

JAERI - M
93-151

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

1993年7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, Tokaimura,
Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1993

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 株原子力資料サービス

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

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

山岸 秀志

(1993年7月1日受理)

原子炉々心等の中性子束分布（出力密度分布）を測定するため、高中性子束かつ高ガンマ線下においても使用できる位置検出型中性子検出器の開発が望まれている。このため、位置検出型核分裂計数管（PSFC）の開発を目的として、その構造と電気的特性の関連について理論的な考察を行った。この PSFC は、高速中性子を計測するための検出器で、信号パルスの伝播時間差により高速中性子の位置を検出する原理に基づくものである。高速中性子は原子炉内構造物に影響されないため、高速中性子検出用の PSFC を開発することにより、炉心出力密度分布をより正確に測定できる計測システムを実現することが期待できる。

本考察の結果、PSFC の陽電極をコイル形状にすることにより、PSFC のインピーダンスを信号伝送同軸ケーブルに整合させることができるために、良好なパルス伝送特性が得られること、及び、適当なパルス伝播時間が得られることから位置検出分解能の大幅な向上を期待できることがわかった。本研究により、原子炉内のような条件の下でも、高速中性子束分布をリアルタイムで測定でき、かつ高い位置検出分解能を有する原子炉出力密度分布測定システムの開発が可能である見通しを得た。

検討した PSFC では高速中性子の検出を想定しているが、この技術は熱中性子検出用としても利用できるものである。

Theoretical Study on Position Sensitive Fission Counters
Designed 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 July 1, 1993)

Structures and electric characteristics of neutron counters were studied for the development of a Position Sensitive Fission Counter (PSFC). The PSFC was designed with a structure of transmission delay line and for measurement of fast neutrons. The PSFC has two output connectors at each end-side, and the signal pulse produced by one fission reaction is transmitted to both connectors with proper delay time. Neutron positions are detected by measurement of pulse intervals.

Through the study, it was found that the PSFC could detect neutron positions with a high resolution and has an excellent transmission characteristic for signal pulses without causing pulse reflection. The reasons are that the PSFC can have an adequate transmission delay of signal pulses for detection of neutron positions and be designed to make impedance matching to a coaxial cable. The PSFC enables one to measure in-core power distributions in the reactor with high position resolution on real time. The development of PSFC for fast neutrons seems to bring about an advanced-type of in-core power distribution monitor.

Keywords: Position Sensitive Fission Counter, Neutron Detector, Reactor Monitoring System, Fast Neutron Measurement, Neutron Flux

目 次

1. 序 論	1
2. パルス伝播時間差法を用いた位置検出型核分裂計数管の作動原理	2
3. 核分裂計数管内のパルス伝播特性	3
3.1 一般的な分布定数回路の波動方程式	3
3.2 核分裂計数管の自己インダクタンス	4
3.2.1 両電極が円筒形状である場合の自己インダクタンス	4
3.2.2 陽極がコイル形状である場合の自己インダクタンス	4
3.3 核分裂計数管のキャパシタンス	5
4. 核分裂計数管のパルス伝播特性の計算結果	6
5. 結 論	9
参考文献	10

Contents

1. Introduction	1
2. Principle of Position Sensitive Fission Counters with a Structure of Transmission Delay Line	2
3. Pulse Transmission Characteristics of Fission Counters	3
3.1 Wave-equations on a Basic Distributed-constant-circuit	3
3.2 Self-inductance of Fission Counters	4
3.2.1 Self-inductance of Electrodes with a Coaxial Structure	4
3.2.2 Self-inductance of the Anode with a Coil Structure	4
3.3 Capacitance of Fission Counters	5
4. Results of Analysis on Pulse Transmission Characteristics of Fission Counters	6
5. Conclusion	9
References	10

1. 序 論

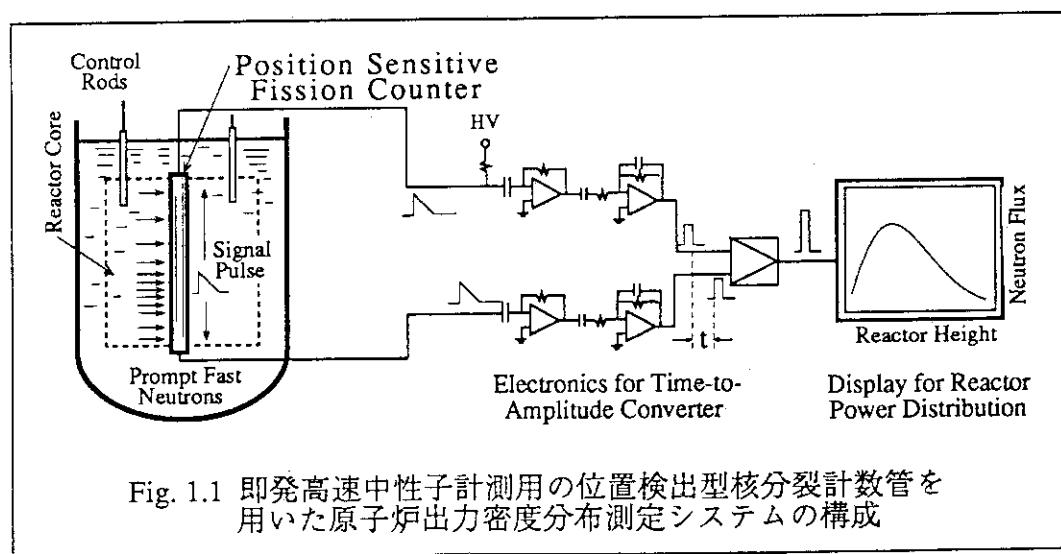
原子炉及び臨界実験装置を用いた炉物理または中性子実験等において、炉心の中性子束密度分布を測定することは重要である。また、軽水型動力炉では炉心出力密度分布を測定するための新たなセンサの開発が望まれている。

上記のことから、中性子束密度分布を測定できる位置検出型中性子検出器が研究されている。これらの位置検出型中性子検出器は、主に、比例計数管型及び核分裂計数管型の2種類であるが、その多くは比例計数管型のものである。比例計数管ではガス増幅前の電離量が少ない。その上、出力パルスの立上がりが遅いため、パルス計測には長い積分時定数を必要とする。以上のことから、比例計数管はガンマ線バックグラウンドの高いところでは使用できない。測定電子回路によって異なるが、一般的に、およそ 10^7 C/kg.s (数R/h) 以上ではガンマ線パルスのバイルアップにより、ガンマ線と中性子パルスの正確な弁別が困難になる。また、 $10^3 \sim 10^4 \text{ counts/sec. (cps)}$ 以上の高計数率での中性子測定も難しい。このため、近年、核分裂計数管型についても研究が進められ、その位置検出分解能の向上及びガンマ線の影響等についての報告がなされている。^{(1),(2)}

以上のことから、高中性子束及び高ガンマ線下で使用できるPSFCを開発するため、その理論的な検討を行った。開発目標としたPSFCは、炉心の高速中性子を計測できるもので、 10^7 counts/sec. の高計数率でも作動し、 0.1 C/kg.s ($1.4 \times 10^6 \text{ R/h}$) の高ガンマ線バックグラウンドにおいても数counts/sec. の中性子計測が可能なものである。高速中性子は原子炉及び臨界実験装置内の構造物による影響を受けないので、高速中性子を検出することにより、炉心内の出力密度分布を精度良く測定することができる。

これまでに開発された位置検出型比例計数管及び核分裂計数管の多くは、出力パルスの波高値の差によって中性子位置を検出する原理に基づくものである。これに対し、本稿で考察したPSFCは、検出器電極を遅延線(Delay Line、DL)構造に設計し、信号パルスの伝播時間差によって中性子位置を検出する原理のものである。DL構造の採用により、位置検出分解能の飛躍的な向上が期待できる。更に、PSFCは高速パルス処理に適しているため、これを開発することにより、高中性子束及び高ガンマ線を有する原子炉及び臨界実験装置の炉心内中性子束密度分布をリアルタイムで測定が可能となる。

Fig. 1.1にPSFCを用いた原子炉内出力密度分布計測システムの構成を示した。



2. パルス伝播時間差法を用いた位置検出型核分裂計数管の作動原理

従来の位置検出型比例計数管の作動原理は、Fig.2.1に示すように、陽極ワイヤに数 $10\text{k}\Omega/\text{cm}$ の超高抵抗線を用い、両コネクタより出力される信号パルスの波高差から、中性子位置を検出するものである。また、両出力端パルスの立上がり時間の違いによって位置を検出する方法もある。しかしながら、上記の検出方法では信号パルスの増幅に電荷型パルス増幅器を用いるため、パルス整形に比較的長い時定数を必要とする。さらに比例計数管ではガス増幅を利用していているため、ガンマ線バックグラウンドが高くなるとパルスのバイブルアップが生じやすい欠点がある。

このため本稿では、原子炉内のような高ガンマ線下でも使用できる位置検出型中性子検出器を開発することを目標として、核分裂計数管方式の位置検出型中性子検出器について検討を行った。高中性子束及び高ガンマ線下での作動を可能にするため、計測系は高速パルスの処理が行えるように電流パルス駆動方式とした。また、中性子の位置検出は信号パルスの伝播時間差によって行う方法を採用した。

従来の核分裂計数管が有する同軸円筒構造を用い、伝播時間差方式により中性子位置を検出する場合の作動原理をFig.2.2に示す。中性子による核反応に伴って検出器内に発生した電流パルスは、陽極(内電極)に沿って両出力端方向にそれぞれ伝播するため、出力パルス間に伝播距離に比例した時間差が生じる。従って、このパルス時間差を計測することにより、中性子の反応位置を検出することができる。この原理を用いる場合、検出器内のパルス伝播速度が重要であり、これは検出器構造が有する分布静電容量と自己インダクタンスによって決定される。しかしながら、同軸円筒構造ではパルス伝播速度が極めて速く、伝播時間差から精度よく位置検出することは困難である。

上記の問題点を解決するため、Fig.2.3に示すように、計数管の陽電極をコイル構造にした新たなPSFCを考案した。PSFCでは、検出器構造を分布定数回路とみなし、最適なパルス伝播特性が得られるように設計する。この結果、検出器自体をDelay Line (DL)として取り扱うことができる。このDL構造の採用により、パルス伝播時間を必要な大きさに設計でき、位置検出分解能を飛躍的に上げることが可能となる。また、信号伝送ケーブル及びパルス計測系とのイビーダンス整合をとることもできるため、パルスの反射をなくし、良好なパルス伝播特性が得られる利点がある。

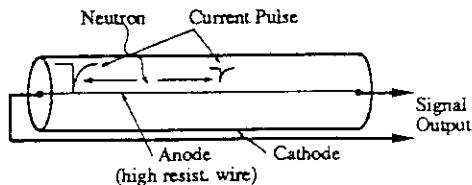


Fig. 2.1 従来の位置検出型比例計数管の作動原理

$$\begin{aligned} [\Phi_n &< \text{約}10^4 \text{n/cm}^2 \cdot \text{s}] \\ [\Phi_\gamma &< 2 \sim 200 \text{nC/kg} \cdot \text{s}] \end{aligned}$$

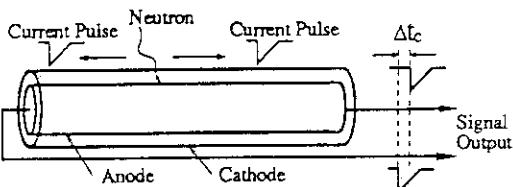


Fig. 2.2 従来の核分裂計数管の構造を位置検出型に応用した場合

$$\begin{aligned} [\Delta t_c &: \text{小さいため計測困難}] \\ [Z_0 &: \text{整合不可}] \end{aligned}$$

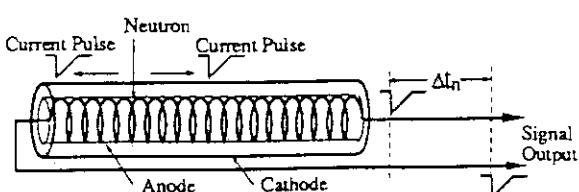


Fig. 2.3 開発目標のパルス遅延差法を用いた位置検出型核分裂計数管

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

3. 核分裂計数管内のパルス伝播特性

本稿で提案するPSFCは、信号パルスの伝播時間差から中性子位置を検出する原理に基づくものである。このような中性子検出器を開発する場合、予め、計数管内における信号パルスの伝播特性を解析しておく必要がある。

Fig.3.1に示すように、核分裂計数管も、電気回路的には抵抗R、インダクタンスL、漏洩コンダクタンスG及びキャパシタンスCから構成される分布定数回路と見なすことができる。

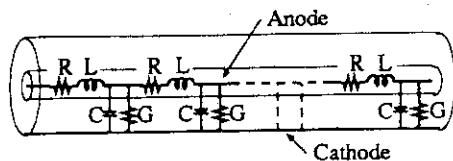


Fig. 3.1 核分裂計数管の分布定数等価回路

3.1 一般的な分布定数回路の波動方程式

核分裂計数管内のパルス伝播特性を調べるため、Fig.3.2に示すような基本的な分布定数回路を考える。この分布定数回路から(3.1)及び(3.2)式のような連立微分方程式が得られる。

分布定数回路が一様線路で無損失線路($R=G=0$)と見なせる場合は、右記の連立微分方程式から式(3.3)及び(3.4)に示す波動方程式が得られる。核分裂計数管の場合、電極はアルミニウムまたは銅で製作されるため、電極の直列抵抗は非常に小さい。また、電極間には電離ガスが封入されるため、漏洩コンダクタンスGはキャパシタンスCによるサセプタンスに比べ極めて小さく、無視して差しつかえない。このことから、核分裂計数管は無損失線路と見なせる。

上記の波動方程式から、分布定数回路におけるパルス伝播速度 u [m/s]及び特性インピーダンス Z_o [Ω]が求められ、それぞれ(3.5)及び(3.6)式のように表される。また、単位長さ当たりのパルス伝播時間 τ [s/m]は、(3.7)式に示すように、速度 u から求めることができる。

$$u = \frac{d\ell}{dt} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \dots \dots \dots \quad (3.5)$$

$$Z_o = \frac{dV}{dI} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \dots \dots \dots \quad (3.6)$$

$$\tau = \frac{1}{u} = \sqrt{LC} \quad \dots \dots \dots \quad (3.7)$$

$$\gamma = \frac{Z_c - Z_o}{Z_c + Z_o} \quad \dots \dots \dots \quad (3.8)$$

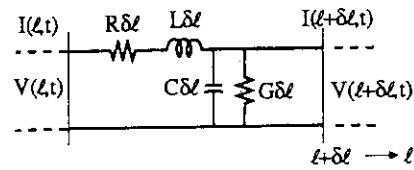


Fig. 3.2 分布定数回路における一様線路の等価モデル

$$-\frac{\partial V(\ell, t)}{\partial \ell} = RI(\ell, t) + L \frac{\partial I(\ell, t)}{\partial t} \quad \dots \dots \dots \quad (3.1)$$

$$-\frac{\partial I(\ell, t)}{\partial \ell} = GV(\ell, t) + C \frac{\partial V(\ell, t)}{\partial t} \quad \dots \dots \dots \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial^2 V(\ell, t)}{\partial \ell^2} = LC \frac{\partial^2 V(\ell, t)}{\partial t^2} \quad \dots \dots \dots \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial^2 I(\ell, t)}{\partial \ell^2} = LC \frac{\partial^2 I(\ell, t)}{\partial t^2} \quad \dots \dots \dots \quad (3.4)$$

パルスの反射係数 γ は、検出器とケーブルの特性インピーダンスをそれぞれ Z_c 及び Z_o とすると(3.8)式のように表せる。

核分裂計数管が有するパルス伝播速度、伝播時間、特性インピーダンス及びパルス反射係数等のパルス伝播特性は、左記に示した計算式によって知ることができる。従って、核分裂計数管のパルス伝播特性を知るためにには、分布定数回路が有するインダクタンス及びキャパシタンスを求める必要がある。

3.2 核分裂計数管の自己インダクタンス

本項で考察する核分裂計数管は、内側電極を陽極、外側電極を陰極とし、それらが同軸構造をなしているとする。計算では陽極と陰極が共に円筒の場合、及び陰極は円筒であるが陽極がコイル形状の場合の2種類についてのインダクタンスを考察する。

3.2.1 両電極が円筒形状である場合の自己インダクタンス

Fig. 3.3に示すような同軸円筒の断面構造をした陽極の単位長さ当たりの自己インダクタンス L_p [H/m]を求める。両電極には反対方向に軸方向電流が流れている場合、陽極の自己インダクタンスは陽極の内部インダクタンスと外部インダクタンスの和となる。核分裂計数管出力パルスのような高周波電流では、表皮効果により内部インダクタンスは無視できる。この結果、自己インダクタンス L_p は次式で表される。

$$L_p = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad \dots \dots \quad (3.9)$$

ここで、 μ_0 は $4\pi \times 10^{-7}$ [H/m]で真空中の透磁率であり、 r_1 と r_2 は陽極及び陰極の半径である。

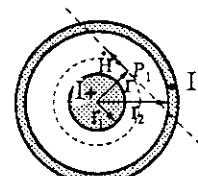


Fig. 3.3 同軸円筒型の軸断面構造

3.2.2 陽極がコイル形状である場合の自己インダクタンス

Fig. 3.4及び3.5に示すような軸断面と側断面形状を有する陽極の場合、コイルの巻きピッチ ℓ/N がコイル円周長さより十分小さいならば、同軸円筒形状による自己インダクタンスは無視できる。従って、陽極の自己インダクタンスはコイルによるインダクタンスとして扱える。

コイルによる自己インダクタンスを求めるため、Fig. 3.6に示すようなコイルを想定し、コイル軸上P点の磁界の強さ H [AT/m]を求める。コイル径を $2a_1$ 、長さ ℓ 、単位長さ当たりのコイル巻き数を $n=N/\ell$ とし、電流 I が流れているとする。コイル微小部 dz は、Fig. 3.7に示すようにコイル巻き数が ndz で、電流が $nIdz$ の円形コイルと考えることができる。

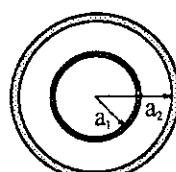


Fig. 3.4 コイル陽極型の軸断面構造

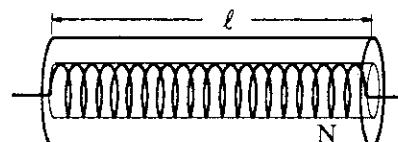


Fig. 3.5 コイル陽極型の側断面構造

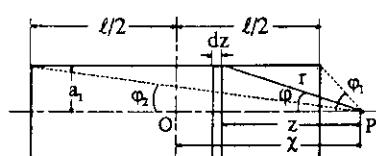


Fig. 3.6 コイル軸上P点の磁界の強さ

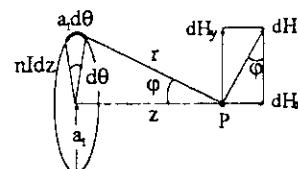


Fig. 3.7 微小コイルによる磁界の強さ

円形コイルによる軸上P点の磁界の強さ dH は、ビオサバールの法則から、次式で表される。

$$dH = \frac{nIdz \sin(\pi/2)}{4\pi r^2} a_1 d\theta = \frac{nI}{4\pi r^2} a_1 d\theta dz \quad \dots \dots \quad (3.10)$$

上式で、 $a_1 d\theta$ の積分は $\int_0^{2\pi} a_1 d\theta = 2\pi a_1$ で円周長さとなる。 dz は $dz = -a_1 \frac{1}{\sin^2 \phi} d\phi$ である。

また、Fig.3.7から、コイル軸方向の磁界の強さは $dH_x = dH \sin\phi$ である。従って、 H_x は ϕ_1 から ϕ_2 まで積分することにより求められるから、

$$H_x = \frac{-nI}{2} \int_{\phi_1}^{\phi_2} \sin\phi d\phi \quad \dots \quad (3.11)$$

で表される。 $\cos\phi_1$ 及び $\cos\phi_2$ は Fig.3.6 より

$$\cos\phi_1 = -\frac{\ell/2 - \chi}{\sqrt{a_1^2 + (\ell/2 - \chi)^2}}, \quad \cos\phi_2 = \frac{\ell/2 + \chi}{\sqrt{a_1^2 + (\ell/2 + \chi)^2}}$$

であるから、P点の磁界の強さ H_x は次式のようになる。

$$H_x = \frac{nI}{2} \left\{ \frac{\ell/2 + \chi}{\sqrt{a_1^2 + (\ell/2 + \chi)^2}} + \frac{\ell/2 - \chi}{\sqrt{a_1^2 + (\ell/2 - \chi)^2}} \right\} \quad \dots \quad (3.12)$$

ここで、コイルが十分長く、 $\chi \ll \ell$ 、 $a_1 \ll \ell$ である場合は、

$$H_x = nI \quad \dots \quad (3.13)$$

となる。位置検出型核分裂計数管は、通常、陽極半径 a_1 が 10mm 以下で、長さ ℓ が 2000mm 以上で製作されるため、(3.13)式を用いることができる。

ところで、磁束 $d\Phi$ は、コイル軸断面の微小面積を dA とすると

$$d\Phi = \mu \mu_0 H_x dA \quad \dots \quad (3.14)$$

で表され、 μ はコイル芯の比透磁率で、気体の場合は $\mu=1$ である。また、 $\int dA = \pi a_1^2$ はコイルの断面積である。コイル単位長さ当たりの磁束鎖交数 ϕ は、コイル巻き数と磁束の積で、 $\phi = n\Phi$ であるから、コイル単位長さ当たりのインダクタンス L_c は次式で表される。

$$L_c = \frac{\phi}{I} = \mu \mu_0 \pi a_1^2 n^2 \quad [H/m] \quad \dots \quad (3.15)$$

3.3 核分裂計数管のキャパシタンス

Fig.3.3に示すような断面構造で長さ ℓ の同軸円筒が有するキャパシタンス C は次式で表される。

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0 \ell}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad [F] \quad \dots \quad (3.16)$$

ただし、 ϵ_0 は真空中または空間における誘電率で $\epsilon_0 = \frac{10^7}{4\pi c^2} = \frac{10^{-9}}{36\pi} [F/m]$ である。

コイル陽極型の場合では、コイル導体間に絶縁層を設ける必要がある。そこで、導体幅を w_1 、絶縁層の厚さを w_2 とし、 $k = w_2/w_1$ とおくと、コイル陽極型のキャパシタンスは(3.17)式で計算できる。しかし、実際には絶縁層の厚さは極めて薄いため、 $k \ll 1$ であり、絶縁層の厚さを考慮しなくとも実用上問題ない。

$$C = \frac{1}{(1+k)} \frac{2\pi\epsilon_0 \ell}{\ln \frac{a_2}{a_1}} \quad [F] \quad \dots \quad (3.17)$$

4. 核分裂計数管のパルス伝播特性の計算結果

前節で導いた諸計算式を用いて、核分裂計数管のパルス伝播特性を計算した。一般のパルス伝送同軸ケーブル及び計測電子回路においては、パルス伝送効率を最大にするため、特性インピーダンスを50、75または93Ωに選定する。このため、核分裂計数管のパルス伝播特性についても、上記3種のインピーダンスをパラメータにして計算した。また、従来の同軸円筒型核分裂計数管との比較も行った。

Fig. 4.1は、核分裂計数管の陰極外径を変えた場合のキャパシタンスと陽極の自己インダクタンスを計算し、同軸円筒型及びコイル陽極型で比較したものである。計算では、電極間隔を0.5mmに固定した。コイル陽極型核分裂計数管では特性インピーダンスを50、75及び93Ωをパラメータとした。コイル陽極型のキャパシタンスの計算では、コイル絶縁層の厚さを無視したため、同軸円筒型の場合と同じ値になった。計算結果は、特性インピーダンスを整合させるためには、陰極が太くなるに従って大きな陽極インダクタンスが必要であることを示している。また、高いインピーダンスほど大きい陽極インダクタンスが必要であることがわかる。同軸円筒型の自己インダクタンスは、コイル陽極型の場合とは逆に、陰極外径に反比例することを示している。

Fig.4.2は、各特性インピーダンスを得るために必要な陽極コイルの巻き数を、陰極外径の関数として計算した結果である。Fig.4.1では、陰極外径が大きくなるに従い、必要インダクタンスは増加することがわかった。しかし、Fig.4.2では陽極コイルの巻き数は、逆に、指數関数的に少なくなることを示している。これは、電極間隔を固定したため、陰極外径を大きくすると陽極コイルの断面積も大きくなり、この結果、少ないコイル巻き数でも大きなインダクタンスが得られるからである。特性インピーダンスが93Ωの場合、陰極外径が10mmでは239[T/m]、外径30mmでは130[T/m]のコイル巻き数が必要である。

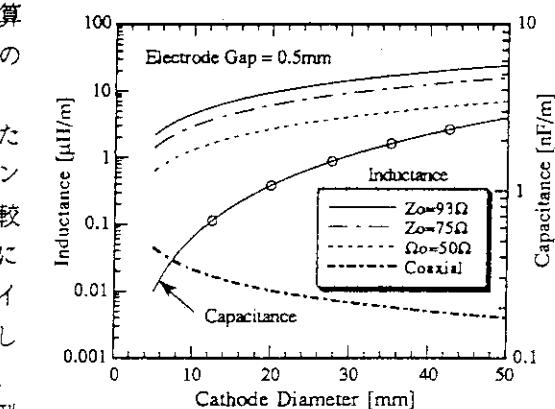


Fig. 4.1 陰極外径を変えた時のインダクタンス及びキャパシタンスの変化

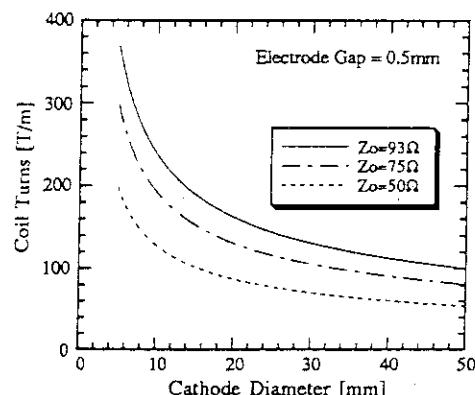


Fig. 4.2 陰極外径を変えた時に必要となる陽極コイルの巻き数

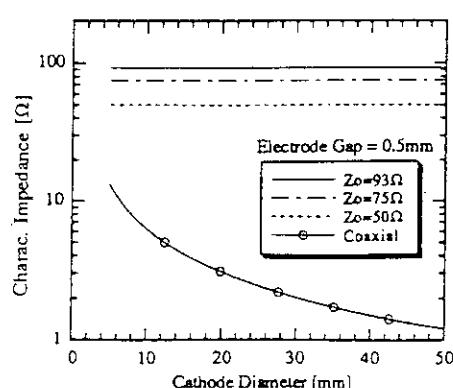


Fig. 4.3 陰極外径を変えた場合の特性インピーダンス

Fig.4.3は、陰極外径を変えた場合の、コイル陽極型と同軸円筒型の特性インピーダンスを比較したものである。コイル陽極型では、どのような陰極外径においても、ケーブルの特性インピーダンスと整合をとることが可能であることを示している。一方、同軸円筒型では、陰極外径が大きくなるに従い特性インピーダンスは急

激に低下することがわかる。この値は陰極と陽極の半径比によって決定されるため、現実的な同軸円筒型核分裂計数管の構造では、信号伝送ケーブルのインピーダンスと整合をとることができない。

Fig.4.4は、コイル陽極型について、電極間隔を変えた時のキャパシタンスと必要なコイル巻き数を計算した結果である。特性インピーダンスは 93Ω とし、陰極外径は10、20及び30mmについて計算した。電極間隔を大きくするに従い、キャパシタンスは指数関数的に小さくなり、コイル巻き数も同様の傾向を示す。しかし、陰極外径10mmの場合のコイル巻き数は、電極間隔2mmで最小となり、それ以上で急激に増加する傾向を示している。これは、コイル断面積の減少に伴う自己印

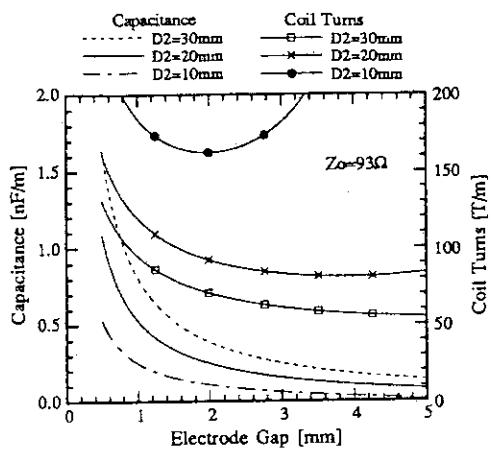


Fig. 4.4 電極間隔を変えた場合のキャパシタンスと陽極コイル巻き数の計算値

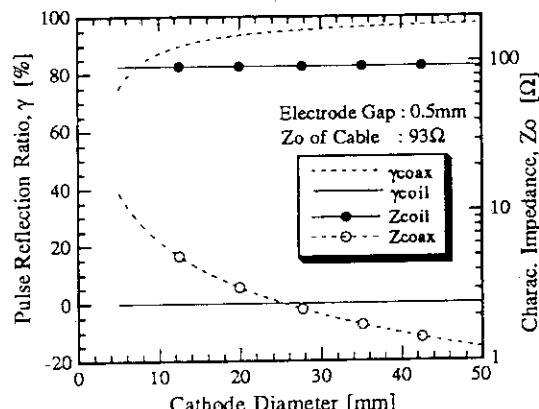


Fig. 4.5 陰極外径を変えた時の特性インピーダンスとパルス反射率の変化

ンダクタンスの低下をコイル巻き数により補う必要があるからである。陰極外径20mm、電極間隔0.5mmで特性インピーダンスが 93Ω の場合、単位長さ当たりのキャパシタンスは 1.1nF/m 、コイル巻き数は 163T/m である。

Fig.4.5は陰極外径を変えた時の特性インピーダンスとパルスの反射率を計算し、同軸円筒型とコイル陽極型とを比較した図である。検出器信号を同軸ケーブルで伝送する場合、検出器とケーブルの特性インピーダンスが整合していないければ、接合部でパルスの反射が生じる。このため、同軸ケーブルの特性インピーダンスが 93Ω 、電極間隔が0.5mmの条件で、接合部におけるパルスの反射率を計算し、比較した。

コイル陽極型の場合、陰極外径が変わっても、特性インピーダンスは 93Ω で一定である。従って、接合部における反射はゼロである。一方、同軸円筒型の場合、陰極外径が大きくなるに伴って、特性インピーダンスは急激に低下する。この結果、接合部でのパルスの反射も急激に増大する。陰極外径が10、20及び30mmの場合、パルスの反射率はそれぞれ87、94及び96%である。従って、同軸円筒型では、大きな反射が生じて、正常な出力パルスが得られないことがわかる。

以上の計算では、核分裂計数管の特性インピーダンスを信号伝送ケーブルと整合させるために必要な検出器構造について考察した。本稿で提案する位置検出型核分裂計数管は、両出力コネクタからの電流パルスの時間差によって、中性子の反応位置を検出する方式のものである。このため、核分裂計数管の位置検出分解能を決定するパルス伝播時間について考察する。

Fig.4.6は、核分裂計数管内における出力電流パルスの伝播時間を陰極外径の関数として計算し、比較したものである。電極間隔は0.5mmとした。同軸円筒型では単位長さ当たりのパルス伝播時間は、陰極外径に係わらず一定となり、 3.3 ns/m である。コイル陽極型では、パルス伝播時間は陰極外径に比例して長くなる。また、特性インピーダンスが50、75、 93Ω と大きいほどパルス伝播時間は長くなることを示している。特性インピーダンスが 93Ω で、陰極外径が10、20及び30mmの時のパルス伝播時間は、それぞれ49、100、153 ns/mである。陰極外径が20mmで特性イン

ピーダンスが50及び75Ωでは、パルス伝播時間はそれぞれ54及び81ns/mである。このように、核分裂計数管の陽極をコイル形状にしてインピーダンス整合をとった場合、同軸円筒型に比べ、大幅に長いパルス伝播時間が得られることがわかる。

Fig.4.7は、電極間隔を変えた時のパルス伝播時間の変化を計算し、比較したものである。計算条件は特性インピーダンスが93Ω、陰極外径が10、20及び30mmである。同軸円筒型では、パルス伝播時間は電極間隔に関係なく3.3ns/mで一定である。従って、Fig. 4.5及び4.6の計算結果から、同軸円筒型のパルス伝播時間は陰極外径及び電極間隔に係わらず一定であることがわかる。

一方、コイル陽極型のパルス伝播時間は、電極間隔が大きくなるに従い、急激に減少することを示している。また、同じ電極間隔である場合、陰極外径が10、20、30mmと大きくなるに従い、パルス伝播時間は長くなることを示している。例えば、陰極外径が20mmで、電極間隔が0.5、1及び2mmの時のパルス伝播時間は、夫々100、49、23ns/mである。従って、電極間隔が0.5mmの場合、コイル陽極型では同軸円筒型に比べ、約30倍のパルス伝播時間が得られることがわかる。

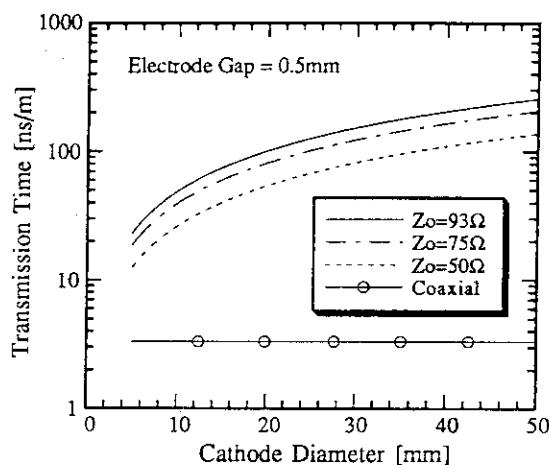


Fig. 4.6 陰極外径を関数としたパルス伝播時間の計算値

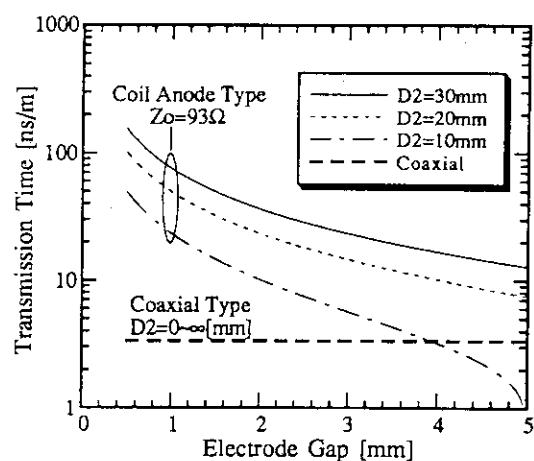


Fig. 4.7 検出器電極間隔を関数としたパルス伝播時間の計算値

5. 結 論

原子炉内のような高中性子束及び高ガンマ線々量率の下で、中性子束分布をリアルタイムで測定できる位置検出型中性子検出器が必要とされている。このため本稿では、パルス時間差を利用した位置検出型核分裂計数管の可能性について、理論的な検討を行った。上記の計数管では、高速電流パルスの反射及び伝播速度が位置検出分解能を決定するため重要である。前節で示した計算結果の内、核分裂計数管の外径(陰極外径)を20mm、電極間隔を0.5mmとした場合を代表例として、その時のパルス伝播特性をTable 5.1にまとめて示した。

従来の同軸円筒型核分裂計数管では、特性インピーダンスは電極半径の比で決定され、その値が極端に低いため、パルス計測系のインピーダンスと整合をとることができない。この結果、計数管の両出力端で信号パルスに対して約90%波高の反射波が生じて、パルス計測に障害をもたらす。しかし、核分裂計数管の陽極をコイル構造にすることによって、核分裂計数管の特性インピーダンスを自由に選べるようになり、パルス計測系インピーダンスと整合をとることが可能となった。この結果、パルス計測の障害となる反射波の問題を完全に解決できることがわかった。

次に、位置検出分解能に決定的な影響を与えるパルス伝播時間について考える。同軸円筒型の場合、単位長さ当たりのパルス伝播時間は、陰極外径及び電極間隔に関係なく3.3ns/mとなり非常に速い。パルス時間差から中性子位置を検出する場合、同軸円筒型ではパルス伝播時間が非常に速いため、実用的な位置検出分解能を有した計測システムを構成することは困難である。一方、コイル陽極構造では特性インピーダンスを93Ωに選定した時、パルス伝播時間は100ns/mとなる。50又は75Ωに選定した場合はそれぞれ54、81ns/mである。これらのパルス伝播時間は同軸円筒型の場合に比べて16~30倍となる。この結果、計測系のパルス間隔分解能を0.5ns程度と余裕をもつて設計しても、5mm程度の高い位置検出分解能が期待できる。同軸円筒型では、分解能は150mm以上となり、実用的な位置分解能が得られない。このように、陽極をコイル構造にすることにより、位置検出分解能を大幅に上げられることがわかった。

以上の考察から、パルス時間差法を用いた位置検出型核分裂計数管の陽極をコイル構造にすることによって、良好なパルス伝送特性と極めて高い位置検出分解能が得られることがわかった。この結果、原子炉内のような高中性子束かつ高ガンマ線の下においても、炉心出力密度分布をリアルタイムで精度良く測定できる計測システムの開発が可能である見通しが得られた。

本稿で考察した位置検出型核分裂計数管は高速中性子を計測することを目標にしたものであるが、同原理は熱中性子検出用の核分裂計数管にも適用できるものである。

Table 5.1 コイル陽極型と同軸円筒型核分裂計数管におけるパルス伝播特性の比較

Items	Coil Anode Type			Coaxial Type	
	Characteristics Impedance				
	50Ω	75Ω	93Ω		
Impedance Matching	Possible	Possible	Possible	Impossible (3.1Ω)	
Transmission Time(ns/m)	54	81	100	3.3	
Transmission Time Ratio	16	24	30	1.0	

Cathode Diameter : 20mm
Electrode Gap : 0.5mm

参考文献

1. 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 γ 線の影響(II)"、日本原子力学会1993春の年会、F10、1993
2. 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
3. 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
4. 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.
5. 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 Trasmission Line Electrode Cofiguration," IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-30 (1), p. 795, 1983

7. おわりに

原子力船「むつ」の原子炉プラント動特性を評価する目的で、疑似不規則2値信号を用いた動特性同定実験を計画し、その第1弾として第1次実験航海中の1991年3月4日に実験方法や実験条件の調査・確認を主目的とした第1回の実験を実施した。

実験では、静穏海域、炉出力50%のプラント運転条件下で、制御棒、主機操縦弁の疑似不規則操作による反応度外乱および負荷外乱を印加し、各種プラント信号応答を測定した。この結果、事前に検討した方法・条件により支障なく疑似不規則外乱を印加でき、プラント応答も予想通り安定で、測定データも動特性同定に十分使用できることが確認できた。これらの成果は、その後1991年8月と9月に行った第3次実験航海での本番の実験の成功に結び付いた。

動特性解析結果については、今後、後続の報告書にまとめる予定である。また、測定データは公開される予定で、現在準備が進められている。

謝辞

実験の遂行に当たり、疑似不規則外乱印加実験に理解を示し種々の協力を惜しまなかった「むつ」本船の渡辺機関長(当時)、ならびに疑似不規則外乱の手動操作入力に際して練習を重ねて実験を成功に導いた「むつ」運転班(当時)の野尻直長、制御棒操作の小河原氏、主機操縦レバー操作の阿比留氏に謝意を表します。また、実験実施に当たり協力を頂いた原子力船試験課の各位に感謝します。

参考文献

- 1) 日本原子力研究所原子力船計画部、原子力船研究開発の現状 1992、日本原子力研究所、1992.
- 2) Ball, R. M. and Batch, M. L., "Measurement of Noise in Three Pressurized-Water Reactors", Uhrig, R. E. (Ed.), "Noise Analysis in Nuclear Systems", TID 7679 pp. 387-403, 1964.
- 3) Kolb, M., "Rauschanalytische Identifikation des Systems See/Schiff/Reaktor am Beispiel der "OTTO HANN", kest berichte Nr. 31, Verlag Karl Thieme, Munchen, 1983.
- 4) 北村正晴、松原邦彦、尾熊律雄：J P D R - II の動特性同定実験－自己回帰モデリングの適用－、JAERI-M 7580 (1978年3月)