

JAERI-Research

99-002



JP9950012



位置検出型核分裂計数管のソレノイド 電極のパルス伝播特性

1999年1月

山岸秀志・鈴木勝男・角田恒巳
伊藤 浩・深草伸二*・田村政和*

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

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

This report is issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1999

編集兼発行 日本原子力研究所

位置検出型核分裂計数管のソレノイド電極のパルス伝播特性

日本原子力研究所東海研究所エネルギー・システム研究部

山岸 秀志・鈴木 勝男・角田 恒巳

伊藤 浩・深草 伸二*・田村 政和*

(1999年1月5日受理)

遅延線電極構造を採用した位置検出型核分裂計数管(PSFC)の開発を進めている。PSFCは、ソレノイド構造の陽極、円筒形状陰極及び2個の出力コネクタで構成される。PSFCで検出された中性子の位置情報は、両出力コネクタから出力されるパルスの時間間隔から得られる。PSFCの性能を検証するため、それに用いるソレノイド電極構造体(SEST)を試作した。SESTを用いて、そのパルス伝播特性の測定と評価を行った。測定した特性はパルス遅延特性、パルス立上り時間及び減衰量である。また、パルス立上がり時間及び減衰量の測定結果を一般の核分裂計数管のそれらと比較し、PSFCの実現性の見通しを得た。

**Pulse Propagation Characteristics of the Solenoid Electrode
for a Position-sensitive Fission Counter**

Hideshi YAMAGISHI, Katsuo SUZUKI, Tsunemi KAKUTA,
Hiroshi ITOH, Shinji FUKAKUSA* and Masakazu TAMURA*

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

(Received January 5, 1999)

Development of a position-sensitive fission counter (PSFC) with the electrode structure of signal-transmission delay line has been made progress. The PSFC consists of an anode of solenoid structure, a cylindrical cathode and two output connectors. The time interval of two signal pulses at both connectors of the PSFC provides the information of position where a neutron has been detected. The solenoid electrode structure (SEST) was manufactured on an experimental basis to verify the predicted performances of the PSFC. We carried out measurements and evaluations on the pulse propagation characteristics of the SEST such as pulse delay, pulse rise-time and pulse attenuation. Measured results of the rise-time and the attenuation were compared with those of conventional fission counters and the feasibility of the PSFC was confirmed.

Keywords: Position Sensitive, Fission Counter, Neutron Detector, Nuclear Instrument, Neutron Measurement, Reactor Monitor, Solenoid Electrode, Pulse Propagation

* Mitsubishi Electric Corporation

目 次

1. 序 論	1
2. ソレノイド電極構造体	2
3. ソレノイド電極構造体のパルス遅延特性	3
3.1 電圧パルスによる遅延時間の測定	3
3.2 電流パルスによる遅延時間直線性の測定評価	4
4. パルスの立上り特性	6
4.1 立上り波形の測定	6
4.2 遅延時間と立上り時間の関係	7
4.3 SEST と一般核分裂計数管の出力パルス立上り時間の比較	7
5. シミュレーション計算による出力パルスの解析	9
5.1 シミュレーション計算による出力パルス波形	9
5.2 一般の核分裂計数管の出力パルス波形	11
5.3 出力パルス波高の評価	13
6. パルスの減衰特性	14
6.1 SEST のパルス減衰量の測定	14
6.2 出力パルス波高分布の測定	14
7. 結 論	16
謝 辞	18
参考文献	18

Contents

1. Introduction	1
2. Solenoid Electrode Structure	2
3. Pulse Delay Characteristics of the Solenoid Electrode Structure	3
3.1 Measurement of the Delay by Voltage Pulses	3
3.2 Measurement and Evaluation of the Linearity for the Delay by Current Pulses	4
4. Characteristics of Pulse Rise Time	6
4.1 Measurement of Pulse Waveforms	6
4.2 Relationship between the Delay and the Rise Time.....	7
4.3 Comparison of the Rise Time provided by the SEST and Conventional Fission Counters	7
5. Calculations and Analysis of Output Pulses by Simulations of the SEST and Conventional Fission Counters	9
5.1 Waveforms of Output Pulses Calculated by Simulations	9
5.2 Waveforms of Output Pulses provided from Conventional Fission Counters.....	11
5.3 Evaluation of Output Pulses	13
6. Characteristics of Pulse Attenuation	14
6.1 Measurement of Pulse Attenuation due to the SEST	14
6.2 Measurement of Pulse Height Distributions for the SEST	14
7. Conclusion	16
Acknowledgment	18
References	18

1. 序 論

原子炉近傍のような高中性子束及び高ガンマ線の下で、中性子密度分布を精度良く計測可能な位置検出型中性子検出器の開発が期待されている。このため、核分裂計数管電極を遅延線構造に設計した位置検出型核分裂計数管(P S F C)の開発を進めている。

Fig. 1.1 に P S F C の作動原理図を示す。P S F C 内で中性子を検出すると電極に電流パルスが発生し、それが電極両端方向に伝播して出力される。夫々のパルスが出力端に到達するためには必要な時間は、パルスの検出位置から出力端までの距離に比例する。この原理を用いて P S F C では、両端出力コネクタからの高速電流パルスの時間差を計測することにより、中性子の位置検出を行う。P S F C を用いた中性子分布計測システムの特徴は、電極を完全な分布定数回路として作動するソレノイド構造に設計していること、及び、高速の電流パルスを

直接計測する方式を採用していることである。この特徴により、高い位置検出分解能の達成と検出器の長尺化が期待でき、且つ高ガンマ線下においても低中性子束から高中性子束の計測が可能になる。さらに、高速の電流パルス計測を採用するため、数十メートルの長い信号ケーブルを使用しても高い信号／雑音比を確保できる優位性がある。P S F C を開発することにより、原子炉出力分布計測の他、臨界実験装置や強力中性子場の熱中性子あるいは高速中性子分布等もリアルタイムで測定可能になる。

しかしながら、P S F C を実現するには、優れたパルス伝播特性（充分且つ均一な遅延特性、パルスの速い立ち上り及び低い減衰等）を有したソレノイド電極構造の開発が必要不可欠である。これまで、位置検出型中性子検出器の研究分野では、パルス波高減衰方式の位置検出型比例計数管⁽⁷⁾ 及び核分裂計数管^(8~10)、パルス時間差方式の位置検出型核分裂計数管^(11~13)の開発研究が行われている。しかし、上記の検出器とそれを用いた計測システムは、検出器構造又は計測方式が異なっており、また、検出器電極上のパルス伝播特性については報告されていない。

以上のことから、P S F C のパルス伝播特性を調べるため、P S F C と電気的に同じ設計で、ソレノイド電極構造体 (S E S T) を試作⁽¹⁴⁾した。S E S T を用いて、遅延特性、パルスの立ち上り特性及び減衰特性を測定し、その性能を詳細に解析評価した。本稿では上記実験結果をまとめて報告した。

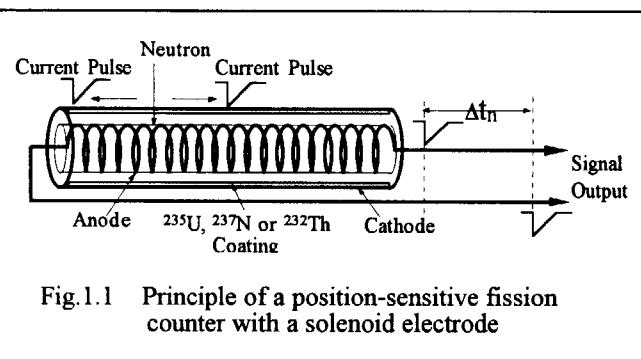


Fig. 1.1 Principle of a position-sensitive fission counter with a solenoid electrode

2. ソレノイド電極構造体

ソレノイド電極構造のパルス伝播特性を調べるため、Table 2.1 に示す設計値で、Fig. 2.1 に示すようなソレノイド電極構造体を試作した。寸法は、外筒外径 22mm、ソレノイド電極外径 17mm、電極間ギャップ 1mm、ソレノイド電極長が 800mm である。試作したソレノイド電極構造体について、導通抵抗、インダクタンス、キャパシタンス及び特性インピーダンスの測定を行い、設計値との照合、評価を行った⁽¹⁴⁾。測定結果の主要値を Table 2.1 に示す。

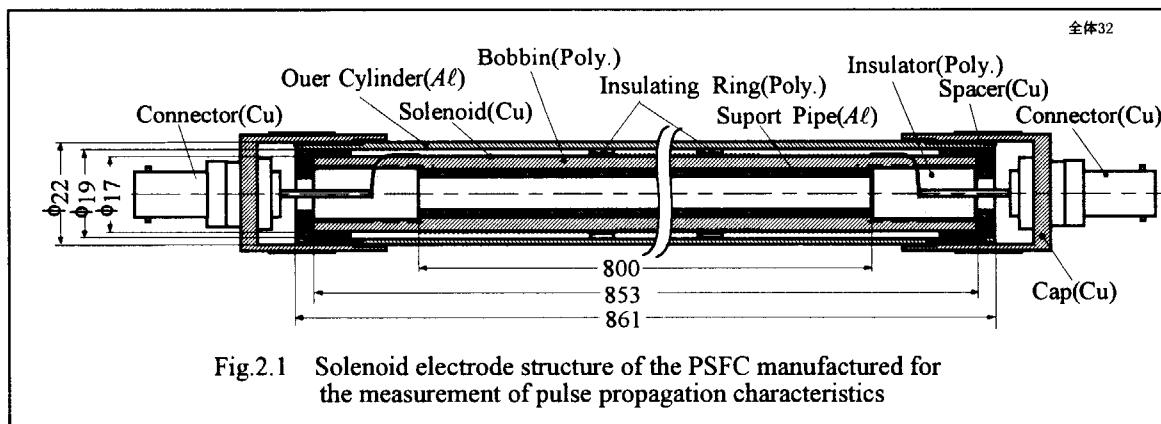


Table 2.1 Specifications of the solenoid electrode structure

Items	Designed Values	Measured Results
Resistance	1.4Ω at DC	1.51Ω at 100Hz 4.71Ω at 100kHz
Inductance	49.1 μH	48.9 μH at 100kHz
Capacitance	667pF	744pF at 100kHz
Characteristic Impedance	271Ω	256Ω at 100kHz 251Ω (TDR)
Delay Time	181ns/800mm	167ns/800mm(TDR)

3. ソレノイド電極構造体のパルス遅延特性

3.1 電圧パルスによる遅延時間の測定

P S F C は、ソレノイド電極によるパルス遅延時間差によって中性子の検出位置を計測する原理に基づく検出器である。したがって、パルス遅延特性は、P S F C の位置検出分解能を決定する重要な特性の 1 つである。試作した S E S T を用いて、Fig. 3.1 に示す回路構成で、パルス遅延時間を測定した。測定では、パルス発生器の電圧パルスを、直接 S E S T の一端に入力し、入力端と出力端のパルスをオシロスコープで観測する方法で実施した。入力端に接続した長さ 1m の同軸ケーブルは、オシロスコープに接続した同軸ケーブルによる遅延を補正するための遅延線である。測定は矩形波パルス及び三角波パルスで行った。三角波の波形は、実際の P S F C で発生される電流パルス波形を模擬し、テール幅を 100ns とした。

オシロスコープでの測定結果を Fig. 3.2 と 3.3 に示す。図では、入力パルスの波高値を 1.0 にノーマライズしている。また、オシロスコープの時間軸は、入力パルスの立上り点をゼロとして、パルス伝播時間で表している。矩形波及び三角波による測定結果の両方とも、パルス間隔は 169ns であった。本測定から、S E S T 電極の全長 800mm をパルスが伝播するに必要な時間は 169ns であることが分かった。

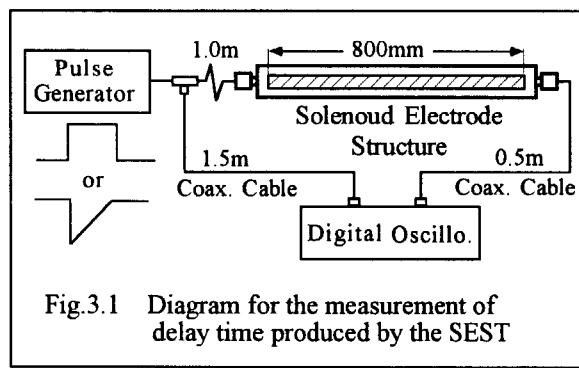


Fig.3.1 Diagram for the measurement of delay time produced by the SEST

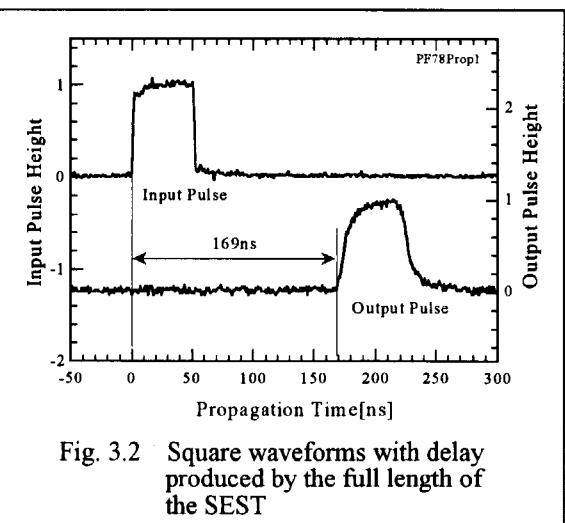


Fig. 3.2 Square waveforms with delay produced by the full length of the SEST

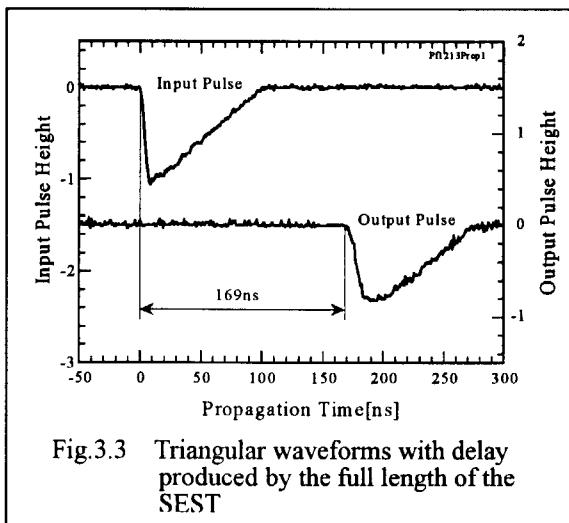


Fig. 3.3 Triangular waveforms with delay produced by the full length of the SEST

S E S T の設計値は既に報告しているが、それらの主要値を Table 2.1 に示している。設計計算におけるパルス遅延時間は 181ns であった。上記測定結果のパルス遅延時間は設計計算値に対して約-6.6%の値であり、このことから設計計算が充分な精度を持っていたことが分かった。

3.2 電流パルスによる遅延時間直線性の測定評価

実際の P S F C では、中性子を検出すると、ソレノイド電極に微小の電流パルスを発生する。その微小電流パルスが発生位置から電極両端方向に伝播し、両端コネクタから出力される。出力された両パルスの伝播時間差が中性子の検出位置を決定する。したがって、パルスの発生位置と両出力パルスの時間差が正しく比例することが重要である。このため、試作した S E S T を用いてパルス発生位置に対する両出力パルスの時間差の直線性を測定した。回路構成を Fig. 3.4 に示す。

測定では、S E S T に設けた 5 個のテスト入力孔からソレノイド電極に電流パルスを入力し、両端からの出力パルスを夫々高速電流パルス増幅器 (C P A) によって電流電圧変換及び増幅して測定する方法を用いた。2 系統の計測回路の一方を Ch#1、もう一方を Ch#2 と名づけた。電流パルスには実際の P S F C を模擬して、パルス波高 $2.3\mu\text{A}$ でテール幅 100ns の三角波を用いた。パルスの時間差の直線性を測定するため、上記電流パルスを 5 個のテスト入力孔に順次入力し、夫々のパルス時間差を測定した。

Fig. 3.5 に C P A 出力パルスの観測結果を示す。図では、ノイズを除去するため夫々のデジタル波形データをフィッティングした波形にした。そして、5 個のテスト入力孔における観測結果を重ねて示した。図中上段の波形が Ch#1 の C P A 出力で、下段が Ch#2 の出力波形である。時間軸は Ch#2 のパルス立上がりを基準にし、基準パルスと Ch#1 の出力パルスとの時間間隔として表した。したがって、ソレノイド電極長中央 400mm のテスト入力孔に電流パルスを入力した時に、Ch#2 と Ch#1 のパルス間隔は理論上ゼロになる。図では Ch#1 の波形が若干マイナス側に観測されている。これは Ch#2 の C P A での時間遅れが Ch#1 に比べて少し大きいことに起因している。

テスト入力孔 100mm にテスト電流パルスを入力した場合、Ch#2 側コネクタに出力されるパルスはソレノイド電極長 100mm に相当する遅延を受けて出力され、一方、Ch#1 側では電極長 700mm に相当する遅延を受けて出力される。この結果、出力された両パルスの時間間隔は電極長 600mm による遅延時間に相当する。同様にテスト入力孔 200mm では電極長 400mm による遅延時間に相当する。テスト入力孔 600mm では、Ch#2 側が電極長 600mm、そして Ch#1 側が電極長 200mm の遅れ

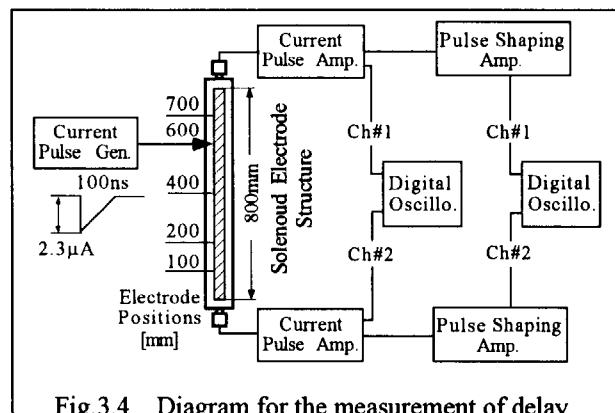


Fig. 3.4 Diagram for the measurement of delay time depended on the distance when triangular current pulses applied to the electrode of the SEST

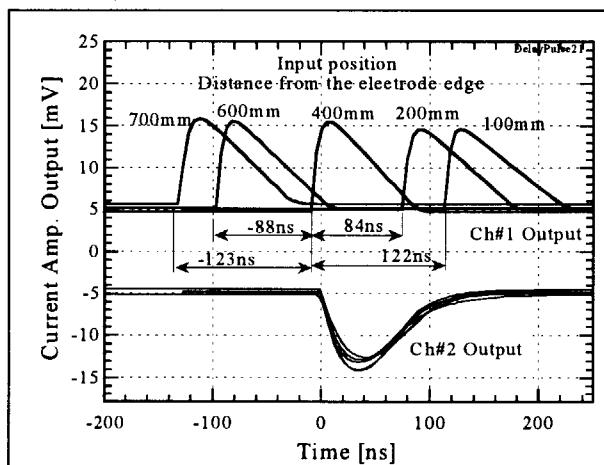


Fig. 3.5 Triangular pulses observed at the outputs of two current pulse amplifiers. The intervals of each pulse depended on the positions on the electrode applied the current pulses

があるため、電極長 400mm に相当するマイナスの遅延時間が観測される。同様にテスト入力孔 700mm では電極長 600mm のマイナスの遅延時間となる。以上のことから、テスト入力孔 400mm の Ch#1 出力パルスを基準にし、その基準パルスと夫々の出力パルスとの時間間隔は、理論上、テスト入力孔 100mm と 700mm の、そして 400mm と 600mm の場合が絶対値で等しくなる。前記 3.1 節で示した S E S T 全長 800mm のパルス遅延時間の測定結果は 169ns であったから、この値を使って比例計算すると、ソレノイド電極長 600mm 及び 400mm による遅延時間は、夫々 126.75ns と 84.5ns である。

Fig. 3.5 の測定結果では、テスト入力孔 100mm と 700mm の測定結果が夫々 122ns と -123ns であり、テスト入力孔 200mm と 600mm が夫々 84ns と -88ns であった。S E S T 全長から求めた遅延時間に対する上記測定結果のずれは最大 4.14% であった。この誤差は、C P A 出力の微小信号の観測結果であること、及び、単発パルスの測定結果であることからノイズの重畠を考慮すると充分小さいと云える。

Fig. 3.6 にソレノイド電極上の位置と C P A 出力で測定したパルス間隔との直線性を示す。●印は、夫々のテスト入力孔に電流パルスを入力した時に得られたパルス間隔を直接プロットしたものである。縦軸は、C P A 出力で測定した Ch#2 と Ch#1 とのパルス間隔を ns で表している。●印の測定結果から、2 個の C P A 間の遅延時間差に起因した電極中央 400mm のゼロ点シフトは、-10ns であることがわかる。このため、-10ns のシフトを補正して□印で示した。ゼロ点補正後のプロットデータに対するフィッティング式を式 3.1 に夫々示す。

$$t_{adj} = 166 - 0.415x \quad \dots \dots \dots (3.1)$$

ここで t_{adj} [ns] はパルス間隔であり、 x [mm] が電極位置である。式 3.1 から、電極位置 0mm と 800mm におけるパルス間隔は、夫々 166ns であった。この結果から S E S T 全長 800mm によって得られるパルス間隔は 332ns となることがわかった。

各測定点の非直線性を求めたところ、S E S T 全長のパルス間隔 332ns に対して、1.21% 以下であった。これを電極長で置換えると 9.7mm 以下であり、充分な直線性を有していることがわかった。この結果から試作した S E S T が、充分なパルス遅延時間とむらのない安定したパルス伝播特性を有しているがわかった。上記のことから、S E S T の両出力コネクタからのパルス間隔を計測することにより、ソレノイド電極上に発生した 2.3μA 程度の微小電流パルスの位置を高精度で測定できることが証明できた。

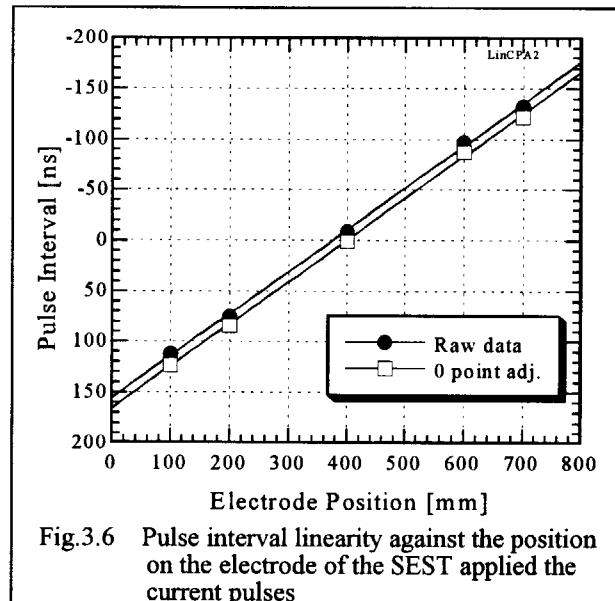


Fig.3.6 Pulse interval linearity against the position on the electrode of the S E S T applied the current pulses

4. パルスの立上り特性

4.1 立上り波形の測定

一般に、高速パルスが遅延線を伝播すると、遅延時間が長くなるにしたがってパルスの立上りは劣化することが知られている。これは遅延線路が長くなるにしたがって高周波成分がより減衰して過渡特性が低下するためである。P S F C も遅延線構造を採用しているため、パルスの立上りの劣化は避けられない。核分裂計数管において、その出力パルスの立上りが極度に劣化すると、出力パルスの低下を生じてS/Nが悪化する。さらに、短いパルス整形時定数を採用することができなくなり、ガンマ線による雑音パルスのパイルアップが増大することから、高ガンマ線下での使用に支障をきたすことになる。上記のことからP S F Cにおいても出力パルスの立上り特性は重要であるため、S E S T を用いて立上り特性を測定評価した。Fig. 4. 1 にS E S T 全長 800mm による立上り特性の測定結果を示す。この特性はFig. 3. 1 に示した回路構成で測定した。入力パルス波形はS E S T に入力する前の、また、出力パルス波形はS E S T を通過した後の矩形電圧パルスを直接オシロスコープで観測したものである。波形の最大値を 1.0 にノーマライズしている。入力パルスの立上り時間は 2.15ns であり、S E S T を通過後のそれは 19.7ns であった。したがって、入力パルスの立上りを補正すると、S E S T 全長 800mm を通過後の立上りは約 19.6ns である。

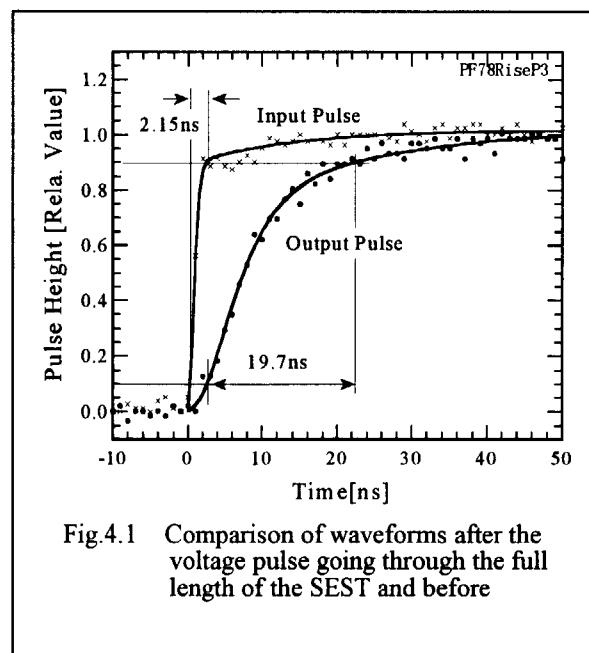


Fig.4.1 Comparison of waveforms after the voltage pulse going through the full length of the SEST and before

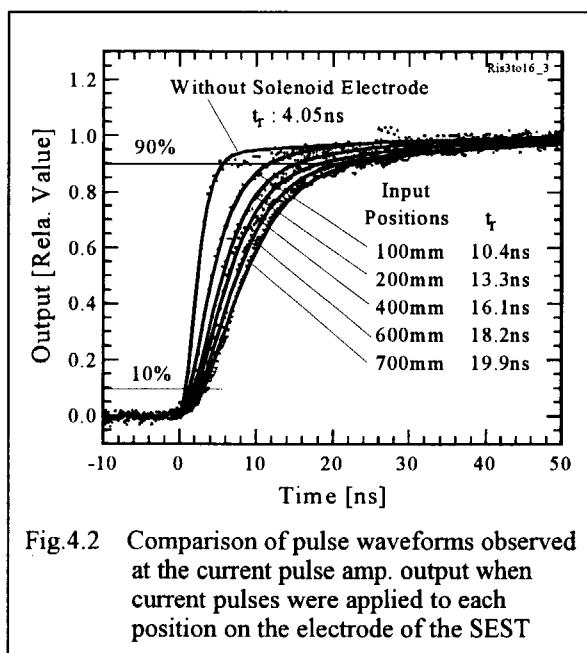


Fig.4.2 Comparison of pulse waveforms observed at the current pulse amp. output when current pulses were applied to each position on the electrode of the SEST

次に、パルスがS E S T 内を伝播した距離によって、その立上りの劣化がどのように変化するかを調べた。測定回路構成は Fig. 3. 4 と同じである。測定では、S E S T に設けたテスト入力孔に矩形電流パルスを順番に入力し、S E S T 出力 Ch#2 に高速C P A を接続して、その出力波形をオシロスコープで観察した。測定した各出力波形の最大値を 1.0 にノーマライズして Fig. 4. 2

に示す。図でS E S Tを除いたと記した波形は、C P Aに直接電流パルスを入力した時の測定結果である。フィッティング曲線から、C P A単独の立上り時間は 4.05ns であった。S E S T内を伝播したパルスの立上りは、伝播距離が長くなるにしたがって劣化することを示している。伝播距離 700mm の時の立上りは 19.9ns であった。この値は、Fig. 4.1 に示した伝播距離 800mm の場合より長くなっている。これはC P Aの立上りの影響を受けていることに起因している。C P Aの立上りを補正した伝播距離 700mm の時の立上りは約 19.5ns である。

4.2 遅延時間と立上り時間の関係

Fig. 4.2 の測定結果から、各遅延時間における立上り時間を求め、Fig. 4.3 に示した。一般的な遅延線では、伝播パルスの遅延時間と立上り時間の関係は式 4.1 になることが知られている。

$$t_r = k \sqrt{t_d} \quad \dots \dots \dots (4.1)$$

ここで、立上り時間 t_r 及び遅延時間 t_d は μs で表され、 k は 0.02~0.08 の範囲の値をとるとされている。両時間を ns 単位で表した場合は、 k は 0.632~2.53 の値となる。

Fig. 4.3 の測定データから求めた立上り時間と遅延時間の関係式を式 4.2 に示す。

$$t_r = 5.13 + 1.2 \sqrt{t_d} [\text{ns}] \quad \dots \dots \dots (4.2)$$

$$\tau = 0.81 + 0.159 \sqrt{t_d} [\text{ns}] \quad \dots \dots \dots (4.3)$$

$$\text{但し}, t_d [\text{ns}] = 169[\text{ns}] \cdot \frac{x[\text{mm}]}{800[\text{mm}]}$$

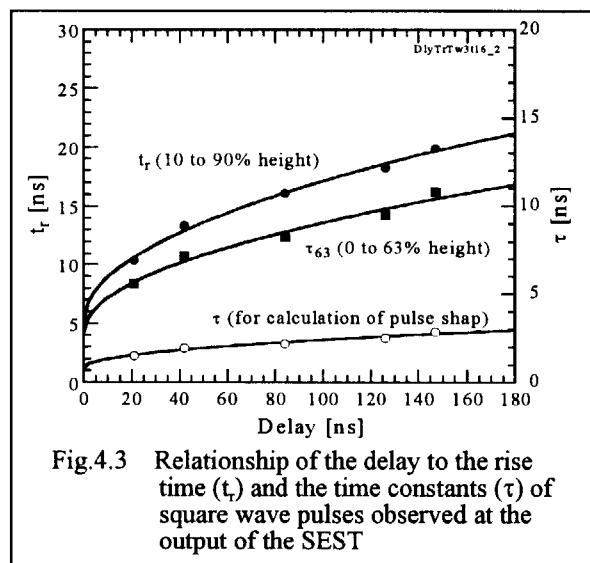


Fig.4.3 Relationship of the delay to the rise time (t_r) and the time constants (τ) of square wave pulses observed at the output of the SEST

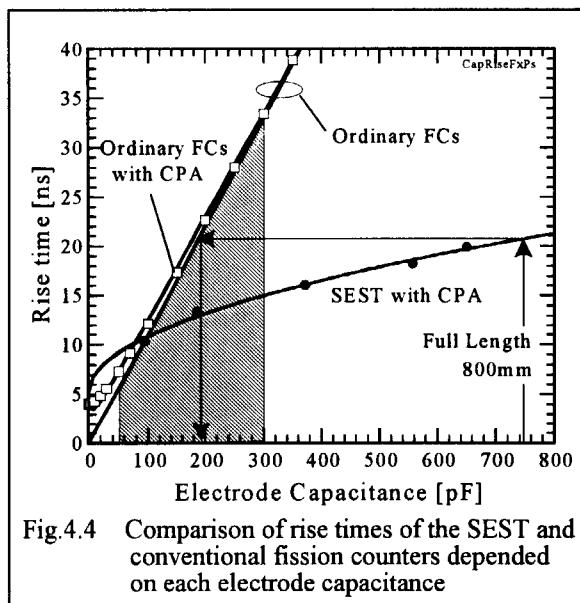
時間の単位は ns である。 k 値は 1.2 となって、一般式 4.1 の k 下限値の約 2 倍であった。Fig. 4.3 には、右縦軸を用いて 63% 波高までの立上がり時間 τ_{63} も合わせて示した。

また、S E S T 出力波形のシミュレーション計算に使用するため、Fig. 4.2 に示したステップ波形のノーマライズする前の波形データを用いて、入出力応答としてのS E S T の伝達関数 $G(s)$ を求めた。但し、 $G(s)$ は時定数 τ [ns] で決まる関数として表され、その式を第 5 章 5.1 節に示した。Fig. 4.3 に時定数 τ と遅延時間 t_d との関係をグラフで示した。グラフから τ は式 4.3 で表されるが、パルスの入力位置で決まる値である。

4.3 S E S T と一般核分裂計数管の出力パルス立上り時間の比較

S E S T では遅延時間の増加と共に出力パルスの立上り時間が増大し、S E S T 全長 800mm における立上り時間はおよそ 19.6ns になることを示した。このようなS E S T 出力の立上り特性は、同軸円筒形状をした一般の核分裂計数管 (F C) 出力の立上りと比較して、どのような相違

があるのか比較評価した。一般のFC出力の立上り波形については第5章5.2節で詳細に述べる。Fig.4.4に一般のFCとSESTの立上り時間を比較して示した。図中の□印は、SESTの測定結果との比較条件と同じにするため、FC波形をCPA出力で観測した場合の立上り時間である。横軸は電極間キャパシタンスで表している。一般のFCで熱中性子感度が0.05~0.5cps/nvの範囲では、電極間キャパシタンスはおよそ50~300pFである。Fig.4.4に示すように、一般のFCでは電極間キャパシタンスの増加と共に、立上がりが急激に劣化し、立上り時間が長くなることがわかる。SESTの総電極間キャパシタンスは744pFであり、一般のFCと比べて2倍以上大きい。しかし、キャパシタンスの増加に対して、立上りの劣化は極めて緩やかである。これは、SESTをパルス伝送線路として設計しており、キャパシタンスが伝送線路上に分布している構造になっているためである。この結果、SEST全長800mmをパルスが伝播した後でも、キャパシタンスが744pFと極めて大きいにも係わらず、19.6nsと比較的速い立上り時間が得られている。この立上り時間は、一般のFCでは電極間キャパシタンス200pF以下のものに相当する。また、一般FCとSESTとの大きな相違は、一般FCでは出力される総てのパルスが総電極間キャパシタンスの影響を受けて立上がりが劣化するのに対して、SESTでは伝播距離に対応した電極間キャパシタンスのみが立上りに影響を与えることである。



5. シミュレーション計算による出力パルスの解析

5.1 シミュレーション計算による出力パルス波形

P S F C 出力電流パルス波形をシミュレーション計算できれば、P S F C の構造設計、出力パルス特性の詳細検討、及び、計測電子回路の設計製作において、時間及び経費の大幅な低減が期待できる。このため、S E S T 出力の立上り特性測定結果から、シミュレーション計算に必要な入出力パルス応答における伝達関数 $G(s)$ を求めた。 $G(s)$ を式 5.1 に示す。

$$G(s) = (0.56 + 0.072\tau) \cdot \left(\frac{1}{1+s \cdot \tau} \right)^3 + (0.46 - 0.088\tau) \cdot \left(\frac{1}{1+3.5 \cdot s \cdot \tau} \right) \quad \dots \dots \dots (5.1)$$

$$\tau = 0.81 + 0.159 \sqrt{\frac{169}{800} x} \quad \dots \dots \dots (5.2)$$

ここで、 s はラプラス変数である。 τ はパルスの遅延時間 t_d [ns] で決まる時定数であり、第 4 章の式 4.3 で与えられる。S E S T の場合、パルスを入力した電極位置と出力されるまでの遅延時間の関係が求められているから、 τ は最終的には式 5.2 で表される。式の x [mm] はパルスを入力した電極位置である。

伝達関数 $G(s)$ を用いた式 5.3 により、S E S T の各テスト入力孔にステップパルスを入力した場合の応答を計算し、Fig.5.1 に示した。これらの波形がC P A 出力で観測されるステップパルス波形である。計算結果から S E S T の出力パルスは、パルスの伝播距離が短い領域では、距離の増加と共に高周波成分が減衰し、それに伴ってパルスの立上りも急激に劣化することがわかる。しかし、伝播距離が長くなるにしたがって、波形が密になっており、パルス立上りの劣化は緩やかになることを示している。この特性は長尺のP S F C を製作する場合に好都合である。

$$P_{stp}(s) = \frac{1}{s} G(s) \quad \dots \dots \dots (5.3)$$

$$P_{trg}(s) = \left(\frac{1}{s} - \frac{1 - e^{-s \cdot T_e}}{s^2 \cdot T_e} \right) G(s) \quad \dots \dots \dots (5.4)$$

$$P_{shp}(s) = A_a \left(\frac{s \cdot \tau_s}{1 + s \cdot \tau_s} \right) \cdot \left(\frac{1}{1 + s \cdot \tau_s} \right)^3 \cdot P_{trg}(s) \quad \dots \dots \dots (5.5)$$

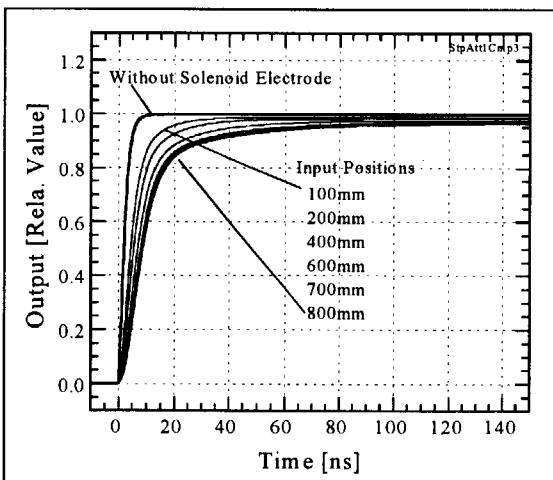


Fig.5.1 Calculation results of output pulses from the current pulse amplifier in the case of current-step-pulses applied to the solenoid electrode

実際のP S F C が中性子を検出した時に電極上に発生する電流パルスは、立上りが非常に速く、テール幅が 100ns 程度の三角波パルスである。三角波パルスの場合、立上りがテール幅に対して無視できないほど劣化すると、そのパルス波高は大幅に減衰する。三角波パルスがソレノイド電極を伝播した時に生じる波形の変化を、式 5.4 によりシミュレーション計算した。 T_e [ns] はパルスのテール幅、即ち電子の電荷収集時間である。計算結果を Fig.5.2 に示す。パルス波高は、S E

S Tを接続しない時のC P A出力を 1.0 にノーマライズし、S E S Tを接続した場合のC P A出力をその比率で表している。三角波パルスでは、S E S T内を伝播することにより、パルス波高はかなり減衰することがわかる。パルス伝播距離が800mmの場合、S E S Tが接続されていない時と比べて、0.798まで低下することを示している。図から、パルスの伝播距離が長くなるにしたがって、パルス波高分布は密になっていることがわかる。これは、波高低下の度合いが、パルス伝播距離が増加すると共に小さくなることを示している。

P S F Cで中性子を計測する場合には、S / Nを改善するため、C P Aの出力パルスはパルス整形増幅器（P S A）により増幅と波形整形される。それで、式 5.5 を用いて、P S Aの出力パルス波形をシミュレーション計算した。ここで τ_s [ns]はパルス整形時定数であり、1次R C微分と3次R C積分の疑似ガウシャン整形とした。計算結果をFig.5.3に示す。計算では、P S Aの波形整形時定数を20nsとした。時定数20nsは、一般FCの計測回路に用いられる時定数と比べて、比較的速い時定数である。このような早い時定数の選択は、核分裂計数管自身のアルファ線によるパルス及び測定環境のガンマ線によるパルスのバイブルアップを少なくする上で重要である。Fig.5.3の波形からわかるように、三角波パルスを疑似ガウシャン整形すると、バイポーラ波形になる。C P A出力パルスの立上り時間に比べて整形時定数を充分大きくしている結果、P S A出力の波高分布はC P A出力の波高分布より密になっている。

電流パルスがS E S T内を伝播した時、伝播距離に対してその波高がどのように減衰するか調べた。Fig.5.4にパルス伝播距離を関数とした各種出力パルスの減衰特性を比較して示した。図では、波形による減衰の相違を比較するため、ステップパルスと三角波パルスの場合について、C

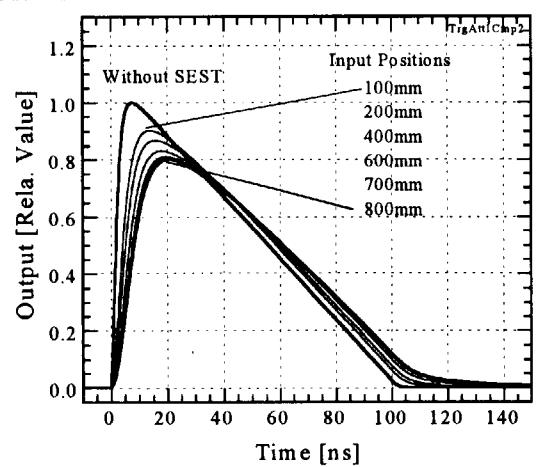


Fig.5.2 Calculation results of output pulses from the current pulse amplifier in the case of current-triangular-pulses applied to the solenoid electrode

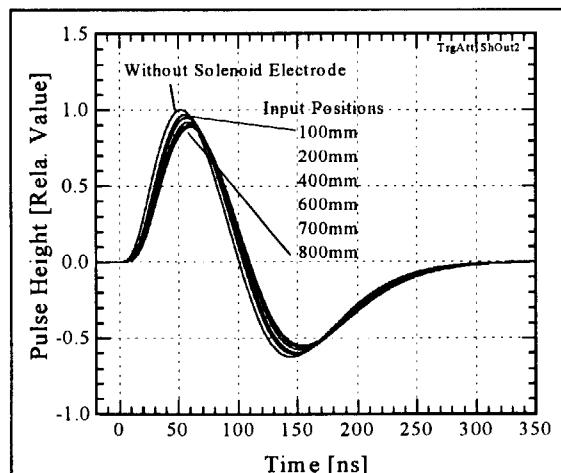


Fig.5.3 Waveforms of output pulses from the pulse shaping amplifier with quasi-Gaussian shaping (1 x RC-differ. and 3 x RC-filter, $t_c=20\text{ns}$)

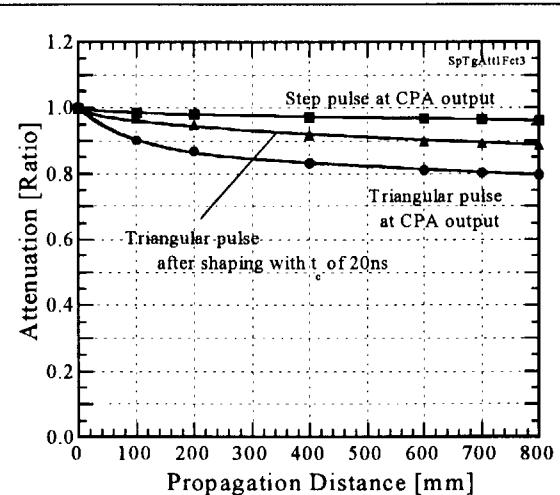


Fig.5.4 Attenuation curves of pulse height when current triangular pulses were applied to the electrode of the SEST

PA出力での減衰特性を比較して示した。さらに、三角波パルスの場合で、CPA出力をPSAで疑似ガウシャン整形した出力パルスの減衰特性についても合わせて示した。各パルスの減衰は、SESTを除いた時のパルス波高を1.0にノーマライズし、それとの比較値で表している。ステップパルスでは、パルス波高は立上がり劣化の影響を受けないため、伝播距離が増加してもパルス波高の減衰が極めて少ないことを示している。三角波パルスのCPA出力は、立上がり劣化の影響を受けて、比較的大きな波高減衰を示す。三角波パルスのPSA出力では、信号パルスはその立上り時間よりもかなり大きな時定数で積分されるため、長い伝播距離においても波高の減衰が少なくなっていることがわかる。上記計算から、PSA出力で観測されるSEST信号パルスの減衰曲線は式5.6で表されることがわかった。

$$H_p = i_s \cdot (1 - 0.0039398\sqrt{x}) \quad \dots\dots\dots (5.6)$$

ここで、 H_p は減衰量であり、比率で表される。 i_s は減衰が無い理論上の波高値を、 $x[\text{mm}]$ はパルスの伝播距離である。

5.2 一般の核分裂計数管の出力パルス波形

PSFCの実現性を評価するには、PSFCの出力パルスと一般の核分裂計数管(F C)の出力パルスとを比較検討することが有効である。それで、BWR型発電用原子炉や研究用原子炉等の起動領域及び広領域系モニタに使用されているFCの性能仕様を基に、その出力パルス波形をシミュレーション計算した。

Fig.5.5に一般のFCの作動原理図を示す。図で i_d は中性子を検出した時に、FC内に発生する電流パルスであり、一般的には波高1.5~2.5μA、テール幅100~250ns

の三角波である。 C_e は電極間キャパシタンスであり、 Z_c は信号ケーブルの特性インピーダンスである。信号ケーブルを通して電流パルス增幅器に入力されるパルス i_c は、式5.7で与えられる。

$$i_c(s) = i_d(s) \cdot \frac{1}{1 + s \cdot C_e \cdot Z_c} \quad \dots\dots\dots (5.7)$$

実際には $i_d(t)$ は三角波パルスであるが、FC出力の立上り特性を調べるために、ステップパルスで計算した。出力パルス波形をFig.5.6に示す。ここでは、 Z_c を50Ω、 i_d の波高値を1.0にノーマライズして、 C_e を50、100、150、200及び

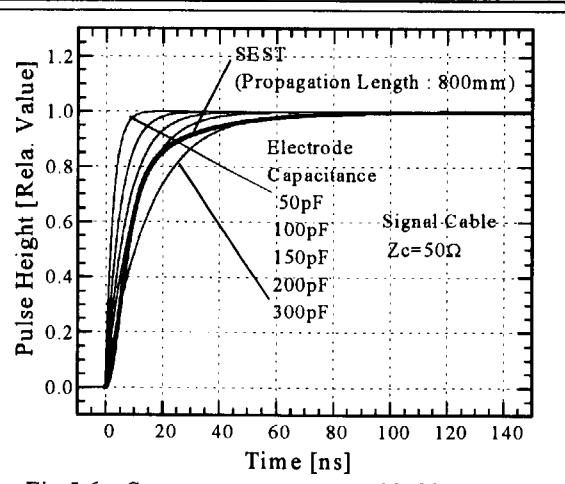
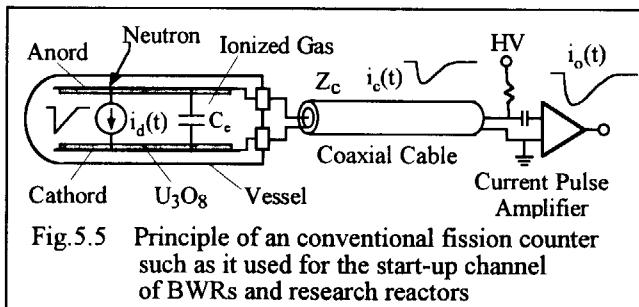


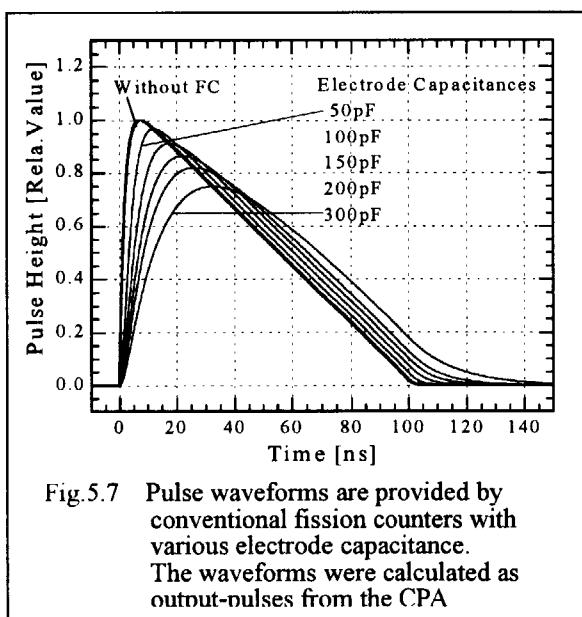
Fig.5.6 Step responses are provided by conventional fission counters with various electrode capacitance, as compared with the SEST

300pF の場合についてパルス波形を計算した。この C_e 値の範囲は、中性子感度がおよそ 0.05 ~ 0.5cps/nv の同軸円筒電極型核分裂計数管のキャパシタンスに相当する。したがって、上記キャパシタンスは、極一般の核分裂計数管が有する電極間キャパシタンスの範囲であると云える。計算結果から、出力パルスの立上りは C_e の増加と共に急激に劣化することを示している。例えば、 C_e が 200pF、中性子感度が約 0.1cps/nv の F C における出力パルスの立上り時間は、22ns 程度である。比較のために、S E S T の実験結果から得られたパルスの立上り波形を Fig.5.6 に合わせて示した。このパルス波形は、S E S T 内を 800mm 伝播して出力された時のものであり、立上りが最も劣化した場合である。立上り時間は 19.7ns であり、一般の F C で電極間キャパシタンス 200pF のものと同等の立上りであることがわかる。

次に、一般の F C が電極間キャパシタンスの影響により、パルス波高がどの程度減衰するか調べるために、三角波出力パルスを式 5.8 により計算した。計算では S E S T との比較条件と同じにするため、S E S T の特性試験に用いた C P A の出力波形とした。

$$i_o(s) = \left(\frac{1}{s} - \frac{1 - e^{-s \cdot T_e}}{s^2 \cdot T_e} \right) \cdot \left(\frac{1}{1 + s \cdot C_e \cdot Z_c} \right) \cdot \left(\frac{1}{1 + s \cdot \tau_a} \right) \quad \dots \dots (5.8)$$

C P A の積分時定数 τ_a [ns] は実測値から 1.84[ns] とした。その他の条件は、立上り波形の計算の時と同じである。計算結果を Fig.5.7 に示す。図から一般の F C では、その電極間キャパシタンスが増加すると共に、パルス波高は急激に減衰することがわかる。電極間キャパシタンスが 200pF の場合、パルス波高は 0.82 まで減衰する。S E S T の場合、最大減衰時に波高は約 0.8 (電極長 800mm を伝播した時) であったから、電極間キャパシタンスが 200pF の一般 F C とほぼ同じである。



5.3 出力パルス波高の評価

これまでの測定結果及びシミュレーション計算から、S E S T と一般F Cにおける出力パルス波高の減衰を比較し、Fig.5.8 に示す。グラフでは波高の減衰を電極間キャパシタンスの関数として表している。波高の減衰は、比較条件を同じにするため、S E S T またはF Cを除いた時の夫々のC P A出力波高を 1.0 にノーマライズし、それらに対する比率として表した。一般F Cの減衰曲線での斜線部は、中性子感度がおよそ $0.05\sim0.5\text{cps/nv}$ であるF Cの範囲を示している。グラフから、S E S T の波高は、電極間キャパシタンスが増加するにしたがって、緩やかな勾配で減衰することがわかる。これに対して、一般F Cでは電極間キャパシタンスの増加と共に急激に波高が減衰することを示している。この違いは、S E S T ではソレノイド電極構造をL Cの分布定数回路となるようなパルス伝送ラインとして設計していることによる。S E S T全長 800mm の電極間キャパシタンスは 744pF であるが、波高比は 0.798 であり、200pF の一般F Cと同等である。

P S F Cを長尺にすれば、中性子分布の計測範囲を大きくすることができる。それでグラフでは、減衰特性曲線を電極長 1344mm まで外挿してみた。S E S T の減衰特性曲線の勾配は 800mm 以上では極めて緩やかである。外挿した減衰特性曲線は、1000pF のような極めて大きな電極間キャパシタンスになっても、波高の減衰を一般F Cと同等にすることが可能であることを示している。上記のことから、P S F Cのソレノイド電極構造は、出力パルスの減衰が極めて小さく優れたパルス伝播特性を有していることがわかった。

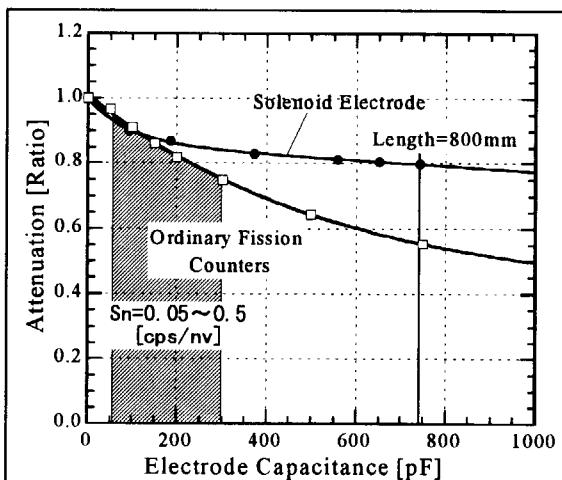


Fig.5.8 Comparison of attenuation curves for pulse height of the SEST and conventional FCs. The curves show to depend on the electrode capacitance

6. パルスの減衰特性

6.1 S E S T のパルス減衰量の測定

第5章では、シミュレーション計算によりS E S Tのパルス減衰特性を詳細に検討した。計算結果を確かめるため、Fig.6.1に示すような回路構成で、三角波パルスがS E S T全長を伝播した時のパルスの減衰を測定した。測定では三角波の電圧パルスをS E S Tに入力し、入力前と出力されたパルスをオシロスコープで観測することにより、減衰量を調べた。実際のP S F Cから出力される信号パルスは電流パルスであるが、減衰量の測定評価では電圧パルスを用いても理論上支障ない。

Fig.6.2に測定結果を示す。図では比較のため、S E S Tによる遅延を補正して、波形をプロットした。測定結果からS E S T全長によるパルス減衰は波高比で0.82であった。シミュレーション計算による減衰は波高比で0.798であったから、計算結果と測定値は良く合っていると云える。上記の波高比は、中性子がP S F Cの長尺電極の端部で検出された時の信号パルスが受ける最小の波高比である。したがって、S E S Tの出力からは、波高が0.82~1.0の範囲のパルスが得られることを示している。

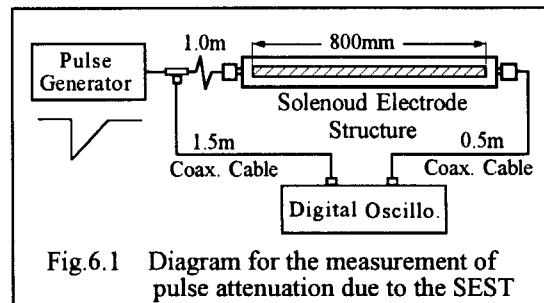


Fig.6.1 Diagram for the measurement of pulse attenuation due to the SEST

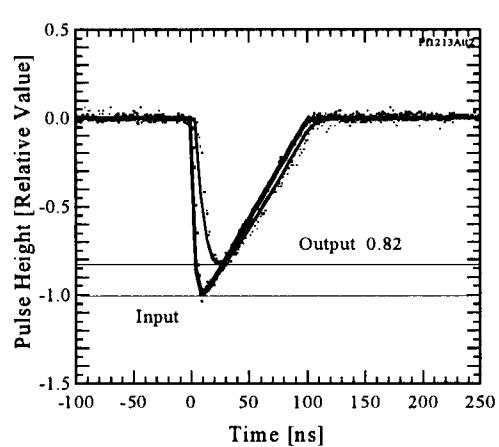


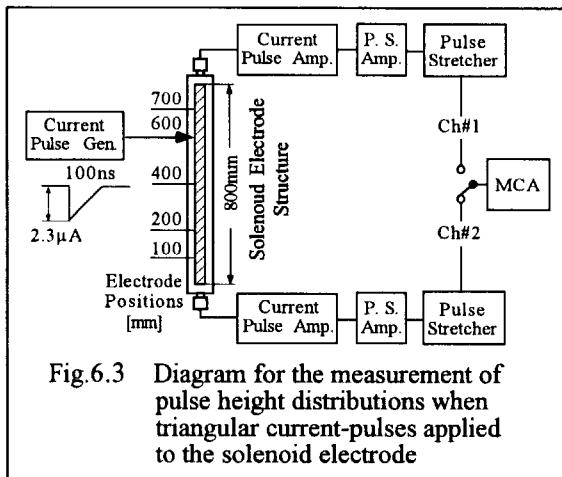
Fig.6.2 Comparison of waveforms observed at the input and the output of the SEST. The attenuation when a triangular pulse going through the full length of the SEST

6.2 出力パルス波高分布の測定

S E S Tに設けたテスト入力孔にテスト電流パルスを入力し、パルス波高分布を測定した。測定回路の構成をFig.6.3に示す。テスト電流パルスは、P S F Cが中性子を検出した時に電極に発生する電流パルスを模擬して、三角波で波高 $2.3\mu\text{A}$ 、 $1.454\mu\text{A}$ 及び $0.729\mu\text{A}$ の3種類とし、テール幅100nsとした。測定では、S E S T両端からの出力電流パルスを夫々C P Aで増幅し、さらにP S Aで時定数20nsの疑似ガウシャン整形をした後、ストレッチャーによりパルス幅を拡大した。パルス波高分布はCh#1とCh#2を交互に切替えて波高分析器(M C A)で測定した。

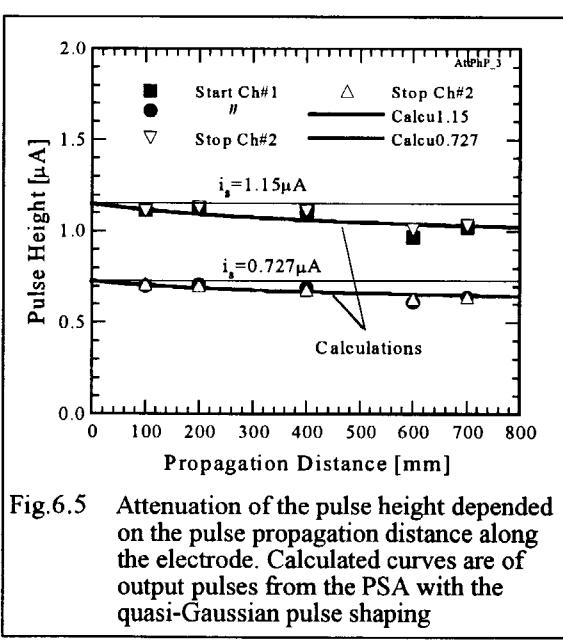
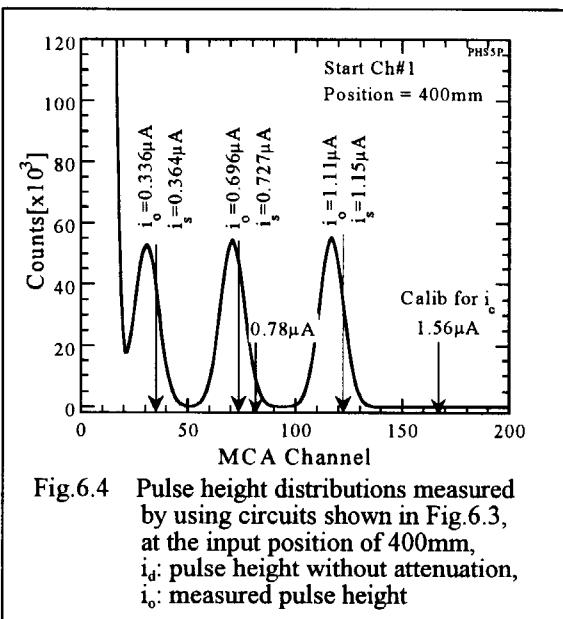
Fig.6.4に測定結果の一例として、テスト入力孔400mmに模擬電流パルスを入力した時に得られた波高分布を示す。図に示した*i_o*値は、減衰が無いとした場合に理論上得られる出力パルス波高値である。*i_o*値は測定した波高分布の最頻パルスの波高値である。したがって、*i_o*と*i_s*の比

がパルス減衰量を与える。図で $i_s = 1.15\mu A$ に対応する波高分布は、P S F Cにおいて想定している電離電流パルスから得られるパルス波高値である。P S F Cで想定している電離電流パルス波高は一般FCと同等としている。図の波高分布で、最左部の鋭く立上がっているのは計測系電子回路のノイズによるものである。想定しているパルス波高はノイズに対して極めて高いこと示している。さらに、 $i_s = 0.727\mu A$ に対応する波高分布（これは想定パルス波高の 63%に相当）における



いても充分高いS/Nを有していることがわかる。上記のこととは、S E S Tがソレノイド電極構造で且つ 250Ω の高い特性インピーダンスを有しているにもかかわらず、誘導ノイズを拾うこともなく、高速の微小電流パルスを計測する電子回路に支障となるような影響を全く与えないことを示している。

Fig. 6.4 は模擬電流パルスをテスト入力孔400mmに入力した時の波高分布であるが、同様にして、400mm以外の各テスト入力孔に模擬電流パルスを入力して波高分布を測定した。波高分布測定結果から得られた最頻パルスの波高値を比較して Fig. 6.5 に示す。横軸は模擬電流パルスの入力位置で、即ちパルスの伝播距離である。図中 i_s で示した夫々の直線は、減衰が無い場合の理論上得られる波高値である。図の各測定データから、波高値はパルス伝播距離が伸びるにしたがって、徐々に減衰することを示している。図で Calculations と示した曲線は、第5章のP S A出力パルス波形のシミュレーション計算から得られた式 5.6 を用いて計算したパルス減衰曲線である。計算した減衰曲線は実測値と良く合っていることがわかる。



7. 結 論

位置検出型核分裂計数管に用いるソレノイド電極構造（S E S T）を試作し、そのパルス伝播特性を測定評価した。測定したパルス伝播特性は、パルス遅延特性、パルス立上り特性及び減衰特性である。立上り特性及び減衰特性については、出力パルス波形のシミュレーション計算により、詳細に検討評価した。パルス遅延特性はP S F Cの位置検出性能を推定評価するために必要な特性である。パルス立上り特性は、ガンマ線によるパルスのパイルアップを防ぐために必要なパルス整形時定数を決定する上で、重要な特性である。減衰特性はS/N及びタイミングパルスの揺らぎを評価する上で不可欠な特性である。

パルス遅延特性の測定では、S E S T全長800mmによる遅延時間は169nsであった。この遅延時間は、特性インピーダンスが 50Ω の同軸ケーブルRG-58A/Uと比較すると、長さ36mと同等であり、45倍の遅延時間である。この結果、ソレノイド電極構造を最適設計することにより、極めて長い遅延時間が得られることがわかった。また、S E S T軸方向に設けた5個のテスト入力孔に順次パルスを入力し、各位置ごとに両端コネクタから出力されるパルスの間隔を測定した。このパルス間隔は軸方向の位置検出に必要な特性である。測定結果からS E S T全長によるパルス間隔は332nsになることがわかった。S E S T軸方向の長さに対するパルス間隔の非直線性は、全長のパルス間隔比で、1.21%以下であった。S E S T試験から得られたパルス間隔とその直線性は、P S F Cの特性として充分な値であった。

パルス立上り特性の測定から、S E S T全長800mmを伝播したパルスの立上り時間は、19.6nsになることがわかった。出力パルス波形の測定結果とシミュレーション計算結果をもとに、S E S Tの立上り特性と一般に用いられている核分裂計数管（F C）のそれを比較検討した。この結果、一般のF Cでは、立上がりは電極間キャパシタンスの増加と共に急激に劣化するのに対して、S E S Tのそれは、電極間キャパシタンスが増加するにしたがって、劣化の進行が緩やかであることがわかった。S E S Tの電極間キャパシタンスが800pFであっても、パルスの立上りは一般F Cで200pFのものとほぼ同程度であった。S E S Tは、一般F Cと比較して、極めて良好な立上り特性を有していることがわかった。

パルス波高減衰量の測定では、S E S T全長800mm（電極間キャパシタンス744pF）における出力パルスの減衰比は約0.8であった。測定結果の外挿により、電極間キャパシタンスが1000pF（電極長1075mmに相当）になっても、減衰比は0.77であることがわかった。一方、一般F Cでは、電極間キャパシタンスが235pFで出力パルス減衰比が約0.8であり、S E S Tの744pFの場合と同じ減衰量であった。また、S E S T1000pFでの減衰は一般F Cの266pFと同じであった。上記のことから、ソレノイド電極構造は、電極間キャパシタンスの影響を極めて小さくし、電極の長尺化に優れた性能を発揮することがわかった。

実際のP S F Cで発生する電流パルス波形の模擬パルスを用意し、これをS E S T電極に入力して、S E S T出力のパルス波高分布を測定した。波高分布からパルス波高の減衰量を電極長の関数として評価すると共に、シミュレーション計算結果との比較を行った。測定結果とシミュレーション計算は良く合っていた。疑似ガウシャン整形した後のパルス波高では、減衰曲線の勾配

は緩やかで、且つ最大の減衰時でも波高比が 0.89 であり、減衰は極めて小さいことがわかった。

S E S T では、高インダクタンスで且つ 250Ω の高い特性インピーダンスに設計した特殊な電極構造を採用している。しかし、実際の検出器を模擬した出力パルス波高分布の測定実験により、S E S T の特殊電極構造は、誘導ノイズを拾うこともなく、計測電子回路に支障となるような影響を全く与えないことを確認できた。

以上の実験結果から、ソレノイド電極構造は、良好なパルス伝播特性を有しており、P S F C に充分適用できることが確認できた。

謝　　辞

位置位置検出型核分裂計数管のパルス伝播特性の測定及び解析では、日本原子力研究所エネルギーシステム部の荒 克之氏及び先端基礎研究センターの片桐政樹氏より御助言して戴いた。厚くお礼申し上げます。

参考文献

1. 山岸秀志 "遅延線電極構造に設計した位置検出型核分裂計数管の理論的考察", JAERI-M93-151, July 1993
2. 山岸秀志 "遅延線電極構造を有した位置検出型核分裂計数管の信号計測系と計数誤差", JAERI-M 94-010, February 1994
3. H.Yamagishi, "Study of Position Sensitive Fission Counter with Transmission Delat Line Structure", JAERI-Review 94-009, p201 (Nov. 1994)
4. H.Yamagishi, "Calculation Method for Pulse Height Distributions of Fission Counters", JAERI-Review 95-014, p176 (Sep. 1995)
5. H.Yamagishi, K.Ara, et al., "Study of Pulse Height Distributions due to Alpha particles in Fission Counters", JAERI-Review 96-012, p136 (Sep. 1996)
6. H.Yamagishi, K.Ara, "Calculational Study of Output Signal Pulses from Fission Counters for Detecting Fast Neutrons", JAERI-Review 97-011, p161 (Oct. 1997)
7. 瓜谷章、森千鶴夫、渡辺鑑、宮原昭、"新しい信号読み出し法を用いた中性子測定用電荷分割式位置検出型比例計数管の開発", 日本原子力学会 1989 年会、E33、1989
8. C. Mori, T.Haga and A.Uritani, "A new position-sensitive nuclear fission counter with a convenient readout method for neutron measurement", Nuclear In. And Methods in Phys. Re. A310, P437, 1991
9. 羽賀剛、安藤彰浩、森千鶴夫、瓜谷章、柳田勝男、"位置検出型核分裂計数管の開発", 日本原子力学会 1992 春の年会、F8、1992
10. 森千鶴夫、安藤彰浩、瓜谷章、羽賀剛、"中性子位置検出型核分裂計数管の開発", 放射線, Vol.21 No.1, ISSN 0285-3604, p35, 1995
11. V.S.Galtsov, I.I.Zakharkin, et al., "Instruments and Technic for Experiments, No.1, p31 (1978)
12. M.K.Kopp, K.H.Valentine, G.C.Guerrant and J.A.Harter, "Position-sensitive Fission Counter for In-core Flux Profile Monitoring", IEEE Trans. Nuclear. Sci. NS-31 (1), p. 733, Feb. 1984
13. F.L.Glesius, J.A.Williams, and C.W.Ricker , "In-core Instrumentation and Rector Core Assessment", Proceedings of a Specialists' Meeting Pittsburgh, USA, 1-4 Oct. 1991
14. 山岸秀志、鈴木勝男、他 "位置検出型核分裂計数管の特性インピーダンスの設計とソレノイド電極構造体の試作試験", JAERI-Research 98-063, Oct. 1998

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

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

表3 固有の名称をもつSI組立単位

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

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ′, ″
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

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

(注)

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

換算表

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

力	N(=10 ³ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s(N·s/m²) = 10 P(ポアズ)(g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St(ストークス)(cm²/s)

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

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad	照射線量	C/kg	R
	1	2.70270×10^{-11}		1	100		1	3876
	3.7×10^{10}	1		0.01	1		2.58×10^{-4}	1

(86年12月26日現在)

