U.D.C. 539. 1. 074. 8 : 621. 039. 564. 2

自己出力形中性子検出器を用いた炉内中性子の測定

In-Core Neutron Measurements Using Self-Powered Neutron Detectors

東條隆夫* 近藤眞* 寺西一夫**
Takao Tojo Makoto Kondo Kazuo Teranishi

要旨

炉内中性子測定に適していると考えられる^{103}Rhおよび^{59}Coエミッタの2種の自己出力形検出器の特性測定を原研4号炉（JRR-4）で行なった。その結果，^{59}Coエミッタの検出器は即応答性であるが，その中性子感度が低いため，雑音電流や長寿命核種の生成によるバックグランド電流，特にコレクタの放射化による逆電流の影響が無視できず，中性子束測定に問題を残していることがわかった。一方，^{103}Rh検出器は応答時間が遅く，中性子束変化に直ちに追従できないが，中性子感度が高いため，検出器飽和出力電流，特に逆電流などの補正を加えることなく中性子束測定が可能であることが明らかになった。

1. 緒言

最近のように大形発電用原子炉が数多く建設される時代になると，原子炉炉心の外部に設置される検出器から得られた信号による原子炉制御法では安全で経済的な炉の運転を行なうことができない。

すなわち，炉外計測による場合には，炉心内における制御棒位置およびその配置の変化に伴い炉出力と検出器出力の関係に変化が生ずるため，正確な炉出力を求めることが不可能である。そのうえ，炉心内の局部的中性子束の値に関するデータが得られないので，炉燃料の燃焼度を高めたり，炉構造物の長寿命化を図る経済効率の高い原子炉運転ができない。

以上のような炉外計測の欠点を補うためには炉内計測が必要になる。

炉内計測用検出器としては，小形の核分裂電離箱，^{10}B電離箱，中性子熱電対および自己出力形検出器などがあげられる。現在ではこの目的のためには核分裂電離箱が多く用いられているが，自己出力形中性子検出器（Self-Powered Neutron Detector 以後SPDと略記）も小形，堅ろう，簡単な構造からくる高信頼性および経済性などのゆえに炉内計測に適していると考えられ，今後の実用化が期待されている。

SPDとしては^{103}Rhや^{51}Vをエミッタとしたものが最も一般的に使用されているが，これらはエミッタが中性子によって放射化され，その結果生成した放射性核種から放出されるβ線に起因する電流を測定する方式のものである。その応答時間は生成核種の半減期（壊変定数）で決定されるため，^{103}Rhで68秒，^{51}Vで5.4分となり，速い応答が望まれる制御用には不適当である。この遅応答性の欠点を改善したものとして即応答性の^{59}CoエミッタのSPDが実用化されている[1][2]。この検出器では，エミッタが中性子を吸収して放出する捕獲γ線がエミッタ内部で光電効果やコンプトン効果を起こし，そのとき発生する二次電子に起因する電流を測定する方式のものである。そのため，このSPDは原理的に即応答性を持っている。

われわれは^{103}Rhエミッタおよび^{59}CoエミッタのSPDについて種々の特性を測定するために炉内計測実験を行なったので，これらの結果について報告する。

* 日本原子力研究所東海研究所
** 日立製作所日立茨城工業専門学校

2. 測定器および測定系

2.1 SPDの動作原理

SPDの有感部は図1に示すように三つの部分から構成されている[3]。すなわち，エミッタ，絶縁物およびコレクタで，これらの配置は同軸円筒状かあるいは平行板状になっている。エミッタ材料は導体かあるいは半導体物質で，適当な壊変定数と大きな放射化断面積をもち，その放射核種がβ線を放出する物質が用いられることが多い。絶縁物としては，強い放射能で連続的に長期間照射されても高い抵抗値を保持しうるアルミナやマグネシアなどの絶縁材料が用いられる。コレクタには放射損傷や腐食に強く放射化断面積の小さい導体の材料が用いられる。中央のエミッタは同軸ケーブルの心線に，コレクタは外側の導体に結合され，両者間を流れる電流が測定される。

入射した中性子はコレクタと絶縁物を通過して，エミッタに吸収され，β線を放出する核種が生成される。一般に，放出されるβ線のエネルギーは大きいので，β線はエミッタから逃げ出して絶縁物を通過してコレクタ内で止まる。そのため，エミッタ内では電子が欠乏するので，同軸ケーブルの心線には正電荷が誘起される。この現象はE.G.LinderおよびP.Rappaportが1953年に^{90}Sr-^{90}Y線源を用いて実験している[4]。かれらはコレクタにおいて電子の後方散乱があると，エミッタ，コレクタ間を流れる電流が減少すると報告している。この正電荷の生成率を測定すれば，得られる信号はエミッタの中性子吸収率に比例しており，したがって電流測定により中性子束測定が可能になる。

SPDの原理は図1に示した構造に限らず，β線が絶縁物を通過してエミッタからコレクタに至る方式のものであれば，どのような配置でもよい。

この検出器の特長をまとめると，

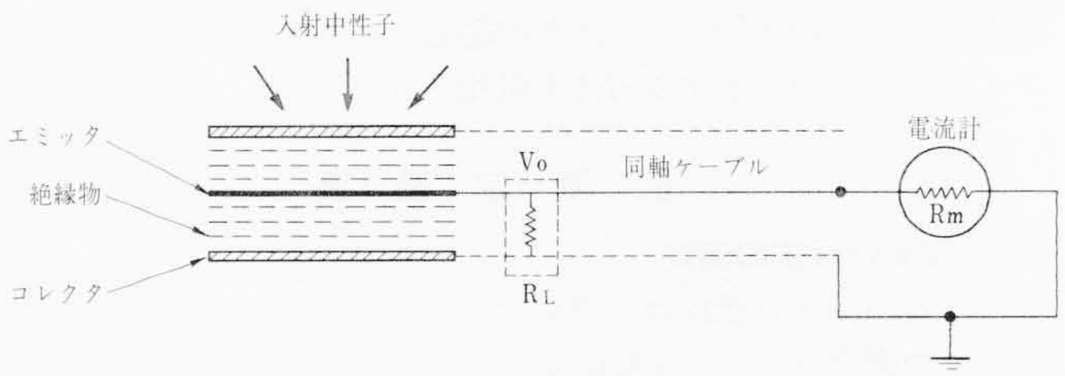


図1 SPDの動作原理図

(1) 構造が簡単であること。
(2) 小形，軽量で高温や高圧に耐えるものであること。
(3) 外部電源が不要であること（ＳＰＤ内に電流を生じさせるためのエネルギーは中性子による誘導放射能から得られるから自己出力形である）。
(4) エミッタに適当な物質を用いれば，熱中性子～高速中性子の測定ができること。

などがあげられる。

2.2 使用したＳＰＤの仕様

実験に使用した即応答の^{59}CoＳＰＤおよび応答の比較のために用いた遅応答性の^{103}RhＳＰＤの仕様は**表1**に示すとおりである。

表1　使用したＳＰＤのおもな仕様

要因＼検出器	^{59}CoＳＰＤ	^{103}RhＳＰＤ
検出器直径	1.58mm	1.6mm
同軸ケーブル直径	1.58mm	1.6mm
同軸ケーブル長さ	4.9m	7.5m
エミッタの長さ	864mm	100mm
ケーブル・シース材質	ステンレス・スチール	インコネル600
コレクタ材質	ステンレス・スチール	インコネル600
ケーブル絶縁材質	MgO	MgO
検出器絶縁材質	MgO	Al_2O_3
エミッタ材質	Co	Rh
抵抗値	$10^{12}\Omega$（21℃）	$2.4\times10^{14}\Omega$（20℃）
	$10^{8}\Omega$（250℃）	$2\times10^{9}\Omega$（400℃）
熱中性子感度	1.4×10^{-21}A/nv	1.2×10^{-20}A/nv

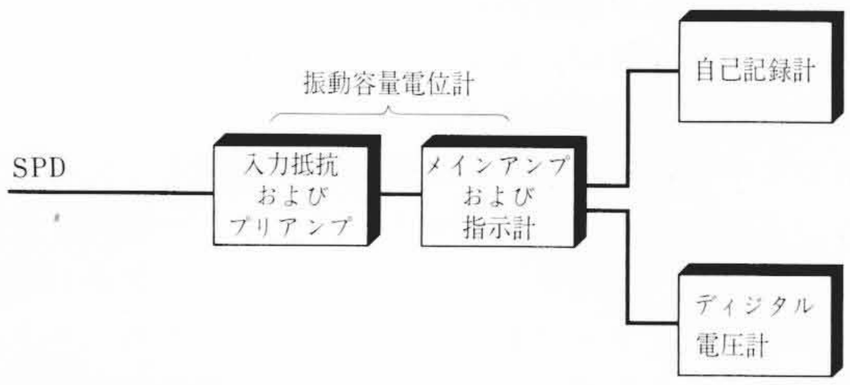


図2　検出器出力電流測定のブロックダイヤグラム

2.3 測　定　系

この測定に用いた測定系のブロックダイヤグラムは**図2**に示すとおりである。検出器からの電流を測定するためには，振動容量形電位計（TR-84M形）を用いた。これは標準負荷抵抗として$1\times10^{6}\Omega$（精度±2％），$1\times10^{8}\Omega$（±2％），$1\times10^{10}\Omega$（±3％），$1\times10^{12}\Omega$（±5％）を有している。

指示計の最高感度は1mVであり，精度はフル・スケールの±1％である。電流測定の場合，指示計の応答時間は入力抵抗が$1\times10^{10}\Omega$のとき1.0秒以下，$1\times10^{8}\Omega$のとき0.7秒以下である。

測定結果は自記記録計（ERI-10形およびB-241形）により記録されたが，指示計のディジタル電圧計用出力をTR-6155形ディジタル電圧計で測定する方法も併用された。

3. 測　定　結　果

3.1 漏えい抵抗の測定

検出器の漏えい抵抗は，電位計の入力抵抗（Rm）を変化させる方法[3]で測定された。ＪＲＲ-4のＳパイプ（実験孔の名称）内の最も中性子束が高い位置（中性子束～4×10^{13}n／cm^2・s，周囲温度約55℃）にSPDをそう入して測定した漏えい抵抗はRh，CoSPDとも～$10^{9}\Omega$であった。この値はRmの精度に依存するので，高精度の測定にはさらにRmの精度を向上させる必要がある。しかし，一般的な直流増幅器の入力インピーダンスは$10^{6}\Omega$以下であるので，得られた漏えい抵抗値は電流測定のためには十分の大きさをもっているものと考えられる。

3.2 検出器の応答の測定

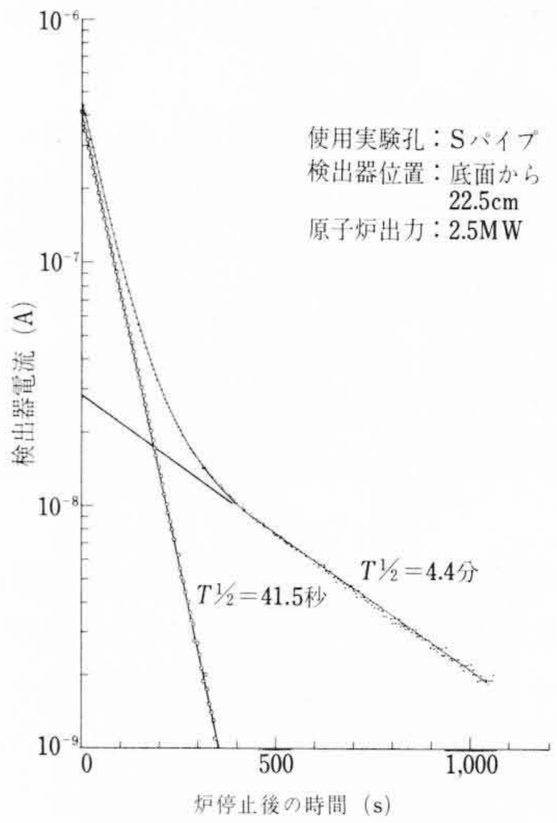
3.2.1 ^{103}RhＳＰＤの時間応答

^{103}RhＳＰＤについて，検出器電流が飽和しているときに原子炉を停止し，検出器電流の減衰の時間的変化を測定した結果は**図3**に示すとおりである。この図には，^{103}Rhが放射化されて生成する^{104}Rh（$T\frac{1}{2}$＝42秒）および^{104m}Rh（$T\frac{1}{2}$＝4.4分）が明瞭（めいりょう）に測定されていて，これらの値は文献[5]に表わされている値とよく一致している。

3.2.2 ^{59}CoSPDの時間応答

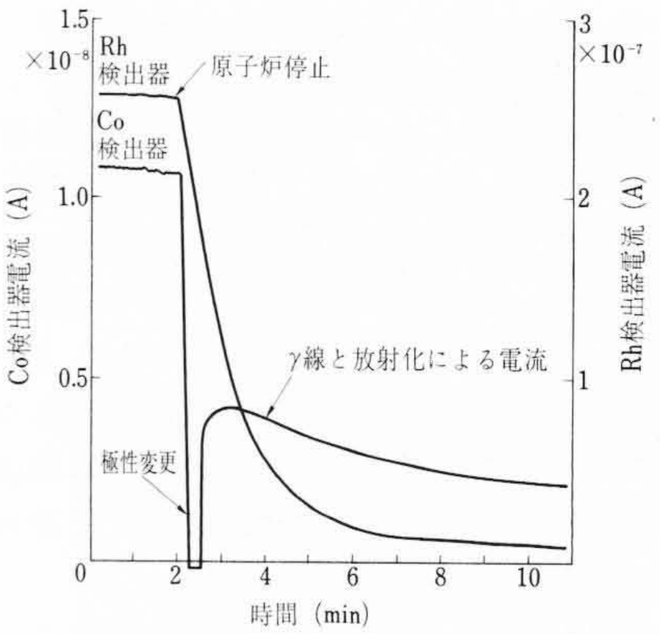
炉出力2.5MWで検出器を炉心の最下端にそう入して炉停止[注1)]を待ち，時間応答を測定した結果は**図4**に示すとおりである。図には比較のために^{103}RhＳＰＤの応答もともに示されている。**図5**は炉をマニュアル・スクラムにより停止した結果を示したものである。**図4**と**図5**から^{59}CoSPDの即応答性が明らかになる。

図5では，^{103}RhＳＰＤ出力電流の約8％は炉停止時に瞬間的に



（振動容量形電位計入力抵抗$10^{6}\Omega$）

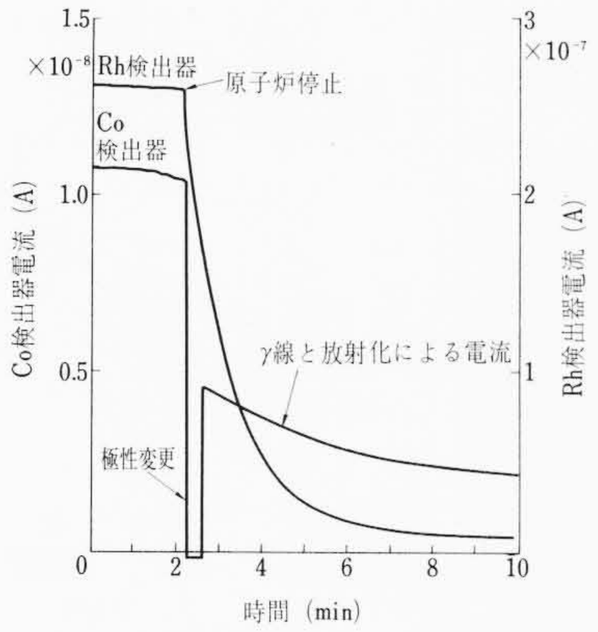
図3　^{103}RhＳＰＤ出力電流の減衰



（通常の方法による炉停止）

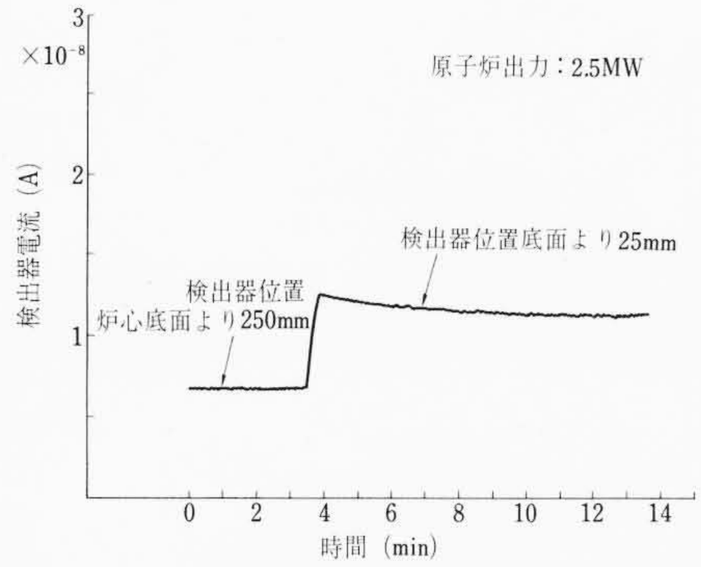
図4　CoおよびRhＳＰＤの炉停止時における応答

注1)　炉は停止前（炉出力：2.5MW）の制御板位置（C_1～C_4：442mm，C_5：300mm）から一定の速度（C_1～C_4：1mm/s，C_5：10mm/s）で制御板をそう入する通常の方法で停止された，後述のマニュアルスクラムによる炉停止のときは制御板C_1～C_5を瞬時に落下させた。



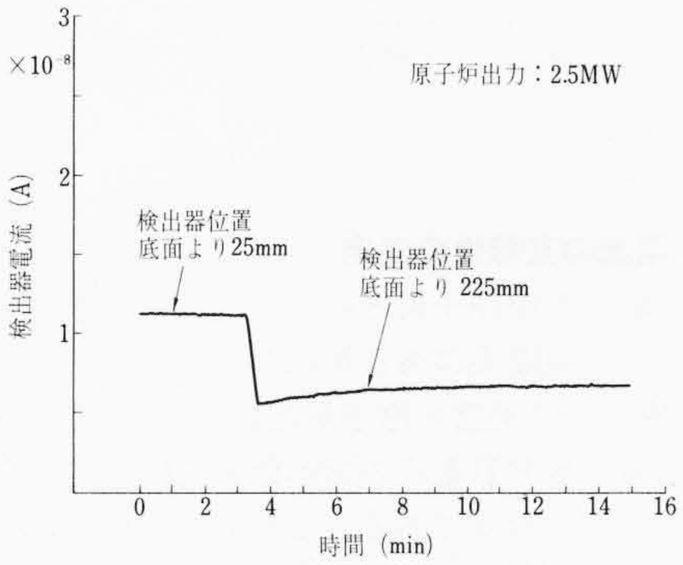
（マニュアルスクラムによる炉停止）

図5　CoおよびRhSPDの炉停止時における時間応答



（中性子束を増加したとき）

図6　中性子束変化に対する^{59}Co S P Dの応答



（中性子束を減少させたとき）

図7　中性子束変化に対する^{59}Co S P Dの応答

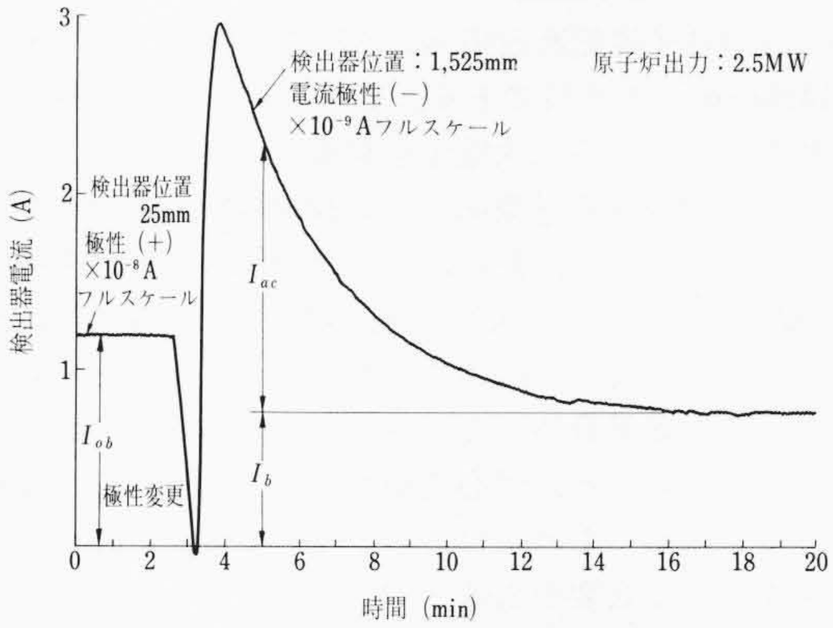


図8　S P D放射化による逆電流の測定

降下しているが，これは^{103}Rh（n, γ）^{104}Rh反応で放出される捕獲γ線がエミッタと相互作用した結果発生する電子によって生ずる即応答性の電流の消滅に起因するものである。

両図に共通な傾向として，^{59}Co S P D電流が炉停止直前にゆるやかに減少しているのが見られる。これは炉停止直前に起動用の核分裂計数管を炉心にそう入したため，それに隣接している自動制御用γ線補償形電離箱にみかけ上の炉出力の上昇を与え，それに対応して自動制御装置が作動して実際の炉出力を低下させたものと思われる。このような現象の確認からも炉内計測の有意義性が理解される。

3.2.3　^{59}CoSPDの中性子束変化に伴う過渡応答

^{59}Co S P Dは一定中性子束では時間的に変化しない一定出力が得られ，中性子束が別の一定値に変化したときには，直ちにそれに対応した一定出力が得られることが望ましい。この点を検討するため，2.5MWの一定炉出力において，検出器位置を変えることにより，中性子束を変化させて応答を測定した。その結果は**図6**および**図7**に示すとおりである。

図6はSPD（エミッタ）の先端が炉心底面より250mmに位置する状態で約20分間中性子照射した後に記録を開始したものである。はじめは一定出力電流が得られているが，S P Dを炉心底面から25mmの位置にそう入した直後は，中性子束の増加に対応した電流以外に経時的に減少する電流成分が認められる。一方，**図7**のように，中性子束が高い場から低い場へS P Dを移動させた直後では，経時的に電流が増加する傾向が認められる。

これらの事実から，出力の経時的変化の原因として，S P Dのコレクタおよびケーブル・シースが中性子照射によって放射化され，そのために，コレクタ側からエミッタ側に電子が流れる現象が考えられる。このように考えれば，S P Dを炉心にそう入した場合には，コレクタの放射化量の経時的増加にともなってS P D電流の経時的減少が起こり，炉心から引き抜く場合は，S P D電流の経時的増加が起こることを示す**図6**および**図7**の実験結果が理解される。

コレクタの放射化による負電流の大きさとその結果的減衰の測定には，S P Dを最も強く放射化した後(検出器位置：25mm)，中性子束の影響がほとんど無視できる位置にS P Dを引き抜き，その出力電流の経時的変化を測定した。この測定結果を示す**図8**から明らかなように，時間的に減衰する電流は中性子による電流と逆の極性を有し，約2分（正確な測定では128秒(**図9**)）の半減期で減衰している。

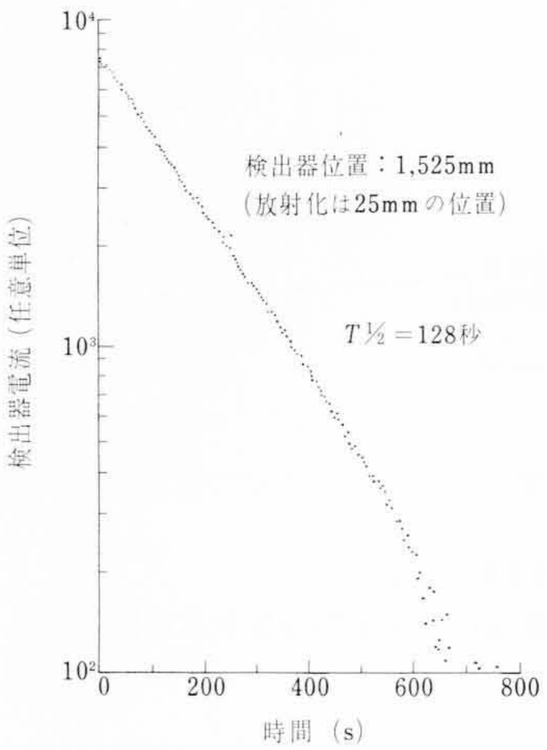
図8から，SPDを炉心底面より25mmの位置にそう入した場合の定常的なコレクタの放射化による電流（Iac）を求めれば，SPDを1,500mm移動させるに要する時間が2.43分で，移動開始後2.43分の経時変化を示す成分の電流は1.49×10^{-9} Aであるので，

$$Iac=1.49\times10^{-9}exp\left(\frac{0.693\times60}{128}\times2.43\right)$$
$$=3.21\times10^{-9}(\mathrm{A})\cdots\cdots(1)$$

したがって，**図8**中に示されたS P D位置25mmにおいて観測された中性子電流（Iob）は，上記の負電流（Iac）のため3.21×10^{-9} A，雑音電流や長寿命核種の生成などによる負電流（Ib）によって7.7×10^{-10}Aだけ低く測定されたことになる。それゆえ，正味の中性子電流Inは

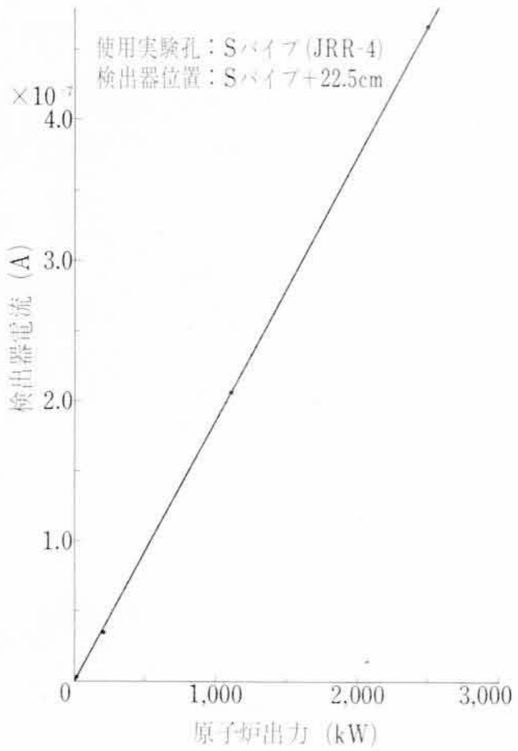
$$In=Iob+Iac+Ib=1.6\times10^{-8}(\mathrm{A})\cdots\cdots(2)$$

となるが，IacとIbの影響でこの値の75%がみかけ上の中性子電流として測定されただけである。



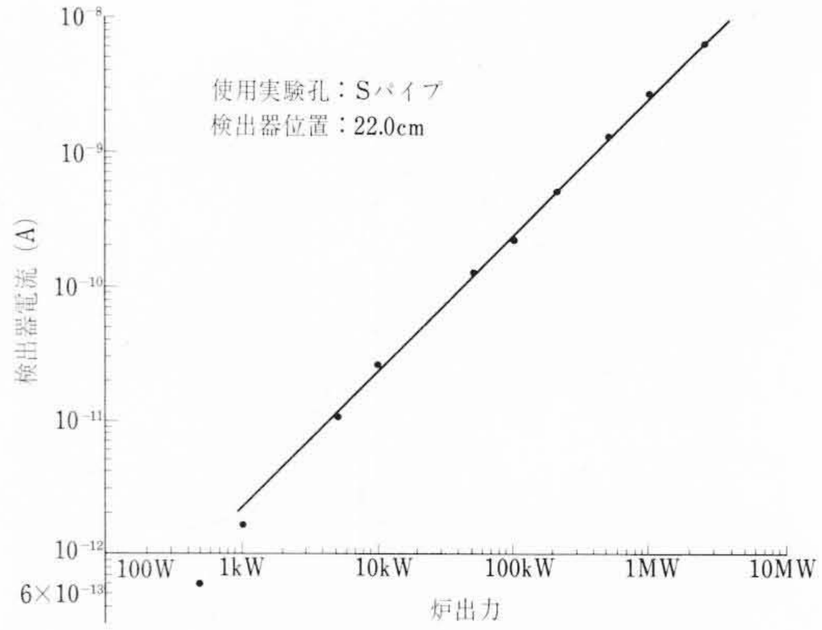
（ディジタル電圧計による測定）

図9　ＳＰＤ放射化による逆電流の減衰



（^{103}RhＳＰＤ）

図10　検出器電流と原子炉出力との関係



（^{59}CoＳＰＤ）

図11　検出器電流と原子炉出力との関係

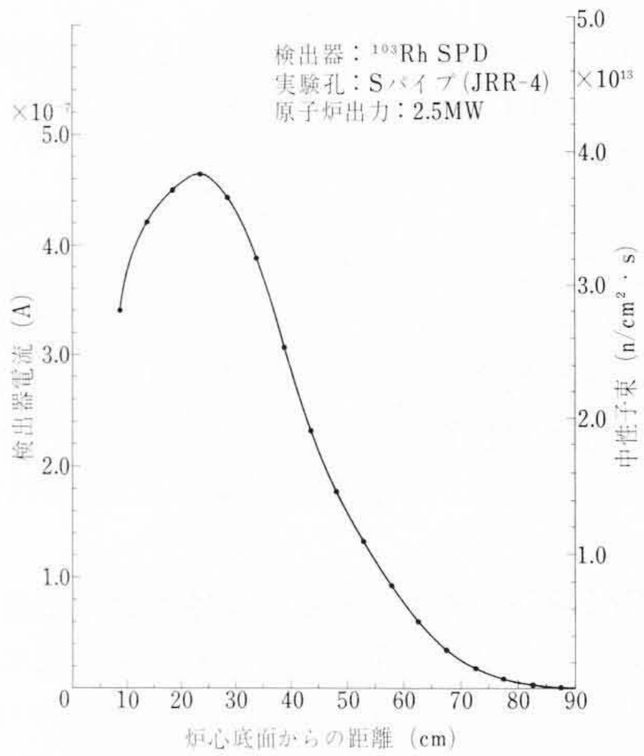


図12　JRR-4　Sパイプ内の中性子束分布の測定

3.3　ＳＰＤ電流の直線性の測定

ＳＰＤ出力電流と中性子束との間の直線性の検討を行なうために，中性子束と比例関係にある炉出力を用いて測定を行なった。炉出力2.5MWまでの通常の原子炉起動（炉周期～35秒）中に，炉出力計の指示値とＳＰＤ電流の指示値を同時測定した結果は**図10**および**図11**に示すとおりである。これらから，^{103}RhＳＰＤの場合は炉出力20kW～2.5MW，^{59}CoＳＰＤの場合は5kW～2.5MWで，検出器電流と炉出力（中性子束）との間の直線性はかなり良好であることがわかる。

3.4　ＳＰＤの中性子感度

^{59}Coの熱中性子捕獲断面積σ_{59}（37.09barns）は^{103}Rhの断面積σ_{103}（149barns）の約¼である。そのうえ，CoＳＰＤはエミッタ内での相互作用による二次電子を利用しているので，同じ寸法のRhより感度（単位中性子束あたりの検出器電流）がかなり低くなる欠点がある。しかし，長いエミッタの^{59}CoＳＰＤを用いれば，10^{13}n／cm^{2}s程度の中性子束の測定の場合には，容易に測定できる範囲の出力電流が得られるので，実用上さしつかえないと考えられる。使用したＳＰＤのエミッタは炉心の高さ（60cm）に比べて約26cm長い。そのうえ，炉心内中性子束分布が均一でないため，中性子感度を求めるためには，エミッタの全長lについての平均中性子束を求める必要がある。

標準検出器として^{103}RhSPD（エミッタ全長10cm）を用い，JRR-4の垂直実験孔（Ｓパイプ）内の炉心底面からの距離rを変化させて熱中性子束$\phi(r)$を測定した結果は**図12**に示すとおりである。この図において中性子束としては^{103}RhSPD仕様書の感度の値1.2×10^{-20}A/nvを用いて求めた。この中性子束の値は文献[6]に記載されている結果とよく一致している。したがって，^{103}RhＳＰＤの場合は，検出器の飽和出力電流に補正を加えず，ただちに中性子束が得られることが明らかになった。

図12から，^{59}CoＳＰＤを炉心の最深部までそう入した場合のlについての平均熱中性子束$\bar{\phi}$を

$$\bar{\phi}=\frac{1}{l}\int_0^l \phi(r)\,dr \cdots\cdots (3)$$

から求め，$\bar{\phi}=1.68\times10^{13}$nvが得られた。

以上の条件におけるＳＰＤ電流の測定値は1.20×10^{-8}Aであるので，このＳＰＤの熱中性子感度として，7.1×10^{-22}A/nv（10cmあたり0.83×10^{-22}A/nv）が得られる。また，前述のInを出力電流としたときの熱中性子感度は，9.5×10^{-22}A/nv（10cmあたり1.1×10^{-22}A/nv）である。これらの値は^{59}CoSPDの仕様書の値1.4×10^{-21}A/nvに比べて前者では50％，後者では70％程度といずれも低い値を示し，かつ，両者のエミッタ10cmあたりの中性子感度は^{103}RhＳＰＤの感度の1％以下である。測定によって求められた^{59}Coの中性子感度と仕様書の感度との相違は，^{59}CoＳＰＤおよび標準用^{103}RhＳＰＤの取付け位置が実験孔内の半径方向で互いに約28mm離れていて，そのために熱中性子が軽水中で受ける減衰効果の相違も一因ではないかと考えられる。

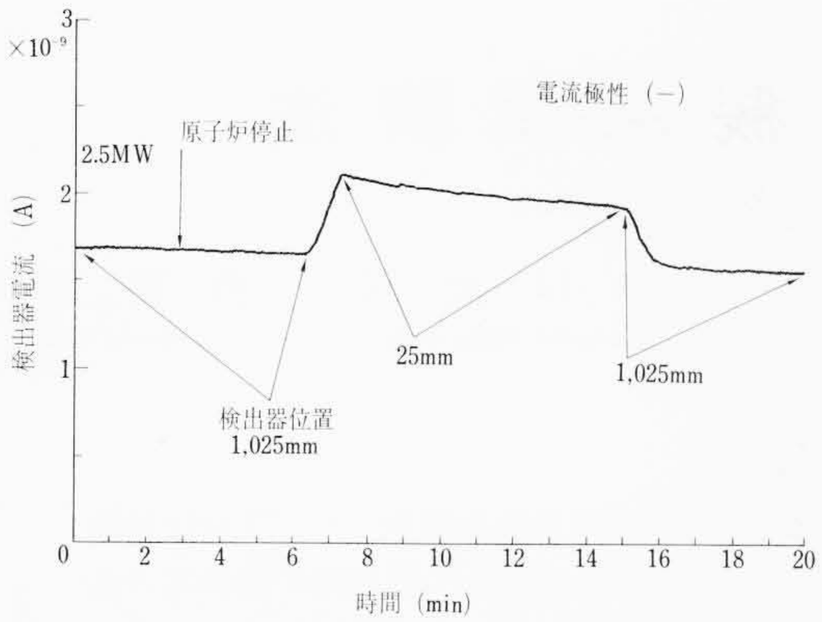
3.5　^{59}CoSPDのγ線感度

検出器のγ線感度を求めるために，あらかじめ^{60}Co線源によって線量と電離電流の関係を校正した^{10}B in-core chamberを用いてエミッタ全長にわたってγ線量の分布を測定した。その結果，炉停止後11分経過したときの平均γ線線量率として，3.58×10^{8}R/hが得られた。

一方，2.5MWの炉出力時に検出器を中性子束が無視できる位置で十分長い時間放置し，炉停止後最下端までそう入したときに得られるγ線に起因する負電流の測定を行なった結果が**図13**である。同図から炉停止後11分経過したときの検出器出力として，1.18×10^{-9}A（雑音電流などの寄与を差し引いた値）が得られた。

これらの結果から本検出器のγ線感度として，3.29×10^{-18}A/R/hが得られる。なお，**図13**に示される検出器出力の経時変化は，炉内γ線量の減衰に基づくものと考えられ，この測定結果はWigner-Wayの式[7]から計算した結果と比較的よく一致した（**図14**）。

さらに，**図13**から明らかなようにγ線の変化に対応する検出器の応答は，中性子の場合のような過渡的な応答を示さない。この



（γ線量を増加したのちもとにもどしたとき）

図13　γ線量の変化に対する検出器の応答

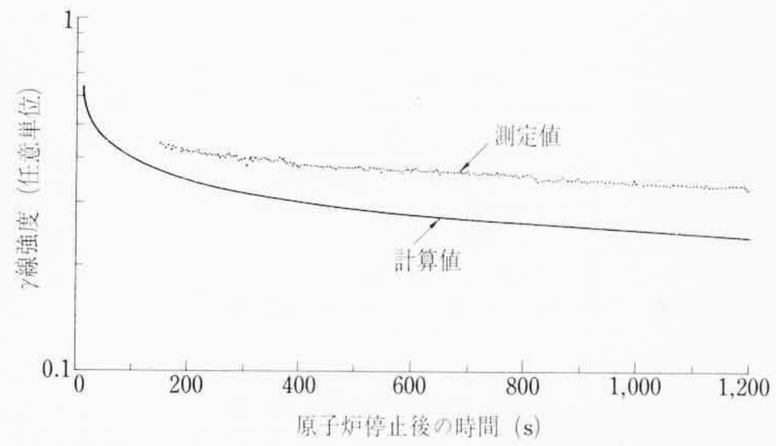


図14　γ線に起因する検出器出力電流の時間的減衰の測定結果と計算結果の比較

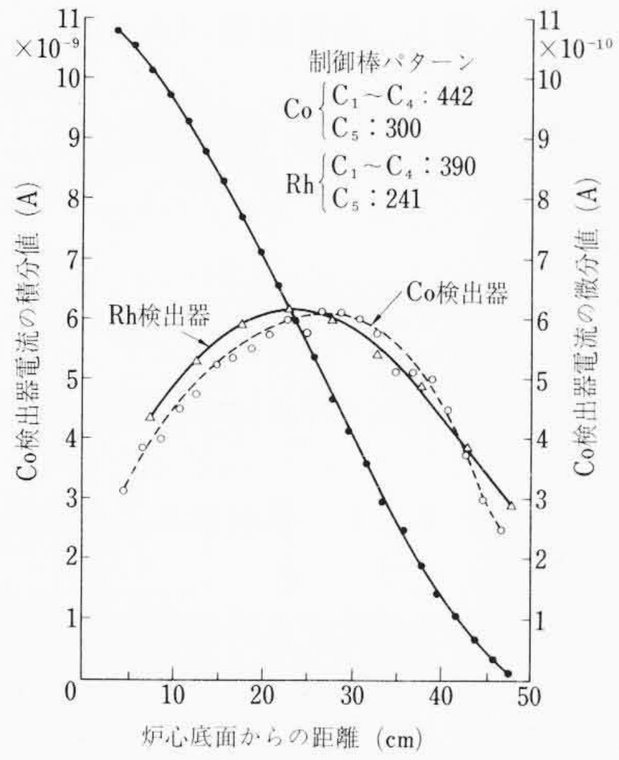


図15　^{59}Coおよび^{103}RhＳＰＤによる炉内中性子束分布の測定

ことからも，中性子束変化に対する過渡応答は，中性子によるコレクタなどの放射化に起因するものと考えられる。

3.6　^{59}CoSPDによる炉内中性子束分布の測定

^{59}CoＳＰＤはエミッタ部分が長いので，そう入した場所の平均の熱中性子束を測定することができる。ＳＰＤをＪＲＲ-４のＳパイプ内の最下端までそう入し，一定長さずつ炉心から引き抜き，各位置に対応するＳＰＤ電流を測定した結果は**図15**に示すとおりである。測定結果を微分すれば，垂直方向の熱中性子束分布が得られるが，その結果も記入してある。さらに同図には比較のためにRhＳＰＤによる測定結果も記してあるが，そのピークの値はCoＳＰＤによるピークの値と同一になるように表わしてある。

この図から明らかなように，両SPDの場合のピークの位置には約**4cm**の差がある。この原因としては，制御板配置の影響，CoＳＰＤの測定精度の悪さおよびコレクタの放射化による逆電流の影響などが考えられる。

4.　結　　言

遅応答性の^{103}RhSPDおよび即応答性の^{59}CoSPDの特性をJRR-4において炉内測定した結果をまとめて下記する。

(1)　^{103}RhＳＰＤの応答時間は^{104}Rhの半減期42秒によって決定されて68秒となり，遅応答性を示す。中性子測定に際しては，検出器飽和出力電流になんら補正を加える必要がない。

(2)　^{59}CoＳＰＤの応答時間は実用上０秒で即応答性である。中性子束測定においては，ＳＰＤの出力電流に，長寿命核種の生成によるバックグウンド電流およびコレクタの放射化による逆電流などに関する補正を加える必要がある。

(3)　^{59}CoＳＰＤの中性子感度を10cmあたりに換算すると，^{103}RhＳＰＤの感度の１％以下であるが，80cm程度のエミッタのものを用いれば，その低感度に関して問題は認められなかった。

(4)　^{59}CoSPDでは，3.29×10^{-18} A/R/hのγ線感度があり，中性子測定に際しては，γ線の影響を考慮する必要がある。

以上から，^{59}CoＳＰＤを原子炉制御用として用いる場合には，コレクタに適当な材質のものを使うか，あるいは補償形ＳＰＤにするかなどの考慮が必要であろう。

本報告を終わるにあたり，実験にご協力いただいた日本原子力研究所ＪＲＲ-４管理課の諸氏ならびに鈴木克彦（中部電力株式会社），田辺俊雄（北陸電力株式会社），斉藤俊雄（昭和海運株式会社）の各氏に感謝する。また，この研究に関して種々ご指導，ご配慮下さった日立製作所原子力研究所谷口　薫，山田周治両博士ならびに同日立工場金井　務博士に感謝する。

参　考　文　献

(1)　J.A.Sovka：AECL−3368（1969）
(2)　関口　晃：原子力工業，**16**，33(1970)
(3)　J.W.Hilborn：Nucleonics，**22**，69(1964)
(4)　E.G.Linder & P.Rappaport：Phys.Rev.，**91**，202(1953)
(5)　D.Strominger, J.M.Hollander and G.T.Seaborg：Rev. Mod. Phys.，**30**，Part 2，678(1958)
(6)　一柳勝晤，大西信秋，服部洋司良：JAERI-Memo3459(1969)
(7)　Theodore Rockwell III ed.，"Reactor Shielding Design Manual"，McGraw-Hill，38(1956)