

J A E R I - M  
94-010

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

1994年2月

山岸 秀志

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

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、お申しこみください。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）で複写による実費領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, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1994

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 ニッセイエプロ株式会社

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

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部  
山岸 秀志

(1994年1月17日受理)

位置検出型核分裂計数管(PSFC)の開発において、その計数管電極を遅延線構造にすることにより、極めて高い位置検出分解能が期待できることを既に報告した<sup>1)</sup>。

本稿では、PSFC信号計測系の構成について検討を行うと共に、PSFC及び電子回路によるパルス計数誤差について計算評価した。PSFCのパルス伝播時間と同じ遅れ時間有するパルス遅延素子と組み合わせて計測電子回路を構成することにより、信号処理系を簡素化でき、高速のリアルタイム計測に有効であることがわかった。また、PSFCに起因する計数誤差は、電子回路によるものよりも小さく、 $10^6$  cpsのような高計数率下においても2%以下であることがわかった。

Electronics and Pulse Counting Error of  
Position Sensitive Fission Counters  
with a Transmission Delay Line Structure

Hideshi YAMAGISHI

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

(Received January 17, 1994)

A new Position Sensitive Fission Counter (PSFC) had been proposed for measurement of neutron flux distribution in a reactor. It was designed with the electrode structure as a pulse delay line to give a high position sensitivity. The result of study has been reported.<sup>1)</sup>

A composition of electronics was designed for a neutron measuring system with the PSFC. Each error of pulse counting due to the PSFC and the electronics was studied.

It was found that a pulse delay device was useful to simplify the electronics in construction and for the neutron measurement at a high pulse counting rate on real time. The delay device has the same delay time as the PSFC.

It was clear that the pulse counting error due to the PSFC was smaller than that of the electronics. The error due to the PSFC was less than 2% even if in a neutron measurement condition at pulse counting rate of  $10^6$  cps.

Keywords: Position Sensitive Neutron Detector, Neutron Detector,  
Fission Counter, Neutron Counter, Reactor Instrumentation,  
Coil Style Electrode, Delay Line, Pulse Counting Error

## 目 次

1. まえがき .....	1
2. 位置検出型核分裂計数管の作動原理 .....	2
3. 計測系電子回路の基本構成 .....	4
4. パルス遅延素子を用いた改良型計測系 .....	5
5. PSFC 計測系におけるパルス計数誤差 .....	7
5.1 PSFC 計測系の不感時間による計数誤差 .....	7
5.2 PSFC の不規則出力による計数誤差 .....	8
6. まとめ .....	12
参考文献 .....	13

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Principle of the Position Sensitive Fission Counter .....	2
3. Composition of Electronics .....	4
4. Improved Measuring System using a Pulse Delay Device .....	5
5. Pulse Counting Error on the Neutron Measuring System with PSFC ...	7
5.1 Pulse Counting Error due to Dead Time of the Neutron Measuring System .....	7
5.2 Pulse Counting Error due to Irregular Output Pulses of the PSFC .....	8
6. Conclusion .....	12
References .....	13

## 1. まえがき

原子炉々心のような高中性子束及び高ガンマ線の下で、原子炉の出力密度分布を精度良く測定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した新たなPSFCを考案した。核分裂計数管型では、比例計数管型の位置検出型中性子検出器と異なり、中性子による出力が大きく、更に電荷収集時間を極めて短く設計できるため、高中性子束及び高ガンマ線下での使用に適している。考案したPSFCは、その両端に設けられた出力コネクタからの信号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原理に基づくものである。このPSFCでは、中性子検出分解能を上げるために、パルス伝播速度が最適な値になるように陽電極をコイル構造としている。理論的検討の結果、位置検出分解能が極めて高く、パルス反射のない優れたパルス伝送特性を有するPSFCの開発が可能である見通しを得た。この結果について既に報告した。<sup>\*1</sup>

本稿では、中性子束分布測定装置としての計測電子回路の構成を検討した。PSFCではその両端から信号パルスを出力するため、信号パルスの時間間隔は中性子の検出位置により負から正の範囲で変化することになる。このような時間信号を処理するには複雑な回路が必要になり、PSFC計測系のように $10^{-9}$ 秒(ns)オーダの高速パルス処理が要求される計測電子回路では困難が生じる。このため、PSFCと遅延素子を組み合わせ、正信号のみを出力する改良型出力系について検討を行った。

また、PSFCはパルス時間差計測法に基づく検出器であるため、高計数率の測定においてはパルス計数誤差を生じることが予想される。このため、PSFCの作動原理により発生する計数誤差と計測系電子回路により生じる計数誤差について検討した。

PSFCでは遅延線電極構造を採用するため、検出器内でのパルス伝播速度は一般の同軸ケーブル等に比べると遅い。従って、高計数率での計測においては、1個の中性子の検出による信号パルス対がPSFCから出力されない内に、次の中性子が検出される確率は無視できなくなる。2個以上の中性子検出により複数の信号パルス対がPSFC内を同時に伝播した場合、信号パルスの時系列は崩れ、不規則な信号パルスが出力されることになる。このため、不規則出力によるパルス計数誤差について計算評価した。

計測系電子回路によるパルス計数誤差を計算するため、PSFCの電流出力パルスを微分1段、積分3段の擬似ガウシャン整形した場合のパルス分解能を求めた。そして、パルス分解能に起因する計数誤差について計算評価した。

## 2. 位置検出型核分裂計数管の作動原理

Fig. 2.1 に遅延線電極構造を採用したPSFCの作動原理図を示す。PSFCの陽極と陰極は同軸構造で配置される。中性子の位置検出を行うため、PSFCの両端には出力コネクタを設けている。陰極の内面には中性子有感物質が塗布される。中性子有感物質として、熱中性子検出用の場合は<sup>235</sup>Uを、高速中性子検出用には<sup>237</sup>Npまたは<sup>232</sup>Th等が塗布される。PSFCでは信号パルスの伝播速度及び伝送特性を最適にするため、陽極をコイル構造している。これが本PSFCの大きな特徴である。

PSFCによる中性子の位置検出は、PSFC両端から出力される信号パルスの時間差を計測する原理に基づくものである。PSFC内で中性子による核反応が生じると、その核分裂片による電離作用で電流パルスが発生し、同じ大きさの電流パルスが両出力端に伝播する。夫々のパルスが出力端に到達するために必要な時間は、パルスの検出位置から出力端までの距離に比例する。従って、計数管両端からの出力パルスの時間間隔を計測することにより、中性子の位置を検出することができる。

従って、PSFCが有するパルス伝播速度は中

性子位置検出分解能を決定する大きな要素となる。パルスの伝播速度は陽極のインダクタンス及び電極間キャパシタンスによって決定される。このため、PSFCでは陽極をコイル構造とすることによって、パルス伝播速度を適度な値になるように設計する。

PSFCの特性インピーダンスはコイルの巻ピッチと電極間の分布キャパシタンスにより決まる。通常は、PSFCの特性インピーダンスを信号計測系のインピーダンス(50Ω、75Ωまたは93Ω)と整合するように設計する。これにより、高い位置検出分解能を達成するための十分なパルス伝播速度が得られる。さらに、インピーダンスの整合を取っているため、計数管と信号伝送ケーブルの接続部におけるパルスの反射がなく、良好な信号伝送特性が得られる。

PSFCと従来の核分裂計数管(FC)における単位長さ当たりのパルス伝播時間を計算し、Fig. 2.2 に比較して示した。これは電極間隔を0.7mmとし、陰極の径(=計数管外径)を変えた場合についての計算結果である。PSFCの特性インピーダンスについては93、75及び50Ωで比較した。本図から、PSFC単位長さ当たりのパルス伝播時間は陰極径に比例して長くなることがわかる。また、特性インピーダンスが高くなるほど、そのパルス伝播時間は長くなることを示している。例えば、陰極径が20mmで、特性インピーダンスが93、75及び50Ωの場合のPSFC単位長さ当たりのパルス伝播時間は、それぞれ71.4、57.5、38.4 ns/mである。

一方、従来型のFCでは、陰極径に関係なく3.33 ns/mで一定である。この値はコイル陽極型PSFCの場合に比べて大変小さく、十分な中性子位置検出分解能を得ることは期待できない。また、従来型FCの特性インピーダンスは、極めて低く、陰極径が20mmで2Ω程度である。従って、同軸ケーブルとの接続部でのパルスの反射が問題となる。

PSFCの全長をパルスが伝播するに必要な時間τは $\tau=L/u$  [s] である。ここで、LはPSFCの有感長で、uはパルスの伝播速度である。しかし、第5章で詳細に述べるように、PSFC出力のパルス間隔

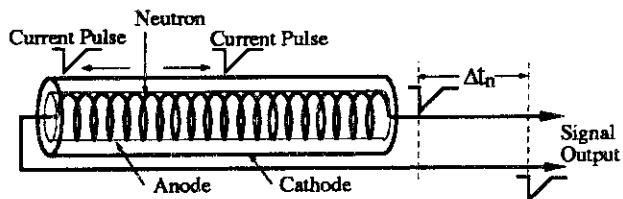


Fig. 2.1 遅延線電極構造を採用した位置検出型核分裂計数管の作動原理

$$\begin{aligned} & [\Delta t_n: 大きくできる] \\ & [Z_0: 整合可能] \\ & [\Phi_n > 10^{10} \text{n/cm}^2 \cdot \text{s}] \\ & [\Phi_\gamma > 10^{-2} \text{C/kg.s}] \end{aligned}$$

$\Delta t$ の変動範囲は $0 \sim 2L/u$  [s]までとなる。この結果、単位長さ当たりのパルス伝播時間に対して2倍の $\Delta t$ が得られることになり、その分、中性子位置検出分解能を上げることができる。

先の計算結果では、外径が20mm、電極間隔が0.7mmで特性インピーダンスが $50\Omega$ の場合のパルス伝播速度 $u$ は $2.65 \times 10^7$  [m/s]であった。従って、PSFC 単位長さ当たりのパルス間隔は $\Delta t/L = 75.4$  [ns/m]となる。パルス計測電子回路が測定可能な最小のパルス間隔を0.5[ns]程度とすると、PSFCの中性子位置検出分解能は6.6mm程度が得られることになる。

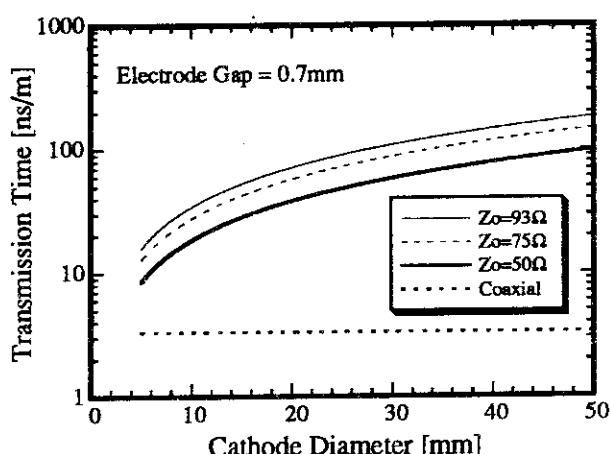


Fig.2.2 PSFC の外径を変えた時の単位長さ当たりのパルス伝播時間の計算結果

### 3. 計測系電子回路の基本構成

Fig. 3.1 にPSFCを用いた中性子束分布測定系の構成を示す。測定系はPSFC、信号伝送同軸ケーブル、電流パルス増幅器 (Current Pulse Amplifier, CPA)、パルス整形増幅器 (Pulse Shaping Amplifier, PSA)、波高弁別器 (Pulse Height Discriminator, PHD) 、パルス間隔・波高変換器 (Time-to-Amplitude Converter, TAC) 及び波高分析器 (Pulse Height Analyser, PHA) により構成される。PSFC出力からPSAまでは2系統で構成する。非常に狭いパルス間隔の測定が要求される計測回路では、パルスの反射が計測誤差を拡大させる。このため、PSFC及び信号伝送同軸ケーブルの特性インピーダンスとCPAの入力インピーダンスを整合するように設計する。

PSFCは両端のコネクタより同じ波形の電流パルスを出力する。その電流パルスは波高が2~4 $\mu$ A、半値幅(FWHM)が50ns程度のノコギリ波である。両電流パルスはCPAによりそれぞれ増幅される。CPAのゲイン及び高周波帯域には夫々25k $\Omega$ 相当、100MHzが必要である。PSAは、高周波及び低周波ノイズを除去し、信号パルスを波高弁別に必要な大きさに増幅するためのものである。PSAのゲインは300倍程度とする。パルス整形は信号/雑音比(S/N比)の優れた擬似ガウシャン整形(微分1段、積分3段)を用いる。PHDは、ノイズや中性子有感物質が放出するアルファ線によるパルス及びガンマ線によるパルスを除去すると共に、中性子信号パルスの波高に依存しない一定の矩形波を出力する。2つのPHD出力はTACに入力され、両パルスの時間間隔がパルス波高に変換される。従って、TAC出力パルスの波高は中性子検出位置によって決まるところになる。PHAにより波高分布、即ち中性子束分布が測定される。

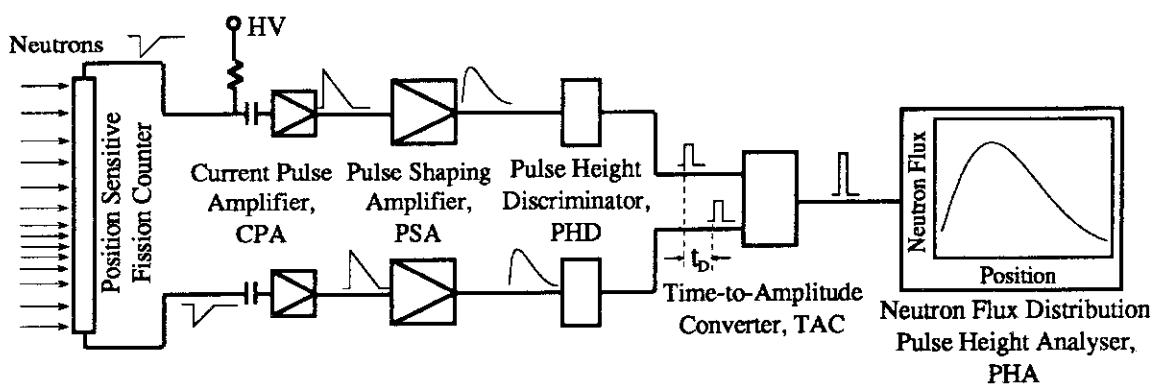


Fig. 3.1 位置検出型核分裂計数管(PSFC)を用いた  
中性子束分布測定系の構成

#### 4. パルス遅延素子を用いた改良型計測系

Fig. 4.1にPSFCにおける中性子検出位置と出力パルス間隔の関係を表す概念図を示す。PSFCの両端から出力される信号パルスの間隔( $\Delta t$ )は、中性子の検出位置( $P_1, P_2$ )により変化する。中性子の検出位置 $P$ と $\Delta t$ の時間的関係を調べるために、Fig. 4.2に信号パルスの伝播を表すタイムチャートを示す。この図の縦軸はPSFCの有感長、即ち中性子の検出位置を表す。横軸は中性子検出からの経過時間、即ち信号パルスの伝播時間を表している。また、図の上辺及び下辺はPSFCの信号出力端である。信号計測回路では、PSFCのOutput#1(上辺側)を基準パルスとし、Output#2(下辺側)出力との $\Delta t$ を計測するものとする。この場合、Output#2側が中性子検出位置のゼロ点となり、Output#1側が検出位置  $L$  [m] となる。本図により、中性子の検出位置と、2つの信号パルスが両出力端へ伝播する時間的関係を知ることができる。図中の $P_1$ が中性子の検出位置を表し、太い斜線が信号パルスの伝播を表す。従って、斜線の勾配はパルス伝播速度となる。また、 $P_2$ は $P_1$ 信号検出の $\delta t$ 秒後に次の中性子を検出したことを表している。

中性子が $P_1$ のようにPSFC中央からOutput#1側で検出された場合は、Output#2の信号パルスは

Output#1の基準パルスより遅れて出力されるため、パルスの間隔 $\Delta t$ は正の値になる。そして、中性子検出位置がOutput#1側に近づくに従って $\Delta t$ は広がる。PSFCの中央で中性子を検出した場合には $\Delta t$ はゼロである。一方、 $P_2$ のようにPSFC中央よりOutput#2側で検出された場合には、Output#1の基準パルスがOutput#2の信号パルスより遅れて出力されるため、 $\Delta t$ は負の値になる。従って、パルスの伝播速度を $u$  [m/s] とすると、中性子の検出位置により、 $\Delta t$ は $L/u \sim -L/u$  [s] まで変化することになる。

前節の計測電子回路の構成で述べたように、中性子の位置を求めるためには、上記の $\Delta t$ をパルス波高に変換する必要がある。一般に市販されているTACでは、一方のパルスをスタート信号に、もう一方のパルスをストップ信号として、そのパルス間隔をパルス波高に変換する方式がとられる。このようなTACでは、 $L/u \sim -L/u$  [s] のような正から負まで変化する時間間隔を変換することは困難である。従って、上記のようなパルス間隔を変換するには、市販のTACを用いることができない。このため、特別な電子回路が必要となる。正負間で変化する時間間隔をパルス波高に変換できるTACは、回路的に複雑となり、高計数率でのリアルタイム計測に支障をもたらすこ

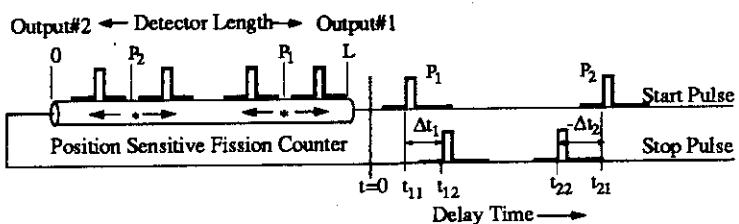


Fig. 4.1 PSFCによる中性子検出位置と出力パルス間隔

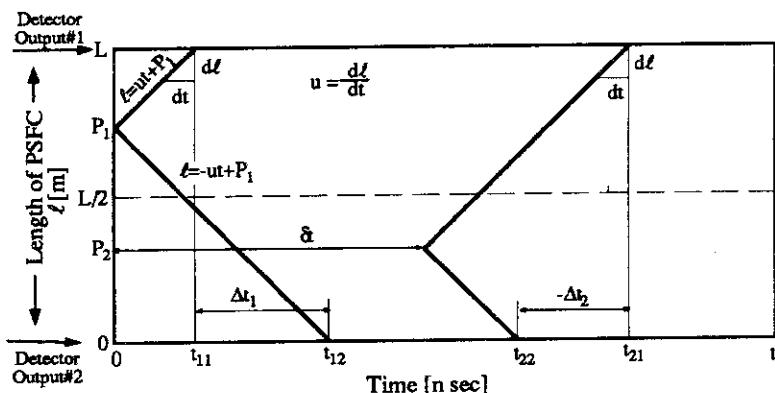


Fig. 4.2 PSFCにおける中性子検出位置と信号パルスの伝播時間を表すタイムチャート

となる。さらに、複雑で特別なTACの製作は、大幅なコスト高を招く。

このため、パルス遅延素子と組み合わせたPSFC出力系の検討を行った。Fig. 4.3にパルス遅延素子を用いた改良型PSFC出力系の構成を示す。改良型出力系では、PSFCのOutput#2側、即ちTACのストップ信号として用いる出力ライン側にパルス遅延素子を挿入する。その遅延時間はPSFC全長が有するパルス伝播時間  $L/u$  [s] に相当する値に選ぶ。この改良により、パルス間隔を正のみの変化にすることが可能となる。このパルス遅延素子の挿入場所は、TACより前側であれば、PSFC出力の後、CPAの後、あるいはPHDの後などのどこでも同じ効果が得られる。

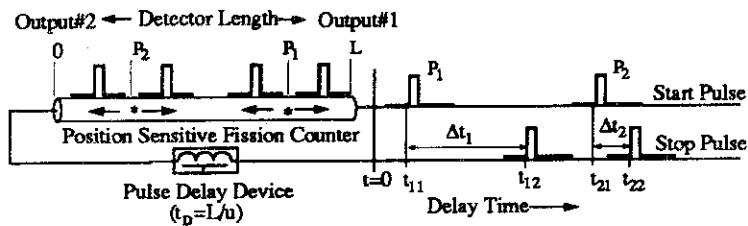


Fig. 4.3 PSFCとパルス遅延素子を組み合わせて  
用いた改良型出力系

Fig. 4.4に信号パルスの間隔と中性子検出位置の関係について、PSFC直接の出力とパルス遅延素子を採用した場合の出力を比較して示す。図から明らかなように、PSFCの直接の出力では、中性子パルスの検出位置  $P_x$  が  $0 \sim L$  [m] で  $\Delta t$  は  $-L/u \sim L/u$  [s] まで変化する。そして  $P_x$  は  $P_x = (u \cdot \Delta t + L)/2$  で表される。一方、パルス遅延素子を採用した場合には、パルス間隔は  $\Delta t = (-L/u \sim L/u) + L/u$  で表され、 $0 \sim 2L/u$  [s] の正のみの変化となる。従って、中性子の検出位置は  $P_x = u \cdot \Delta t/2$  のように表される。このように中性子検出位置はPSFCの長さに依存しない  $\Delta t$  のみの関数となる。パルス遅延素子には、半導体遅延素子、同軸型遅延線、あるいは数十メートルの同軸ケーブルを用いればよいため、簡単、安価である。このように、パルス遅延素子の採用により複雑な回路は不要となり、市販のTACが使用可能となる。

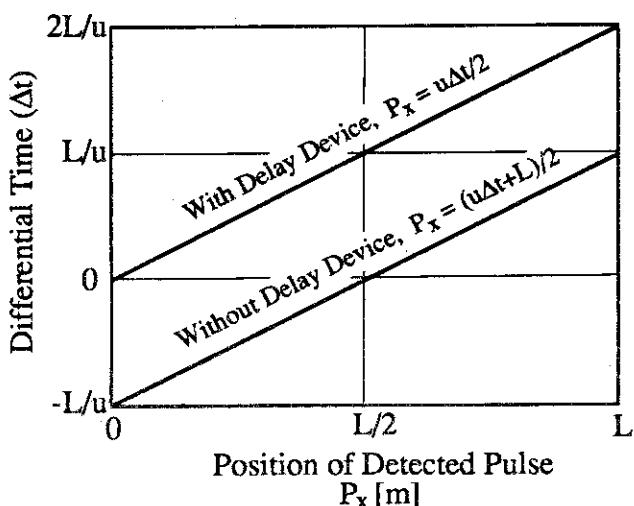


Fig. 4.4 中性子検出位置とパルス時間間隔

## 5. PSFC計測系におけるパルス計数誤差

PSFCを用いた計測系のパルス計数誤差には、次の2種類が考えられる。その1つはPSFC及び電子回路が有する不感時間(Dead Time)によるものである。もう1つは信号パルスがPSFC内を伝播している間に次のパルスが検出された場合に生じる不規則出力による誤差である。不感時間によるものは一般の核分裂計数管を用いた計測系にも生じるが、不規則出力による誤差はPSFCの作動原理に起因する計数誤差である。以上のことから、高計数率の計測時におけるパルス計数誤差について考察した。

### 5.1 PSFC計測系の不感時間による計数誤差

不感時間によるパルス計数誤差の計算には、一般に良く知られているまひ型モデルを用いる。まひ型モデルでは、ランダムな間隔で発生するパルスにおいて、1つのパルスの検出による不感時間 $\tau_D$ 内に次の信号が入ってきた場合、前のパルスによる不感時間に続いて同じ不感時間 $\tau_D$ が生じるものとしたモデルである。従って、前のパルスの不感時間内に次々に信号が入った場合、その信号数を $N_b$ とすると、不感時間は $N_b \tau_D$ となる。

信号パルスの計数率を $N$  [cps] とすると、不感時間 $\tau_D$ 内に次の信号が入る確率 $P(\tau_D)$ は、まひ型モデルでは下式で表される。

$$P(\tau_D) = \int_0^{\tau_D} N e^{-Nt} dt = 1 - e^{-N\tau_D} \quad \dots \quad (1)$$

PSFCでは核分裂片による電離パルスが大きいため、電子増倍や電子雪崩等を用いる必要がない。また、PSFCの電荷収集時間は100ns程度で非常に速いため、10<sup>6</sup>cpsのような高計数率の計測においても、比例計数管やGM管のような窒息現象を考慮する必要がない。このため、一般的に、PSFCの不感時間は計測電子回路の不感時間(ダブルパルス分解能で決まる)に比べて充分小さい。一方、PSFCの信号増幅には高速の電流パルス増幅器を採用し、パルス整形には信号/雑音比(S/N比)の優れている擬似ガウシャン整形(微分1段と積分3段)を行う。Fig. 5.1にPSFC出力パルスを擬似ガウシャン整形したパルス波形の計算結果を示す。PSFCの出力パルス波形は、立ち上がりがns以下、電荷収集時間が100ns程度の極めて速いノコギリ波である。計算では、微分及び積分時定数を同一とし、時定数 $\tau=5$ 、10、20、50及び100nsで比較した。また、Fig. 5.2に、2個の近接したパ

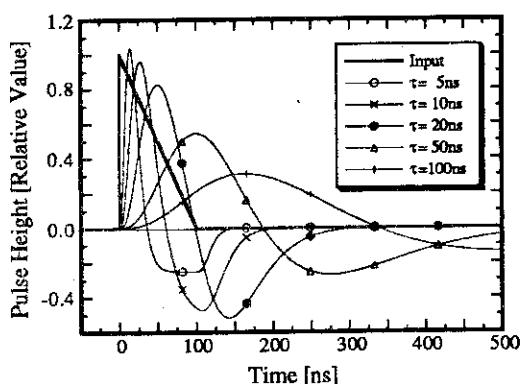


Fig. 5.1 PSFCの出力パルスを種々の時定数で擬似ガウシャン整形した時のパルス波形の比較

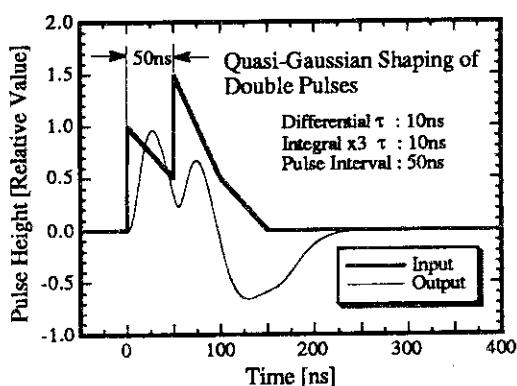


Fig. 5.2 パルス間隔50nsのダブルパルスを時定数10nsの擬似ガウシャン整形した時のパルス波形

ルス(ダブルパルス)が入力した場合の出力波形を示す。計算では、ダブルパルスの間隔を50ns、擬似ガウシャン整形の時定数を10nsとした。Fig. 5.3にダブル入力パルスの間隔( $\delta t$ )を20ns、30ns、40ns及び50nsに変えた場合の出力波形を比較して示した。図では、それぞれの出力波形毎に100ns遅らせて作図している。この図から明らかのように、10nsの極めて短いパルス整形時定数を用いても、20ns間隔のダブルパルスを判別することは困難であることがわかる。判別可能なパルス間隔は30~40ns以上である。

以上のことから、パルス計数率の上限がダブルパルス分解能で決まるとして、まひ型モデルを用いて、 $\tau_D=30\text{ns} \sim 50\text{ns}$ の場合のパルス計数誤差を計算した。Fig. 5.4にパルス計数率の上昇に伴う計数誤差の計算結果を示した。パルス計数率が $10^6\text{cps}$ で、ダブルパルス分解能 $\tau_D$ が30ns、40ns及び50nsとした時のパルス計数誤差は、夫々2.96、3.92、4.88%である。

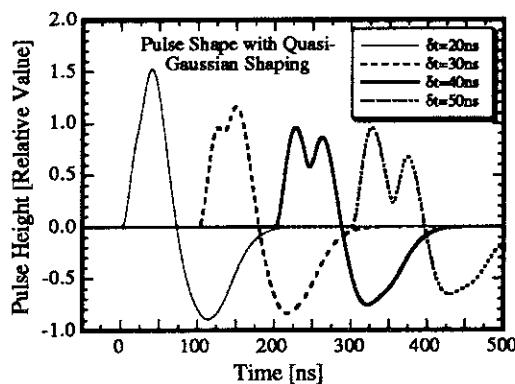


Fig. 5.3 時定数10nsの擬似ガウシャン整形において、ダブル入力パルスの間隔が変化した時の出力波形の比較

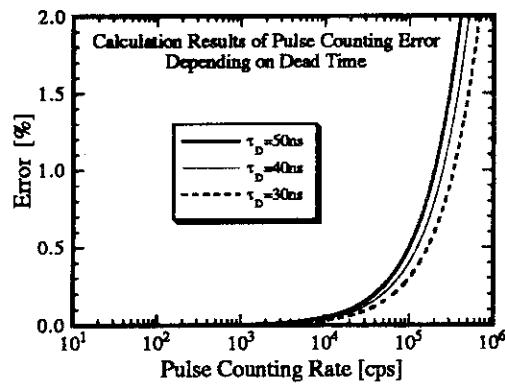


Fig. 5.4 計測回路のダブルパルス分解能 $\tau_D$ により生じるパルス計数誤差の比較、 $\tau_D$ を30ns、40ns及び50nsとした

## 5.2 PSFCの不規則出力による計数誤差

パルス間隔測定法を用いたPSFCでは、高計数率の下において不規則出力が発生することは原理的に避けられない。このため、不規則出力の発生確率を調べた。

Fig. 5.5にPSFC信号パルスの検出位置とパルス伝播の時間的関係を表した信号伝播タイムチャートを示す。図の縦軸は信号パルスの検出位置を表し、0~LはPSFC有感長である。0~-LはOutput#2側に挿入したパルス遅延素子の遅れを距離に換算して表したものである。L点がパルス時間間隔を計測するためのスタート信号の出力である。-L側出力は遅延素子を介したパルスであり、ストップ信号になる。 $P_1$ はある信号パルス(前パルスと呼ぶ)の検出位置で、 $P_2$ は次に検出されたパルス(次パルスと呼ぶ)の位置を表す。信号パルスの検出位置は、 $P_1$ で検出した信号を例にとると、スタート信号の出力時刻 $t_{11}$ とストップ信号の出力時刻 $t_{12}^*$ の時間差 $\Delta t_1$ を測定することにより行う。パルスの検出位置と各パラメータを示す。

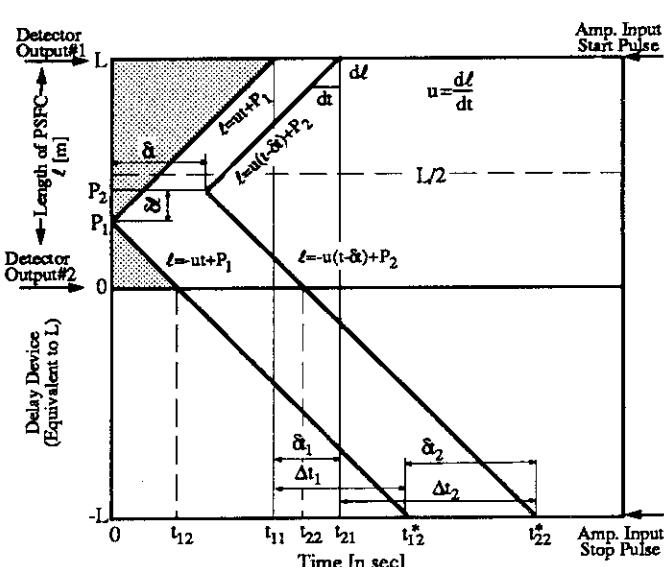


Fig. 5.5 中性子検出位置とパルス伝播時間を表した信号伝播タイムチャート

ルスの到達時刻の関係は次式で表され、検出位置 $P_1$ が求められる。

$$L = ut_{11} + P_1 \quad \dots \quad (2)$$

$$-L = -ut_{12}^* + P_1 \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

$$P_1 = (t_{12} - t_{11}) u/2 \quad \dots \quad (4)$$

上記の測定原理から、PSFCで正しい測定を行うためには、前パルスの信号伝播直線と次パルスの信号伝播直線が交叉してはならない。信号伝播直線が交叉するのは、次パルスの検出点がタイムチャート上の黒色範囲(黒く塗り潰した部分)に入った時である。Fig. 5.6に信号伝播直線が交叉した場合のタイムチャートを示す。このような場合、次パルスのスタート信号が出力される時刻 $t_{21}$ が前パルスのスタート信号の $t_{11}$ よりも早くなるため、 $\Delta t_1$ は $t_{12}^*$ と $t_{21}$ の差となり、正しい位置検出ができない。本稿では、以上のような信号伝播直線が交叉した信号パルスを不規則出力と呼ぶ。まひ型モデルを用いて、不規則出力の発生確率、即ちパルス計数誤差の割合を求める。

ランダムで検出されるパルスの計数率を  $N[\text{cps}]$  とすると、前パルスから時間  $t$  秒後の  $dt$  の間に次のパルスが検出される確率  $I_1(t)dt$  は下式で表される。

$$I_1(t)dt = Ne^{-Nt}dt \quad \dots \dots \quad (5)$$

PSFCで測定される中性子束分布は、PSFC軸方向において一定であることはまれであり、一般的には曲線分布であることが多い。そして、PSFC内で検出されるパルスの軸方向分布(以後、パルス検出分布と呼ぶ)は中性子束分布と同様になることは容易に理解される。従って、パルス計数率  $N$  は長さの関数として表され、下式により求められる。

$$N = N_0 \int_s^L f(\ell) d\ell \quad \dots \quad (6)$$

上式で  $N_0$ [cps] はパルス計数率の大きさを表す正規化定数であり、 $f(\ell)$  は  $N_0$  で正規化されたパルス検出分布を表す分布関数である。

Fig. 5.6 の  $dt$  時間に検出したパルス  $N_{dt}$  の内、 $\ell_1 \leq \ell \leq L$  及び  $0 \leq \ell \leq \ell_2$  の黒色範囲に入るパルスの数  $N_{E_1}(t)dt$ 、 $N_{E_2}(t)dt$  は夫々下式のように表される。

$$N_{E1}(t)dt = \left[ N_0 \int_t^L f(\ell) d\ell \right] dt \quad \dots \dots \dots \quad (7)$$

$$N_{E2}(t)dt = \left[ N_0 \int_0^{t_2} f(\ell) d\ell \right] dt \quad \dots \dots \dots \quad (8)$$

式及びは前パルスの検出からの経過時間  $t$  と検出位置の関数であり、下式で表される。

$$\ell_i \equiv \mu t + P_i \quad \dots \quad (9)$$

この結果、パルス計数率が  $N$  [cps] である時、不規則出力の発生確率  $R_E(N)$  は次式で表される。

$$R_E(N) = \int_{t_1}^{t_{11}} N_{E1}(t) e^{-Nt} dt + \int_{t_2}^{t_{12}} N_{E2}(t) e^{-Nt} dt \quad \dots \quad (11)$$

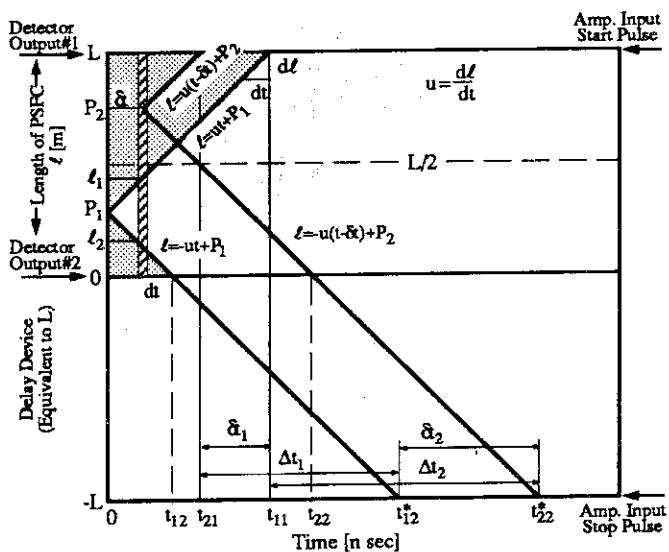


Fig. 5.6 PSFCにおいて不規則出力が発生する場合の信号伝播タイムチャート

上記の(7)~(11)式から明らかなように、PSFCの不規則出力の発生確率は、前パルスの検出位置  $P_1$  に依存することがわかる。

不規則出力によるパルス計数誤差を調べるために、PSFCの長さが1mの場合で、パルス検出分布がPSFC軸方向において一定の時と正弦波状である時の二例について、不規則出力の発生確率を計算した。計算では、夫々の条件におけるパルス計数率Nが同じとなるように  $N_0$  を設定した。Fig. 5.7に、不規則出力発生確率の計算に用いたパルス検出条件をグラフにして示した。これはパルス検出分布及びランダムに検出されるパルスの時間間隔の分布関数  $I_1(t)$  を3次元グラフで表したものである。但し、パルス検出分布がPSFC軸方向において一定の場合である。Fig. 5.8はパルス検出分布がPSFC中央で最大となる正弦波状である場合のグラフである。但し、上記のグラフでは  $t=0$

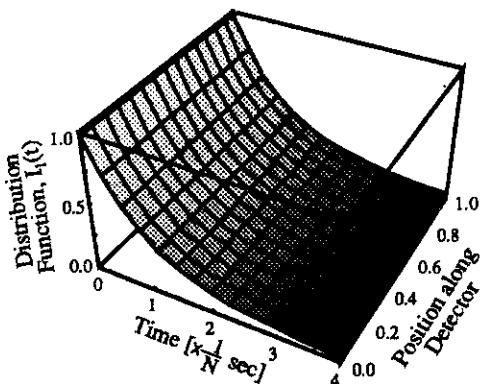


Fig. 5.7 計算に用いた PSFC 軸方向におけるパルス検出分布と時間間隔分布  
(パルス検出分布を一定とした)

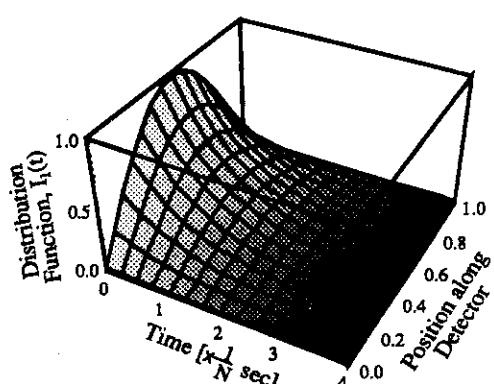


Fig. 5.8 計算に用いた PSFC 軸方向におけるパルス検出分布と時間間隔分布  
(パルス検出分布を正弦波状とした)

で、軸方向のパルス分布関数  $f(l)$  が最大値となる  $I_1(t)$  を1.0に、また、時間はパルス計数率の  $N$  で夫々正規化して示した。Fig. 5.9は、不規則出力発生の原因となる信号パルスのみを、上記と同様の手法により、3次元グラフで表したものである。パルス計数率は  $10^6 \text{ cps}$  の場合で、前パルスの検出位置は  $0.75L$  とした。

Fig. 5.10は、パルス検出分布が一定の場合において、パルス計数率によってPSFCの計数誤差がどのように変化するか、前パルスの検出位置をパラメータにとって計算した結果である。この場合のパルス計数  $N_{dt}$ 、 $N_{E1}(t)dt$  及び  $N_{E2}(t)dt$  は夫々(12)、(13)、(14)式のように表される。

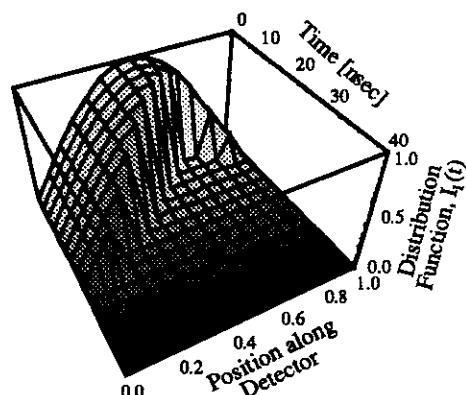


Fig. 5.9 不規則出力を生じさせるパルス検出分布の時間経過に伴う変化 (計数率  $10^6 \text{ cps}$ )

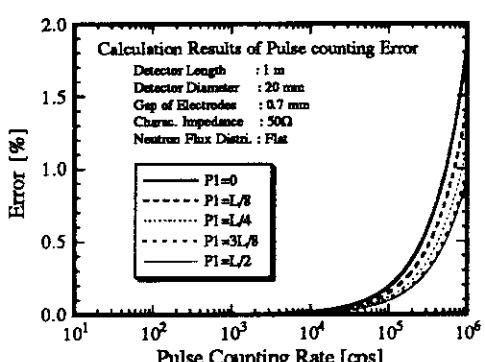


Fig. 5.10 PSFCの不規則出力パルスによる計数誤差(PSFC軸方向のパルス検出分布を一定とした場合)

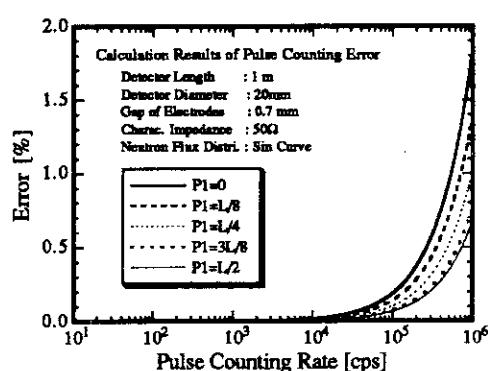


Fig. 5.11 PSFCの不規則出力パルスによる計数誤差(PSFC軸方向のパルス検出分布を正弦波状とした場合)

$$Ndt = \left[ N_0 \int_0^L d\ell \right] dt \quad \dots \quad (12)$$

$$N_{E1}(t)dt = \left[ N_0 \int_{t_1}^L d\ell \right] dt \quad \dots \quad (13)$$

$$N_{E2}(t)dt = \left[ N_0 \int_0^{t_2} dl \right] dt \quad \dots \quad (14)$$

本図から、パルス計数誤差はPSFCの端部で最大となり、中央で最小となることがわかる。パルス計数率が $10^6$  cpsにおいても、パルス計数誤差は0.94~1.86%である。また、パルス計数率が $10^5$  cps以下では、計数誤差は充分小さいことがわかる。

Fig.5.11はパルス検出分布が正弦波状である場合の不規則出力の発生確率を計算した結果である。この場合のパルス計数  $N_{dt}, N_{p_1}(t)dt, N_{p_2}(t)dt$  は下式で表される。

$$Ndt = \left[ N_0 \int_0^L \sin(kl) dl \right] dt \quad \dots \quad (15)$$

$$N_{E1}(t)dt = \left[ N_0 \int_{\ell_1}^{\ell} \sin(k\ell) d\ell \right] dt \quad \dots \quad (16)$$

$$N_{E2}(t)dt = \left[ N_0 \int_0^{t_2} \sin(k\ell) d\ell \right] dt \quad \dots \quad (17)$$

計算結果から、パルス検出分布が正弦波状であってもそれが一定の場合と同様、パルス計数誤差はPSFCの端部で最大となり、中央で最小となることがわかる。10<sup>6</sup>cpsにおけるパルス計数誤差は0.68~1.86%である。

Fig. 5.12はパルス計数率が $10^6$  cpsの条件の下で、PSFCの軸方向におけるパルス計数誤差をパルス検出分布が一定の場合と正弦波状である場合で比較したものである。右縦軸は、計算に用いたPSFC軸方向におけるパルス検出分布を示している。両計算条件を合わせるために、パルス計数率Nが同一になるように $N_0$ を設定した。図から、パルス検出分布が正弦波状である場合のパルス計数誤差は、それが一定である場合より、中央部で若干小さくなることがわかる。しかし、PSFC両端部近傍では、パルス検出分布が異なっても、パルス計数誤差はほぼ同じになることを示している。このように、パルス計数率が $10^6$  cpsの高計数率下においても、PSFCの不規則出力によるパルス計数誤差は2%以下の低い値であることがわかった。

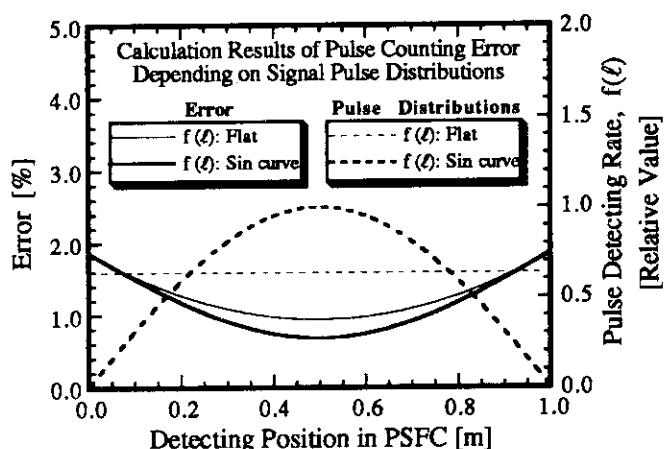


Fig. 5.12 PSFC軸方向におけるパルス計数誤差の変化。パルス検出分布が一定の場合と正弦波状の場合とで比較

## 6. まとめ

考案したPSFCを用いた中性子束分布測定系の計測回路の検討を行った。この結果、PSFC出力のような $10^{-9}$ 秒(ns)オーダの短いパルス間隔を計測するためには、パルス増幅系として高速電流パルス増幅器を採用し、立ち上がりの速いパルスで信号処理する必要があることがわかった。

PSFCでは信号パルスを両端より出力するため、パルス間隔は、中性子の検出位置により、 $-L/u$  [s]から $L/u$  [s]までの負から正の範囲で変化する。上記のような負から正にまたがる変化は電子回路を複雑にし、高速のパルス処理に制限を与えることになる。検討の結果、1個のパルス遅延素子を用いることにより、パルス間隔の計測範囲を0から $2L/u$ に変換できることがわかった。この素子による遅延時間は、信号パルスがPSFC全長を伝播するに必要な時間と同じになるように設計する必要がある。パルス遅延素子と組み合わせた出力系は、高速のパルス処理に有効であり、更に計測回路を簡単、安価にする。

PSFCによる中性子検出においては、高計数率になると、1個の中性子検出信号がPSFCより出力される前に、次の中性子によるパルスが検出され、PSFC内を複数の中性子検出信号のパルスが伝播することがある。上記の様な条件の下では、不規則出力が発生し、計数誤差を生じる。これはPSFCの作動原理に基づくものであり、避けることができない。このため、外径20mm、有感長1mのPSFCを例として、高計数率におけるパルス計数誤差を計算評価した。PSFCによるパルス計数誤差は、PSFC軸方向のパルス検出分布に依存するため、パルス検出分布が一定の場合と正弦波状の場合について計算した。この結果、 $10^5$ cps以下の計数率ではパルス計数誤差は充分低く、 $10^6$ cpsの高計数率においても計数誤差は2%以下になることがわかった。これはパルス整形後のパルス分解能がもたらす計数誤差よりも小さい値である。また、パルス検出分布の違いによるパルス計数誤差では、曲線分布の方が一定の場合よりも若干低くなることがわかった。

パルス整形では信号/雑音比(S/N比)特性の優れた擬似ガウシャン整形(微分1段、積分3段)を行うこととした。PSFCの出力電流パルス波形は、ns以下の極めて速い立ち上がり時間で、半値幅がおよそ50nsのノコギリ波である。従って、10~50nsの短い時定数によるパルス整形が可能である。パルス整形時定数を10nsにすれば、計数率が $10^6$ cpsにおいても、電子回路の不感時間によるパルス計数誤差は5%以下になることがわかった。

## 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-M 93-151, July 1993
2. 安藤彰浩、森千鶴夫、柳田勝男、瓜谷章、"位置検出型核分裂計数管における $\gamma$ 線の影響(II)"、日本原子力学会1993春の年会、F10、1993
3. 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
4. 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
5. F.L.Glesius, J.A.Williams, and C.W.Ricker , "In-core Instrumentation and Rector Core Assessment," Proceedings of a Specialists' Meeting Pittsburg, USA, 1-4 Oct. 1991.
6. K.H.Valentine, M.K.Kopp, J.A.Harter, G.C.Guerrant, W.T.Clay, G.W.Allin and C.E.Fowler, "Ultrahigh-Sensitivity Fission Counter with Transmission Line Electrode Configuration," IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-30 (1), p. 795, 1983