比の逆数即ち中性子感度の補正係数 K_i を乗ずることによって受感長の違いに関する中性子感度の補正を行うことができる。

5.5.3 中性子感度測定

表 5.4 (a), (b), (c) 及び (d) に試作核分裂計数管型電離箱 FX-2 及び FX-3 の中性子感度の測定に関する手順及び詳細データの例を示す。

(a) は中性子感度測定場における較正用 BF₃ の計数率を与えるもので、(b) は試作核分裂計数管型電離箱 FX-2 の計数値と中性子感度、(c) は同 FX-3 の計数値と中性子感度を示すものである。

中性子感度に関するFX-2及びFX-3の設計値は夫々、0.12 cps/n/cm²s, 0.3 cps/n/cm²s で、これに対して、夫々の測定値は $0.117 \pm 3\% \text{ cps/n/cm}^2\text{s}$ 及び $0.308 \pm 3\% \text{ cps/n/cm}^2\text{s}$ となり、試作核分裂計数管の中性子感度は設計値と大変良く一致した。また同表(d)は同型、同サイズの別の試作核分裂計数管に対する測定値で、(c)の場合に比べて約13%程度、また設計値に対して約16%感度が大きい。

表 5.4 中性子感度測定手順及びデータ

(a) 中性子検出器設置における較正用 BF ₃ 計数管測定系の計数率			
	N(counts/100 s)	$\Delta N = N - \bar{N}$	2 σ
run-1	45422	- 22	
run-2	45500	+ 56	
run-3	45385	- 59	426
run-4	45309	- 135	
run-5	45604	+ 160	
<hr/>			
	$\Sigma N = 227220$	$1 / \sqrt{\Sigma N} = 0.0021$	
	$\bar{N} = 45444$	$\sqrt{\bar{N}} = 213.2 = \sigma$	
<hr/>			
$N = 45444 \pm 0.0021$			
$n(\text{counts/s}) = 454.4 \pm 0.21 \%$			
測定系の中性子感度			
$S(\text{BF}_3) = 2.88 \text{ cps/n/cm}^2 \text{ s} \pm 3 \%$			
(b) 較正用 BF ₃ 計数管と同位置に置いた試作核分裂計数管型電離箱 FX-2 の測定系の計数率 と中性子感度 (波型整形: 時定数 20 ns 擬似ガウシャン, 波高弁別レベルは α 線計数率 0.1 cps の点に設定)			
	N(counts/10 ³ s)	$\Delta N = N - \bar{N}$	2 σ
run-1	19080	- 11	
run-2	19022	- 69	
run-3	19233	+ 142	
run-4	19091	0	
run-5	18999	- 92	
run-6	19175	+ 84	276
run-7	19088	- 3	426
run-8	19098	+ 7	
run-9	18958	- 133	
run-10	19167	+ 76	
<hr/>			
	$\Sigma N = 190911$	$1 / \sqrt{\Sigma N} = 0.0023$	
	$\bar{N} = 19091$	$\sqrt{\bar{N}} = 138 = \sigma$	
<hr/>			
$N = 19091 \pm 0.0023$			
$n(\text{counts/s}) = 19.09 \pm 0.23 \%$			

表 5.4 (続 き)

FX-2 の中性子感度 S (FX-2)

$$\begin{aligned}
 S(\text{FX-2}) &= S(\text{BF}_3) \cdot n(\text{FX-2}) / n(\text{BF}_3) \cdot K_2 \\
 &= 2.88 \pm 3\% \text{ cps/n/cm}^2 \text{ s} \times (19.09 \pm 0.23\% \text{ cps} / 454.4 \pm 0.21\% \text{ cps}) \times 0.966 \\
 &= 0.117 \text{ cps/n/cm}^2 \text{ s} \pm 3\%
 \end{aligned}$$

(c) 較正用 BF_3 計数管と同位置に置いた試作 FX-3 の測定系の計数率と中性子感度
(測定条件は FX-2 と同じ)

	N(counts/10 ² s)	$\Delta N = N - \bar{N}$	2 σ
run-1	4739	- 4	
run-2	4696	- 47	
run-3	4658	- 85	
run-4	4701	- 42	
run-5	4743	0	138
run-6	4877	+ 134	
run-7	4722	- 21	
run-8	4710	- 33	
run-9	4852	+ 109	
run-10	4732	+ 11	

$$\Sigma N = 47430$$

$$1 / \sqrt{\Sigma N} = 0.0046$$

$$\bar{N} = 4743$$

$$\sqrt{\bar{N}} = 58.9 = \sigma$$

$$N = 4743 \pm 0.0046$$

$$n(\text{counts/s}) = 47.43 \pm 0.46\%$$

FX-3 の中性子感度 S (FX-3)

$$\begin{aligned}
 S(\text{FX-3}) &= S(\text{BF}_3) \cdot n(\text{FX-3}) / n(\text{BF}_3) \cdot K_3 \\
 &= 2.88 \pm 3\% \text{ cps/n/cm}^2 \text{ s} \times (47.43 \pm 0.46\% \text{ cps} / 454.4 \pm 0.21\% \text{ cps}) \times 1.0256 \\
 &= 0.308 \text{ cps/n/cm}^2 \text{ s} \pm 3\%
 \end{aligned}$$

表 5.4 (続 き)

(d)(c)で試験した試作核分裂計数管型電離箱 FX-3 と同型であるが別の試作品の中性子感度

	$N(\text{counts}/10^2 \text{s})$	$\Delta N = N - \bar{N}$	2σ
run-1	5195	-139	
run-2	5425	+91	
run-3	5385	+51	
run-4	5269	-65	
run-5	5337	+3	146
run-6	5378	+44	
run-7	5367	+33	
run-8	5268	-66	
run-9	5287	-47	
run-10	5428	+94	

$\Sigma N = 53339$	$1 / \sqrt{\Sigma N} = 0.0043$
$\bar{N} = 5334$	$\sqrt{\bar{N}} = 73.0 = \sigma$

$N = 5334 \pm 0.0043$

$n(\text{counts/s}) = 53.34 \pm 0.43 \%$

FX-3' の中性子感度 $S(\text{FX-3}')$ は

$$S(\text{FX-3}') = 2.88 \pm 3\% \text{ cps/n/cm}^2 \text{ s} \times (53.34 \pm 0.43\% \text{ cps}/454.4 \pm 0.21\% \text{ cps}) \times 1.0256$$

$$= 0.347 \text{ cps/n/cm}^2 \text{ s} \pm 3\%$$

現在実用的な中性子検出器の感度の誤差はメーカーの仕様を示されていない場合が多いが、製品ベースでは極めて厳しい品質管理のもとで製作して±20%の仕様が限界と言われている。従って試作品としてはこの程度の誤差は止むを得ないものと考えられる。以上の試作核分裂計数管型電離箱の中性子感度の測定値は2章2.5及び3章3.1.6で述べた中性子感度の計算法による設計値と極めてよく一致しており、先に述べた設計法で設計し正しく製作が行われれば、ほぼ確実に目標の中性子感度の核分裂計数管電離箱ができることが分かった。

5.5.4 直流モード及びキャンベルモードに対する中性子感度

a) 直流モードに於ける中性子感度

中性子源による標準中性子場では中性子束密度があまり高くないので、核分裂計数管型電離箱のように内部にα線源をもつパルス電離箱では微小な中性子電流はα線電流のゆらぎの中にかくれてしまい正確な直流モードに於ける中性子感度を直接測定することはむずかしい事が多い。このため、直流モードにおける中性子感度は2.5.2の(2.32)式を用いて計数モードにおける測定値から計算した。

(2.32)式中のqはパルス電荷の波高分布の平均値で与えられるが、実際に計算してみるとパルス電荷波高分布の最頻値の値とあまり大差がない値となる。

核分裂計数管はα線や高中性子束密度で使用した直後に現われる核分裂生成物による暗電流があるため、直流モードで使用されることは多くは無いが、参考迄に各種試作核分裂計数管の直流モードに於ける感度を表5.5に示す。

b) キャンベルモードにおける中性子感度

キャンベルモードにおける中性子感度も低い中性子束密度の標準場で直接測定することは困難である。このため既に求められた核分裂計数管の計数モードで測定した諸定数から計算で求めることが望ましい。これらの計算式は2.5.3の(2.33)式～(2.37)式であたえられている。これらの関係式から求めた試作核分裂計数管型電離箱の各種モデルのキャンベルモードにおける中性子感度を表5.5中に示す。

表 5.5 試作核分裂計数管型電離箱の各種の中性子感度

Type of chambers		FX-2A	FX-2	FX-3	FX-2D
		Neutron sensitivity			
Pulse mode (cps/ncm ⁻² s ⁻¹)		0.12	0.12	0.3	0.12
D.C. mode (10 ⁻¹⁴ A/ncm ⁻² s ⁻¹)		1.3	2.3	4.1	1.5
Campbell mode	0 < f < f _i	7.0	22	28	9.8
	(10 ⁻²⁸ A ² /ncm ⁻² s ⁻¹ Hz) f _i < f < f _e	1.8	5.4	6.9	2.5
Effective frequency bandwidth of power spectrum density	f _e (MHz)	15.5	6.7	7.8	10
	f _i (KHz)	14.0	3.5	5.0	6.2

5.6 ガンマ線感度

試作した核分裂計数管型電離箱の γ 線感度試験はコバルト60照射用45KCi Co-60線源を用いて行った。照射ケーブ中における線源と試作電離箱の配置及び使用計測器の概要を図5.30及び図5.31 a)及びb)に示す。線源を照射ケーブの中心に置いた場合の γ 線線量率は線源中心からの距離の関数として毎月校正され、公表されているが図5.31 b)に示すように、電離箱の受感長が長くなると、電離箱が受ける平均の γ 線量率は線源周りの γ 線量率分布の影響で若干中心部の γ 線量率より小さくなる。この影響を除き電離箱軸方向にわたる平均の γ 線量率を正しく評価するため中性子感度の測定の場合と同様に直径D長さ l の円筒形の線源からdだけはなれた位置での長さ l の核分裂計数管電離箱の軸方向長さ l の間の平均値 $\bar{\phi}_r$ を γ 線線量率として使用する必要がある。

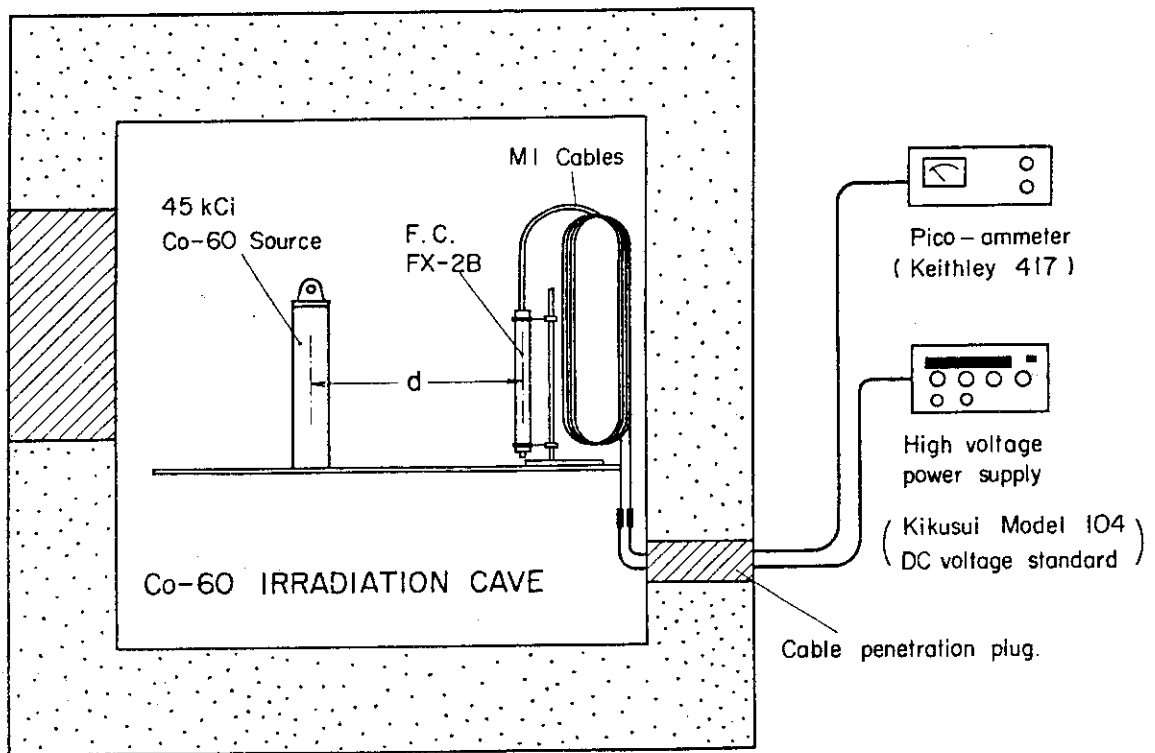
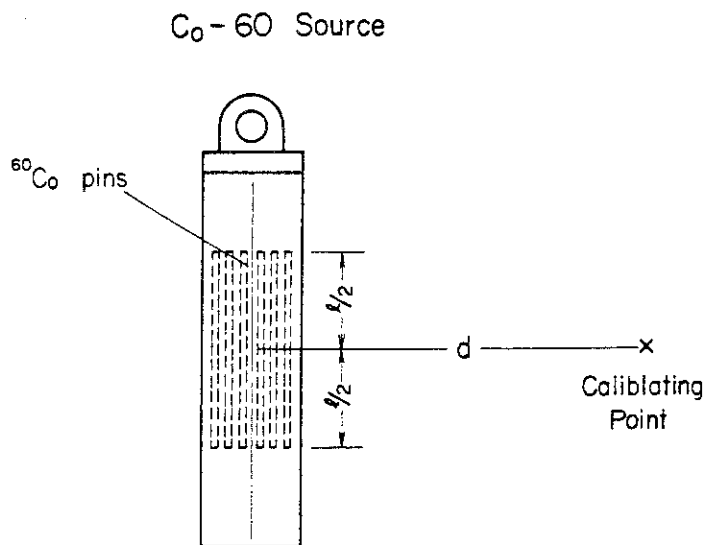
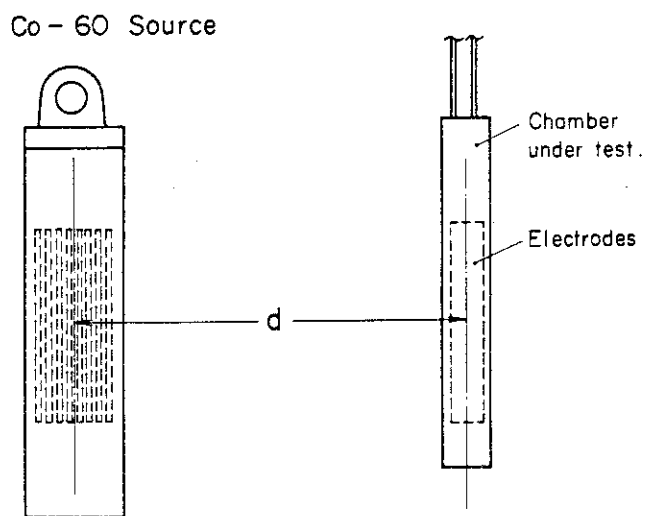


図5.30 γ 線感度試験に用いたコバルト60照射ケーブ中の線源、検出器及び計測機器の概要



(a) 線源のみの場合の γ 線量率の較正点



(b) 供試核分裂計数管型電離箱の位置

図 5.31 線源と供試核分裂計数管型電離箱の配置

試作した各種の核分裂計数管型電離箱の γ 線感度を表5.6に示す。この表中の γ 線感度が中性子感度と直接比例していないのは、同じ中性子感度のものでも封入ガス圧や電極間隔が異なるモデルであれば、これによって γ 線感度が異なること、また電極長が2分の1となっても電極両端の保持機構があり、 γ 線受感部の体積が2分の1にはならないことなどがその理由である。

一方 γ 線感度の測定結果をみるとこれらの試作核分裂計数管型電離箱は欧米の同等の中性子感度をもつ高温核分裂計数管に比べて γ 線感度が大変低くなっているが*この理由は既に述べたようにウランの塗布厚を若干厚くし、さらに両電極に濃縮ウランを塗布して、同じ中性子感度でも、 γ 線の感じる電極間のガス容積が大略1/3になっていること、電極間隔とガス圧の積を比較的小さく設計している等のためである。これらは高温耐熱性を向上させるための、電極長を短縮する設計努力、及び中性子パルス出力電流波高値を大きく、電荷収集時間を短くする設計努力によって副次的に得られた成果と言うこともできるが、この中性子感度に対する γ 線感度の比が小さいことも、今回開発した高温用核分裂計数管型電離箱の大きな特徴の一つである。

表5.6 試作核分裂計数管型電離箱の γ 線感度

試作型名	FX-2A	FX-2	FX-3	FX-2D
γ 線感度 (10^{-11} A/Rh $^{-1}$)	0.7	1.2	2.0	0.8

測定線源：Co-60

5.7 高 γ 線下における中性子測定試験

一般に核分裂計数管型電離箱を用いた中性子計測系では、 γ 線によって誘起される γ 線パルスおよび電離箱内部で発生する α 線パルスを波高弁別器によって除去し、中性子パルスを計測する。核分裂計数管型電離箱からの中性子信号のパルス波高は、 γ 線信号および α 線信号のそれぞれのパルス波高よりも十分大きい。またこの中でも γ 線による1つのパルスは α 線のパルスに比べると極めて小さい。従って、核分裂計数管型電離箱では γ 線レベルのあまり高くない状態では、中性子信号との弁別に γ 線信号が問題となることはほとんどない。

しかし、タンク型高速炉や集積型大型高温ガス炉の起動系用計数管は一般に高 γ 線バックグラウンドのもとで使用することが要求されることが多い。このように、 γ 線レベルが特に高くなると γ 線パルスのパイルアップが生じ、その振幅が中性子パルスの大きさに近くなってくると中性子パルスとの弁別が困難になってくる。この結果、中性子計測に大きな誤差を与えることになる。従って、この様な条件下で使用する起動系の設計にあたっては、 γ 線パルスのパイルアップ誤差が問題とならないよう検討がなされる。

中性子計測系の設計にあたって、 γ 線パルスのパイルアップの点だけから言えば、検出器から

* 例えば英国で開発された高温核分裂計数管P7Aに比べて γ 線感度/中性子感度の比は大略4分の1となっている。

の出力信号を短い時定数でパルス整形し、パルス幅を狭くすればするほどパイルアップの確率は小さくなる。しかし、パルス整形時定数を短かくすると、それだけ計測系の周波数帯域が広がり、また、ある程度以上の短い時定数でパルス整形を行うと出力パルス波高は極度に低下するので、信号対雑音比 (S/N) が悪くなる。一方、上記のようにパルス整形時定数を長くすると、 γ 線パルスのパイルアップが生じ、中性子対 γ 線比 (n/γ) が悪くなる(12)。

従って、中性子計測系の設計にあたっては、電流パルス出力が大きい核分裂計数管型電離箱を使用し S/N および n/γ 比の両方を考慮し、これらが最大になる最適なパルス整形時定数を選ぶ必要がある。開発試作した核分裂計数管型電離箱は、出力電流パルス波形の半値幅は 50 ns (FWHM) 以下と非常に短かく、さらに、S/N 比を良くするため出力電流パルス波高も従来の高温用計数管よりも数倍大きく設計、製作した。

このため、5章 5.1.2 で述べた如く従来の核分裂計数管に比べて大変短かい時定数でパルス整形が可能であり、より優れた $n-\gamma$ 比が得られることが容易に予想できる。

5.7.1 試験装置および測定系

高 γ 線下における中性子測定試験は、Co-60 照射室の照射ケーブルで 45 K Ci の照射用線源を用いて実施した。

本測定に使用した中性子計測系は 5章図 5.1 に示した計測系と同じである。本測定では、検出器出力信号は付属の MI ケーブル 8 m とポリエチレン絶縁トライキシャルケーブル 10 m を電流パルスで伝送し、増幅し測定を行っている。

5.7.2 測定方法

図 5.32～図 5.34 に示すように先ず Co-60 照射室内で試作核分裂計数管と 45 K Ci Co-60 線源をぴったりくっつけて、現実的に得られる最大の γ 線照射率の状態とした。FX-2 の Group と FX-3 (旧 FX-2B) の Group では図に示されている平均 γ 線線量率が異なっているが、これは核分裂計数管の長さ方向の γ 線線量率分布を考慮し、等価的な値としてその受感部の長さ方向 γ 線線量率の平均値を表示しているので電極長の長い FX-3 の方が平均 γ 線線量率 $\bar{\phi}_\gamma$ が小さくなっている。しかし核分裂計数管の電極中心部のみについて見てみると同じ線量率である。高 γ 線下における中性子測定は単に計数すると言うだけでは無く、中性子測定特性におよぼす γ 線の影響を詳しく調べるため、夫々出力パルス電流の波高分布及び積分波高分布を測定し詳しく調べた。

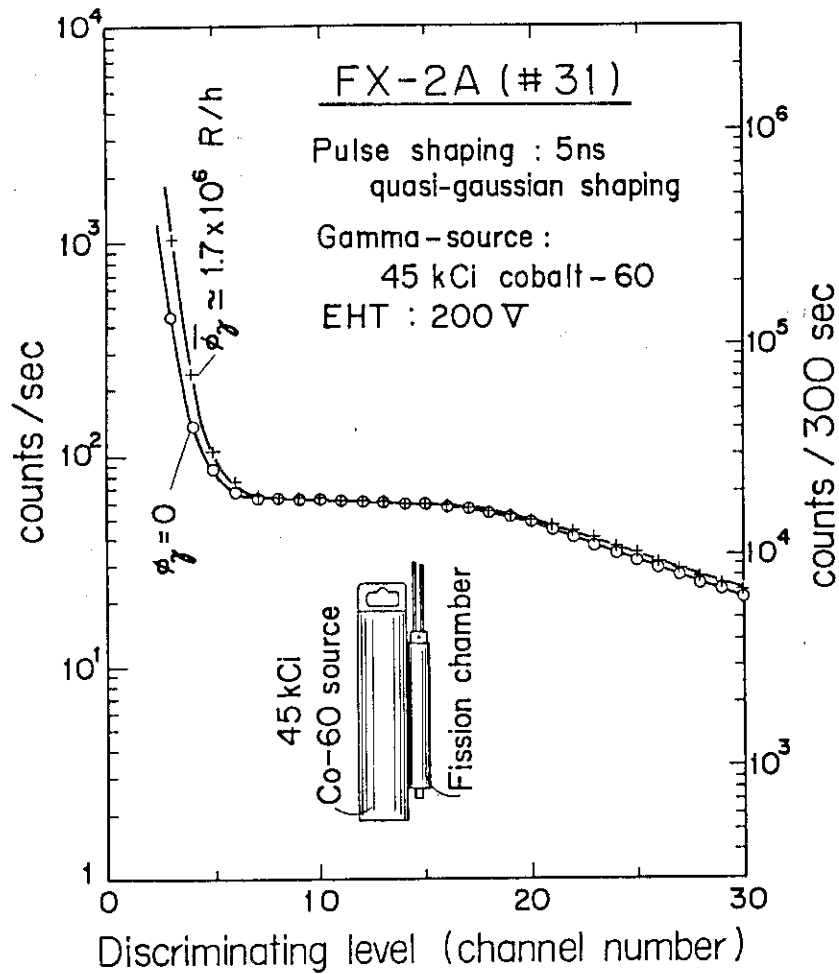


図 5.32 高 γ 線バックグラウンドの下での中性子計測(1)
FX-2Aのインテグラルバイアス曲線に与える γ 線バックグラウンドの影響
($\phi_\gamma = 1.7 \times 10^6 \text{ R/h}$)

5.7.3 測定結果

図 5.32 に試作核分裂計数管型電離箱 FX-2A の高 γ 線下における中性子測定の積分波高分布を示す。図には Co-60 線源がある場合と無い場合の両方の測定値を示した。いずれも測定条件は印加電圧 200, パルス電流伝送方式, 波形整形は時定数 5 ns の擬似ガウシャンである。また図 5.33 ~ 図 5.34 には夫々試作核分裂計数管型電離箱 FX-2D 及び FX-3 の γ 線レベルが 0 の場合及び高 γ 線下での中性子測定の積分波高分布を示した。この 3 枚の図の, 特に積分波高分布曲線の左部の α パルスの計数による立上り部分に, パイルアップした γ 線パルスがどのように重畳してくるか注目してみると, FX-2A では 0.5 mm ($\text{Pd} = 3.5 \text{ Atm} \cdot \text{mm}$) という狭い電極間隔に加えて等価的電荷収集時間 43 ns, 出力電流パルス 2.6 μA という高性能のため約 170 万 R/hr の γ 線線量率に対しても極めて小さな影響しか出ていない。FX-2D, FX-3 となると積分波高分布曲線の左肩の立上り部分が徐々に右へ寄って来るが, FX-3 の場合でもまだ中性子パルスのプラトー部分は広く残っており, 中性子の検出感度が大幅に低下するような位置に波高弁別器の設定値を決める必要はない。

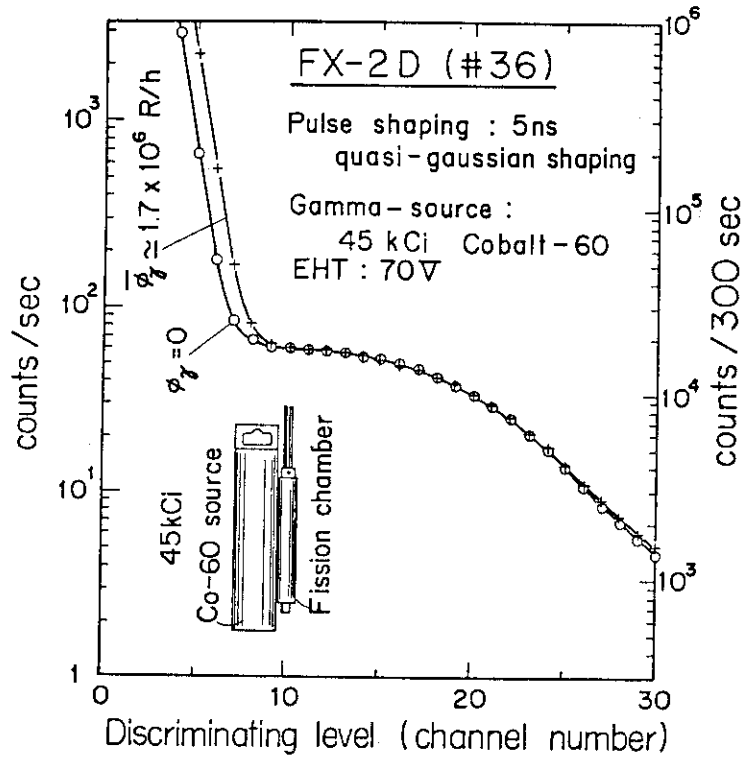


図 5.33 高 γ 線バックグラウンドの下での中性子計測(2)
FX-2Dのインテグラルバイアス曲線に与える γ 線バックグラウンドの影響
($\bar{\phi}_\gamma = 1.7 \times 10^6 \text{ R/h}$)

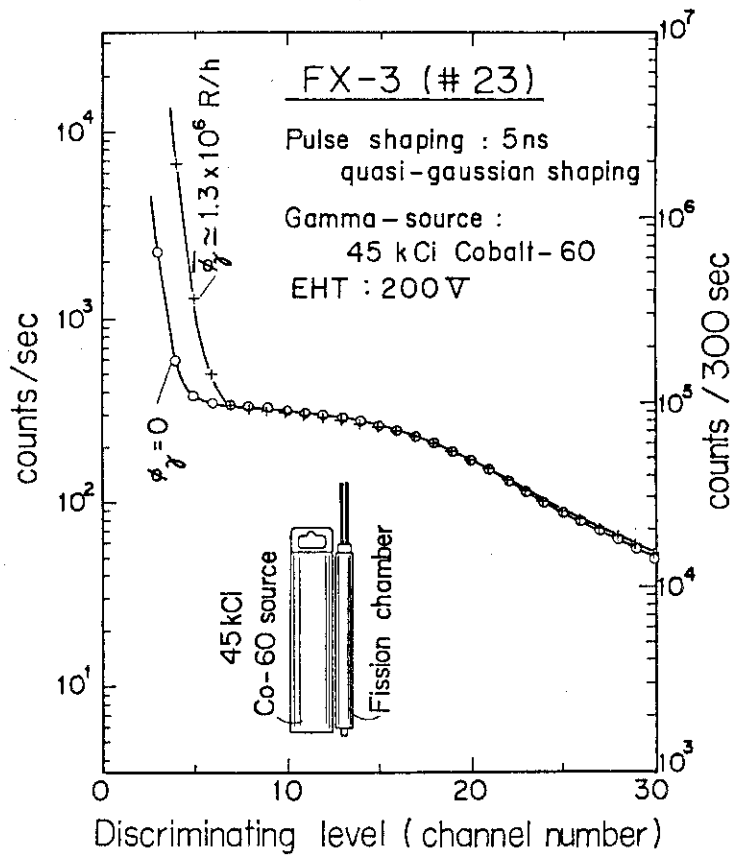


図 5.34 高 γ 線バックグラウンドの下での中性子計測(3)
FX-3のインテグラルバイアス曲線に与える γ 線バックグラウンドの影響
($\bar{\phi}_\gamma = 1.3 \times 10^6 \text{ R/h}$)

この実験結果が示すように開発した核分裂計数管型電離箱は 100 万 R/hr を越す γ 線バックグラウンドのもとでも数 $\text{n/cm}^2 \text{ s}$ の低レベル中性子束密度の測定が可能である。

次いで試作核分裂計数管型電離箱のうちで最も中性子感度が高く γ 線の影響を最も受けやすい FX-3 について γ 線バックグラウンドレベルが変わった場合及び波形整形時定数を変えた場合について調べた。この実験はあるプロジェクトにおける検証試験の目的で行ったもので 350°C について測定を行っているが、温度の依存性はほとんど無いことが既に測定されているので測定温度自体に特別な意味はない。本実験も Co-60 照射室で行ったもので測定の機器配置の概要を図 5.35 に示す。

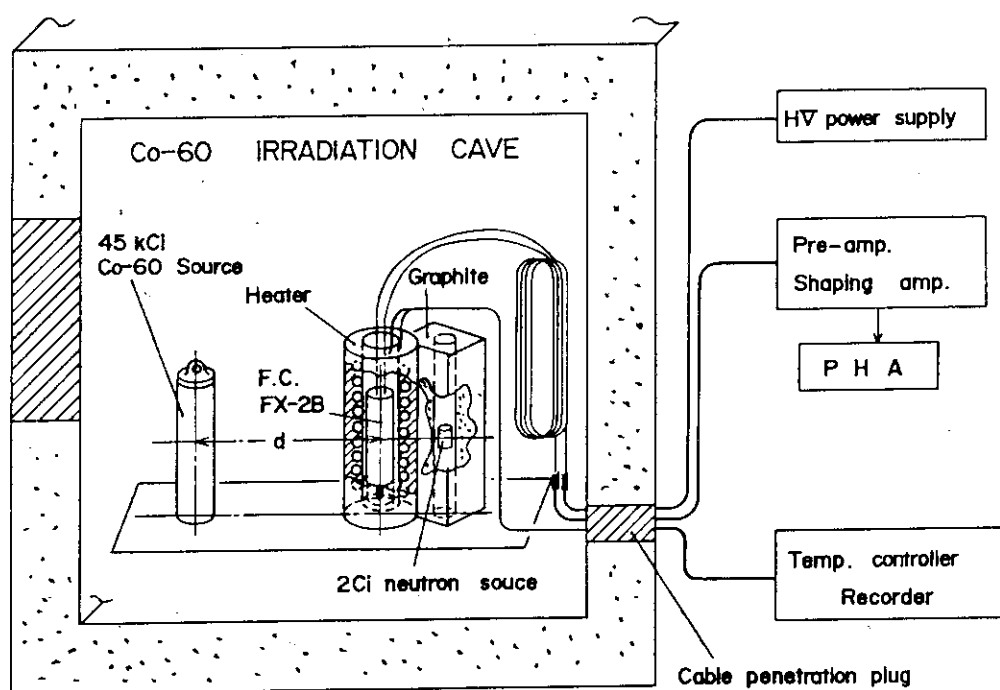


図 5.35 Co-60 照射ケーブル内における γ 線源、供試核分裂計数管型電離箱、中性子源等の配置

実験に用いたパルス整形時定数は 10 ns 、 20 ns 、 50 ns で γ 線バックグラウンドは夫々 $5.9 \times 10^5 \text{ R/hr}$ 、 $1.4 \times 10^5 \text{ R/hr}$ 、 $2.3 \times 10^4 \text{ R/hr}$ 及び 0 R/hr である。上記の γ 線線量率は核分裂計数管の受感部の長さ方向の平均値であり、例えば上記の $5.9 \times 10^5 \text{ R/hr}$ の線量率の場合、核分裂計数管の中心位置で点状化学線量計で較正された公称線量率は $6.5 \times 10^5 \text{ R/hr}$ である。

(a) 検出器の α 線パルス

図 5.36 は中性子源なし、 γ 線量率 (ϕ_γ) を 0 R/hr の状態で、パルス整形時定数 (τ_s) を 10 ns 、 20 ns 、 50 ns と変えた時のそれぞれの積分波高分布を比較したものである。この波高分布は濃縮ウランから出る α 線によるパルスによって生じているものである。図では、 τ_s が 10 ns 、 20 ns 、 50 ns と大きくなるに従い、同図左部の α 線パルスの積分波高分布は波高値の高い方へ平行移動している。このことは核分裂計数管自身で発生している α 線パルスのパイルアップがこの時定数でも既に起っており、 τ_s を大きくするにしたがい確率が大きくなることを示している。

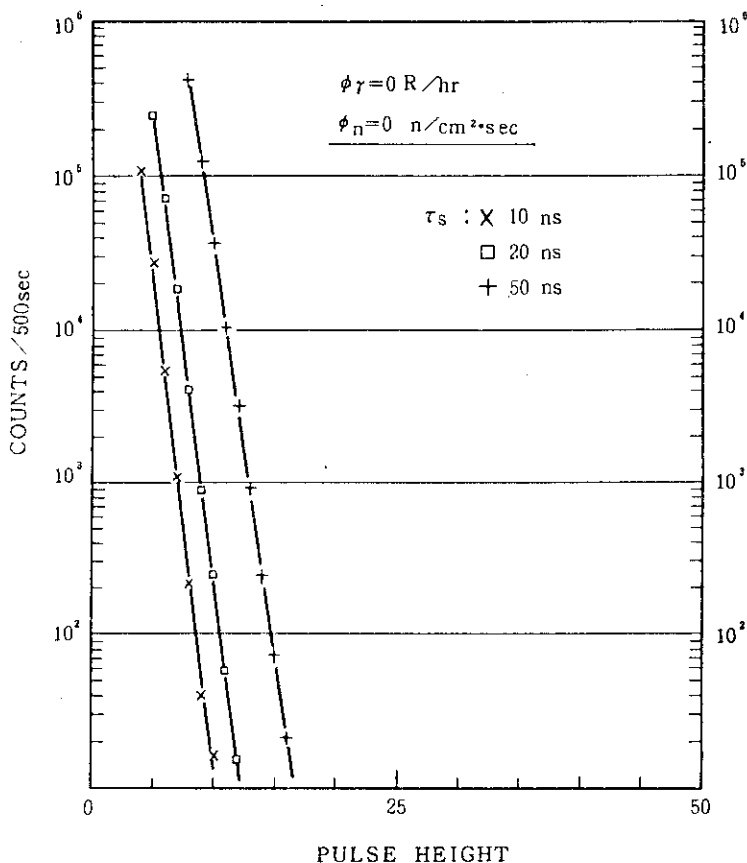


図 5.36 波形整形時定数 10 ns, 20 ns, 50 ns に対する FX-3 の α パルスの積分波高分布 $\phi_n=0$, $\phi_r=0$, $T=350^\circ\text{C}$

(b) γ 線がない時の中性子計測特性

図 5.37 は γ 線源なし ($\phi_r=0$) の状態で, τ_s を 10 ns, 20 ns, 50 ns と変えた時の中性子パルスの積分波高分布を比較したものである。この図の曲線で左部立上りは, 上記の検出器内部の α 線パルスによるものである。この図からも, 中性子源がない時と同様, τ_s を長くすると α 線パルスのパイルアップが増加し, 結果的に, 中性子パルスのプラトー領域を狭めることがわかる。

(c) パルス整形時定数を変えた時の中性子計測特性

図 5.38 は γ 線のバックグラウンド $\phi_r=2.3 \times 10^4 \text{ R/hr}$ の場合, τ_s を 10 ns, 20 ns, 50 ns と変えた時の積分波高分布を比較したものである。この図の曲線で, 左部立上りは検出器自身の α 線パルスと γ 線パルスの和によって生じている。しかし, $\phi_r=2.3 \times 10^4 \text{ R/hr}$ 程度では γ 線パルスのパイルアップは少なく, $\phi_r=0 \text{ R/hr}$ の時のそれぞれの積分波高分布とはほぼ同様の波高分布となっている。

図 5.39 は $\phi_r=1.4 \times 10^5 \text{ R/hr}$ の場合, τ_s を変えた時の積分波高分布を比較したものである。 ϕ_r が $1.4 \times 10^5 \text{ R/hr}$ 程度でも, τ_s を 10 ns, あるいは 20 ns に選べば, γ 線パイルのパイルアップの影響は殆んどない。しかし, τ_s を 50 ns 以上にすると γ 線パルスのパイルアップの影響が現れることがわかる。

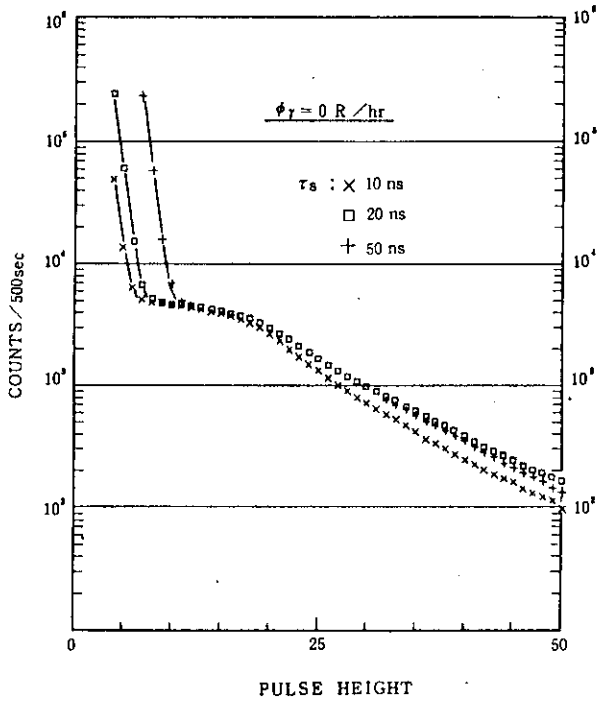


図 5.37 波形整形時定数 10 ns, 20 ns, 50 ns に対する FX-3 の中性子パルスの積分波高分布 $\phi_n = 0$, $T = 350^\circ\text{C}$

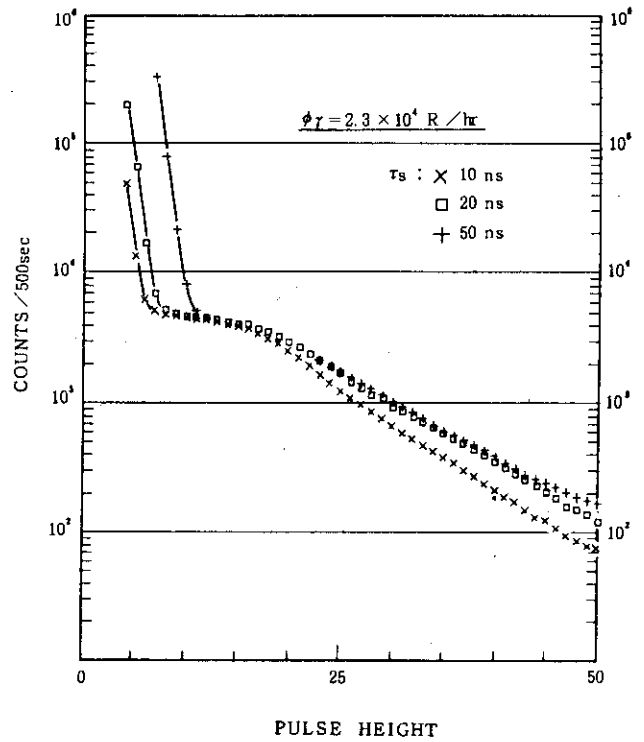


図 5.38 γ 線バックグラウンド $\phi_\gamma = 2.3 \times 10^4 \text{ R/h}$ における FX-3 の出力パルス電流の積分波高分布

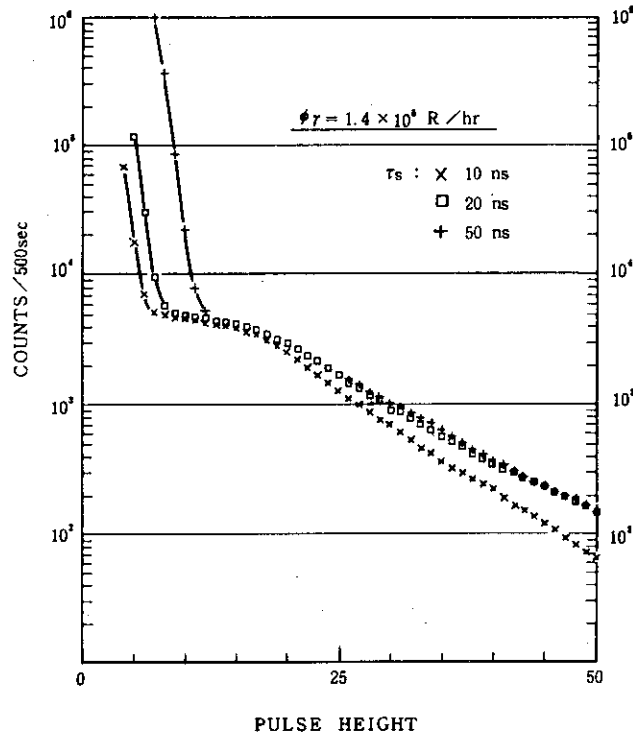


図 5.39 γ 線バックグラウンド $\phi_\gamma = 1.4 \times 10^5 \text{ R/h}$ における FX-3 の出力パルス電流の積分波高分布

図 5.40 は $\phi_r = 5.9 \times 10^5$ R/hr について、 τ_s を変えた時のそれぞれの積分波高分布を示したものである。この図から、 5.9×10^5 R/hr の高 r 線下においても、 τ_s を 10 ns、および 20 ns にすれば r 線パルスのパイルアップが少なく、良い中性子計測特性を得られることがわかる。

しかし、 $\tau_s = 50$ ns になると、 r 線パルスのパイルアップの影響が増加し、中性子パルスプラトー領域が狭くなり、中性子計測において r 線パルスアップ誤差が 1 cps 程度となるように波高弁別器の設定レベルを上げると、見かけ上の中性子感度は約 17% 低下する結果となることがわかった。

(d) r 線線量率を変えた時の各種パルス整形時定数における中性子計測特性

図 5.41 は波形整形時定数 τ_s を 10 ns に固定し、 r 線線量率 ϕ_r をそれぞれ 5.9×10^5 R/hr、 1.4×10^5 R/hr、 2.3×10^4 R/hr、0 R/hr と変えた時の中性子測定の積分波高分布を比較したものである。

この図の $\phi_r = 0$ R/hr の曲線で、左部の立上り部分は検出器自身の α 線パルスによるものである。従って、この波高分布の立上り部と比較することにより、 r 線パルスのパイルアップの影響の大きさを知ることが出来る。

$\tau_s = 10$ ns と短いパルス整形時定数を使用すると、 ϕ_r が 2.3×10^4 R/hr 程度の r 線線量率下では、 r 線パルスのパイルアップの影響は全く現われず、 ϕ_r がゼロの時と同一の積分波高分布を示している。また、 ϕ_r が 1.4×10^5 R/hr となっても、パイルアップ効果は殆んどなく、さらに 5.9×10^5 R/hr と高くなっても、パイルアップは極めて少なく、良い中性子計測特性を示している。

図 5.42 はパルス整形時定数 $\tau_s = 20$ ns において、 r 線線量率を変えた時のそれぞれの積分波高分布を比較したものである。 $\tau_s = 20$ ns において、 r 線線量率が 1.4×10^5 R/hr 以下では、 r 線パルスのパイルアップはまた α 線のそれに比べて非常に少なく、 $\phi_r = 0$ R/hr の時の積分波高分布と大差ない。また、 $\phi_r = 5.9 \times 10^5$ R/hr になっても r 線パルスのパイルアップは少ない。

図 5.43 は $\tau_s = 50$ ns において、 r 線線量率を変えた時のそれぞれの積分波高分布を比較したものである。 $\tau_s = 50$ ns では、 r 線がない状態でもすでに α 線パルスのパイルアップがかなり生じている。また、 2.3×10^4 R/hr 程度の r 線線量率なら r 線パルスによるパイルアップは、 α 線パルスによるそれに比べ少ないが、 1.4×10^5 R/hr、 5.9×10^5 R/hr と r 線線量率が高くなるにしたがい、 r 線パルスのパイルアップの影響も増加する。 5.9×10^5 R/hr の r 線バックグラウンドの下ではパイルアップは著しい。

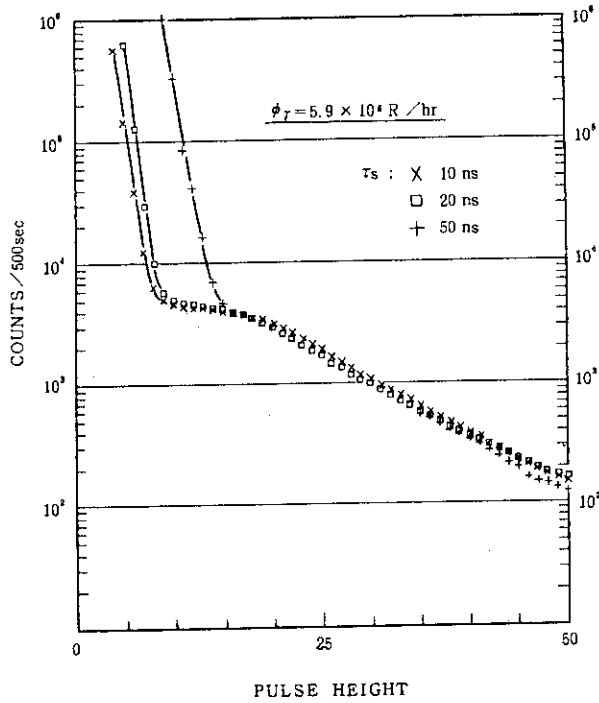


図 5.40 γ 線バックグラウンド $\phi_\gamma = 5.9 \times 10^5$ R/h における FX-3 の出力パルス電流の積分波高分布

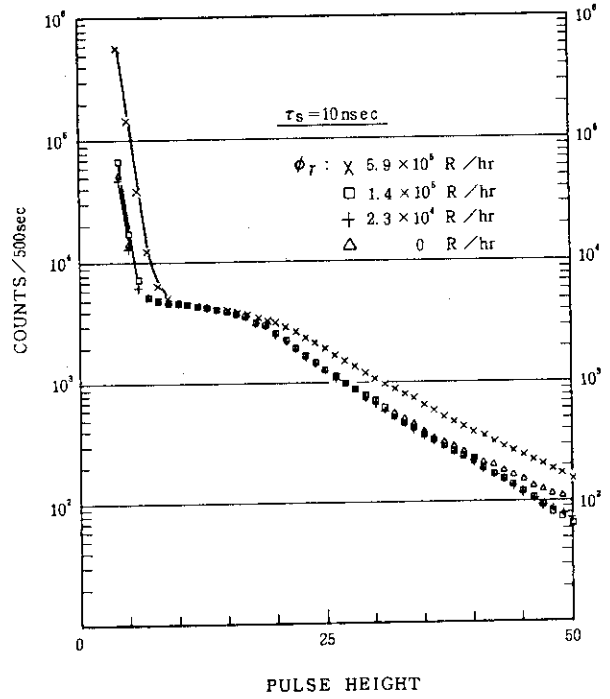


図 5.41 パルス整形時定数 10 ns の場合の FX-3 の積分波高分布に与える γ 線バックグラウンドの影響

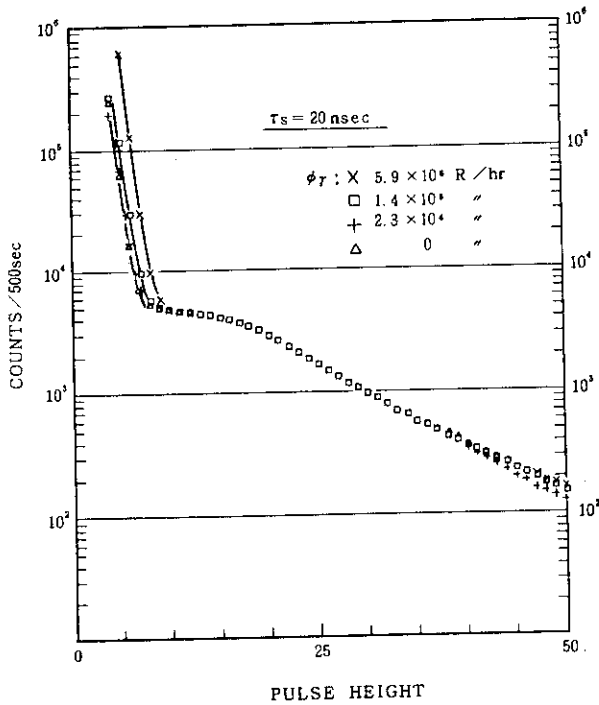


図 5.42 パルス整形時定数 20 ns の場合の FX-3 の積分波高分布に与える γ 線バックグラウンドの影響

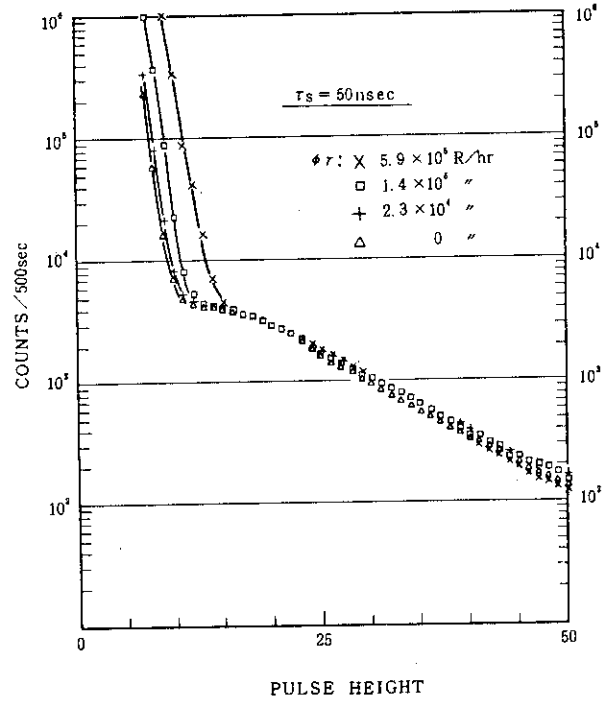


図 5.43 パルス整形時定数 50 ns の場合の FX-3 の積分波高分布に与える γ 線バックグラウンドの影響

5.7.4 高 γ 線下作動特性の評価方法

一般に、核分裂計数管を用いて中性子計測を行う場合、その積分波高分布を測定したのち雑音や γ 線パルスおよび α 線パルスの計数誤差が必要な仕様値、例えば、0.1 cps あるいは 1 cps 以下となる波高弁別値 (M_d) を求め、波高弁別レベルをこの値にセットすることによって、これらの誤差の原因となるパルスを除去し、中性子の計測を行う方法がとられる。しかし、 γ 線や α 線のパルスのパイルアップが増加するに従い、 γ 線や α 線パルスの積分波高分布は波高値の高い方へ平衡移動する。この結果、中性子計測上必要な波高弁別値 (M_d) が高くなり、中性子パルスの波高分布のうち小さな中性子パルスは計数されなくなるので、実用上の中性子感度が低下し効率の悪い中性子計測特性となる。

一方、 γ 線や α 線パルスのパイルアップを少なくするため、パルス整形時定数を短くすると計測系の周波数帯域が広がり、等価雑音周波数帯域は時定数の大きさとほぼ逆比例して増大する。従って α 線及び γ 線のパイルアップ確率は減少しても増幅器雑音の増加のため積分波高分布の左部立上りは右に移動する。更にまた、中性子検出器の出力電流パルスの立上り時間に比べて過度に短い時定数でパルス整形すると、信号パルス波高が低下する。この結果、S/N が悪くなる。従って、増幅系の雑音の増加に対抗し、小さな時定数の波形整形を行ない、高い γ 線のもとでも高い中性子計数効率を維持するには、中性子検出器の中性子パルス波高値 (M_p) は十分大きい必要がある。

以上のことから、同一の α 線バックグラウンド、または、 γ 線線量率のもとでの中性子計測特性の良さを表わす指標 (F. M.) を次式で定義した。

$$F. M. = M_p / M_d$$

本実験では、検出器出力パルス波高値と多重高分析器のチャンネル数は比例し、一対一の対応となるよう校正しておいたのち、 M_d は γ 線や α 線パルスの計数値が 1 cps になる波高弁別値を多重波高分析器のチャンネル数で表わした数値を用い、また、 M_p は中性子パルスの最頻値を多重波高分析器のチャンネル数で表わした数値を使用した。

従って、F. M. は大きい方がより良い中性子計測特性を示すことになる。

表 5.7 は各測定結果ごとに F. M. を求め、 γ 線線量率と波型整形時定数との関数として F. M. の値を示したものである。

表 5.7 に示すように、50, 20, 10 ns と各時定数とも F. M. は γ 線線量率が高くなるに従い低下している。また、 $\phi_r = 0R/hr$ 時、すなわち検出器自身の α 線パルスのパイルアップについても、 τ_s が 50, 20, 10 ns と短くなるにしたがい改善されている。このことは、 ϕ_r が 2.3×10^4 , 1.4×10^5 , $5.9 \times 10^5 R/hr$ と高線量率になっても同様で、 τ_s を短くするに従い、F. M. は改善されている。

表 5.7 各種の γ 線バックグラウンドレベルにおける中性子測定の
Figure of merit - パルス整形時定数の関数として -

τ_s \ ϕ_r		γ 線量率 (R/hr)			
		0	2.3×10^4	1.4×10^5	5.9×10^5
パルス整形時定数 (ns)	50	1.84	1.72	1.64	1.43
	20	2.38	2.35	2.25	2.00
	10	2.76	2.62	2.50	2.37

以上のように、開発した核分裂計数管を用いた計測系では、10 ns と非常に短いパルス整形においても S/N の劣化はほとんどなく、 γ 線パルスのパイルアップの影響を除去出来、実験した範囲では波形整形時定数が小さい程良い結果が得られている。

これは欧米の高温核分裂計数管 (77) に比べて約 1 桁小さい整形時定数が使用できることを意味しており、従って、開発した中性子検出器を用いた計測系はそれだけ高い γ 線バックグラウンドのもとでも中性子計数効率を低下させることなく、中性子測定が出来ることを示している。

6. 炉内特性試験

6.1 原子炉出力測定試験

原子炉の起動用計数管として使用する核分裂計数管型電離箱は、前章で述べた低中性子束下で測定した各種の作動特性、例えば、高温下での積分波高分布のプラトー特性、 n/r 比、中性子感度等が優れていることも重要であるが、さらに、検出器の出力特性が原子炉出力の増加に対しても劣化することなくその出力が炉出力あるいは周辺中性子密度と比例性を有していることも重要である。

例えば、高出力領域で作動特性が劣化し直線性が悪い核分裂計数管は、結局、原子炉出力監視領域が狭くなり、性能の良い計数管とは言えない。従って、核分裂計数管の出力が広範囲にわたり原子炉出力に対し直線性を有しているかどうかということは、原子炉出力監視用に使用する核分裂計数管型電離箱にとって重要な性能の指標の一つである。

本試験では、JRR-4を主として使用し原子炉出力をステップ状に変え、それぞれの原子炉出力に対する試作核分裂計数管電離箱の出力の直線性について試験をした。

試作核分裂計数管電離箱は高温のもとで作動する起動系用計数管及び中間出力／出力領域キャンベル系用電離箱兼用として設計、製作されたものなので、先ず、パルス系検出器として原子炉出力に対する電流パルス出力計数率の直線性についての測定を行った。次いで原子炉の出力領域までの広範囲の監視用検出器として使用が可能であることを確認するため、キャンベル系電子回路を用いてキャンベル系検出器として使用した場合の高出力領域までの直線性について測定を行った。

6.1.1 直線性測定試験準備

先に述べたように、試作核分裂計数管電離箱を計数管として使用した場合、あるいは、キャンベル法で計測した場合のそれぞれについて、原子炉出力に対する直線性の試験をするためには、非常に広範囲のステップ状の中性子束変化を必要とする。さらに、各計測法に適当な中性子束レベルをも必要とする。しかし、JRR-4の炉出力においては、原子炉として正確な出力値が示し得る条件を要求すると10W～3.5MWまでの約5桁のステップ変化が限界である。このため、JRR-4のNo.1プールに試作核分裂計数管型電離箱を挿入し試作計数管と炉心の距離を2種類選り広い中性子束範囲の試験を行う方法を採用した。また計数管の位置を変える場合には、既に測定したパルス系計数率およびキャンベル系出力の範囲で、両位置の中性子束の比が対比できるようにした。この方法では、各計測法に適した中性子束が自由に得られること、距離を変えることにより約9桁の中性子束変化が得られた。この実験時には、JRR-4 No.1プールでは、炉心横に設置された他の実験用装置のため試作核分裂計数管用キャプセルを $3 \times 10^9 \text{ n/cm}^2 \text{ sec}$ 以上の中性子束の位置に接近することが出来なかったため、 $3 \times 10^7 \text{ n/cm}^2 \text{ sec}$ から約 $10^{11} \text{ n/cm}^2 \text{ sec}$ までの範囲はJRR-3の実験孔を用いて測定を行った。

試験のため、JRR-4 No.1 プールの水深 9 m の位置に設置した試作核分裂計数管用照射キャプセルの製作図を Appendix の図 A 6.1 に、また組み立て寸法図をそれぞれ図 A 6.2(a)(b)に示した。

本キャプセルは JRR-4 の No.1 プールに設置した際、被試験体の試作核分裂計数管の挿入位置が炉心高さになるよう設計している。また、Appendix 図 A 6.2(a)で示す⑤のケーブル案内管は、中性子のストリーミングを防止するためと浮力を最小限にするため、内径を検出器及びヒータケーブルが通せる最小限の寸法 41 mmφ とし、また実験時にわずかに曲げて水中に設置した。

照射キャプセルに装着した加熱器の断面図を Appendix 図 A 6.3 に示す。加熱器はステンレス管に深さ 1.5 mm の螺旋状の溝を切り、これにインコネルシースヒーターを巻いたものである。この加熱器は垂直にして使用するため、その温度分布が均一となるよう、シースヒーターは3分割巻きとし、3分割制御方式を採用した。そして、温度検出および制御用として、試作核分裂計数管電離箱を装着した時、その先端、中央、M I ケーブル取付け端に相当するそれぞれの位置に熱電対を設けた。断熱材には断熱特性の優れかつガスの発生しないカオワールを使用した。温度自動制御系は、図 5.7 に示した回路と基本的に同じ構成である。完成した炉内試験用キャプセルは図 6.1 に示すように JRR-4 No.1 プールの炉心側面に挿入した。

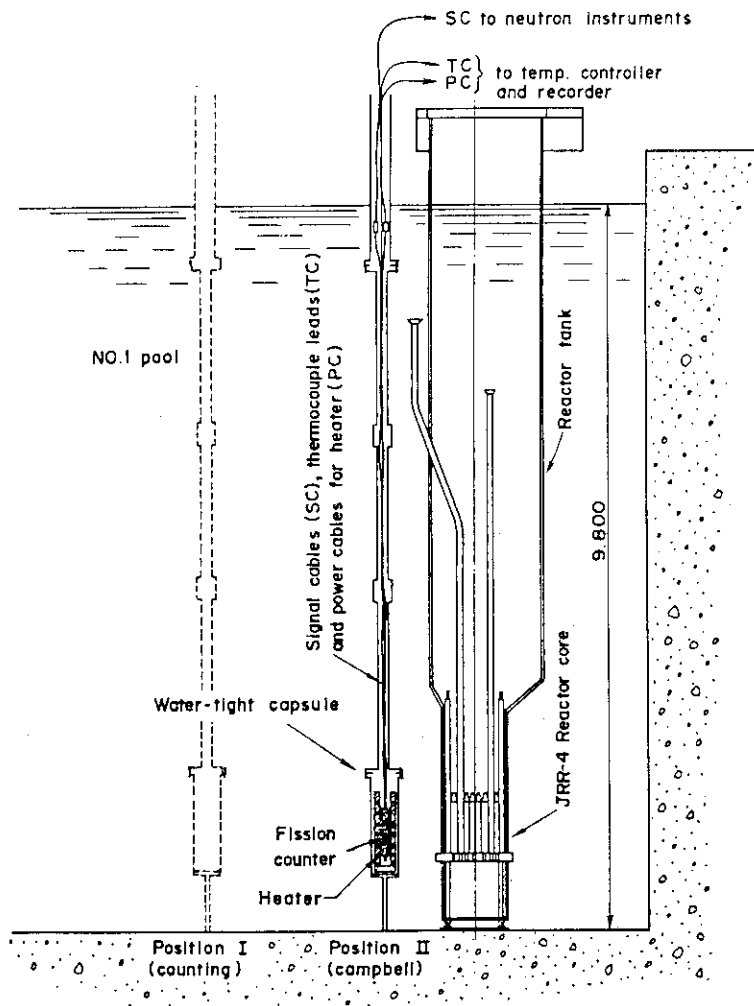


図 6.1 JRR-4, No.1 プール内に設置した炉内試験用キャプセル

6.1.2 パルス計測系およびキャンベル計測系

高速炉や溶融塩炉あるいは大型高温ガス炉炉心内設置の起動系用計数管は一般に γ 線バックグラウンドが極めて高い環境で使用される。従って、 γ 線のパイルアップを除去するため、中性子検出器からのパルス信号は極力狭いパルス幅に整形する必要がある。このため、計数管の出力信号は立上りの速い電流パルスで伝送し、増幅する方法を用いることが望ましい。従って、原子炉出力に対する直線性試験時も、検出器の信号は付属の8 mのMIケーブルと12 mのポリエチレントリアキシャルケーブルを電流パルスで伝送し、増幅する方法をとった。

図6.2に本測定に使用したパルス計測系の構成を示した。図中の電流パルス増幅器(CPA)とパルス整形増幅器は、5章の各種試験に用いたものと同じ型式のものである。パルス整形は積分を5 nsで3段、微分を同じく5 nsで1段の疑似ガウシャン整形で行った。波高弁別器はこのような短い時定数でパルス整形した狭いパルスでも安定に動作するFast Discriminator

(JAERI-RIL FD-1)を使用した。この波高弁別器の不感時間は最小5 nsにセット可能のものであるが、整形されたパルス波形の時間幅を考慮して、不感時間は30 nsにセットした。

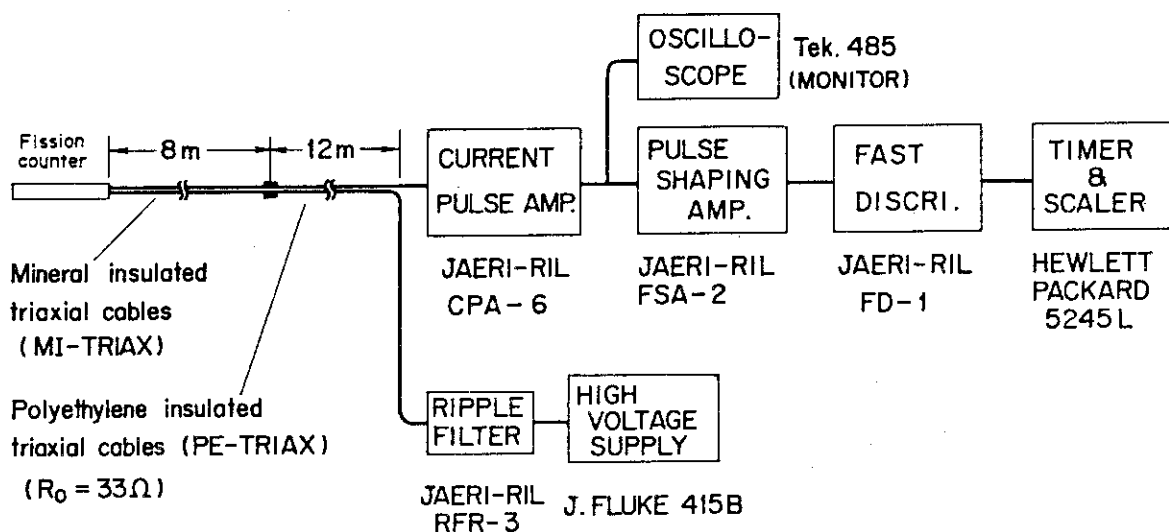


図6.2 原子炉出力に対する直線性測定試験に使用したパルス系の構成

図6.3はキャンベル法による測定に使用した計測系の構成を示したものである。このキャンベル系は原研における高速炉開発の一環として筆者が中心となった開発したものでその詳細回路図をAppendix 図A 6.4～A 6.6に示す。PRE-AMP. は入力抵抗約75 Ωの電流入力型雑音交流増幅器である。また、B.P.AMP.は帯域増幅器であり、周波数帯域は10 KHz～30 KHzに選んだ。この出力をCAMPBELL LINEAR AMP.とCAMPBELL LOG AMP.で測定することにより、原子炉出力に対する直線性試験を行った。

キャンベル計測系と中性子束との較正は、図6.1中に示したPosition Iの位置でパルス計測系と比較することにより実施した。較正時の条件は、原子炉出力3.0 MW、供試核分裂計数管の温度350℃、印加電圧200 Vである。

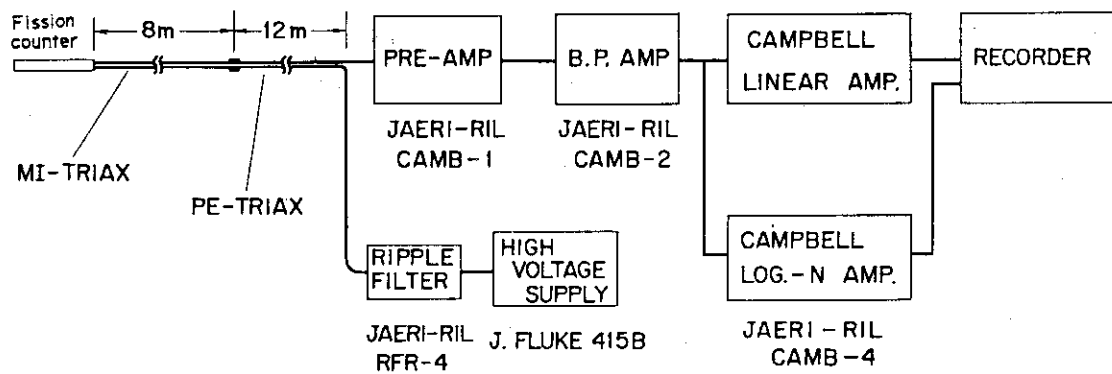


図 6.3 原子炉出力に対する直線性測定試験に使用したキャンベル系の構成

6.1.3 試験方法

JRR-4のNo.1プールにおけるキャプセル設置位置を示す図6.1においてPosition Iは主としてパルス計測法による試験の位置であり、Position IIはキャンベル法による試験時の位置であるが、各位置の中性子束密度の相互比較には各々のPositionにおいて両系を用いて同時に測定を行い、その関係を求めている。

キャプセルに装着された加熱器は、ケーブル案内管を通してプール横に設置された温度自動制御装置に接続し、検出器を350℃一定に制御した。

Position Iでパルス計測に必要な出力パルスの積分波高分布の測定とパルスプラトー特性の測定を行い、続いて、原子炉出力を10W～3.5MWまで15ステップで変化させ、それぞれの原子炉出力時における供試核分裂計数管型電離箱の電流パルス出力を測定した。パルス計測による直線性試験中、原子炉出力200KWおよび3.0MWでパルス計測法とキャンベル計測法による較正を実施した。

次に、キャプセルをPosition IIに移動し、キャンベル系により3MWに対する両位置の出力を比較した。次いで原子炉を一度停止後、再び同じく原子炉出力を10W～3.5MWまで変化させ、キャンベル計測法による直線性試験を行った。また供試核分裂計数管温度350℃のときと同じ手順により温度30℃においても、パルス計測法およびキャンベル計測法の直線性試験を行った。

6.1.4 波高弁別レベルの設定とパルスプラトー特性

直線性の試験に先立ち、電流パルス計測系の積分波高分布を測定しこの測定結果にもとづいて波高弁別レベルの設定を行うと共にパルスプラトー特性を測定した。

積分波高分布の測定は、検出器の温度が350℃、検出器印加電圧が200V、パルス整形時定数は積分、微分とも5nsで行った。次いでこのパルス電流の積分波高分布より、電流パルス計測系の波高弁別値を α パルス及びノイズの誤差が0.1cpsとなる点を求めてその設定を行い、この設定状態で直線性の試験を行った。この波高弁別レベルにおける原子炉停止時のスプリアス計数は0ないし、0.3cpsであった。

図6.4はこの設定条件におけるパルスプラトー特性で、パルス整形時定数が5ns～5nsの場合、ゆるい立上りを示している。参考までに破線で示したパルス整形時定数20ns～20nsの時

の印加電圧プラトーと比較すると明らかなように、5 ns - 5 ns と非常に短いパルス整形を行った結果、大きい出力パルス電流を得るためにはより高い印加電圧が必要となったものである。

5 ns - 5 ns 整形でも 200 V の印加電圧では充分プラトー領域に入っている。

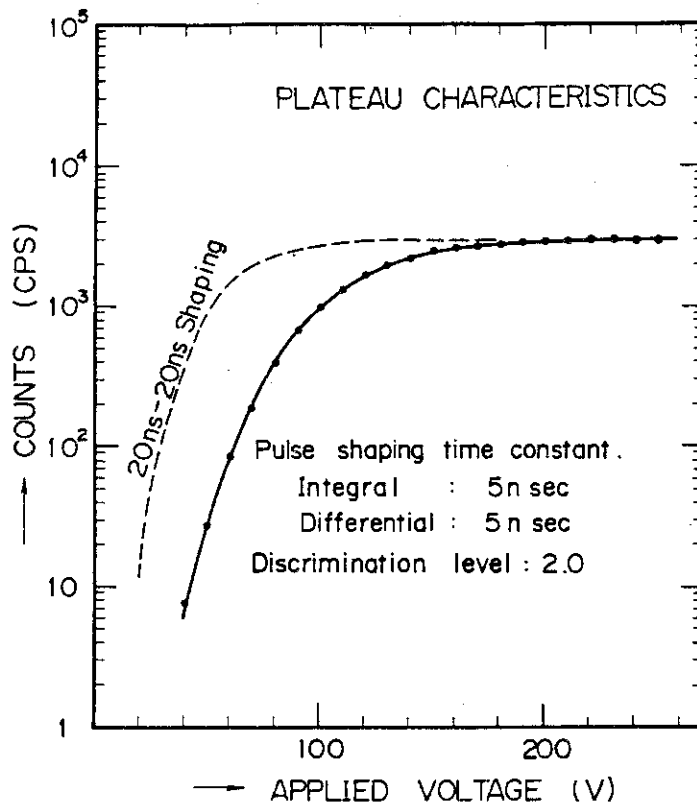


図 6.4 直線性測定試験時の波形整形時定数 (5 ns) 及び波高弁別レベル設定値に対する印加電圧プラトー特性 (破線は比較参考のため時定数 20 ns の場合の値を示したものである)

6.1.5 試験結果

図 6.5 と図 6.6 にパルス計測法およびキャンベル法による計測時の、試作核分裂計数管型電離箱 FX-3 の原子炉出力に対する直線性の測定結果を示す。図 6.5 は温度が 350 °C の時であり、図 6.6 は 30 °C の時の特性である。電離箱印加電圧はともに 200 V である。

これらの図で、横軸は各測定時における中性子束密度 ($n/cm^2 \cdot sec$) とそれぞれの試験時における JRR-4, JRR-3 の原子炉出力を示している。縦軸はパルス計測系の出力 (cps) とキャンベル測定系の出力を示している。図中、+印で示したのがパルス系による測定結果で、●印で示したのがキャンベル系による測定結果である。

JRR-4 における本直線性試験では、JRR-4 No.1 プール内の他の実験装置による制限から、最大中性子束密度 $3.5 \times 10^9 n/cm^2 \cdot sec$ までしか接近できなかったため、 3×10^7 から $8 \times 10^{10} n/cm^2 \cdot sec$ 迄の高中性子領域は JRR-3 実験孔で実験を行った。JRR-3 は重水炉であるため、光中性子が残り、これ以下の出力では誤差の少ない炉出力測定を行うことはむずかしい。図 6.5 の中の○印は JRR-3 で行ったキャンベル系による直線性の試験結果である。実験条件は JRR-4 の場合と全く同じで同一測定レンジで炉出力のつなぎの較正を行っている。

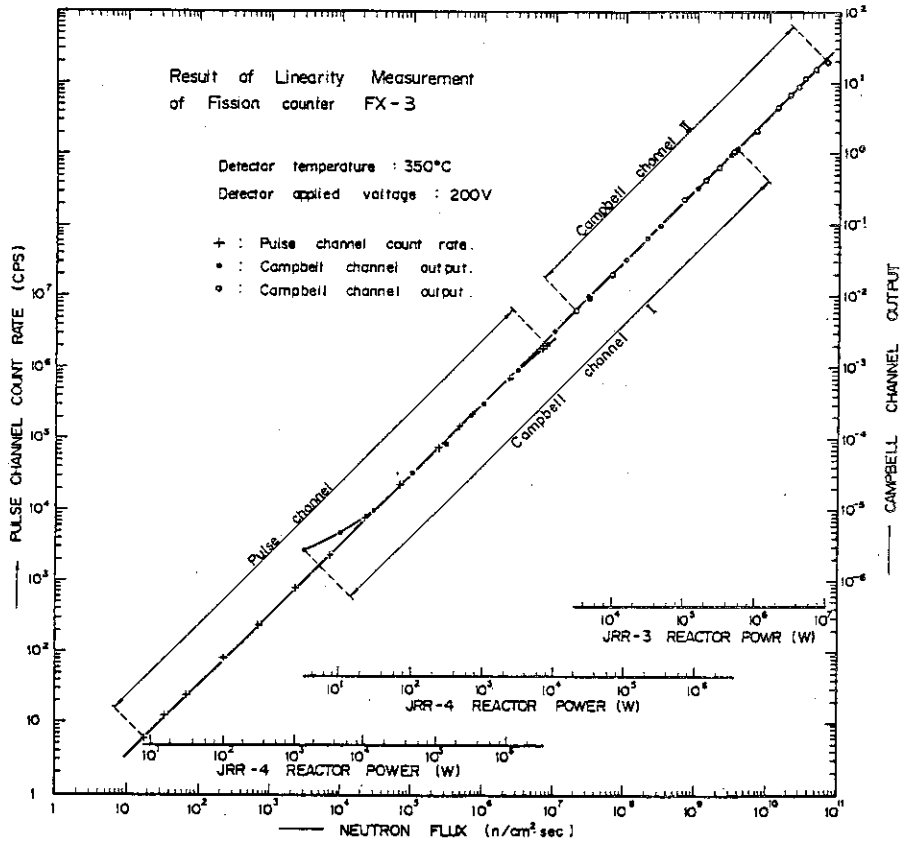


図 6.5 原子炉出力に対する直線性(1)
(測定温度 350 °C)

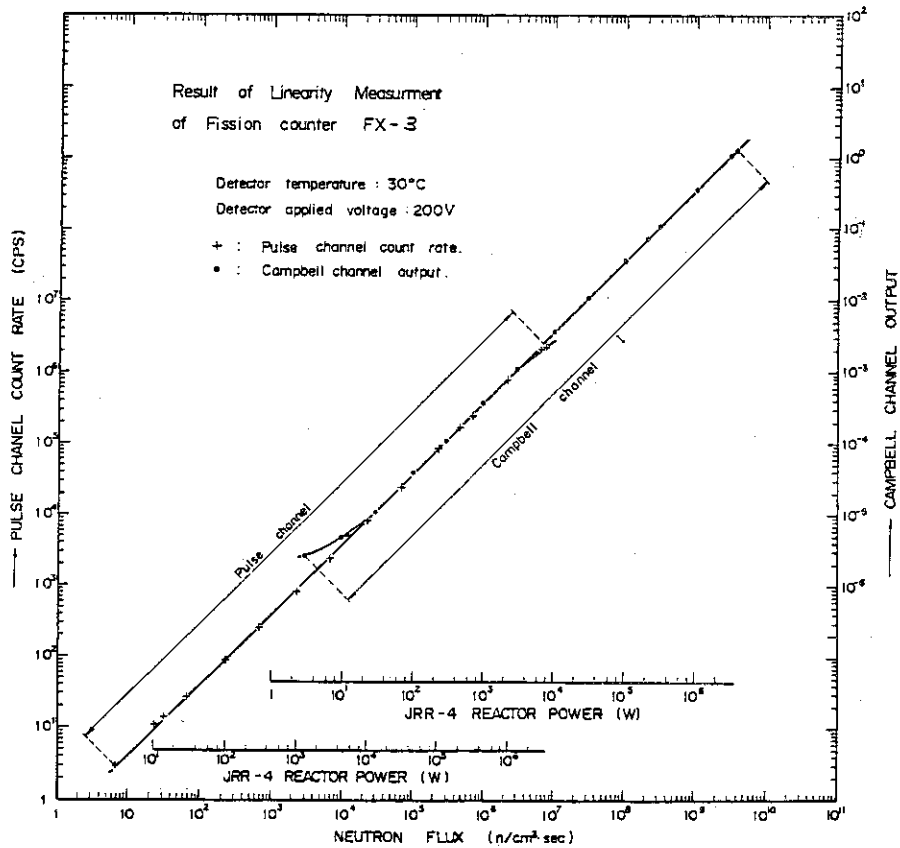


図 6.6 原子炉出力に対する直線性(2)
(測定温度 30 °C)

図 6.5 に示すように、供試核分裂計数管型電離箱のパルス計測による直線性は、中性子束密度 (ϕ_n) が $18 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ (JRR-4 炉出力 8 W) から $3 \times 10^6 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ (同じく炉出力約 1 MW), パルス計数率で約 $1 \times 10^6 \text{ cps}$ まで完全な直線性を示している。

先に述べたように、パルス系は原子炉停止時の測定で誤計数が 0 ないし 0.3 cps であることを確認しているの、パルス出力は更に下に一桁延びていることは確信をもって言うことが出来るが、JRR-4 の出力を 8 W 以下で正しくセットすることが出来ないの、実験結果としては 8 W 以上しか図に示さなかった。また、3.5 MW における計数率は約 $2 \times 10^6 \text{ cps}$ で直線性からのずれは 0.1 decade である。これはパルス測定のパイルアップのためでありパルス系増幅器にベースラインレストアラを使用しなかったこと、および波高弁別器の dead time の補正を行っていない生のデータをそのまま使用しているため核分裂計数管自体の非直線性によるものではない。この範囲は既にキャンベル系の計測範囲に入っておりパルス系で測定誤差が多少あっても問題とならない。

キャンベル系による測定結果については、 ϕ_n が $3.0 \times 10^4 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ (JRR-4 炉出力 30 W) から $3.5 \times 10^9 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ (同じく炉出力 3.5 MW) まで完全な直線性を示し、さらに、JRR-3 での実験による測定結果では、 $2 \times 10^7 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ (JRR-3 出力 3.0 KW) ~ $5 \times 10^{10} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ (同じく炉出力 7.0 MW) までほぼ完全な直線性を示している。従って、供試核分裂計数管のキャンベル系による計測結果では、 $\phi_n = 3 \times 10^4 \sim 5 \times 10^{10} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ までほぼ完全な直線性を有しており、通常対数出力系で許容される 0.1 decade の誤差を許容するとすれば、中性子束 1.4×10^4 から $7 \times 10^{10} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ の範囲で約 6.7 桁の直線性があると言える。

以上のパルス系、キャンベル系両系の 350 °C における測定結果を総合すると、中性子束 $18 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ から $7 \times 10^{10} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ までの約 10 decade に相当する原子炉出力変化が 0.1 decade の誤差範囲で計測できる直線性を有していることが実験値より明らかとなった。またパルス系計測下限を 1 cps ($\phi_n \sim 3.3 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$) とすれば試作核分裂計数管型電離箱 FX-3 1 本で 0.1 decade の誤差範囲内で実に 10.5 decade の炉出力範囲をカバーできると言える。

検出器温度が JRR-4 プール水温度 (30 °C) における測定結果図 6.6 でも、その特性は 350 °C の時の特性と全く変わらない。このことは、直線性の特性は温度変化によって影響を受けないことを示している。

600 °C における原子炉出力直線性測定実験は原子炉利用のマシントイムの中で行うことができなかったが、試作核分裂計数管型電離箱は特性試験及び照射試験を通して 600 °C ないし 800 °C 迄主要特性の変動が無いことが示されており、その様な温度でも常温及び 350 °C における測定値と同じ炉出力直線を有していることを論理的に示すことができる。

この試験の結果より、試作核分裂計数管型電離箱はパルス系計測領域およびキャンベル系計測領域の両領域にわたり、合計 10 桁を越える広い範囲で原子炉出力あるいは中性子束密度の計測に使用可能であることが確認できた。

このように、1 本の核分裂計数管型電離箱で起動領域から出力領域までの広い範囲の原子炉出力を監視可能であると言うことは、原子炉中に挿入する核計装用中性子検出器の過大な多重化をさけることを可能とし、原子炉設計上でも寄与するところが大きいと考えられる。なお、本試作

核分裂計数管型電離箱は2本のケーブルから2つの信号取り出し得るように設計、製作してあるので、現在では図6.7の回路図に示すように、起動領域用パルス系と中間領域/出力領域用キャンベル系を同時に接続しワイドレンジモニタとして種々の試験に使用している。

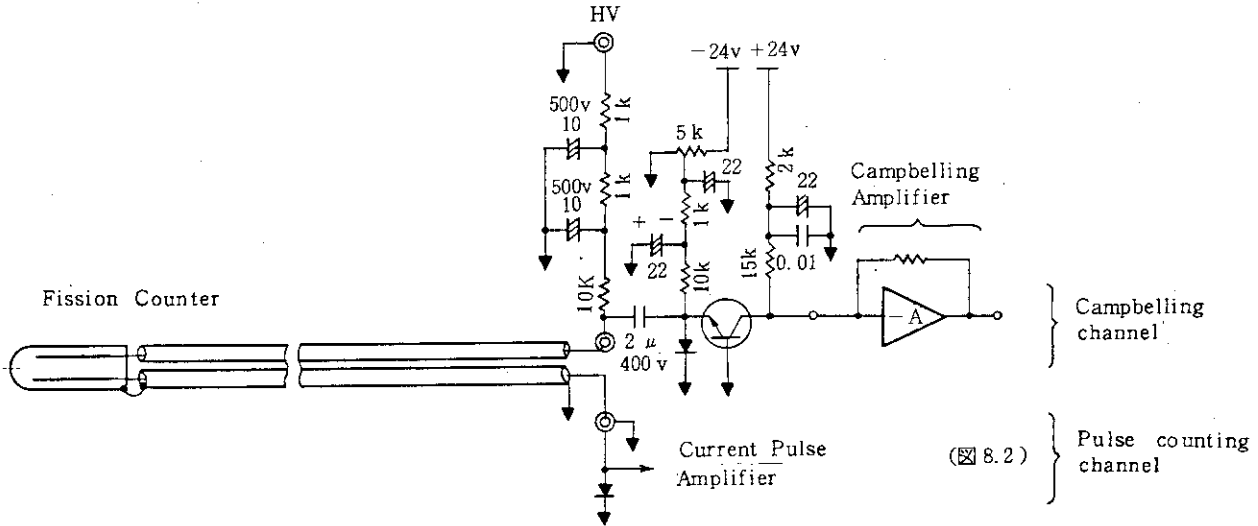


図 6.7 パルス系とキャンベル系を同時に接続する場合の入力回路

6.2 第1次照射加速寿命試験 (JMTR)

照射試験の目的は、その対象によりいろいろあるが、本試作核分裂計数管型電離箱の照射の目的は、使用中の中性子及びγ線量率を実際の場合より大幅に増加し、その照射の影響を限られた期限内に調べようとする照射加速寿命試験である。

照射試験は、開発研究期間中に2度実施した。

第1回は、本核分裂計数管型電離箱開発の基本的要素の一つであるアルゴン-窒素混合ガス的高温下における電極・構造金属材料との両立性の研究・検証を主目的として、材料試験炉JMTRの炉心内照射孔で通常使用時の最大値の約1000倍の中性子照射線量率で試験をおこなった。

第2回の照射試験は、JRR-3のRIトレン (RI製造用照射孔) を用い、中性子照射線量率は通常最大値の約10倍の中性子照射線量率で、即ち実用使用状態により近い照射条件で試験を行った。

第1次照射寿命試験の目的はこの様にアルゴン-窒素混合ガス中電極・構造材料金属に対する高温両立性の研究・検証である。

即ち3章3.1.1で述べたように通常的高温下ではアルゴン-窒素混合ガス中の窒素は、「焼きなまし処理後のインコネル合金と共存出来るのではないか」ということは想像できるが、高温かつ高放射線下におけるガスの電離状態でも共存可能かどうかは全く不明で、新しい知見に属するものである。

このアルゴン-窒素混合ガスと金属材料との高温・高放射線下の両立性の有無は本開発研究の根幹にかかわるものであったので、実際には既述の各種高温諸特性の詳細試験に先がけて、祈る

ような気持ちで実施したものである。

供試の核分裂計数管型電離箱は4章4.1節の基本的設計と4.2節の製作方法をすべてとり込んだ製造工程で製作したFX-2型核分裂計数管電離箱である。

6.2.1 試験方法

第1次照射試験は既述のように短期間に大量の照射が可能なJMTRのキャプセル照射を選んだ。図6.8に使用した照射キャプセルの概要を示す。

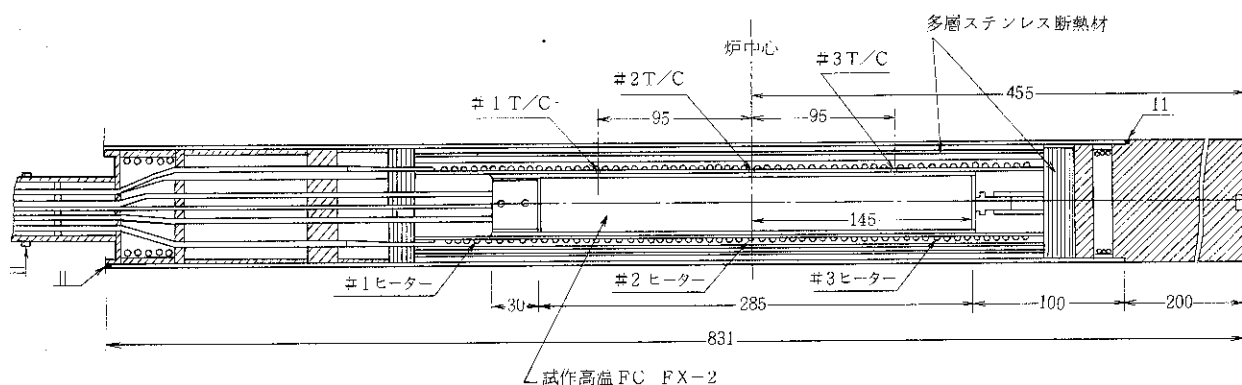


図6.8 JMTR照射キャプセルの概要

キャプセル内にはステンレス多層遮熱板が取り付けられ、その中に軸方向に3分割巻されたジューヒータを取り付けその中心に供試試作核分裂計数管型電離箱を取り付けた。

また、キャプセル内の中性子束密度のモニタとしてSPDを内部断熱板の外側に取り付けた。

核分裂計数管の照射雰囲気は当初ヘリウム中で行う予定であったが、キャプセル製作時の真空制御配管の目づまりのため、止むを得ず空気と一緒に封じ込んだまま照射を行うこととなった。

本照射試験の目的は、先に述べたように窒素-アルゴン混合ガスと電極等の金属材料との高温・高放射線下における両立性の試験であるから、イオン化した窒素イオン及び電子がすべて電極等に衝突し電極材料と考え得る最大の interaction が起きるように、図6.9に示すように照射中は両電極間に低出力インピーダンスの高圧電源（定電圧電源）から直接核分裂計数管型電離箱の電極間に印加電圧を加えイオン電流を流すようにした。

また、ガス特性の変化はパルス電流波高値に最も大きく現われるので、その変化を最も監視しやすいパルス電流の積分波高分布を照射前、燃料シャフリング時及び照射サイクル後など、原子炉出力低下時に測定した。照射原子炉の定格出力時は中性子照射率が設計値の約1000倍と言う極めて高い値であるため、パルス系はもとよりキャンベル系でも正常な動作範囲を越えているので、電離ガスを加速劣化させる電極間イオン電流をモニタするにとどまった。

6.2.2 照射試験

試作核分裂計数管型電離箱を内部に収納した照射用キャプセル（型番72F-13A）はJMTR炉心内の0.3位置に挿入された。

この状態で照射前試験として原子炉起動用中性子源による中性子パルス電流の積分波高分布の測定を行ったのち原子炉の出力上昇が行われた。

原子炉の出力上昇時には電力による加熱電源はすべて OFF とし、照射による自己加熱の状態を監視した。

JMTR の出力上昇に伴い供試核分裂計数管各部の温度が徐々に上昇し、原子炉の定格出力時には核分裂計数管の自己発熱のみによってその最高部温度（中央部）が 590 °C、最低部温度（上端部）が 550 °C となった。次いでこの温度勾配を平坦にするため軸方向に 3 分割された電気ヒータによる温度制御回路の電源を投入し、夫々を供試核分裂計数管の上端部、中央部及び下端部に取り付けた熱電対を用いて制御した。この結果、下端及び中央部 620 °C、上端部 600 °C で平衡状態となり、この状態で照射をすすめた。核分裂計数管の上部の方が温度が低い理由は(1)核分裂計数管内部では濃縮ウランを塗布した電極部分が中央より下方に寄って取り付けであり、上部は比較的発熱の少ない MI ケーブルとの接続のための構造物が組込まれていること、(2)更に JMTR の照射運転初期には制御棒位置の関係で炉心内の中性子束分布は炉心中央部より下で大きくなるよう歪んでいること、などの 2 つの原図の相乗効果と考えられる。

この原子炉定格出力状態で、図 6.9 に示した高圧電源と電流計を用いて測定した印加電圧に対する核分裂計数管型電離箱の直流出力電流を図 6.10 に示す。

尚、図には照射途中及び照射最終期に計測した測定にも示されている。

図に示されるように印加電圧 300 V を印加すると供試核分裂計数管電離箱に 26 mA の電離イオン電流を流すことができるので、この電流を照射期間中継続して流した。

600 °C での原子炉定格出力での照射時間は 1975 年 5 月 23 日以降、1976 年 1 月 24 日迄の間に累積約 1128.5 時間で積算中性子照射量は $6.5 \times 10^{18} \text{ n/cm}^2$ 、 γ 線量は $7.2 \times 10^{10} \text{ R}$ である。

この照射量は、照射量からの単純計算によれば試作核分裂計数管を核計装起動系用検出器として最大 $3 \times 10^7 \text{ n/cm}^2 \text{ s}$ の中性子束密度の場所で用いた場合 6800 年以上、キャンベル系検出器として最大 $2 \times 10^{10} \text{ n/cm}^2 \text{ s}$ の中性子束密度のもとで使用した場合でも 10 年以上の連続使用に相当する。

図 6.11 に供試核分裂計数管のパルス電流の積分波高分布（インテグラルバイアス曲線）の照射による変化を示す。これらの測定値は、照射前、照射後および照射途中の原子炉の停止時に測定したもので測定温度 t_m が 40 °C のグループと t_m が 600 °C のグループに分かれており、パルスの振幅は若干温度によって変化しているが、いずれの測定値に対しても照射による顕著な特性変化は全くなく、かつ出力パルス電流の積分波高分布のプラトーは、十分な広さが残っており試作核分裂計数管電離箱のパルス電流特性はほとんど変化しなかったと結論できる。

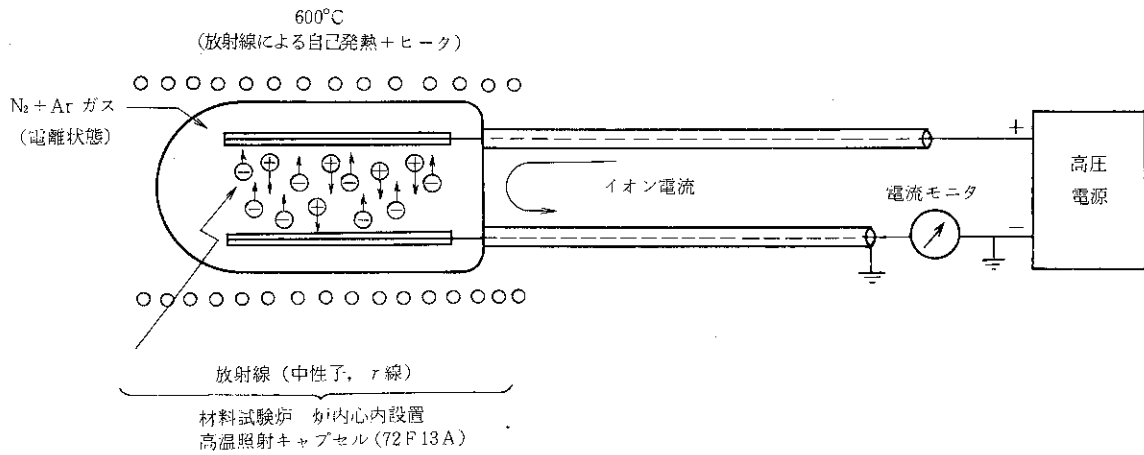


図 6.9 高中性子束照射中の高圧印加とこれによるガス電離イオン電流のモニタ

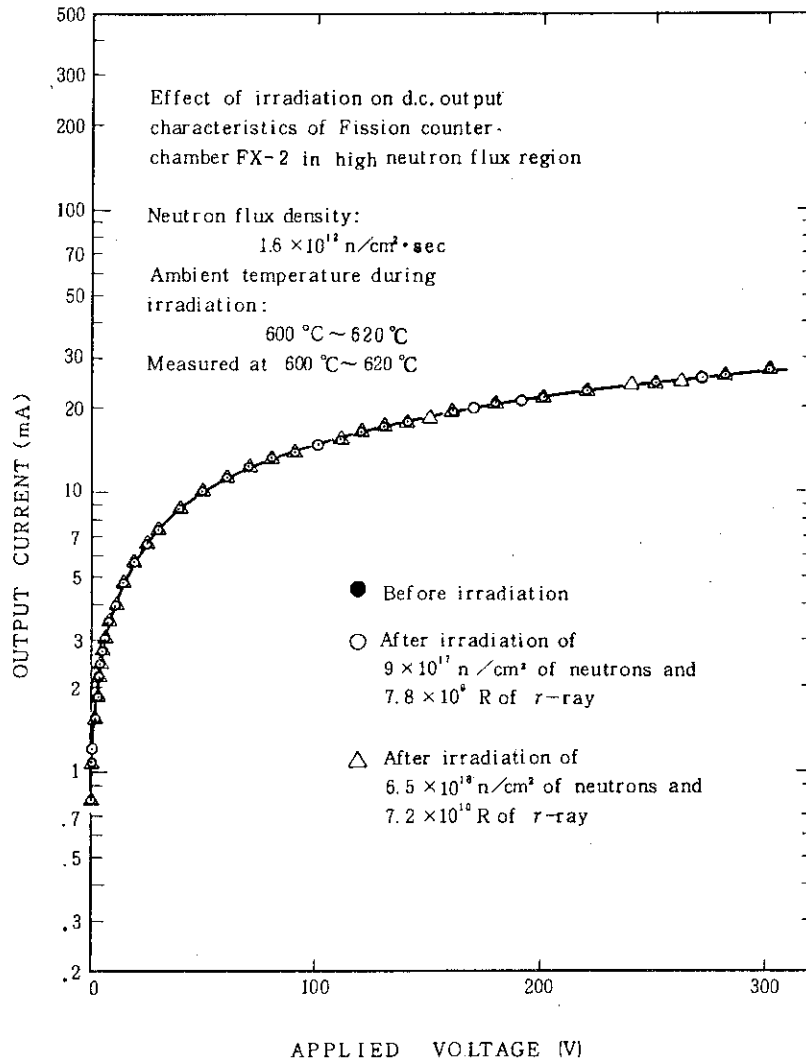


図 6.10 高中性子照射中の各種印加電圧に対する電離イオン電流

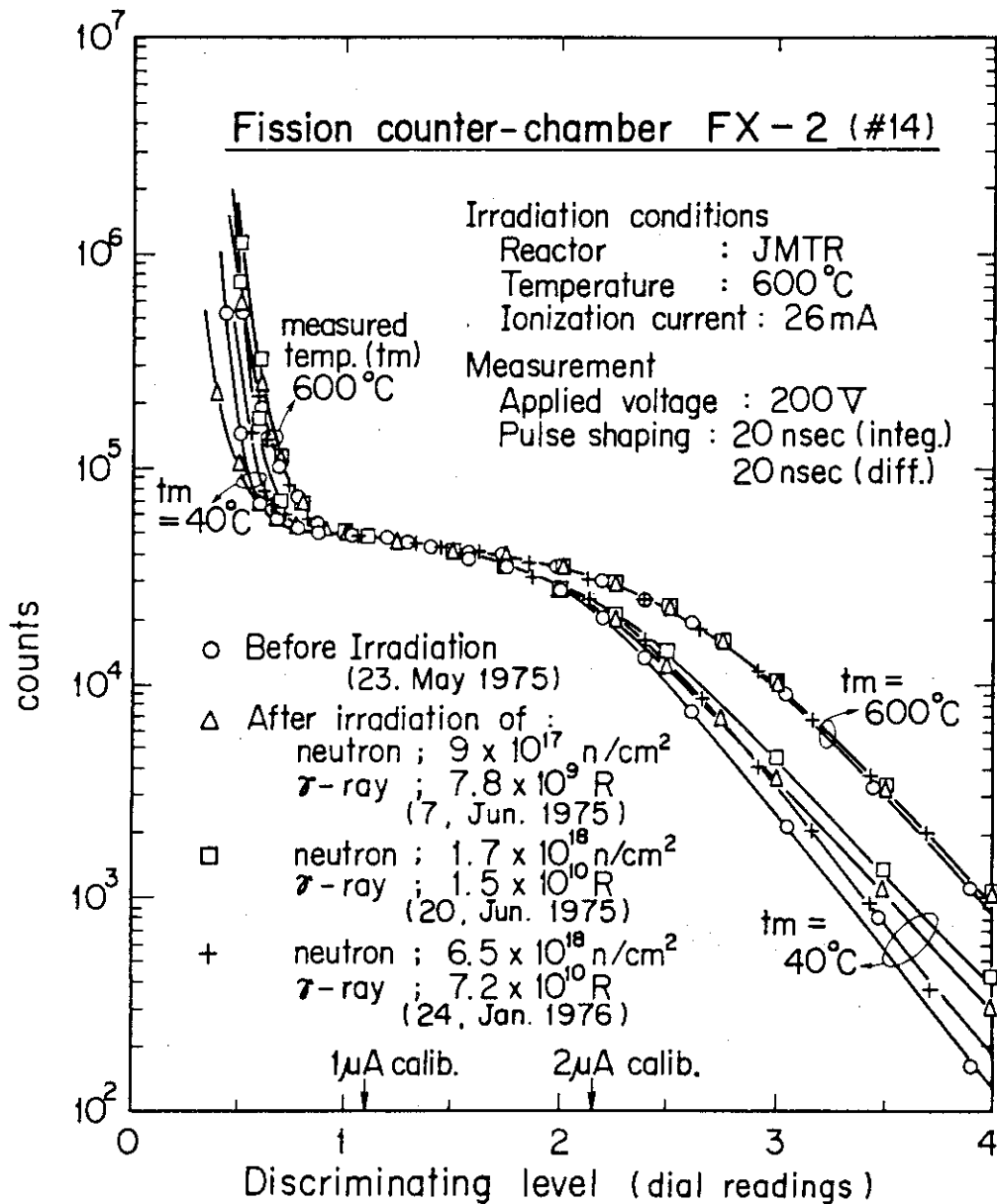


図 6.11 試作核分裂計数管型電離箱FX-2のJMTR炉心内600°C照射試験におけるパルス電流積分波高分布の安定性

6.2.3 試験結果の検討

JMTRの照射キャプセルを用いて、試作核分裂計数管型電離箱FX-2を600°C~620°Cの温度のもとで、 6.5×10^{18} n/cm²の熱中性子と 7.2×10^{10} Rのγ線を重畳し照射試験した結果、供試核分裂計数管電離箱の特性はほとんど変化が無かった。

照射期間中26 mAの電離電流が約1128.5時間(4.06×10^6 秒)継続して流れたので、この間

に電離されたガスイオン及び電子によって電極に運ばれた全電荷は $1.06 \times 10^5 \text{ C}$ 、ガスは夫々単電荷を有していたと仮定して、イオン化されたのち電極間の電界のため電極に引き寄せられて衝突したガスイオン及び電子の数は夫々約 6.6×10^{23} 個、従って標準状態で累積約 24.5 リットルのガス原子又は分子が電離状態で電極に衝突したことになる。

試作核分裂計数管型電離箱 FX-2 の封入ガス容量は標準状態で 1 リットルに満たないので確率的にガスの全原子が平均約 25 回、600 °C の電極に衝突した勘定である。

この様な状況のもとでも、パルス電流波高の分布に変動が無かったことは、アルゴンガス中の窒素ガスは窒化等により電極金属表面に吸収されて無くなってしまふことは起らなかった事を実証するもので、「速い計数ガスを 450 °C を越す高温下で使いこなす」と言う本開発研究の基本的課題がここに達成できたことの証が得られた。

6.3 第 2 次照射加速寿命試験 (JRR-3)

前節の第 1 次照射試験では、試作核分裂計数管型電離箱の内部電離ガスと電極金属等との高温両立性を確かめることを目的として、いきなり 600 °C で高線量の中性子照射を行ったが、本節の照射試験は各種の応用分野の要請により種々の温度でかつ、あまり高くない照射加速率の熱中性子束密度の下で、試験試験を行ったものである。

6.3.1 試験方法

第 2 次照射加速寿命試験の照射孔には、JRR-3 の RI トレン (RI 製造用照射孔) を使用した。この RI トレンに軸方向に 3 領域に分けて温度制御可能な加熱ヒータと断熱材を内部に持つ照射キャプセルを装着し、その中へ供試核分裂計数管電離箱を挿入して試験を行った。

設定位置の中性子束密度は金箔の放射化による測定で $4 \times 10^{11} \text{ n/cm}^2 \text{ s}$ であった。測定に使用した計測系は図 5.1 に示した計測系と同じである。

6.3.2 350 °C における照射試験

本照射試験は比較的小型の高速炉で、核計装検出器が炉心タンク外側の 350 °C 前後の位置に設定される場合を想定し、照射作動安定性を実際に確認する目的で実施した。

照射キャプセル内の温度制御ヒータによって、供試試作計数管型電離箱を 350 °C に加熱して照射を行った。JRR-3 の RI トレン中の中性子束密度は JMTR 等の照射炉に比べて低いのでこれら照射による自己加熱は極めてわずかである。

350 °C における熱中性子照射量は、 $2.3 \times 10^{17} \text{ n/cm}^2$ である。

図 6.12 及び図 6.13 に室温における照射前及び照射後のパルス電流波高分布及び積分波高分布を示す。波形整形は時定数 20 ns の擬似ガウシアンで、印加電圧は 200 V である。図 6.14 及び図 6.15 は 350 °C における照射前及び照射後のパルス電流波高分布及び積分波高分布で、測定温度を除いて測定条件は同じである。

以上の図からわかるように 350 °C、 $2.3 \times 10^{17} \text{ n/cm}^2$ の照射に対して特性は全く変化がないとすることができる。

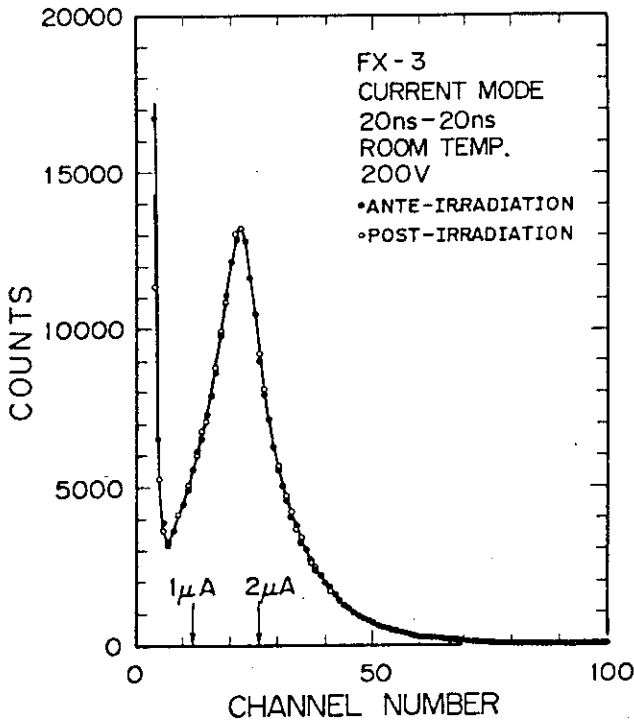


図 6.12 350℃ 照射試験の照射前及び照射後における FX-3 の出力パルス電流波高分布 (測定温度: 常温)

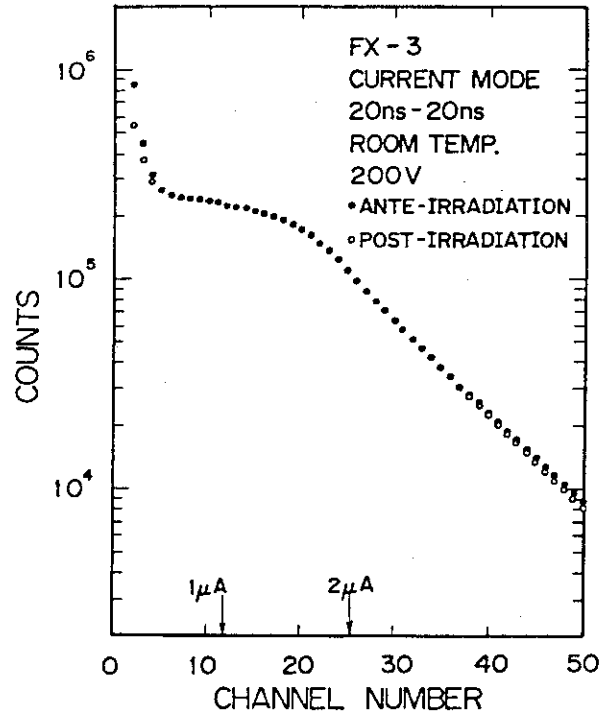


図 6.13 350℃ 照射試験の照射前及び照射後における FX-3 の出力パルス電流の積分波高分布 (測定温度: 常温)

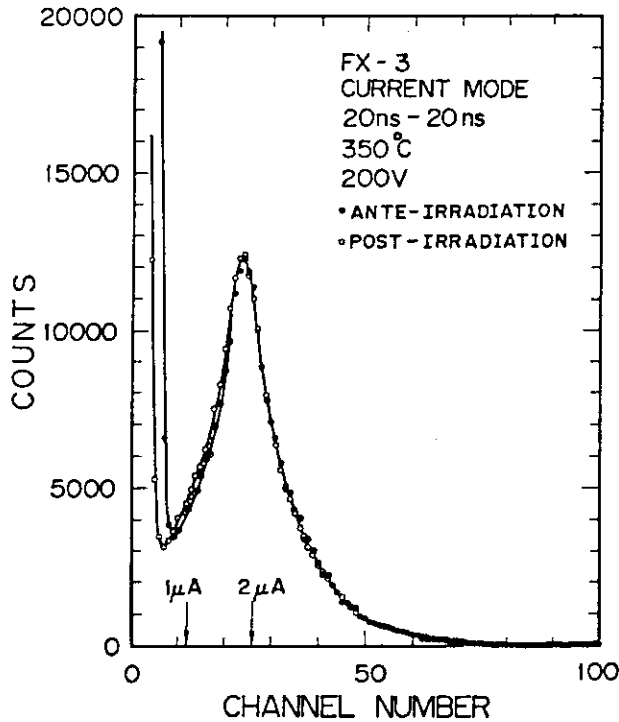


図 6.14 350℃ 照射試験の照射前及び照射後における FX-3 の出力パルス電流波高分布 (測定温度: 350℃)

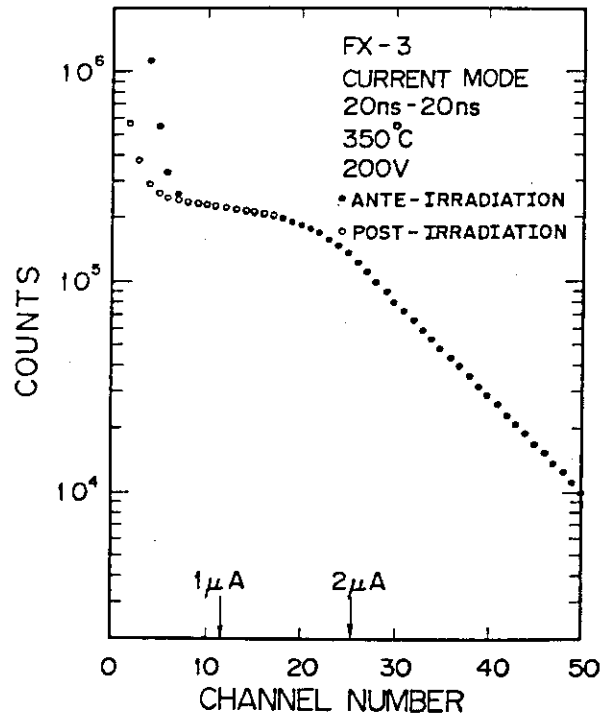


図 6.15 350℃ 照射試験の照射前及び照射後における FX-3 の出力パルス電流の積分波高分布 (測定温度: 350℃)

6.3.3 550℃における照射試験

550℃での中性子照射試験は350℃照射試験後試験装置および供試核分裂計数管電離箱をそのまま継続使用して実施した。

550℃における熱中性子照射量は $3.9 \times 10^{17} \text{ n/cm}^2$ である。

図6.16及び図6.17に550℃中性子照射前と照射後に常温で測定した供試核分裂計数管のパルス電流波高分布およびパルス電流積分波高分布を示す。

図6.18及び図6.19は、同照射前及び照射後に550℃で測定した同波高分布及び積分波高分布である。

550℃での中性子照射前および照射後に測定したパルス電流波高分布、積分波高分布を比較してみると、それらはほぼ完全に重なり合っており、照射温度550℃でも、中性子照射量 $3.9 \times 10^{17} \text{ n/cm}^2$ の照射の影響はほとんど無かったということが出来る。

6.3.4 600℃における照射試験

550℃照射試験にひきつづき600℃の周囲温度のもとで中性子照射を行った。600℃における熱中性子照射量は $7.6 \times 10^{17} \text{ n/cm}^2$ である。

図6.20～図6.23に600℃での中性子照射前及び照射後の供試核分裂計数管電離箱のパルス電流波高分布及び積分波高分布をしめす。図6.19及び図6.20は測定温度は常温で、図6.22及び図6.23の測定温度は600℃～700℃である。これらの図は600℃における照射試験でも顕著な特性の変化が無かったことを示している。本600℃照射試験に於ける中性子照射量は、本核分裂計数管型電離箱を核計装出力系の定格出力レベルで、例えば $2 \times 10^{10} \text{ n/cm}^2\text{s}$ の中性子束密度の位置で使用しても約4年間の連続使用の場合に相当する。

また、照射後試験の際に測定温度を650℃及び700℃に昇温して特性の変化を調べた。図6.22及び図6.23には650℃及び700℃における波高分布特性も併せて示した。これらの図が示すように試作した核分裂計数管型電離箱の700℃における波高分布は600℃のそれと変わらず、照射後にもかかわらず700℃でも安定に作動することが確認できた。

6.4 800℃作動試験

6.4.1 目的

開発試作した高温核分裂計数管型電離箱は、各種の特性試験及び高 γ 線下における中性子測定試験（5章）、炉出力測定試験及びJMTR、JRR-3における各種の照射寿命試験（6章6.1～6.3）をクリアし、目標とする600℃安定作動の高性能核分裂計数管型電離箱が開発できたことを、ほぼ検証することができた。しかし、更に

- (1) 高速炉や高温ガス炉の仮想的な事故時に、炉内の核計装中性子検出器設置位置の温度が定常時よりある程度迄上昇しても開発した核分裂計数管がPAM (Post Accident Monitor) 用の中性子束モニター*として未臨界監視に使用できるかどうか確認できれば、その用途は更に拡大すること、

* 定格出力の $10^{-6}\%$ ($= 10^{-8}$)以下の低レベル中性子束密度が事故時の状態の下でモニタ可能なこと。

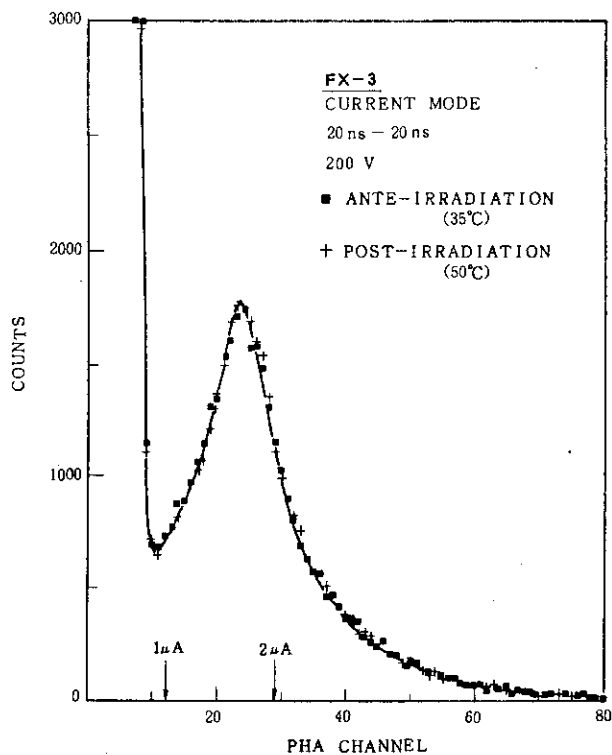


図 6.16 550 °C 照射試験の照射前及び照射後における FX-3 の出力パルス電流波高分布 (測定温度: 常温)

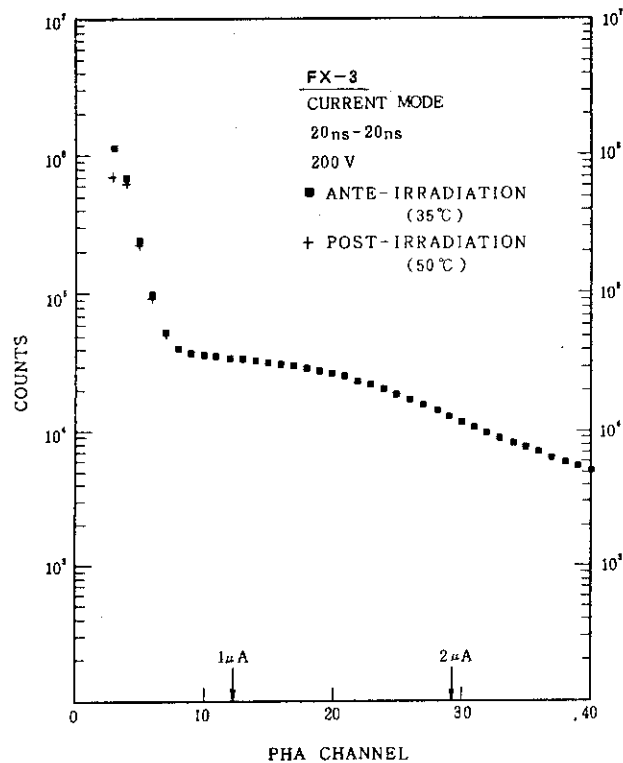


図 6.17 550 °C 照射試験の照射前及び照射後における FX-3 の出力パルス電流の積分波高分布 (測定温度: 常温)

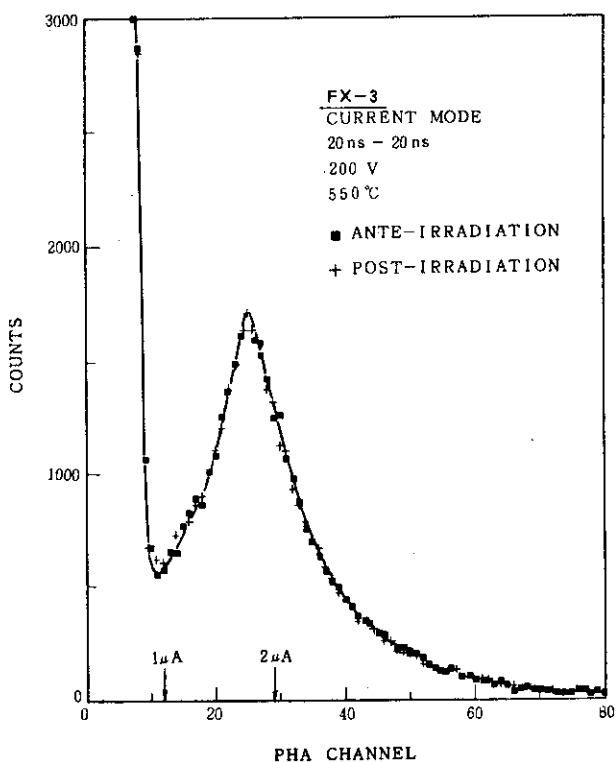


図 6.18 550 °C 照射試験の照射前及び照射後における FX-3 の出力パルス電流波高分布 (測定温度: 550 °C)

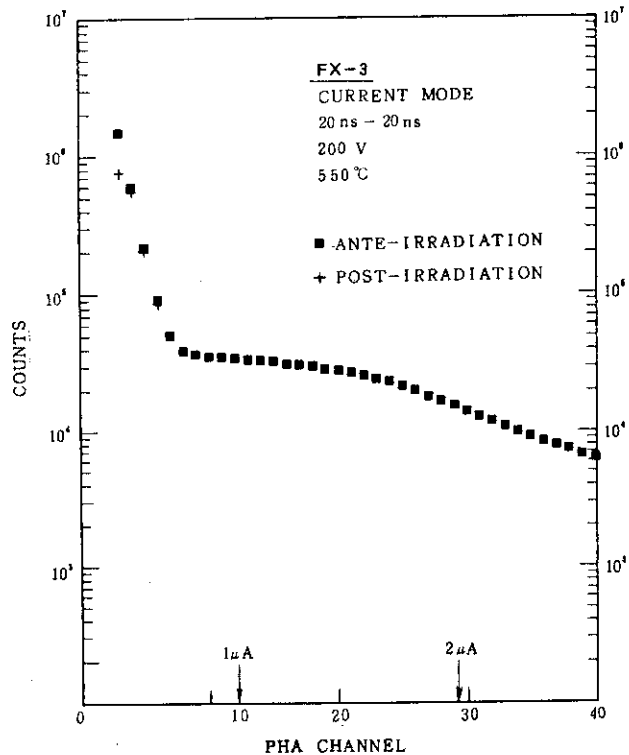


図 6.19 550 °C 照射試験の照射前及び照射後における FX-3 の出力パルス電流の積分波高分布 (測定温度: 550 °C)

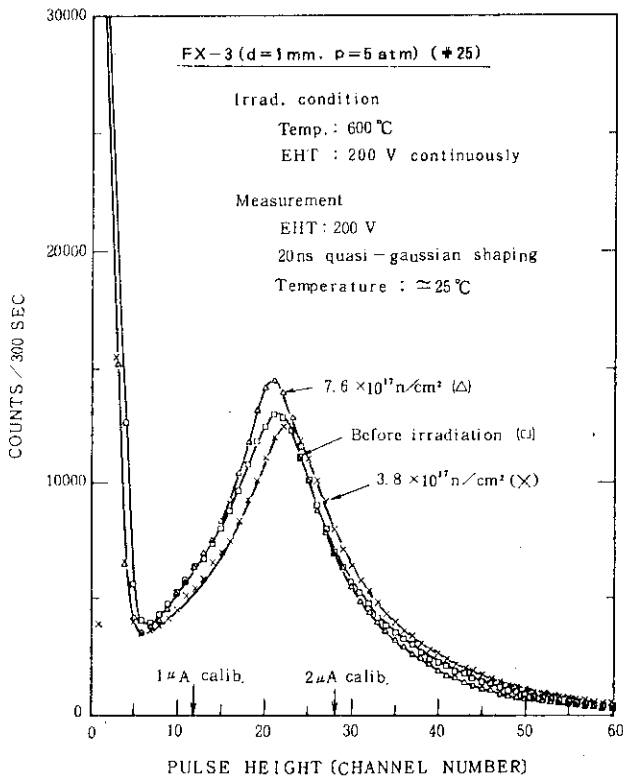


図 6.20 600 °C 照射試験の照射前, 中間試験時及び照射後における FX-3 の出力パルス電流波高分布 (測定温度: 常温)

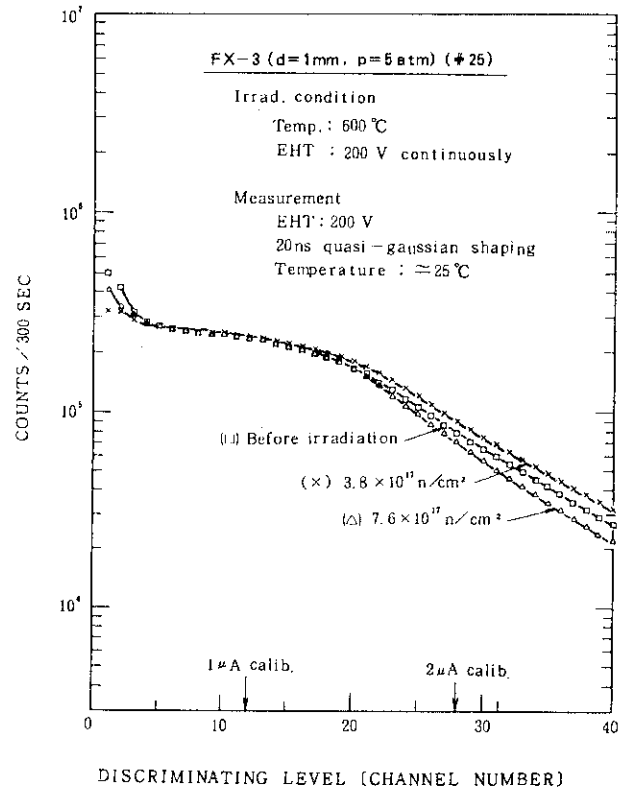


図 6.21 600 °C 照射試験の照射前, 中間試験時及び照射後における FX-3 の出力パルス電流の積分波高分布 (測定温度: 常温)

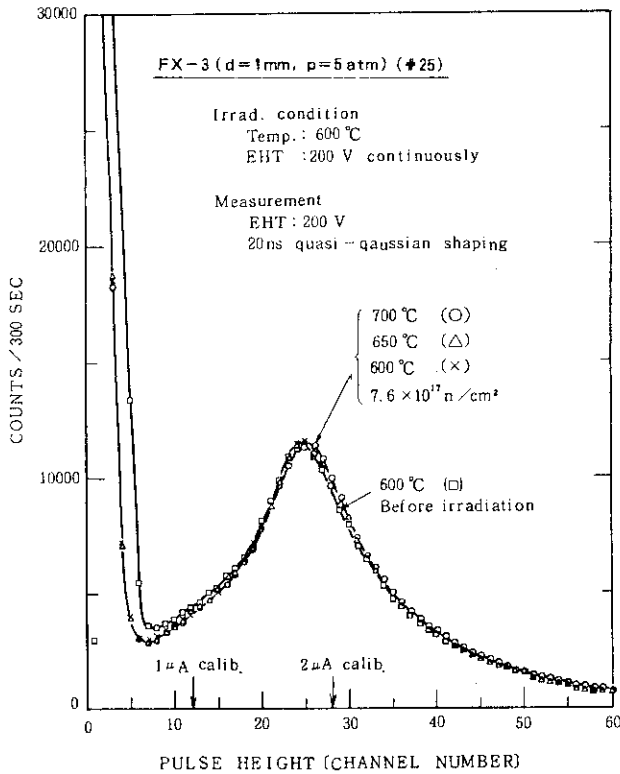


図 6.22 600 °C 照射試験の照射前, 中間試験時及び照射後における FX-3 の出力パルス電流波高分布 (測定温度: 照射前 600 °C, 照射後 600 °C, 650 °C, 700 °C)

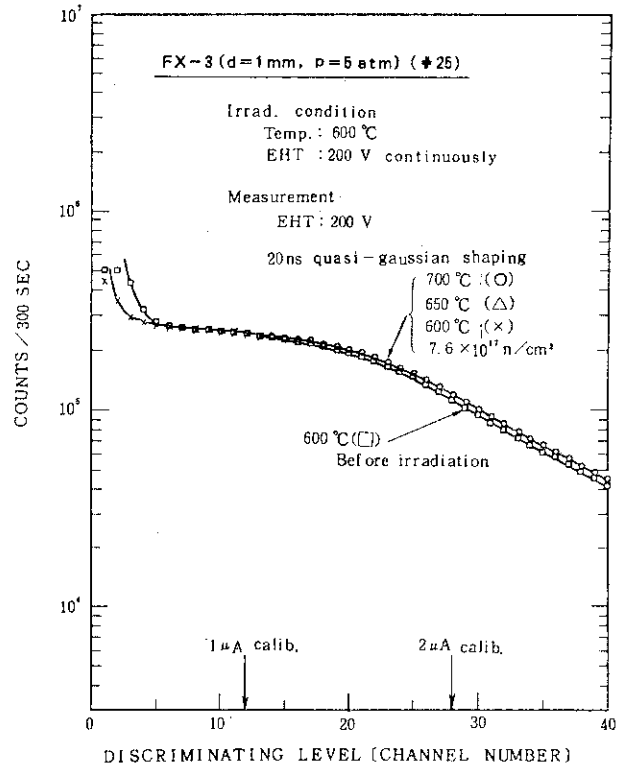


図 6.23 600 °C 照射試験の照射前, 中間試験時及び照射後における FX-3 の出力パルス電流の積分波高分布 (測定温度: 照射前 600 °C, 照射後 600 °C, 650 °C, 700 °C)

- (2) 高望みと思いながら構造的には 800 °C の高温に耐えるよう設計し、検出器圧力容器及びその溶接部等は既に 800 °C で長期に耐え得ることが、実験段階で確認済みのこと、
 - (3) 800 °C の環境下で低レベルの中性子束を測定することは未知の分野であり、それが可能かどうか研究的にも大変興味がある、
- 等の理由で 800 °C における作動試験を実施した。

6.4.2 試験方法及び結果

800 °C 作動試験は既に述べたように PAM 用検出器としての試験の意味もあるので第 1 回試験は、JRR-3 において 350 °C ~ 600 °C の温度で既に $1.4 \times 10^{18} \text{ n/cm}^2$ の中性子照射を行った試作核分裂計数管型電離箱 FX-3 について実施した。

加熱ヒータ及び測定系は照射試験に用いた装置を主として使用し、炉内で常温 (50 °C) 及び 600 °C, 700 °C, 800 °C に昇温して、それぞれ中性子によるパルス電流波高分布を測定した。印加電圧は 200 V, 波形整形は 20 ns の擬似ガウシアンである。

図 6.24 に 50 °C, 600 °C, 700 °C, 800 °C で測定した中性子パルス電流の波高分布及び積分波高分布 (インテグラルバイアス曲線) を示す。常温 (50 °C) から 200 °C 程度迄温度が上昇する間に電流パルス波高値がわずかに増加するが、それ以上の温度では 800 °C 迄全く温度の影響が認められなかった。また、積分波高分布のプラトー部分は常温から 800 °C 迄どの温度においても十分な広さを持って居り、 $1 \text{ n/cm}^2\text{s}$ 以下の低レベル中性子密度が 800 °C でも確実に測定できることが確認できた。

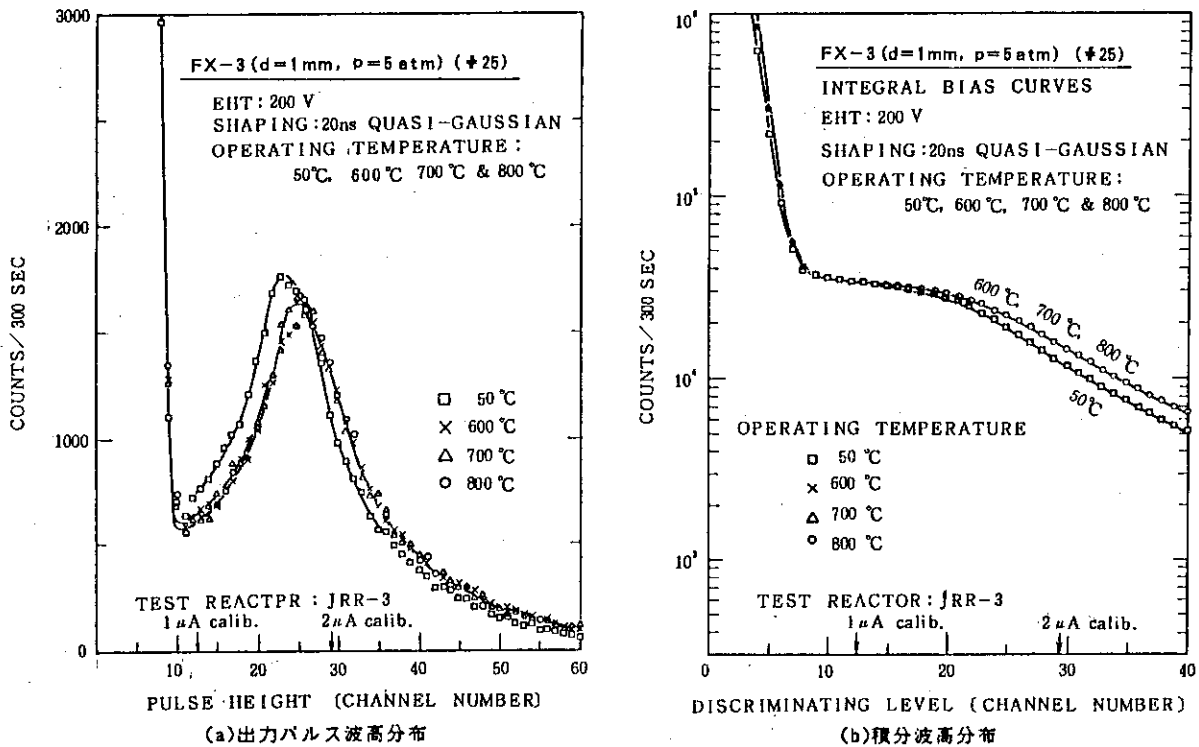


図 6.24 JRR-3 照射試験により $1.4 \times 10^{18} \text{ n/cm}^2$ の照射後に行った事故時対応 800 °C 試験における FX-3 の、(a)出力パルス波高分布、及び(b)積分波高分布

第2回高温過熱作動試験は研究室内の黒鉛パイルとAm-Be中性子源を用いて行った。黒鉛パイルを用いた理由は、原子炉では次の照射運転のため、原子炉停止中の低レベル中性子測定には時間の制限があるのに対し、黒鉛パイルでは十分な時間測定を継続できるためである。供試作核分裂計数管電離箱はモデルFX-3で、印加電圧200V、波形整形は時定数10nsの擬似ガウシアンである。

過熱昇温試験は図6.25に示すように約1ヶ月にわたって実施し、このうち700℃以上の試験時間は約536時間、800℃試験は約92時間である。

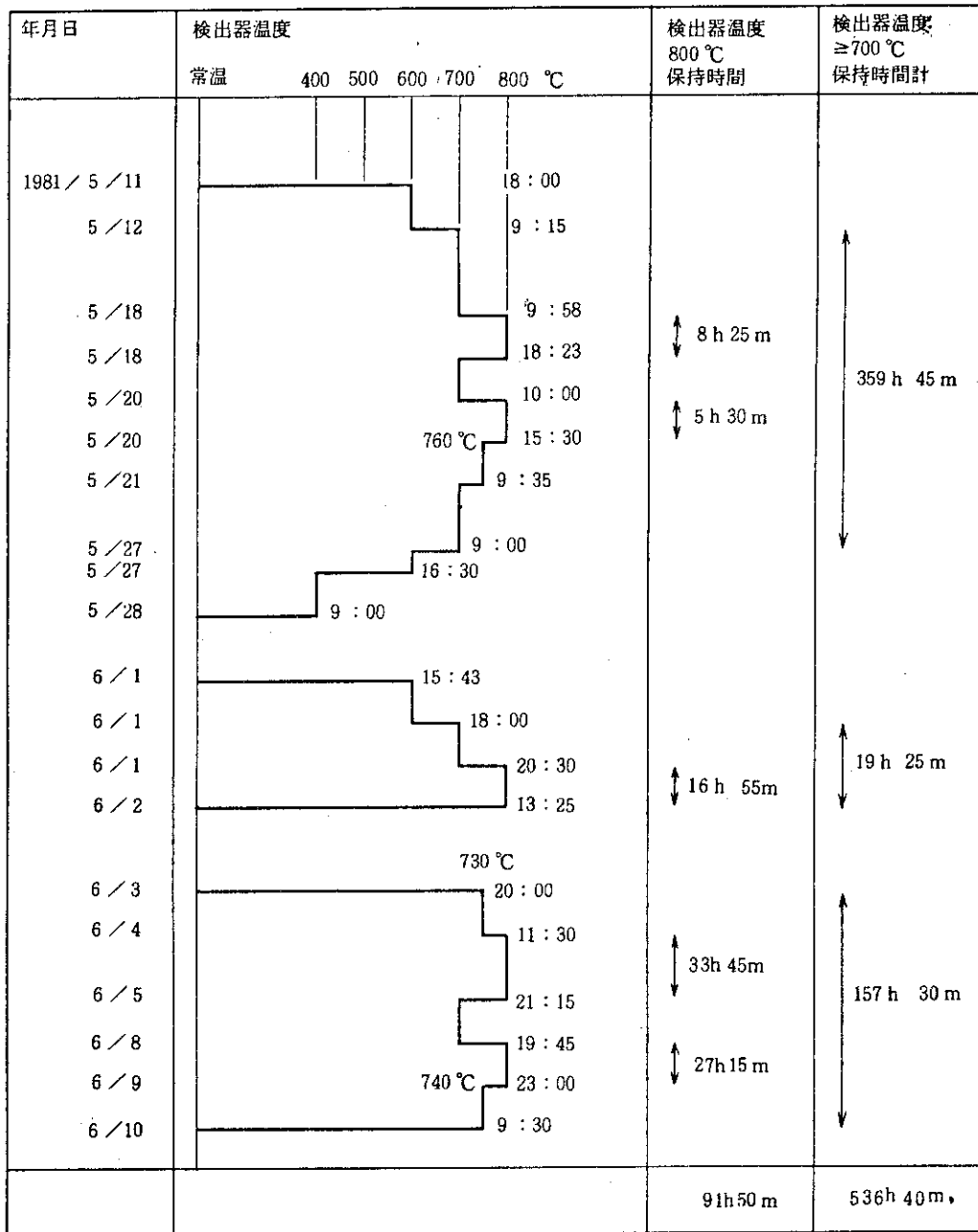


図6.25 黒鉛パイル中で行った事故時対応高温長時間試験の温度履歴

波高分布等の詳しい測定は、昇温前及び昇温途中で 25℃、600℃、700℃及び800℃で実施するとともに、試験中に温度を変化させた際にも測定を行った。また、800℃の温度の維持中は中性子源からの中性子計数の様子を対数計数率計を用いて監視すると共に試験終了時及びその温度下降時に800℃、700℃、600℃、25℃で再び電流パルス波高分布及び積分波高分布（インテグラルバイアス曲線）の測定を行った。

700℃以上の温度で作動させた時間は536時間（約22.3日）であり、いろいろの炉心過熱を伴う仮想事故に対して必要な冷却期間を十分カバーし得る時間と思われる。

図6.26に本試験の最終段階で測定した供試核分裂計数管型電離箱FX-3の25℃、600℃、700℃、800℃における波高分布及び積分波高分布を示す。

700℃～800℃における高温過熱作動試験の結果、試験の前及び後で測定した供試核分裂計数管型電離箱の出力特性に全く変化がなく、仮想的な原子炉事故時の過熱状態においても事故処理に必要な十分な時間、安定に作動することを確認することが出来た。

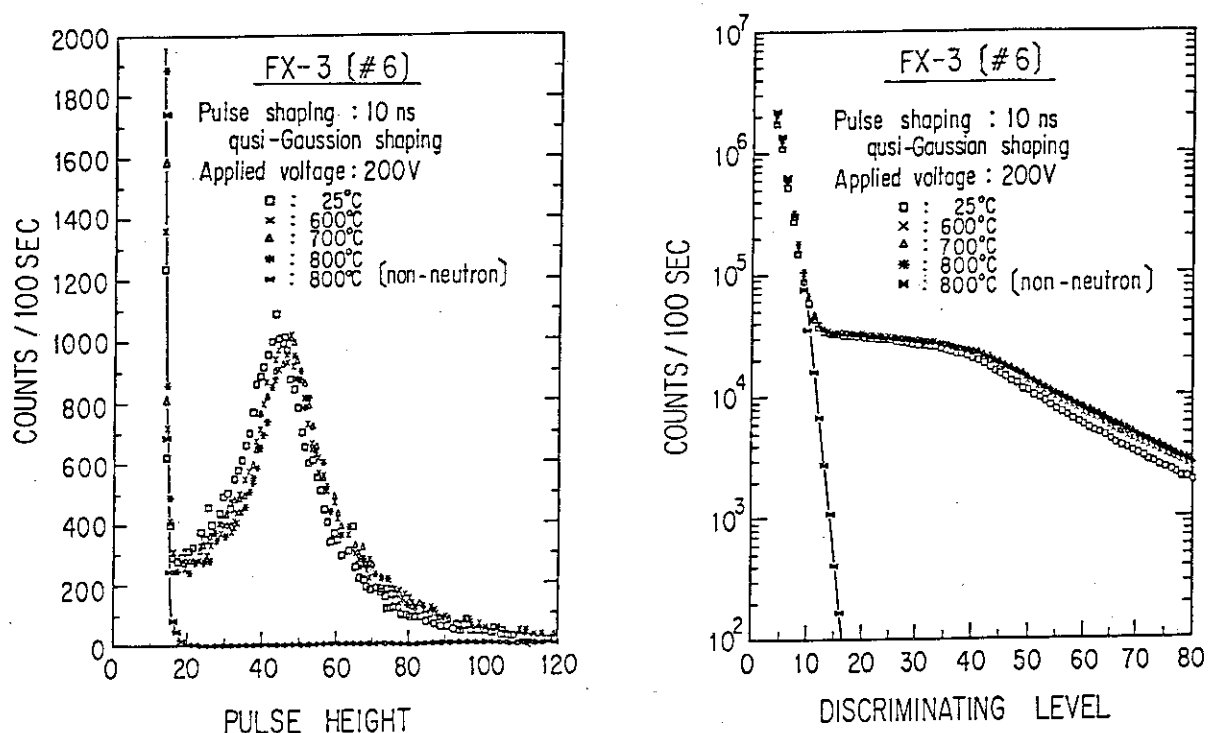


図6.26 黒鉛パイル中で行った800℃試験におけるFX-3の(a)出力パルス波高分布、及び、(b)積分波高分布

6.5 長期原子炉内実作動試験

前節までに、開発した核分裂計数管型電離箱についてその性能試験、照射加速寿命試験等その性能検証に必要なほとんどすべての試験を行ったが、高温下の加速照射寿命試験において、時間的に加速されない現象又は要因が残っている可能性について明確に否定できる根拠はない。

このため高温核分裂計数管型電離箱の開発の最終段階として、その長期作動に係る信頼度の検

証,あるいは必要な場合にはその改良を画るため,原子炉内での実作動による長期実時間作動試験を実施した。

6.5.1 試験装置

長期原子炉内作動試験に使用した原子炉はJRR-4で,そのサーマルコラムに電気ヒーターを内蔵する核分裂計数管試験用キャプセルを設置し,その中に供試中性子検出器を挿入して試験を行った。

図6.27に実験装置設置の概要を示す。図6.28及び図6.29に実験に使用した測定システムのブロック図を示す。

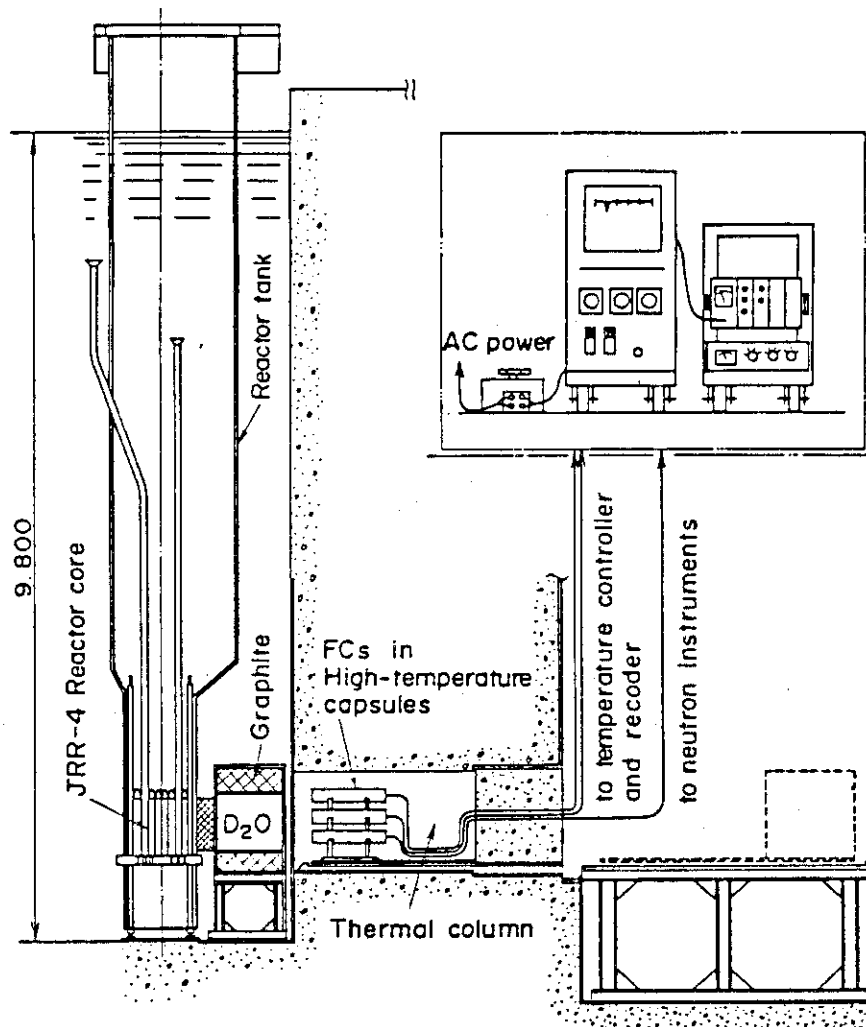


図6.27 長期原子炉内実作動試験における実験装置の概要

図6.28は温度制御・監視装置及び核分裂計数管出力の長期連続監視装置の構成である。

パルス計測装置の主要部分は高速パルス系を用いた核計装起動系と同じもので原子炉の出力を常時モニタする形となっている。図6.29は数ヶ月に一度,供試試作核分裂計数管型電離箱の特性の変化を詳しく測定するためのシステムで,5章で述べた特性試験の際用いたパルス電流波高分布測定システムとほぼ同じ構成である。

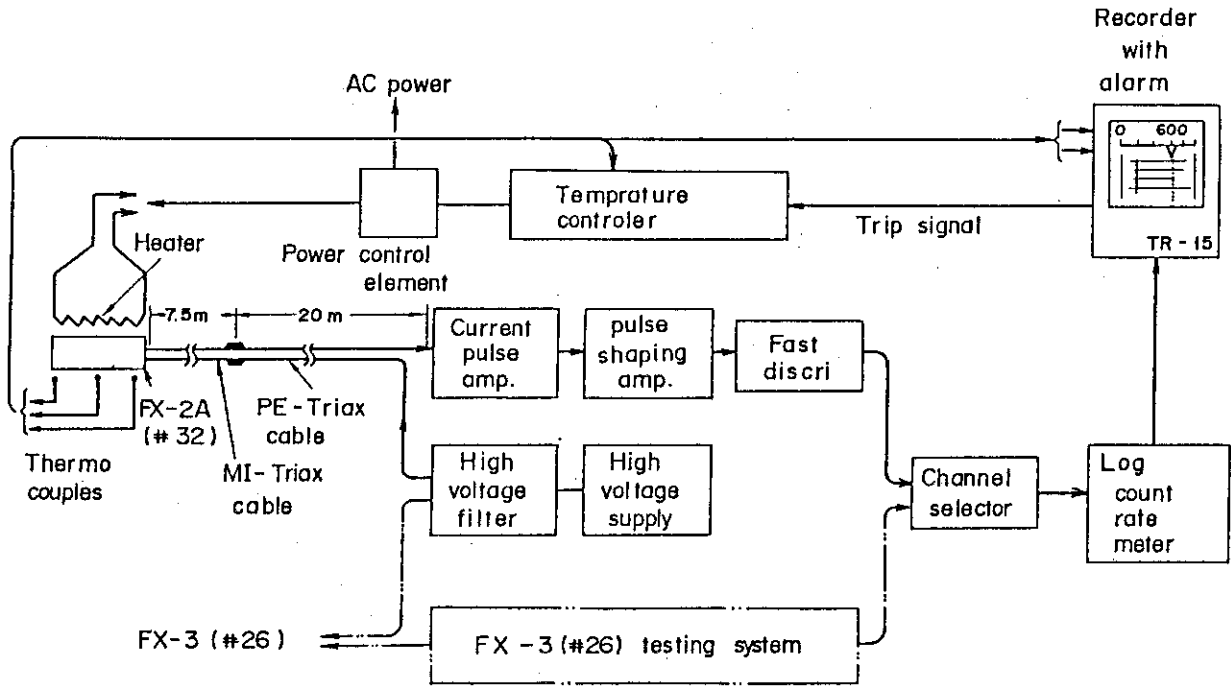


図 6.28 長期原子炉内実作動試験に使用した温度制御装置，連続監視装置等の構成

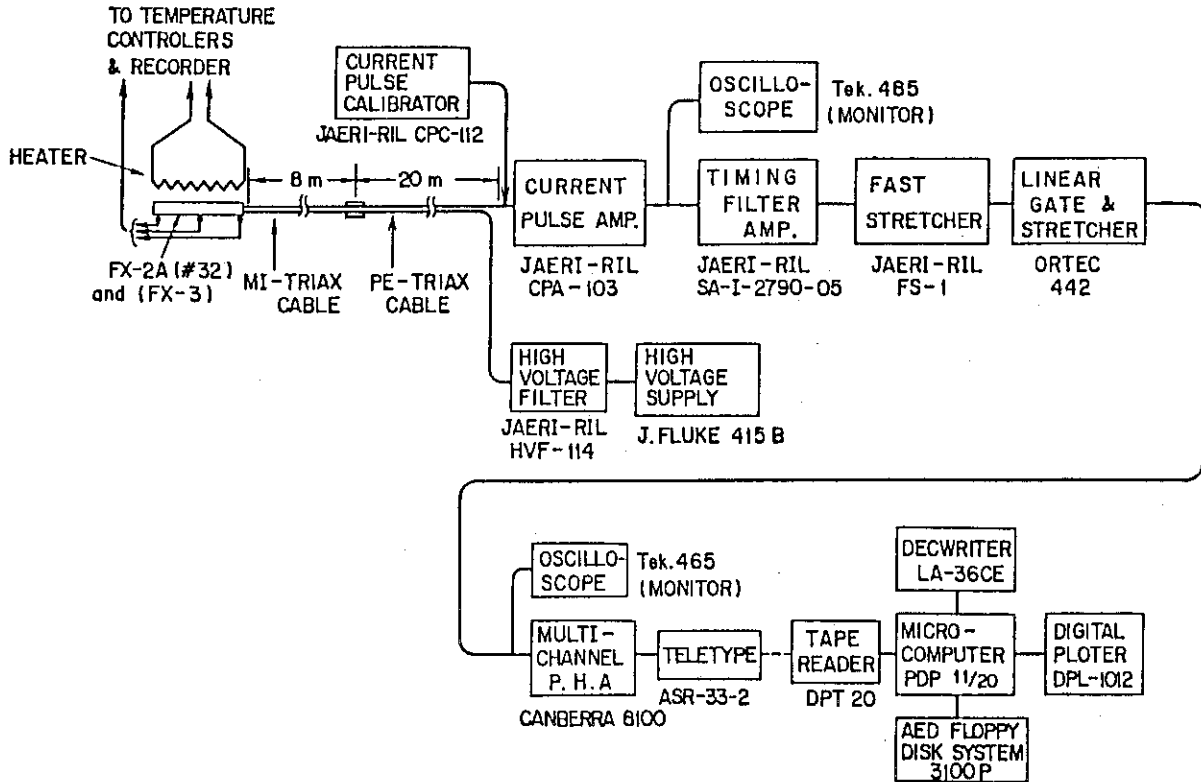


図 6.29 長期炉内試験に使用した出力パルス電流波高分析装置

6.5.2 試験方法及び結果

図 6.30 に試作核分裂計数管型電離箱の長期原子炉内実作動試験における 600 °C 加熱期間，原子炉運転期間，詳細試験実施日などを年度，月の線上に示す。

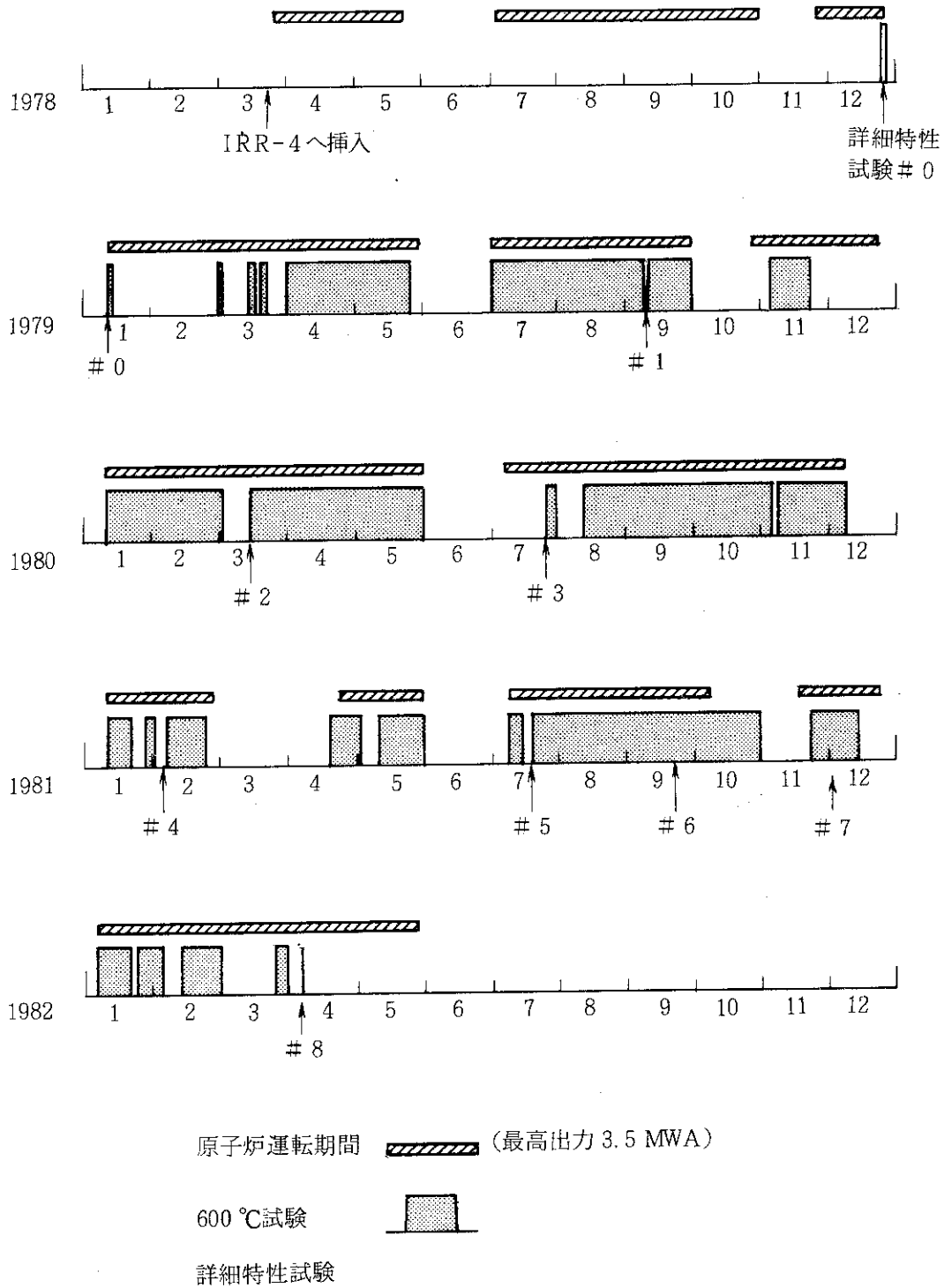


図 6.30 長期炉内実作動試験における 600 °C 加熱試験期間，原子炉運転期間，及び詳細特性試験実施日

図中に示された原子炉運転期間は、毎週火曜日から金曜日にかけて、図 6.31 に示すように朝に原子炉を起動し、夕方停止する運転が繰り返されている。また、図 6.30 の横線上に示す幅広いマークは供試核分裂計数管型電離箱温度が 600 °C に加熱されている期間を示す。また、同図の横線下の番号付き矢印は詳細試験実施日である。

JRR-4 運転実績表一例

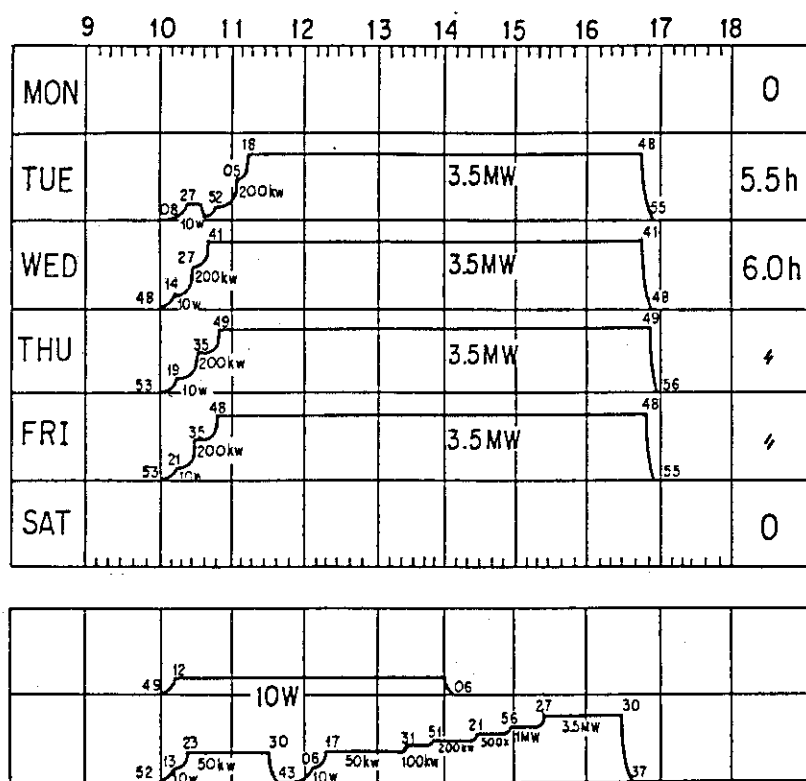


図 6.31 一週間各日における原子炉運転時間のパターン

1978年3月供試試作核分裂計数管型電離箱を原子炉サーマルコラム内に設置後、加熱ヒータの制御装置の完成を待って同年12月末～1979年1月初旬にかけて初期詳細特性試験（#0）を実施し、1982年4月末の第8回詳細特性試験が終了する迄約3年4ヶ月にわたる試験を実施した。

供試核分裂計数管型電離箱はFX-2A及びFX-3の2本である。各詳細測定における計測値は毎回ほとんど変化せず計測誤差範囲内であった。

図 6.32 に供試核分裂計数管型電離箱 FX-2A の初期詳細特性試験（1979年1月12日）で測定した積分波高分布特性と第4回詳細特性試験（1981年2月5日）の測定結果との比較を示す。

また図 6.33 に同 FX-3 について初期詳細特性試験（1978年12月21日）で測定した積分波高分布特性と、第4回詳細特性試験（1981年2月5日）の測定結果との比較を示す。

両方の供試核分裂計数管型電離箱共に、全く正常にかつ安定に作動し、また有意差のある特性変化は全く無かったことが両図より確認できる。

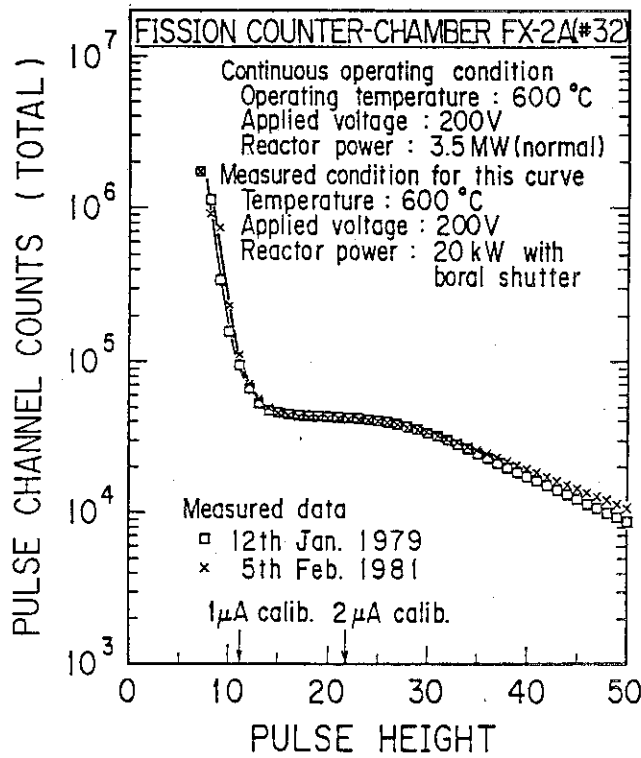


図 6.32 長期炉内実作動試験の初期試験（1979年1月12日）及び第4回詳細特性試験（1981年2月5日）に測定したFX-2Aの出力パルス電流の積分波高分布の比較

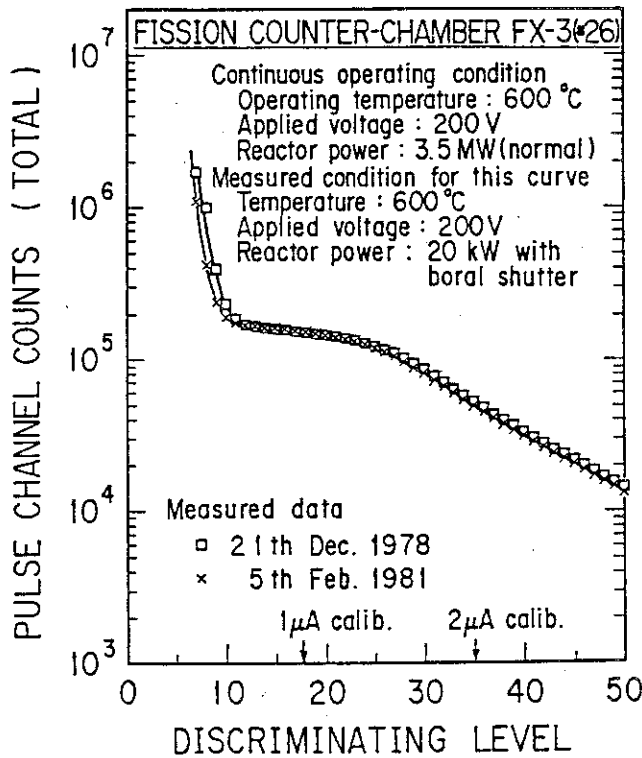


図 6.33 初期試験（1978年12月21日）と第4回詳細特性試験（1981年2月5日）で測定したFX-3の出力パルス電流の積分波高分布の比較

第5回（1981年7月21日）の詳細特性試験では供試核分裂計数管型電離箱FX-3には異状が無かったが、一方のFX-2Aの特性に変化があることが測定された。図6.34に第5回詳細特性試験におけるFX-2Aの積分波高分布（×印）を初期の測定値（1979年1月12日、□印）と共に示す。第5回試験における積分波高分布のプラトーは初期値の大略半分となっており、パルス電流波高値が約2分の1になったことを示している。しかし、この状態でも核分裂計数管型電離箱として正常に作動しており、図からみてわかるように初期正常値に対する中性子パルス計測用波高弁別レベルの設定値14（最適値は横軸目盛13ないし16）に対してはパルス波高値が減少後もプラトー部が重なっており同じ計数率を示しているので、パルス系計数率モニタとしてはまた正常に機能しており、総合的には変化が現われなかったことがわかる。また測定の結果、パルス電荷波高値も大幅に小さくなっていることから、異状の原因はガスの漏洩による減圧が生じたためと推定されている。

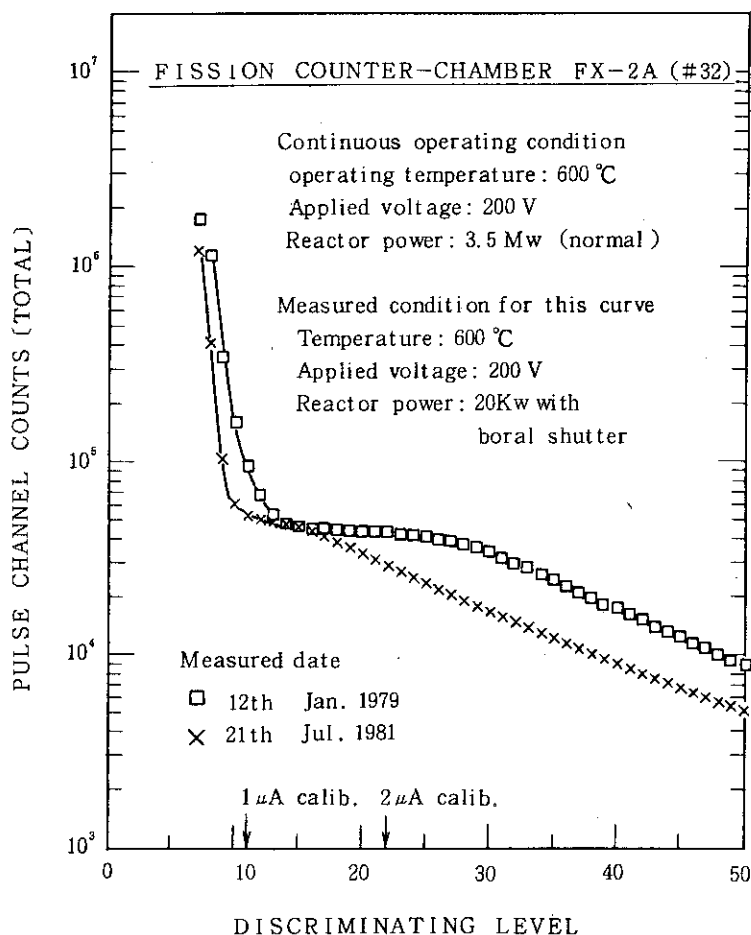


図6.34 第5回詳細特性試験で測定したFX-2A の出力パルス電流の積分波高分布（×印）と初期測定値（1979年1月12日、□印）との比較（プラトーはわずかに残っているが、出力パルスの電流波高の減少がみられる）

この様に1本の供試試作核分裂計数管型電離箱FX-2Aではパルス波高の減少が認められたので試験をここで打ち切った。試験開始より941日、600℃での作動時間11,204時間、原子炉運転起動・停止回数約280回、常温→600℃の加熱・冷却回数22回であった。

一方の供試試作核分裂計数管型電離箱FX-3は更にひきつづき安定に作動し作動試験を継続し、1982年4月8日行った第8回詳細特性試験においても全く異状が認められなかった。

図6.35に供試試作核分裂計数管型電離箱FX-3の第8回詳細特性試験において測定した出力パルス電流の積分波高分布(×印)を初期値(1978年12月21日、□印)との比較において示す。

この検出器は足かけ5年に及ぶ原子炉内長期実作動試験に耐え高温下で心配された出力パルス電流波高値の減少も全く観測されなかった。サーマルコラムの次の利用計画の関係で本長期実作動試験は第8回詳細試験をもって打ち切りとした。

1978年12月21日から1982年4月8日迄の炉内における計測作動日数は1202日、600℃での作動時間は15324時間(688日)、この間の原子炉の起動・停止は約370回、常温→600℃の加熱冷却熱サイクルは30回であり、供試試作核分裂計数管型電離箱FX-3はこれらの炉内長期実時間試験に完全に耐え抜いた。

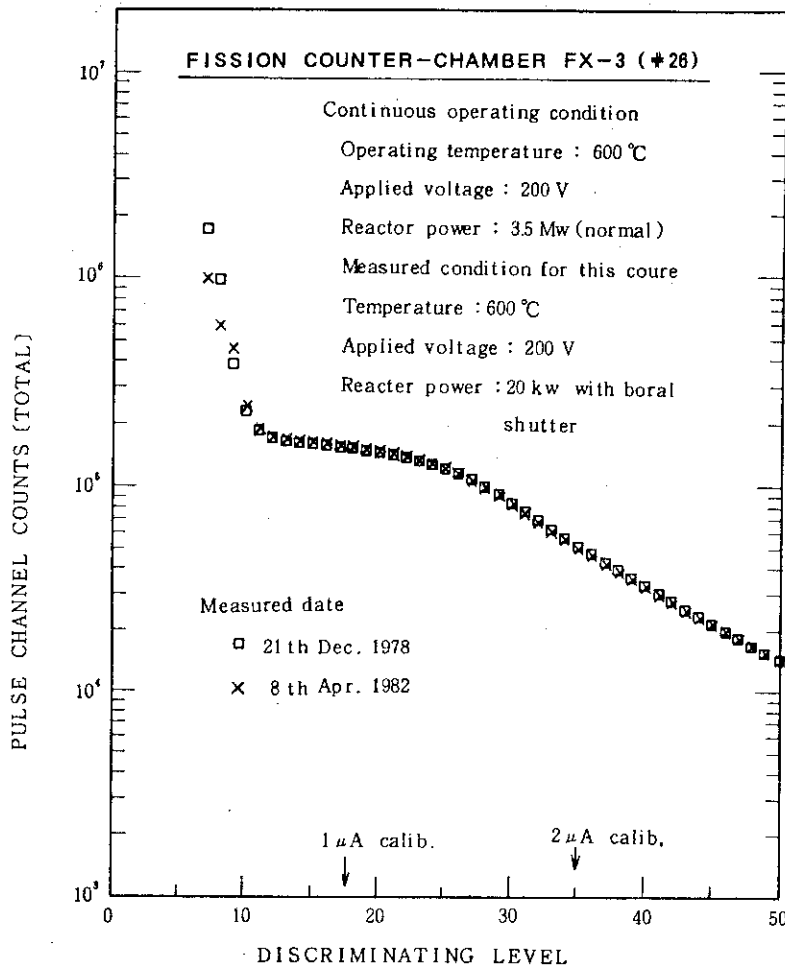


図6.35 第8回詳細特性試験(1982年4月8日)において測定したFX-3の出力パルス電流の積分波高分布(×印)と初期特性試験(1978年12月21日、□印)の比較

7. 結 言

将来各種の新型炉で必要とされる 600°C 以上の高温耐熱性と高性能な作動特性が両立する核分裂計数管型電離箱の開発研究をすすめ、

- (1) 高ニッケル含有率のニッケル、クロム、鉄合金の電極・構造金属材料と窒素 5%—アルゴン 94%—ヘリウム 1% 混合の電離ガスの使用によっていわゆる速いガスが高温高放射線下で安定に使用できる道を開き、更に
- (2) 外テーパ管状封着合金を用いた高温耐熱メタル・セラミック封着方法、
- (3) 柔構造の封着部を保護する二重圧力容器構造、
- (4) 高温バネの不要な高温膨張差吸収構造、

などの構造上の工夫や研究によって 600°C でも長期にわたり安定に作動するとともに電荷収集時間 43 ns ~ 100 ns, 出力パルス電流高波値 1.6 μ A ~ 2.6 μ A 等の高度な作動特性を有する高温用核分裂計数管型電離箱の開発に成功した。

試作した高温用核分裂計数管型電離箱について高温における詳細な特性試験、照射試験、800°C 試験、長期炉内実作動試験等を実施し将来の各種新型炉での使用に耐える性能を有するかどうか確認をおこなった。

各種特性試験においては (1)出力パルス電流波高、(2)出力パルス電荷波高、(3)電荷収集時間、(4)中性子感度、(5)ガンマ線感度等の詳細な測定を常温及び 600°C の高温下で実施し、夫々高温下でも安定に作動しかつ各種の特性値は設計値と大変良く一致する結果を得た。これにより開発した高温用核分裂計数管型電離箱の基本的設計法が妥当であることを確認することができた。

表 7.1 に試作試験を行った高温用核分裂計数管型電離箱の諸特性に関する設計値と測定結果との一覧表を示す。

表 7.1 開発した高温用核分裂計数管型電離箱の各種モデルの諸特性の設計値と測定結果一覧

モデル名	FX-2A		FX-2		FX-3		FX-2D		
項 目	設計値	実測値	設計値	実測値	設計値	実測値	設計値	実測値	
最高作動温度 (°C) ¹	長期作動目標		600	600	600	640	600	600	
	設計		800	-	800	-	800	800	
出力パルス電流 (最頻値, μ A) ¹ 条件: HV = 200 V 33 Ω MI ケーブル出力	常 温	2.73	2.5	1.85	1.9	1.65	1.6	1.82	1.9
	300°C		2.6		2.2		1.8		1.9
	600°C		2.6		2.3		1.8		1.9
	800°C		-		-		1.8		1.9
電荷収集時間 (ns, HV = 200 V)	(26)	43	(105)	100	(75)	85	(60)	67	
出力パルス電荷 (最頻値, 10^{-13} C)	0.58	0.54	1.09	0.95	0.81	0.68	0.65	0.64	
中性子感度 (cps/n cm^{-2} s)	0.12	0.12	0.12	0.12	0.3	0.31	0.12	0.12	
作動電圧 (V)	<250	200	<250	200	<250	200	<250	200	
寸 法	38 ϕ × 350	同左	38 ϕ × 340	同左	38 ϕ × 350	同左	38 ϕ × 350	同左	

() 内はケーブル無しの場合の理論的電荷収集時間。

FX-2Aの出力パルス電流波高値の測定値は設計計算値よりわずかに小さいが、この理由は電荷収集時間が短かくパルス幅が狭いのでMIケーブルの高周波伝送損失が大きいことによると考えられる。

とは言っても全試作モデルの中で最も大きな出力電流波高値をもつのみでなく、図5.15に示されるように積分波高分布（インテグラルバイアス曲線）のプラトー部が極めて広く、かつ100V以下の印加電圧で正常に作動するなど極めて大きな特徴を有している。

しかし製造面から見ると、0.5mmの電極間隔を精度よく保つためには高度の製造工程管理が必要であり、この点から電極間隔を1mm、ガス圧4Atmに選んだFX-2Dが、出力パルス電流は程ほどに大きく、電荷収集時間もあまり長くない上、中性子感度に対する γ 線感度がFX-2A程度に小さいなど、ほぼ満足すべき性能を有している上、電極間隔を決める各種部品の許容誤差を、ややゆるやかに設計できるなどの特徴があり、量産にはこの方が適しているといえることができる。

また、FX-2Dは内部ガス圧がFX-2A、FX-2の約半分であり、検出器容器の高温下での信頼性が更に向上しよう。

FX-3は中性子感度を高くするため、電極長がFX-2のグループに比べて2.5倍（300mm）となっているが1mmの電極間隔はほぼ正常に維持されていることがパルス波高分布から推察できる。

表7.2に開発した高温用核分裂計数管型電離箱の各種試作モデルの主要特性値を示す。また、表7.2の右方に欧米の代表的な高温核分裂計数管型電離箱の主要性能を示す。

開発した高温核分裂計数管型電離箱ではこれら欧米の核分裂計数管に比べてパルス電流波高値、電荷収集時間等において大変優れた結果を得ることができた。

表 7.2 開発した高温核分裂計数管型電離箱の各種モデルの主要特性値

モデル名	FX-2A	FX-2	FX-3	FX-2D	P 7A	CFUD 12	WX-31384
最高作動温度 (°C)	600	600	600 (800)	600 (800)	550	600	594
出力パルス電流 (最頻値, μ A)	2.5	1.9	1.6	1.9	0.7	0.4	0.5
電荷収集時間 (ns)	43	100	85	67	250	250	250
中性子感度 (cps/n cm ² s ⁻¹)	0.12	0.12	0.3	0.12	0.1	0.1	0.1
γ 線感度 (10 ⁻¹¹ A/Rh ⁻¹)	0.7	1.2	2.0	0.8	2.2	1.5	10
寸法 (mm)	38 ϕ ×350	38 ϕ ×340	38 ϕ ×530	38 ϕ ×350	38 ϕ ×547	36.5 ϕ ×208	63.5 ϕ ×497
MIケーブルの種類	Triax c-c-s	Triax c-c-s	Triax c-c-s	Triax c-c-s	Triax c-c-s	Coax s-s	Coax s-s
差動出力	yes	yes	yes	yes	No	No	No
備考					(英)	(佛)	(米)

特性値の測定電圧: 200 V, C: Copper, S: Stainless Steel or Inconel

高ガンマ線下における中性子測定実験では、試作核分裂計数管型電離箱の胴部に4万5千キュリーのコバルト60照射線源を密着させた状態の約130~170万R/hrの γ 線バックグラウンドのもとでも、 $1\text{ n/cm}^2\text{ s}$ の中性子が安定に測定できることがわかった。特にFX-2Aでは170万R/hrの γ 線バックグラウンドに対して、 γ 線パルスのパイルアップによるインテグラルバイアス曲線の左方の立ち上がりの変化は極めて少なく、 γ 線パイルのパイルアップに対して出力パルス電流波高が大きく電荷収集時間の短い特徴の有効性が明確に現われている。

原子炉出力測定試験ではパルス系及びキャンベル系電子回路と組み合わせて1本の検出器で10桁以上にわたる原子炉出力の変化を正しく監視できることを確認した。

照射加速寿命試験では、JMTRにおける第1次照射加速寿命試験で、JMTR炉心内の高放射線下で、 600°C の照射温度、 $6.5 \times 10^{18}\text{ n/cm}^2$ の中性子照射の間、継続して26mAの電離イオン電流を流しつづける約10万クーロン(約1モル余)の電離ガス及び電子を電極に衝突させてアルゴン・窒素混合計数ガスと高ニッケル含有耐熱合金の電極との高温高放射線下における両立性を調べ、当初の予想以上にこれらが安定に共存し得ることを実証した。

これにより初めて 600°C 以上の高温下で作動する高性能特性の核分裂計数管型電離箱の概念が成立することを立証することが出来た。

JRR-3で行った第2次照射試験では、 350°C における中性子照射試験(ループ型高速炉用ワイドレンジモニタなどに対する対応)、 550°C 中性子照射試験(タンクタイプ高速炉、新鋭ガス炉、熔融塩炉等の核計装に対する対応)及び 600°C 中性子照射試験(大型高温ガス炉、VHTR実験炉などの核計装対応)を一つの試作核分裂計数管型電離箱に対して実施し、全照射期間を通して全く特性の変化がないことを確認した。

事故時対応高温加熱模擬試験では、2本の試作核分裂計数管型電離箱について 800°C までの高温作動試験を行った。1本はJRR-3で第2次照射寿命試験を実施したあと、その照射後の核分裂計数管型電離箱を用いて実施し、 800°C の温度環境でも 600°C の場合と全く同じ特性・性能で作動し、中性子計測ができることを確認した。

また、他の一本は原子炉実験を行った比較的照射量の少ない試作核分裂計数管型電離箱を用いて比較的長時間、 $700^\circ\text{C} \sim 800^\circ\text{C}$ における高温作動特性試験を行い、事故処理に必要な十分な期間安定に作動しその特性に変化が無いことを確認した。

更にまた、最終的確認事項の一つとして約3年4ヶ月にわたる長期原子炉内実作動試験を実施し、開発した高温用核分裂計数管型電離箱の基本的構成概念に問題点が無いことを確認した。

以上の試験結果を総合して、当初目標とした 600°C 以上の高温耐熱性とで高性能特性が両立する核分裂計数管型電離箱の開発をここに達成できたと言うことができる。

図7.1に世界各国における代表的な中高温用核分裂計数管の性能を、耐熱作動温度の関係において図示する。図は高温最高作動温度を横軸にとり夫々の出力パルス電流高値(最頻値, μA)を縦軸に示したものである。

図中に示したマークは次の意味を有する。

▼: 論文等による作動試験実績又はカタログ仕様温度(放射線検出器のカタログ仕様における耐

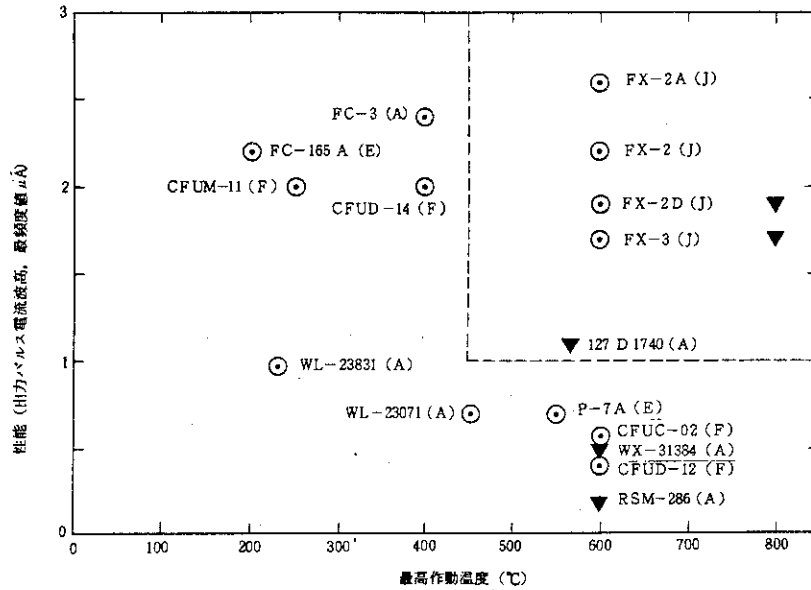


図 7.1 各国の代表的な原子炉計装用核分裂計数管型電離箱の最高作動温度と出力パルス波高値(最頻値)

(熱温度は必ずしも長期作動保障温度を意味するものではない。)

○：少なくともプロトタイプ of 長期炉内照射実績の報告値があるもの

英数字：モデル型名 (カッコ内は国名)

(A)：米国, (E)：英国, (F)：フランス, (J)：本研究成果

図で○印が右上の方にある程耐熱性が高くかつ作動性能が良いことを示している。

図中の縦の破線は従来信じられていた高性能核分裂計数管の設計温度限界であり、また横の破線は 450°C を越える耐熱性の高温核分裂計数管の従来信じられていた性能限界である。

諸外国の核分裂計数管電離箱は最近試作された一つの例外を除いていずれもこれらの線の下側又は左側にあり、本分野における従来技術のいわゆる常識内の設計及び性能のものであるが、本研究で得られた成果は右上の飛び離れた位置にありその特異性が理解されよう。

本研究では、600°C を越える高温耐熱性と、大きなパルス電流出力及び短い電荷収集時間をもつ高性能性が両立する核分裂計数管型電離箱を実現する方法を探求し、それが現実的に可能であることを試作及び各種の試験を通して実証した。

本研究の成果は世界における 1990 年代の各種の新型動力炉計画における核計装検出器に対する高度な要求にも十分対応できるものと考えられる。

従って次段階の課題としては、信頼性を含めた品質保障計画に基づく製作工程を早急に確立するとともに、更に現在の構造部品及び製造工程のどこをどのように単純化できるかについて製造面から研究をすすめる、その単純化による信頼性の向上、製造歩留まりの向上と共に製造コストの低減を画り、現在この種の高性能中性子検出器の使用について要望のある欧米諸国に安定供給可能な体制を作ることが重要かと思われる。

謝 辞

本研究は、非常に多くの基本的開発要素の検討から始まり、複雑で高度の工程を必要とする試作、並びに極めて多岐・長期にわたる大規模な実証試験が必要であり、大変多くの諸先達並びに専門家の御指導、御支援、御助力を得てはじめて成し遂げ得たものである。

東京大学教授 関口晃博士には永年にわたり研究嘱託として御指導をいただき、更にまた本論文のまとめ方について親身の御指導をいただいた。同大学名誉教授 西野治博士には原研入所以来研究全般にわたり御指導をいただき、また多数の研究発表の機会を作っていたいただいた。前日本原子力研究所副理事長、元計測制御研究室長 天野昇氏には、見通しのないようみえる研究への取り組みかたを仕込んで頂いた。現在迄原子力計測分野の一研究者として、ささやかながら研究を進めていくことができたのは、これら諸氏のお陰である。また元北大教授 故古川友三博士には原研入所後約7年間、職場上司として核計装回路の基礎を御伝授いただき本研究の基礎を得た。原研動力炉開発安全性研究管理部長 原昌雄氏には前研究室長として暖かく御指導いただいたのみでなく、約17年前の英国南部での同氏との論議が後年本研究に着手するきっかけとなった。原研企画室長（前原子炉工学部長）朝岡卓見博士及び現原子炉工学部長 松浦祥次郎博士及び現新潟大学教授 川口千代二博士（元原子炉計測研究室長）には過分の研究環境を与えていただき、また研究進路の御指導をいただいた。東京大学助教授長谷川賢一博士及び同中沢正治博士には、本研究をまとめる際に幾多の適切な御助言、御指導をいただいた。原研技術部工作課 大部昇氏には基礎実験用核分裂計数管型電離箱の製作及び本格的試作のための高精度試作部品を幾度も製作していただいた。

一方、元三菱電気（株）中央研究所主幹 宮下恭一氏、同 故川島克彦博士、現同所主任研究員 友田利正氏、田中広二氏並びに深草伸二氏（現通信機製作所）らの諸氏は本高温核分裂計数管型電離箱試作の初期段階より積極的に組立・製作技術の開発及び試作を御担当いただいた。この協力の途上、各種の討論を通して引用文献で示したように筆者との共同発明（特許）が多数生まれた。また同社中央研究所副所長 岸田公治博士並びに田中光雄博士による御指導、御支援も本研究の完成に不可欠であった。

更にまた、本高温核分裂計数管型電離箱の特性試験、照射試験、炉内試験の多くの測定は原研原子炉計測研究室 山岸秀志主査及び伊藤浩技術員の協力によってはじめて完遂できたものである。また本研究において原子炉出力直線性の測定に使用したキャンベル系の研究、高速パルス系の試作並びに中性子感度のモンテカルロ計算による検討及び核分裂計数管型電離箱製作・試験研究時のガス混合充填装置の製作には夫々同研究室主任研究員荒克之博士、角田恒巳主査、五藤博副主任研究員の御助力を得た。またJMTR及びJRR-3における照射寿命試験においては、原研JMTR部照射1課露崎典平係長、並びに企画室調査役（元JRR-3管理課課長代理）白井英次氏の全面的な御協力を得た。

本研究は以上に述べた諸氏の御指導、御協力によって完遂できたものであり、どの一部がかけてもその完成は困難であったと思われる。上記諸氏に心から深甚の謝意を表するものである。

参 考 文 献

- (1) GOODINGS, A., HAGGER, H., PHILLIPS, R.D., "Reactor Control Neutron Detectors for Operation at High Temperature", Inst. Elect. Eng., Publication, No.47, p.37 (1968)
- (2) PFLASTERER, G.R., "LMFBR Instrumentation and Control, Trans. Inst. Electr. Electron. Eng. NS-20, vol.1, pp.586-594 (1973)
- (3) DITTO, S.J. and ANDERSON, J.L., "Development Status of Molten-Salt Breeder Reactors", Chapter 10 Plant Control and Instrumentation, ORNL-4812, pp.315-324 (1972)
- (4) McNEESE, L.G., "Program Plan for Development of Molten-Salt Breeder Reactors", Chapter 12 Instrumentation and Controls Development, vol.1, pp.12/1 - 12/27 (1974)
- (5) Neutron Gas Filled Detectors, Catalogue-R.T.C. La Radio-Technique-Compelec, Ref. 4270-05-1977 (1977)
- (6) MOBBS, D.J., Neutron Detectors for Reactor Control, J. Inst. Nucl. Eng., vol.18, No.1, p.16 (1977)
- (7) GOURDON, J. (CEN Cadarache) Private Information (1981)
- (8) SHEPARD, R.L., VALENTINE, K.H. and YINGLING, G.E., "Current Status of LMFBR Nuclear Instrumentation System Research and Development in the U.S., U.S./Japan Specialists' Meeting on LMFBR Instrumentation and Control, D1(1) (1980)
- (9) CURREN, R.N. and YINGLING, G.E., "Nuclear Instrumentation System Operating Experience and Nuclear Instrument Testing in the FBR-II", U.S./Japan Specialists' Meeting on LMFBR Instrumentation and Control" (1980)
- (10) 若山, 河上, 中田 起動系検出器出力の伝送と増幅 昭和42年 電気四学会連合大会 499 (1967)
- (11) 若山, 中田 原子力計装用電流パルス増幅器と波高選別器 JAERI-memo 2697 (公開) (1967)
- (12) 若山, 角田, 荒, 河上 高速炉用核計装, 特に高速パルス系について 電気学会原子力計測専門委員会資料- JAERI-memo 3103 (公開) (1968)
- (13) 若山 高ガンマ線下における中性子測定 KURRI-TR-89, pp.32-37 (1971)
- (14) 星合ほか 無線工学ハンドブック 3-89 (1964)
- (15) ALEXANDER, J.M. and GAZDIK, M.F., Phys. Rev., vol.120, p.874 (1960)
- (16) PRICE, W. J., 関口晃訳, (西野治監修) 「放射線計測」コロナ社 (1961)
- (17) WHALING, W., "The Energy Loss of Charged Particles in Matter", Handbuch der Physik XXXIV, pp.193-217 (1958)
- (18) 三浦ほか 放射線計測学 P.14 (裳華房) (1960)

- (19) CULBRIGHT, H.W., "Ionization Chambers in Nuclear Physics", HANDBUCK DER PHYSIK XLV (Instrumentelle Hilfsmittel der Kernphysik II), Nuclear Instrumentation II, Springer-Verlag (1958)
- (20) ABSON, W., SALMON, D.G. and PYRAH, S., "The Design, Performance and Use of Fission Counters", J. Brit. Nucl. Energy Conf., pp.201-209 (1958)
- (21) VON ENGEL, A., Ionized Gases, Oxford University Press, p.182 (1965)
- (22) VON ENGEL, A., "Ionization in Gases by Electrons in Electric Fields", Handbuch der Physik XXI, p.530 (1956)
- (23) BROWN, S.C., "Basic Data of Plasma Physics", The Technology Press of the MIT and John Wiley & Sons, Inc., p.125 (1959)
- (24) 浅田, 「鉄鋼便覧」 16.2.3 : 窒化鋼 P.1350 .丸善 (1971)
- (25) MORRAN, J.J., MIHALISIN, J.R. and KHINNER, E.N., "Behavior of Stainless Steels and Other Engineering Alloys in Flat Ammonia Atmospheres", CORROSION, vol.17, No.4, pp.191-195 (1961)
- (26) Metals Handbook, p.635 (1954)
- (27) 素木「セラミック外論(4)」-特殊セラミックス・酸化物セラミックス総論- (1969)
MAPMEP, ㊦. H. et al., 「高温材料」 日ソ通信社訳
- (28) 今井ほか「耐熱材料ハンドブック」朝倉書店 (1965)
- (29) CHARKE, F.J.P., "The Effects of Reactor Irradiation on Ceramic Materials", AERE-M659 (1960)
- (30) THORNE, R.P. and HOWARD, V.C. "Fast-Neutron Radiation Induced Changes in Polycrystalline Alumina", TRG-Report 1137(c) (1966)
- (31) WULLAERT, R.A., et al., "Effects of Radiation on Ceramic Materials" Chapter 6
- (32) 山岸秀志, 共同研究資料: (Private information) (1984)
- (33) 前田力, 同軸線路の遮蔽効果に関する諸問題 (その1) 大日本電線時報, 第27号, PP.1-6 (1964)
- (34) McMINN, K.W. and GOODINGS, A., "The Development of Mineral Insulated Cables for Incore Neutron Detectors", J. Brit. Nucl. Energy Soc., vol.10, p.33 (1971)
- (35) COVILLE, P. and TIXIER, M., Les Detecteurs a Cables Integres Pour Utilisation Sous Flux et/ou a Temperature Level. Nuclear Power Plant Control and Instrumentation 1978, vol.II, Proceedings of IAEA Symposium on NPPCI, Cannes. SM-226/43, pp.275-289 (1978)
- (36) 電気製鋼研究会「特殊鋼便覧」 16.3 封着合金 P.16-11 (1969)
- (37) 住友特殊金属(株) Glass Sealing Alloys (技術資料) 住特金Cat. No.E07-1971 (1971)

- (38) 若山直昭, 川島克彦 金属セラミック封着構造物 特許第 1092865 号, 特公昭 56-32270 (1981)
- (39) 田中広二, 中性子検出器(電極保持構造) 実新 1222956 号
- (40) 若山ほか, 核分裂計数管の α 線計数率と電荷 昭和 53 年原子力学会年会 E-24 (1970)
- (41) 納入濃縮ウランに添付された分析表及び原研分析センターの分析による。
- (42) ROSSI, B.B. and STAUB, H.H., "Ionization Chambers and Counters", McGRAW-HILL (1949)
- (43) FULBRIGHT, H.W., "Ionization Chambers in Nuclear Physics", Handbuch der Physik XLV, pp.18-24 (1958)
- (44) McDANIEL, E.W., "Collision Phenomena in Ionized Gas", JOHN WILEY & SONS INC. (1964)
- (45) BROWN, S.C., "Basic Data of Plasma Physics", The Technology Press of the MIT. & John Wiley & Sons Inc. (1959), Rev. (1967)
- (46) Westinghouse Neutron Detectors 86-011, WL-23071 (Catalogue)
- (47) OAKES, L.C. and YINGLING, G.E., "Current Status of LMFBR Nuclear Instrumentation System Research and Development in the U.S., Presentation at DOE/PNC Specialists' Meeting on LMFBR Instrumentation and Control, Tokyo (1980)
- (48) SNELL, H., et al., "Nuclear Instrument and Their Uses", John Wiley & Sons Inc.
- (49) Inconel Alloy 600 データ集 International Nickel Company Inc.
- (50) 日本工業標準調査会 JIS B 8243 (1981)
- (51) 若山, 「放射線計数管」 特許 特公昭 58-56957 (1983)
- (52) WAKAYAMA, N., "Compteur de radiations", Brevet d'Invention (France) N°79 10048 (1979)
- (53) WAKAYAMA, N., "Radiation Counter", U.S. Patent 4,527,084 (1985)
- (54) 若山, 山岸, 友田, 田中, 「放射線電離箱」特許第 1193005 号 特公昭 58-26142 (1983)
- (55) WAKAYAMA, N., et al., "Chamber d'Ionisation", Brevet d'Invention (France) N°79 10877 (France Patent)
- (56) WAKAYAMA, N., et al., "Ionization Chamber", U.S. Patent 4,379,248 (1983)
- (57) 若山, 友田, 「放射線検出器」特許第 1194209 号 特公昭 58-63141 (1983)
- (58) 若山, 荒, 高速実験炉核計装の設計上の問題点とその検討 未公開資料 (1967)
- (59) 若山, 荒, 高速実験炉核計装に対するキャンベル系の適用の検討 未公開資料 (1967)
- (60) 荒, 河上, 角田, 若山, キャンベル法による中性子計測系の開発 未公開資料 (1968)
- (61) 川口, 若山, 荒, 河上, 角田, 高速炉計測法の研究(I) 報告書-2 高速実験炉用核計装の部分試作 未公開資料 (1970)
- (62) WAKAYAMA, N., et al., "Development of Fission Chambers for High-

- Temperature Reactors", IAEA SM-226/32, Nuclear Power Plant Control and Instrumentation 1978, Proceedings of IAEA Symposium, vol.II, pp.243-255, Cannes (1978)
- (63) WAKAYAMA, N., et al., "Developments on Experimental VHTR Instrumentation", IAEA Specialists' Meeting on GCR Core and High-Temperature Instrumentation, PN-13, Windmere, England (1982)
- (64) WAKAYAMA, N., GOTOH, H., TOMODA, T., "High-Temperature Neutron Detector Development, JAERI-M 5955, pp.131-134 (1975)
- (65) 若山ほか, 高温用核分裂計数管の開発(Ⅲ) 昭和 50 年炉物理・炉工学分科会 C7 (1975)
- (66) WAKAYAMA, N., et al., "High-Temperature Neutron Detector Development", JAERI-M 6320, pp.125-127 (1975)
- (67) WAKAYAMA, N., "High-Temperature Neutron Detector Development", JAERI-M 6710, pp.119-120 (1976)
- (68) WAKAYAMA, N., YAMAGISHI, H. and TOMODA, T., "Development of High-Temperature Neutron Detectors", JAERI-M 7291, pp.132-134 (1977)
- (69) 若山ほか, 高温用核分裂計数管の開発(Ⅳ) 昭和 53 年炉物理・炉工学分科会 B68 (1978)
- (70) 若山ほか, 高温用核分裂計数管の開発(Ⅴ) 昭和 53 年炉物理・炉工学分科会 B69 (1978)
- (71) 若山ほか, 高速炉用核分裂計数管(Ⅰ) - 試作, 特性試験及び照射寿命試験 - 昭和 53 年炉物理・炉工学分科会 B66 (1978)
- (72) 山岸, 伊藤, 若山ほか, - 高 r 線下における中性子計測特性と出力直線性 - 昭和 53 年炉物理・炉工学分科会 B67 (1978)
- (73) WAKAYAMA, N., et al., "Development of High-Temperature Detectors", JAERI-M 7844, pp.133-136 (1978)
- (74) WAKAYAMA, N., et al., "Development of High-Temperature Detectors", JAERI-M 8393, pp.77-79 (1979)
- (75) WAKAYAMA, N., et al., "Development of High-Temperature Neutron Detectors", JAERI-M 9032, pp.98-99 (1980)
- (76) WAKAYAMA, N., et al., "Development of High-Temperature Neutron Detectors", JAERI-M 9672, pp.90-94 (1981)
- (77) 角田ほか, 高速炉用炉外中性子検出系の特性試験(Ⅱ) 未公開資料 (1975)
- (78) General Electric Company, "Neutron Detectors Application Data Book", (1959)

付 録

Appendix 1.1 核分裂計数管型電離箱の出力電流パルス波高と、許容 γ 線バックグラウンド

Appendix 5.1 中性子感度較正場の中性子束分布の測定方法及び測定結果

Appendix 図集 (図A 2.1～図A 6.6)

Appendix 1.1 核分裂計数管型電離箱の出力電流パルス波高と、許容 γ 線バックグラウンド

出力パルス電流波高が $1/n$ となると、許容できる γ 線バックグラウンド $1/n^2$ になる理由は以下の通りである。即ち、出力パルス電流の振幅が $1/n$ となると当初と同じ信号対雑音比を維持するためには増幅系の雑音振幅を $1/n$ にする必要があるが、もともと線源領域モニタの増幅系雑音は既に技術的、現実的に達成できる最小値迄低減されていることが多いので、雑音を更に減らす道としては増幅帯域を減らすより他に道がないことが多い。雑音のスペクトル密度が周波数に関して一定 (White noise) の場合、増幅器の帯域を $1/k$ とすると雑音電圧又は雑音電流の振幅は $\sqrt{1/k}$ になる。従って雑音振幅を出力パルス電流の減少と同じく $1/n$ だけ小さくするには信号の増幅帯域を $1/n^2$ にする必要がある。これはパルス整形時定数を n^2 倍にしなければならないことを意味し、 γ 線パルスのパイルアップ確率は n^2 倍となるので許容できる γ 線バックグラウンドも $1/n^2$ に減少する。

Appendix 5.1 中性子感度較正場の中性子束分布の測定方法及び測定結果

中性子束分布の測定には、局所的な中性子束が測定できること、周囲の中性子束分布を乱さないことなどの理由で、センサーは小さい素子程よく、原子炉内などでは金箔を用いることが多いが、計数管の感度較正に適当な低い中性子束密度の場の較正には、金箔は放射化量が小さ過ぎて測定には適当でない。このため小型でかつ比較的中性子感度の高い ${}^6\text{LiF}$ のTLD素子を用いて中性子束分布の測定を行った。

${}^6\text{Li}$ の中性子反応(n, α)の断面積は、300 keV附近に若干のピークがある他は熱中性子領域に至るまで、断面積は $1/v$ 法則に従うので、 ${}^6\text{LiF}$ TLD素子を使用する場合、熱中性子および準熱中性子エネルギー領域の中性子に対しては、エネルギー分布を考えなくても同一中性子場ならば ${}^{10}\text{B}$ を用いた BF_3 計数管と直接感度比較ができるという利点がある。

しかし天然のLiで作られたLiF-TLD素子は、中性子のみでなく、 γ 線に対しても受感性が有るので、これを補正するため中性子感度の高い濃縮 ${}^6\text{Li}$ によって作られた ${}^6\text{LiF}$ 素子と、 γ 線に対して同様の受感性を有するが中性子に対して感度がほとんど零の ${}^7\text{LiF}$ 素子を組合せて測定を行い、 ${}^6\text{LiF}$ による測定値 $Q(n+\gamma)$ から ${}^7\text{LiF}$ による測定値 $Q(\gamma)$ を差引く方法による中性子の測定を行った。

測定に使用した ${}^6\text{LiF}$ TLD素子および ${}^7\text{LiF}$ 素子は夫々Harshaw chemical社TLD-600およびTLD-700である。

中性子束分布を測定した軸方向の長さは660 mmで、検出器中心位置に対して ± 330 mmの範囲に、夫々20 mmの間隔をおいて合計35組のTLD Pairsを2 mm(厚) \times 18 mm(幅) \times 1100 mm(長さ)の亚克力板に取付けて配置した。

TLD素子は、取付前に400 $^\circ\text{C}$ 一定で1時間、その後約50 $^\circ\text{C}$ まで約5時間の徐冷によってアニールした。

夫々のTLD素子はアニール前に全数重量を計り記録した。

中性子場における照射時間は合計35時間26分15秒(127215秒)である。

TLDによる中性子場の測定結果をTableに示す。

TLDの照射量の読出しにはHarshaw chemical社2000型を用いた。

表中 Q_6 , Q_7 は各々 ${}^6\text{LiF}$ 素子および ${}^7\text{LiF}$ 素子による測定値(nano culomb), m_6 , m_7 は夫々 N_i の ${}^6\text{LiF}$ 素子および ${}^7\text{LiF}$ 素子の重量(mg)であり、 Q_{n_i} は、 ${}^6\text{LiF}$ 素子の平均重量 $m_6 = 22.88$ mg, ${}^7\text{LiF}$ 素子の重量 $m_7 = 23.80$ mgで正規化の後、 γ 線による補正を行った中性子による照射量である。

$$Q_{n_i} = Q_6 \times \frac{22.88 \text{ mg}}{m_6} - Q_7 \times \frac{23.80 \text{ mg}}{m_7} \quad (1)$$

この測定値はTLD素子の感度の差異および測定上の誤差などにより若干のバラツキがあるので、もともと中性子束分布はなだらかなはずであることを利用して、4次多項式の形に最小二乗法によるフィッティングを行った。その結果、得られた中性子照射量分布は同表右端に Q_{n_i} として示されており、中心位置を0とし位置 x における中性子照射量 $Q_{n_i} = f(x)$ は、

$$\overline{Qn}_i = f(x) = 1.781 \times 10^{-5} x^4 + 7.469 \times 10^{-6} x^3 - 4.453 \times 10^{-2} x^2 - 3.780 \times 10^{-2} x + 4.513 \dots\dots\dots(2)$$

となった。

Table Results of axial direction neutron flux distribution measurements and 4th degree polynomial approximation fitting

TLD. No.	Position	Q6i (⁶ LiF)	Q7i (⁷ LiF)	m6i (⁶ LiF)	m7i (⁷ LiF)	Qni	\overline{Qn}_i
1	-33	23.7	4.09	23.6	23.7	18.87	18.75
2	-31	23.9	4.65	22.7	23.6	19.41	19.74
3	-29	25.3	4.92	22.5	24.0	20.86	21.20
4	-27	29.9	5.12	22.4	23.4	25.27	23.01
5	-25	29.5	5.57	22.2	23.5	24.76	25.09
6	-23	34.1	6.93	23.1	25.0	27.18	27.34
7	-21	36.8	6.97	23.0	23.6	29.59	29.69
8	-19	35.0	7.75	23.0	23.5	26.98	32.05
9	-17	42.8	8.48	22.8	23.9	34.51	34.36
10	-15	48.0	9.30	22.8	23.5	38.75	36.56
11	-13	49.3	9.82	23.0	24.0	39.31	38.59
12	-11	51.9	10.0	22.8	23.7	42.04	40.41
13	-9	55.1	11.4	23.2	23.7	42.90	41.98
14	-7	53.9	11.5	22.9	23.9	42.41	43.26
15	-5	57.9	11.9	22.2	23.8	47.78	44.22
16	-3	53.9	12.2	22.8	23.6	41.80	44.85
17	-1	54.6	11.9	23.0	23.7	42.37	45.13
18	0	53.3	12.6	23.3	25.9	39.80	45.13
19	+1	55.9	12.5	23.2	24.1	42.79	45.05
20	+3	60.2	11.9	22.6	23.5	48.90	44.62
21	+5	58.1	13.3	23.2	26.0	45.13	43.84
22	+7	55.3	11.9	23.0	24.3	43.36	42.73
23	+9	52.1	10.9	23.0	24.0	41.02	41.31
24	+11	47.0	10.2	23.2	24.0	36.24	39.60
25	+13	46.8	9.66	23.3	24.1	36.42	37.64
26	+15	45.9	9.40	22.9	24.2	36.62	35.48
27	+17	44.6	8.32	23.2	23.8	35.67	33.15
28	+19	36.9	7.53	23.0	23.9	29.21	30.72
29	+21	34.8	7.14	22.7	24.1	28.02	28.24
30	+23	30.8	6.28	22.4	23.8	25.19	25.79
31	+25	28.5	5.88	22.8	24.1	22.80	23.43
32	+27	28.8	5.23	23.3	23.8	23.05	21.27
33	+29	25.7	4.79	23.2	24.2	20.64	19.37
34	+31	21.7	4.32	22.9	24.4	17.67	17.84
35	+33	19.2	7.76	22.5	24.2	15.83	16.73
36	Back Ground	0.215	0.197	22.0	24.1	0.029	-

Q6i : read-out charge of ith ⁶LiF-TLD in nano-culombs
 Q7i : read-out charge of ith ⁷LiF-TLD in nano-culombs
 m6i : weight of ith ⁶LiF-TLD in milligrams
 m7i : weight of ith ⁷LiF-TLD in milligrams
 Qni : gamma-compensated read-out charge of ith TLD
 \overline{Qn}_i : reasonable value obtained by the 4th digree polynomial approximation fitting

Appendix 図集

本 Appendix の図は本研究における検討あるいは設計に必要な諸データの基礎資料をデータ集として取りまとめたものである。

先駆者の研究成果を引用したものも少なくないが、これらについては引用文献番号を付しその起源を明示した。

- 図 A 2.1 E/p に対する電子電離係数 α/p (引用文献(2))
- 図 A 3.1 金属部をステンレス (SUS 304) で作り窒素混合ヘリウムガスを用いた核分裂型インコアチェンバのプラトー特性の照射による変化
- 図 A 3.2 各種ステンレス鋼及び耐熱鋼のアンモニア窒化による窒化層の深さと硬さ (引用文献(24))
- 図 A 3.3 アンモニアコンバータにおけるニッケル合金の腐食 (引用文献(25))
- 図 A 3.4 プラントアンモニアラインにおける表面研磨及び表面酸化のニッケル合金の腐食挙動 (引用文献(25))
- 図 A 3.5 各種アンモニア含有雰囲気さらされた市販ニッケル合金の腐食挙動 (引用文献(25))
- 図 A 3.6 コイルバネのリラクセーション (引用文献(26))
- 図 A 3.7 封着金属合金の熱膨張 (引用文献(27))
- 図 A 3.8 電極表面への塗布厚が厚い場合のパルス波高分布の例 (引用文献(78))
- 図 A 3.9 アルゴン-窒素混合ガス中の電子ドリフト速度(a) (引用文献(19))
- 図 A 3.10 アルゴン-窒素混合ガス中の電子ドリフト速度(b) (引用文献(19))
- 図 A 3.11 アルゴン-窒素混合ガス中の電子ドリフト速度(c) (引用文献(19))
- 図 A 3.12 アルゴン-窒素混合ガス中の電子ドリフト速度(d) (引用文献(44))
- 図 A 3.13 アルゴン-窒素混合ガス中の電子ドリフト速度(e) (引用文献(48))
- 図 A 6.1 炉内試験用キャプセル詳細断面図
- 図 A 6.2(a) 炉内試験用キャプセル組み立て寸法概要
- 図 A 6.2(b) 炉内試験用キャプセル核分裂計数管型電離箱挿入部概要
- 図 A 6.3 炉内試験用キャプセル内蔵加熱ヒーター
- 図 A 6.4 キャンベル系用前置増幅器回路
- 図 A 6.5 キャンベル系用帯域増幅器及び線型出力回路
- 図 A 6.6 キャンベル系用対数増幅器 (Log N) 及びペリオド増幅器回路

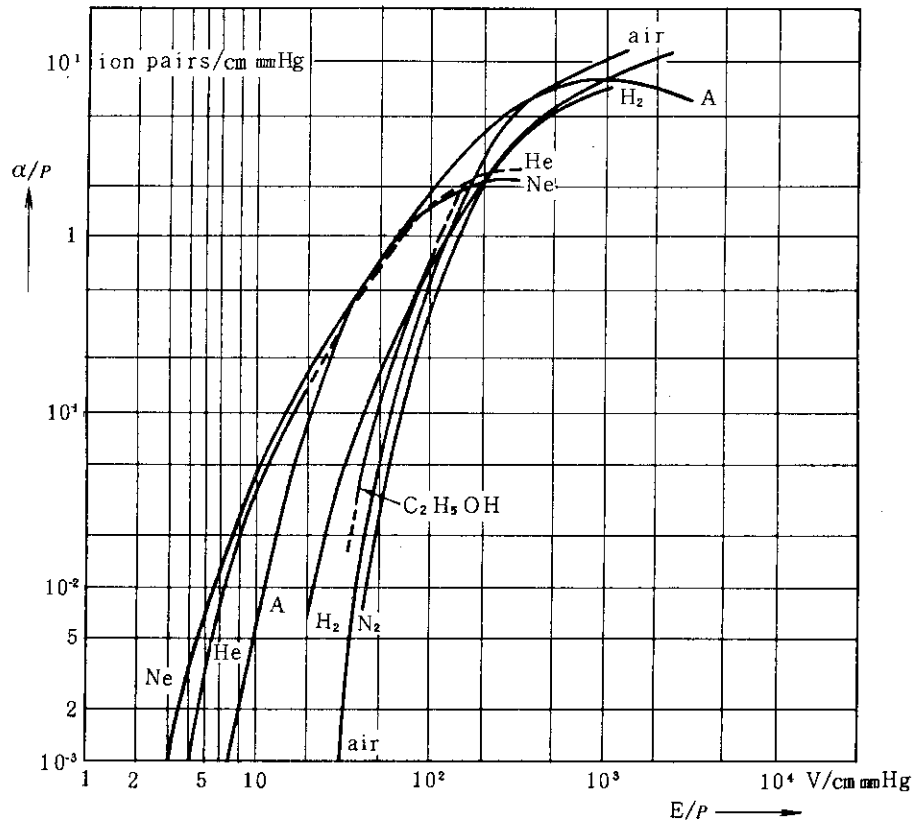


図 A 2.1 E/p に対する電子電離係数 α/p (引用文献 21)

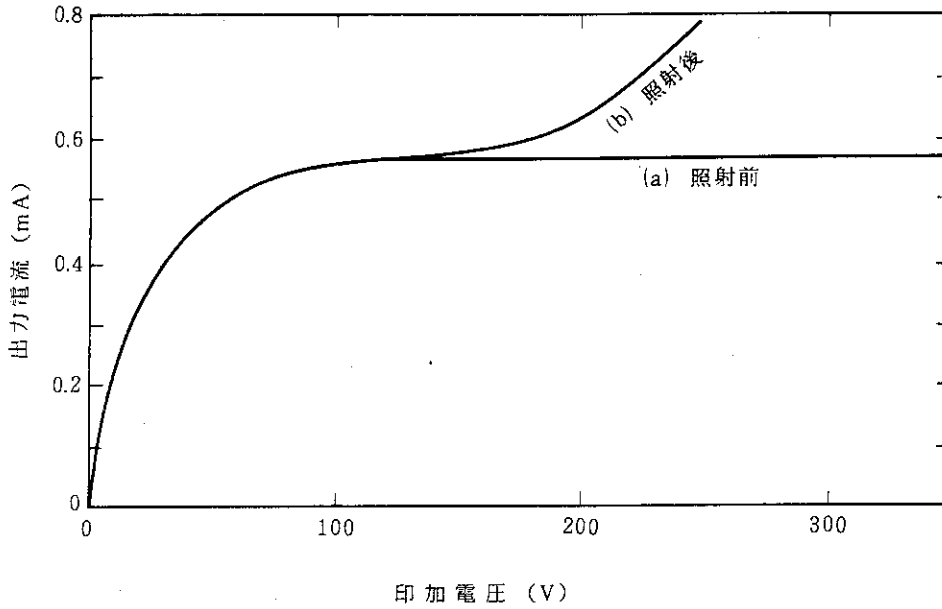
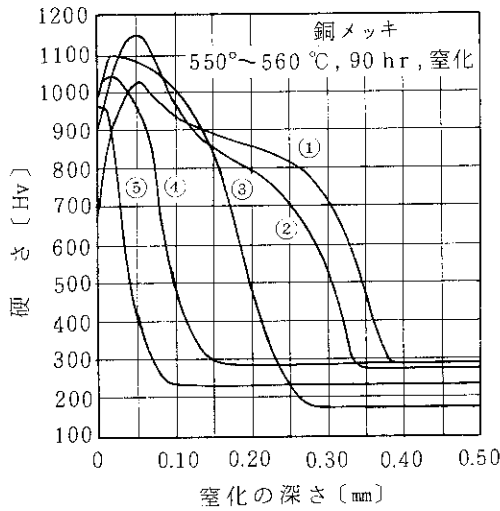


図 A 3.1 金属部をステンレス (SUS 304) で作り窒素混合ヘリウムガスを用いた核分裂型インコアチェンバのプラトー特性の照射による変化



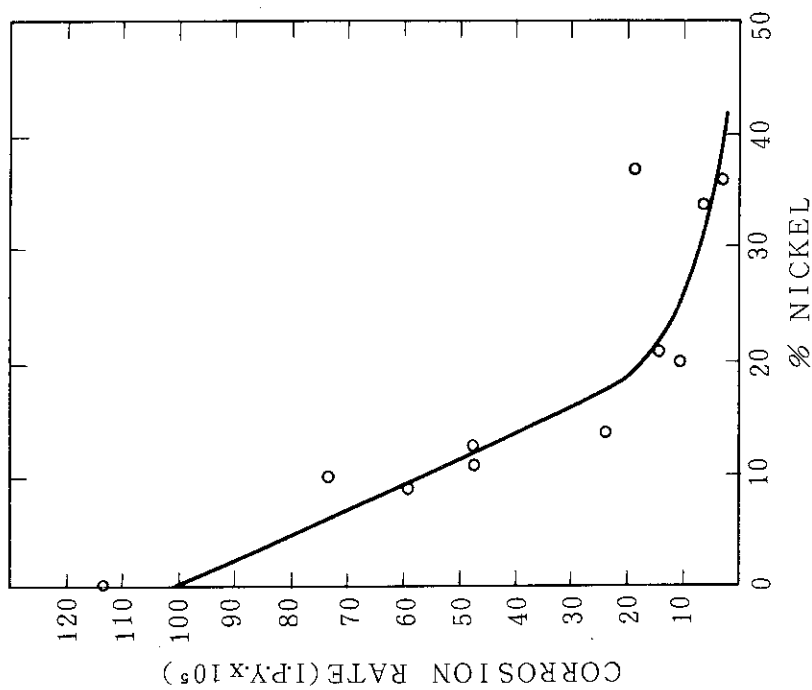
化学成分 [%]							
No.	鋼種	C	Si	Mn	Cr	Ni	W
1	13% Cr ステンレス鋼	0.28	0.18	0.25	13.40	0.35	-
2	18% Cr ステンレス鋼	0.16	0.10	0.54	17.20	1.40	-
3	18-8 ステンレス鋼	0.13	0.32	0.17	18.14	8.75	-
4	パルプ鋼	0.40	0.89	0.65	13.00	12.80	2.20
5	"	0.47	1.38	1.39	13.40	26.50	3.54

図 A 3.2 各種ステンレス鋼及び耐熱鋼のアンモニア窒化による窒化層の深さと硬さ (引用文献 24)

Corrosion Behavior In Ammonia Converter

Alloy	Nominal Nickel Content, Percent	Corrosion Rate (ipy)
446	.....	0.00112
430	.....	0.00090
302B	10	0.00073
304	9	0.00059
316	13	0.00047
321	11	0.00047
309	14	0.00023
310	21	0.00014
37 Ni/20 Cr	37	0.00018
314	20	0.00010
330 (a)	34	0.00006
330 (b)	36	0.00002
80 Ni/20 Cr	80	.....
60 Ni/15 Cr	60	.....
Inconel Alloy	79	.....
70 Ni/20 Cr	70	.....
Monel Alloy	66	.....
Nickel	99.5	.....

* Based on 29,164 hours exposure.



Corrosion behavior of nickel alloys in ammonia converter.

図 A 3.3 アンモニアコンバータにおけるニッケル合金の腐食 (引用文献 2)

Corrosion Behavior in Plant Ammonia Line*

Alloy	Nominal Nickel Content, Percent	CORROSION RATE, (Ipy)	
		Surface Polished	Surface Oxidized
Nickel	100	0.0790	0.098
80 Ni/20 Cr	80	0.0074	0.004
Inconel Alloy	78	0.0063	0.010
60Ni/15 Cr	60	0.0074	0.006
38Ni/18 Cr	38	0.0171	0.010
Type 310	21	0.0535	0.007
Type 309	13	0.0950	0.049
Type 316	12	> 0.52	> 0.5
Type 304	9	0.0995	0.102
Type 446 .....	..	0.1645	0.173

* Based on 1540 Hrs' Exposure at 500 °C

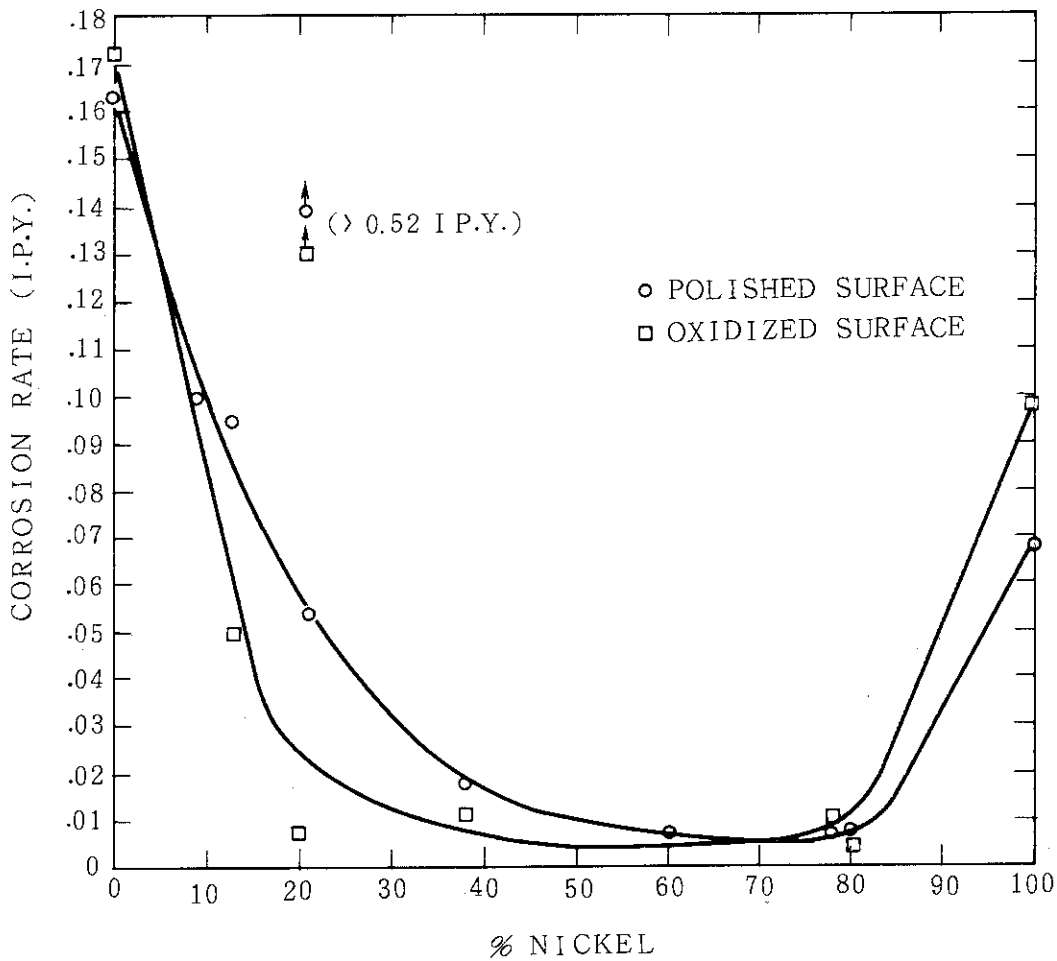
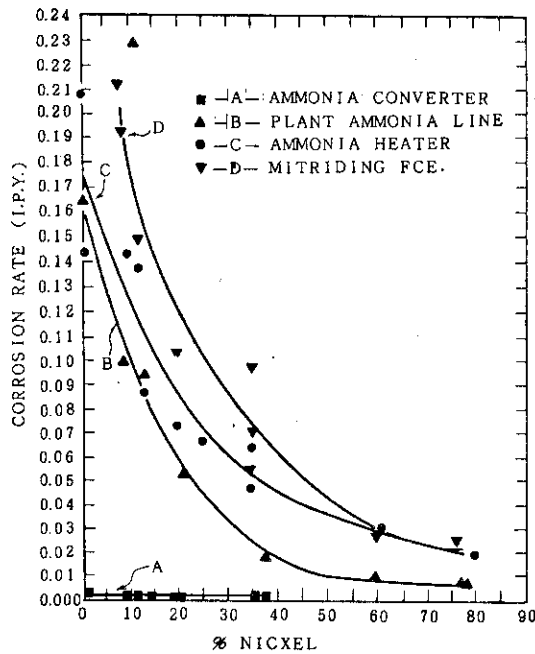


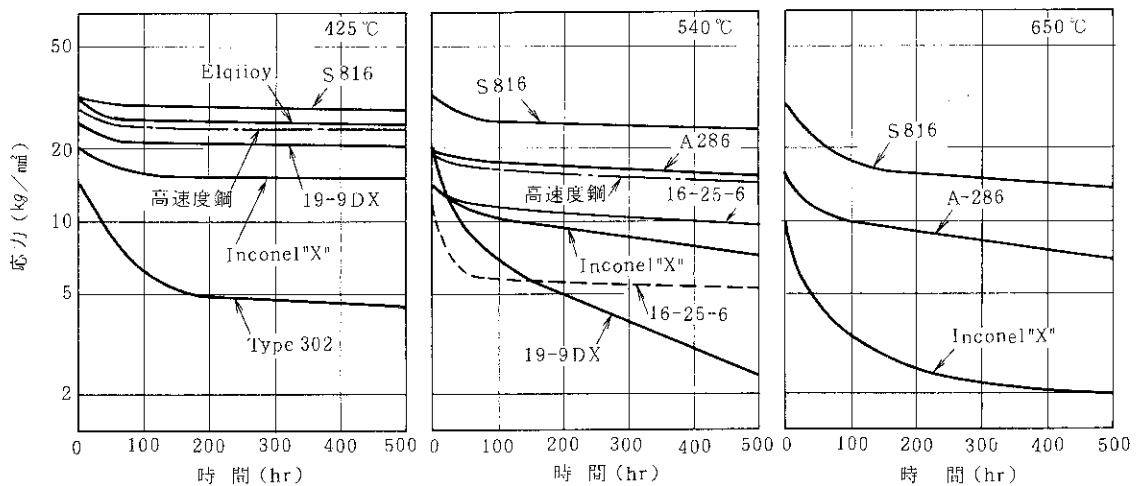
図 A 3.4 プラントアンモニアラインにおける表面研磨及び表面酸化のニッケル合金の腐食挙動 (引用文献(4))



Corrosion behavior of commercial alloys exposed to dissimilar ammonia-containing atmospheres.

図 A 3.5 各種アンモニア含有雰囲気さらされた市販ニッケル合金の腐食挙動 (引用文献 23)

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Co	Mo	W	Fe	V	Nb	Ti	Al
A 286	0.05	0.50	1.35	15.0	26.0		1.25	-	Bal.	0.30	-	2.0	0.2
S 816	0.38	0.40	1.2	20.0	20.0	Bal.	4.0	4.0	4.0	-	4.0	-	-
Inconel X	0.04	0.30	0.70	15.0	73.0		-		6.75	-	0.85	25	0.80



実線…時効処理, 破線…伸線加工, 一点鎖線…焼入れ焼もどし

図 A 3.6 コイルバネのリラクゼーション (引用文献 26)

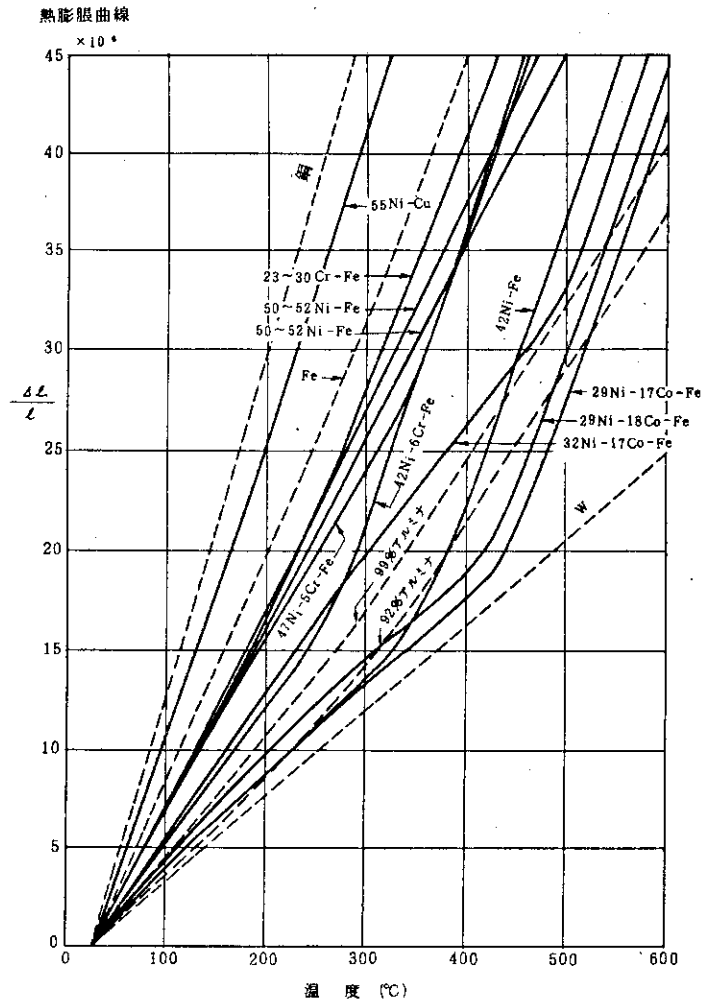


図 A 3.7 封着金属合金の熱膨張 (引用文献 37)

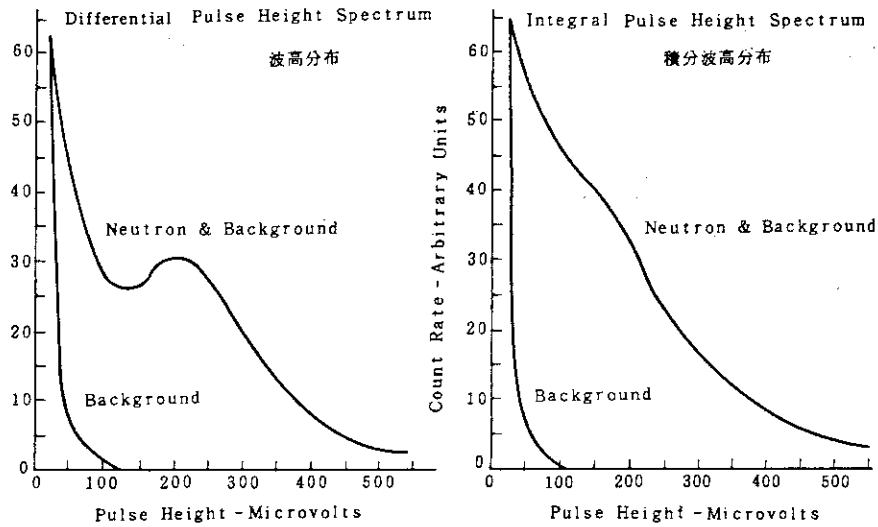


図 A 3.8 電極表面への塗布厚が厚い場合の脉冲波高分布の例 (引用文献 78)

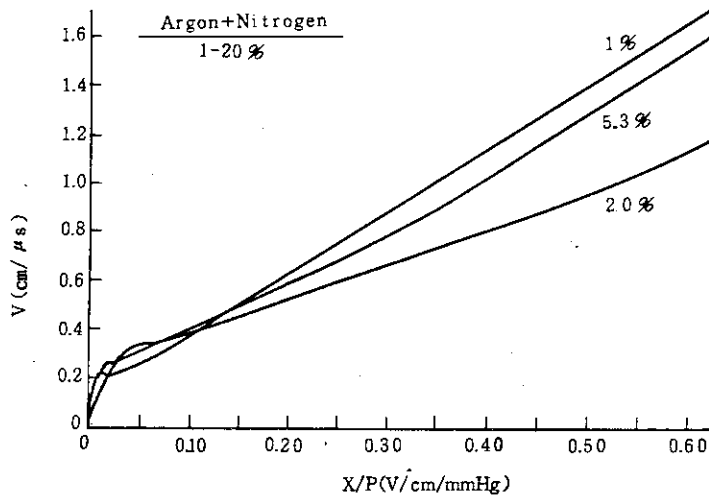


図 A 3.9 アルゴン-窒素混合ガス中の電子ドリフト速度(a) (引用文献(19))

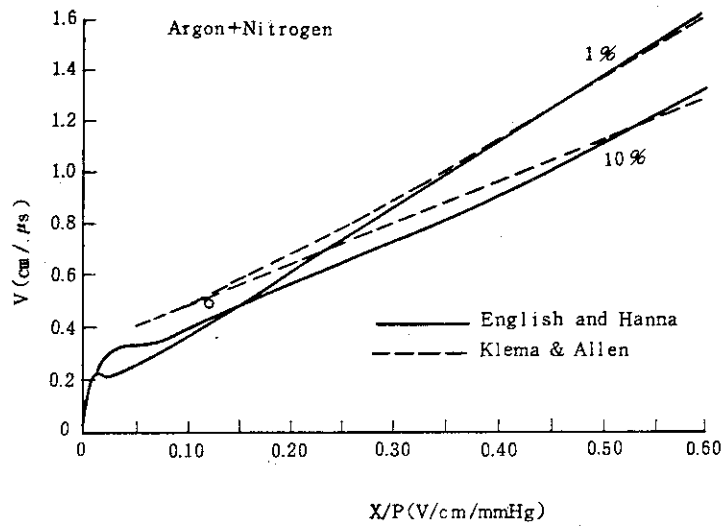


図 A 3.10 アルゴン-窒素混合ガス中の電子ドリフト速度(b) (引用文献(19))

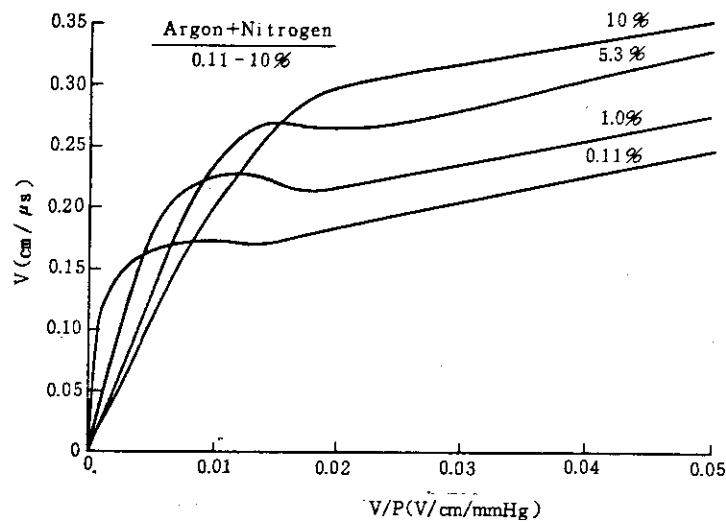
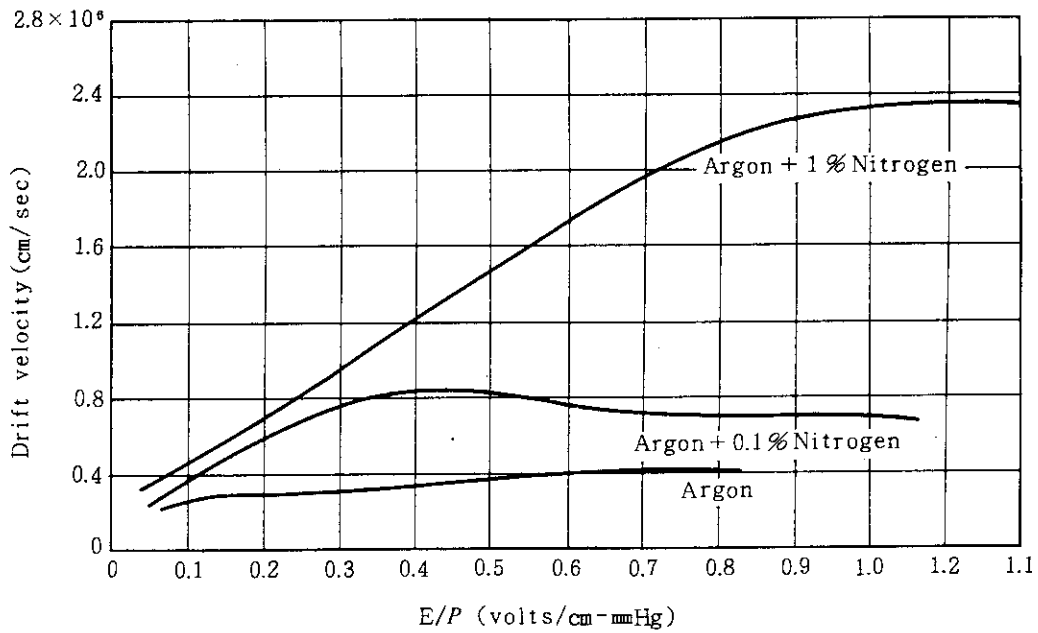
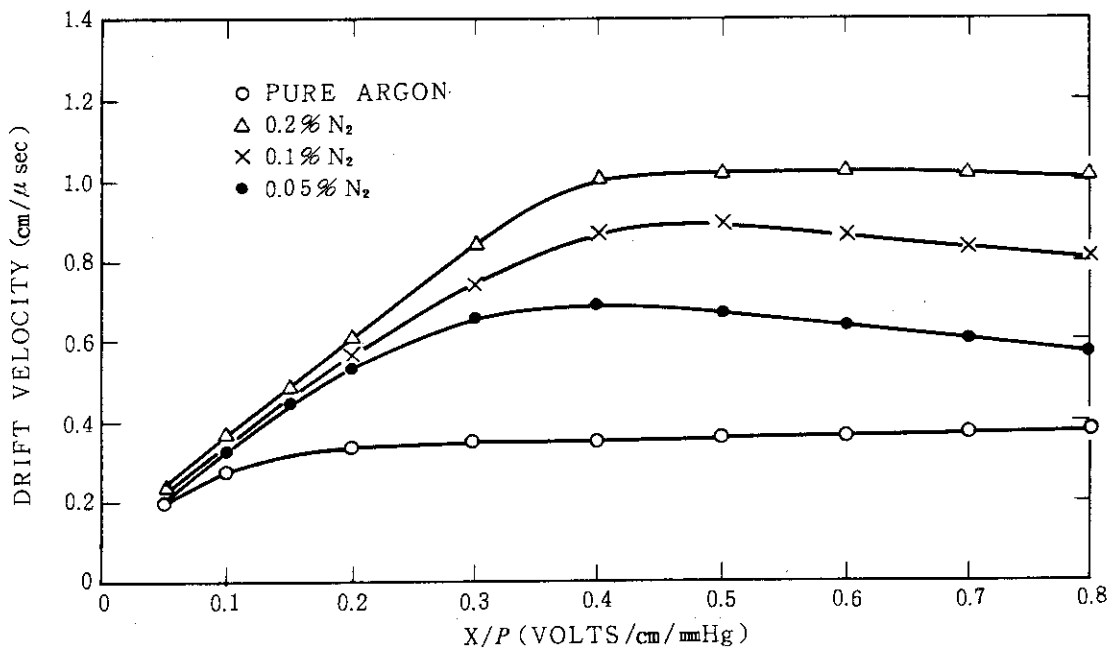


図 A 3.11 アルゴン-窒素混合ガス中の電子ドリフト速度(c) (引用文献(19))



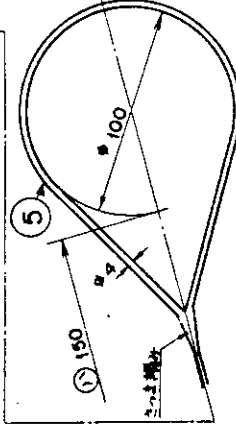
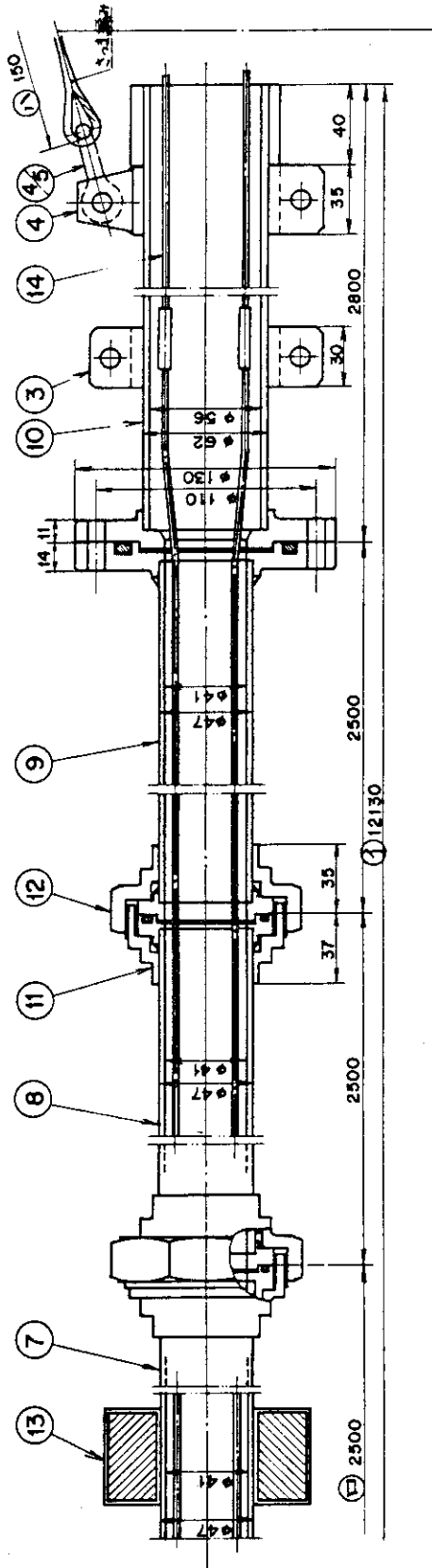
The drift velocity of electrons in pure argon and in argon contaminated by nitrogen. These results were obtained by the ionization chamber method. L. Colli and U. Facchini, *Rev. Sci. Instr.* 23, 39 (1952).

図 A 3.12 アルゴン-窒素混合ガス中の電子ドリフト速度(d) (引用文献(44))



Electron drift velocity in argon-nitrogen mixtures. From Bortner, Hurst, and Stone.

図 A 3.13 アルゴン-窒素混合ガス中の電子ドリフト速度(e) (引用文献(48))



16	MFD-3804	絶縁体	12	SS41	物品
17	MFE-8004	スパー	2	SUS304	支給品
18	ヒータ	1式			支給品
19	中間引出器	1式 (FX-2B)			
20	M17-7	1式			
21	MFD-3805	ネジ	1	SUS304	
22	ナット	2		SUS304	
23	ワッシャー	2		SUS304	
24	ナット	2		A1050	
25	ナット	1		A1050	
26	ナット	1		A1050	
27	ナット	1		A1050	
28	MFD-3804	ヒータ	1	A1050	
29	MFE-8004	ワッシャー	1	SUS304	
30	ナット	1		SUS304	
31	ナット	1		SUS304	
32	ナット	1		SUS304	
33	ナット	1		SUS304	
34	ナット	1		SUS304	
35	ナット	1		SUS304	
36	ナット	1		SUS304	
37	ナット	1		SUS304	
38	ナット	1		SUS304	
39	ナット	1		SUS304	
40	ナット	1		SUS304	
41	ナット	1		SUS304	
42	ナット	1		SUS304	
43	ナット	1		SUS304	
44	ナット	1		SUS304	
45	ナット	1		SUS304	
46	ナット	1		SUS304	
47	ナット	1		SUS304	
48	ナット	1		SUS304	
49	ナット	1		SUS304	
50	ナット	1		SUS304	
51	ナット	1		SUS304	
52	ナット	1		SUS304	
53	ナット	1		SUS304	
54	ナット	1		SUS304	
55	ナット	1		SUS304	
56	ナット	1		SUS304	
57	ナット	1		SUS304	
58	ナット	1		SUS304	
59	ナット	1		SUS304	
60	ナット	1		SUS304	
61	ナット	1		SUS304	
62	ナット	1		SUS304	
63	ナット	1		SUS304	
64	ナット	1		SUS304	
65	ナット	1		SUS304	
66	ナット	1		SUS304	
67	ナット	1		SUS304	
68	ナット	1		SUS304	
69	ナット	1		SUS304	
70	ナット	1		SUS304	
71	ナット	1		SUS304	
72	ナット	1		SUS304	
73	ナット	1		SUS304	
74	ナット	1		SUS304	
75	ナット	1		SUS304	
76	ナット	1		SUS304	
77	ナット	1		SUS304	
78	ナット	1		SUS304	
79	ナット	1		SUS304	
80	ナット	1		SUS304	
81	ナット	1		SUS304	
82	ナット	1		SUS304	
83	ナット	1		SUS304	
84	ナット	1		SUS304	
85	ナット	1		SUS304	
86	ナット	1		SUS304	
87	ナット	1		SUS304	
88	ナット	1		SUS304	
89	ナット	1		SUS304	
90	ナット	1		SUS304	
91	ナット	1		SUS304	
92	ナット	1		SUS304	
93	ナット	1		SUS304	
94	ナット	1		SUS304	
95	ナット	1		SUS304	
96	ナット	1		SUS304	
97	ナット	1		SUS304	
98	ナット	1		SUS304	
99	ナット	1		SUS304	
100	ナット	1		SUS304	

注 1) 溶接継手...組立時の状態を参照せよ。
 内部に圧力がかかると加工不良を起こす。
 2) 品②は表面塗装/コート
 3) 洗浄

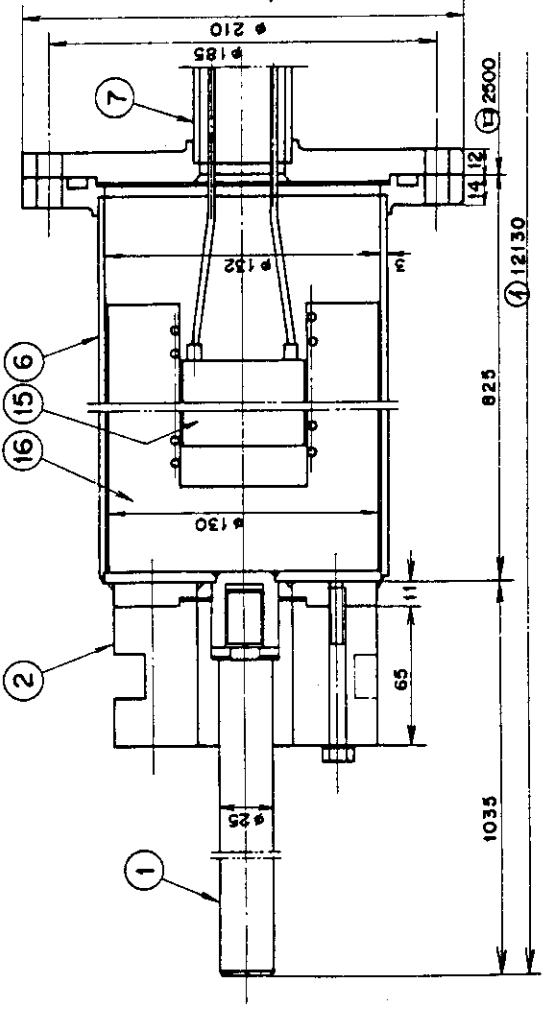
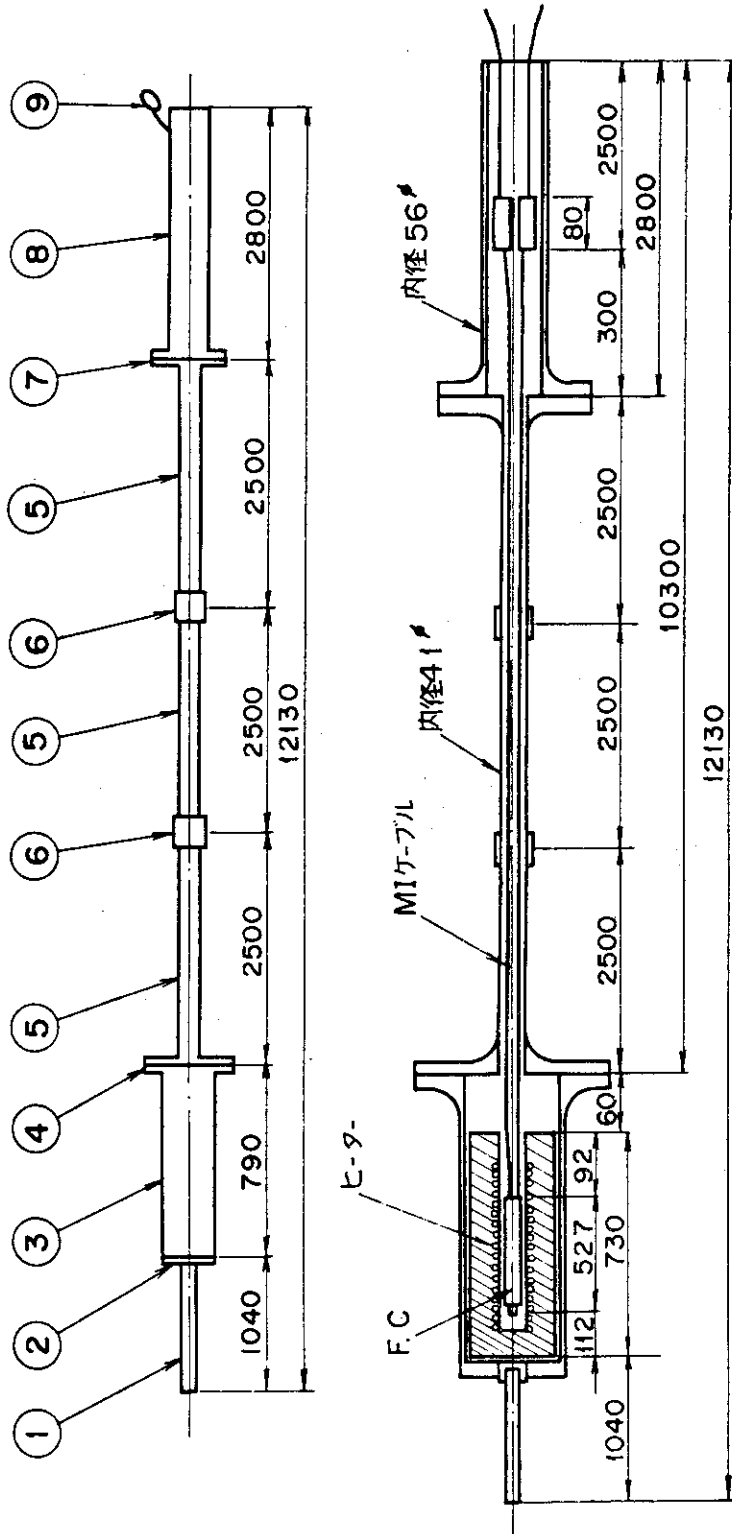
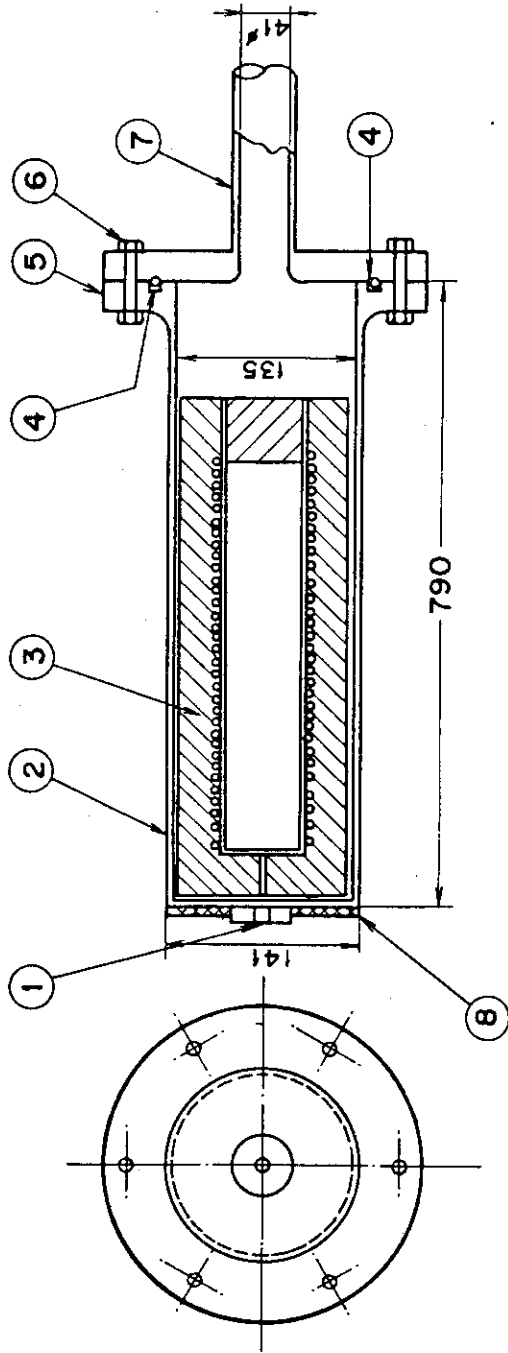


図 A 6.1 炉内試験用キャプセル詳細断面図



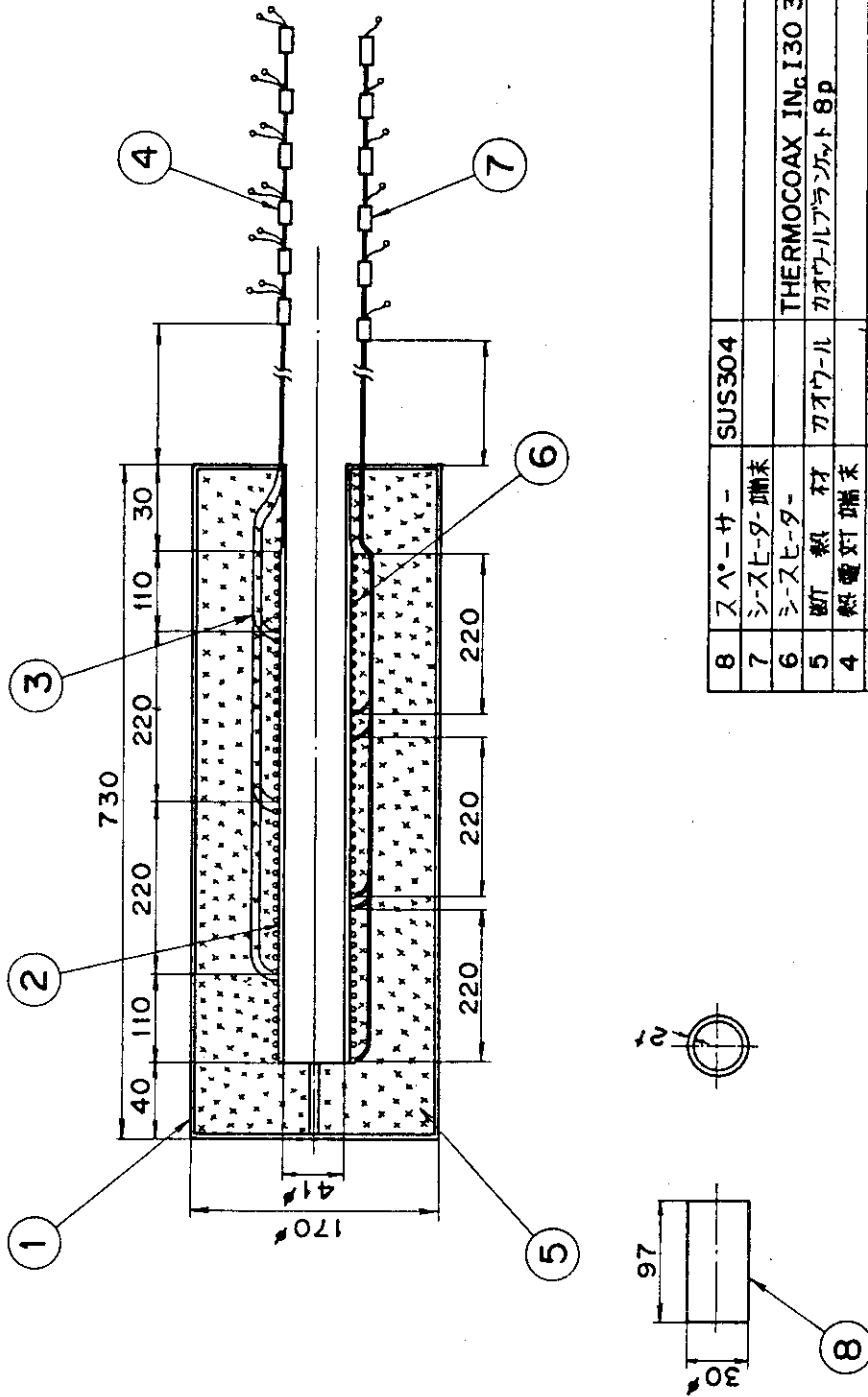
9	クレン用フック	AL	内径 56φ	
8	ケ-ブル接続管	AL		
7	フランジ	SUS		
6	ジョイント	AL	内径 41φ	
5	ケ-ブル案内管	AL		
4	フランジ	AL	内径 135φ	
3	ヒ-タ-キャプセル	Pb		
2	おもり			
1	キャプセル支持棒	AL		
品番	品名	材質	備考	
図番	FX-3 照射キャプセル			

図 A 6.2(a) 炉内試験用キャプセル組み立て寸法概要



8	おもり	Pb	浮力防止、取外し可能な構造とする。
7	MIケアル案内管		水圧 2Kg/cm ² に耐える板厚
6	フランジ取付ボルト		
5	キャプセルフランジ		
4	水シール用Oリング		Oリング構造とする。水圧 2Kg/cm ² をシール可能
3	ヒータ		別添 詳細図面参照
2	キャプセル耐圧管	AL	水圧 2Kg/cm ² に耐える板厚を用いる
1	支柱取付穴	AL	
品番	品名	材質	備考
	FX-3 照射キャプセル		
図番			ヒータ-キャプセル接続管)

図 A 6.2(b) 炉内試験用キャプセル核分裂管型電離箱挿入部概要



8	スパーサー	SUS304	
7	シースヒータ-端末		
6	シースヒータ-	カオウル	THERMOCOAX INc 130 3mm ^φ 12珠ヒータ
5	断熱材	カオウル	カオウルプラグト 8P
4	熱電対端末		
3	熱電対(6本)	CA	非接地シース型 1.6mm ^φ 耐熱800°C以上
2	ヒータ-内管	SUS304	外径46mm ^φ 肉厚2.5mm
1	ヒータ-外管	AL	肉厚3.0mm
品番	品名	材質	備考
			ヒータ-I型

図 A 6.3 炉内試験用キャプセル内蔵加熱ヒータ-

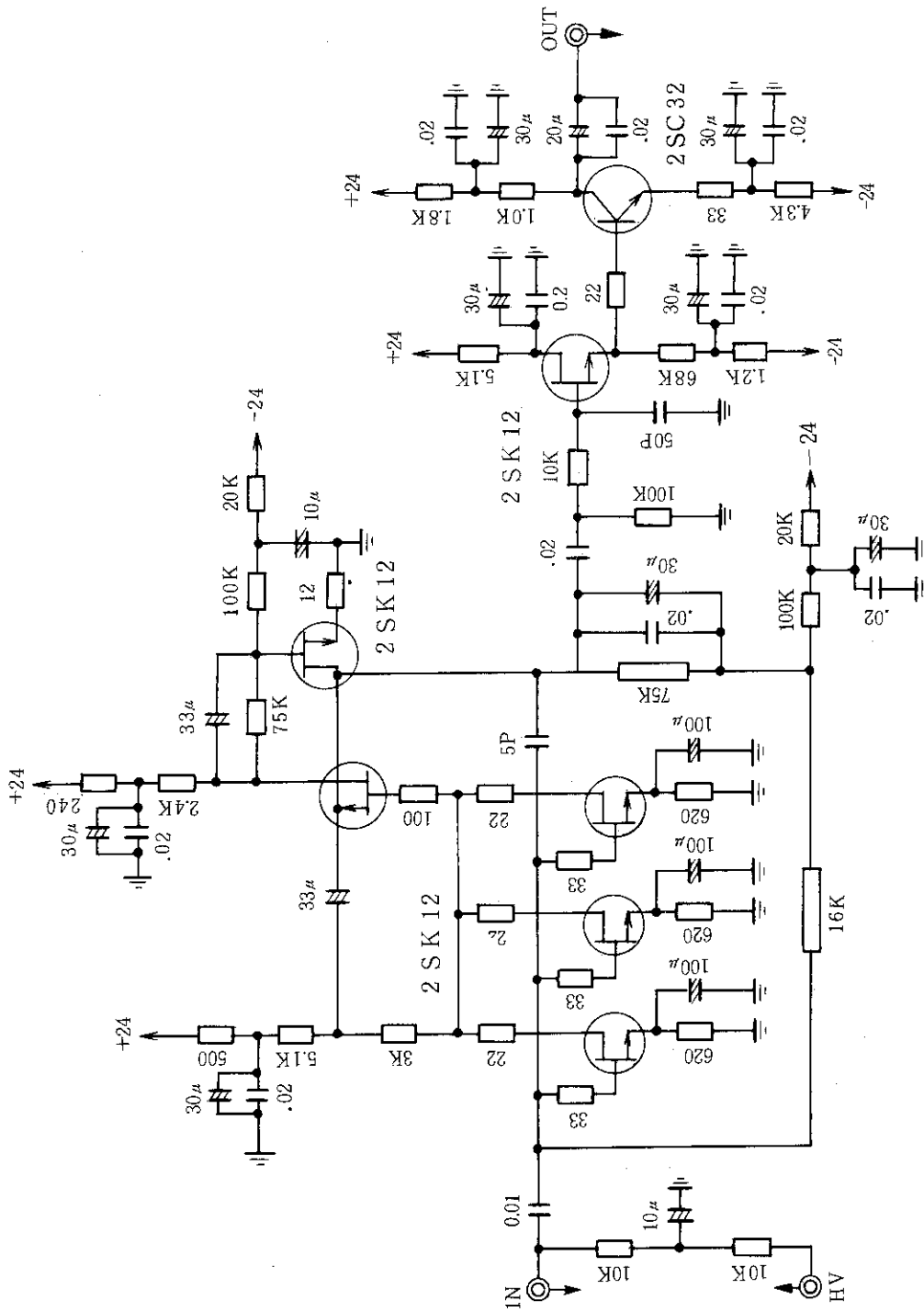
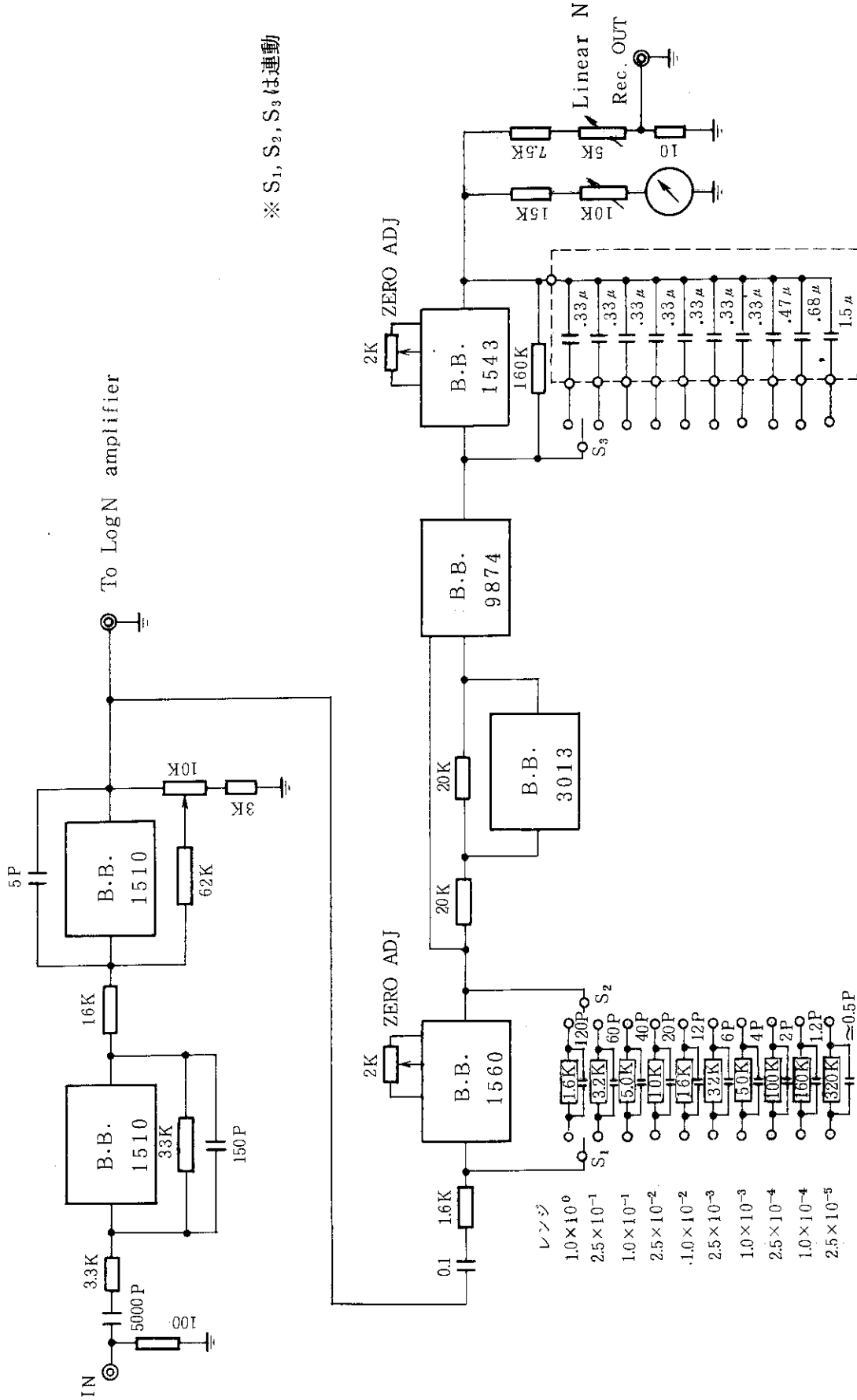


図 A 6.4 キャンベル系用前置増幅器回路



※ S₁, S₂, S₃は連動

図 A 6.5 キャンベル系用帯域増幅器及びひ線型出力回路

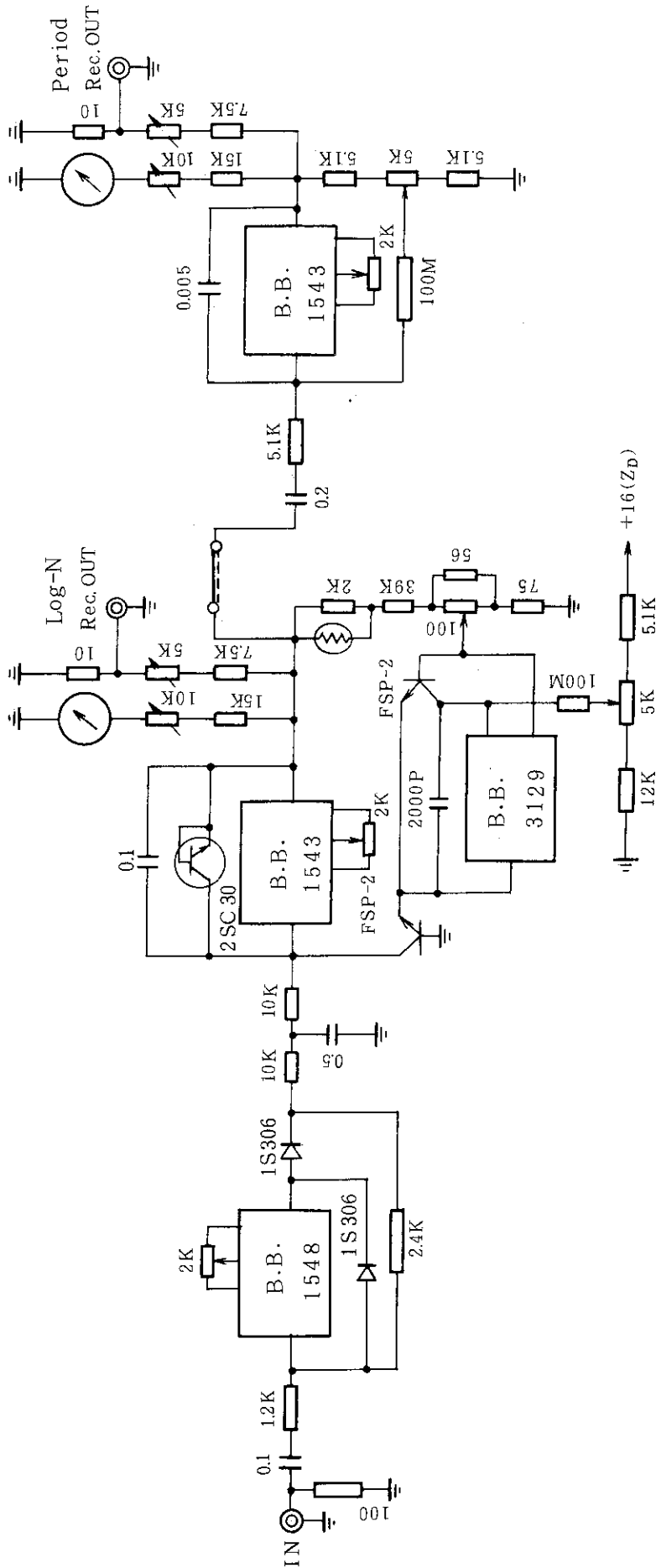


図 A 6.6 キャンベル系用対数増幅器 (Log N) 及びペリオド増幅器回路