

JAERI-Tech  
2000-037



JP0050376



位置検出型核分裂計数管計測システム  
の性能検証試験

2000年3月

山岸秀志・池田裕二郎・伊藤 浩  
角田恒巳・中川正幸・岩村公道  
田畠広明\*・浦上正雄\*

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、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

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

## 位置検出型核分裂計数管計測システムの性能検証試験

日本原子力研究所東海研究所中性子科学研究中心

山岸 秀志・池田 裕二郎・伊藤 浩

角田 恒巳<sup>+</sup>・中川 正幸<sup>+</sup>・岩村 公道<sup>+</sup>

田畠 広明\*・浦上 正雄\*

(2000年3月6日 受理)

原子炉の圧力容器近傍のような高中性子束且つ高ガンマ線量率の環境下においても作動可能で、高い位置検出分解能を有する位置検出型核分裂計数管（P S F C）の開発を進めている。P S F Cは計数管の両端から出力される信号パルスの遅延差から中性子の検出位置を計測する原理の中性子検出器である。P S F Cを用いた中性子束分布計測システムの性能を検証するため、ソレノイド電極(有効長 1000mm)を組込んだP S F C模擬体(外径 25mm)と計測電子回路を試作し、その特性試験を実施した。試験の結果、試作した中性子束分布計測システムは、位置検出分解能が半値幅で 7.5mm 以下であること、及びパルス計数レンジが  $1\sim2\times10^6$ cps の 6 枠以上あることが確認された。

---

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

+ エネルギーシステム研究部

\* 日本原子力発電(株)

Investigation of a Neutron Measuring System with  
a Position-sensitive-fission-counter

Hideshi YAMAGISHI, Yujiro IKEDA, Hiroshi ITOH  
Tsunemi KAKUTA\*, Masayuki NAKAGAWA\*, Takamichi IWAMURA\*  
Hiroaki TABATA\* and Masao URAKAMI\*

Center for Neutron Science  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received March 6, 2000)

A position-sensitive fission counter (PSFC) has been under development. The PSFC is a base on a delay-line method. One of applications for the PSFC is a power distribution monitoring for a pressurized water reactor in electric power plants. A mock-up of the PSFC with a solenoid electrode and electronics were manufactured for investigation of the performances. The outer diameter of the cathode and the active length of the solenoid electrode are 25mm and 1000mm, respectively. After the investigation, a position-resolution of less than 7.5mm as a FWHM and a pulse counting range of more than 6 decades from 1 to  $2 \times 10^6$ cps were established with the measuring system.

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

---

\* Department of Nuclear Energy System

\* The Japan Atomic Power Company

## 目 次

1. 序 論 -----	1
2. 位置検出型核分裂計数管模擬体の電気特性試験 -----	3
2.1 位置検出型核分裂計数管模擬体の試作 -----	3
2.2 位置検出型核分裂計数管模擬体の電気特性 -----	3
3. P S F C 計測システムの性能試験 -----	7
3.1 位置検出分解能の測定試験 -----	7
3.2 P S F C 計測システムの計測レンジ検証試験 -----	8
4. 結 論 -----	11
謝 辞 -----	12
参考文献 -----	12

## Contents

1. Introduction -----	1
2. Investigation of Electric Characteristics of a Position-sensitive Fission Counter Using a Mock-up -----	3
2.1 Manufacturing a Mock-up of the Position-sensitive Fission Counter -----	3
2.2 Electric Characteristics of the Mock-up of the Position-sensitive Fission Counter -----	3
3. Performances of a Neutron Measuring System with the PSFC -----	7
3.1 Measurement of the Position Resolution -----	7
3.2 Measurement of a Pulse Counting Range Provided by the Neutron Measuring System with the PSFC -----	8
4. Conclusion -----	11
Acknowledgment -----	12
References -----	12

This is a blank page.

## 1. 序 論

高い位置検出分解能と広い計測レンジを有し、原子炉圧力容器近傍のような高ガンマ線々量率下においても作動する位置検出型核分裂計数管(P S F C)を目標にその開発を進めている。位置検出型中性子検出器の研究分野では、これまでに、出力パルス波高減衰方式の位置検出型比例計数管及び核分裂計数管<sup>(1-3)</sup>、パルス遅延差方式の位置検出型核分裂計数管<sup>(4, 5)</sup>の開発研究が行われている。出力パルス波高減衰方式では、比較的簡単な構造である優位性を持つが、高抵抗電極の長期中性子照射に対する安定性に課題があること、また、電荷パルス計測を必要とし、原子炉計装等に要求される高ガンマ線々量率下での作動、広い計測レンジ及び長尺信号ケーブル等の厳しい条件においては充分な性能が得られない。パルス遅延差方式では位置分解能が 22~300mm 程度であり、充分な性能が得られていない。

Fig.1.1 に我々が開発を進めている P S F C の作動原理を示す。P S F C では、ソレノイド構造の陽極を採用して高速電流パルス計測を行うことにより、高い位置検出分解能と広い計測レンジの両方を実現しようとするものである。P S F C は信号パルスの発生メカニズムにおいては核分裂計数管と何ら変わることがないため、中性子の位置検出ができる構造に設計しても、下記のような優位性を持っている。(1) P S F C の電極に塗布する核分裂性物質を変えることによって、熱中性子あるいは高速中性子(1MeV 以上)のどちらかの計測を選択することができる。(2) 電流信号パルスが高速(パルス幅が極めて狭い)であることから、10<sup>6</sup>cps 以上の高計数率まで作動させることができ、6 枝以上の中性子計測レンジを実現可能である。(3) 中性子による電流信号パルスが大きく高速であることから、2.6x10<sup>-4</sup>C/kg/h (10<sup>6</sup>R/h) 以上の高いガンマ線々量率下においても、数 cps 相当の低い中性子束を計測できる。(4) 信号計測は電流パルスで行うことができるため、検出器からプリアンプまでのケーブル長を 50 m 程度まで長くしても、充分作動する。(5) P S F C は、印加電圧 150V 程度で

充分な出力パワーが得られるので、500°C 以上の高温作動の検出器も開発可能である。上記のような優位性は、P S F C を原子炉等において実用化する上で、極めて重要なことである。

以上のような特徴

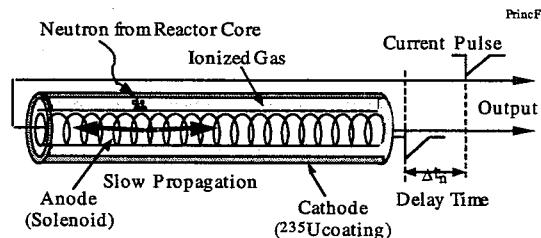


Fig.1.1 Principle of a position-sensitive fission counter

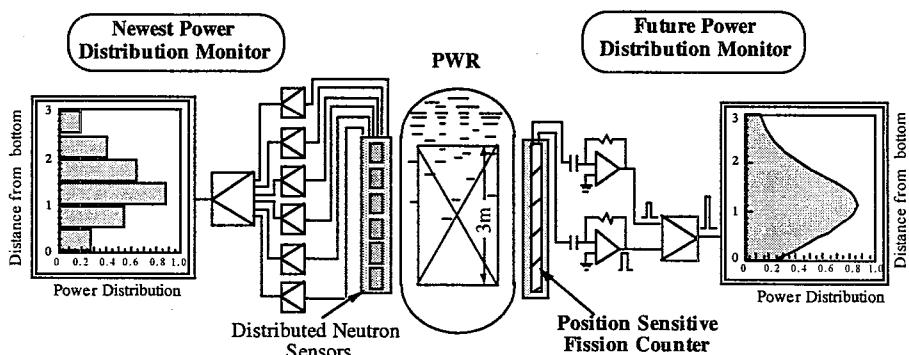


Fig.1.2 Power Distribution Monitor (PDM) with a position-sensitive fission counter for future Pressurized Water Reactors (PWRs) as compared with the newest PDM in PWRs

を持った P S F C の応用例を Fig.1.2 及び Fig.1.3 に示した。Fig.1.2 は、最新鋭の加圧水型原子炉(PWR)に採用されている出力分布計測システムと、P S F C を PWR の出力分布計測システムに応用した場合を比較した概念図である。最新鋭の PWR では、原子炉軸方向の出力分布の計測を行うため、図左側に示すように 4 ~ 6 本の中性子検出器を原子炉圧力容器の側壁に配置して、夫々の出力信号から分割的に出力分布を計測する方法が用いられている。一方、P S F C を採用した出力分布計測システムでは、図右側に示すように、1 本の検出器で連続した出力分布をリアルタイムで計測可能になる。さらに、高速中性子を検出する P S F C を採用すれば、炉心の出力分布情報をより高精度で得ることができる。また、本システムでは計測系統数が少なくて済むことから、原子炉格納容器に設ける信号ケーブル用ペネトレーション数及び計測電子回路系統数を削減できるため、経済的効果も期待できる。

Fig.1.3 は、再処理施設及び燃料加工施設等における臨界安全性を試験するための溶液燃料型の臨界実験設備に P S F C を応用した場合の概念図である。P S F C を高速中性子検出タイプに選択すれば、溶液燃料タンク軸方向の中性子束分布の変化及び溶液内で発生するボイドの挙動を計測することが可能になり、臨界状態の解析に大きく寄与できる。

今回、実際の P S F C と全く同じ構造をした P S F C 模擬体を設計試作し、その模擬体に実際の核分裂計数管で発生する電流パルスと同じ波形の擬似信号を入力する方法で、P S F C を用いた計測システムの性能試験を行った。本報告では、性能試験で得られた P S F C ソレノイド電極の電気的特性、位置検出型中性子検出器としての作動特性及び信号パルスの位置検出分解能等の測定結果について報告する。

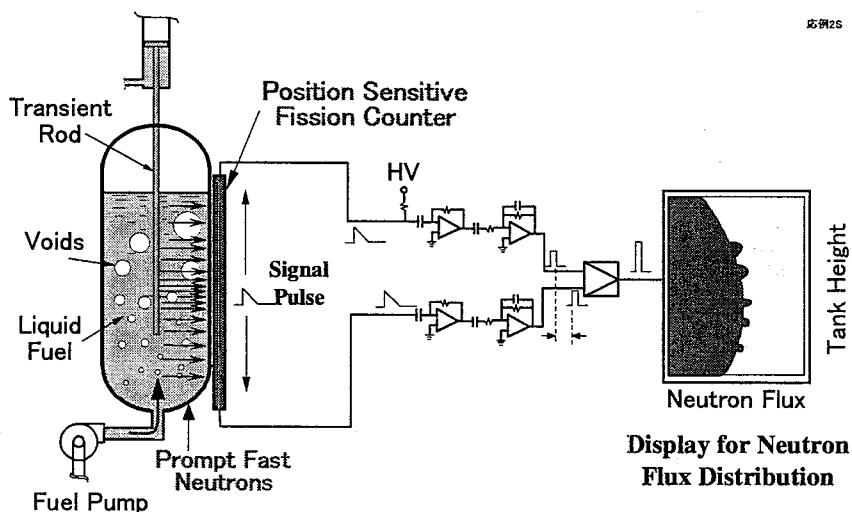
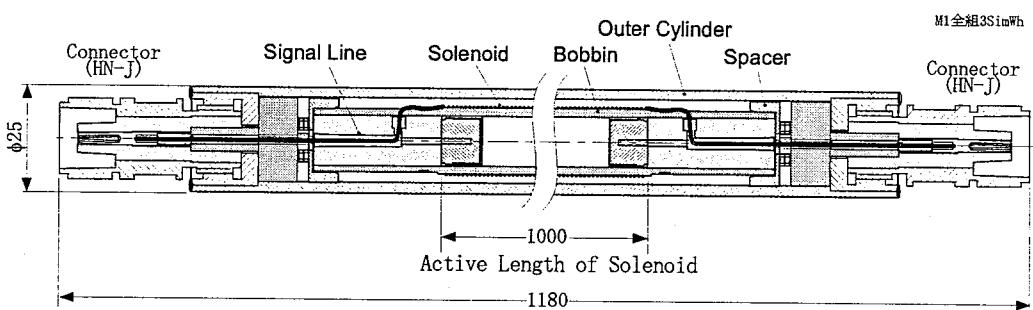


Fig.1.3 Neutron flux distribution monitor using a position-sensitive fission counter for a critical test facility with liquid fuel

## 2. 位置検出型核分裂計数管模擬体の電気特性試験

### 2.1 位置検出型核分裂計数管模擬体の試作

擬似信号パルスを用いた試験方法で、P S F C の作動原理及び位置検出分解能等の性能を検証するため、実際の P S F C と同じ構造のソレノイド電極を組込んだ P S F C 模擬体を試作した。その断面構造を Fig.2.1 に示す。試作した模擬体は、円筒陰極の外径が 25mm で、ソレノイド電極有効長が 1000mm である。模擬体両端には、実際の P S F C 製作時の電離ガス封入を考慮し、P S F C に適合したメタルセラミックシール構造の信号出力コネクタを取り付けた。擬似電流パルスをソレノイド電極へ直接入力できるようにするために、円筒陰極軸方向の 7 個所にテスト入力孔を設けた。製作した P S F C 模擬体は、ウラン塗布と電離ガスの封入をしていない以外、開発を目指している P S F C と総て同一の構造である。



**Fig.2.1** A mockup of the position sensitive fission counter with a solenoid electrode structure manufactured for investigation of the performances such as a position resolution and a measuring range

### 2.2 位置検出型核分裂計数管模擬体の電気特性

P S F Cにおいては、計数管内で発生した電流パルス信号は、ソレノイド電極軸方向の総ての位置及び出力コネクタ部でパルスの反射を生じることなく、信号伝送用同軸ケーブルを通して電流パルス増幅器(CPA)に入力されなければならない。パルスの反射が発生すると、中性子の位置検出に支障をきたす。それで、試作した模擬体について、反射が発生しないことを確認するための試験を行った。Fig.2.2 にパルス反射計測器(TDR, Time Domain Reflect meter)を用いて測定した結果を示す。測定では、模擬体の出力コネクタの片端を開放した場合、及び、信号ケーブルを接続して信号ケーブルの先端を特性インピーダンスと同じ抵抗で終端した場合(正規の接続)について比較した。測定結果から、ソレノイド電極上では T D R のトレースが一定になっており、全く反射が発生していないことがわかる。出力コネクタの片端を開放した場合の T D R トレースは、開放部で跳ね上り反射を起こしている。一方、ケーブルを接続した正規の接続では、トレースが平坦になっており、反射が全く発生しないことを示している。

実際の P S F C 計測システムでは、P S F C 両端のコネクタからの出力信号は、夫々に接続された信号伝送用同軸ケーブルを介して、C P Aに送られ増幅、計測される。それで、実際の計測システムと同様の回路構成で反射パルスの発生を調べた。

Fig.2.3 は、ソレノイド電極軸上のテスト入力孔(計測側電極端から 400mm)に電流パルスを入力して、C P A出力をオシロスコープで観測した結果である。図では比較のため、正規接続時と模擬体片端の出力コネクタを開放した場合についての結果を合わせて示した。片端コネクタを開放した場合の下段トレースでは、最初の信号パルスから 250ns 遅延して、開放端からの大きな反射パルスが観測されている。一方、正規接続における上段のトレースでは、信号パルスのみ観測され、反射パルスは全く認められない。このトレースはソレノイド電極及び出力コネクタの如何なる位置においても反射パルスが発生していないことを示している。

以上の 2 種類の方法による測定結果から、反射が全く認められず、ソレノイド電極及びメタルセラミックシール型出力コネクタはP S F C に極めて良く適合していることが確認された。

次に、P S F C 模擬体の一方のコネクタから矩形パルスを入力して、両端コネクタのパルス波形をオシロスコープで観測する方法で、ソレノイド電極によるパルスの遅延を測定した。測定結果を Fig.2.4 に示す。ソレノイド電極長 1m によるパルスの遅延は 215ns であった。この時間は同軸ケーブル(3D2V)の 43m による遅延に相当する。このように、ソレノイド電極は、極めて大きなパルス遅延特性を有していることがわかる。遅延後のパルスには、立上りの劣化が少々認められるが、これも同軸ケーブル 43m の場合とほぼ同じ劣化である。

P S F C で中性子を検出した時、電極に誘導される電流パルスは、立上りが急峻でテール幅

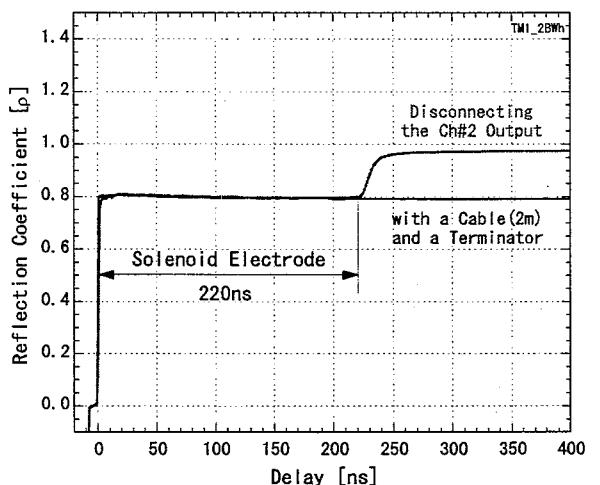


Fig.2.2 Reflection coefficient along the solenoid electrode compared with that in a case of disconnecting the Ch#2 output

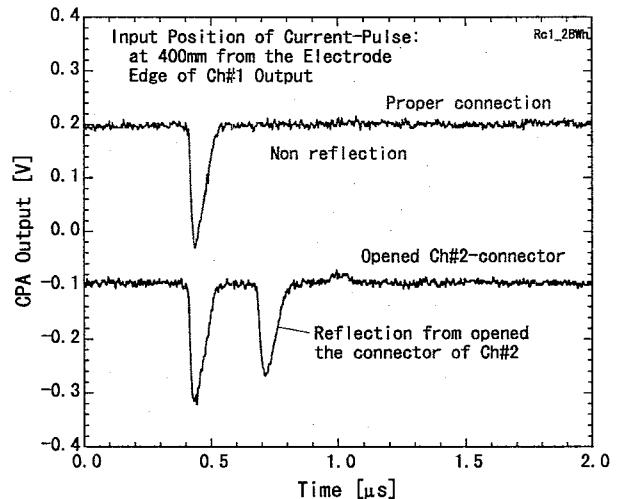


Fig.2.3 Upper trace was measured with a proper connection of the measuring circuit. Lower trace with a reflected pulse is due to disconnecting Ch#2-output

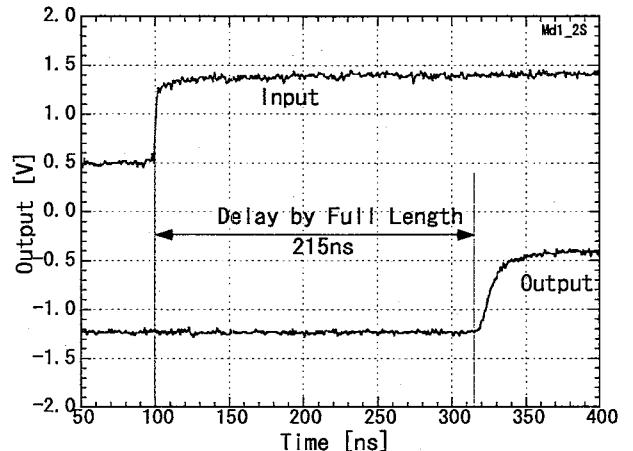


Fig.2.4 Pulse delay by the solenoid electrode of the PSFC

が 100ns 程度の幅の極めて狭いノコギリ歯状の波形である。先に示したソレノイド電極によるパルス立上りの劣化は、出力電流パルス波高の低下をもたらす原因になる。パルス波高の低下が大きいと S/N 比が悪化して、中性子検出信号とノイズの弁別が困難になる上、位置検出分解能も低下する。それで、P S F C ソレノイド電極によるパルス低下率の測定と S/N 比の観測を行った。測定の回路構成を Fig.2.5 に示す。

S/N 比の確認は、波高値  $2\mu\text{A}$  の擬似電流パルスをテスト入力孔 500mm に入力して、Ch#1 と Ch#2 の波形整形増幅器出力をオシロスコープで観測する方法で行った。Fig.2.6 は観測結果である。波高値  $2\mu\text{A}$  は、実際の P S F C の作動時にソレノイド電極に発生する最頻パルスの想定される波高値である。波形整形増幅器では擬似ガウシャン整形(微分 1 段 + 積分 3 段)で、時定数 10ns-10ns を採用した。極めて小さな時定数にも係わらず、良好な S/N 比が得られた。実際の P S F C の作動において、小さなパルス整形時定数はアルファ線によるノイズパルスのパイルアップを少なくす効果、及び広い計測レンジを実現する上で重要である。

パルス波高低下の位置依存性の測定は、ソレノイド電極上に設けた各テスト入力孔に、順次、擬似電流パルスを入力して、P S F C 模擬体出力に接続した電子回路及び MCA により電流パルス波高分布を測定する方法で行った。Fig.2.7 はテスト入力孔 500mm に擬似電流パルスを入力した時の出力パルス波高分布の測定結果である。電流パルス波高を実際の P S F C で得られる波高値の  $1\mu\text{A}$ ,  $2\mu\text{A}$  及び  $3.17\mu\text{A}$  に変えて測定した。波高分布測定結果では入力波高値  $1\mu\text{A}$  の波高分布でもノイズと完全に分離しており、このことから充分大きな S/N 比が得られることが分かる。テスト入力孔 100mm から 900mm 位置に、順次、擬似電流パルスを入力して測定した波高分布から、高速電流パルスがソレノイド電極上を伝播する時、その伝播距離によってパルス波高がどのように低下するかを評価した。

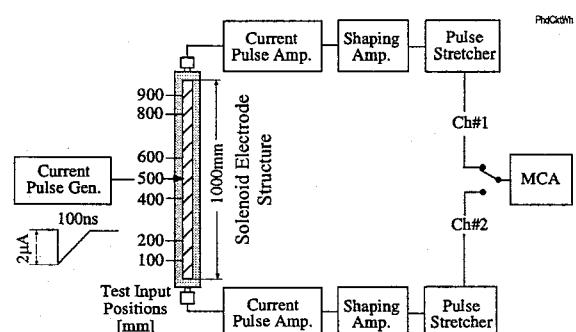


Fig.2.5 Block diagram for measuring pulse height distributions using the mock-up of PSFC with the solenoid electrode

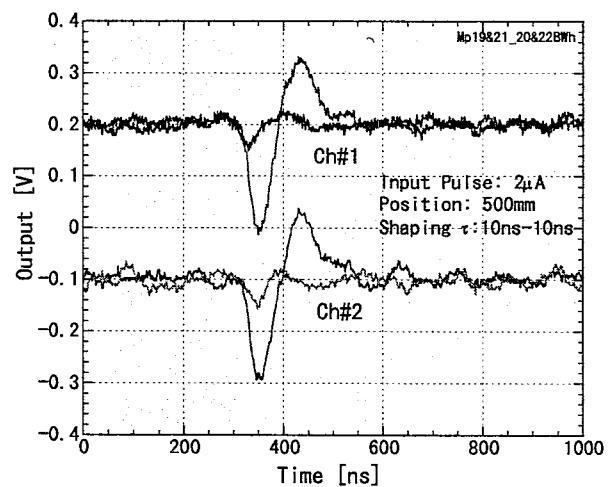


Fig.2.6 Pulse shapes at the output of shaping amplifiers

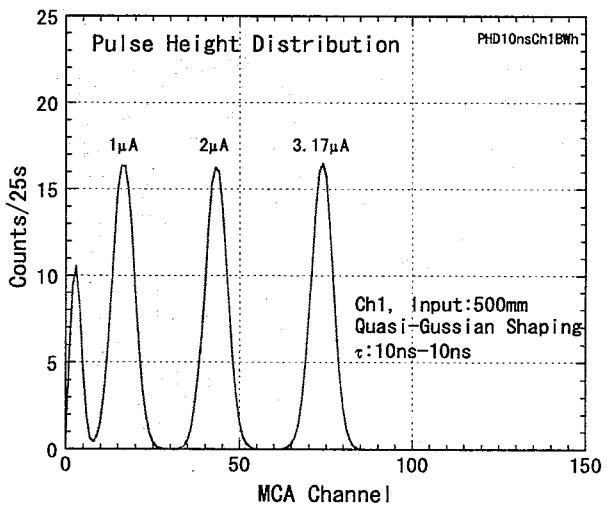


Fig.2.7 Pulse height distributions measured by using the mock-up of the PSFC

Fig.2.8 に、P S F C 模擬体の両端(Ch1 及び Ch2)から測定した 2 つの結果を比較して示した。図縦軸の波高低下率は、入力電流パルスの波高値  $2\mu\text{A}$  を 100% として、低下した波高値をパーセントで表した。横軸は、ソレノイド電極の軸方向をパルスが伝播した距離で表しているが、Ch1 側では 1000mm が伝播距離ゼロである。Ch1 と Ch2 の波高低下特性曲線は当然のことながら、対照的になっている。パルスの低下は、伝播距離の増加とともに徐々に増大し、最大の伝播距離 1000mm で約 17% であった。ソレノイド電極では、巻線抵抗による減衰は、伝播距離 1000mm でも 4% 以下であることは、既に報告した。従って、上記の 17% の低下は、その殆どがパルスの立上り劣化に起因していると考えられる。それは、パルス波形が極めて狭いノコギリ歯状であるため、立上りの劣化がパルス波高を大幅に低下させることから容易に理解される。パルスの立上りの劣化に起因した 17% のパルス波高の低下は、一般に用いられている同軸円筒構造の核分裂計数管(例えば、有感長 150mm、中性子感度  $0.1\text{cps/nV}$ )での低下とほぼ同程度であり、決して大きな値ではない。一般的な核分裂計数管でも、その電極間キャパシタンスと信号ケーブルの特性インピーダンスの効果により立上りが大幅に劣化し、出力パルスが減衰するからである。

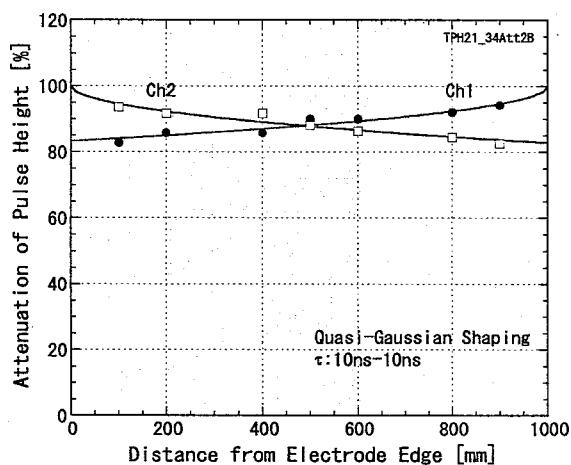


Fig.2.8 Attenuation characteristics depended on pulse propagation distance from the solenoid electrode edge

### 3. PSFC 計測システムの性能試験

#### 3.1 位置検出分解能の測定試験

PSFC で得られる中性子位置検出分解能を調べるために、試作した PSFC 模擬体を用いて、中性子束分布を測定する実際の計測システムと同じ回路構成で、作動試験を行った。計測システムの構成を Fig.3.1 に示す。PSFC 模擬体の両出力コネクタには、夫々同軸ケーブルを介して、高速電流パルス増幅器、波形整形増幅器及び波高弁別器を接続して、ソレノイド電極により遅延されたパルス信号を取出した。位置検出のための計測回路は、ソレノイド電極で遅延された計数管両端からのパルスを Time to Amplitude Converter (TAC) に入力して、時間間隔をパルス波高に変換、MCA を用いて時間間隔の分布を測定する回路構成とした。位置検出分解能測定試験では、PSFC 模擬体のソレノイド電極上 7ヶ所に設けたテスト入力孔から擬似電流パルスを順次入力する方法で、実際の PSFC 計測システムを模擬した。擬似電流パルスは、実際の核分裂計数管の電極上に誘導される最頻信号パルスと同一波高及び同一波形の電流パルスで、波高が  $2\mu\text{A}$ 、立上がりが  $2\text{ns}$  以下、テール幅が  $100\text{ns}$  のノコギリ歯状波形である。

PSFC ソレノイド電極の位置検出精度を調べるため、擬似パルスを入力した位置と MCA で計測されるパルス波高(=パルス時間間隔)の直線性を調べた。測定では、擬似電流パルス  $2\mu\text{A}$  をテスト入力孔 100mm 位置から 900mm 位置まで順次入力し、MCA で計測された波高分布のピークを計測する方法で直線性を調べた。測定結果を Fig.3.2 に示す。図の縦軸は MCA のチャンネルを距離に換算して示した。測定結果から、非直線性幅は  $\pm 1.34\text{mm}$  以下で、良好な直線性を有していることを確認できた。

上記と同様の測定方法により、MCA で測定された波高分布から、PSFC が有する位置検出分解能(波高スペクトルの半値幅 FWHM で表した値)を調べた。測定結果を Fig.3.3 に示す。図の横軸は MCA チャンネル(波高値)をソレノイド電極軸方向距離に換算して表している。また、夫々の波高分布中央部に示した■印は半値幅(FWHM)

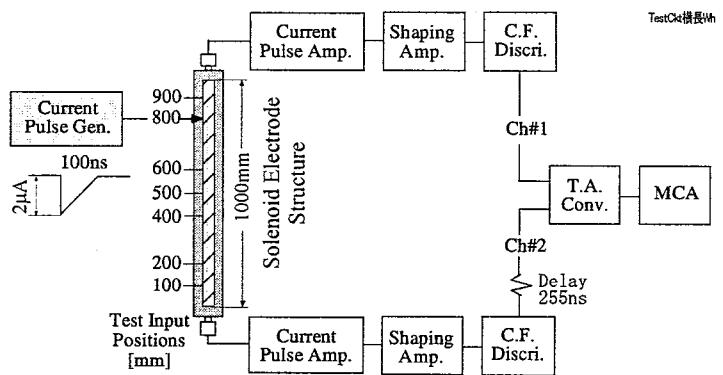


Fig.3.1 Block diagram for the investigation of a neutron-flux-distribution monitoring system with the PSFC

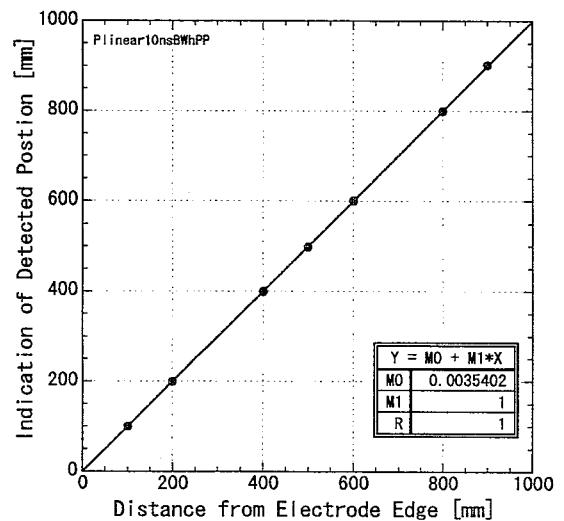


Fig.3.2 Output linearity of a measuring system with the PSFC mock-up

である。測定結果から、ソレノイド電極軸方向の各位置における波高分布はどれも狭長なスペクトルを示し、FWHMの変動も充分小さいことがわかる。このことから、位置検出分解能は電極の軸方向位置に全く依存しないことがわかった。さらに、試作したPSFC模擬体は、有効電極長1000mmの長尺であるにも係わらず、位置検出分解能が7.5mm以下で、極めて良い性能を有していることが確認できた。

Fig.3.3は入力電流パルス波高値を総て $2\mu\text{A}$ で測定した結果である。実際のPSFC電極に発生するパルス波高は、当然のことであるが最頻パルス $2\mu\text{A}$ を中心とした波高スペクトルを持っている。PSFCを用いた計測システムでは、信号パルスの大きさによって、位置検出分解能も変動する。それで、PSFC模擬体のテスト入力孔500mm位置に、波高の異なったパルスを入力して、位置検出分解能がどのように変化するかを調べた。測定結果をFig.3.4に示す。位置検出分解能は、波高が最頻パルス波高 $2\mu\text{A}$ より小さくなるに従って低下し、波高値 $1\mu\text{A}$ で14.4mmになった。しかしながら、PSFC出力波高分布では、最頻パルスの計数率に対して $1/2$ 波高のパルス計数率は、これまでの核分裂計数管の開発実験から $1/4$ 以下であると予想され、位置検出分解能への寄与は少ないといえる。一方、波高が高くなれば、位置検出分解能は上昇し、 $3.2\mu\text{A}$ で5.1mmであった。

### 3.2 PSFC計測システムの計測レンジ検証試験

PSFCの作動原理には、第2章に述べたように、中性子の検出によって電極上に発生した電流パルスをソレノイド電極によって遅延させ、計数管両端から出力される2個の信号パルスの時間間隔から、中性子の検出位置を計測する方法を用いている。このことから、PSFCを用いた計測システムでは、中性子信号が電極上に短時間に多数発生した時(高計数率計測時)に、計測不能になつて、測定レンジが大幅に制限されるのではとの疑問が数多く寄せられる。PSFCを用いた

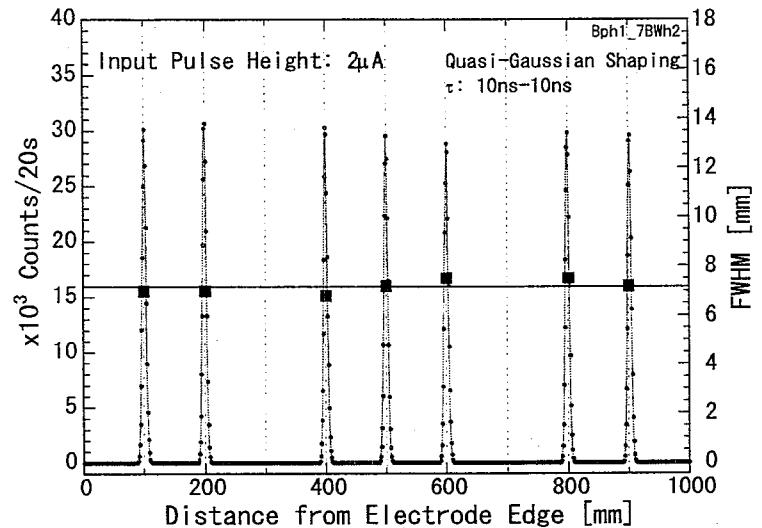


Fig.3.3 Position resolutions measured by using the mock-up of the PSFC

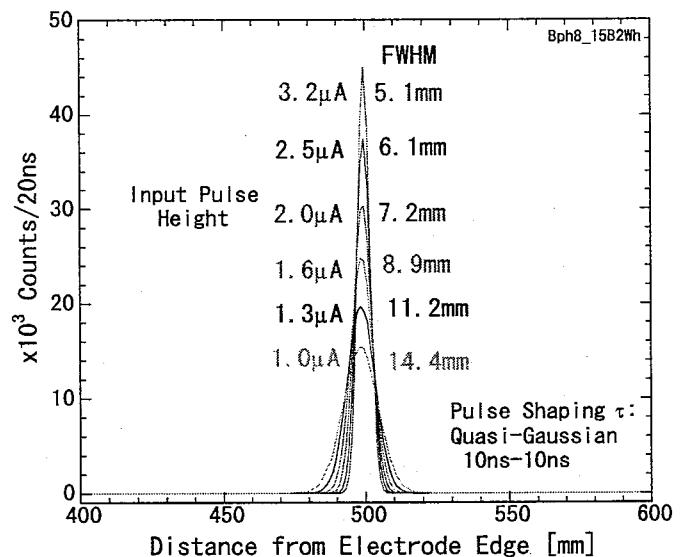


Fig.3.4 Position resolutions depended on input pulse heights measured by using the mock-up of the PSFC

計測システムは、充分広い測定レンジを有していることを明らかにするため、入力信号パルス計数率に対する計測システム出力の直線性及び計測レンジを調べた。測定結果を Fig.3.5 に示す。測定では、テスト入力孔 500mm 位置に波高  $2\mu\text{A}$  の擬似電流パルスを入力し、その擬似電流パルスの周波数を変える方法で試験した。出力の計測としては、MCA が高計数率では作動しないため、PSFC 模擬体の両出力系統に夫々配置された 2 つの波高弁別器の出力と、TAC (Time to Amplitude Converter) 出力をスケーラーで読み取る方法を行った。図から 3 つの測定点とも良好な直線性を示していることがわかる。TAC はパルス計数率  $4 \times 10^5 \text{ cps}$  で作動しなくなった。これは、一般の放射線測定実験用として市販されている TAC、即ち高計数率に対応していない TAC を用いたことで生じた結果である。

Fig.3.5 の測定レンジは、ソレノイド電極上的一点に信号が発生した場合を想定して、測定したものである。しかし、実際の PSFC を用いた中性子束分布の測定では、信号パルスはソレノイド電極軸方向全長の総ての位置に対してランダムに発生すると考えられる。PSFC による計測において、測定レンジを制限する最も厳しい条件は、先行する信号パルスがソレノイド電極端で発生した後、次のパルスがもう一方の電極端で発生した場合である。このような条件を分かり易く解説するため、信号発生場所とパルス伝播の時間的関係をタイムチャートにして表し、Fig.3.6 に示した。この図では、1 個のパルスがソレノイド電極上 900mm 位置に発生した後、500ns 経過後に今度は 100mm 位置にパルスが発生し、夫々のパルスが電極上及び付加した遅延ケーブルを伝播して出力されるまでをタイムチャート上に表したものである。

中性子の位置検出は、信号パルス S1 及び S2 の夫々のスタート・ストップ間隔を計測することによって行われる。この図から明らかなよう

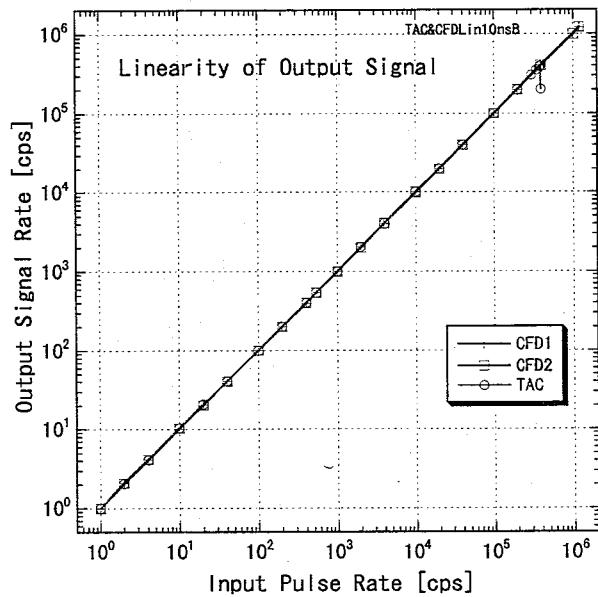


Fig.3.5 Output linearities of the measuring system versus input pulse rate to the solenoid electrode

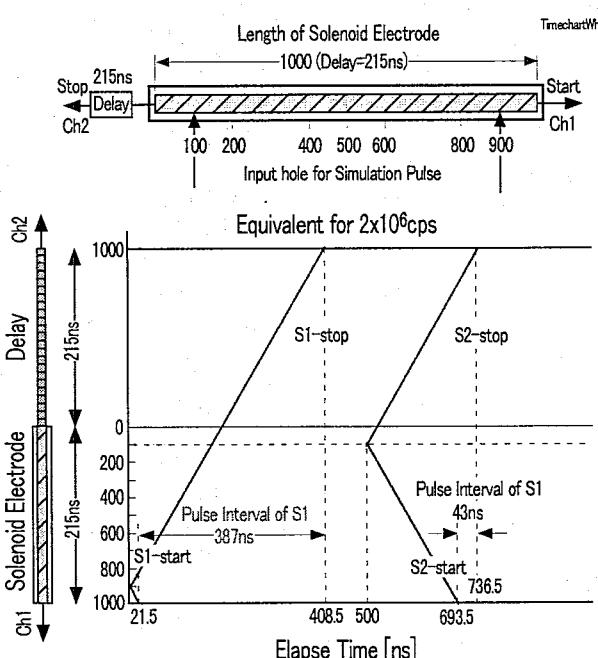


Fig.3.6 Time chart for showing the relation between induced pulse position and propagation

に、中性子信号パルスが 500ns(計数率  $2 \times 10^6$  cps に相当)の間隔をおいて、ソレノイド電極の両端近傍に夫々発生した場合でも、充分位置検出が可能であることがわかる。

P S F C 模擬体を用いた中性子束分布計測システムの作動試験によって、実際に計数率  $2 \times 10^6$  cps が計測可能か調べた。Fig.3.7 に測定結果を示す。下図のオシロスコープ画面において、上段トレースのパルスが時間間隔を計測するためのスタート信号であり、下段がストップ信号である。テストパルスを 498ns 間隔で、夫々ソレノイド電極 900mm と 100mm に入力しても係わらず、上段のスタートパルス間の間隔が 684ns を示し、186ns 広がっていることがわかる。これは、入力したテストパルスの位置が異なった結果、ソレノイド電極による遅延差が 498ns のパルス間隔に加算されたためである。ソレノイド電極 900mm に入力されたパルスの位置検出は、図に示した時間幅 432ns を、また、ソレノイド電極 100mm に入力されたパルスの位置検出は時間間隔 64ns を夫々計測することによって行うことができる。従って、図中の時間幅 684ns と 432ns の差である 252ns(ここではイベント弁別時間幅と呼ぶ)が 2 つのイベントを区別するための時間幅になる。このように、 $2 \times 10^6$  cps 以上の高計数率の信号パルスが電極両端近傍で発生したとしても、イベント弁別時間幅が 250ns 以上確保されるため、位置検出は充分可能である。また、上記と逆の順番、即ちテスト入力孔 100mm に入力後、500ns 遅れでテスト入力孔 900mm にパルスを入力した場合についても観測した。この場合のイベント弁別時間幅は 251ns であった。

以上の試験結果から、パルス計数率が  $2 \times 10^6$  cps 以上の高計数率であっても、P S F C を用いた中性子の位置検出は可能であることが確認できた。

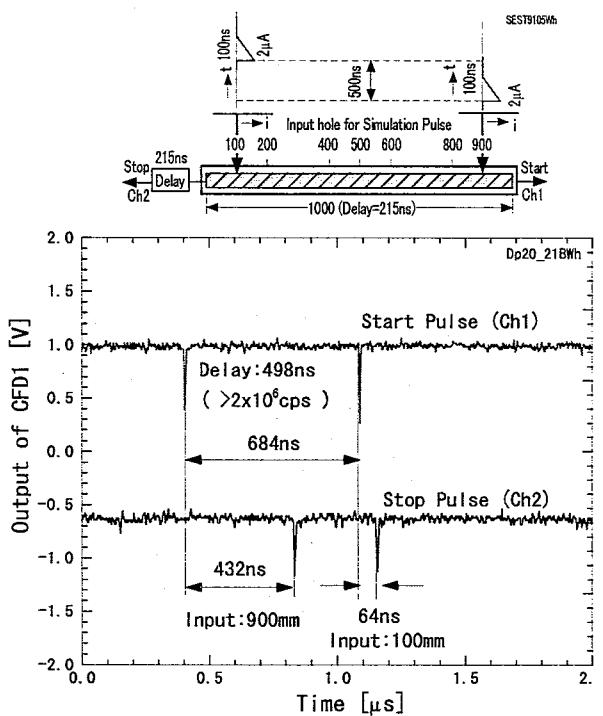


Fig.3.7 Pulse intervals at outputs of the CFDs in a case of a pulse injected into TP100 with a delay of 500ns from that into TP900

#### 4. 結 論

高性能 P S F C を開発する前段階として、ソレノイド電極構造を採用した P S F C が有するエレクトロニクス上の性能及び中性子位置検出分解能等を調べるために、P S F C と構造が全く同じで、但し中性子有感物質(ウラン)を塗布していない P S F C 模擬体を試作した。P S F C 模擬体に設けたテスト入力孔に、核分裂計数管電極に誘導される微小電流パルスと同じ波形及び波高の擬似電流パルスを入力する方法で、P S F C と電子回路を組み合せた中性子束分布計測システムの性能試験を実施した。

試験の結果、有効長 1 m のソレノイド電極が有するパルス遅延は 215ns で、これは同軸ケーブル 3 D 2 V の約 4.3 m に相当する値であり、極めて大きな遅延特性を得られることがわかった。出力パルスの立上りの劣化とソレノイド巻線の電気抵抗による減衰を合わせた出力パルス波高の低下は、核分裂計数管電極上の電流パルス幅が 50ns の高速ノコギリ歯状パルスにも係わらずパルス伝播距離が最大の 1 000mm の場合で、約 17 % であった。このパルス低下は、一般の核分裂計数管(有感長 150mm、中性子検出感度 0.1cps/nv)と同等であり、充分小さい値である。P S F C では電離ガスを封入する必要があるため、P S F C 電極及び信号伝送ケーブルの特性インピーダンスと整合した無反射型の特殊メタルセラミックシール出力コネクター(M C S C)が必要である。試験の結果、P S F C 用に開発した M C S C によって、パルスの反射と減衰を殆ど生じることなく、高速微小電流パルスをソレノイド電極から信号ケーブルへ伝送できることを確認した。

P S F C 位置検出分解能の測定試験では、ソレノイド電極 1 m 全長に渡って、検出位置に係わらず半値幅で 7.5mm 以下の良好な分解能が得られることがわかった。この半値幅は、電極長 1 m に対する比率で表すと 0.75% であり、極めて高い位置検出分解能といえる。また、位置検出の精度、即ちパルス検出位置と P S F C 出力(パルス間隔)直線性の測定試験では、非直線性幅で 1.4mm 以下が得られることを確認した。

計測レンジの測定では、パルス計数率で 1 cps ~  $1.2 \times 10^6$  cps の範囲で試験し、6 枝以上の出力直線性を有することを確認した。高計数率の計測で最も厳しい条件は、先行パルスとそれに続くパルスが、夫々、ソレノイド電極の両端近傍で検出された場合である。高計数率計測実験では、ソレノイド電極軸方向 100mm と 900mm 位置で、信号間隔 500ns 以下( $> 2 \times 10^6$  cps 相当の計数率)で信号パルスが検出された場合を試験し、 $2 \times 10^6$  cps 以上の高計数率でも、信号パルスの位置検出が充分可能であることを確認した。

今後の計画として、電極に  $^{235}\text{U}$  を塗布し、電離ガスを封入した P S F C を製作することにしている。そして、アルファ線によるノイズパルスが与える影響及び中性子の位置検出分解能等の性能試験を進める予定である。

## 謝　　辞

シミュレーションによる位置検出型核分裂計数管計測システムの性能試験では、日本原子力研究所・先端基礎研究センター・パルスイメージングプレート研究グループリーダーの片桐政樹氏にご協力を戴いた。また、本研究は日本原子力発電株式会社との共同研究として行われたものであり、本研究の遂行にあたり日本原子力発電株式会社の関係者にご尽力を戴いた。上記諸氏に厚くお礼申し上げます。

## 参考文献

1. 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
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. 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
4. 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
5. 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
6. 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
7. 山岸秀志、鈴木勝男、他 "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"、JAERI-Research 99-002, Jan. 1999

## 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 <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
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	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
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 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	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閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

## 換 算 表

力	N(=10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s} = 10 \text{ P(ボアズ)} (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)} (\text{cm}^2/\text{s})$$

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

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)	
								= 4.184 J(熱化学)	
1	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150 × 10 <sup>18</sup>			
9.80665	1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>			
3.6 × 10 <sup>6</sup>	3.67098 × 10 <sup>5</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>26</sup>			
4.18605	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>			
1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>			
1.35582	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>			
1.60218 × 10 <sup>-19</sup>	1.63377 × 10 <sup>-20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>	1			

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad	照射線量	C/kg	R	線量当量	Sv	rem
1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>	1	100	1	100	3876	1	100	1	100	
3.7 × 10 <sup>-10</sup>	1		0.01	1		2.58 × 10 <sup>-4</sup>	1		0.01		1

