

熱中性子用位置感応型比例計数管における 位置ピーク分裂現象

堀口 哲男^{*1}、伊藤 眞^{*1}、伊藤 哲夫^{*1}、時吉 正憲^{*2}、
岡井 一也^{*2}、田中 真史^{*2}、丹羽 健夫^{*2}、前多 信博^{*3}

Splitting behavior of the position-peak structure observed with a position-sensitive proportional counter for thermal neutrons

Tetsuo Horiguchi^{*1}, Shin Ito^{*1}, Tetsuo Itoh^{*1}, Masanori Tokiyoshi^{*2},
Kazuya Okai^{*2}, Masafumi Tanaka^{*2}, Takeo Niwa^{*2}, Nobuhiro Maeda^{*3}

A position-sensitive proportional counter for thermal neutrons has been developed being based on the backgammon position-reading principle. In order to achieve high position resolution, some efforts were made as follows: 1) The backgammon electrode was cylindrically placed around the anode wire to effectively pick up the induced charge by an electron avalanche. 2) A thin solid layer of ^{10}B , enriched to 90.4%, was used to eliminate the parallax effect. 3) A pressurized counting gas was employed to reduce the ranges of α and ^7Li particles emitted from the ^{10}B layer. It was found with the use of 6 atm Ar + 10%CH₄ that the position resolution well below 1.0 mm (FWHM) can easily be obtained [Ref. 1]. It was also found with the use of 1.3 atm Ar + 10%CH₄ that the position peak was of double-peak structure and the degree of the peak splitting was strongly correlated to the avalanche size. Since the understanding of this phenomenon is important to obtain better position resolution, we have proceeded the numerical analysis by taking account of the energy-dependent range effect on the position-peak profile. Here we show the observed splitting behavior of the position-peak structure, and report the result of numerical analysis. The result suggests that the phenomenon of the splitting is caused by the effect of self-induced space charge in the region of limited proportionality.

Keywords : PSPC, thermal neutrons, position resolution, peak splitting, self-induced space charge

^{*1} 近畿大学原子力研究所

Atomic Energy Research Institute, Kinki University

^{*2} 近畿大学理工学部

School of Science and Engineering, Kinki University

^{*3} 福井工業高等専門学校

Department of Electrical Engineering, Fukui College of Technology

1. はじめに

現在、中性子利用科学の発展に大きな期待が寄せられている。アメリカの SNS (Spallation Neutron Source) 計画や、日本の J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) 計画に基づいて、次世代の中性子実験施設 (J-PARC では全体計画の一部として) の建設が進んでいる。中性子利用科学の発展により、タンパク質、DNA の骨格構造の水素位置の決定や磁性体の磁気構造解析など広範囲な応用領域での革新的な成果が期待されている。その中性子利用の基盤技術の一つとして、高性能の中性子位置検出器の開発があげられる。次世代の中性子実験施設における位置検出器には、高計数率下での高位置分解能といった過酷な条件が要求されている。

位置感応型比例計数管 (PSPC) は X 線、荷電粒子用位置検出器として長い歴史を有しているが、その簡単な構造や製作の容易さから中性子位置検出に対しても利用度の高い検出器として PSPC が有望であると我々は考えている。しかしながら、耐高計数率性に関してはガス検出器特有の強い空間電荷効果が大きな障害要因として立ちはだかることが良く知られている。

我々はバックガモン電極を用いた位置読み取り法に基づく熱中性子用 PSPC を開発し、6 気圧 Ar +10%CH₄ 計数ガス、¹⁰B 固体薄膜層を使用して位置分解能 0.72 mm (FWHM) を達成している [1]。しかしながら、計数ガスを更に高気圧化し、 α 線や ⁷Li の飛程を短縮させることにより位置分解能を向上させようとする、カウンターを必然的に制限比例領域 (Region of Limited Proportionality : 以下 RLP) で作動させることになり、自己誘導型空間電荷効果 (Effect of Self-Induced Space

Charge : 以下 SISC) が発現し検出器は複雑かつ奇妙な応答を示す。我々は、X 線を用いた実験で SISC 効果がガスカウンターのエネルギー応答や位置分解能に与える影響を調査し、いくつかの興味深い結果を得た。これにより、今まで理解されていなかった RLP での検出器応答のいくつかを明確に解明した [2-4]。

空間電荷効果が位置分解能に与える影響を解明することは、高性能 PSPC 開発の重要な要素であるが、特に中性子検出では関与する荷電粒子エネルギーが X 線の場合と比べて大きく、初期電子数及び初期電子の空間密度も大きくなるため SISC 効果が強く発現すると考えられる。本研究では、バックガモン法に基づく熱中性子用 PSPC の開発及びその基礎特性調査を行う過程で見出された SISC 効果に起因する位置ピーク分裂現象を報告し、これに対する基礎的な解析結果を示す。

2. 実験

開発している PSPC は、X 線用に開発された 1 次元の PSPC を、中性子測定用に改良したものであり、その基本構造は参考文献 [2] に示されている。カウンターは 64×64×240 mm³ の検出器ボディー内に内径 30 mm の円筒状有感部を有し、その実効長は約 100 mm である。中央に張られた陽極芯線を円筒状に取り囲むように (周方向 85% をカバーしている) 位置読み取り用バックガモン電極が取り付けられている。通常の平板形状の PSPC に比べ、円筒状の PSPC は、電子雪崩による誘導電荷を効果的にピックアップできるだけでなく、カウンターの実効体積における電界の乱れが皆無であり、明確な 1/r 依存の電界を実現できるという大きな特徴を有している。このこと

は特に RLP での不可思議な検出器応答を研究する際には極めて有利である。

熱中性子測定用には、 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 反応を利用し、放出される α 粒子、 ^7Li 粒子を検出した。実際の測定には酸化ボロン (^{10}B 90.4 %) をカウンター内側方向になるよう塗布した厚さ 1 mm のアルミニウム窓を用いた。酸化ボロン層はカウンターの芯線方向に長さ 20 mm、幅 9 mm 厚さ数 μm 塗布した。 α 粒子及び ^7Li 粒子のボロン層表面からカウンター有感体積への入射エネルギーは、ボロン層内でのエネルギー損失により、 α 粒子に対しては 0 から 1.47 MeV、 ^7Li 粒子に対しては 0 から 0.84 MeV の連続分布となる。1.47 MeV α 粒子のボロン層中の飛程は 3-4 μm である。放出粒子が連続エネルギー分布であるため、カウンターを比例領域で作動させた場合、そのエネルギースペクトルは、 α 粒子、 ^7Li 粒子に対応する 2 つのプラトー領域を形成する。また、固体の ^{10}B 層を用いることで、 BF_3 のようなガス状中性子コンバータを用いた場合の斜め入射効果による位置分解能の劣化を排除することが出来る。

実験は近畿大学原子炉 (UTR-KINKI、熱出力 1W) で行った。バックガモン電極からの 2 つの信号 A、B は、FAST ComTec 社製 MPA-3 (Multiparameter Data Acquisition System) を用いてリストモードで収集された。信号処理には電荷感应型プリアンプ (Canberra 2003 T)、メインアンプ (Canberra 2011)、ADC (Canberra 8007) を用いた。位置情報 P とエネルギー情報 E (Avalanche Size) は、 $P \propto A/(A+B)$ 、 $E \propto (A+B)$ の演算を Event by Event で行うことによって得られる。中性子ビームコリメーションはアルミ窓の表面 (中性子ビーム入射側) に取り付けた厚さ 0.5 mm の Cd 板により開口部幅 0.6 mm 及び 0.9 mm の 2 本のスリット (スリット中央間隔 10.0 mm)

を形成して行った。

3. 実験結果

1.3 気圧 $\text{Ar}+10\%\text{CH}_4$ の場合に得た、位置 P とエネルギー E の 2 次元スペクトルを図 1 に示す。陽極芯線は 10 μm の金メッキタングステン線を用い、印加電圧は 1.34 kV で作動させた。縦軸 E が約 75 Channel 以下の多量のイベントは主に炉心からの γ 線イベントである。横軸 P 約 470-620 Channel、縦軸 E 約 75-300 Channel に観測される帯状イベントはスリット形成に用いた Cd 板を通過あるいは窓以外のカウンターボディから入射し ^{10}B 層で反応した一種のバックグラウンド中性子イベントである。その帯中にスリットを通過した中性子イベントが 2 本存在する。この 2 本両者に対し、エネルギー E の増大に呼応して位置ピーク構造が大きく左右に分裂していく様相が観測されている (特に 0.9-mm Slit Event に対して明瞭である)。

図 2 に図 1 の W で示される 2 次元ウインドウに存在するイベントを P 軸 (位置) 上に投影した位置スペクトルを示す。W ウインドウのイベントは、ボロン層表面から放出された比較的エネルギー損失の少ない α 粒子のイベント (約 1.47 MeV) と考えられる。このエネルギーの高い α 粒子に対する位置ピーク分裂が明瞭に示されている。またこのイベントを取り込めば位置分解能の劣化を招くことも明白である。この場合分裂したピーク間隔は約 4.7 mm に相当する。この位置ピーク分裂現象は制限比例領域 (RLP) における自己誘導型空間電荷効果 (SISC) に起因すると考えられるが、位置分解能を向上させるためにはこの位置ピーク分裂発生機構の詳細を理解することが必須である。

堀口：熱中性子用位置感応型比例計数管における位置ピーク分裂現象

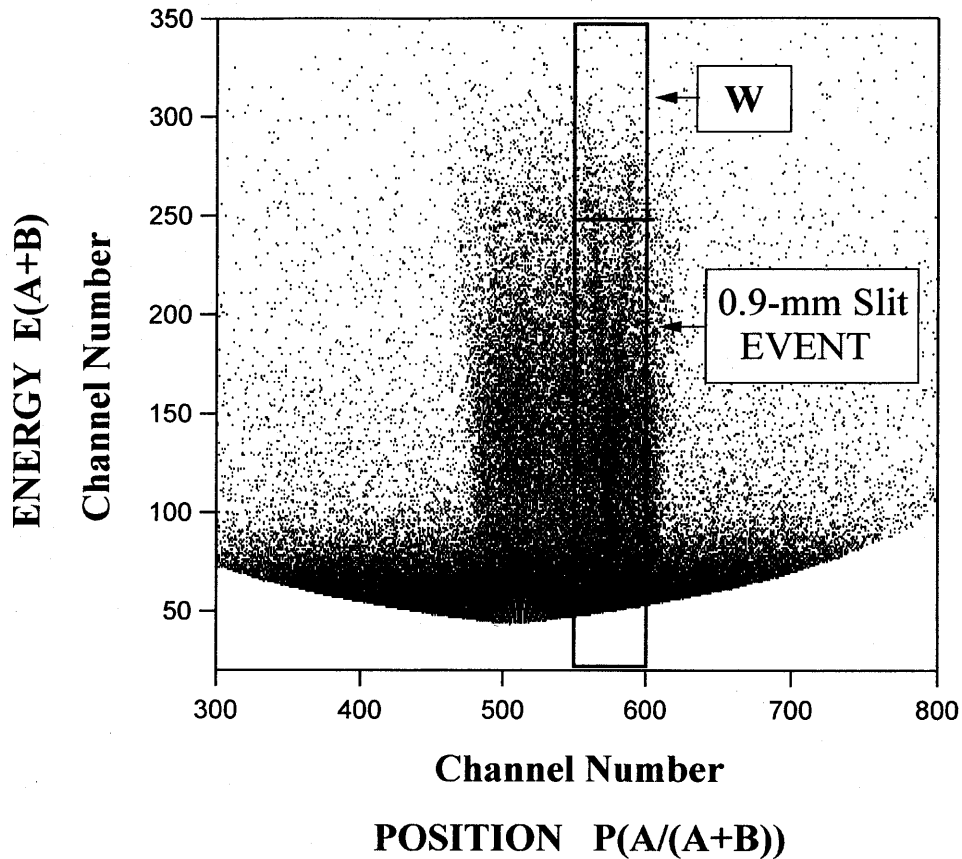


図1 位置Pとエネルギー（Avalanche Size）Eとの2次元スペクトル。1.3気圧 Ar + 10%CH₄ 計数ガス使用。

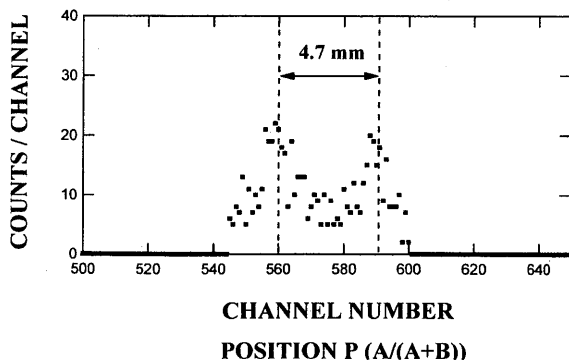


図2 図1の2次元ウインドウW内のイベントをP軸に投影して得た位置スペクトル。

4. 位置ピーク分裂に対する数値解析

位置ピーク分裂現象を数値的に解析することを試みた。解析には簡略化のため、次の仮定を用いた。

- (1) $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ により放出される α 粒子は等方的に放出される。 ^7Li は考慮しない。
- (2) ボロン層表面から放出される α 粒子のエネルギー分布は0から1.47 MeVの様な連続スペクトルである。
- (3) カウンターは比例領域で作動し、エネルギーの線形性は保たれSISCは考慮しない。

まず、カウンター内での α 粒子の飛程Rとバックガモンによる位置読み取りの関係につ

いて考える。カウンター内の α 粒子の飛程 R はエネルギー E の関数 $R(E)$ であらわされる。

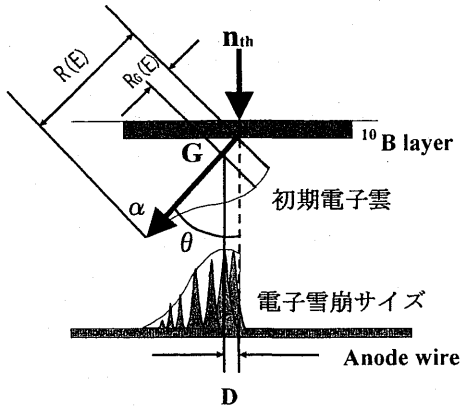


図3 カウンターを比例領域で作動させた場合の α 線の飛程と初期電子雲、電子雪崩及び読み取り位置の関係。
($R(E)$ 、 $R_G(E)$ 、 G は本文参照)

図3に示すように α 粒子によって引き起こされる初期電子雲の電荷重心を G とする。 $R_G(E)$ は E のエネルギーを持った α 粒子が初期電子雲を形成したとき、その電荷重心にいたるまでの距離を表す。カウンターが比例領域で作動する場合、芯線上に形成される電子雪崩サイズは初期電子数に比例する。また、バックガモンの読み取り電極に誘導される電荷量は芯線上に形成される電子雪崩サイズに比例し、その読み取り位置は電子雪崩分布の重心と一致する。したがって、図3で示すように、 α 粒子がボロン層表面からエネルギー E で芯線方向に θ の角度で放出された場合、バックガモンで読み取られる位置と中性子入射位置からのずれ D は $R_G(E)\sin\theta$ で表される。

ボロン層表面から放出される α 粒子のエネルギーは連続スペクトルとなるので、すべてのエネルギーに対して初期電子雲の電荷重心までの距離 $R_G(E)$ を求める必要がある。その過程を以下に述べる。図4はAr気体中の α 粒子のBragg曲線であり、縦軸は比電離、横

軸の上側がエネルギー、下側が残留飛程である。図では、 α 粒子のエネルギー $E = 1.47$ MeV に対応する残留飛程 $R(E)$ 及び電荷重心までの距離 $R_G(E)$ が示してある。

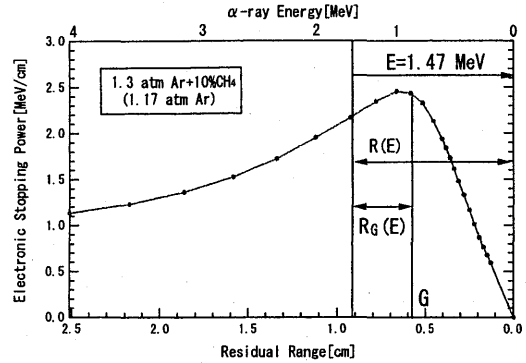


図4 α 粒子がAr気体 (Ar分圧 1.17気圧) に入射した場合のBragg曲線。

電荷重心 G は $R(E)$ の範囲で、比電離を残留飛程で積分し、初期電子雲の全電荷量を求めそれを2分する位置として求めた。解析に用いたBragg曲線は文献[5]のデータを用いた。同様に、 $0 < E < 1.47$ MeVのエネルギーに対して $R_G(E)$ を求めた。

次にボロン層表面から放出される α 粒子の方向に関して考える。

$$\begin{aligned} x &= R_G(E)\sin\theta\cos\phi \\ y &= R_G(E)\sin\theta\sin\phi \\ z &= R_G(E)\cos\theta \end{aligned}$$

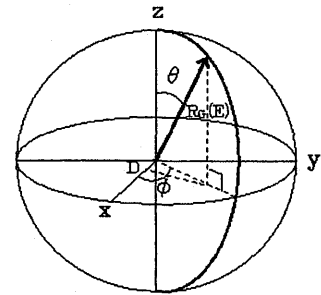


図5 解析に使用した座標系

解析に使用した座標系を図5に示す。芯線方向を X 軸方向とし、 XY 平面状に X 軸上に沿ってボロン層が塗布されている。中性子は Z 軸上の $-Z$ 方向より原点に入射する。原点において $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 反応により E のエネルギーを持った α 粒子が $+Z$ 方向に半球状に

等方的に放出さる。また、 $R_G(E)$ はエネルギー E を持つ α 粒子の PSPC 内での飛程 $R(E)$ より求めた初期電子雲の荷電重心までの距離である。図 3 及び図 5 で示される D は α 粒子による初期電子雲の荷電重心の位置の X 軸への射影であり、バックガモンで読み取られる位置と真の中性子入射位置、すなわち α 粒子放出位置からのずれを表し、

$$D = R_G(E) \sin \theta \cos \phi \text{ となる。}$$

E 、 θ 、 ϕ を変化させて求めた位置 D とエネルギー E の関係を図 6 に示す。

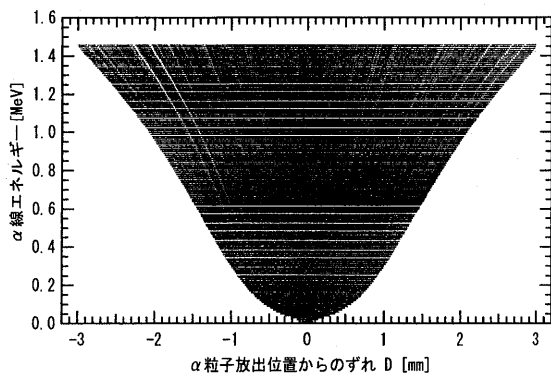


図 6 数値解析により得られた α 粒子放出位置と読み取り位置との差 D とエネルギー E の関係。

この図では、エネルギー E は 0 から 1.47 MeV まで 0.01 MeV 刻みで、 θ は 0 から $\pi/2$ まで、 ϕ は 0 から π まで 0.1 rad 刻みで変化させた計算結果をプロットしてある。この図より、エネルギーが高くなるに従って左右への α 粒子の放出位置からのずれが急速に大きくなりその広がり方は直線的な変化より大きくなる。これは、Bragg 曲線より求めた α 粒子により引き起こされる初期電子雲の荷電重心までの距離 $R_G(E)$ とエネルギーとの間に比例関係が成立しないためである。また、ある一定のエネルギー E_1 の α 粒子に注目すると、その放出位置から初期電子雲の電荷重心までの最大距離 D_1 は $R_G(E_1)$ であり、イベントは $-D_1 < D < +D_1$ に一様に分布する。

これは α 粒子の放出が等方的であることに起因する。

次に実験結果図 2 のピーク間隔について考える。1.47 MeV のエネルギーを持つ α 粒子がボロン層（芯線）方向と平行に放出された場合 ($\theta = \pi/2$ 、 $\phi = 0$)、 α 線の放出位置から初期電子雲の電荷重心までの距離、すなわちバックガモンにおける位置の読み取りのずれが最大となり、その値は図 6 より 3.05 mm となる。しかし、ボロン層とほぼ平行に放出され、かつすべてのエネルギーを電離により失う α 粒子イベントはほとんどないと考えられる。1.47 MeV のエネルギーを持つ α 粒子が中性子の入射方向に対し 0.88 rad (50.4°) の角度で放出された場合 $D = \pm 2.35$ mm となり、図 2 の位置ピーク間隔をよく再現出来ることが分かる。

以上の解析手法では、エネルギーに依存した読み取り位置のずれの最大値については再現できると考えられる。しかしながら、図 1、図 2 で観測されている位置ピーク分裂現象、すなわち読み取り位置のずれの少ない領域で高エネルギー成分のイベントが欠落しているという現象は説明出来ない。この位置ピーク分裂現象は SISC（自己誘導型空間電荷効果）によるものと考えられる。SISC は芯線方向に射影した初期電子雲密度に強く依存する。この初期電子雲密度が低い場合、電子雪崩は大きく成長するが、初期電子雲密度が高い場合、電子雪崩の成長は小さい。これは先に到達した電子により引き起こされた電子雪崩による空間電荷が、後から到達した電子による電子雪崩の成長を妨げるためである。従って、芯線に対し垂直方向に放出される α 粒子の場合、芯線方向に射影した初期電子雲密度が高くなり電子雪崩の成長が強く妨げられる。よって、読み取り位置のずれの少ない領域では、高エネルギー成分のイベントが観測されず、位置ピーク分裂現象が現れると考えられる。

5. まとめ

バックガモンによる位置読み取り法を用いた熱中性子用PSPCによる位置ピーク分裂現象に関する実験結果及び解析結果について報告した。位置ピークの広がりにはボロン層表面から放出される α 粒子のエネルギーに依存する飛程により説明できるが、位置のずれの少ない領域における高エネルギーベントの欠落は説明できないことが分かった。これは制限比例領域における強いSISCによるものと考えられる。今後は、 α 粒子のみではなく、 ${}^7\text{Li}$ も含め、またSISCを考慮に入れた解析を行う予定である。

参考文献

- [1] T. Horiguchi, T. Itoh, S. Ito, T. Yamamoto, T. Miyasaka, J. Sakai, K. Shibata, Y. Masuda, A. Okumura, T. Niwa, *Nucl. Instr. and Meth.* **A529** (2004) 369.
- [2] S. Ito, M. Tosaki, N. Maeda, N. Takahashi, R. Katano, Y. Isozumi, *Nucl. Instr. and Meth.* **B 75** (1993) 112.
- [3] S. Ito, R. Katano, Y. Isozumi, *Nucl. Instr. and Meth.* **A 324** (1993) 141.
- [4] S. Ito, M. Tosaki, N. Maeda, *Nucl. Instr. and Meth.* **A368** (1996) 738 (and references therein).
- [5] L.C. Northcliffe and R. F. Schilling, *Nuclear Data Tables* **A7** (1970) 233.

堀口：熱中性子用位置感応型比例計数管における位置ピーク分裂現象