

緊急時における野外モニタリング手法に関する研究

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

2003年3月

(財) 若狭湾エネルギー研究センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquires about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,
Japan

核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2002

目 次

第1章 はじめに	1
第2章 高強度中性子放射線に対する線量評価に関する調査・研究	
2.1 加速器を用いた中性子計測実験	2
2.2 ヘリウムビーム照射による中性子場	7
2.3 中性子照射によるレムカウンターの感度特性	14
2.4 中性子積分線量評価実験	26
2.5 計算機シミュレーションによるレムカウンターの時間応答特性評価	54
2.6 考察	215
第3章 遠隔空中モニタリング手法に関する調査・研究	
3.1 無人ヘリコプタ搭載ダストモニタ機能概略	218
3.2 設計検討	218
3.3 市販既存品の検討	221
3.4 無人ヘリコプタ搭載用ダストサンプラの特性	221
3.5 使用部品検討	221
3.7 無人ヘリコプタ搭載用ダストサンプラの試作	222
3.8 小型ヘリコプターを用いたダストサンプラーの試験	223
第4章 環境用放射線モニタ環境放射線の変動要因調査	
4.1 序論	251
4.2 自然界における主な変動要因	251
4.3 宇宙線に対する環境放射線監視用モニタの応答特性評価	254
第5章 まとめ	276

2003年3月

緊急時における野外モニタリング手法に関する研究

伊藤慶文^{*}、久米恭^{**}、大谷暢夫^{*}

要旨

原子力施設に於ける臨界事故時等に発生する高強度放射線に対する放射線用計測器の応答特性を調査し、緊急時における線量評価手法の確立に資することを目的として、タンデム加速器で得られるヘリウムビーム照射によるベリリウムターゲットから放射される高強度中性子をレムカウンター、Au 箔・In 箔放射化、および TLD 積分線量計を用いて計測した。又、モンテカルロシミュレーションコード (NRESP) を用いてレムカウンターの感度特性を調査した。これらより、以下のことが明らかにされた。

1) ビームエネルギーが 15MeV、電流が 0.8μA の場合、ターゲットより 100cm 離れた位置での中性子線量等量は、熱中性子 16~27 μSv/h、中速中性子 30~41 μSv/h、熱中性子~速中性子 > 9.5mSv/h であった。従ってほとんどが速中性子と考えられる。

2) 中性子フラックスの増加に対してレムカウンターの出力がほぼ直線的に応答するのは、カウントレイト～10 kcps 以内である。

3) レムレスポンスと同様な応答関数は、熱中性子吸収材が面積割合で 29% 覆う場合である。計算では、カウントレイトの上限は～3 kcps であった。

小型ヘリコプター搭載用ダストサンプラを設計・製作し、無人小型ヘリで動作試験を実施した。遠隔操作による空中のダストのサンプリングが可能である事が確認された。

原子力施設の環境放射線モニタリングに於いては、計測時の変動要因を正確に把握することが必要である。変動要因は人工的要因と自然的要因がある。この二つの要因は、測定上分離することは可能であり、そして連続的な測定により自然的要因も定量評価が可能であることが分かった。

自然的変動要因の一つである宇宙線について、シミュレーション結果を用いてモニタリング検出器での応答を評価した。宇宙線中の荷電粒子は、電離箱での測定が適しており、NaI(Tl) 検出器では応答が測定範囲外になることが分かった。従って、宇宙線中の荷電粒子線束が変動した際には、電離箱線量率の上昇がありうる。なお、宇宙線中の中性子に対しては、電離箱、NaI 検出器双方の測定感度は変わらないこと判明した。

本報告書は（財）若狭湾エネルギー研究センターが核燃料サイクル機構との契約により実施した業務の成果である。

サイクル機構担当課及び担当者：敦賀本部 技術企画部 環境監視課 野崎達夫

* （財）若狭湾エネルギー研究センター 研究部

** （財）若狭湾エネルギー研究センター 粒子線医療研究室

Research on Environment Monitoring of Radiation Emergency

Yoshifumi ITO*、Kyo KUME*、Nobuo OTANI*

Abstract

In a case of a nuclear accident at nuclear facilities, strong radiation such as g-rays and neutrons might radiate at a burst in the initial stage. For the establishment of dose estimation system for such accidents, the experiments were done using the He^{+2} beam accelerated by Tandem in the W-MAST. The following results were obtained:

- 1) Neutron measurements using a rem counter yielded that dose equivalent was about 9.4 mSv/h at a position 100cm from the Be target when the beam current of 15MeV He^{+2} was 0.8 μA . neutron measurement by means of Au and In foil activation method and by use of TLD element revealed that dose equivalents were to be 16-27 $\mu\text{Sv}/\text{h}$ for thermal neutron, and 30-41 $\mu\text{Sv}/\text{h}$ for sub-fast neutron (20keV). Therefore, it was concluded that neutron field was mainly composed by fast neutron.
- 2) Linearity of the rem-counter out put vs neutron flux was valid under the condition that the count rate of the rem-counter was less than 10 kcps.
- 3) Computer simulation using NRESP code indicated that upper limit of the count rate might be 3 kcps.

In an accident occurring in nuclear facility, radiation monitoring using an unmanned helicopter might be great helpful technique. We developed the dust sampler system and demonstrated its performance using an unmanned helicopter.

Sources of variation in environmental radiation measurements near nuclear power plants can be classified into two main sources; artificial one and natural one. It was shown that one can distinguish these two sources in the existing monitoring systems and also that one can know the natural source of the variation quantitatively with continuum measurements.

Cosmic rays are known to be one of the biggest factors in the monitoring variation. Ion chambers are quite sensitive to detect charged cosmic rays, while the response to these particles are out of the energy range at measurements in NaI(Tl) scintillation detectors. In the meantime, the detector sensitivity does not change between these two types of detectors at measurements of the cosmic neutrons. As a conclusion, dose rate monitored by ion chambers are shown to grow up following to the increase of the flux of the charged cosmic rays.

This work was performed by The Wakasa-wan Energy Research Center under contact with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

* The Wakasa-wan Energy Research Center

第1章 はじめに

原子力施設の事故等では、瞬時に強高度バースト状中性子が放射される。このような高強度パルス中性子を計測する時には、中性子検出器の時間応答特性を調べる必要がある。

加速器イオンビームは、イオンビーム種及びターゲット材の選択により、エネルギー・スペクトルがよく分かった強度及パルス巾が制御されたパルス中性子を生成することが可能である。第2章に、加速器イオンビームがターゲットを衝撃する際放出される高強度中性子をもちいた、中性子レムカウンターの応答特性について述べる。箔放射化法を用いた中性子線量当量測定、TLD等の素子による中性子積分線量測定を行い、測定位置での中性子場を評価を行う。

モンテカルロ法を用いたレムカウンターの時間応答についてのシミュレーションを行った。第2章に、計算結果を述べ、実験との比較検討を行う。

原子力施設の事故等の緊急時では、遠隔操作による小型無人ヘリコプターは極めて有用である。第3章に、無人ヘリによるモニタリングシステム開発の一環として実施した、小型ヘリコプター掲載用のダストモニタを設計・製作について述べ、評価試験及びフライト試験結果を記述する。

原子力施設周辺の環境放射線モニタリングは、場の放射線測定と環境試料の放射能測定で構成されており、場の放射線測定では一般に空間 γ 線量の測定が測定対象になっている。空間 γ 線量測定のうち、線量率測定はNaI(Tl)シンチレーション検出器や電離箱等の連続モニタにより実施されている。連続モニタは放射線量の時間変動を直ちに把握することができるため、異常時の速やかな対応には欠かすことのできない測定装置である。

空間放射線のモニタリング結果を評価する際には、放射線レベルの変動が人工的な原因によるものなのか、それとも自然界の変動に起因するのかを弁別しなければならない。

第4章においては、自然界における環境放射線モニタリングの主な変動要因についての調査結果を述べるとともに、モニタリングシステムへの影響をシミュレーションにより評価を行った。

第5章に実施した研究のまとめを述べる。

第2章 高強度中性子放射線に対する線量評価に関する調査・研究

2.1 加速器を用いた中性子計測実験

高強度中性子放射線に対する線量評価は、若狭湾エネルギー研究センターに設置されている W_MAST (Wakasa-wan Multi-purpose Accelerator with Synchrotron and Tandem) の照射室2のイオン注入装置で行われた。W_MAST システム全体を図 2.1-1 に、照射室2の全体を図 2.1-2 に、イオン注入コースのビームライン及び注入容器を図 2.1-3 に示す。照射室2では、タンデム加速器（最大ターミナル電圧、5MV）で加速されたプロトンビーム（最大エネルギー 10MeV、最大電流値 100 μ A）、ヘリウムビーム（最大エネルギー 15MeV、最大電流値 50 μ A）、炭素ビーム（最大エネルギー 25MeV、最大電流値 50 μ A）による材料照射・注入実験、材料分析が可能である。これまで、イオン注入コースを用いて、ヘリウムビームによる SUS 系材料の照射損傷評価、6H-SiC 単結晶の照射損傷実験、シリコンへの炭素ビーム注入による SiC 作成実験等が実施された。大電流ヘリウムビーム照射が可能なことより、ターゲット材料にベリリウムを使用し $^9\text{Be}(^4\text{He},\text{n})^{12}\text{C}$ 反応を利用すれば、強力中性子源としての使用も可能である。

タンデム加速器を出射した He^{2+} ビームを照射室2に導き、2連の4重極磁界を用いて、2個のアパーチャー中心を通り、且つイオン注入容器の中心に設置したターゲット上にてビーム径が 1mm ϕ となるように調整した。中性子生成のために、 He^{2+} ビームのターゲットとして厚さ 5 μm 薄膜を用いた。中性子計測実験の概念図を図 2.1-4 に示す。ヘリウムビーム照射時のビーム電流は、ターゲット下流に設置されている faraday cup で計測した。中性子の測定には、レムカウンター中性子検出、Au 箔及び In 箔による放射化法、TLD による積分線量計測を用いた。本実験では、検出系の感度を考慮してヘリウムビームエネルギーを 6MeV～15MeV、ビーム無電流 4 μA 以下とした。

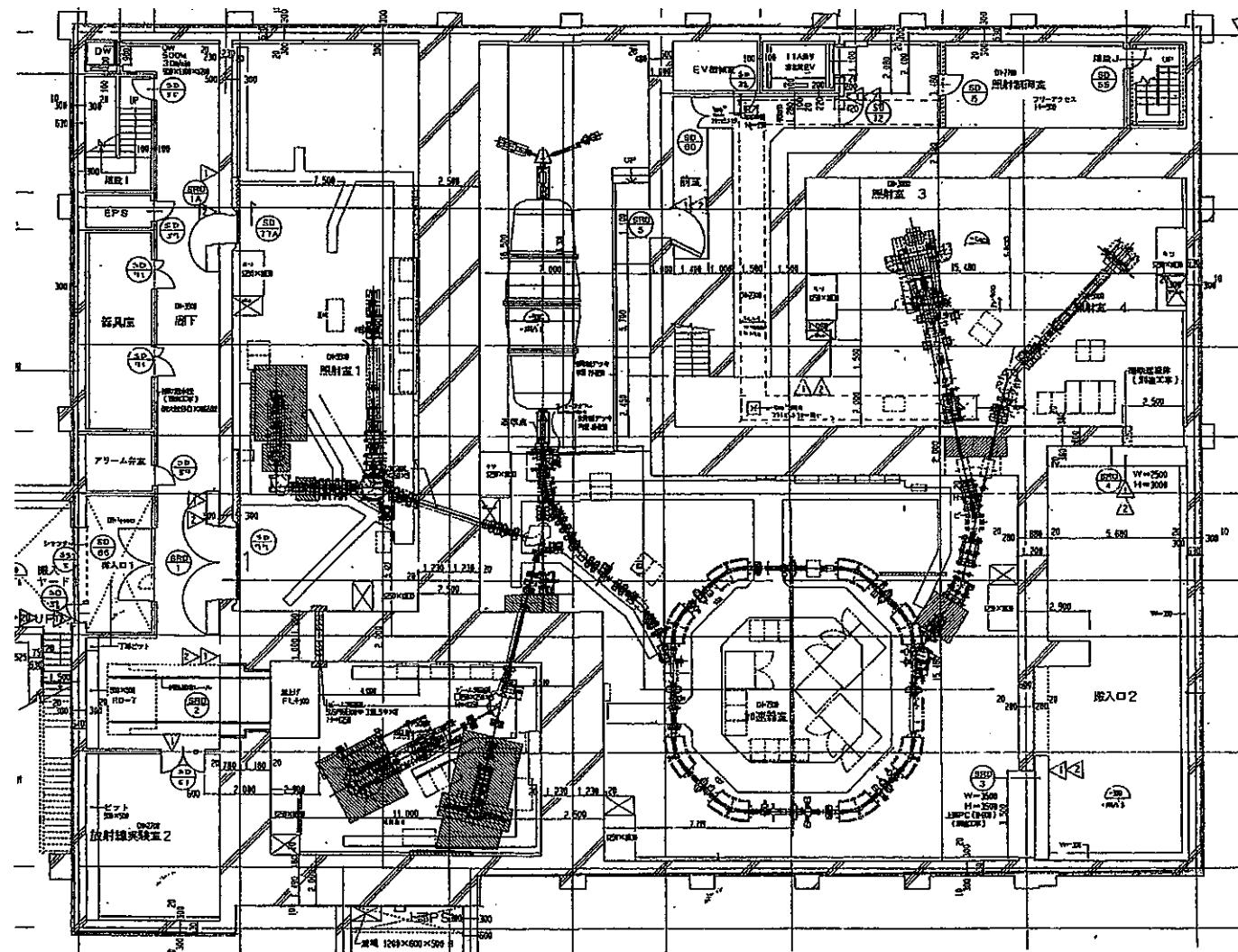


図 2.1-1 W-MAST 装置の全体図

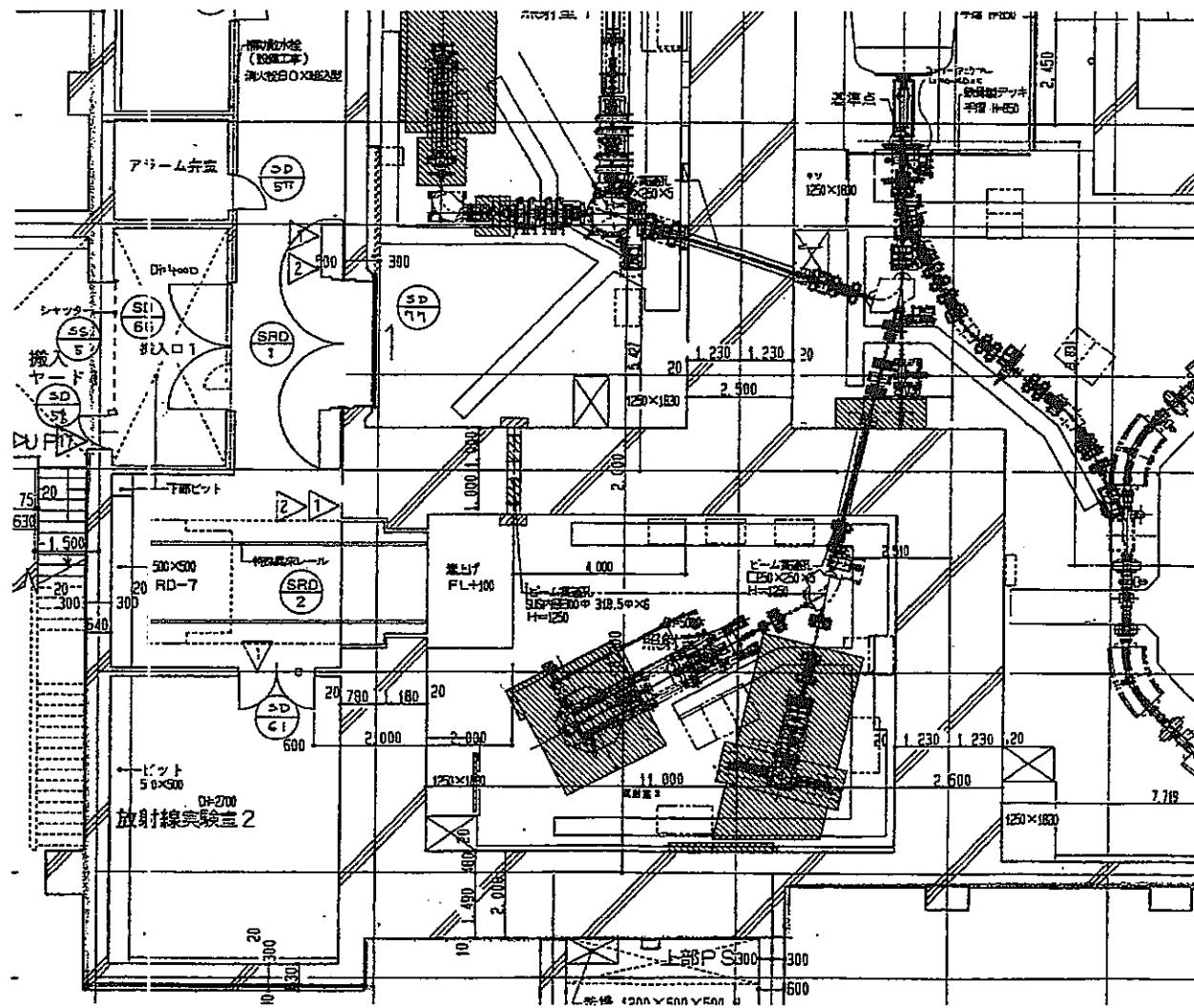


図 2.1-2 照射室 2 の全体図

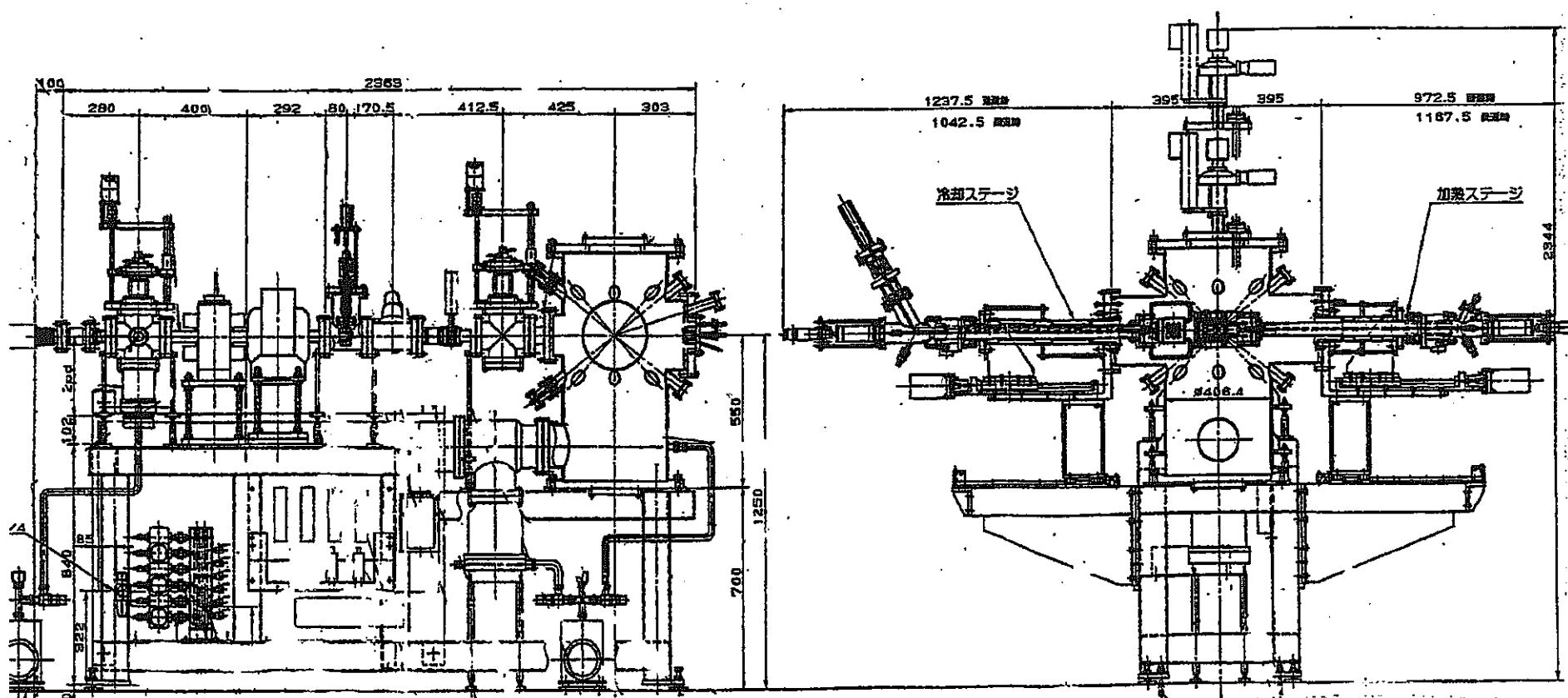


図 2.1-3 イオン注入コース

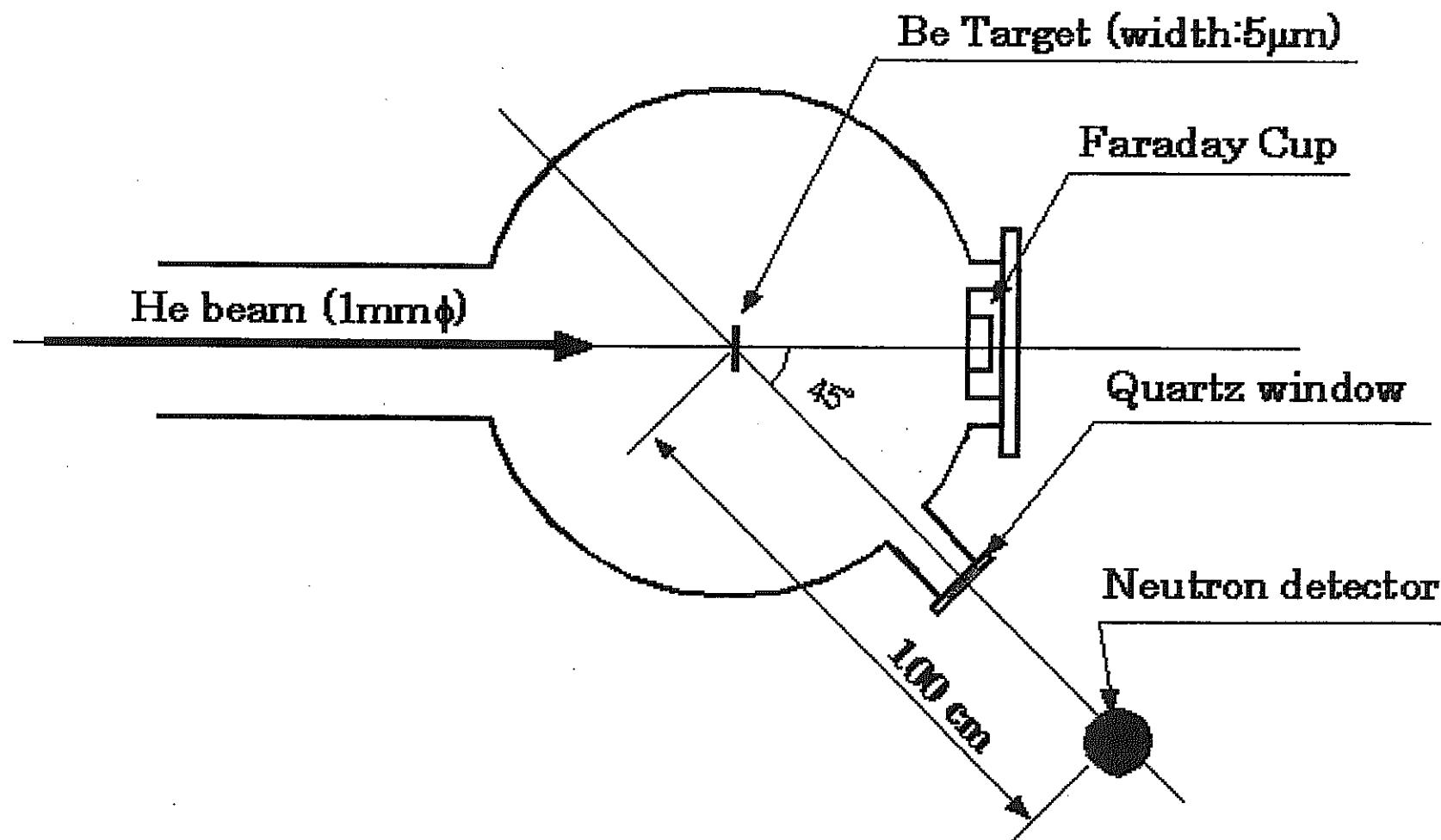


図 2.1-4 中性子計測実験概念図

2.2 ヘリウムビーム照射による中性子場

薄いベリリウム膜への高エネルギーへリウム照射による中性子生成では、以下の2つの反応が重要である。



図2.2-1に¹²Cのエネルギーダイアグラムを示す。反応1は¹²Cのエネルギーレベルに対応して、不連続な値の中性子が生成される。反応のQ値は

基底状態 $E_0 = 0.00 \text{ MeV}$	$Q = 5.71 \text{ MeV}$
励起状態 $E_1 = 4.44 \text{ MeV}$	$Q = 1.26 \text{ MeV}$
励起状態 $E_2 = 7.65 \text{ MeV}$	$Q = -1.69 \text{ MeV}$
励起状態 $E_3 = 9.64 \text{ MeV}$	$Q = -3.94 \text{ MeV}$

である。核反応の反応前、反応後の全系の運動量とエネルギー保存より、反応を指定すればある角度に放出される中性子エネルギーが求まる。図2.2-2に、ヘリウムビームのエネルギーに対する $\theta = 45^\circ$ 方向の中性子エネルギーを示す。1の反応における微分散乱断面積は、0bst等が、エネルギー $E_\alpha = 6 \text{ MeV} \sim 10 \text{ MeV}$ の微分散乱断面積の実験データを報告している[1]。



図2.2-3に、 $E_\alpha = 4.7 \text{ MeV} \sim 6.37 \text{ MeV}$ に対してGeiger等が求めた、2の反応による中性子にエネルギースペクトルを示す[2]。この反応による中性子は、エネルギー $E_n = 0.3 \sim 0.4 \text{ MeV}$ にピークを持ち、 $E_n = 0.5 \sim 0.8 \text{ MeV}$ より急速に減衰するガウス分布的なエネルギー分布を持つ。

図2.2-4にヘリウムエネルギー E_α に対する、種々の過程の中性子生成断面積を示す[2]。 E_α が6MeVを超えると、反応2が主たる反応である事が分かる。

Beターゲットに入射したヘリウム粒子は、電子との非弾性散乱により徐々に減速され、エネルギーを失う。Betheの式を用いて計算した、Be中のヘリウムのエネルギー変化を図2.2-5に示す。Be厚 δT が5μmでは、入射粒子のエネルギーが $E_\alpha = 15 \text{ MeV}$ のヘリウムは、 $\sim 14.6 \text{ MeV}$ で出射する。従って、 $\theta = 45^\circ$ に放出される中性子は、基底状態が生成される場合は、 $6.9 \sim 7.3 \text{ MeV}$ 程度のエネルギー広がりが生ずる。励起状態の¹²Cが生成される場合、エネルギー拡がりは $5.3 \sim 5.5 \text{ MeV}$ (n₁)、 $4.1 \sim 4.3 \text{ MeV}$ (n₂)、 $3.3 \sim 3.5 \text{ MeV}$ (n₃)程度である。生成中性子のエネルギーが広がる効果は、ヘリウムの入射エネルギーが小さいほど大きくなる。 $E_\alpha < 1 \text{ MeV}$ で入射されたヘリウムは、 $\delta T = 5 \mu\text{m}$ の場合、Be内で停止する。

実験に先立ち、検出器に入射する中性子数を見積もった。厚さ δT のBeターゲッ

トに、電流 I の He²⁺のが照射される場合、中性子生成反応断面積を σ_T とすれば、単位時間あたり生成される中性子 dN_n/dt は

$$\frac{dN_n}{dt} = (0.5 \cdot I/e) \cdot \sigma_T \cdot \delta T \cdot n_{Be} \quad (2.2.3)$$

である。ここで、 ρ_{Be} ($= \rho_d N_A / A_{Be}$) は、ターゲット Be の数密度 ($1.8 [\text{g}/\text{cm}^3] \times (6.02 \times 10^{23} [\text{個}/\text{mol}] / 9.01 [\text{g}/\text{mol}] = 1.2 \times 10^{23} [\text{個}/\text{cm}^3]$) である。 $\sigma_T = 500 \text{ mb}$ ($= 5 \times 10^{-25} \text{ cm}^2$)、He²⁺の電流を $I = 2 \mu\text{A}$ として dN_n/dt を見積もると、フルエンス $F (= (I/2)/e)$ は

$$F = (2 \times 10^{-6}/2) / 1.602 \times 10^{-19} = 6.2 \times 10^{12} \text{ 個/sec}$$

$\delta T = 5 \mu\text{m}$ ($= 5 \times 10^{-4} \text{ cm}$) として、 dN_n/dt は、

$$\begin{aligned} dN_n/dt &= 6.2 \times 10^{12} [\text{個/sec}] \times 5 \times 10^{-25} [\text{cm}^2] \times 1.2 \times 10^{23} [\text{個}/\text{cm}^3] \times 5 \times 10^{-4} [\text{cm}] \\ &= 1.9 \times 10^8 [\text{個/sec}] \end{aligned}$$

中性子の放射が等方と仮定する。検出器の有効立体化角を $d\Omega$ とすれば、検出器に毎秒入射する中性子数 dN_d/dt は、

$$\frac{dN_d}{dt} = \frac{d\Omega}{4\pi} \cdot \frac{dN_n}{dt} \quad (2.2.4)$$

である。Be ターゲットより検出器までの距離 L を $L = 1\text{m}$ 、検出器の有効検出面を半径 $r = 5\text{cm}$ とすると、 $d\Omega/4\pi (= \pi r^2/4\pi L^2) = 6.4 \times 10^{-4}$ より、

$$\frac{dN_d}{dt} = 1.3 \times 10^5 [\text{個/sec}]$$

となる。通常の放射線計測に於いては、1kc/s の検出は容易である。従って検出するに十分な中性子が得られることが分かる。

検出器に入射する中性子の角度拡がり ($\delta\theta = 10/200 = 0.05 \text{ rad}$) に起因する、中性子エネルギーの拡がりは小さく、 $E_\alpha = 15 \text{ MeV}$ ($E_n = 7.3 \text{ MeV}$)、 $\theta = 45^\circ$ の場合

$$\frac{dE_n}{d\theta} = -0.29 [\text{MeV}/\text{rad}] \quad \delta E_n = \frac{dE_n}{d\theta} \delta\theta = 0.015 [\text{MeV}]$$

と見積もられる。

References

- [1] A. W. Obst et al., Phys. Rev. C5 (1972) 738.
- [2] K. W. Geiger et al., Nucl. Instr. and Meth. 131 (1975) 315.

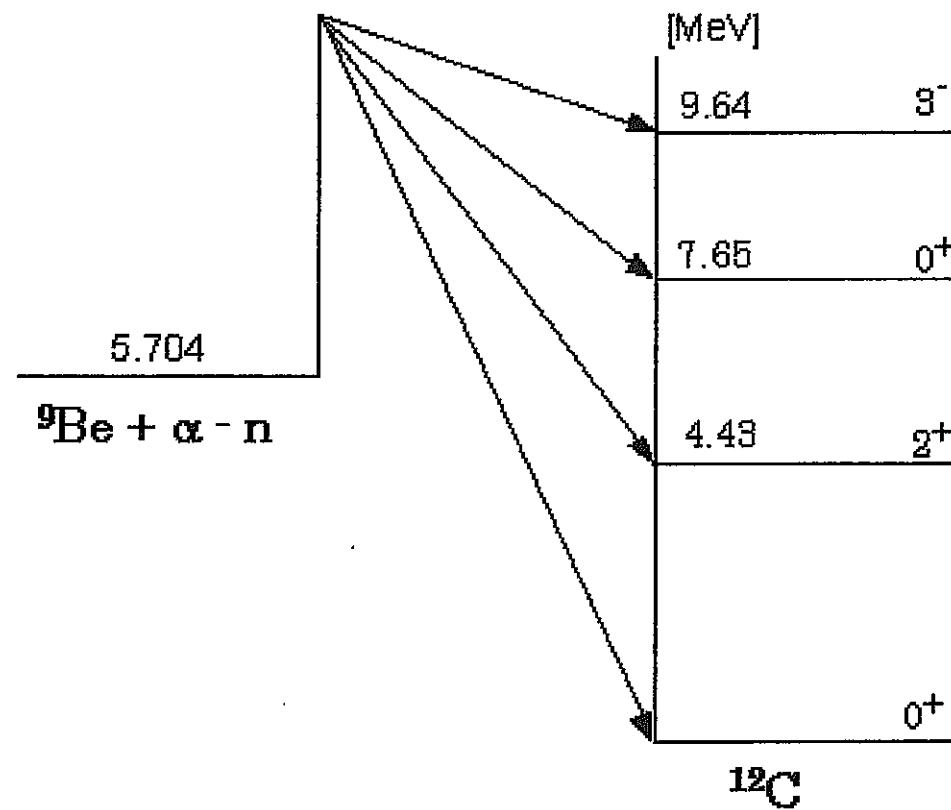


図 2.2-1 ^{12}C のエネルギーダイアグラム

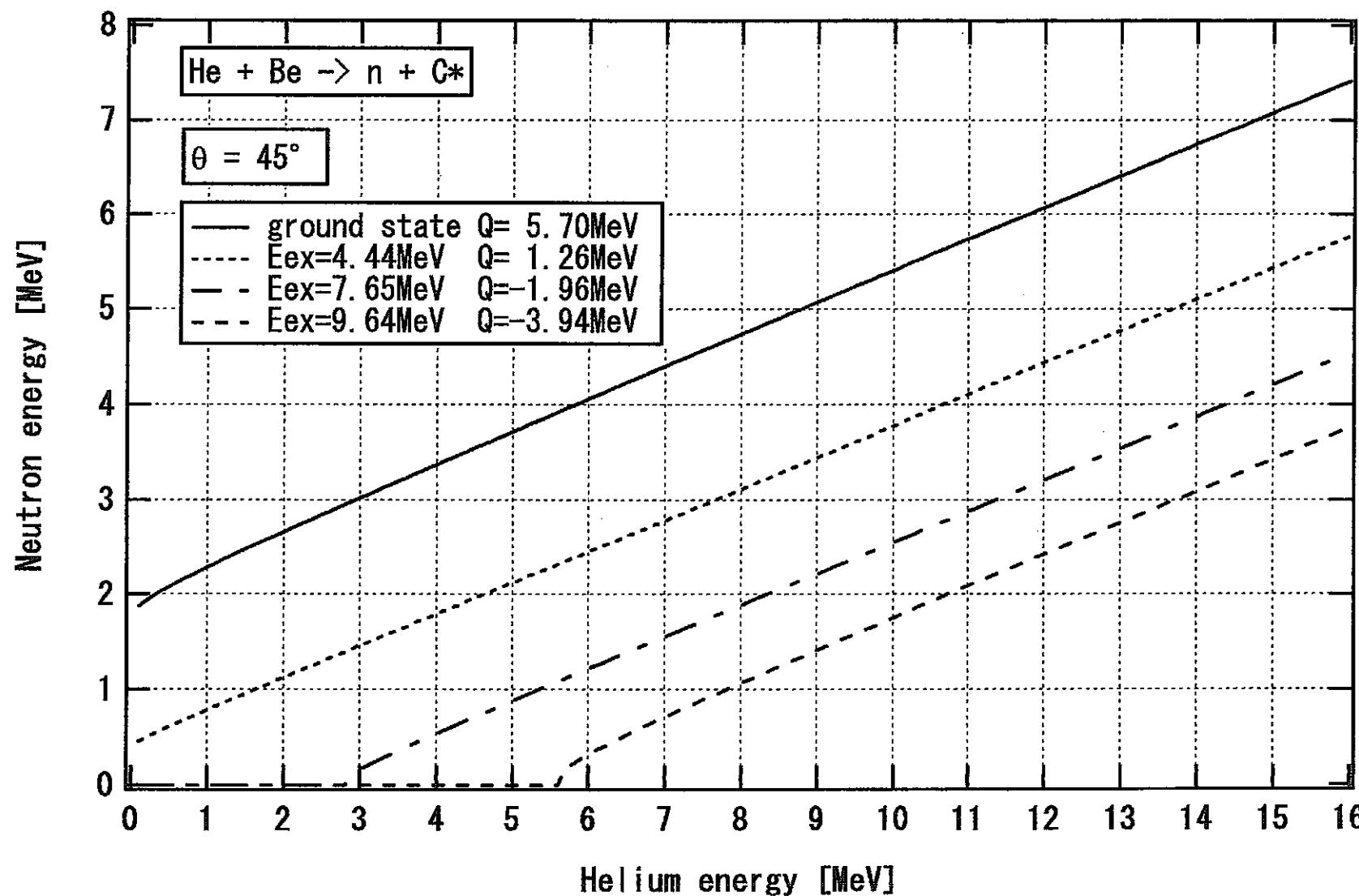


図 2.2-2 ヘリウムエネルギーに対する $\theta = 45^\circ$ 方向の中性子エネルギー

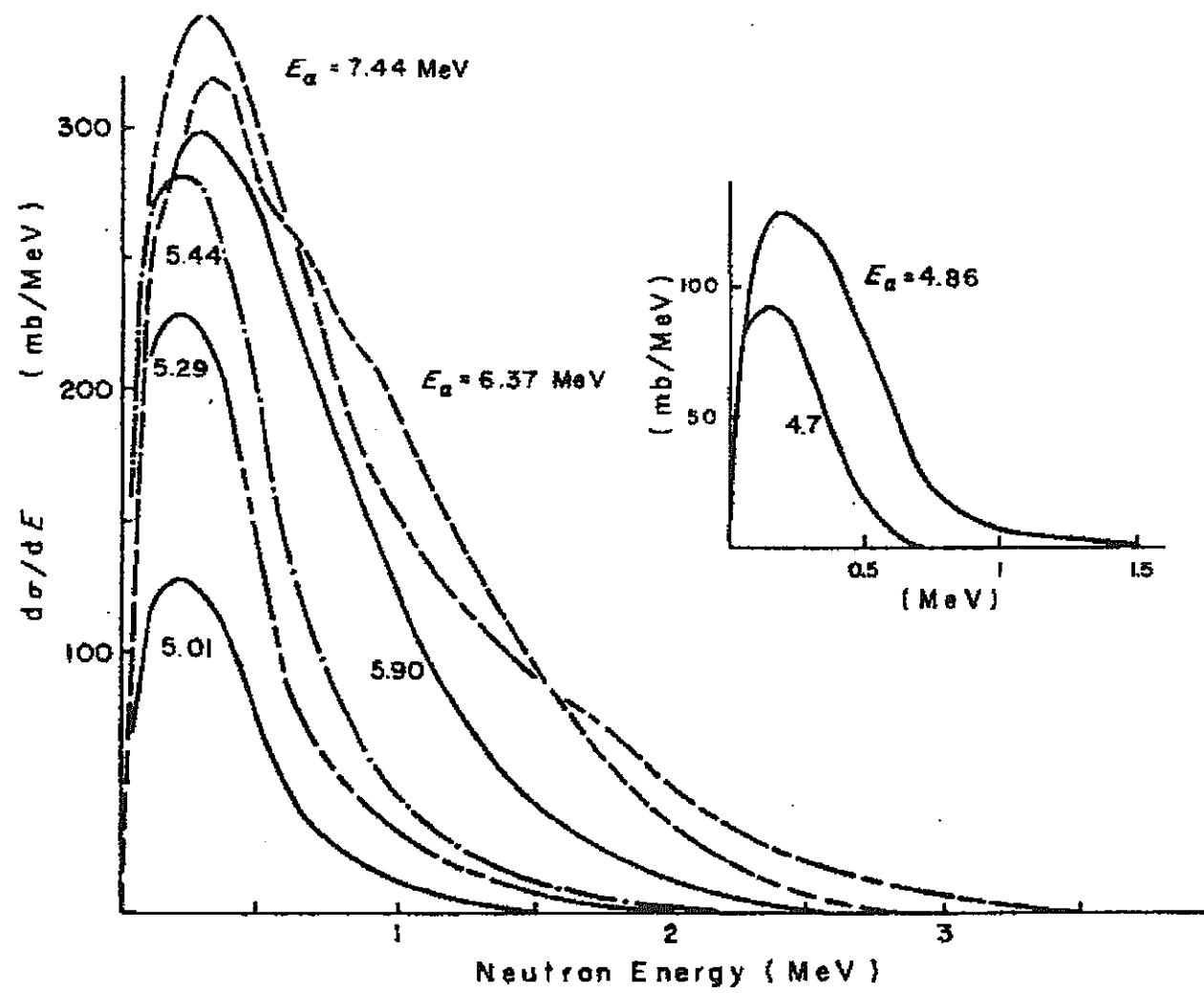


図 2.2-3 Break-up neutron のエネルギー スペクトル [K. W. Geiger et al., Nucl. Instr. and Meth. 131 (1975) 315]

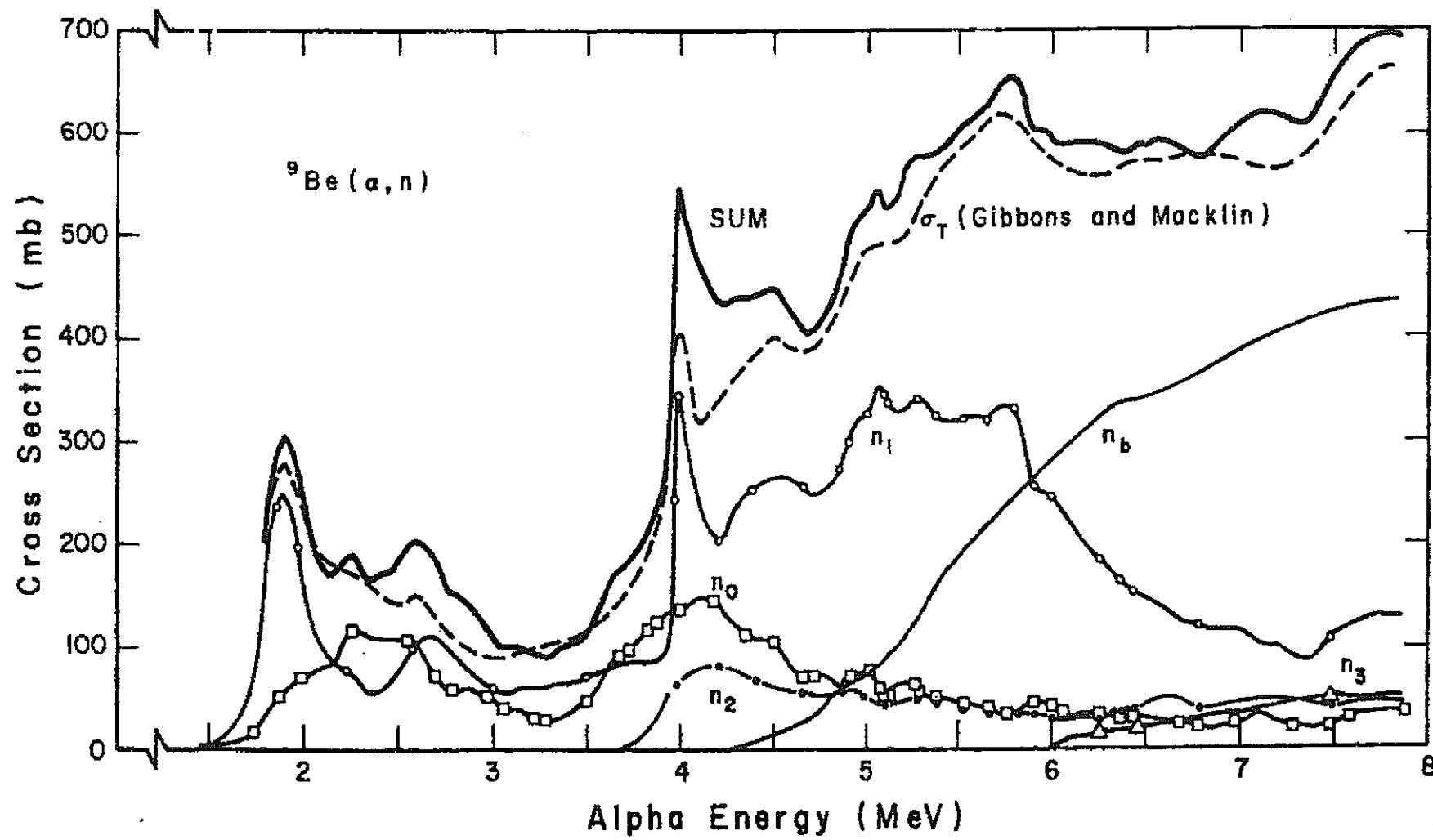


図 2.2-4 ヘリウムエネルギーに対する、種々の過程の中性子生成断面積
[K. W. Geiger et al., Nucl. Instr. and Meth. 131 (1975) 315]

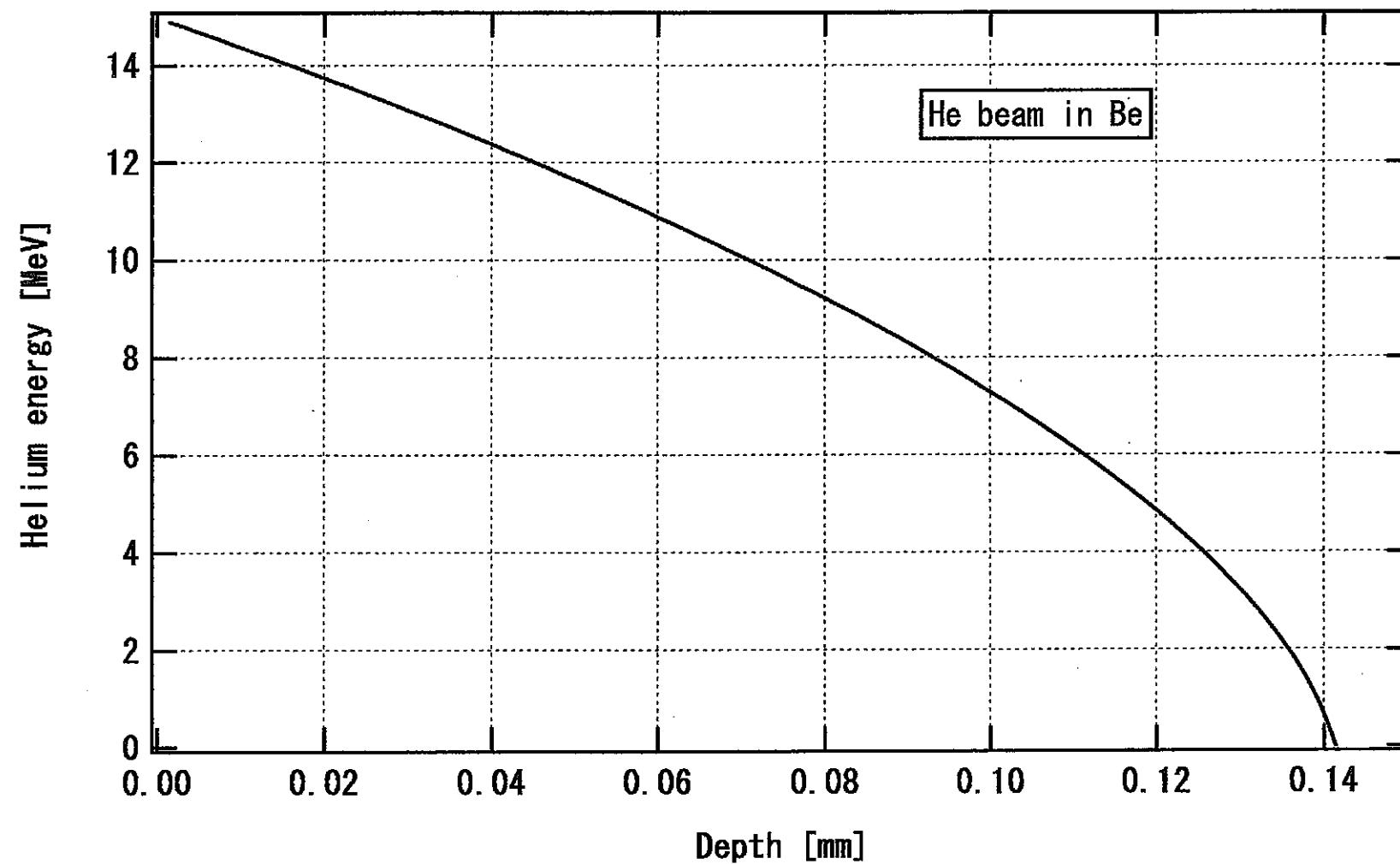


図 2.2-5 ベリリウムに入射されたヘリウムビームエネルギーの減衰

2.3 中性子照射によるレムカウンターの感度特性

加速器ビーム照射により発生した中性子線量評価に、富士電機製中性子レムカウンター(NSN10014)を用いた。レムカウンター外形を図2.3-1に示す。NSN10014の主たる仕様を以下に記す。

測定線種： 中性子

中性子感度： $4.5 \text{cps}/\mu\text{Sv}/\text{h} \pm 20\%$ (ポロエチレンモデレータ付 ^{252}Cf にて)

測定線線量率範囲： $0.1 \mu\text{Sv}/\text{h} \sim 9.999 \text{mSv}/\text{h}$

測定線線量範囲： $0.001 \mu\text{Sv} \sim 9.999 \text{mSv}$

エネルギー範囲： $0.025 \text{eV} \sim 8 \text{MeV}$

エネルギー特性： ICRP51 準拠

方向特性： $\pm 10\%$ 以内 ($0^\circ \sim \pm 135^\circ$ 範囲、 ^{252}Cf 基準)

γ 線感度： $100 \text{mSv}/\text{h}$ までの線量率寄与分 $0.2 \mu\text{Sv}/\text{h}$ 以下 (^{137}Cs 基準)

自然係数率： 0.02cps 以下 (自然バックグラウンド雰囲気)

時定数切替： 1秒～60秒までの自動切替

測定レンジ切替： $\mu\text{Sv}/\text{h} \sim \text{mSv}/\text{h}$ 自動切替

表示範囲： デジタル表示部(LCD表示) $0.001 \sim 9.999 \mu\text{Sv}/\text{h}$

または $0.001 \sim 9.999 \text{mSv}/\text{h}$

アナログ表示部(LED表示) $10^{-1} \sim 10^4 \mu\text{Sv}/\text{h}$

ここで使用したレムカウンターでは、中性子1個当たり、パルス巾 $2 \sim 3 \mu\text{s}$ 、電圧 -3V のパルス出力信号が得られる。(感度係数： $4.5 \text{cps}/[\mu\text{Sv}/\text{h}]$) ヘリウムビームエネルギー E_α を $E_\alpha = 10 \text{MeV}$ とし、イオン電流 I_α を $\sim 50 \text{nA}, \sim 160 \text{nA}, \sim 250 \text{nA}, \sim 500 \text{nA}, \sim 0.95 \mu\text{A}, \sim 1.63 \mu\text{A}$ と増加させて、各々の電流値における10秒間の計数を測定した。計数の測定は各電流値に対し12回測定し、単純平均値を各々の電流値における計数とした。図2.3-2にヘリウム電流に対する、レムカウンターの計測率を示す。ベリリウムを照射するヘリウム電流は、ベリリウムから放出されレムカウンターに飛来する中性子に比例する。照射電流の増加に伴い計数率も増加するが、計数率が 6kc/s を超えると、照射電流と計数率との比例関係が外れてくる。

10秒間の計測の間でのイオンビーム電流値の揺らぎ(これは主として加速器ビームの不安定に起因する)を考慮して、ヘリウムビームの入射数と中性子の計数を同時に測定し、電流値と計数率を求めた。 $E_\alpha = 10 \text{MeV}$ の場合の電流値に対する係数率を図2.3-3に示す。直線性を評価するために、計数率/イオン電流値を計数率の関数として図2.3-4に再プロットした。計数率が 10kc/s 以内では、計数率/イオン電流値は 10% 以内であるが、計数率の増加に伴い徐々に減少し、 40kc/s 以上では 40% 以下となる。 $E_\alpha = 6 \text{MeV}, 9 \text{MeV}, 15 \text{MeV}$ とした場合のイオン電流値に対する計数率、及び計数率に対する計数率/イオン電流値の再プロットを、図2.3-5、図2.3-6($E_\alpha = 6 \text{MeV}$)、図

2.3・7、図 2.3・8 ($E_{\alpha}=9\text{MeV}$) 及び図 2.3・9、図 2.3・10 ($E_{\alpha}=15\text{MeV}$) に示す。 $E_{\alpha}=6\text{ MeV}$ の場合、図 2.3・6 から 20 kc/s に対し 10% 程度の範囲内で直線性は保持されている。 $E_{\alpha}=15\text{ MeV}$ の場合、図 2.3・10 からより 10% 程度の範囲内で直線性が保たれるのは、 $E_{\alpha}=6\text{MeV}$ の場合に比べて低く、15 kc/s 以下と考えられる。これはベリリウムから放出される中性子のエネルギー分布の差によると考えられる。本実験の範囲内では、レムカウンターへの中性子フラックスに対し、レムカウンターの計数率の直線性が良好な計数率の範囲は 10 kc/s 以下と考えられる。

カウント数の計測時にレムカウンターのデジタル表示で示される線量を記録した。ヘリウムビーム電流の揺らぎのため表示される値は時々刻々変わったため、その間の代表的な値を記録した。以下に示す値は使用レムカウンターで得られたおおよその線量を与えるものである。デジタル表示 D は

$E_{\alpha}=10\text{MeV}$	$I_{\alpha} \approx 120\text{nA}$	$D \approx 1.7 \text{ mSv/h}$
	$I_{\alpha} \approx 300\text{nA}$	$D \approx 3.8 \text{ mSv/h}$
	$I_{\alpha} \approx 500\text{nA}$	$D \approx 5.8 \text{ mSv/h}$
$E_{\alpha}=9\text{MeV}$	$I_{\alpha} \approx 120\text{nA}$	$D \approx 1.3 \text{ mSv/h}$
	$I_{\alpha} \approx 250\text{nA}$	$D \approx 2.7 \text{ mSv/h}$
	$I_{\alpha} \approx 420\text{nA}$	$D \approx 5.0 \text{ mSv/h}$
	$I_{\alpha} \approx 950\text{nA}$	$D \approx 9.0 \text{ mSv/h}$
$E_{\alpha}=15\text{MeV}$	$I_{\alpha} \approx 120\text{nA}$	$D \approx 2.0 \text{ mSv/h}$
	$I_{\alpha} \approx 200\text{nA}$	$D \approx 3.4 \text{ mSv/h}$
	$I_{\alpha} \approx 440\text{nA}$	$D \approx 6.6 \text{ mSv/h}$
	$I_{\alpha} \approx 800\text{nA}$	$D \approx 9.5 \text{ mSv/h}$

であった。

本実験で用いたレムカウンターの感度は $4.5\text{cps}/[\mu\text{Sv}/\text{h}]$ とされている。この値を用いれば、10 kc/s は 2.2 mSv に相当する。

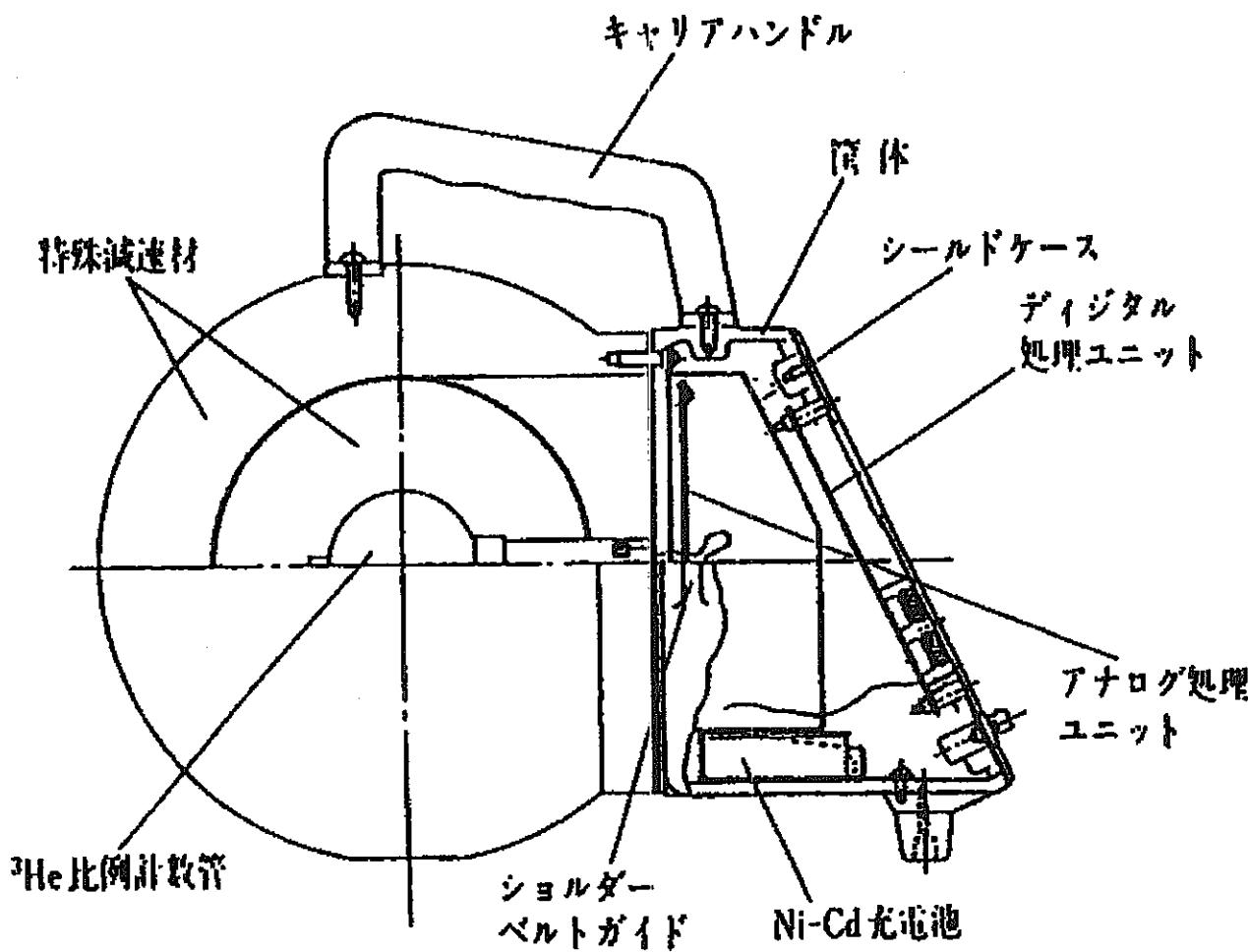


図 2.3-1 実験に使用したレムカウンター外形（富士電機製、NSN10014）

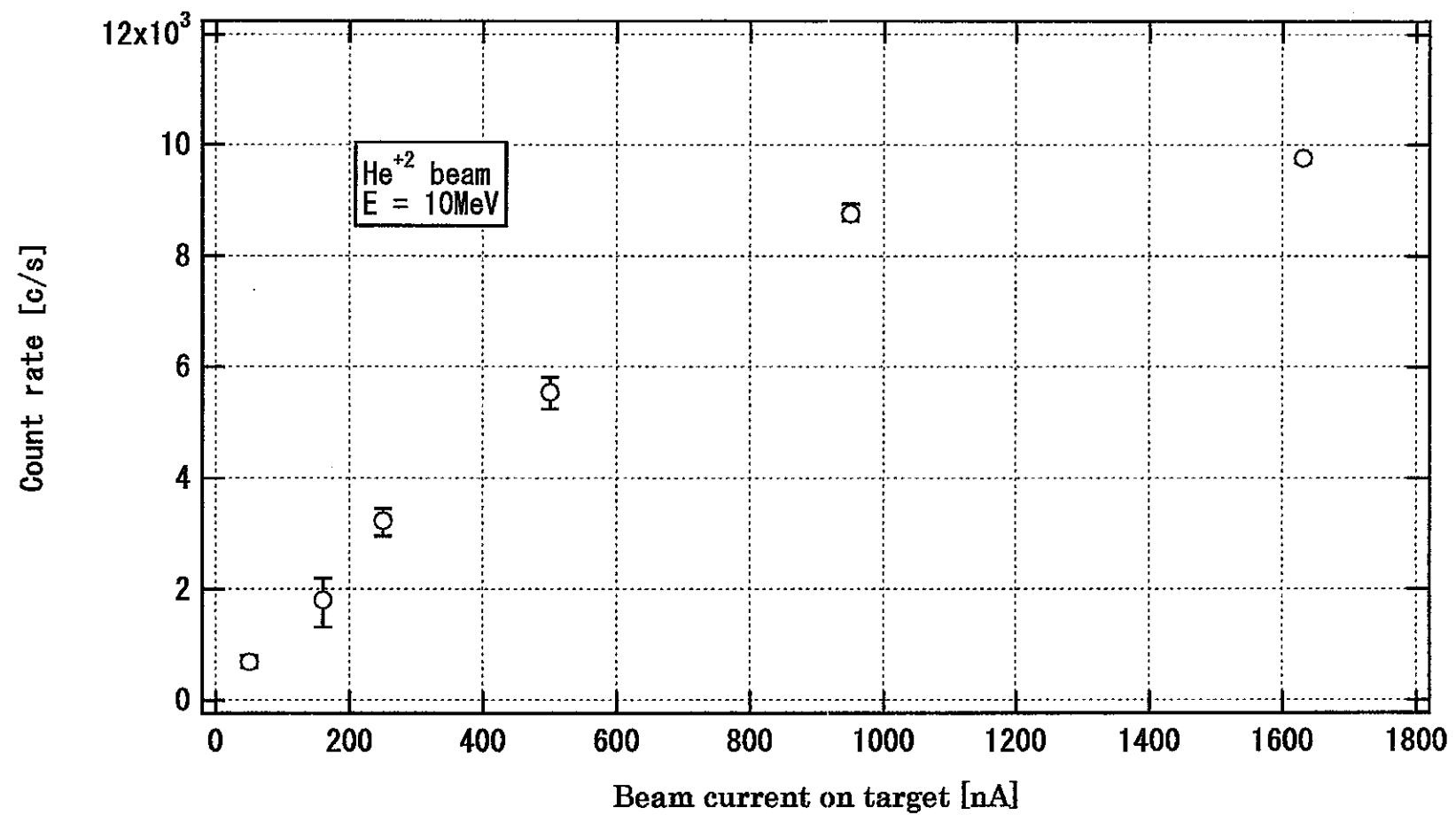


図 2.3-2 ヘリウムビーム電流に対するレムカウンターの中性子カウントレイト。

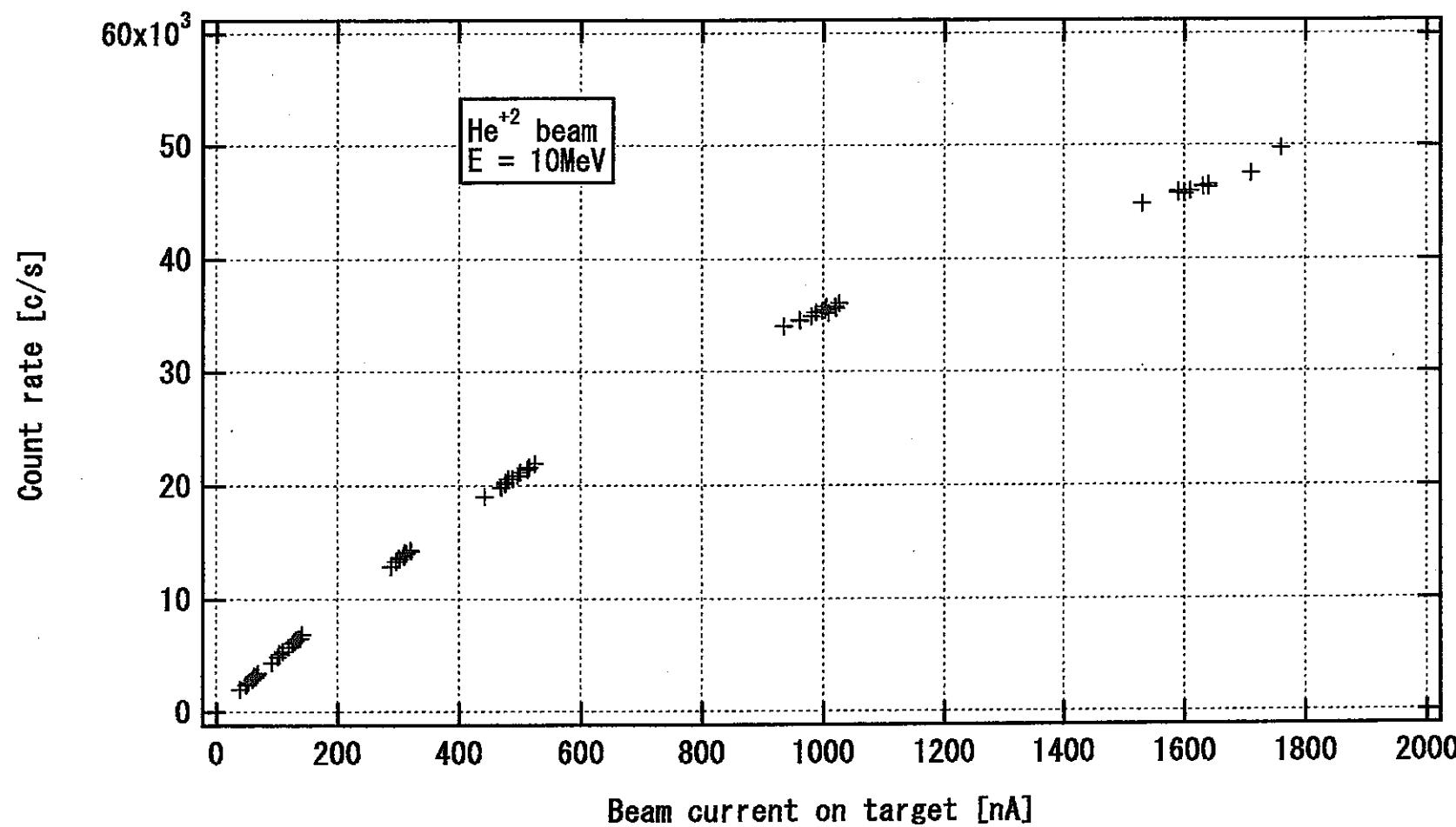


図 2.3-3 ヘリウムビーム電流に対するレムカウンターの中性子カウントレイト ($E_\alpha = 10\text{MeV}$)。

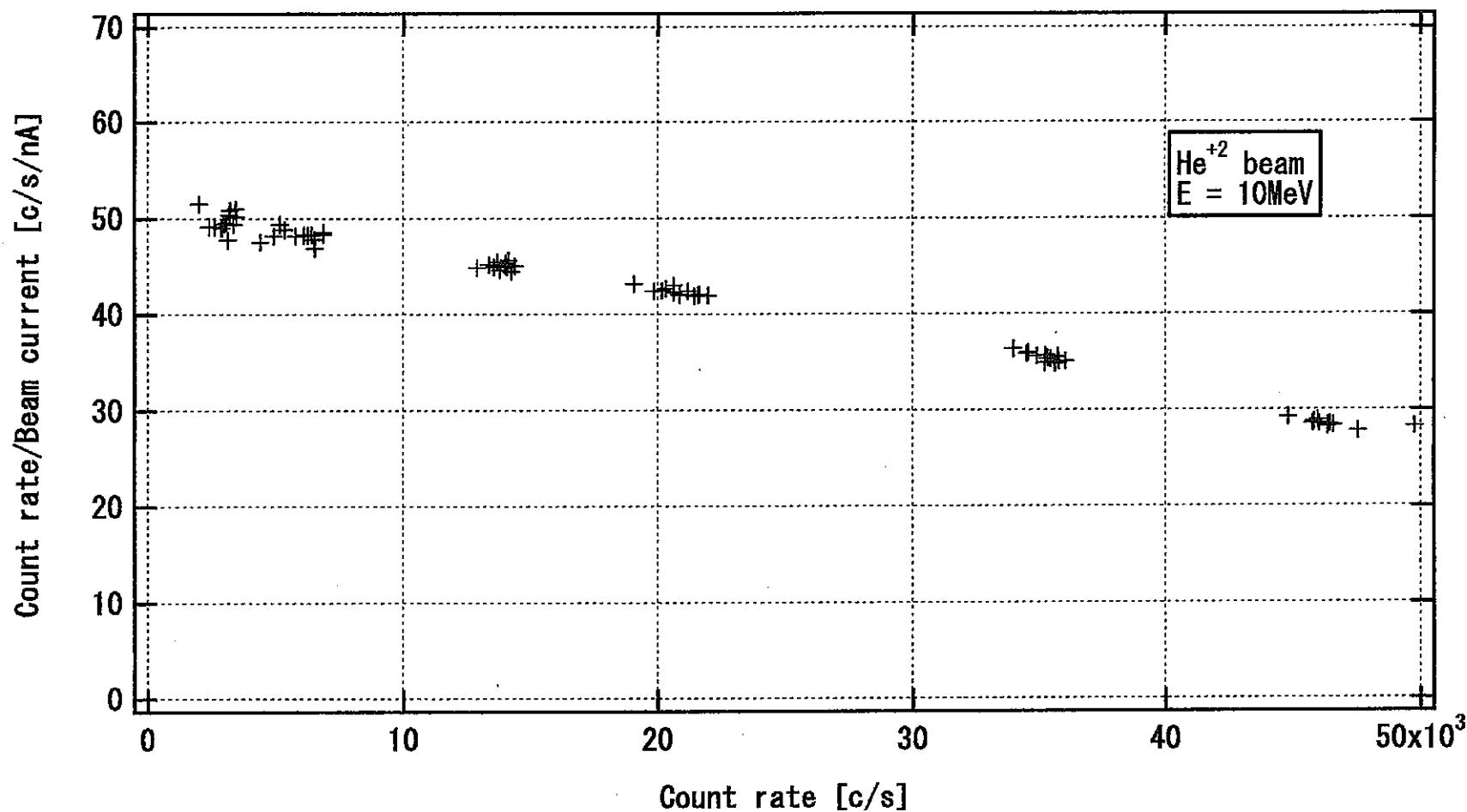


図 2.3-4 「カウントレイト/ビーム電流」のカウントレイト依存性 ($E_\alpha = 10\text{MeV}$)。

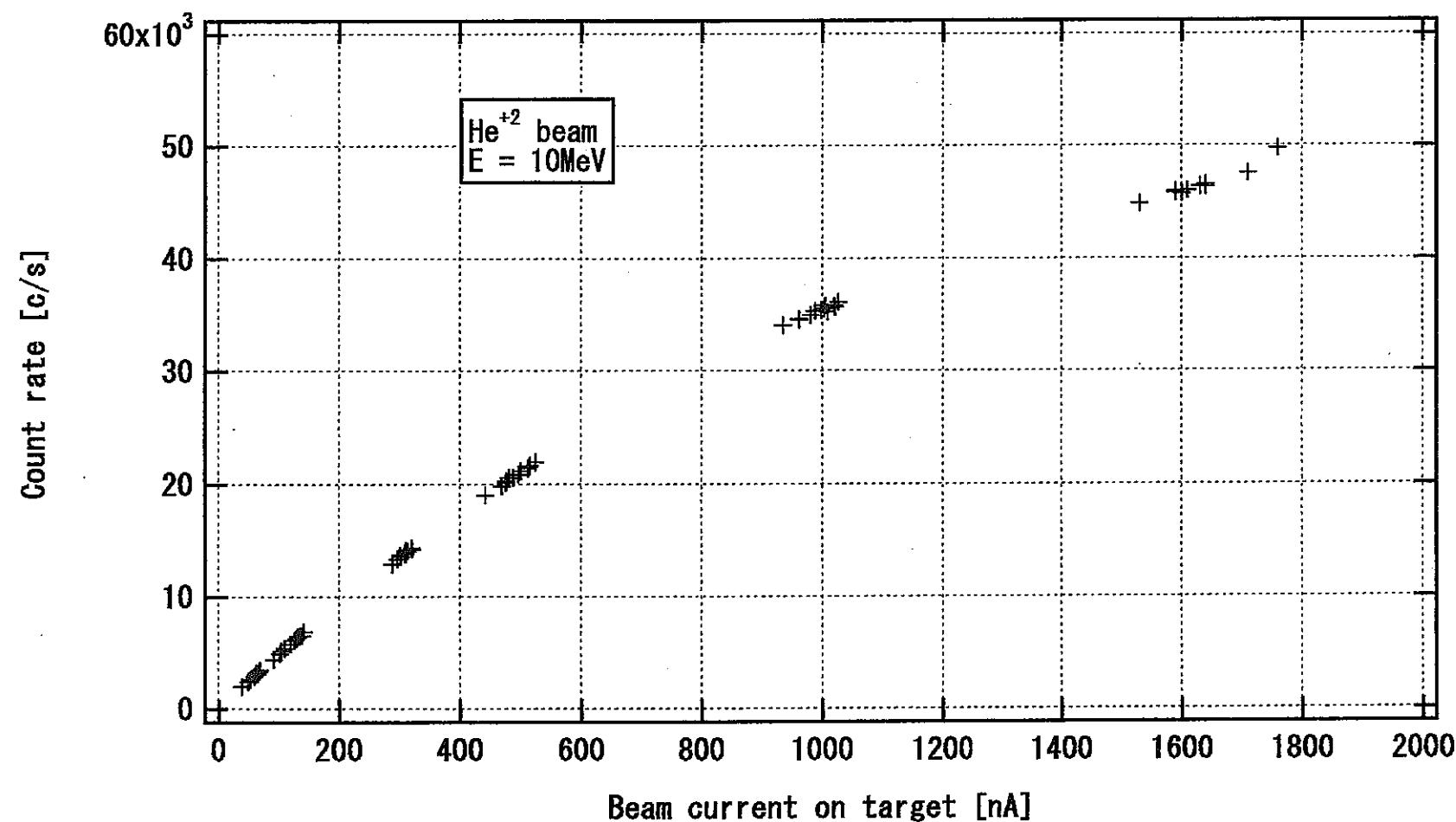


図 2.3-3 ヘリウムビーム電流に対するレムカウンターの中性子カウントレイト ($E_{\alpha} = 10\text{MeV}$)。

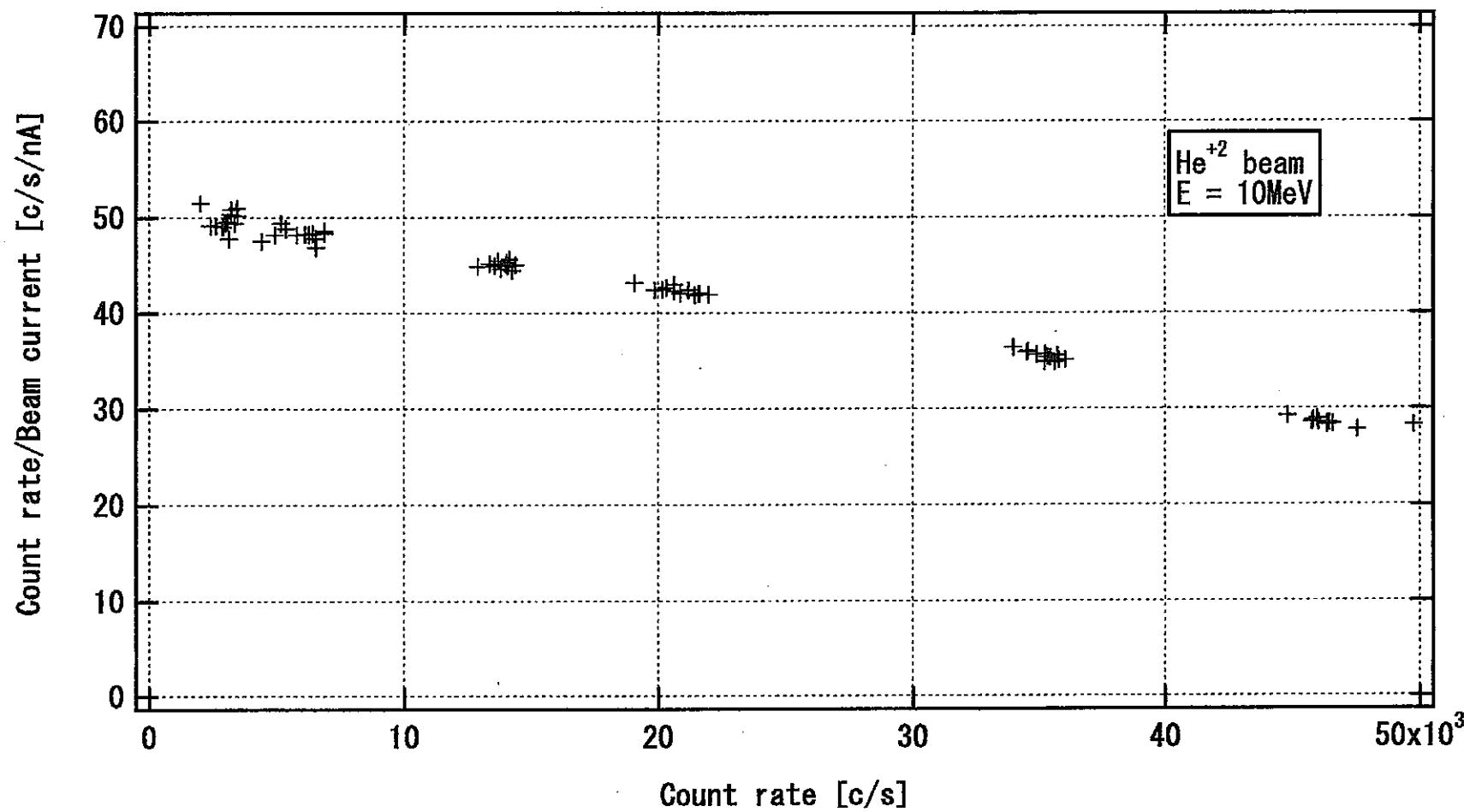


図 2.3-4 「カウントレイト/ビーム電流」のカウントレイト依存性 ($E_{\alpha} = 10\text{MeV}$)。

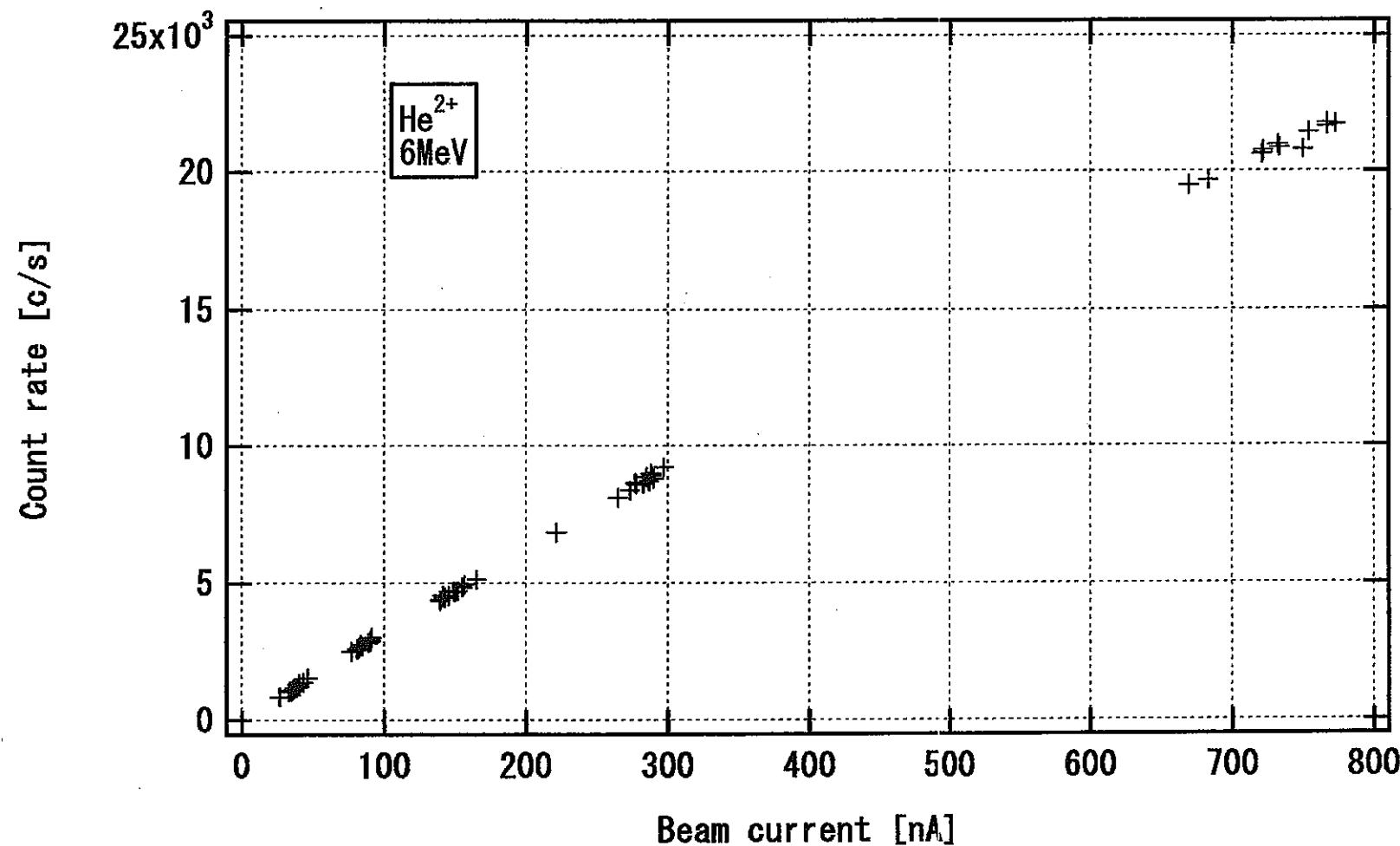


図 2.3-5 ヘリウムビーム電流に対するレムカウンターの中性子カウントレイト ($E_\alpha = 6\text{MeV}$)。

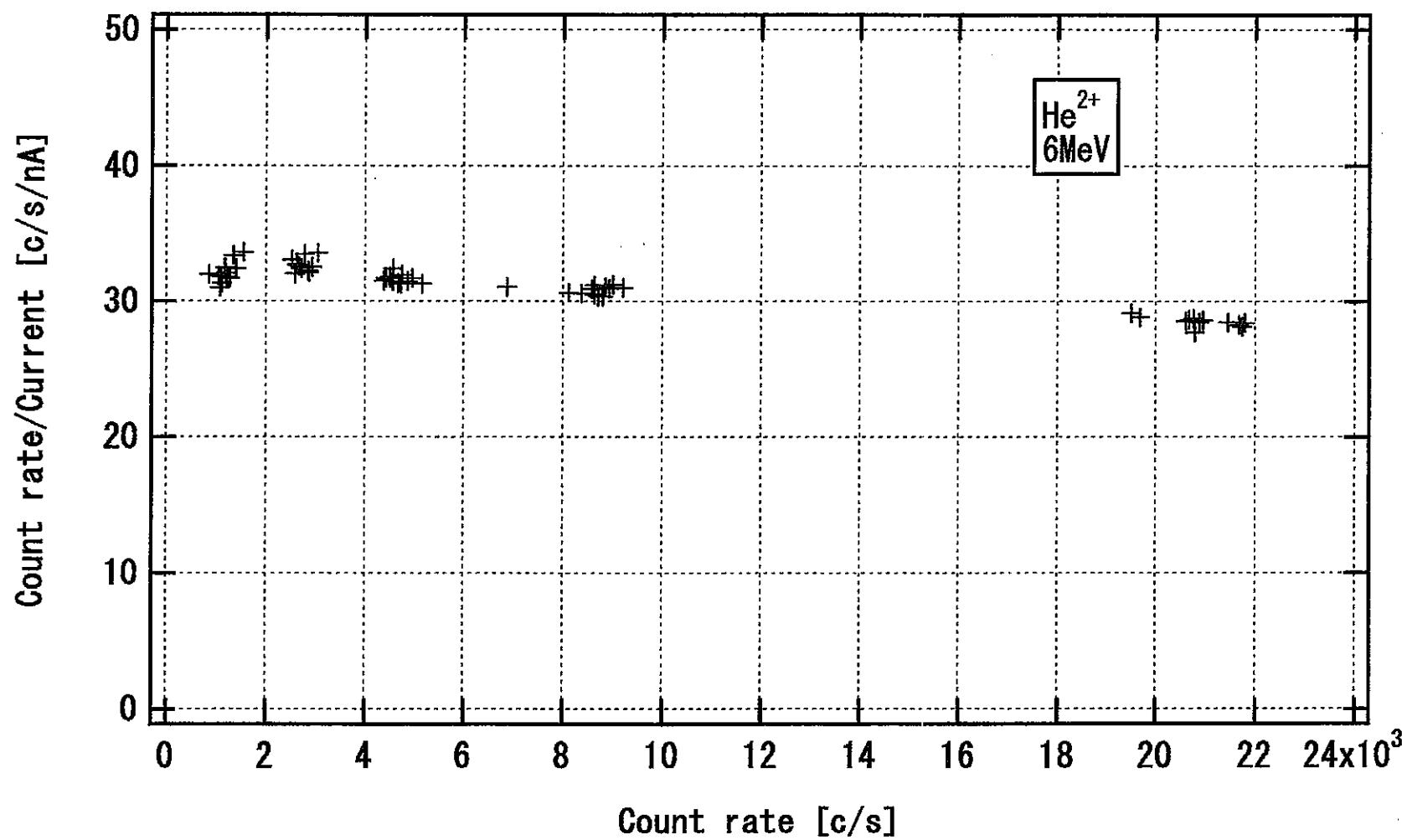


図 2.3-6 「カウントレイト/ビーム電流」のカウントレイト依存性 ($E_\alpha = 6\text{MeV}$)。

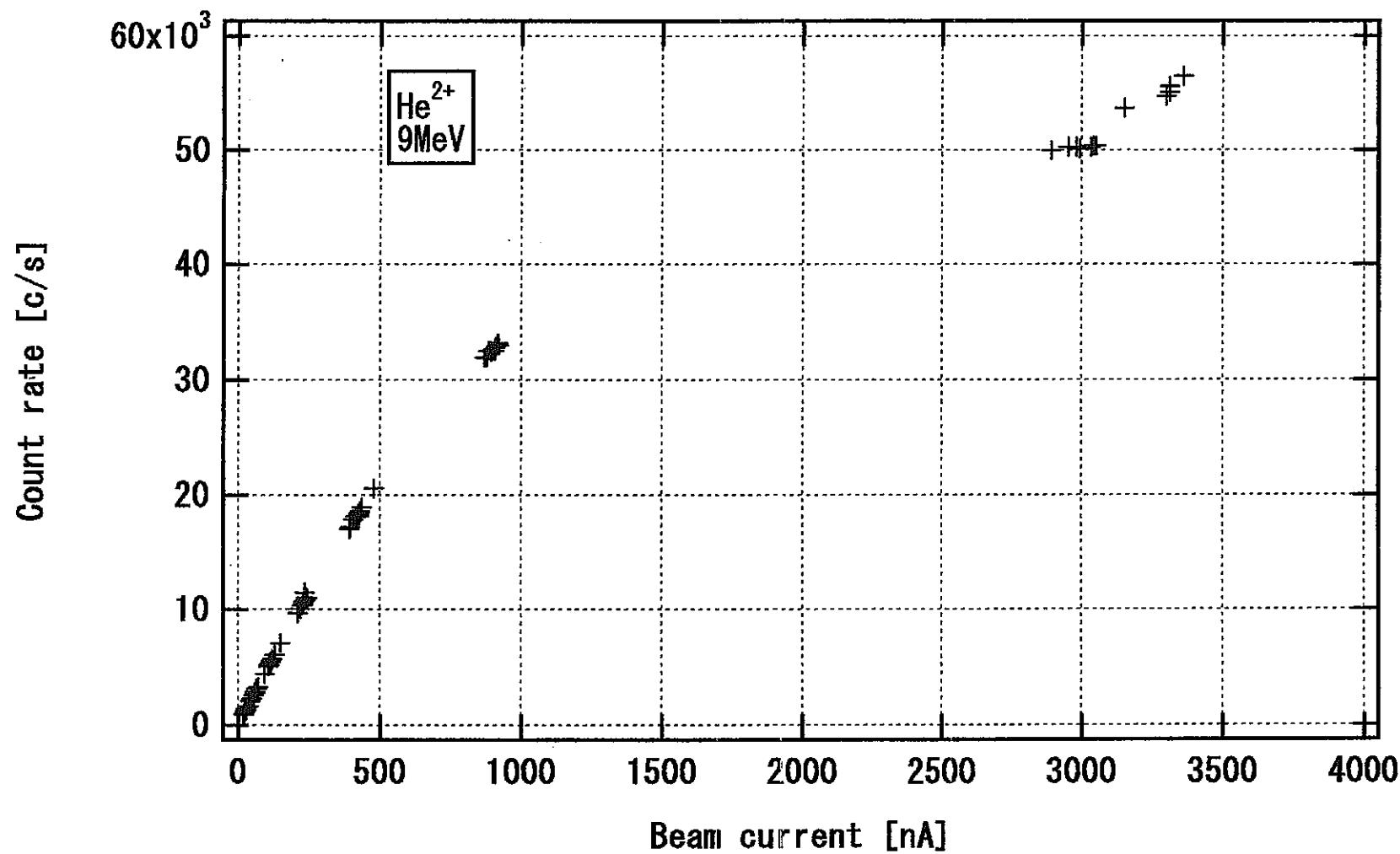


図 2.3-7 ヘリウムビーム電流に対するレムカウンターの中性子カウントレイト ($E_\alpha = 9\text{MeV}$)。

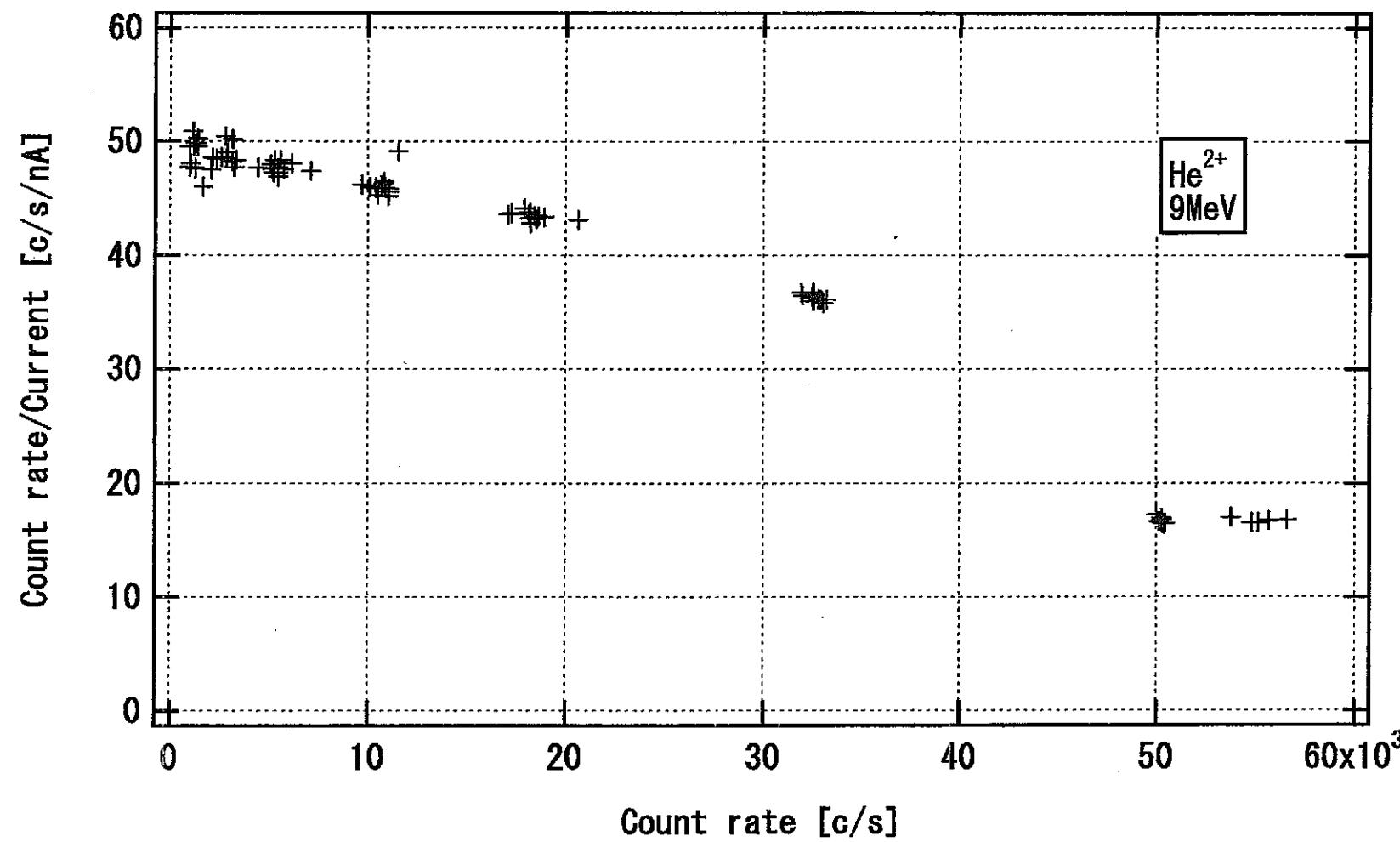


図 2.3-8 「カウントレイト/ビーム電流」のカウントレイト依存性 ($E_{\alpha} = 9 \text{ MeV}$)。

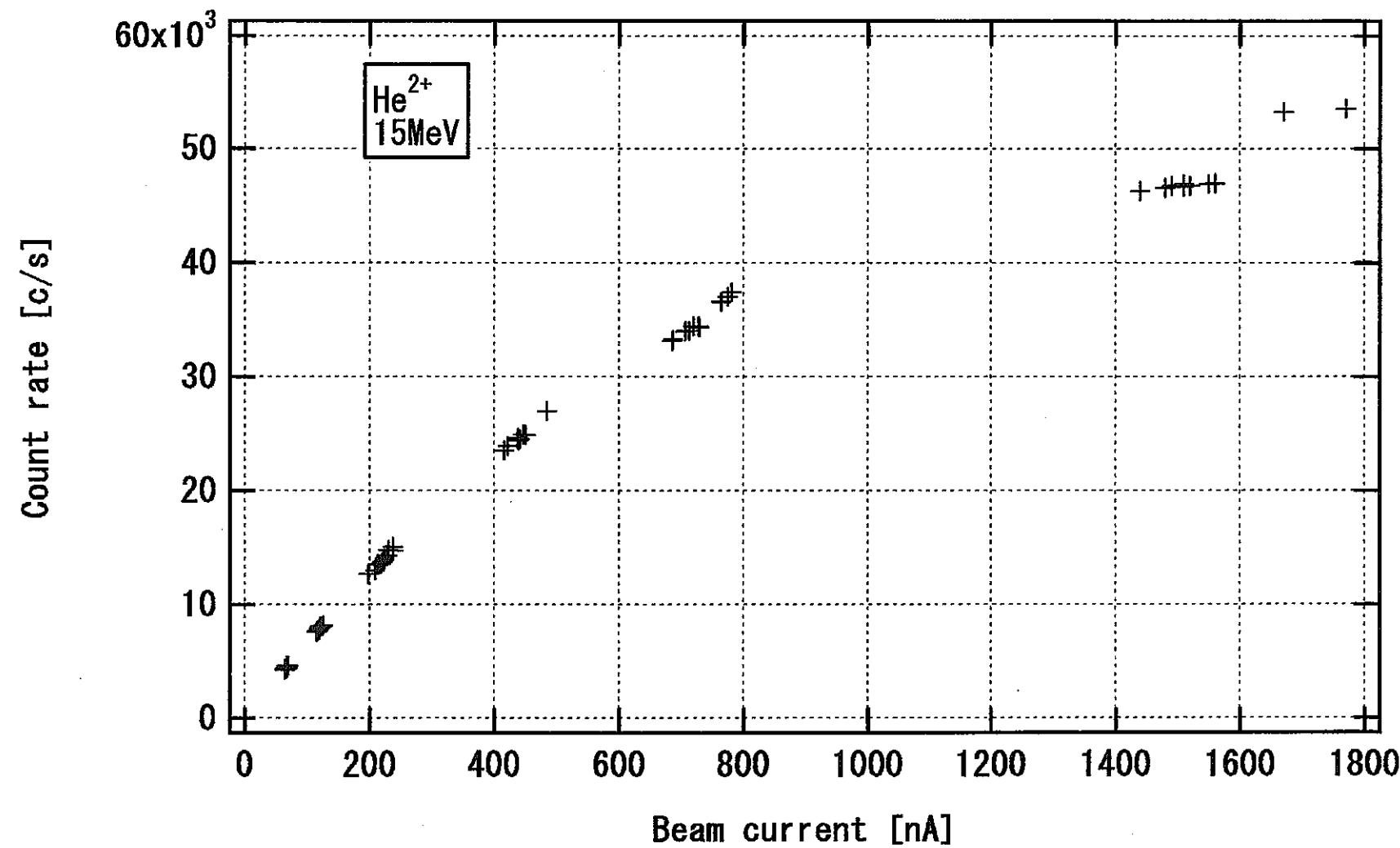


図 2.3-9 ヘリウムビーム電流に対するレムカウンターの中性子カウントレイト ($E_\alpha = 15\text{MeV}$)。

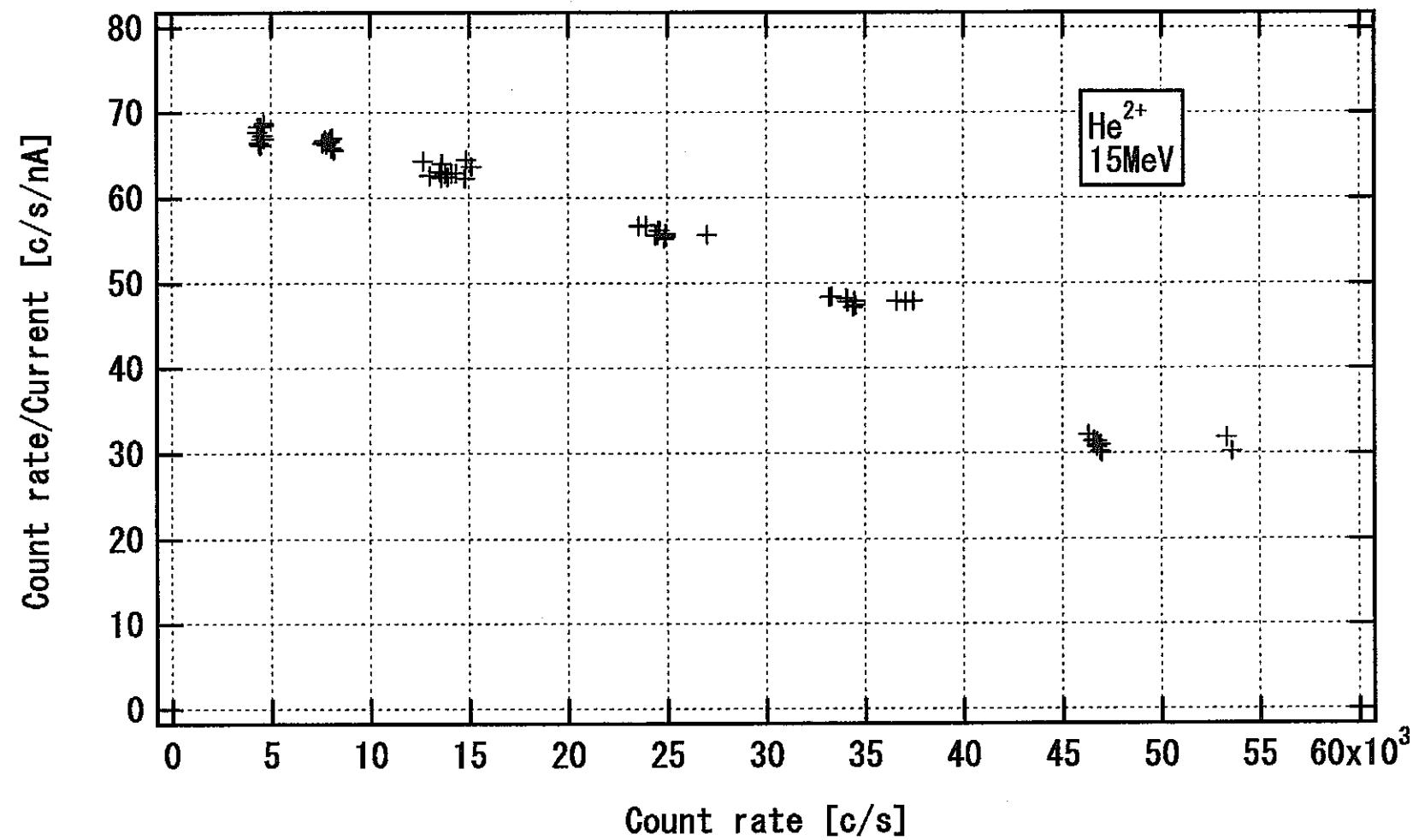


図 2.3-10 「カウントレイト/ビーム電流」のカウントレイト依存性 ($E_\alpha = 15\text{MeV}$)。

2.4 中性子積分線量評価実験

ヘリウムビーム照射によるベリリウム中性子源から、ビーム下流の45°方向、100cm離れたレムカウンター設置位置の中性子線量を箔放射化法及びTLDバッチによる中性子線量計測により評価した。最初に箔放射化法による中性子線量評価結果について述べ、この節の終わりにTLDバッチによる中性子線量評価を述べる。箔放射化法による中性子線量評価には、(株)千代田テクノル製の中性子放射化検出器を用いた。本研究では¹⁹⁷Au箔、¹¹⁵In箔、及びカドニウムケース内に納入された¹⁹⁷Au箔、¹¹⁵In箔、を中性子線量評価に使用した。ベリリウム膜(厚さ5μm)へのヘリウムビーム照射条件は、エネルギーE_α=15 MeV 電流値I_α~0.8μAとし、照射時間を30分とした。

2.4.1 γ線検出系(Ge検出器)の校正

中性子照射による箔放射化法計測にはGe検出器を使用した。照射中性子のフラックスの絶対値を求めるために、使用したGe検出器のγ線検出システムの校正を行った。

校正用に使用したガンマ線線源(複数のガンマ線放出核種線源)の核種、γ線エネルギー、放出率等の物理特性等を表2.4-1に示す。3時間の線源照射によりGe検出器で得られた波高分布を図2.4-1に示す。線源設置位置は中性子照射サンプルの測定位置と同一である。種々の線スペクトルに対し、非線形最小2乗法を用いて6個のパラメータを持つ次式へのフィッティングを行い、チャンネル番号のエネルギー校正及びカウント数の算出を行った。

$$y = a_1 \exp\left(-\frac{[x-a_2]^2}{a_3^2}\right) + a_4 x^2 + a_5 x + a_6 \quad (2.4.1)$$

フィッティングにより得られたa₂の最確値は、種々の核種のエネルギーにおけるチャンネル番号に対応する。ガンマ線エネルギーをチャンネル番号の関数として図2.4-2にプロットする。このデータを用いて直線へ最小2乗法によるフィッティングの結果、ガンマ線エネルギーEとチャンネル番号Ch_numberとの関係は

$$E = 0.50083 \times Ch_number + 0.13976 \quad (2.4.2)$$

と求まった。以下に示す波高分布は、この関係を用いてエネルギーの関数として表示する。

Ge検出器に於ける全カウント数N_cを(2.4.1)式の第一項を積分して求め、測定時間を考慮してカウントレイトを算出した。カウント数、カウントレイトC、カウントレイトCに対する測定時の線源のガンマ線放射強度Iの比I/Cを表2.4-2にまとめた。図2.4-3にエネルギーEの関数としての比I/Cをプロットする。比I/CをエネルギーE

の1次関数で近似し、データを最小2乗法で当てはめ、以下の結果を得た。

$$I/C = 0.04297 \cdot E + 5.6763 \quad (2.4.3)$$

2.4.2 Au 箔放射化法による中性子線量評価

30分の中性子照射の後、放射化したAu（直接照射及びカドニウムケース内照射）とIn（直接照射及びカドニウムケース内照射）から放射されるガンマ線をGe検出器で計測した。直接照射されたAu箔の照射直後から17時間40分後の波高分布を図2.4-4に、26時間50分後の波高分布を図2.4-5に、68時間10分後の波高分布を図2.4-6に、83時間45分後の波高分布を図2.4-7に示す。カドニウムボックスに入れたAu箔の照射直後から18時間50分後の波高分布を図2.4-8に、28時間4分後の波高分布を図2.4-9に、69時間42分後の波高分布を図2.4-10に示す。Ge検出器による γ 線計測時間は全て60分とした。 $E_\gamma = 411.804\text{keV}$ の位置に観測される ^{198}Au （半減期、2.696d）からのガンマ線放射強度が、時間の経過とともに減少していくことがわかる。図2.4-7及び図2.4-10に於いてはノイズレベル程度となる。(2.4.2)式を用いた関数フィッティングによりカウント数を求め、計測時間を考慮してカウントレイトを算出した。(2.4.3)式の関係を用いてサンプルの γ 線放出強度を求めた後、 $E_\gamma = 411.804\text{keV}$ の放出率95.5%を考慮して壊変率及び測定間の壊変数を求めた。その結果を表2.4-3にまとめる。

t_0 間の中性子照射の後、照射終了後時刻 t での放射能 $A(t)$ は

$$A(t) = N(0)\sigma\phi \cdot [1 - \exp(-\lambda t_0)] \cdot \exp(-\lambda t) \quad (2.4.4)$$

で与えられる。ここで、 $N(0)$ は中性子照射前の原子の個数 ($N(0) = mN_A/A$, m : ターゲットの質量、 N_A : アボガドロ数、 A : 1mol当たりの質量数)、 σ は中性子照射により同位体元素が生成される反応断面積、 ϕ は中性子フラックス、 λ は生成同位体元素の壊変定数である。時刻 t_1 から t_2 までの壊変数 D は、(2.4.4)式を積分することにより

$$D = N(0)\sigma\phi \cdot \frac{[1 - \exp(-\lambda t_0)]}{\lambda} \cdot [\exp(-\lambda t_1) - \exp(-\lambda t_2)] \quad (2.4.5)$$

である。使用した金箔の重量 $m = 208.6\text{mg}$, ^{198}Au 生成の反応断面積 σ は $= 98.65\text{ barn}$, 半減期 $T = 2.695\text{ day}$ を用いて金箔での中性子フラックス ϕ を求めた。結果を表2.4-3の最終列にその値を記す。直接照射された金箔により評価された中性子フラックスは $\phi_{\text{direct}} = 1174.7\text{ [cm}^2\text{s}^{-1}\text{]}$ 、カドニウムボックス内の金箔により評価された中性子フラックスは $\phi_{\text{inCd}} = 616.1\text{ [cm}^2\text{s}^{-1}\text{]}$ であった。ここで ϕ_{direct} は3つの値の単純平均を用いている。カドニウムは、熱中性子に対する放射化断面積が大きく、又、金箔の速中性子による放射化断面積は僅かであるため $\phi_{\text{direct}} - \phi_{\text{inCd}}$ が、熱中性子のフラックス

ϕ_{thermal} を与える。又、 ϕ_{InCd} は中速中性子のフラックス $\phi_{\text{sub_fast}}$ を与える。それぞれの値は、

$$\phi_{\text{thermal}} = 558.5 \text{ [cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{]} = 2.01 \times 10^5 \text{ [cm}^{-2}\text{h}^{-1}\text{]}$$

$$\phi_{\text{sub_fast}} = 616.1 \text{ [cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{]} = 2.22 \times 10^5 \text{ [cm}^{-2}\text{h}^{-1}\text{]}$$

であった。熱中性子に対しては 1cm 線量当量換算計数 $8.00 \times 10^{-12} \text{Sv} \cdot \text{cm}^2$ を、中速中性子に対しては、 20 keV に対応する 1cm 線量当量換算計数 $1.46 \times 10^{-11} \text{Sv} \cdot \text{cm}^2$ を掛けて各々の線量を評価すると、

$$\text{熱中性子: } 16.09 \text{ [\mu Sv/h]}$$

$$\text{中速中性子: } 32.38 \text{ [\mu Sv/h]}$$

であった。

2.4.3 In 箔放射化法による中性子線量評価

In 箔に対しても同様な評価を行った。表 2.4-4(1), 表 2.4-4(2)に中性子照射後の In 箔サンプルの Ge 検出器による計測時間を示す。生成核種 ^{116m}In の半減期が 54.4 min と短いため、照射後直ちに中性子照射した In 箔の γ 線計測を実施した。複数回の計測で、計測時間は全て 10 分とした。直接照射した In 箔、及びカドニウムボックス内の In 箔に対して得られた波高分布を図 2.4-12～図 2.4-19 に示す。 ^{116m}In からは幾つかの線スペクトルが観測された。ここでは比較的 γ 線強度の強いエネルギー $E_\gamma = 416.86 \text{ keV}$ (29.2%)、 $E_\gamma = 1097.30 \text{ keV}$ (56.2%)、 $E_\gamma = 1293.54 \text{ keV}$ (84.4%) を分析対象とした。ここで括弧内の値は、夫々の γ 線放出率である。

Au 箔サンプルと同様に、(2.4.1)式へのフィッティングを用いて、Ge 検出器のカウント数を求め、計測時間を考慮してカウントレイト算出した。(2.4.3)式の関係を用いて γ 線放出強度を求めた後、各々の放出率を考慮して壊変率及び測定間の壊変数を求めた。これらの値を表 2.4-4 に記す。中性子照射後の ^{116m}In 壊変数の変化を図 2.4.20 にプロットする。中性子フラックスを算出するための壊変数は、3 つの値の単純平均値を用いた。

使用した In 箔の重量 $m = 82.2 \text{ mg}$, ^{116m}In 生成の反応断面積 σ は $= 81 \text{ barn}$, 半減期 $T = 54.4 \text{ min}$ を用いて、(2.4.5)により中性子フラックス ϕ を求めた。結果を表 2.4-4 の最終列に記す。直接照射された In 箔により評価された中性子フラックスは $\phi_{\text{direct}} = 1694.5 \text{ [cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{]}$ 、カドニウムボックス内の In 箔により評価された中性子フラックスは $\phi_{\text{InCd}} = 770.7 \text{ [cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{]}$ であった。これらの値は、表 2.4-4 に示した 4 つ値の単純平均値である。この値より、Au 箔と同様に、熱中性子のフラックス ϕ_{thermal} を及び中速中性子のフラックス $\phi_{\text{sub_fast}}$ を評価し、

$$\phi_{\text{thermal}} = 923.8 \text{ [cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{]} = 3.33 \times 10^5 \text{ [cm}^{-2}\text{h}^{-1}\text{]}$$

$$\phi_{\text{sub_fast}} = 770.7 \text{ [cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{]} = 2.77 \times 10^5 \text{ [cm}^{-2}\text{h}^{-1}\text{]}$$

を得た。熱中性子及び 20 keV に対する 1cm 線量当量換算計数を掛けて線量を評価する

と

熱中性子： 26.60 [μSv/h]

中速中性子： 40.51 [μSv/h]

であった。

2.4.4 TLD パッチによる中性子線量評価

中性子放射線積分線量測定用に使用した TLD パッチ (UD-801PQ) は、4つのエレメント (E1~E4) からなり、以下の蛍光体材料が使われている。

エレメント番号	蛍光体材料	シールド
E1 - E2	$^6\text{Li}_2^{11}\text{B}_4\text{O}_7$ (Cu)	樹脂 14mg/cm ³
E3 - E4	CaSO ₄ (Tm)	鉛 厚さ 0.7mm

4つの TLD パッチにおける結果を表 2.4-5 に示す。エレメント E1-E2 から読みとられた値は、エレメント E3-E4 に比べて一桁高い値を示している。ここで使用したエレメント E1-E2 (ホウ酸リチウム) は、X線、γ線、β線、及び熱中性子に感度を持ち、特に熱中性子に対してはγ換算で約 46 倍の感度を持つ。但し、高速中性子に対しては、ほとんど感度が無い。一方、エレメント E3-E4 (硫酸カルシウム) は中性子に対してまったく感度が無く、またシールドが厚い (鉛 0.7mm) ためβ線にも感じない。これらを考慮して、E3-E4 の平均値がγ線による積分線量と考えることができる。E1-E2 は熱中性子に対しても感度を持つ。ここでは E1-E2 が熱中性子のみによると仮定すれば、以下の式を用いて、熱中性子による積分放射線量 I_n が推定できる。

$$I_n = \left(\frac{E1+E2}{2} - \frac{E3+E4}{2} \right) / 46 \quad (2.4.6)$$

このようにして評価した熱中性子積分放射線量及び線量率を、表 2.4-5 の最後の列に示す。4つのパッチの熱中性子積分放射線量の平均値は 11.21μSv、線量率の平均値は 22.41μSv/h であった。

表 2.4-1 チェックソースの核種の物理特性と計測時の放射能値

核種	γ 線エネルギー [keV]	半減期 T [days]	納入時の放射能 [Bq]	実験時の放射能 [Bq]	壊変数 [個]	γ 線放出率 (%)	γ 線放出個数 [個]	γ 線放出強度 [1/s]
¹⁰⁹ Cd	88.034	464.00	1.92E+04	5.05E+03	5.45E+07	3.73	2.03E+06	188.33
⁵⁷ Co	122.061	271.00	1.59E+03	1.61E+02	1.74E+06	85.60	1.49E+06	138.24
⁵⁷ Co	136.474	271.00	1.59E+03	1.61E+02	1.74E+06	10.60	1.85E+05	17.12
¹³⁹ Ce	165.858	137.70	1.19E+03	1.32E+01	1.43E+05	79.90	1.14E+05	10.55
¹³⁷ Cs	661.660	11037.60	2.26E+03	2.14E+03	2.31E+07	85.00	1.96E+07	1816.11
⁵⁴ Mn	834.843	312.22	2.13E+03	2.93E+02	3.16E+06	99.98	3.16E+06	292.54
⁶⁰ Co	1173.238	1925.13	2.34E+03	1.70E+03	1.83E+07	99.90	1.83E+07	1694.20
⁶⁰ Co	1332.502	1925.13	2.34E+03	1.70E+03	1.83E+07	99.98	1.83E+07	1695.56

表 2.4-2 カウント数と検出系の校正值

核種	γ 線エネルギー	γ 線放出強度	カウント数	カウントレイト	比
	[keV]	[1/s]		C [1/s]	I/C
^{109}Cd	88.034	188.33	132804	12.2967	15.3154
^{57}Co	122.061	138.24	142734	13.2161	10.4603
^{57}Co	136.474	17.12	18672	1.7289	9.9017
^{139}Ce	165.858	10.55	10248	0.9489	11.1212
^{137}Cs	661.660	1816.11	633306	58.6394	30.9707
^{54}Mn	834.843	292.54	79616	7.3718	39.6831
^{60}Co	1173.238	1694.20	318212	29.4641	57.5006
^{60}Co	1332.502	1695.56	284131	26.3084	64.4492

表 2.4・3 中性子照射により放射化した金箔の壊変数

Data name	Time after irradiation	Time interval in measurement	energy [keV]	カウント 数	count rate [個/s]	emission/s [個/s]	壊変率 [個/s]	壊変数 [個]	フラックス [cm ⁻² s ⁻¹]
Au_pure_15	17h 40min	60min	411.804	51.71	0.01436	0.3357	0.3515	1265.42	1269.77
Au_pure_17	26h 50min	60min	411.804	45.74	0.01271	0.2969	0.3109	1119.30	1239.05
Au_pure_19	68h 10min	60min	411.804	24.07	0.00669	0.1562	0.1636	588.94	1015.19
Au_pure_21	83h 45min	60min	411.804	xxx	xxx				
Au_inCd_16	18h 50min	60min	411.804	22.45	0.00624	0.1457	0.1526	549.29	616.14
Au_inCd_18	28h 04min	60min	411.804	xxx	xxx				
Au_inCd_20	69h 42min	60min	411.804	xxx	xxx				

表 2.4-4(1) 中性子照射により放射化した In 箔の壊変数—その 1

Data name	Time after irradiation	Time interval in measurement	energy [keV]	カウント数	count rate [個/s]	emission/s [個/s]	壊変率 [個/s]	壊変数 [個]	平均壊変数 [個]	フラックス [cm ⁻² s ⁻¹]
In_pure_01	15min	10min	416.86	120.84	2.01E-01	4.753	16.278	9767	8655	1673.7
			1097.3	76.57	1.28E-01	6.738	11.990	7194		
			1293.54	124.00	2.07E-01	12.668	15.010	9006		
In_pure_03	43min	10min	416.86	84.63	1.41E-01	3.329	11.400	6840	6650	1840.1
			1097.3	81.31	1.36E-01	7.155	12.731	7639		
			1293.54	75.33	1.26E-01	7.696	9.119	5471		
In_pure_05	70min	10min	416.86	43.16	7.19E-02	1.698	5.814	3488	3822	1494.2
			1097.3	36.03	6.01E-02	3.171	5.642	3385		
			1293.54	63.24	1.05E-01	6.461	7.655	4593		
In_pure_08	130min	10min	416.86	27.48	4.58E-02	1.081	3.702	2221	2101	1769.9
			1097.3	23.44	3.91E-02	2.062	3.670	2202		
			1293.54	25.88	4.31E-02	2.644	3.132	1879		

表 2.4-4(2) 中性子照射により放射化した In 箔の壊変数—その 2

Data name	Time after irradiation	Time interval in mesurement	energy [keV]	カウント数	count rate [個/s]	emission/s	壊変率 [個/s]	壊変数 [個]	平均壊変数 [個]	フラックス [cm ⁻² s ⁻¹]
In_inCd_02	30min	10min	416.86	36.14	6.02E-02	1.421	4.868	2921	3386	793.4
			1097.3	39.04	6.51E-02	3.436	6.113	3668		
			1293.54	49.14	8.19E-02	5.021	5.949	3569		
In_inCd_04	55min	10min	416.86	23.22	3.87E-02	0.913	3.127	1876	1902	613.7
			1097.3	18.62	3.10E-02	1.639	2.916	1749		
			1293.54	28.64	4.77E-02	2.926	3.467	2080		
In_inCd_06	83min	10min	416.86	15.43	2.57E-02	0.607	2.079	1247	1990	918.8
			1097.3	31.45	5.24E-02	2.768	4.925	2955		
			1293.54	24.35	4.06E-02	2.488	2.947	1768		
In_inCd_09	145min	10min	416.86	10.79	1.80E-02	0.424	1.453	872	742	757.0
			1293.54	8.42	1.40E-02	0.860	1.019	611		

表 2.4-5 TLD パッチの測定結果

	E1	E2	(E1+E2)/2	E3	E4	(E3+E4)/2	neutron	
	[μ Sv]	[μ Sv/h]						
1	638	529	583.5	121	104	112.5	10.24	20.48
2	638	717	677.5	184	194	189	10.62	21.24
3	643	683	663	98	92	95	12.35	24.70
4	613	663	638	112	95	103.5	11.62	23.24

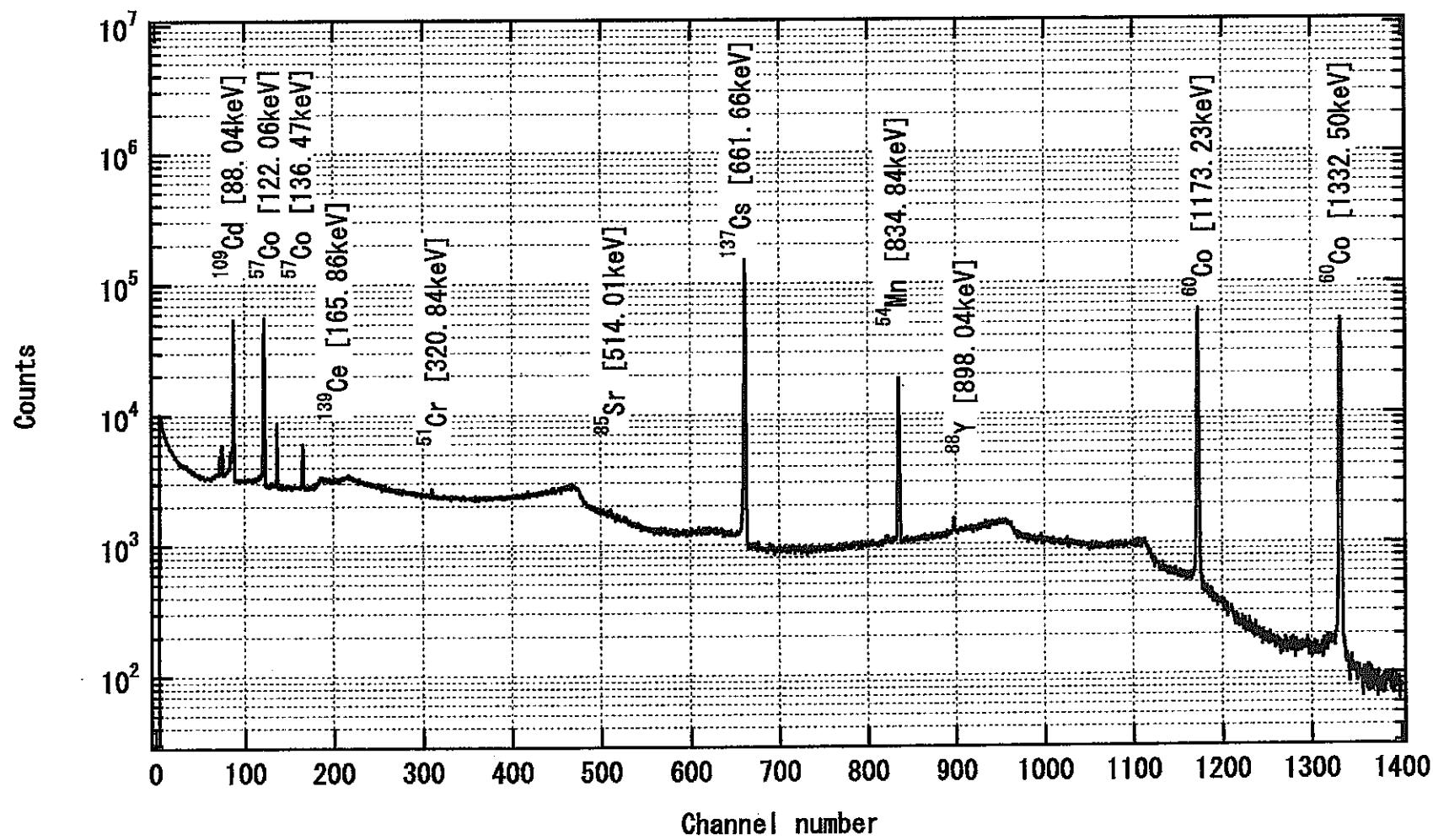


図 2.4-1 ガンマ線線源により得られた波高分布（測定時間 3 時間）。

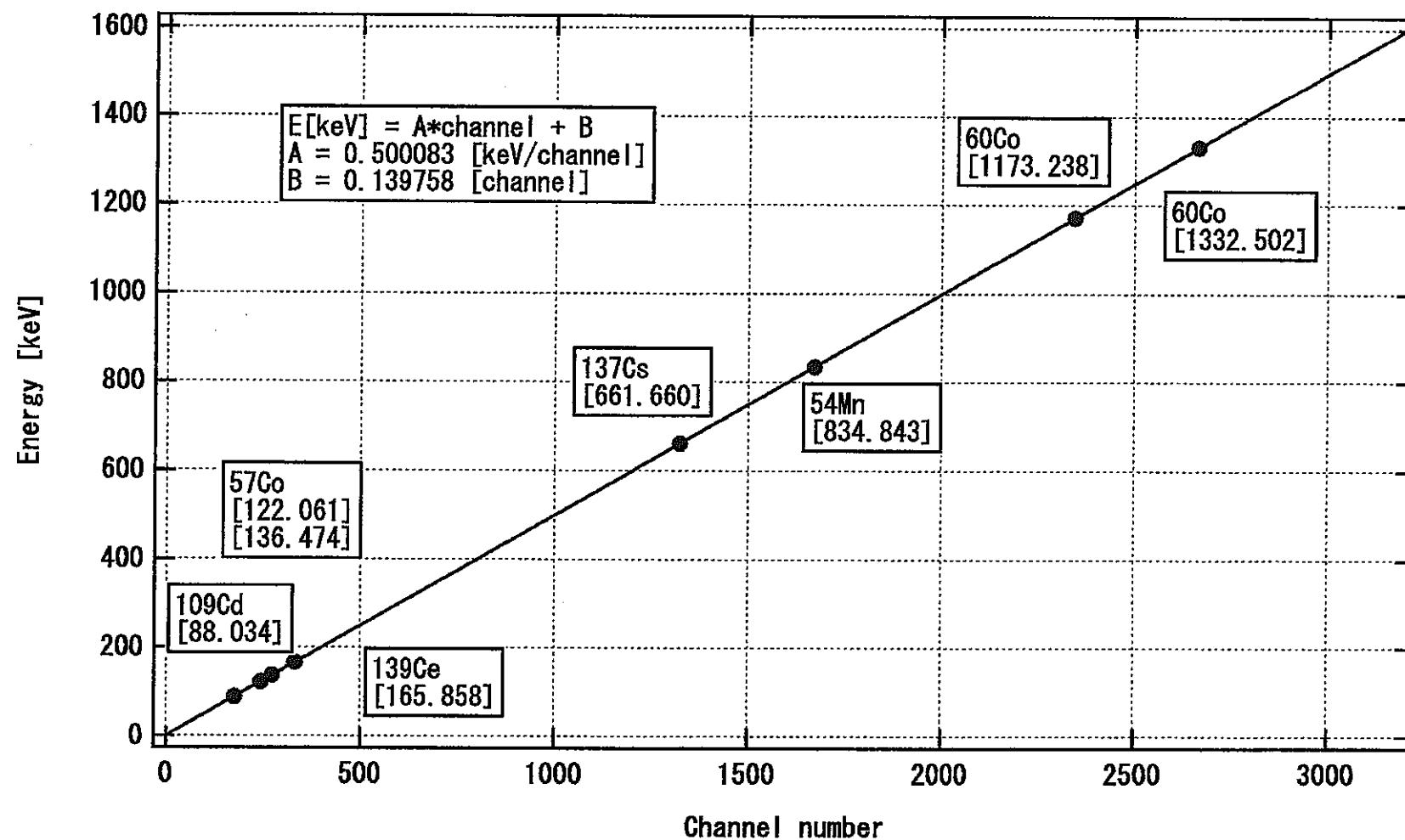


図 2.4-2 チャンネル番号と γ 線エネルギーとの関係。

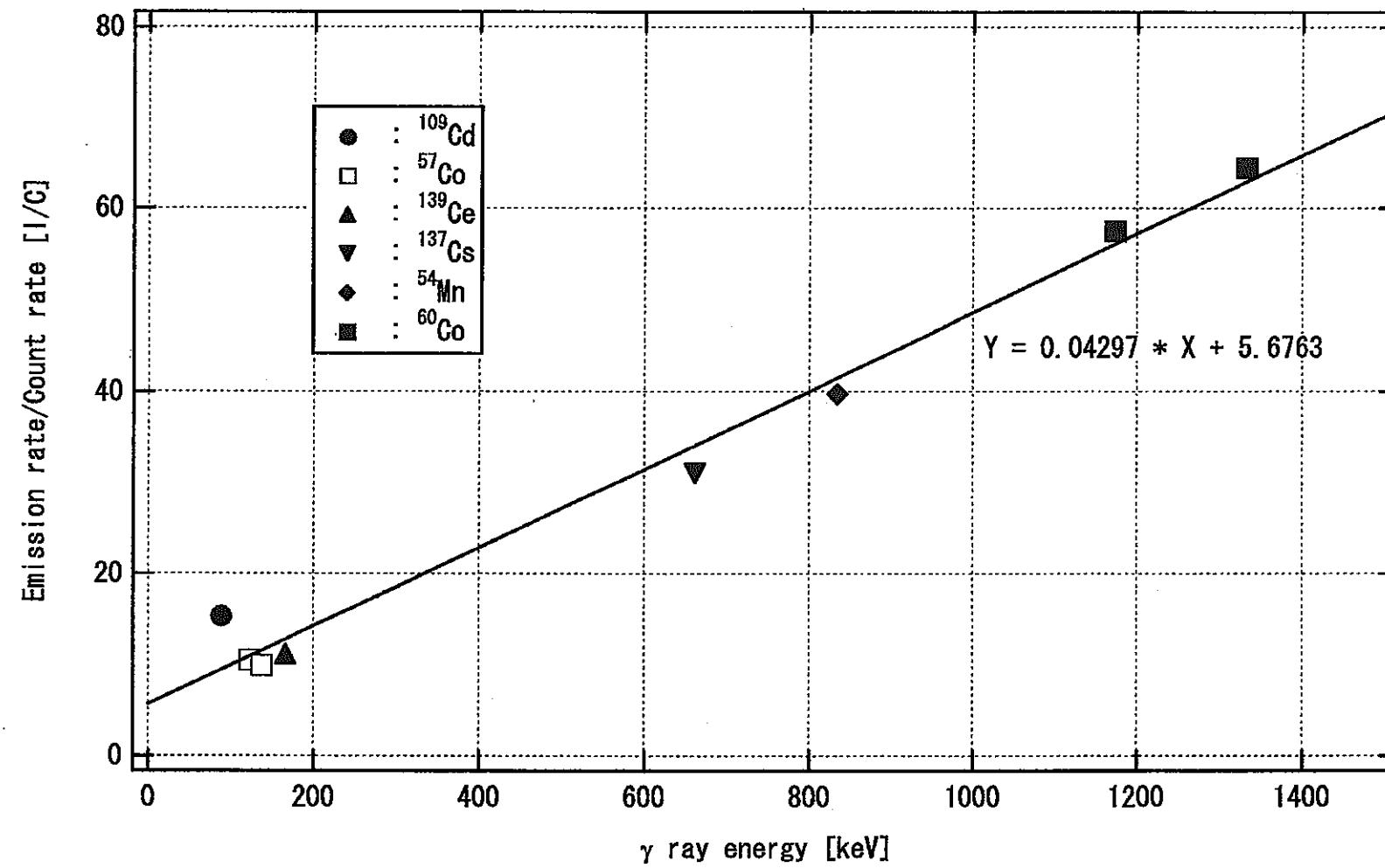


図 2.4-3 Ge 検出器感度校正

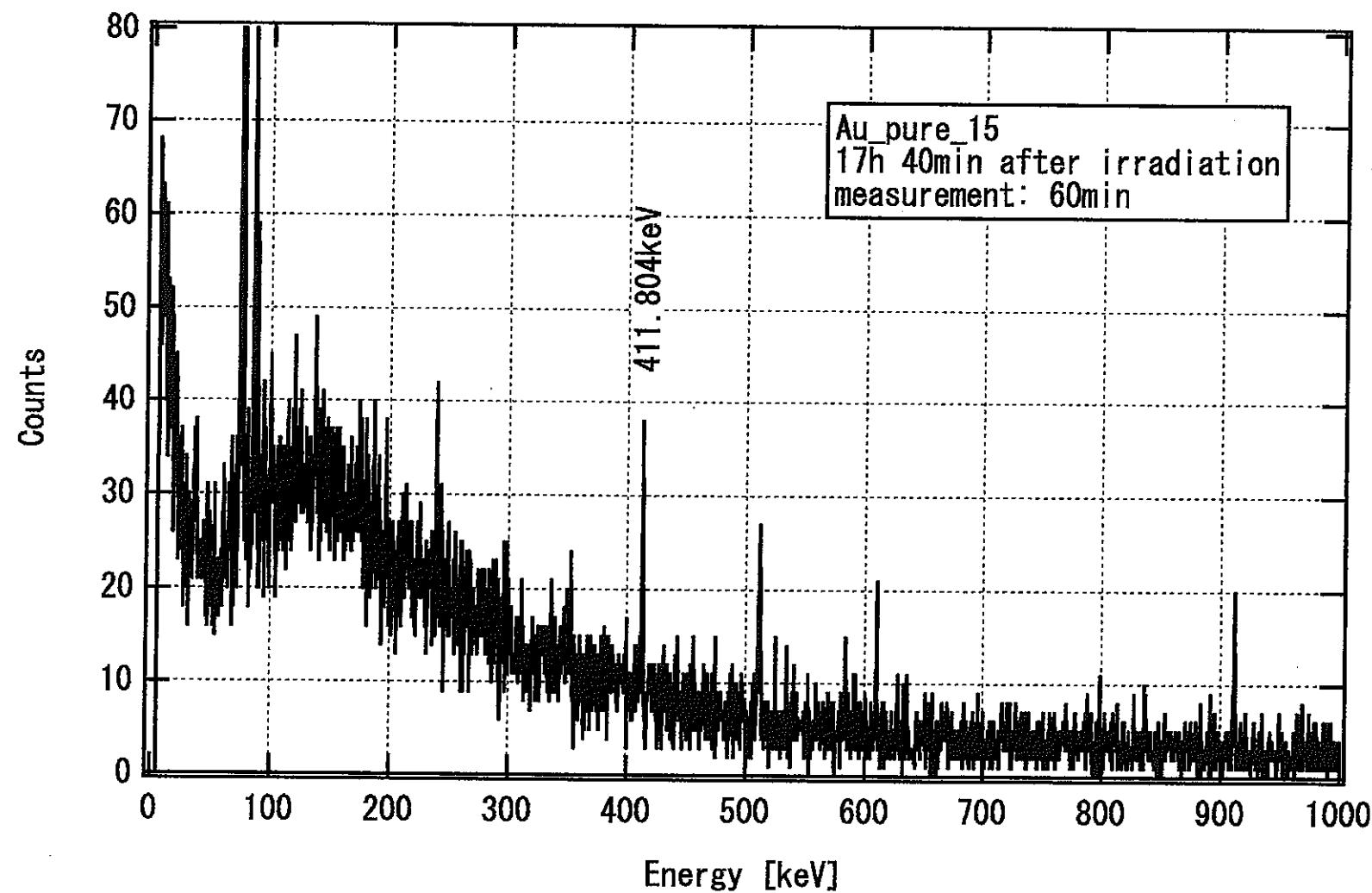


図 2.4-4 直接照射 Au 箔の照射後 17 時間 40 分後の波高分布（測定時間 60 分）。

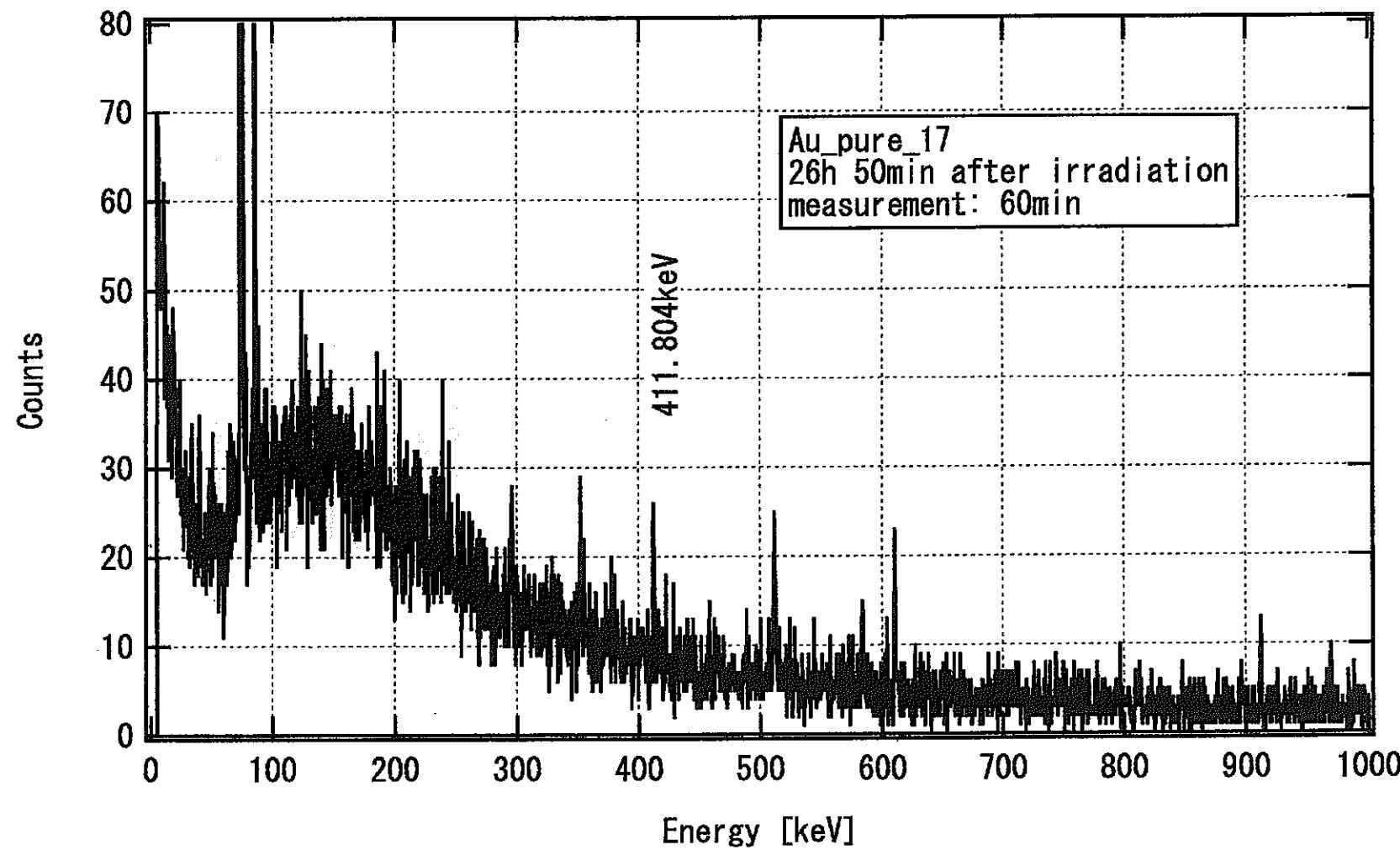


図 2.4-5 直接照射 Au 箔の照射後 26 時間 50 分後の波高分布（測定時間 60 分）。

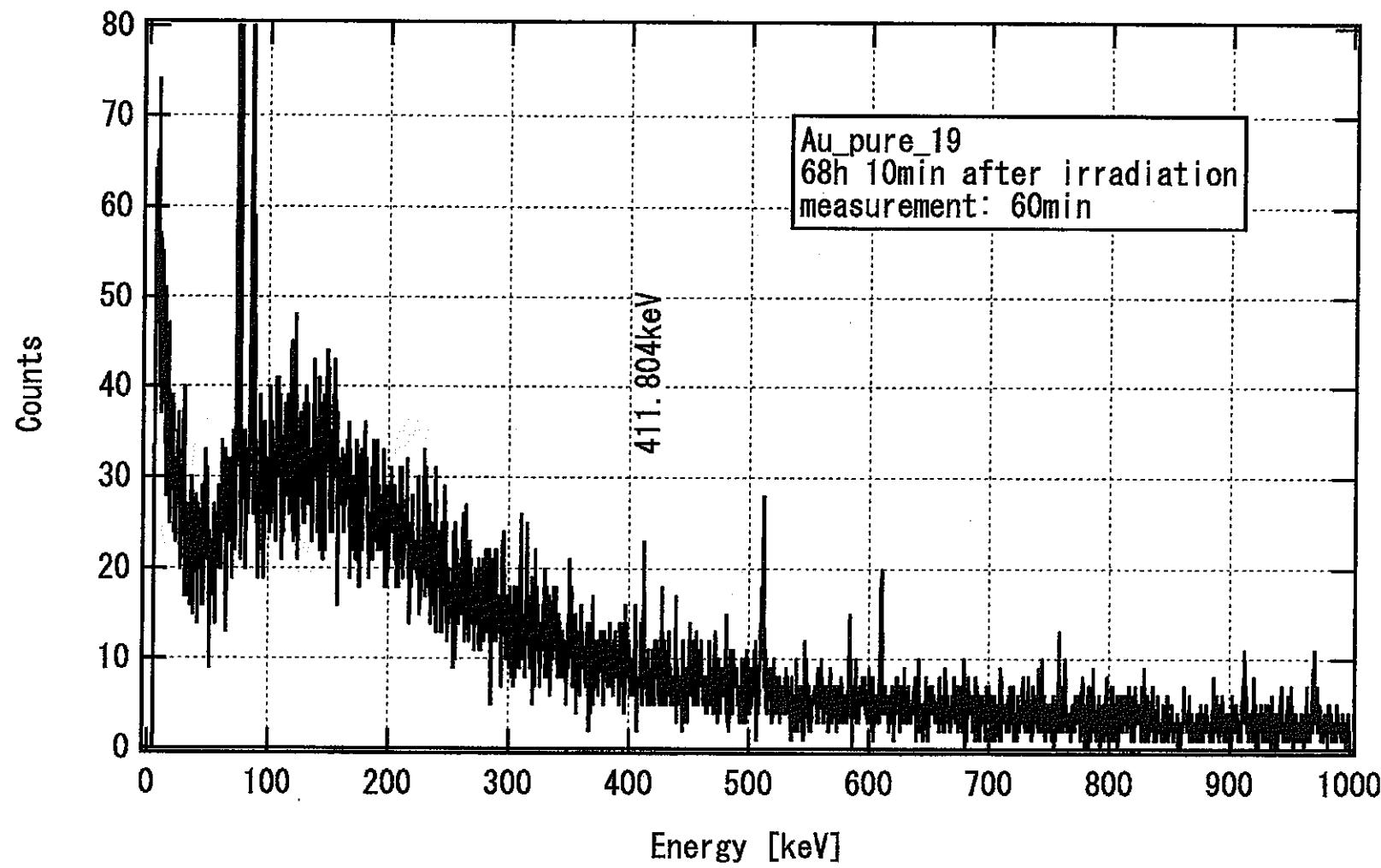


図 2.4-6 直接照射 Au 箔の照射後 68 時間 10 分後の波高分布（測定時間 60 分）。

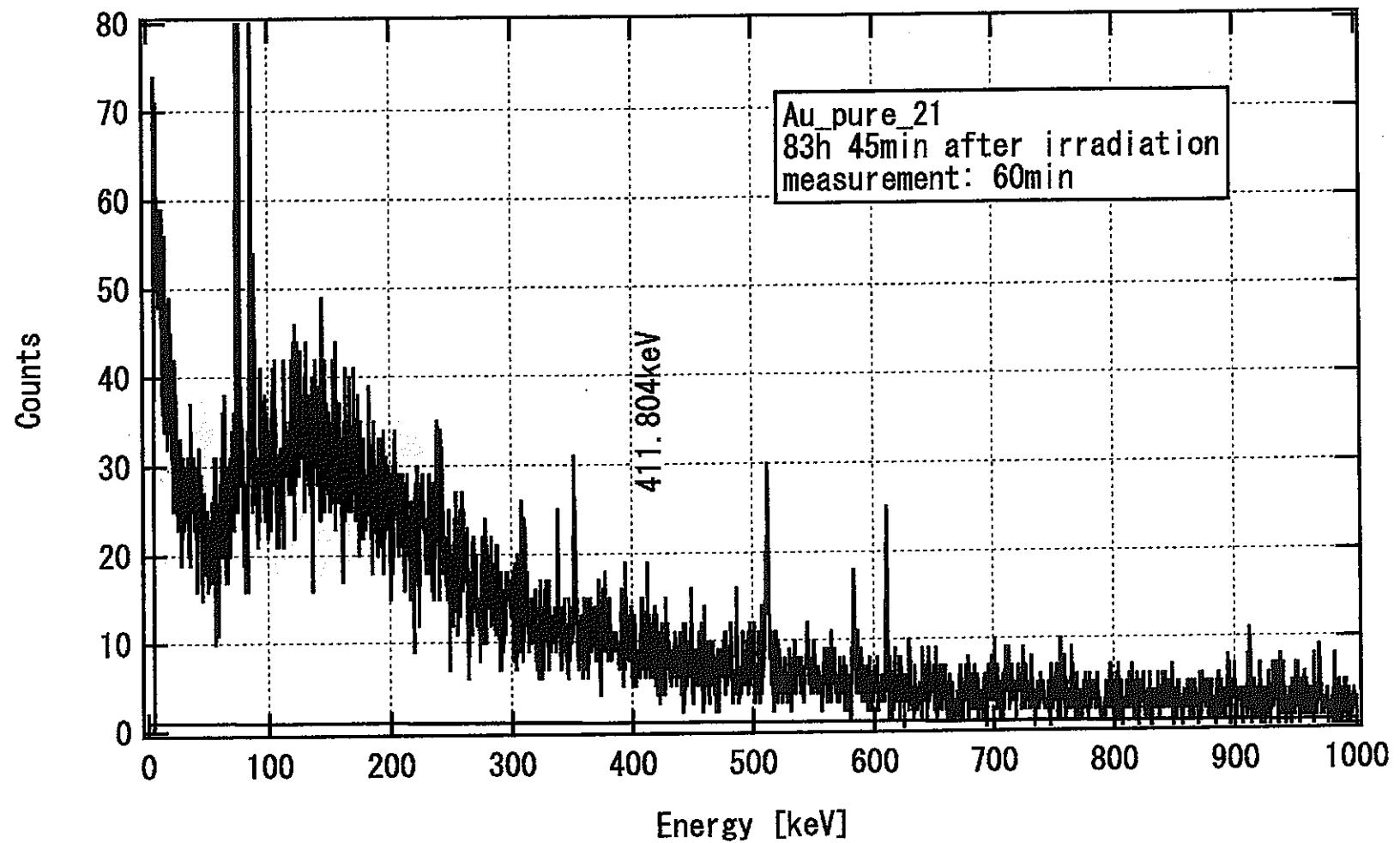


図 2.4-7 直接照射 Au 箔の照射後 83 時間 45 分後の波高分布（測定時間 60 分）。

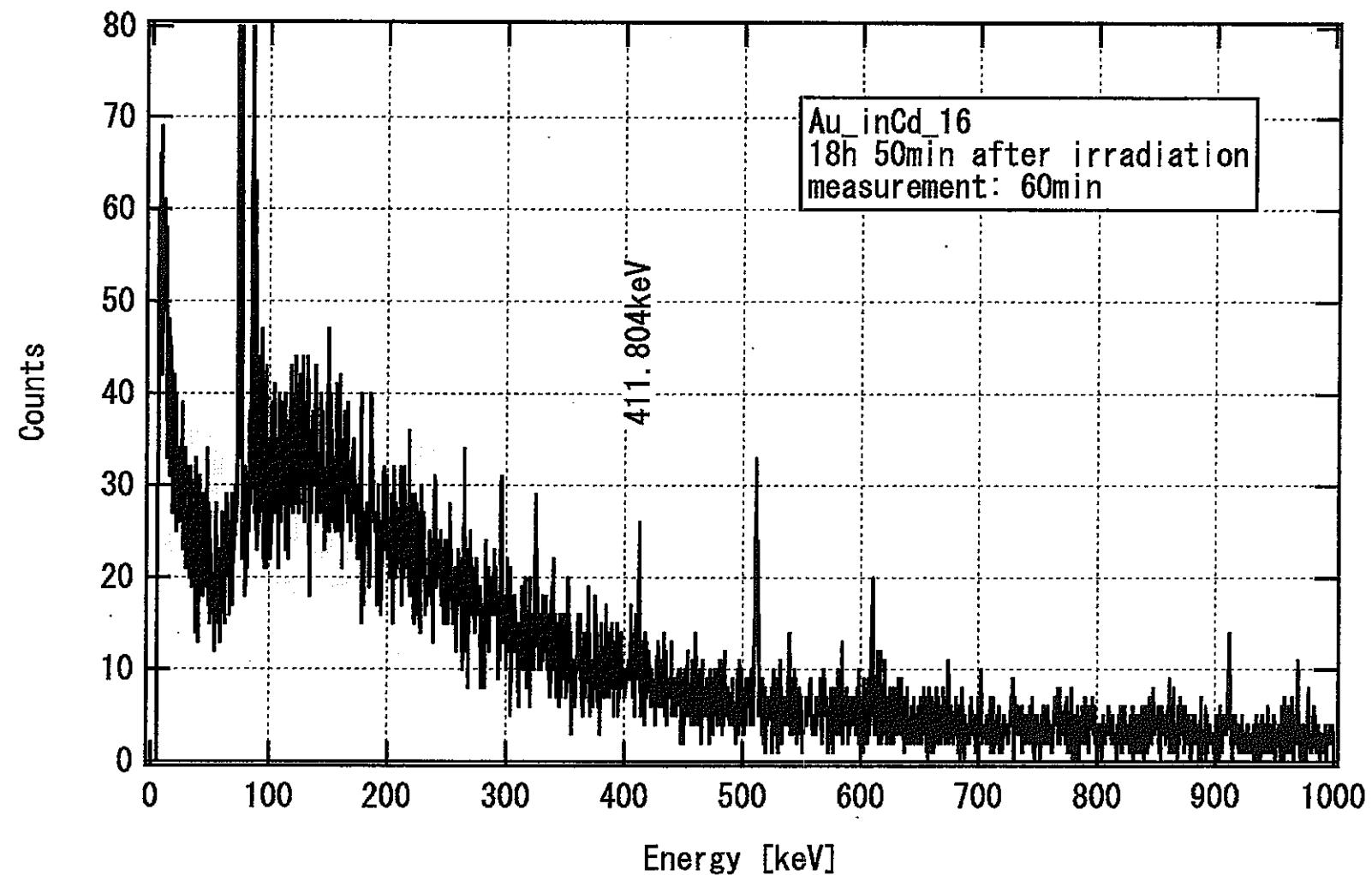


図 2.4-8 Cd ケース中の Au 箔の照射後 18 時間 50 分後の波高分布（測定時間 60 分）。

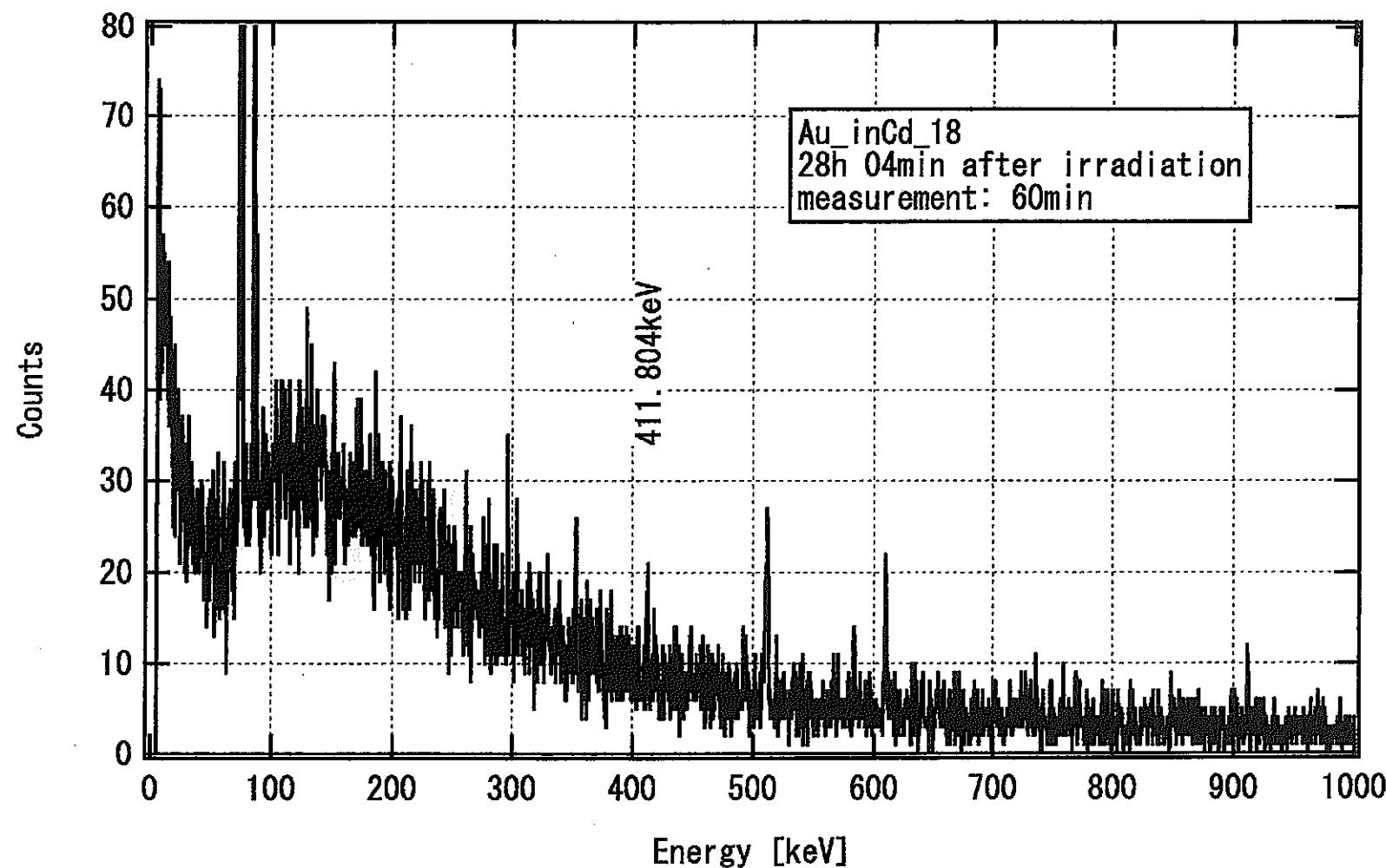


図 2.4-9 Cd ケース中の Au 箔の照射後 28 時間 04 分後の波高分布（測定時間 60 分）。

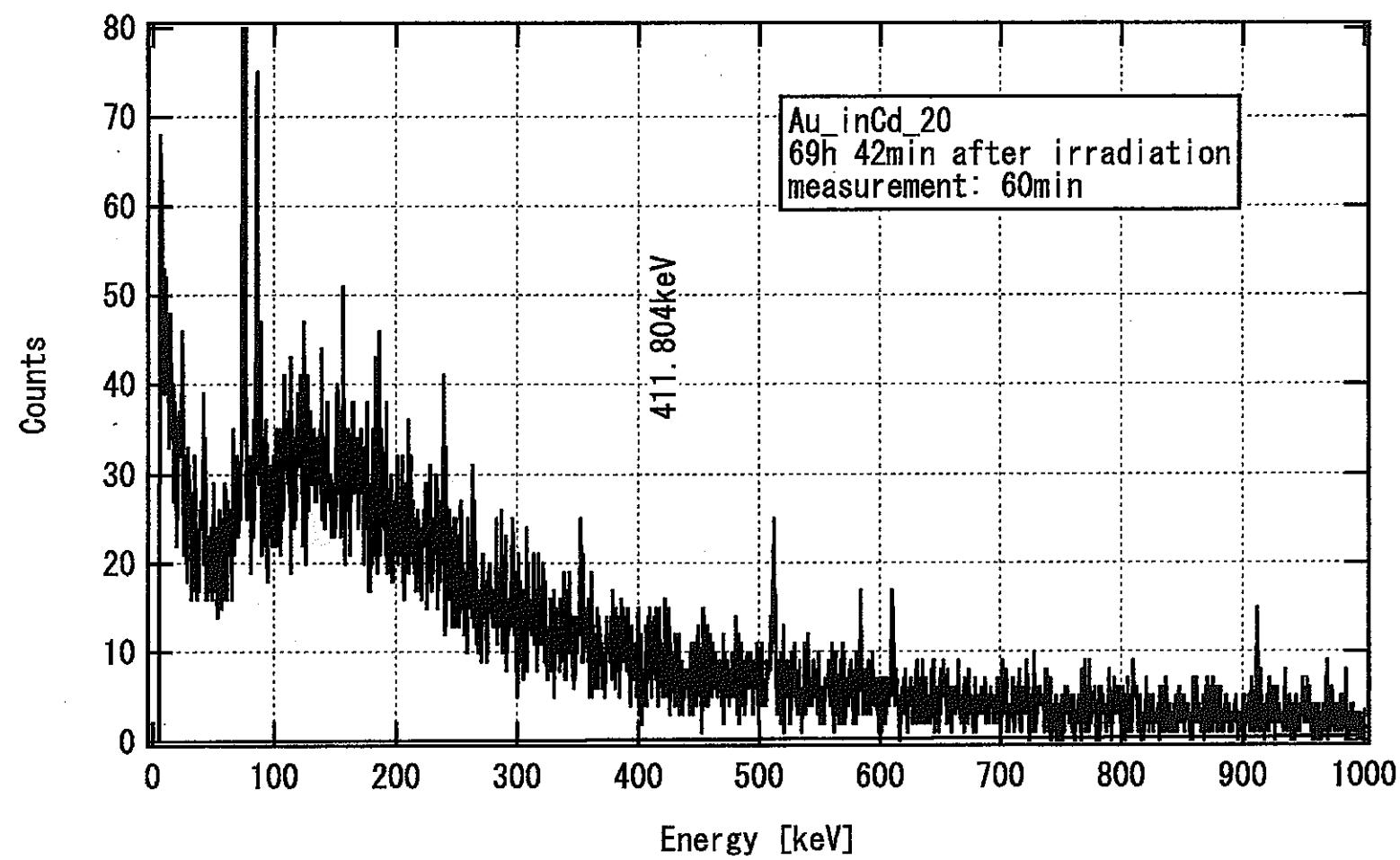


図 2.4-10 Cd ケース中の Au 箔の照射後 69 時間 42 分後の波高分布（測定時間 60 分）。

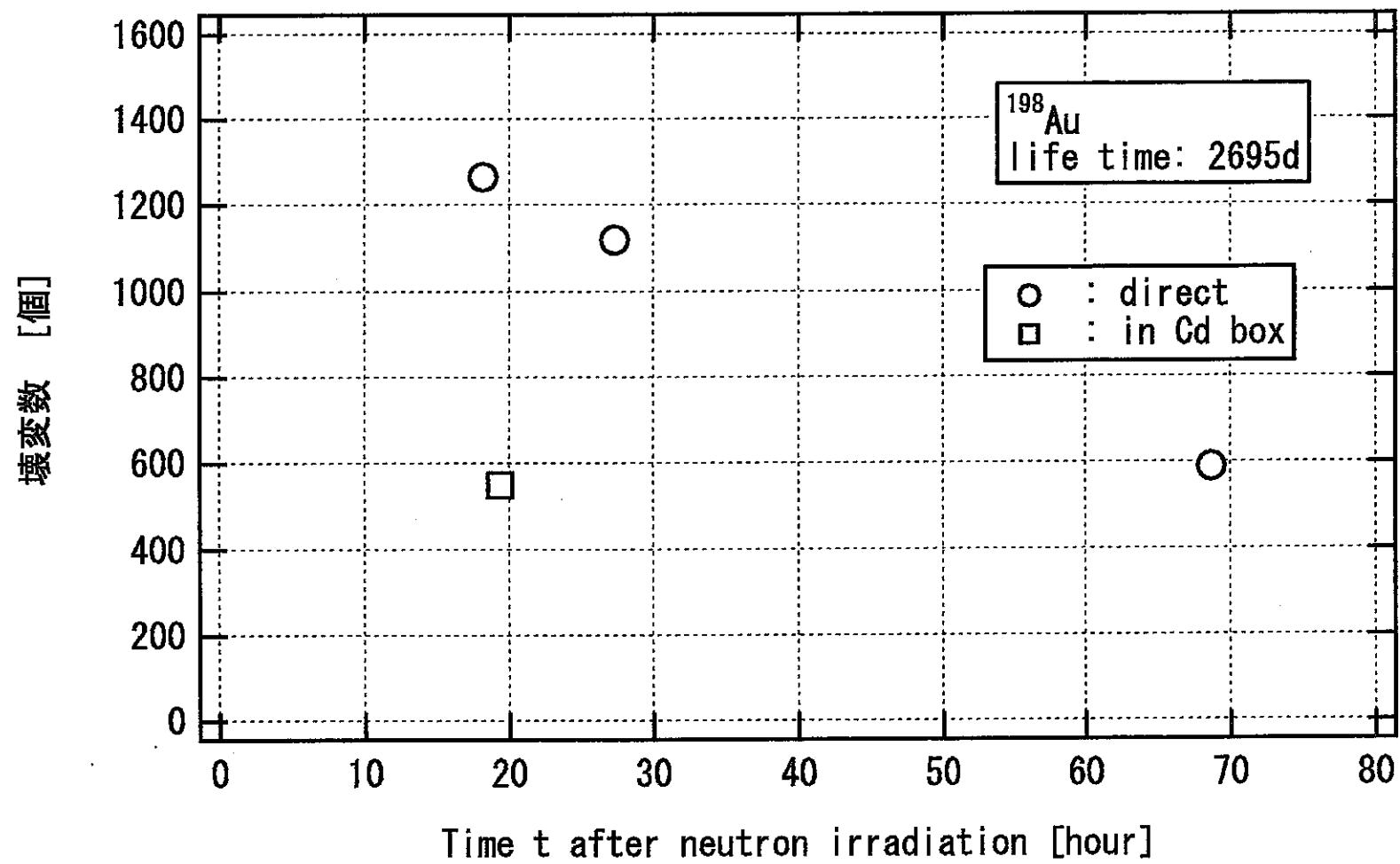


Fig. 2.4-11 中性子照射により放射化した Au 箔の壊変数の時間変化。時間原点は照射完了時。

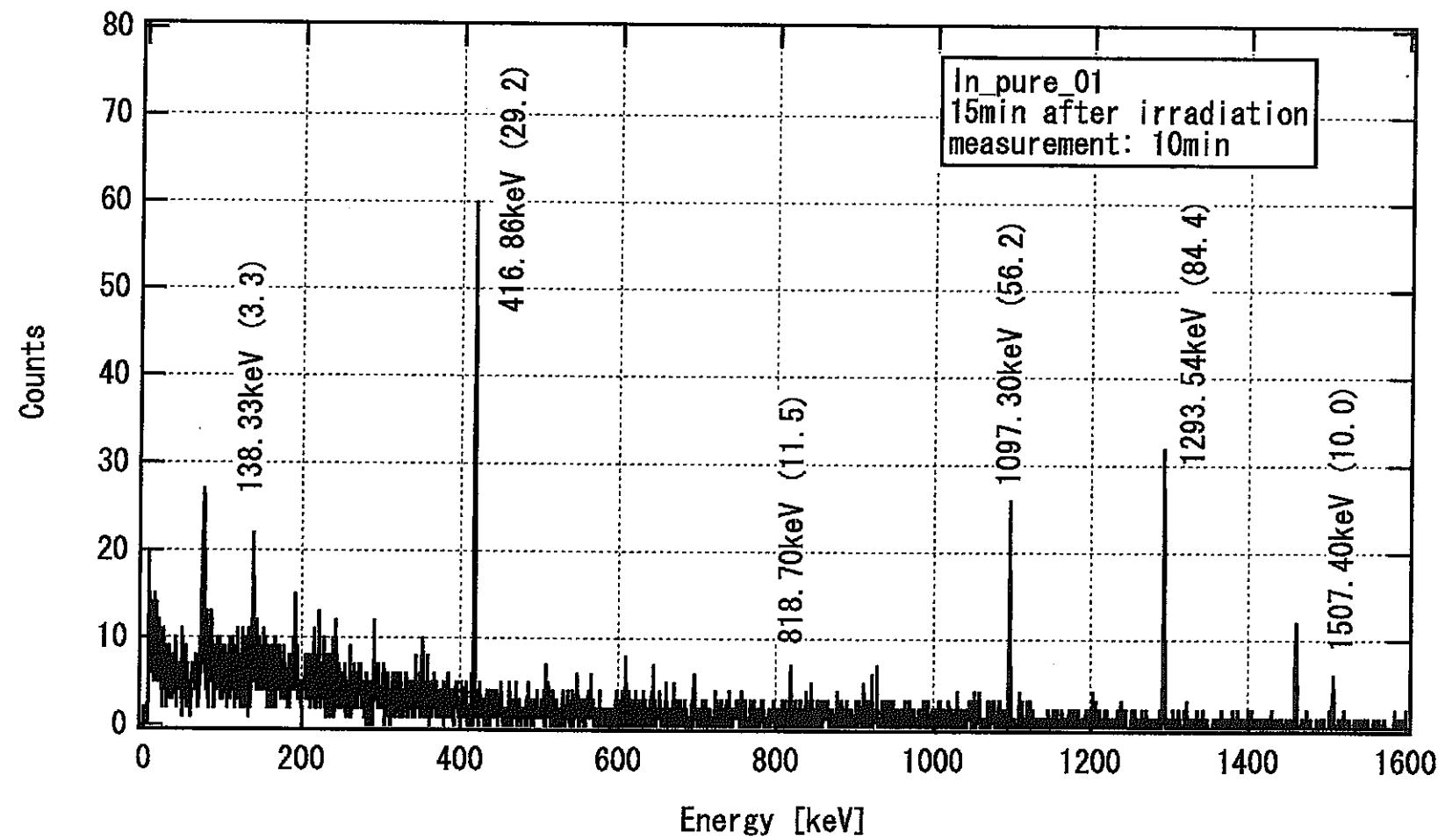


図 2.4-12 直接照射 In 箔の照射後 15 分後の波高分布（測定時間 10 分）。

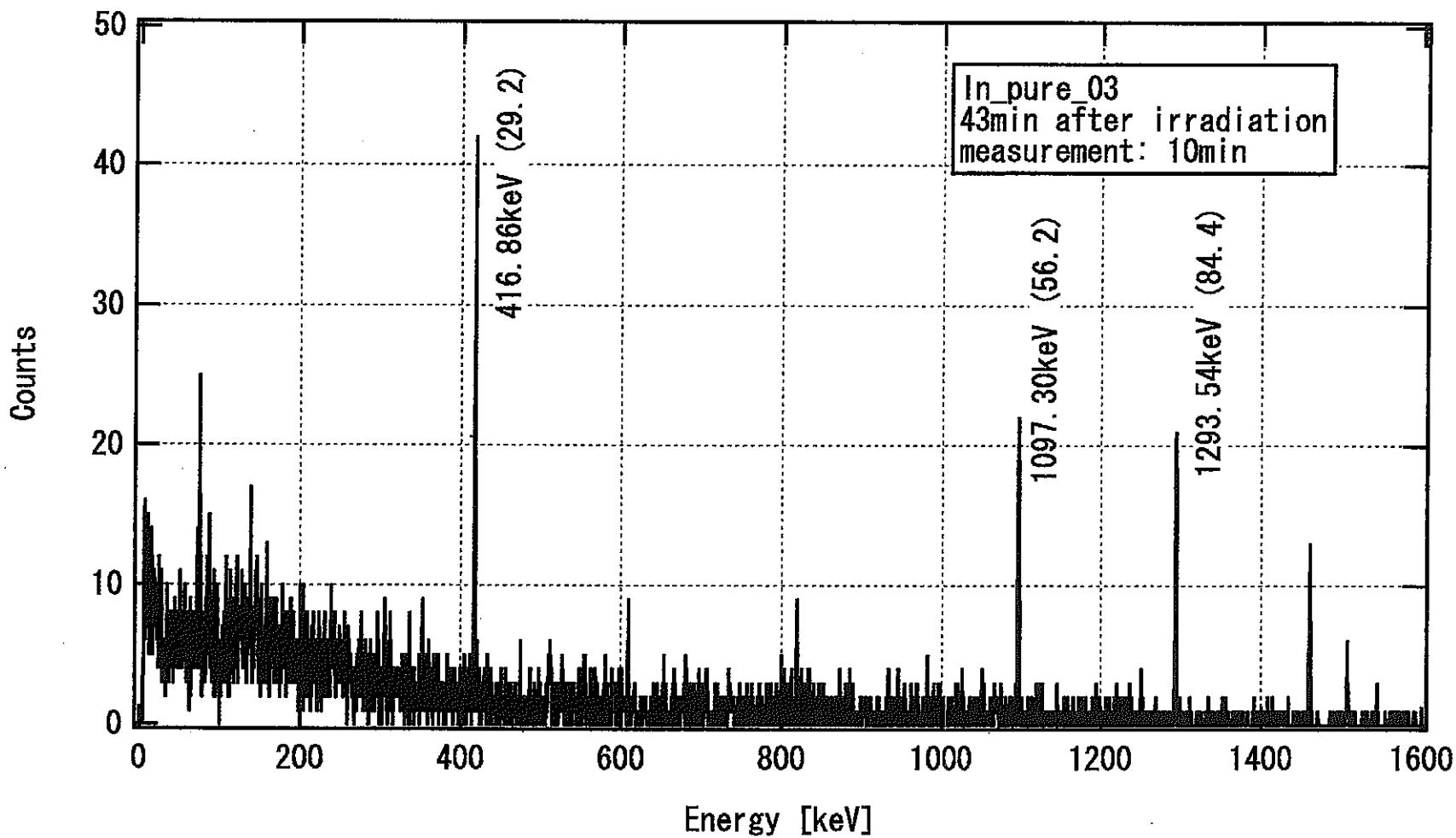


図 2.4-14 直接照射 In 箔の照射後 43 分後の波高分布（測定時間 10 分）。

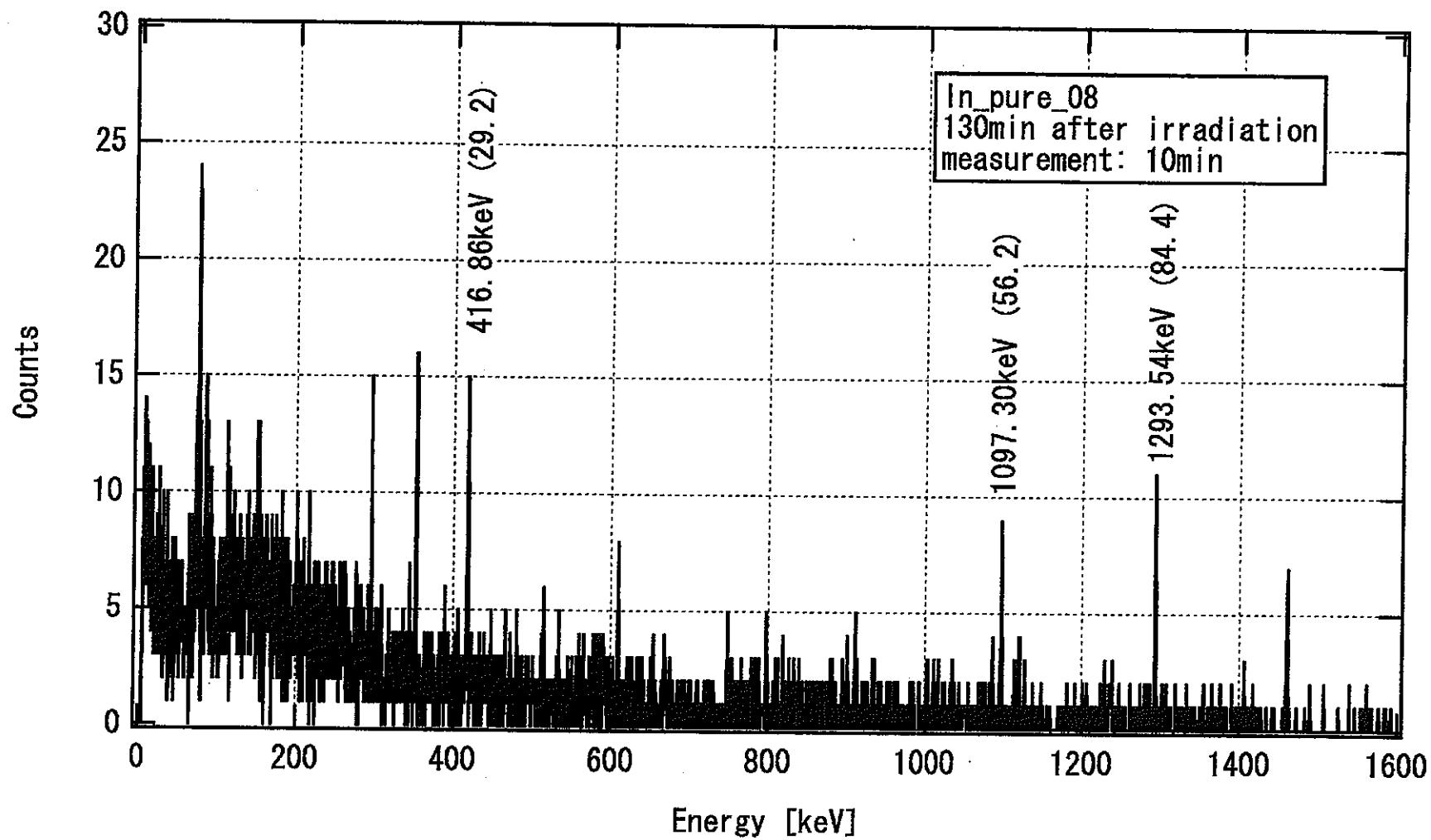


図 2.4-15 直接照射 In 箔の照射後 130 分後の波高分布（測定時間 10 分）。

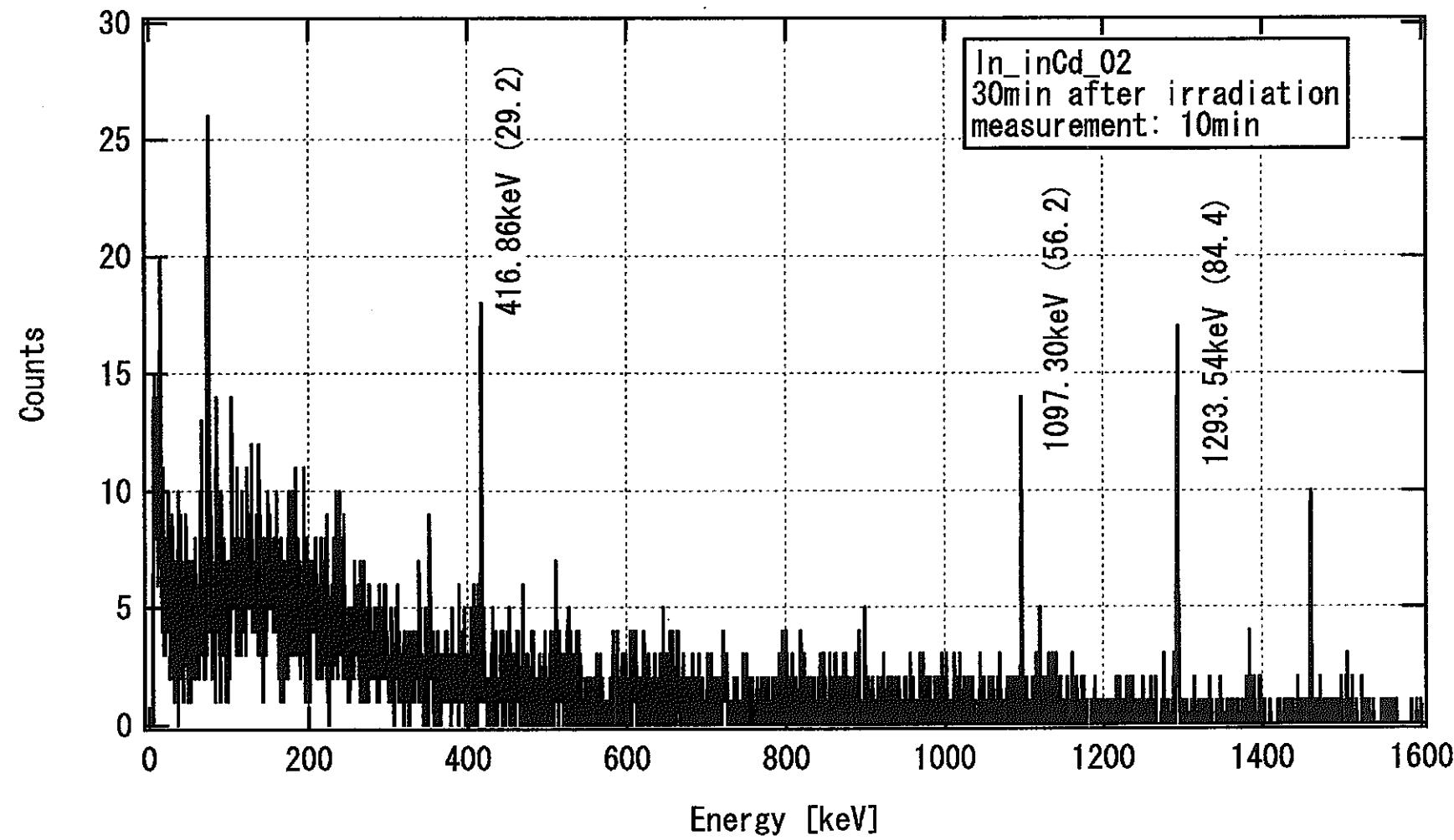


図 2.4-16 Cd ケース中の In 箔の照射後 30 分後の波高分布（測定時間 10 分）。

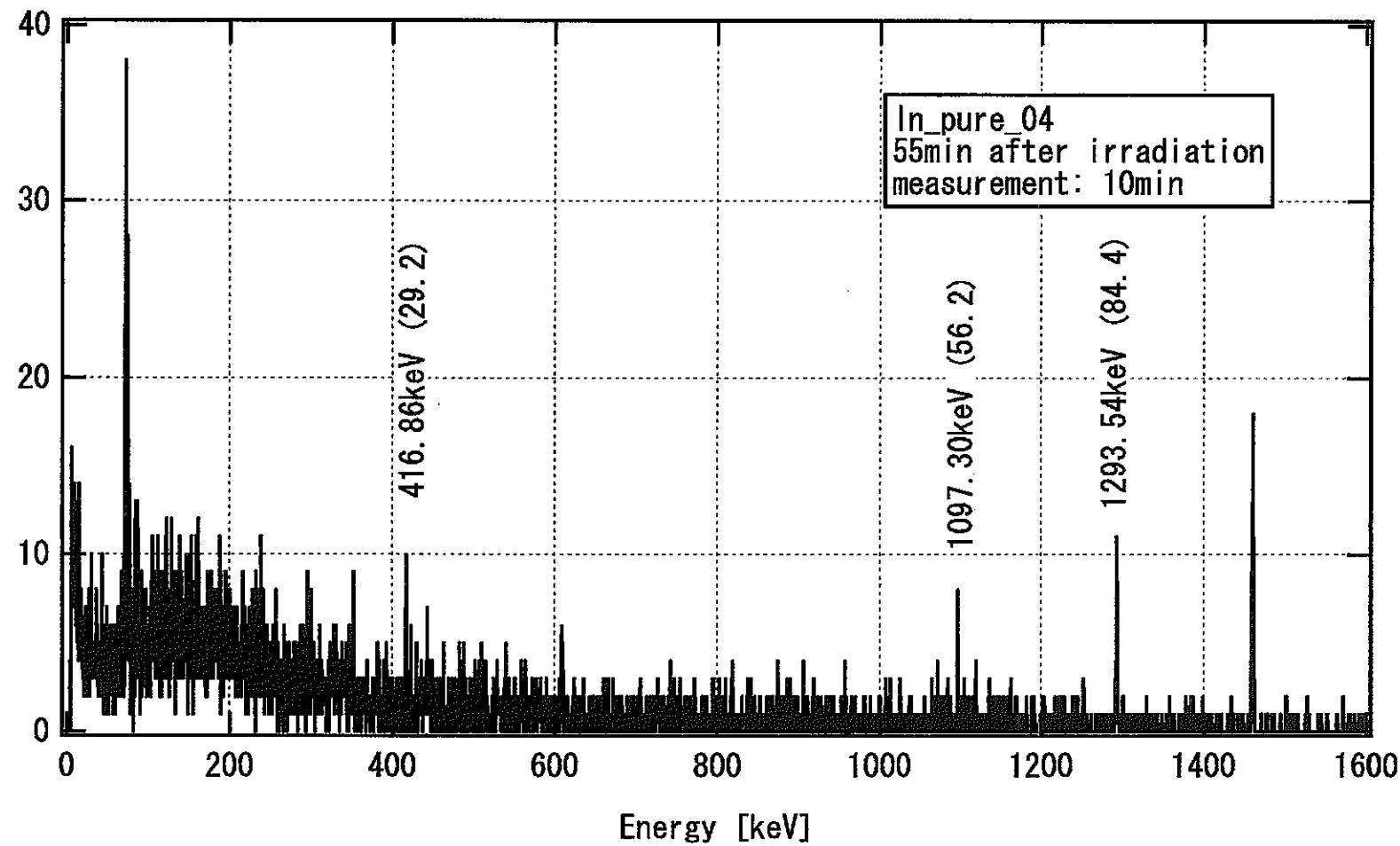


図 2.4-18 Cd ケース中の In 箔の照射後 55 分後の波高分布（測定時間 10 分）。

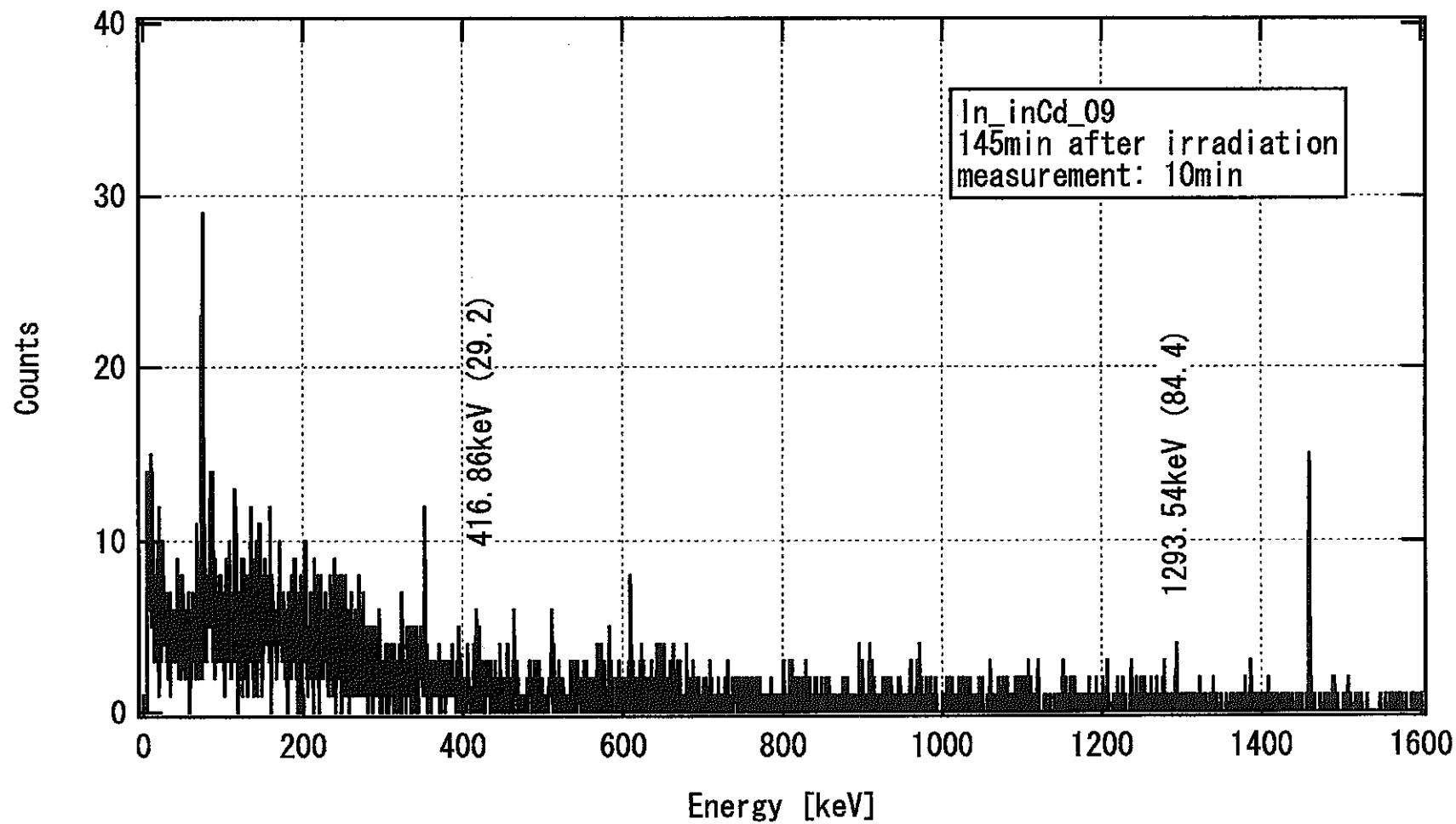


図 2.4-19 Cd ケース中の In 箔の照射後 145 分後の波高分布（測定時間 10 分）。

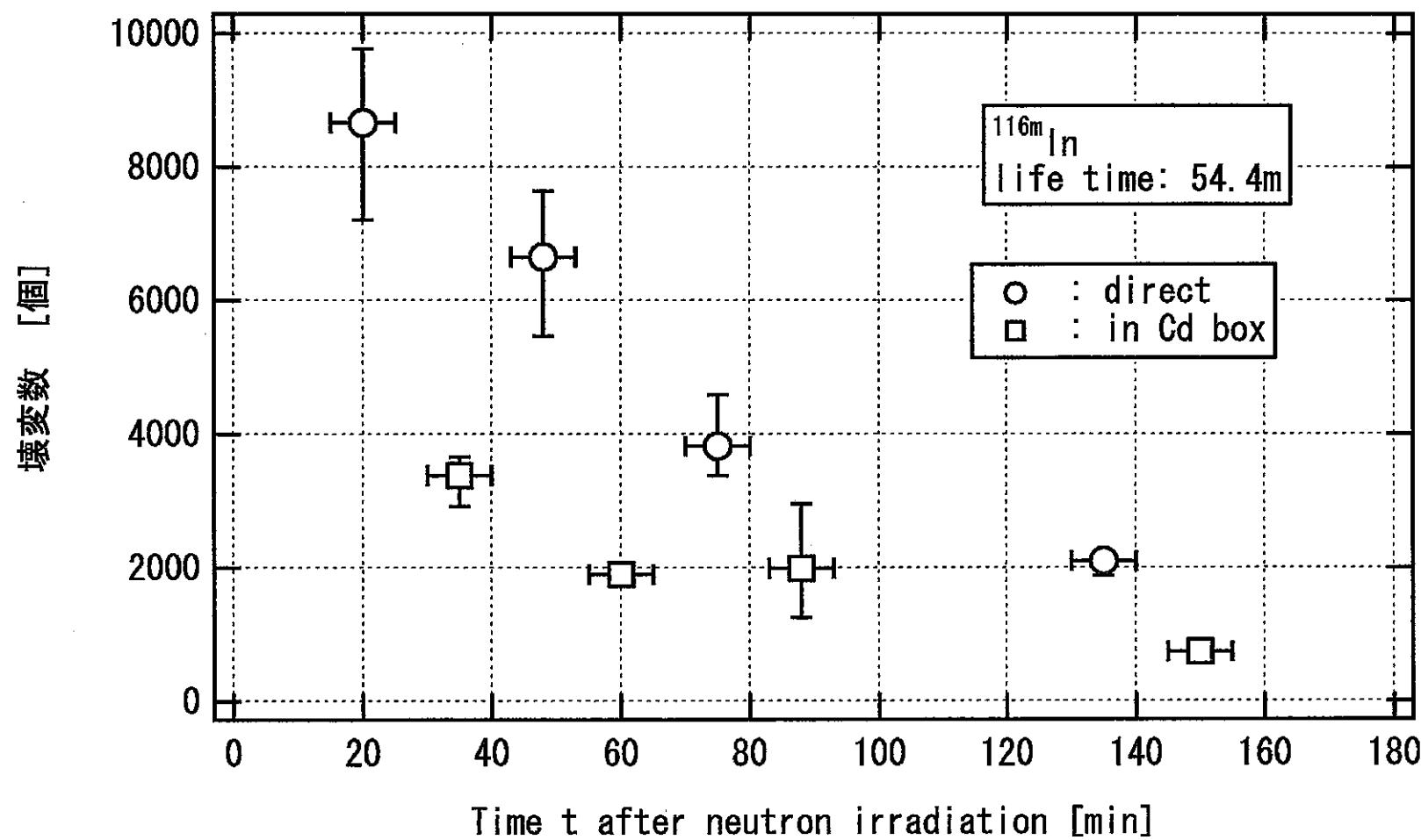


Fig. 2.4-20 中性子照射により放射化した In 箔の壊変数の時間変化。時間原点は照射完了時。

2.5 計算機シミュレーションによるレムカウンターの時間応答特性評価

NRESP 計算機シミュレーションコードを用いて、実験で使用したレムカウンターの中性子に対する時間応答を調べた。本研究で用いた NRESP コードでは、中性子場におけるガス比例計数管又は固体検出器の波高分布をモンテカルロ計算法により求めることが出来る。評価できる形状は円筒形と球形であり、評価できるガスは ^3He , ^4He , H_2 , CH_4 , Kr , Ar , BF_3 等、評価できる容器の材質は Al, SUS 等である。線源の形状は点線源と平行ビーム線源（円形、方形）が指定できる。NRESP コードでは、乱数を用いるモンテカルロ法で中性子の挙動を評価するのに加え、中性子と物質の衝突反応により発生した荷電粒子の挙動を幾何形状（壁効果）を含めて評価し、ガスに付与されたエネルギーからその波形を計算することが出来る。

NRESP コードでは、核データには ENDFB-IV 及び ENDFB-V から編集した値を用い、荷電粒子(p, d, t, α) の阻止能データには、"Hydrogen Stopping Powers and Ranges in All Elements", H.H. Andersen, J.F. Ziegler (1977) と "Helium Stopping Powers and Ranges in All Element Matter", J.F. Ziegler (1977) の値に加え、"Stopping and Ranges of Ions in Solids", J.F. Ziegler (1985) を用いている。使用している乱数は、周期の長い RANMAR 乱数である。

ベリリウムターゲットから放出され、レムカウンターに入射した中性子が、レムカウンター内で電気信号に変換されるまでの時間 T_{tot} を、NRESP コードによる計算機シミュレーションにより評価した。ターゲットから放出される時刻を時間原点にとり、減速材との弾性散乱によるエネルギーの減少後、 ^3He ガス内で $^3\text{He}(n, p)^3\text{H}$ 反応によりプロトンが生成されるまでの時間を T_1 、生成された荷電粒子（プロトン）が消滅（電極に到達）するまでの時間を T_2 とすると、 $T_{\text{tot}} = T_1 + T_2$ である。計算に用いた幾何学的な配置を図 2.5-1 に示す。5 気圧の ^3He ガスが内半径 $r_1 = 2.49 \text{ cm}$, 厚さ $dr_1 = 0.5 \text{ mm}$ の SUS 球内により充填されており、周りを半径 $r_3 = 12.654 \text{ cm}$ のポリエチレン減速材で覆われている。減速材内には内半径 $r_2 = 6.54 \text{ cm}$, 厚さ $dr_2 = 1.14 \text{ mm}$ の B_4C 材が挿入されている。実験ではイオンビーム径は $1\text{mm}\phi$ と小さく、ベリリウムターゲットからレムカウンターまでの距離は 100cm であるので、点線源からの中性子放射線場での計測に近い。レムカウンターに飛来する中性子はターゲット・カウンターとの距離がかなり長いので、殆ど平行な中性子が飛来すると考えても大きな差異は無いと考えられる。ここでは計算時間の短縮のために、レムカウンターに平行な中性子がレムカウンターに飛来するとして計算した。

レムカウンターは、減速型中性子検出器であり、水素との弾性衝突により中性子エネルギーを熱中性子領域まで減速させ、BF3 比例計数管あるいは ^3He 比例計数管

といった熱中性子検出器で検出するもので、広い測定エネルギー範囲を有し、出力波高分布は中性子エネルギーにほとんど依存しないという特徴をもつ。レムカウンターの応答関数 $R(E)$ を、線束一線量変換係数 $K(E)$ の逆数 $1/K(E)$ (レムレスポンス) と同じエネルギー依存性を持つように設計できれば、入射中性子エネルギーに関係せず、線量当量に比例する出力を得ることが出来る。図 2.5-2 に ICRP'21 (国際放射線防護委員会専門委員会 3 の報告) に示された $K(E)$ を用いてプロットしたレムレスポンスを示す。減速材料として用いるポリエチレン厚を 20cm 程度とすれば、 $1/K$ に類似の応答関数が得られるとされている。

ポリエチレンの適当な場所に熱中性子吸収材 (B_4C) を挿入することにより、比較的薄い (10mm 厚) ポリエチレンでもレムレスポンスに近い曲線となる。ところが吸収材の領域で既に熱化している中性子は完全に吸収されるため、中速—熱中性子領域にかけての応答はどうしても低下してしまう。感度低下の防止策として、吸収材には部分的には熱中性子のバイパス孔が設けられている。本実験で使用したレムカウンターは、標準中性子場での実測により、熱中性子吸収材のバイパス孔率、挿入位置、全体のポリエチレン厚の 3 つのパラメータに対し最適化が行われ、レムレスポンスに極めて類似した応答が得られているとされている。

熱中性子吸収材として用いられている B_4C のバイパス孔率、及びその位置は不明である。本研究では、熱中性子吸収材の空間 (内半径 6.54 cm, 厚さ 1.14mm) が、1) 空気、及び 2) B_4C で満たされている場合のエネルギーに対するレムカウンターの感度を計算し、レムレスポンス $1/K(E)$ を考慮して、 B_4C が覆う面積を適切に選ぶことにより、比較的近いレムレスポンスに近い感度特性を得る事とした。

中性子エネルギー E_n は熱エネルギーから 10MeV まで後半に変え、 $E_n = 25.3\text{meV}, 100\text{meV}, 1\text{eV}, 10\text{eV}, 100\text{eV}, 1\text{keV}, 10\text{keV}, 20\text{keV}, 50\text{keV}, 100\text{keV}, 200\text{keV}, 500\text{keV}, 1\text{MeV}, 2\text{MeV}, 3\text{MeV}, 4\text{MeV}, 5\text{MeV}, 6\text{MeV}, 7\text{MeV}, 8\text{MeV}, 9\text{MeV}, 10\text{MeV}$ とした。各々の中性子エネルギーに対し、 B_4C が 0%, 100% の中性子の飛行時間分布を図 2.5-3_1 ~ 図 2.5-24_1 に、荷電粒子の飛行時間分布を図 2.5-3_2 ~ 図 2.5-24_2 に、(中性子+荷電粒子)の飛行時間分布を図 2.5-3_3 ~ 図 2.5-24_3 に、波高分布を図 2.5-3_4 ~ 図 2.5-24_4 に示す。計算に使用した中性子粒子数は、500000 である。ターゲットから放出され最終的に電子信号に変換されるまでに飛行時間は殆ど、中性子の飛行時間分布できる。波高分布は、大まかには、中性子エネルギーによらず、 $^3\text{He}(n, p)^3\text{H}$ 反応の Q 値 764keV に大きなピークを持つ。低エネルギー部分は $E_n < 500\text{keV}$ ではピーク部に比べて 2 枠以下であるが、 $E_n > 1\text{MeV}$ では低エネルギー部分が多少増加し、 $E_n = 10\text{MeV}$ ではピーク部に対し 1/20 程度まで増加する。

B_4C が覆う面積を 0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100% とした場合の感度 (全カウント

数を入射入試数で規格した値) のエネルギー依存性を図 2.5-25 に示す。図 2.5-2 に示されるレムレスポンスでは、 $E_n < 10\text{keV}$ で $1/K(E)$ はほぼ一定であるが、計算された感度は $E_n < 10\text{keV}$ の領域で中性子エネルギーの減少とともに減少する。又 $1/K(E)$ は $1\text{MeV} < E_n < 100\text{MeV}$ でも一定であるが、計算された感度は $E_n = 2\text{MeV}$ 辺りにピークを持ちそれより高エネルギー中性子に対しては減少する、これはレムカウンターの大きさに起因すると考えられる。熱中性子と $E_n = 2\text{MeV}$ での感度比がレムレスポンスの比と一致するという条件で、 B_4C 球に開けてあるバイパス孔率を B_4C が覆う面積割合として評価した。求められた面積割合は 29% であった。

B_4C の覆う面積割合が 29% である場合、中性子の飛行時間分布を図 2.5-26_1～図 2.5-47_1 に、荷電粒子の飛行時間分布を図 2.5-26_2～図 2.5-47_2 に、(中性子+荷電粒子)の飛行時間分布を図 2.5-26_3～図 2.5-47_3 に示す。各々の中性子エネルギーに対し、全カウント数の 99%, 95%, 90%, 70%, 50% が電気信号に変換される直前の時間を求め、図 2.5-48 にプロットした。全カウント数の 99% の場合、 $E_n < 100\text{mV}$ では～1 msec, $100\text{eV} < E_n < 10\text{keV}$ では～0.5 msec, $E_n > 1\text{MeV}$ では～0.3 msec であり、全カウント数の 90% の場合、 $E_n < 100\text{mV}$ では～0.7 msec, $100\text{eV} < E_n < 10\text{keV}$ では～3.0 msec, $E_n > 1\text{MeV}$ では～80 μsec である。

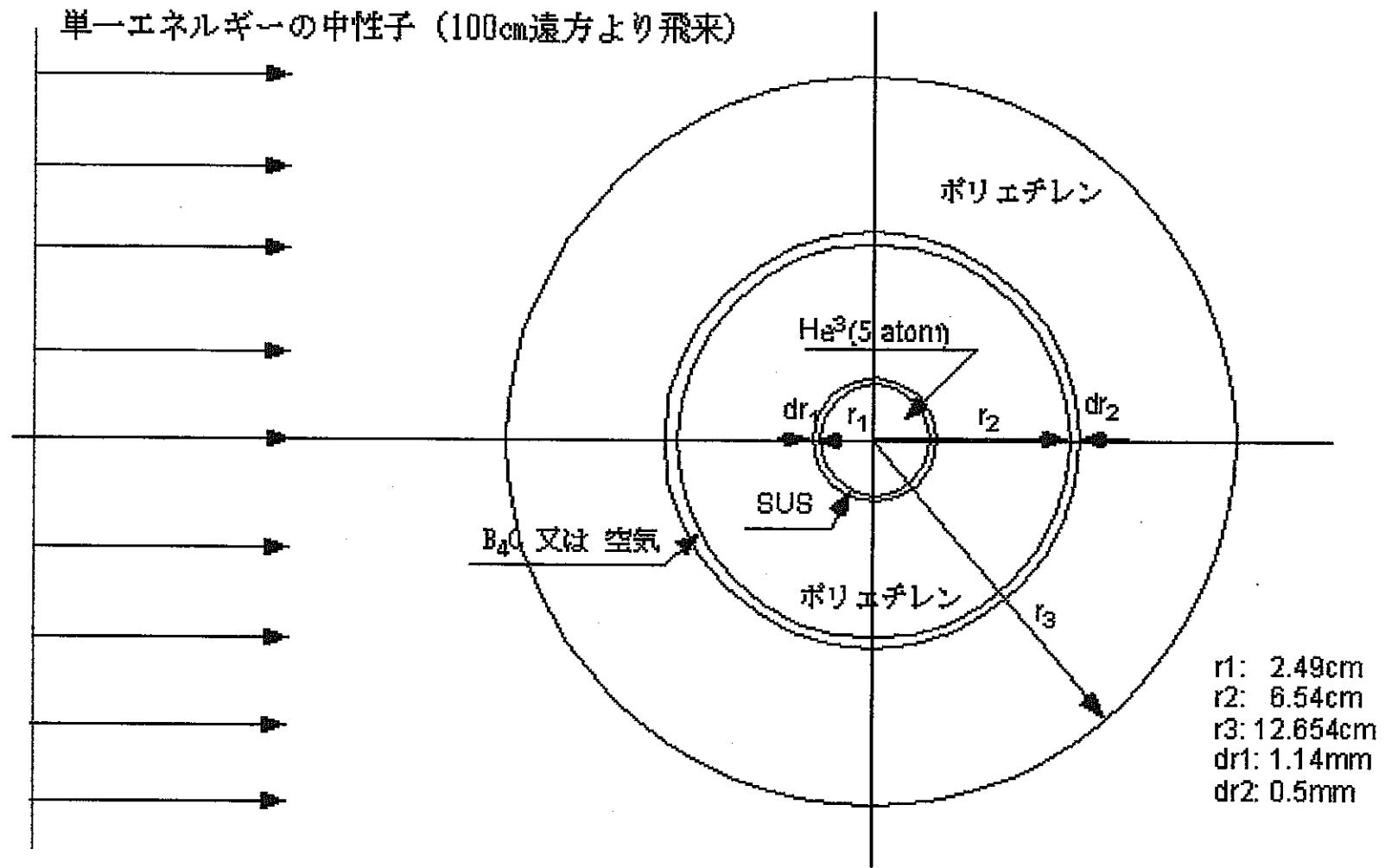


図 2.5-1 計算に用いたレムカウンターの幾何学的な配置

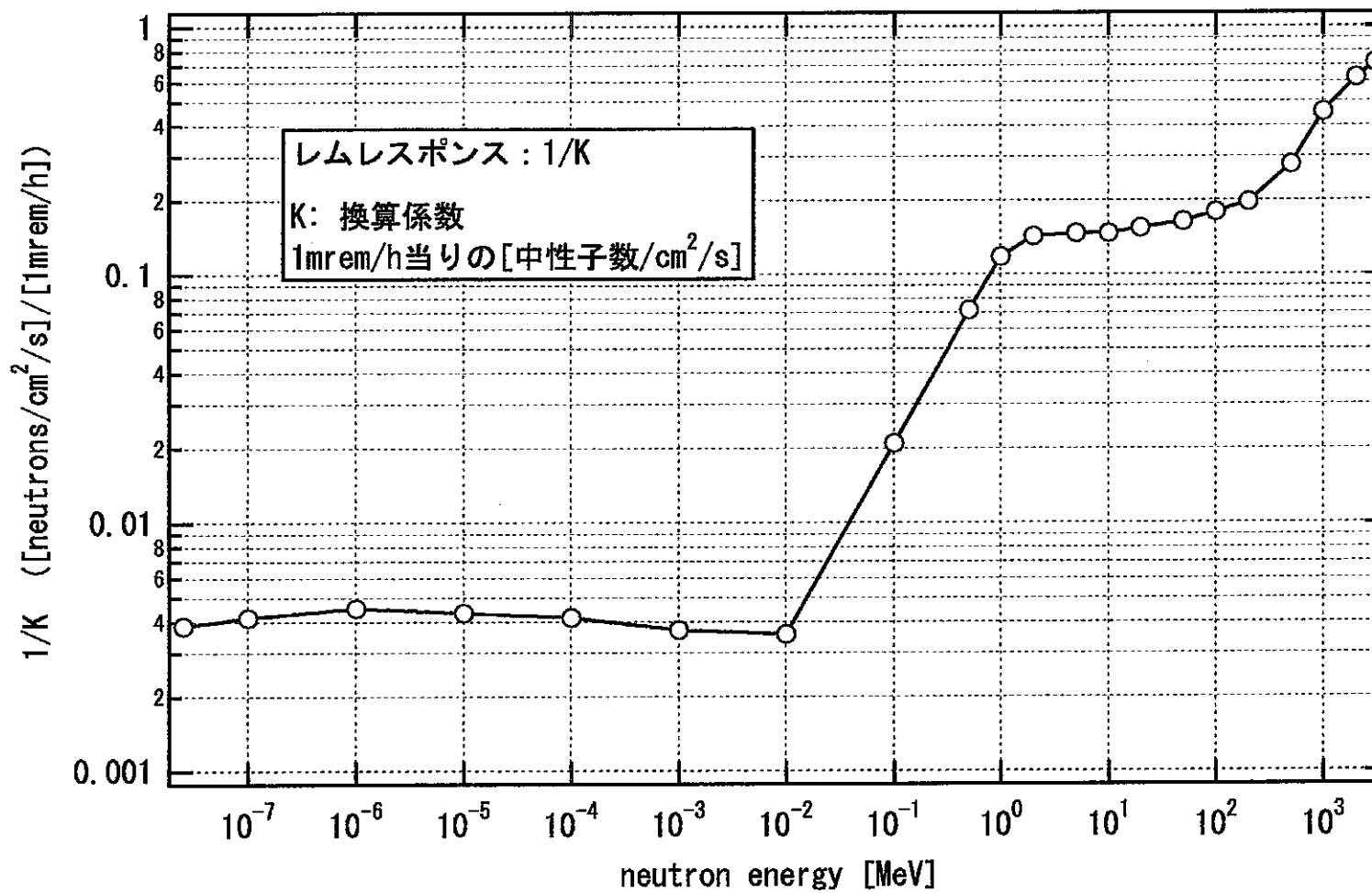


図 2.5-2 ICRP'21（国際放射線防護委員会専門委員会 3 の報告）の値を用いたレムレスポンス

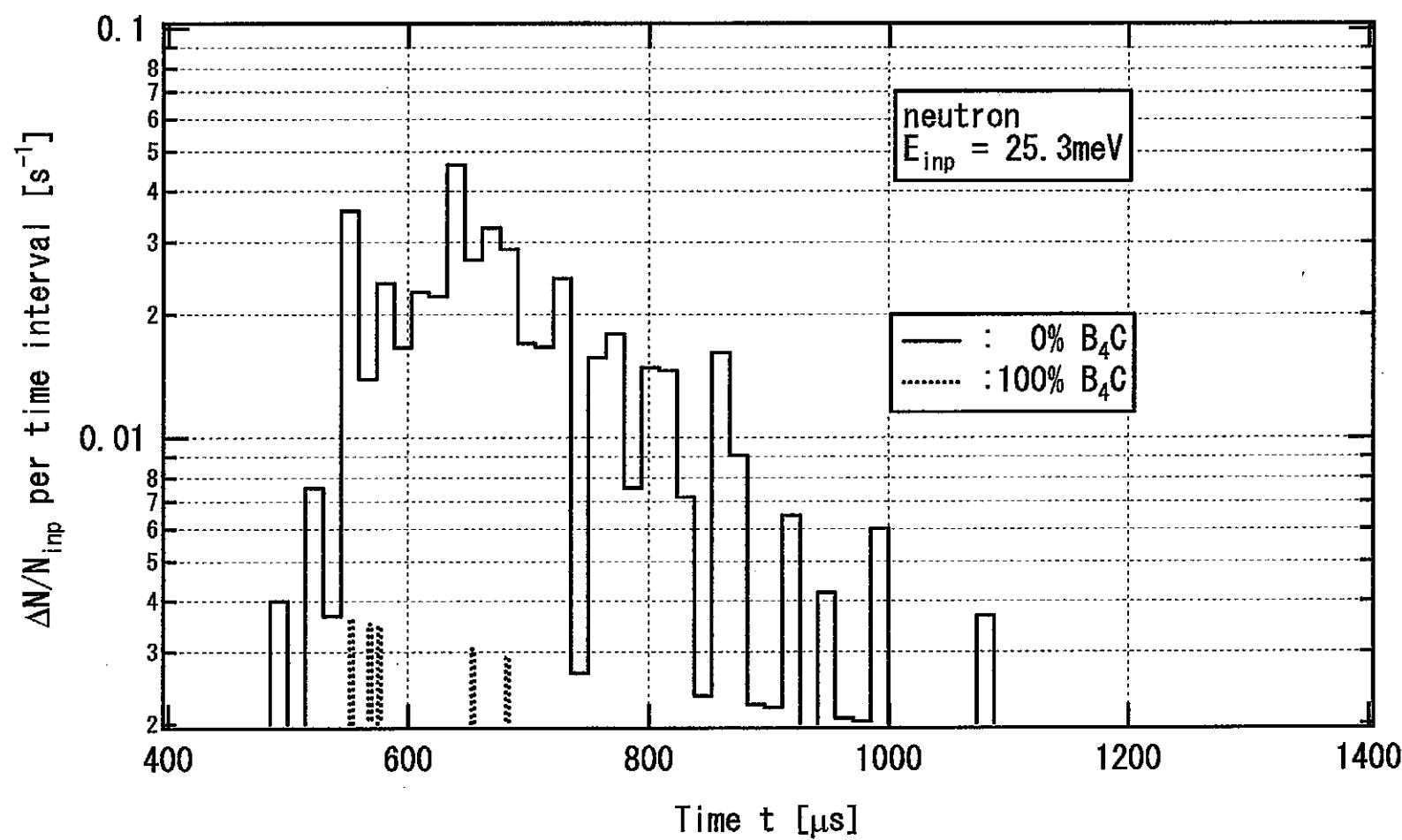


図 2.5-3_1 B_4C 有無の場合の中性子の TOP 分布 ($E_n = 25.3 \text{ meV}$)

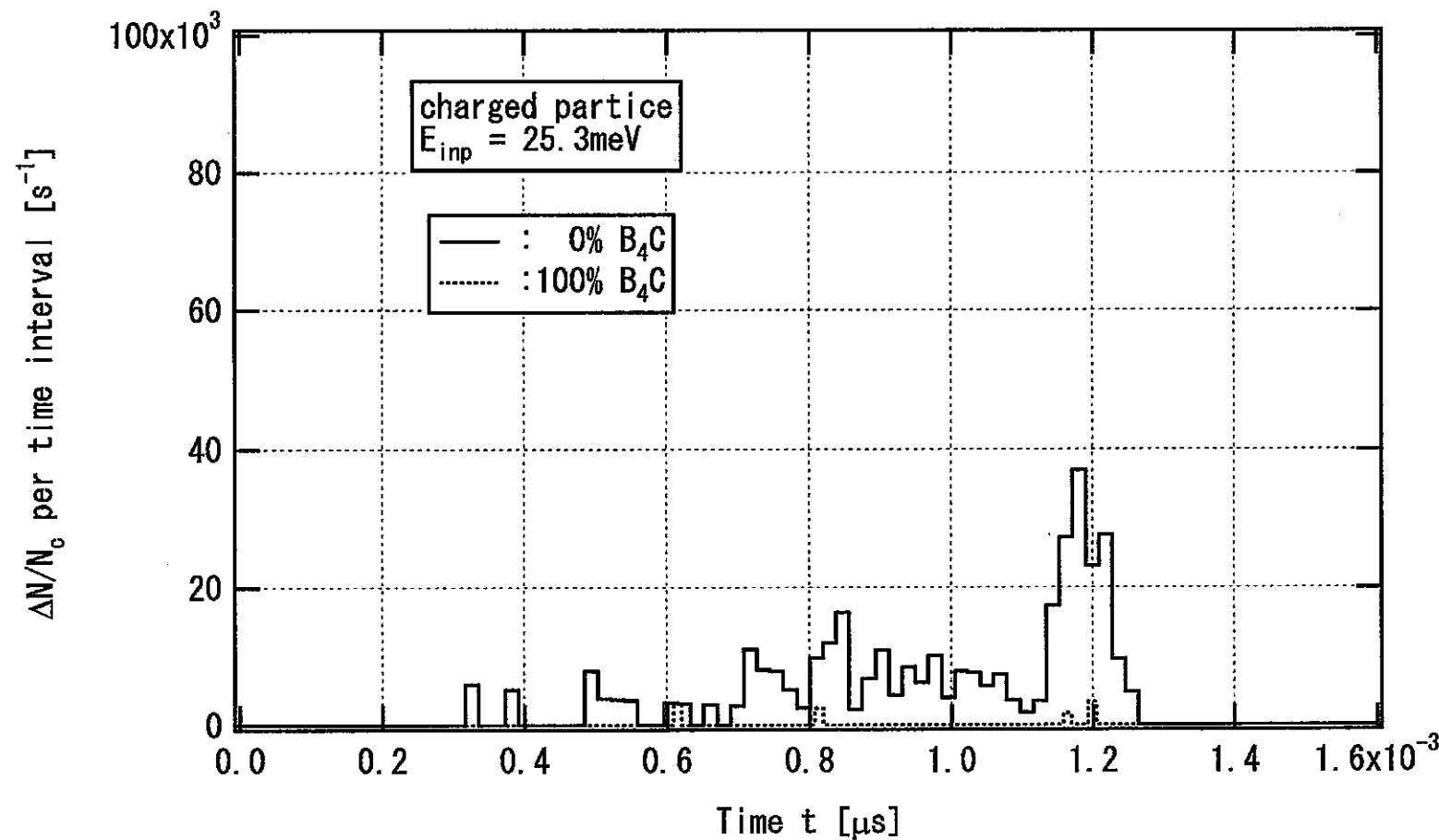


図 2.5-3_2 B_4C 有無の場合の荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 25.3\text{meV}$)

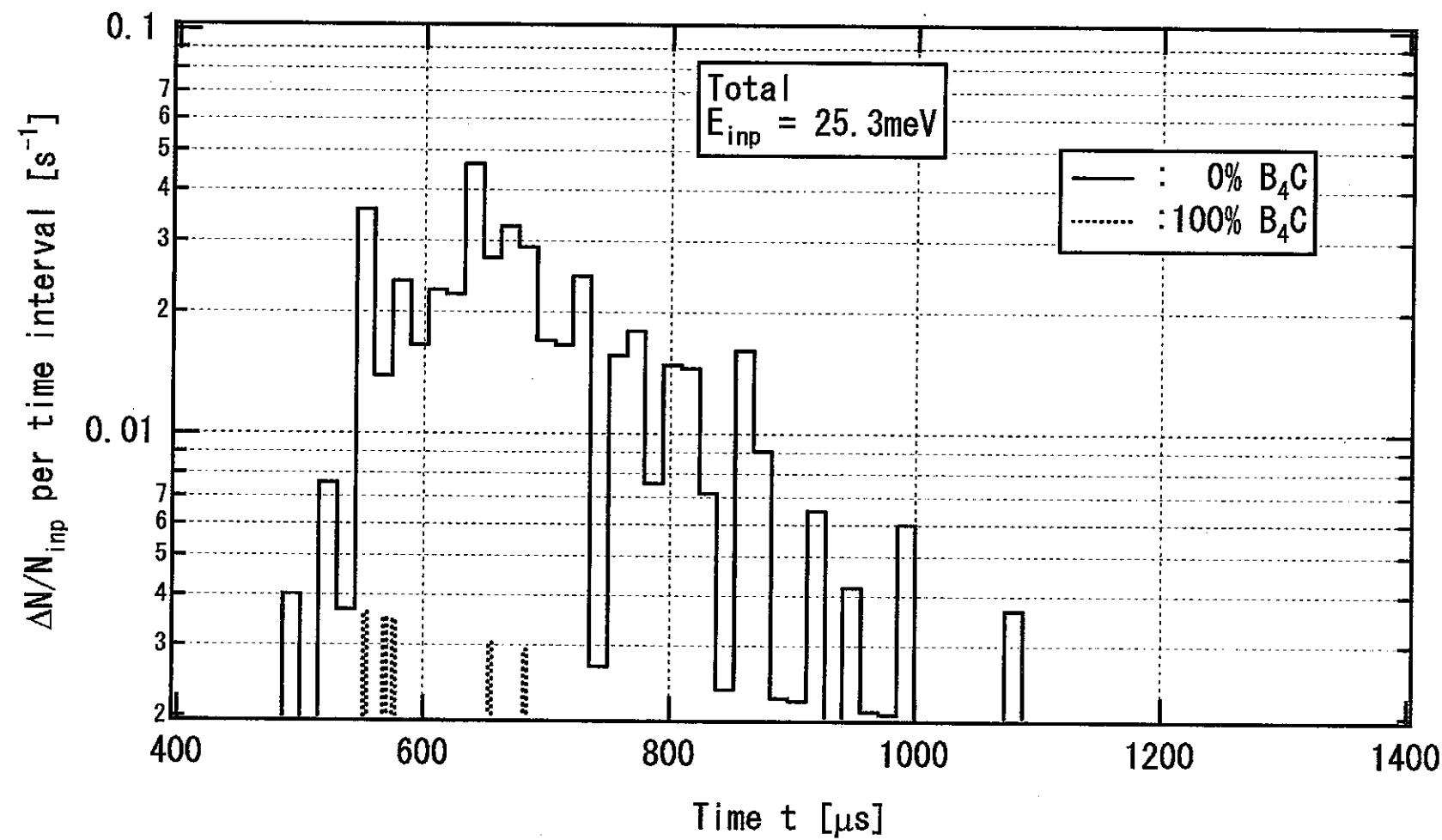


図 2.5-3_3 B_4C 有無の場合の中性子+荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 25.3 \text{ meV}$)

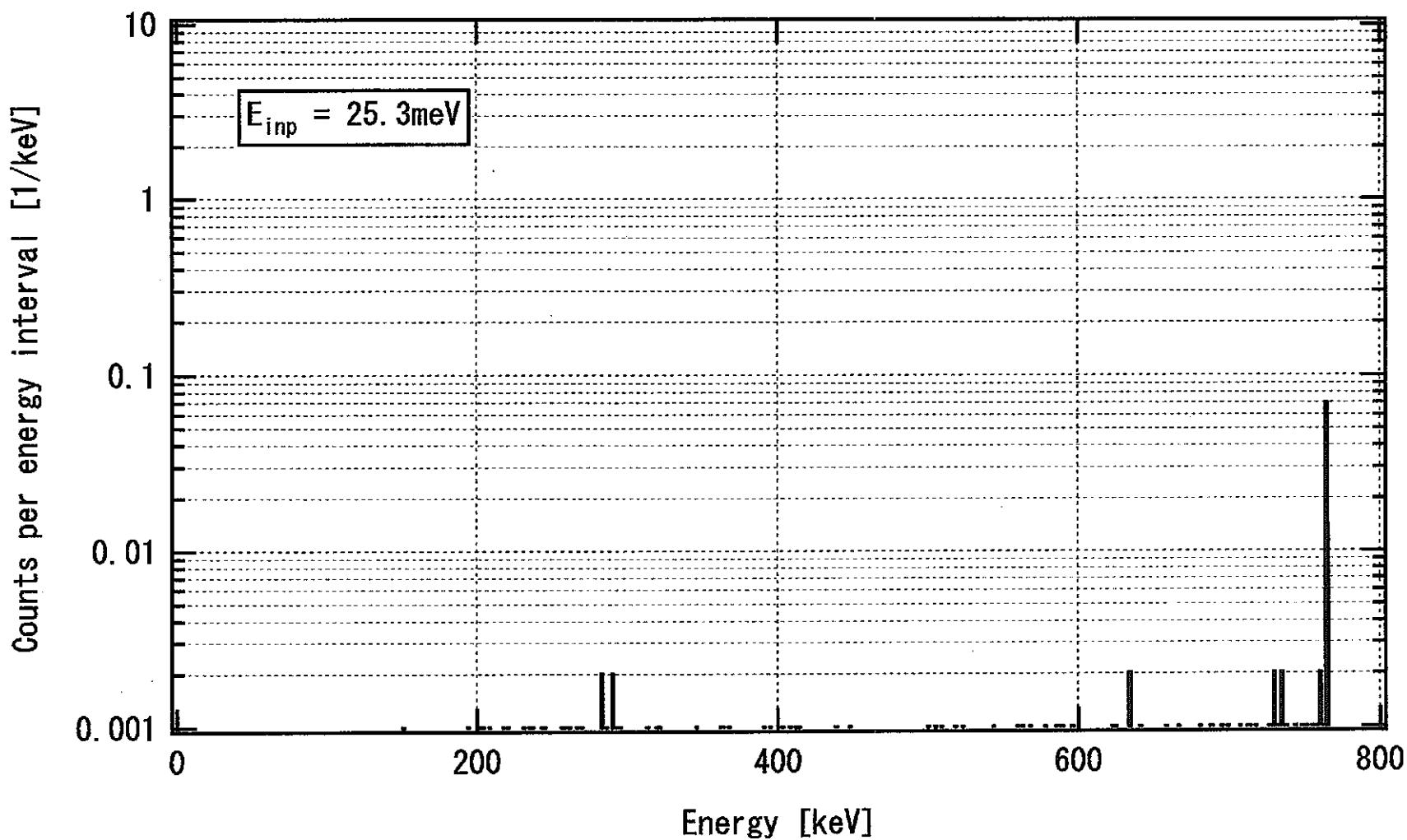


図 2.5・3_4 ${}^3\text{He}$ 比例計数管（レムカウンター）による中性子 ($E_n = 25.3\text{meV}$) の波高分布

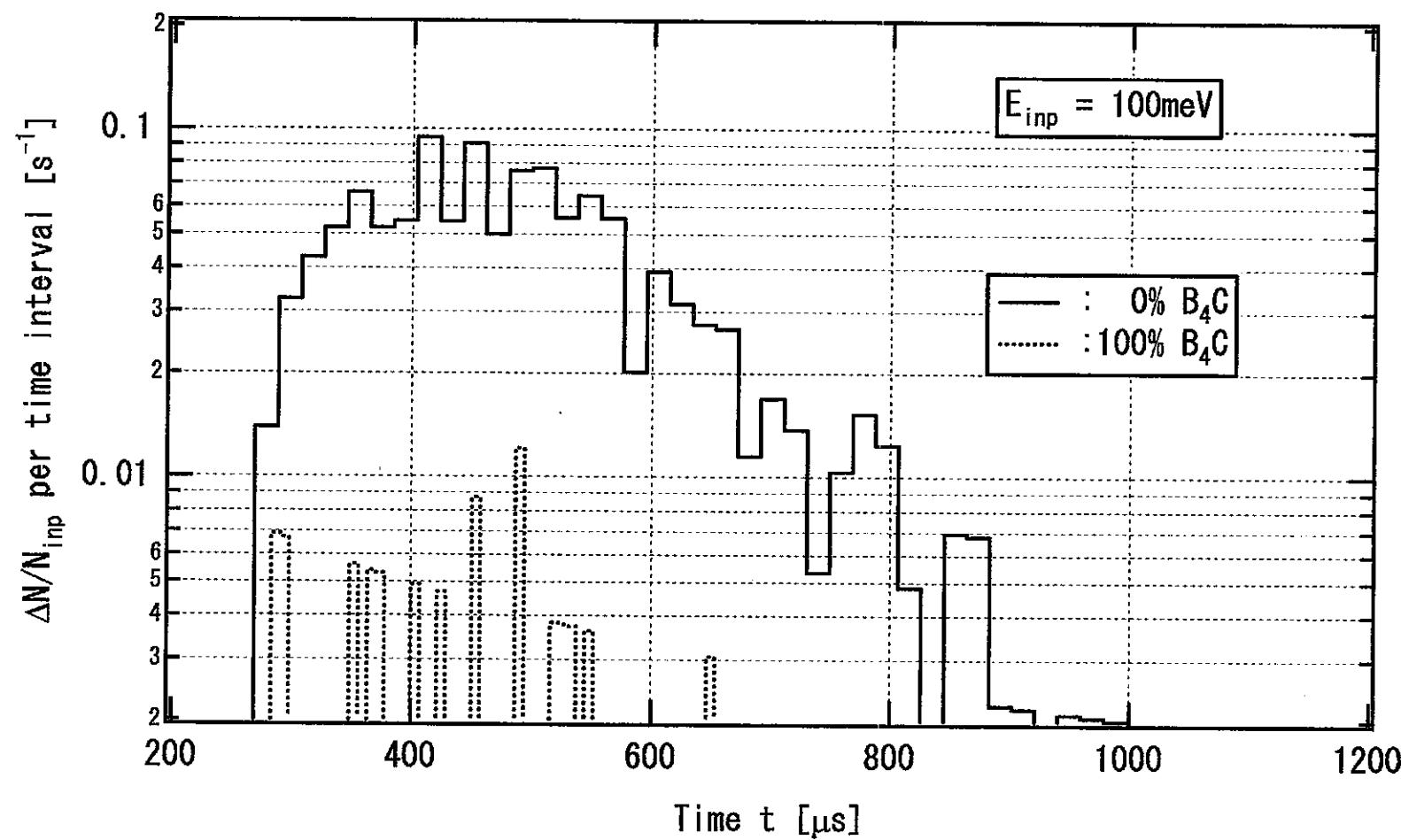


図 2.5-4_1 B_4C 有無の場合の中性子の TOP 分布 ($E_n = 100 \text{ meV}$)

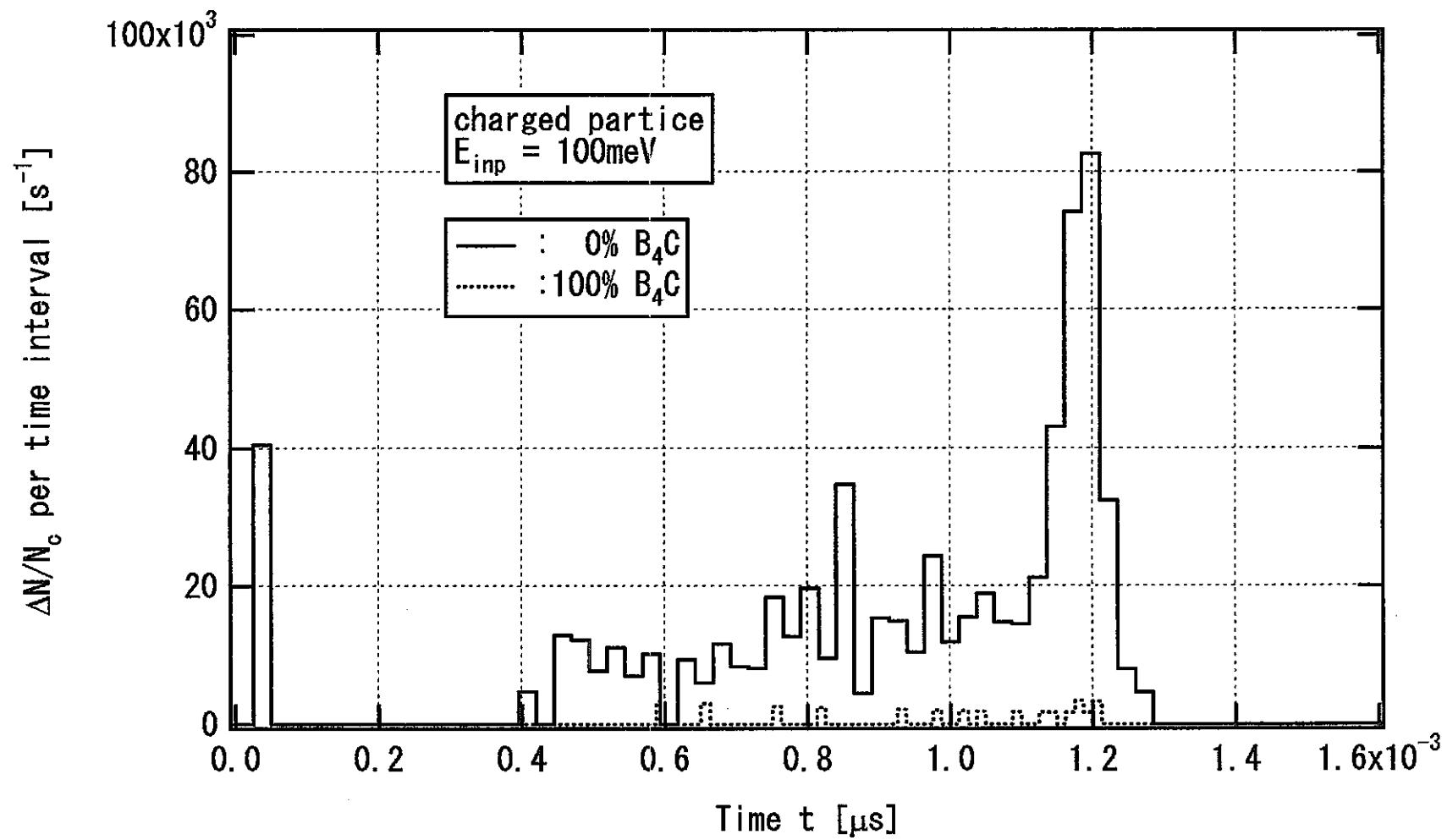


図 2.5-4_2 B_4C 有無の場合の荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 100\text{meV}$)

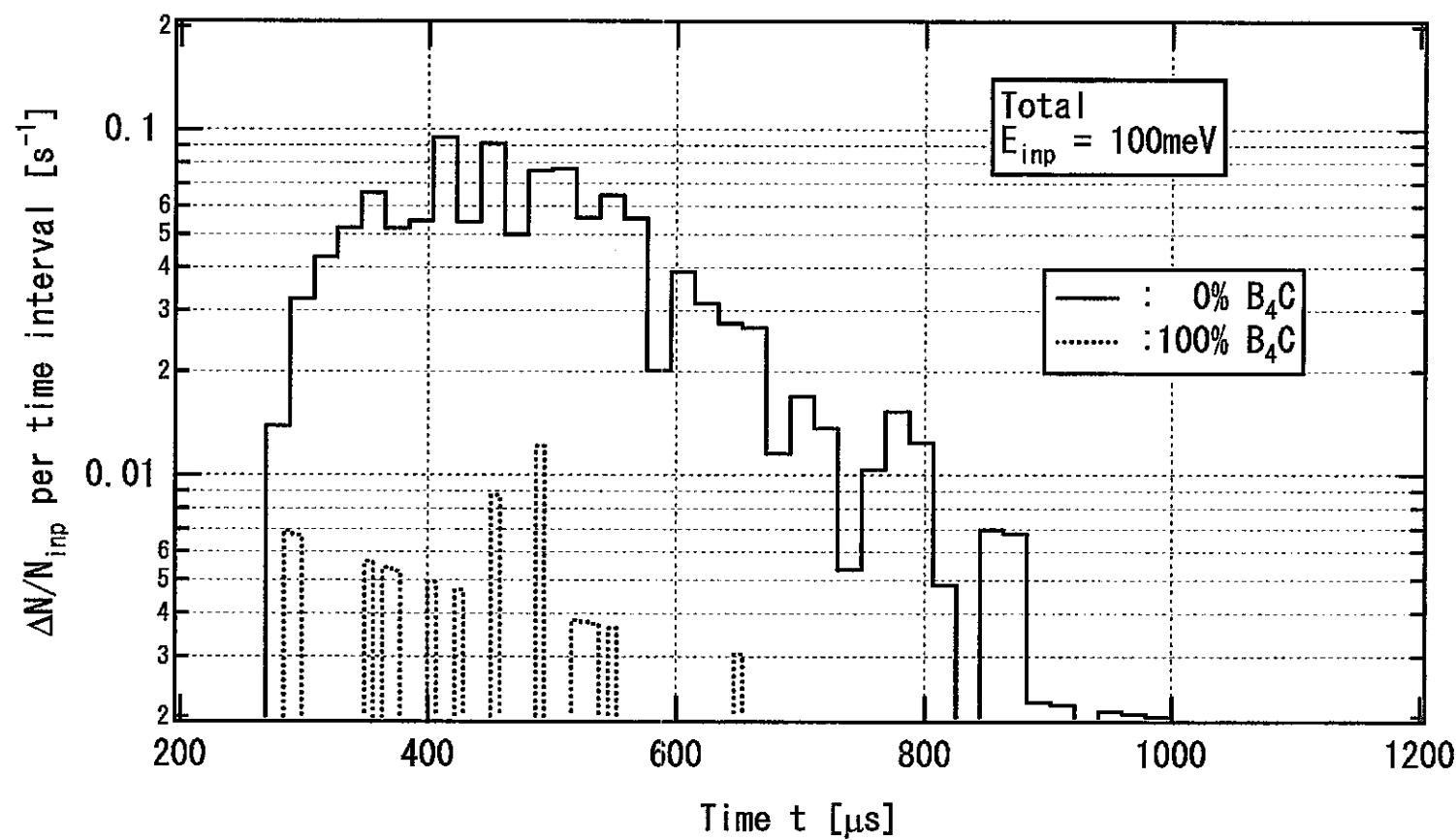


図 2.5-4 _3 B_4C 有無の場合の中性子+荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 100\text{meV}$)

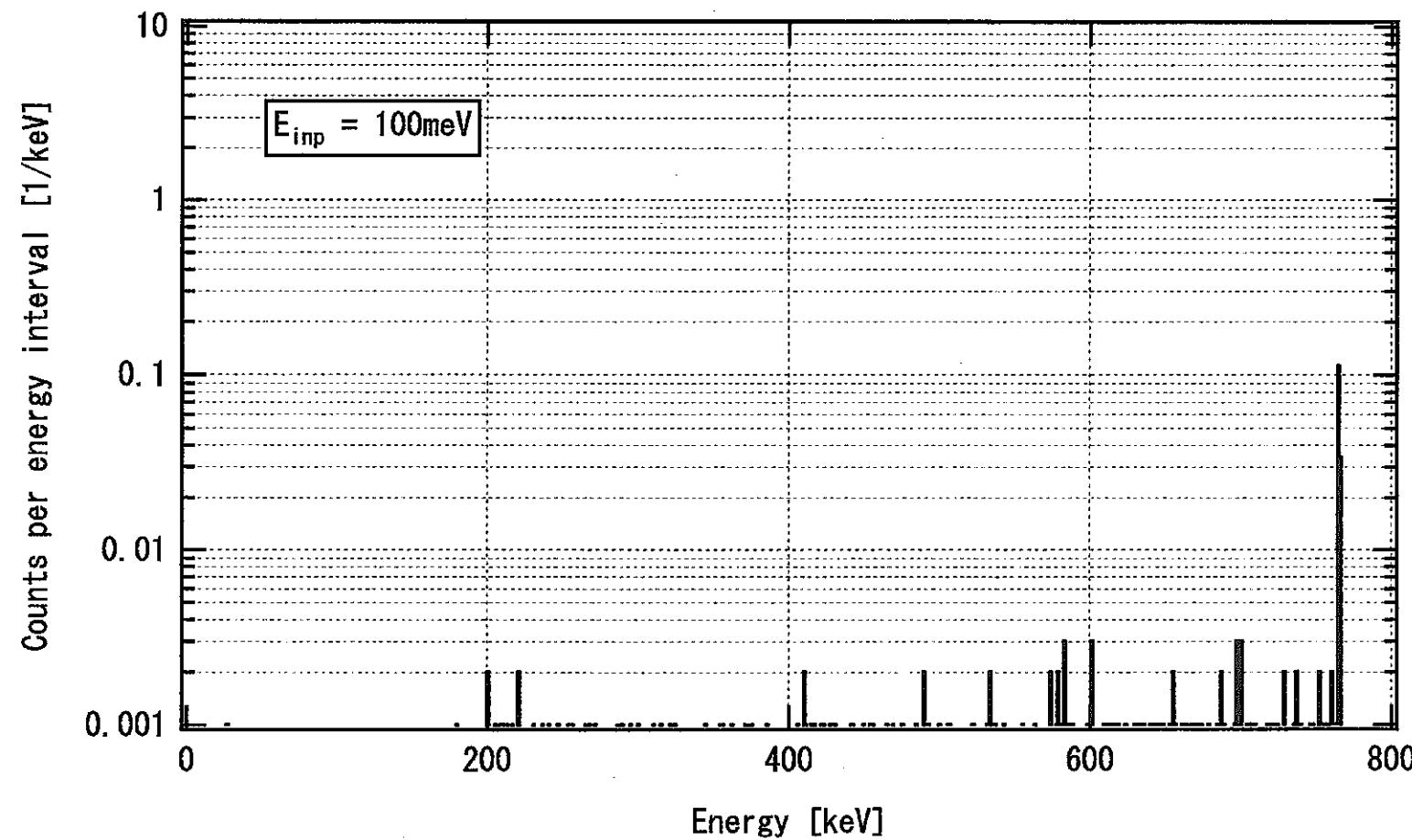


図 2.5-4_4 ^3He 比例計数管（レムカウンター）による中性子 ($E_n = 100 \text{ meV}$) の波高分布

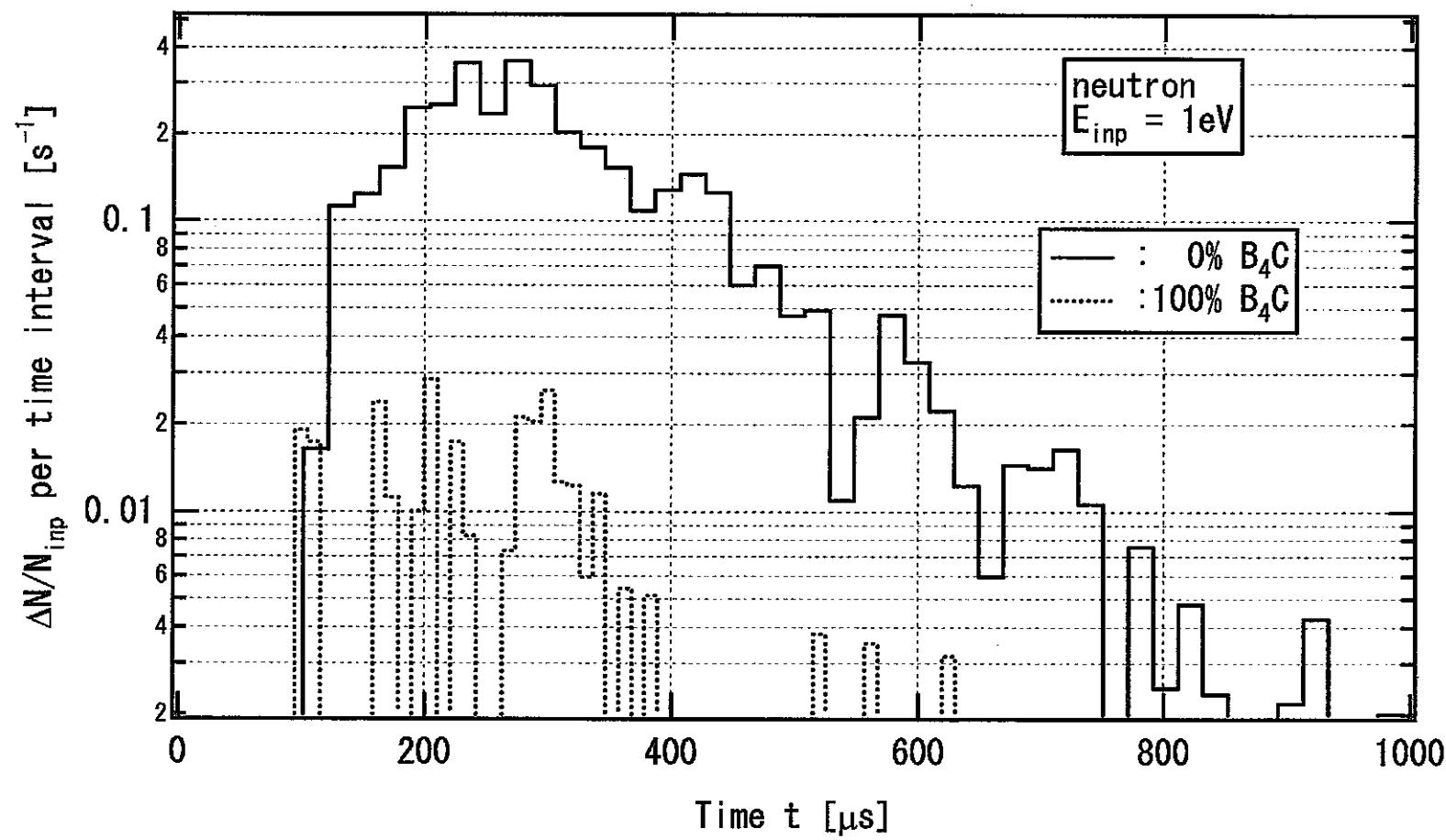


図 2.5-5_1 B_4C 有無の場合の中性子の TOP 分布 ($E_n = 1\text{eV}$)

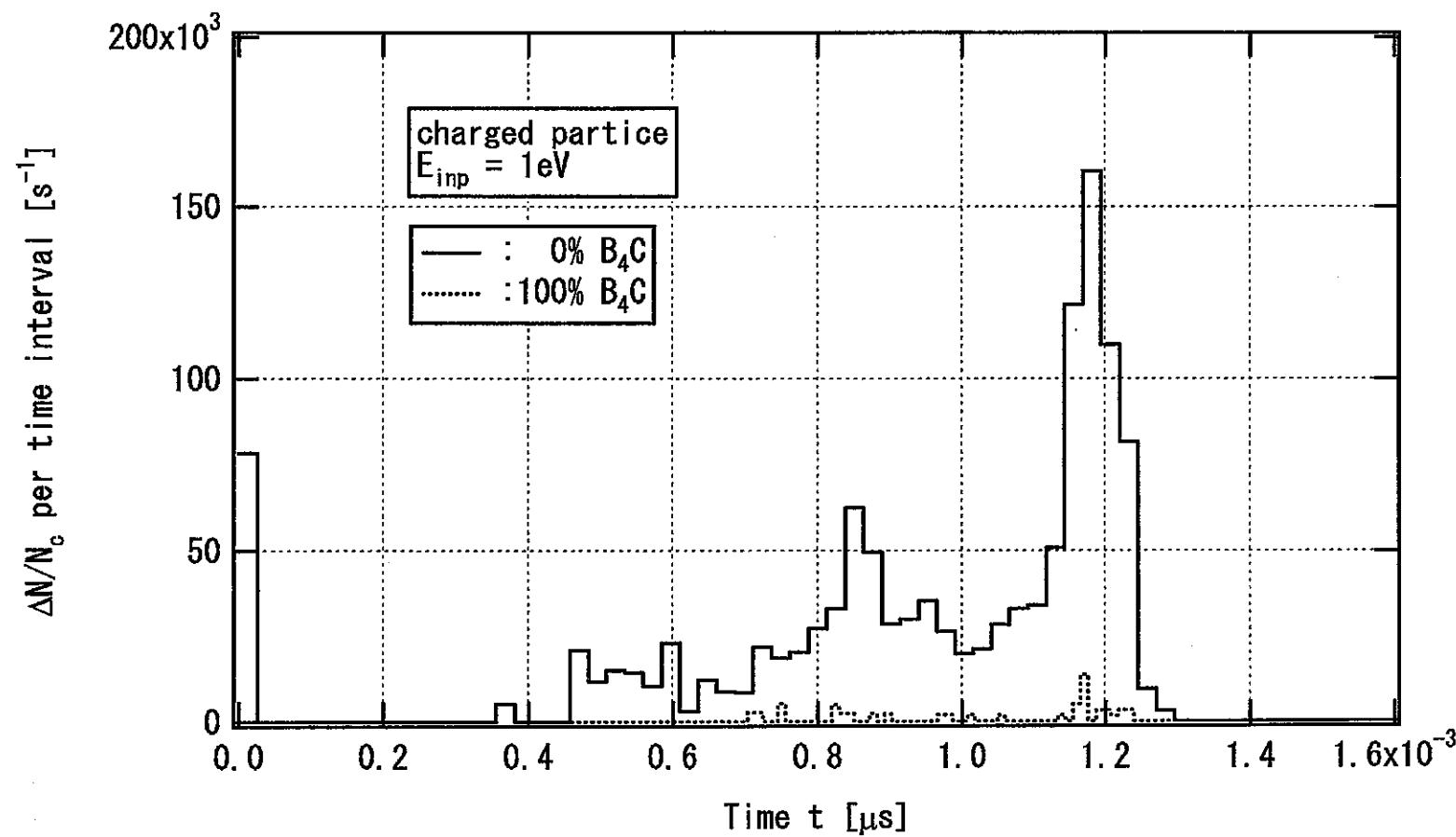


図 2.5-5_2 B_4C 有無の場合の荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 1\text{eV}$)

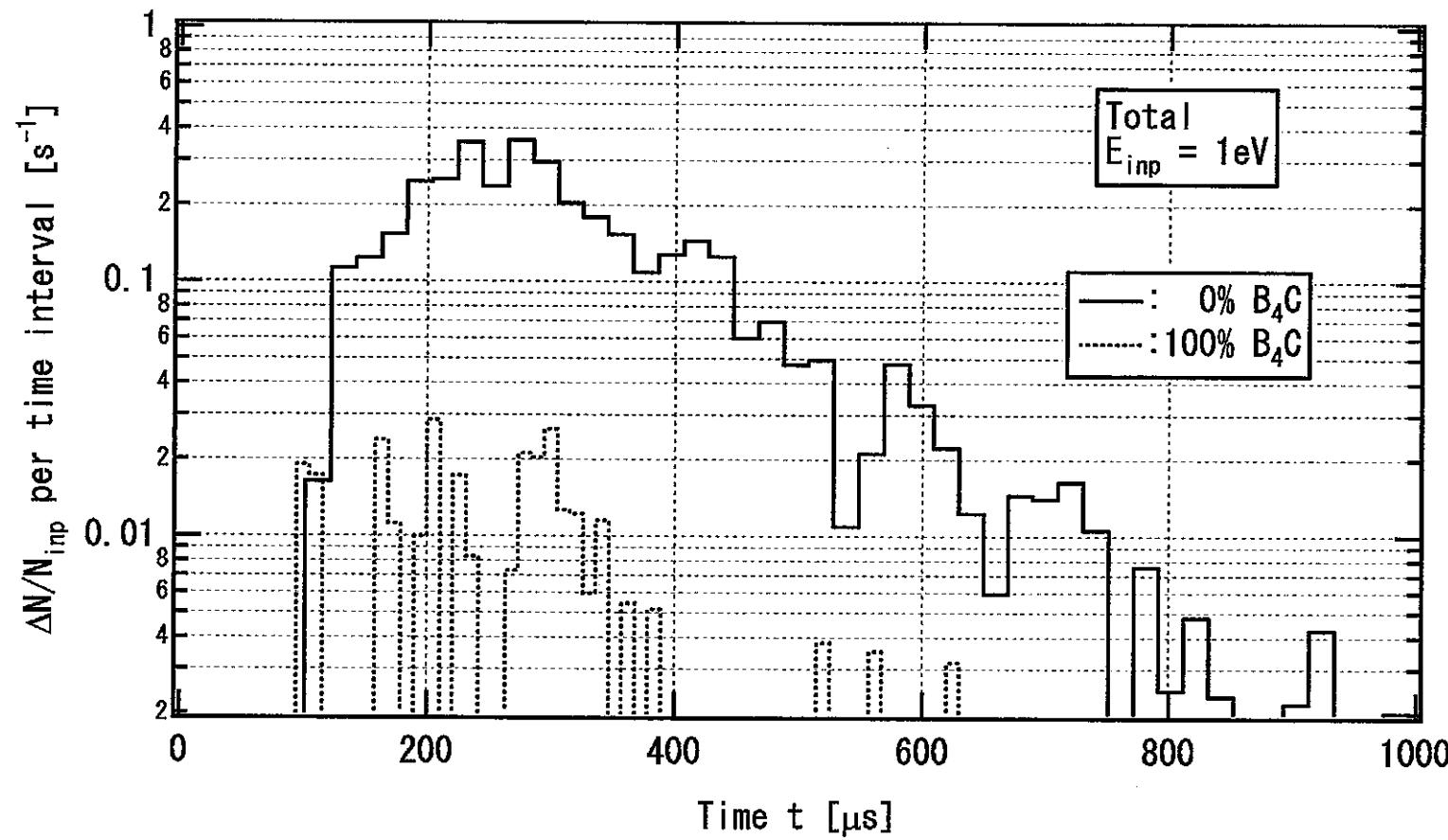


図 2.5-5_3 B_4C 有無の場合の中性子+荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 1 \text{ eV}$)

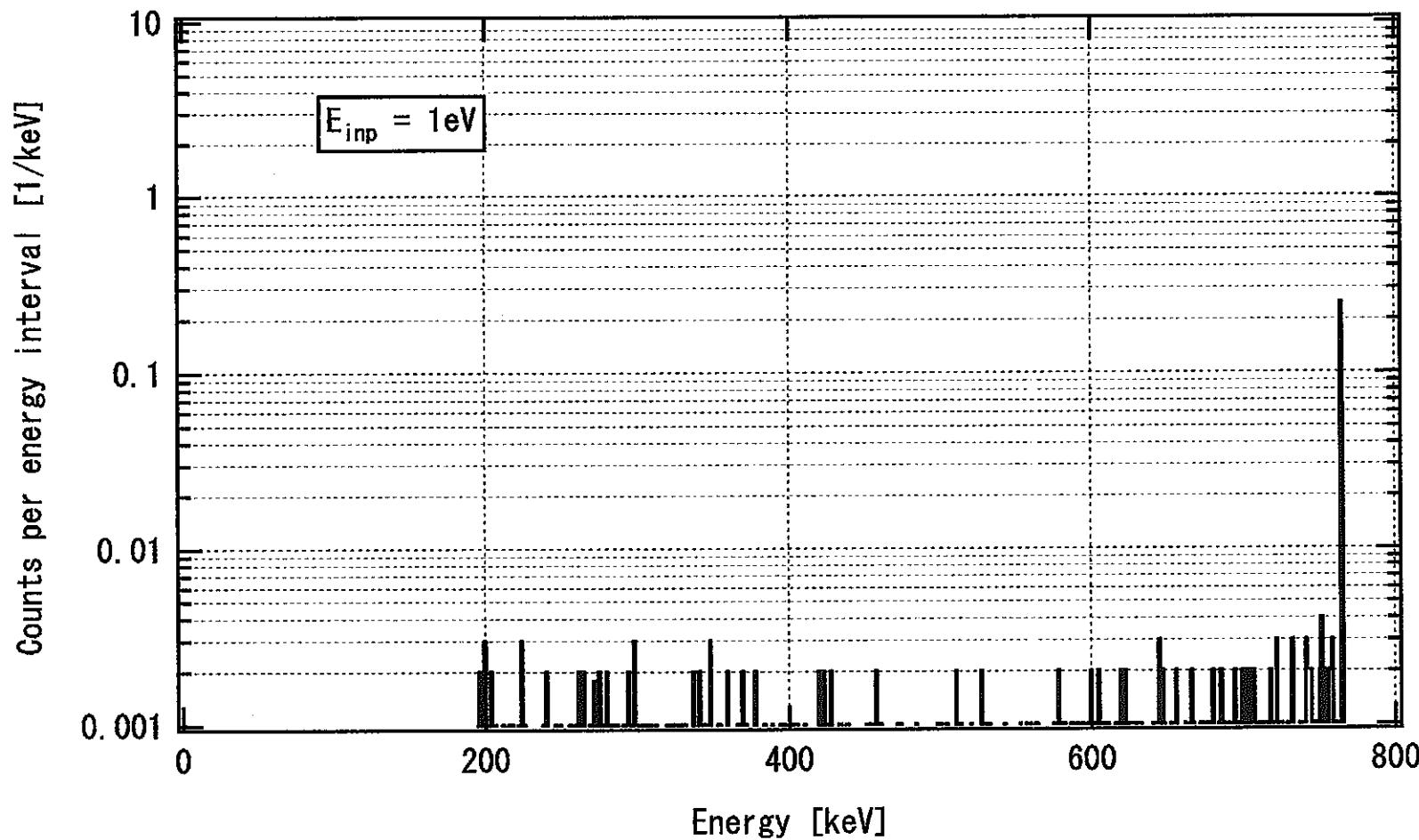


図 2.5-5_4 ^3He 比例計数管（レムカウンター）による中性子 ($E_n = 1\text{eV}$) の波高分布

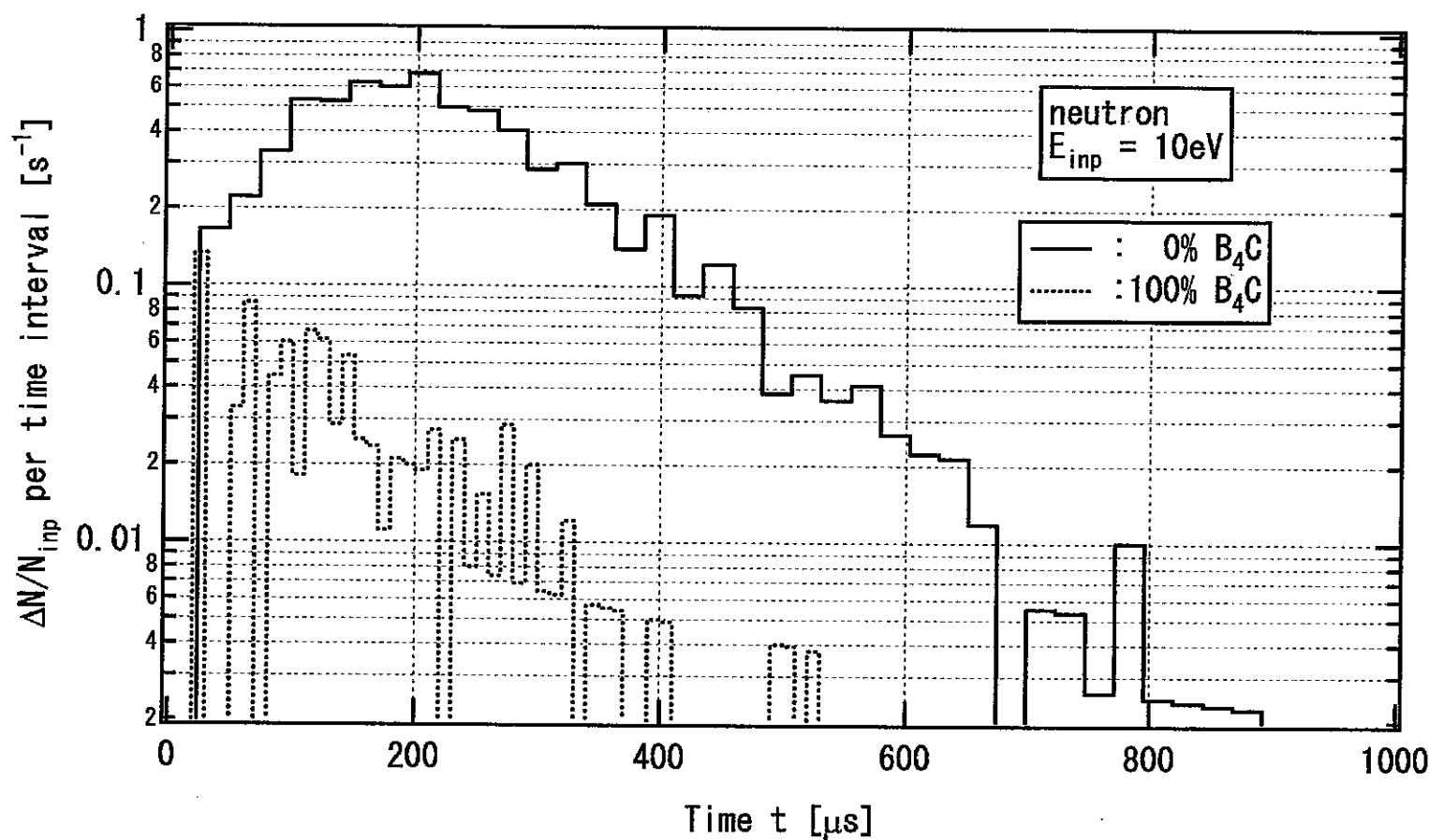


図 2.5-6_1 B_4C 有無の場合の中性子の TOP 分布 ($E_n = 10\text{eV}$)

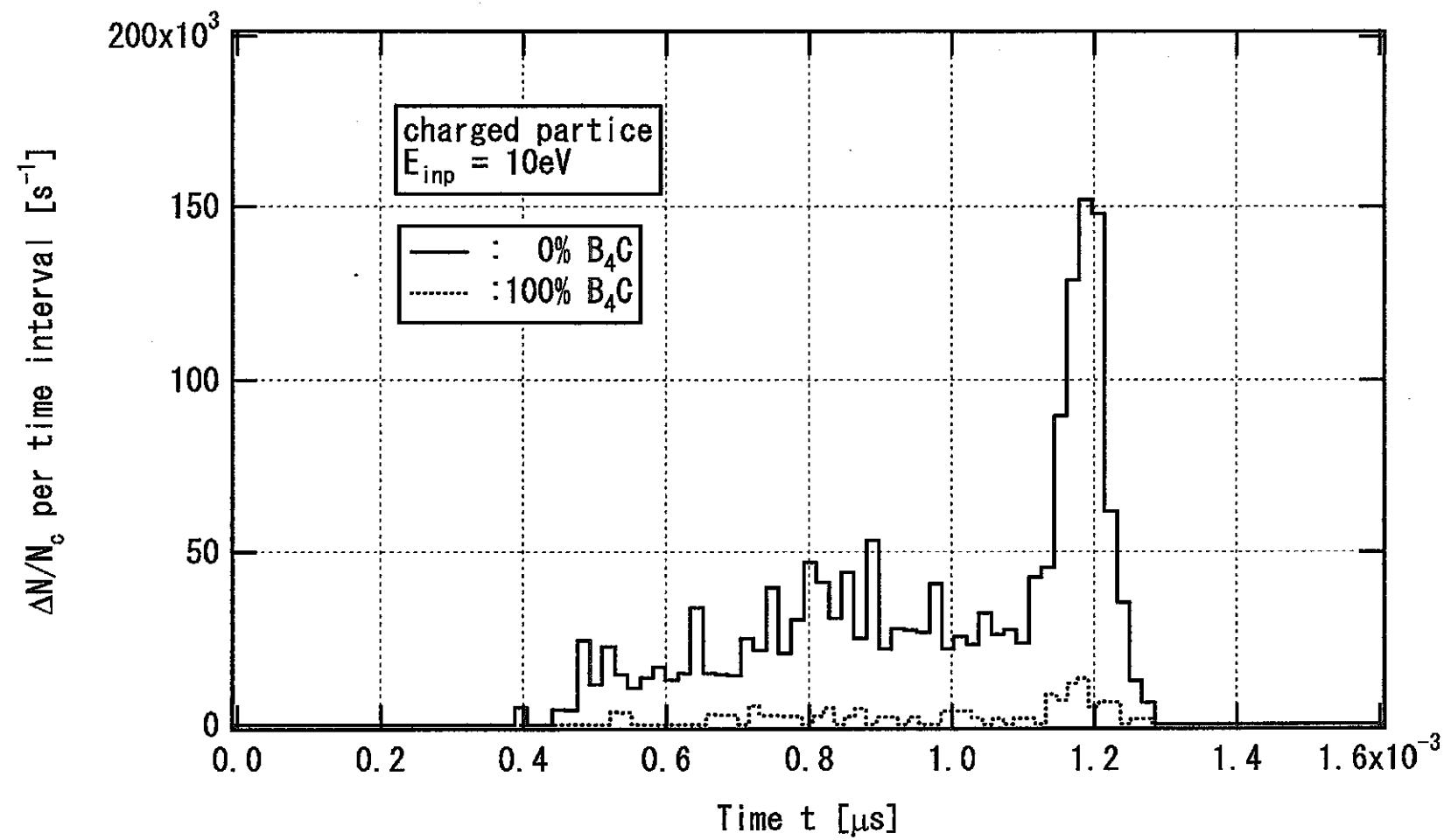


図 2.5-6_2 B_4C 有無の場合の荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 10\text{eV}$)

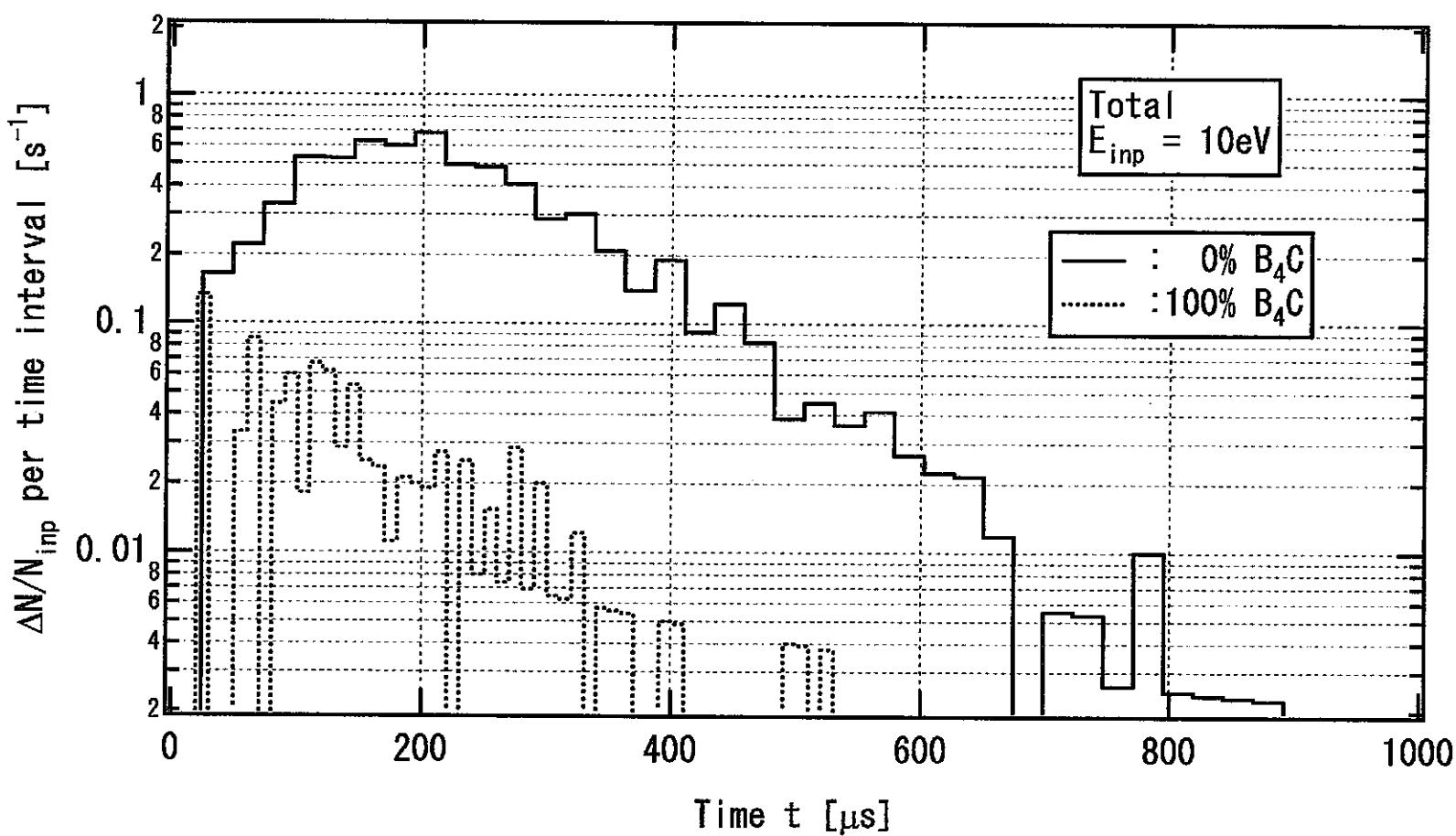


図 2.5-6_3 B_4C 有無の場合の中性子+荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 10 \text{ eV}$)

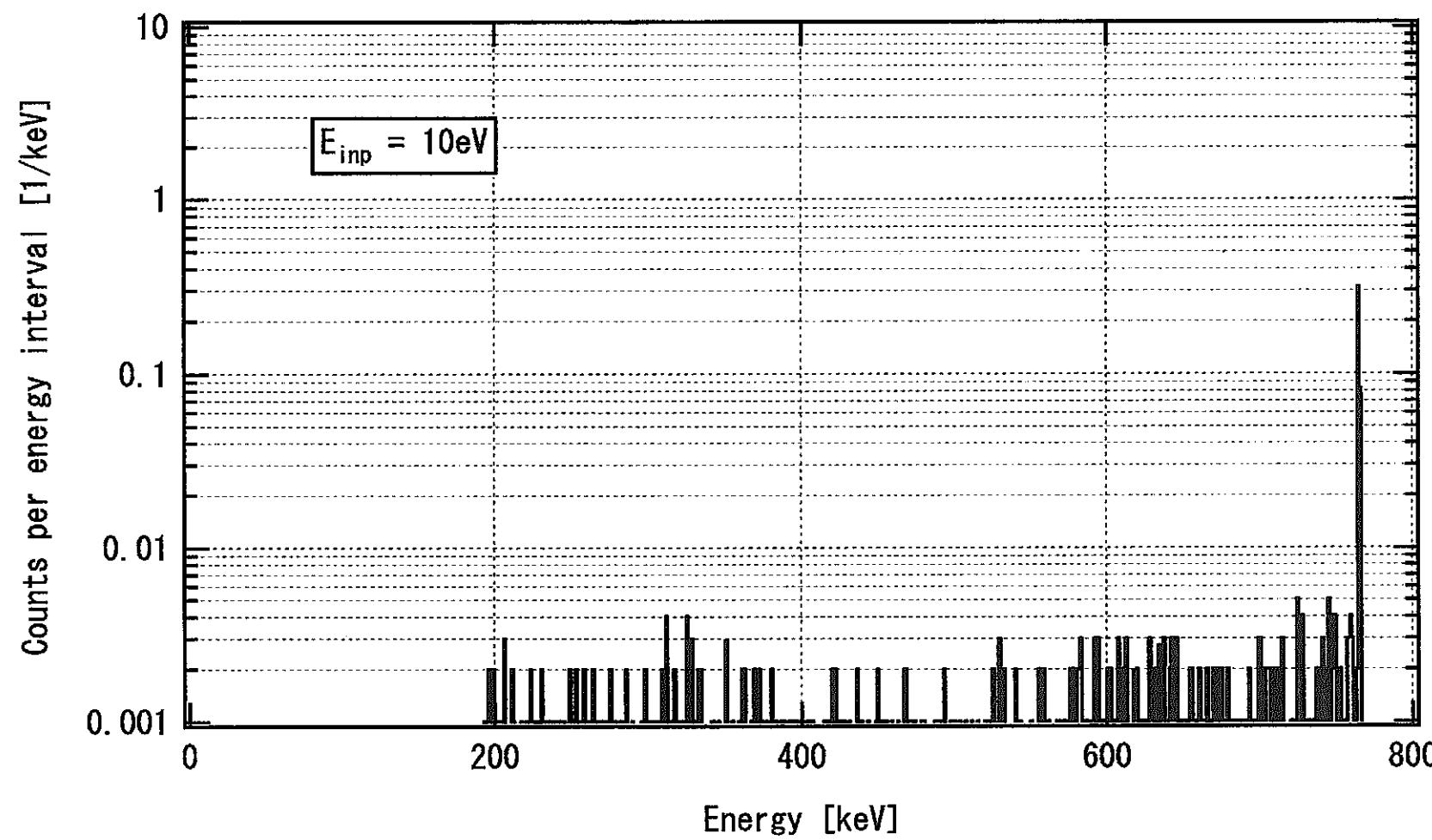


図 2.5-6_4 ^3He 比例計数管（レムカウンター）による中性子 ($E_n = 10\text{eV}$) の波高分布

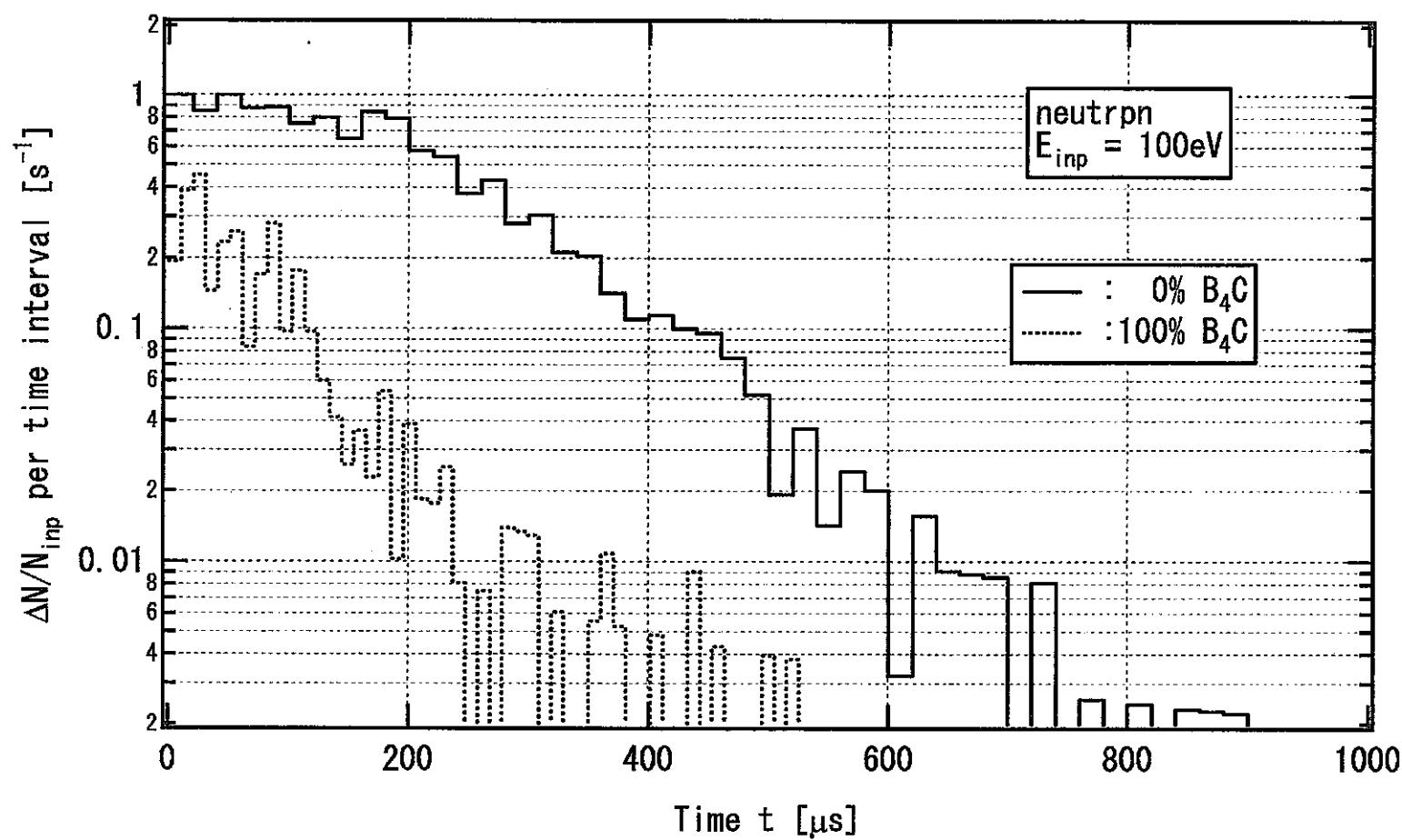


図 2.5-7_1 B_4C 有無の場合の中性子の TOP 分布 ($E_n = 100\text{eV}$)

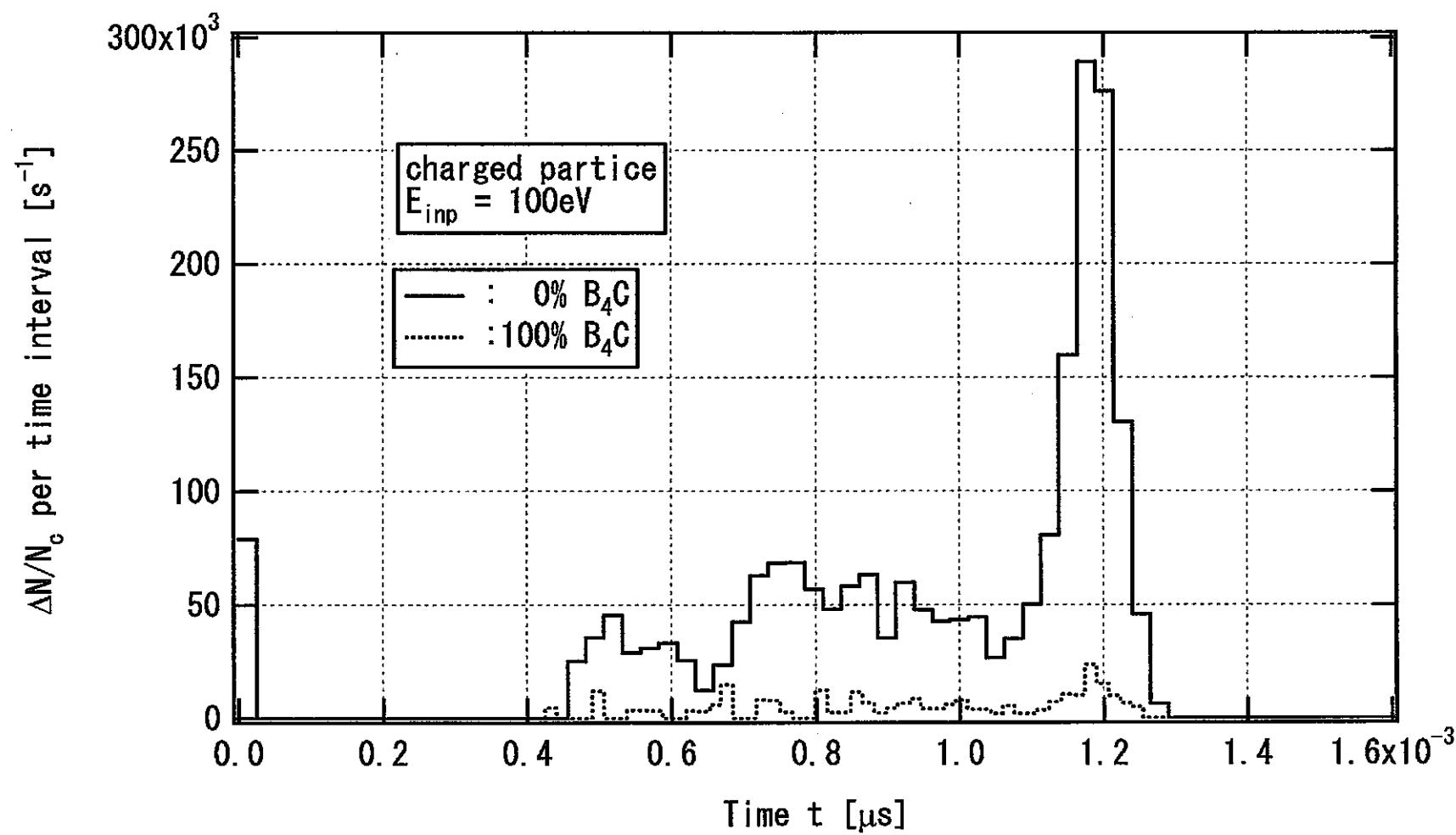


図 2.5-7_2 B_4C 有無の場合の荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 100\text{eV}$)

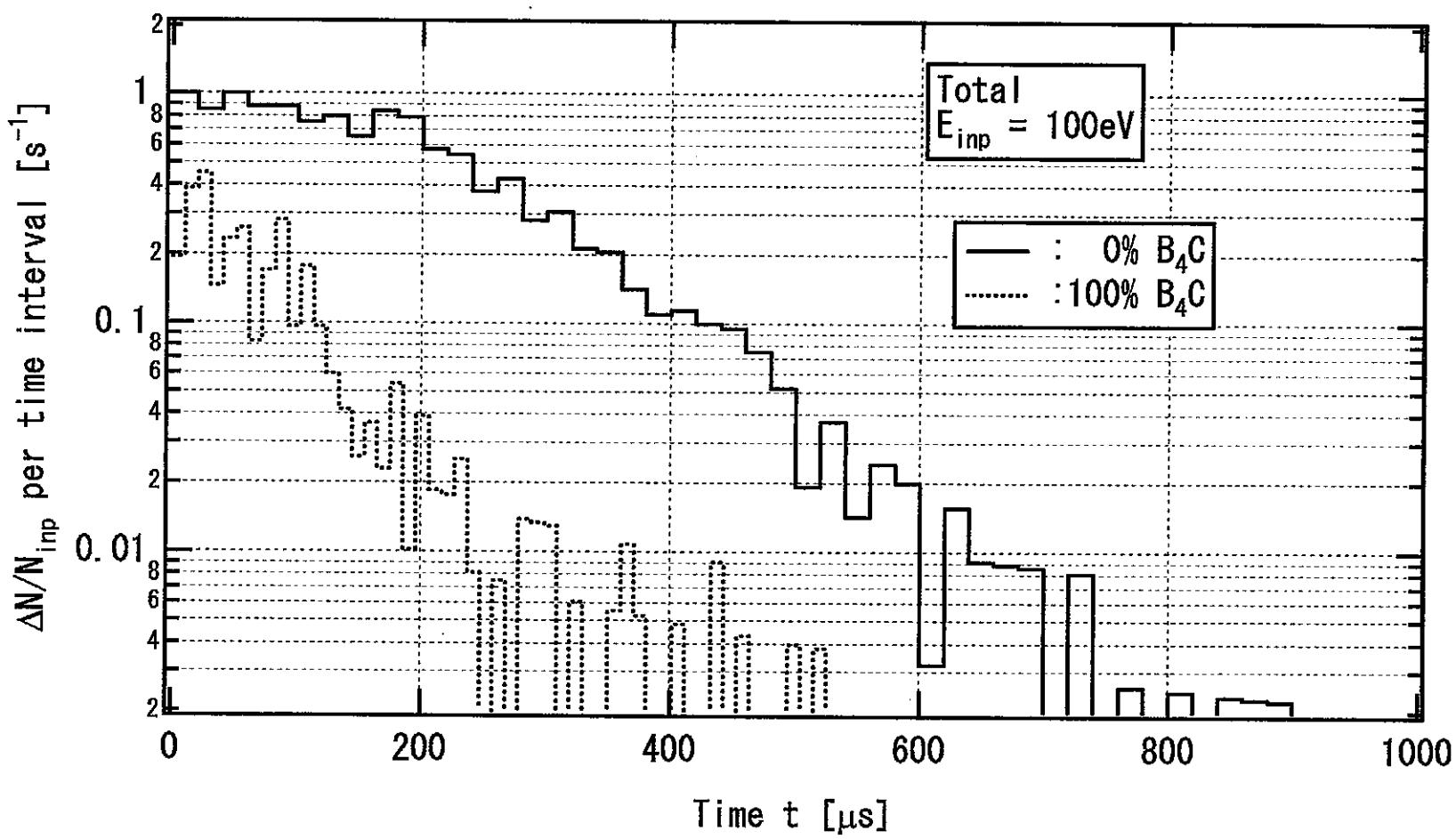


図 2.5-7_3 B_4C 有無の場合の中性子+荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 100\text{eV}$)

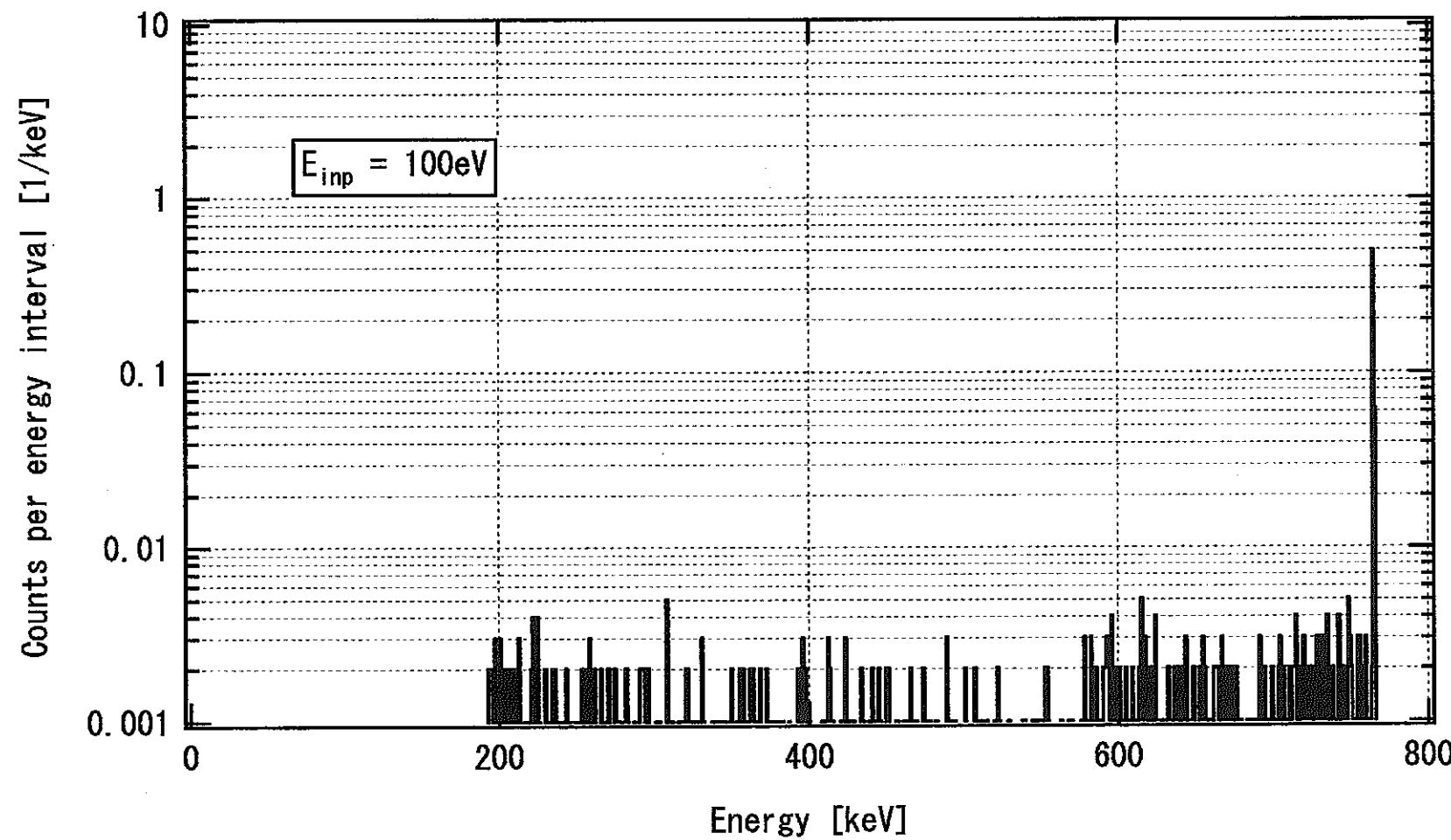


図 2.5-7_4 ${}^3\text{He}$ 比例計数管（レムカウンター）による中性子 ($E_n = 100\text{eV}$) の波高分布

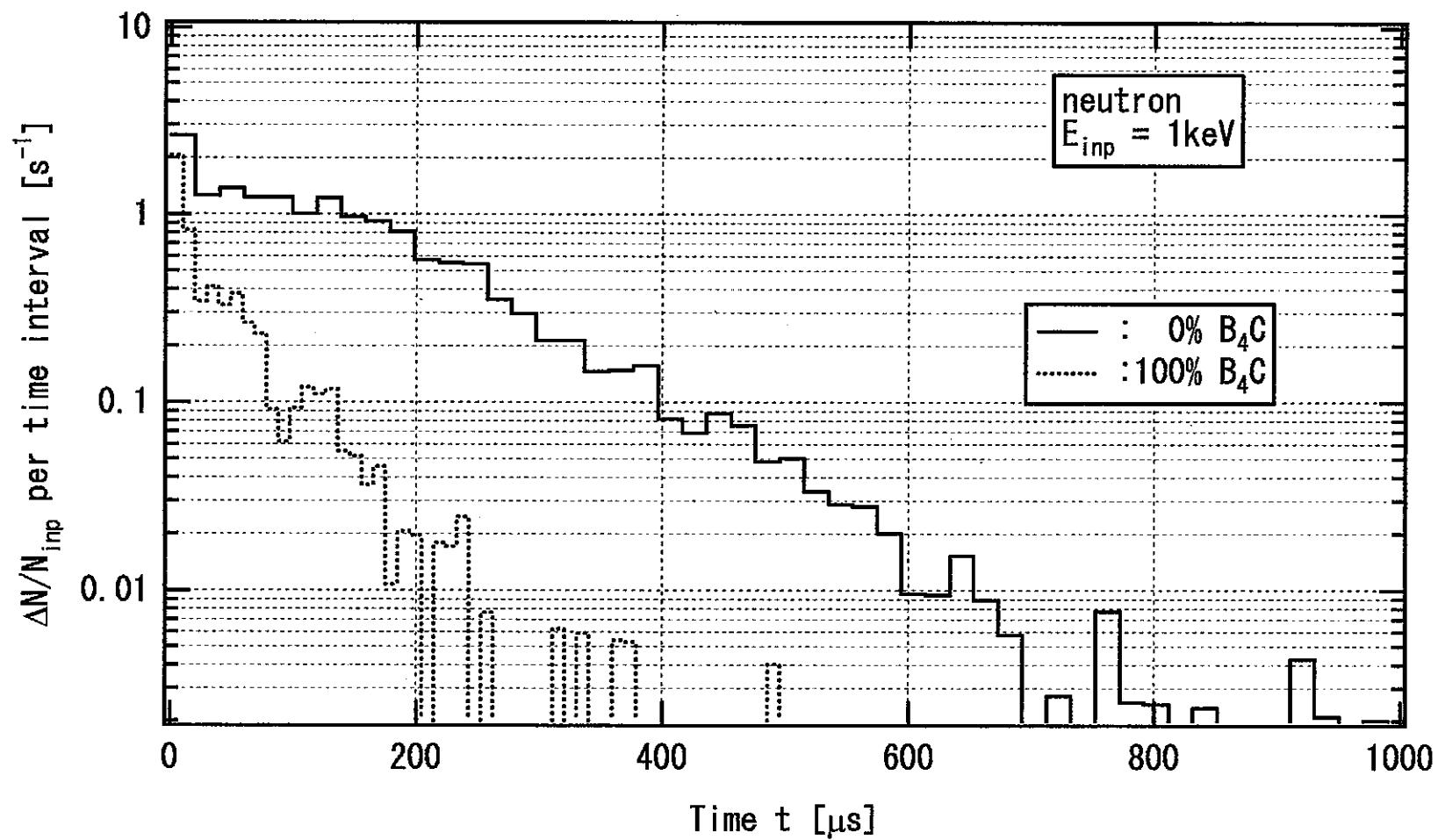


図 2.5-8_1 B_4C 有無の場合の中性子の TOP 分布 ($E_n = 1\text{keV}$)

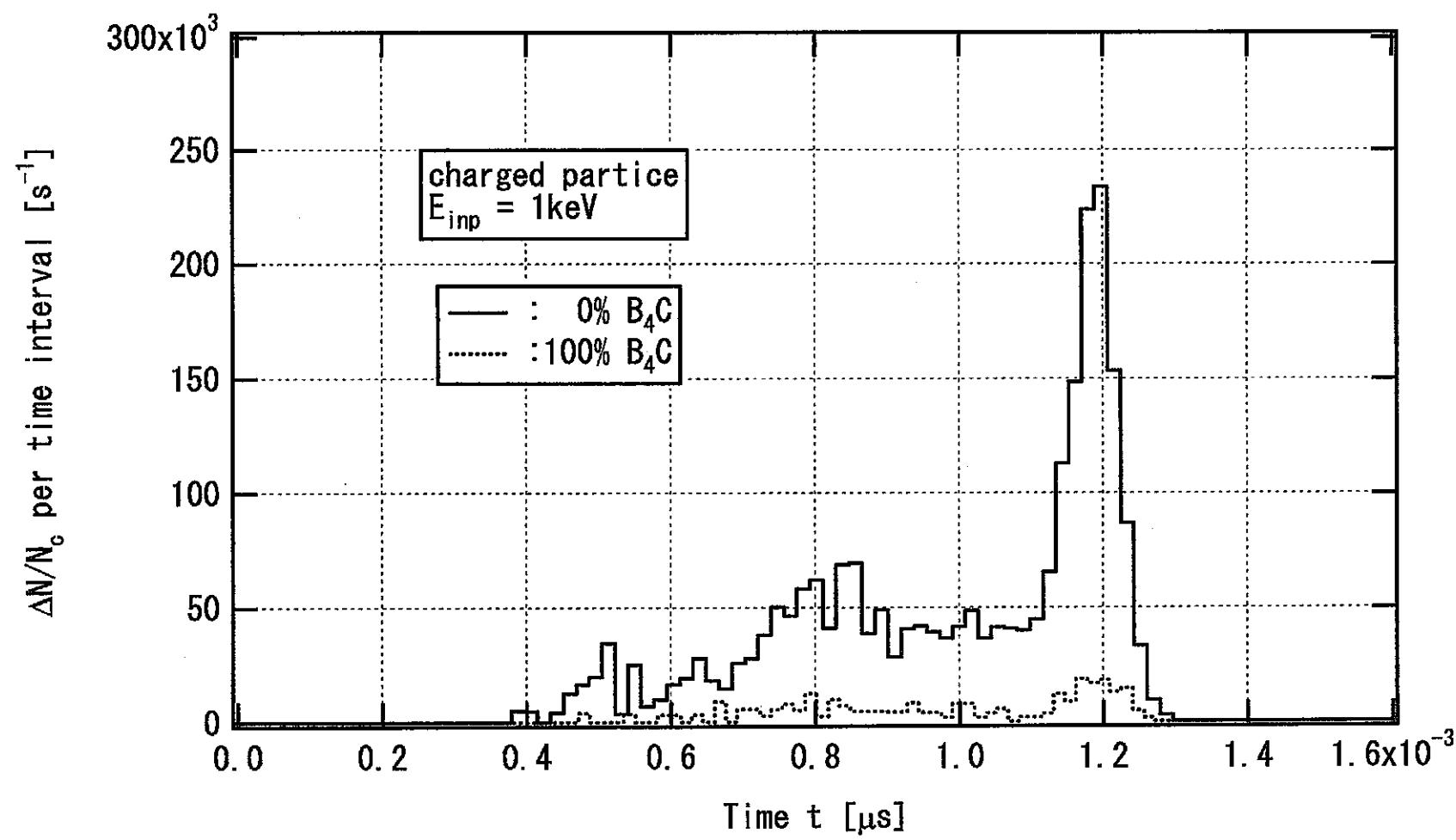


図 2.5-8_2 B_4C 有無の場合の荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 1\text{keV}$)

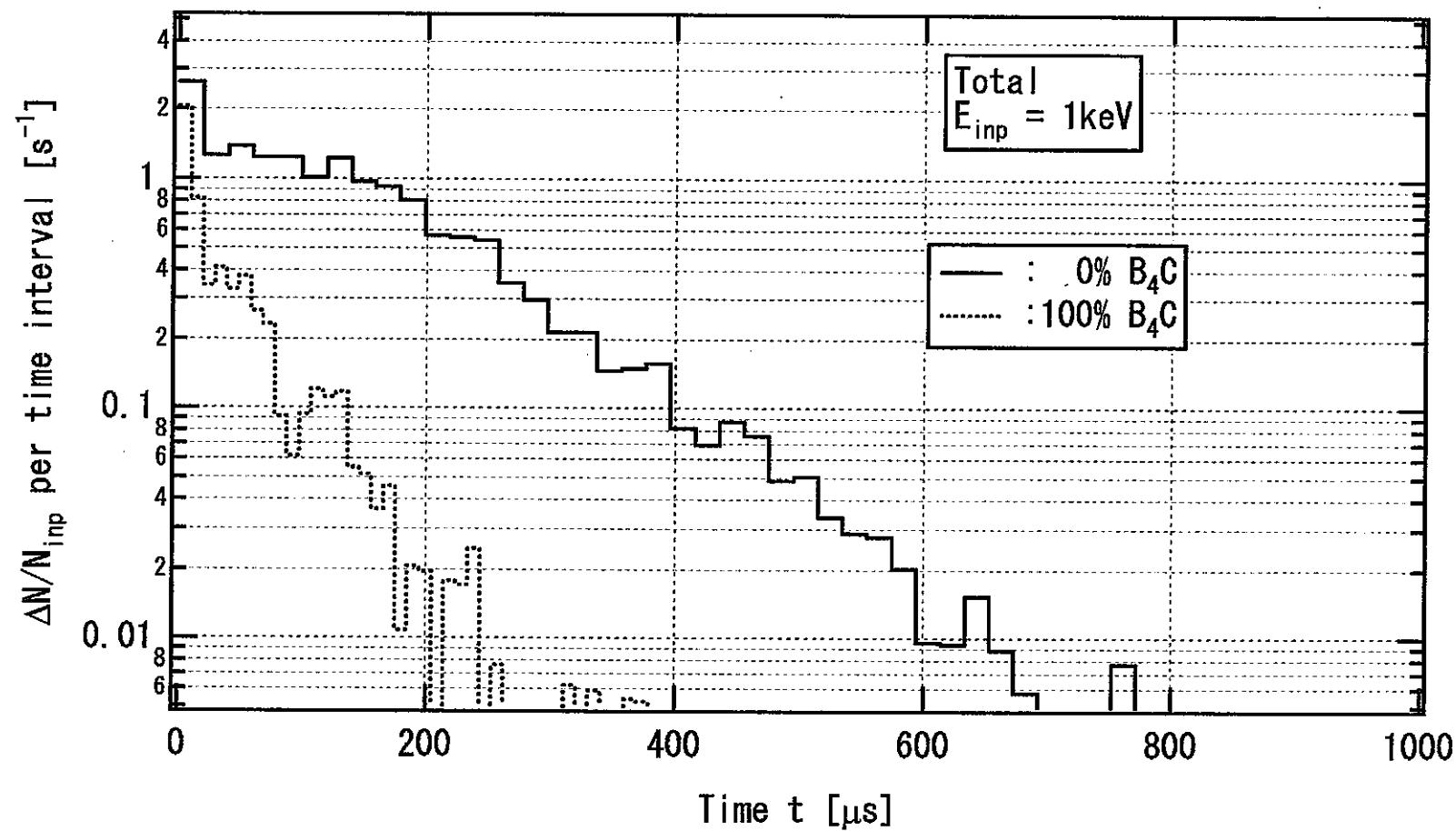


図 2.5-8_3 B_4C 有無の場合の中性子+荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 1\text{keV}$)

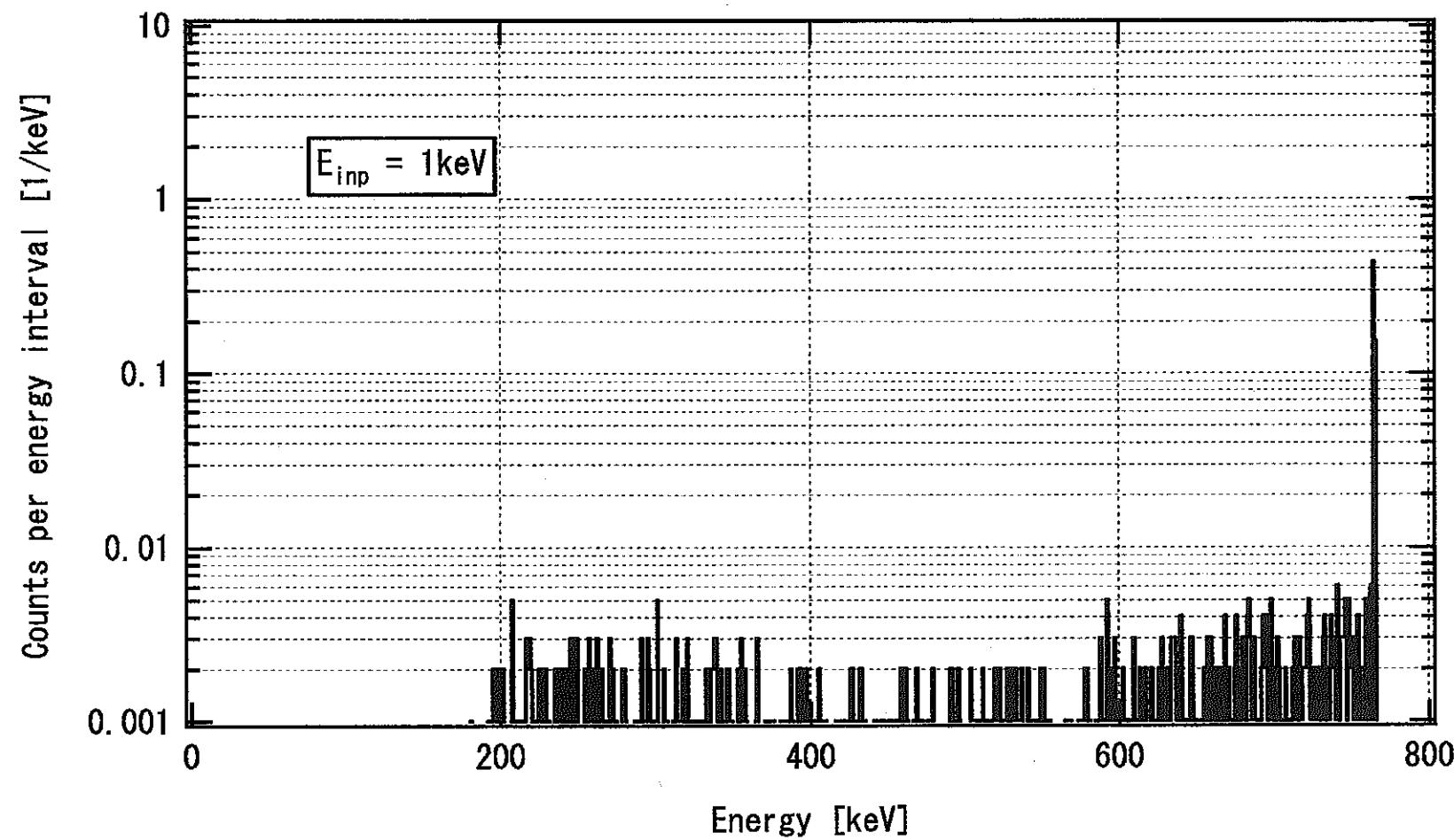


図 2.5-8_4 ${}^3\text{He}$ 比例計数管（レムカウンター）による中性子 ($E_n = 1 \text{ keV}$) の波高分布

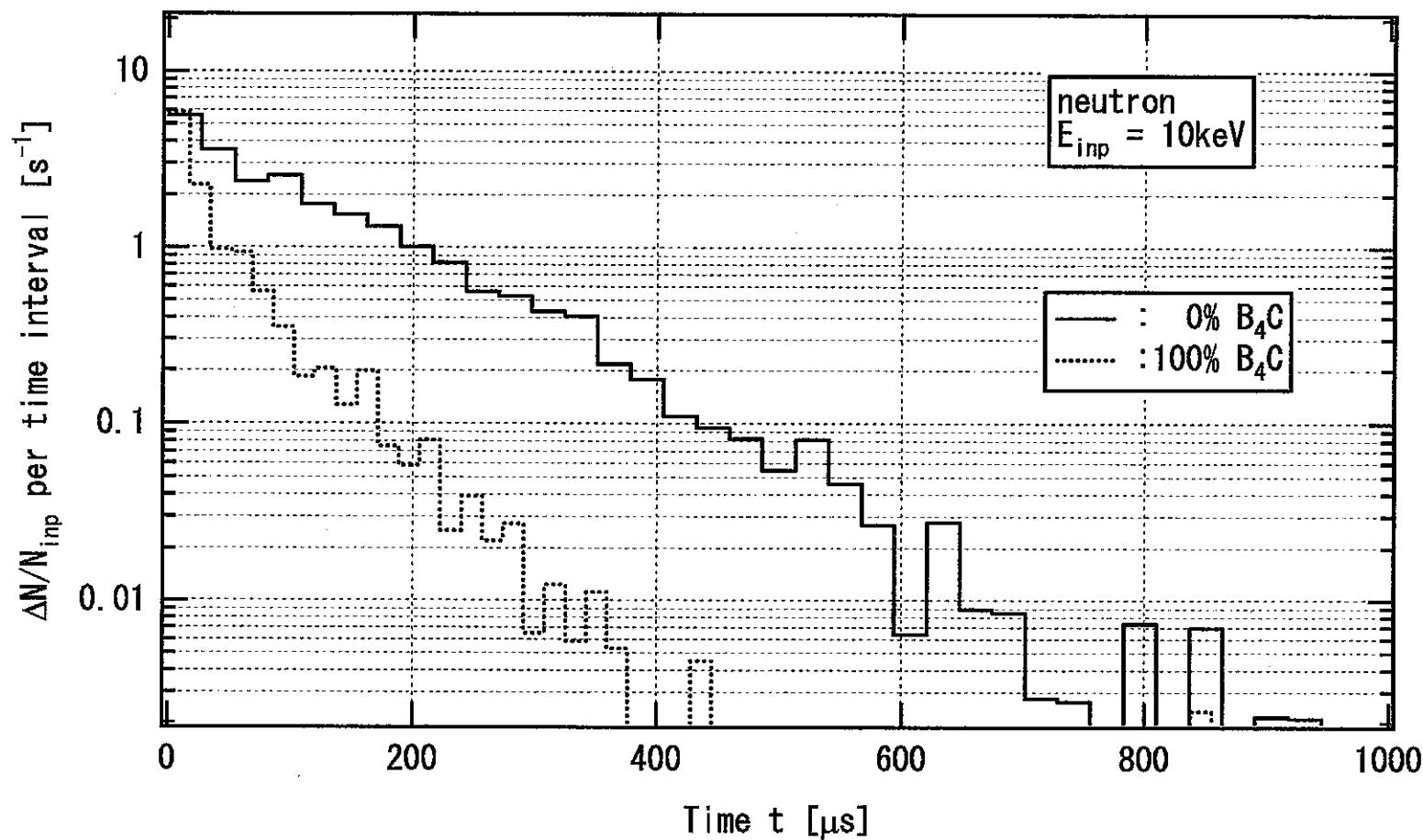


図 2.5-9_1 B_4C 有無の場合の中性子の TOP 分布 ($E_n = 10\text{keV}$)

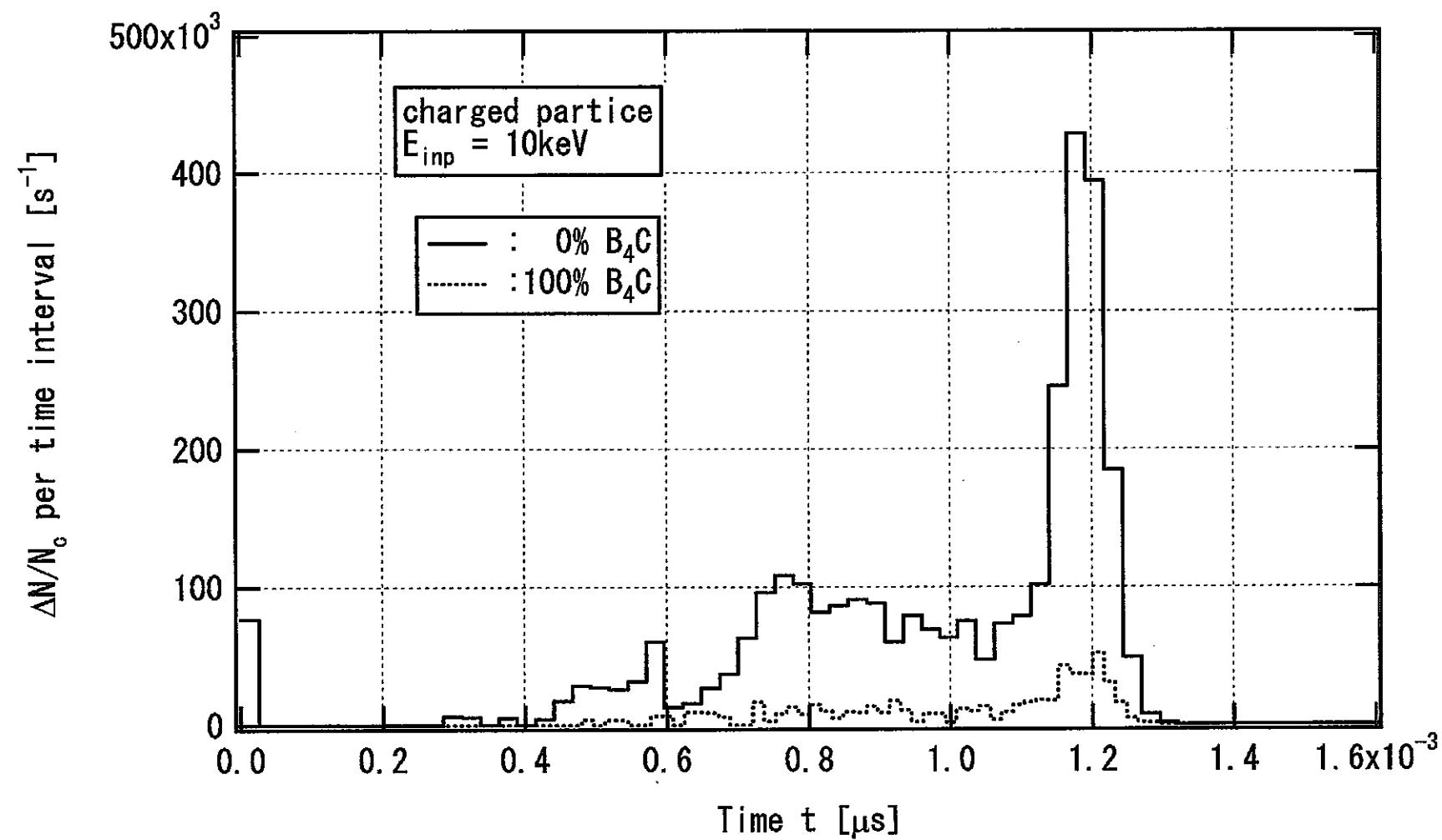


図 2.5-9 _2 B_4C 有無の場合の荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 10 \text{keV}$)

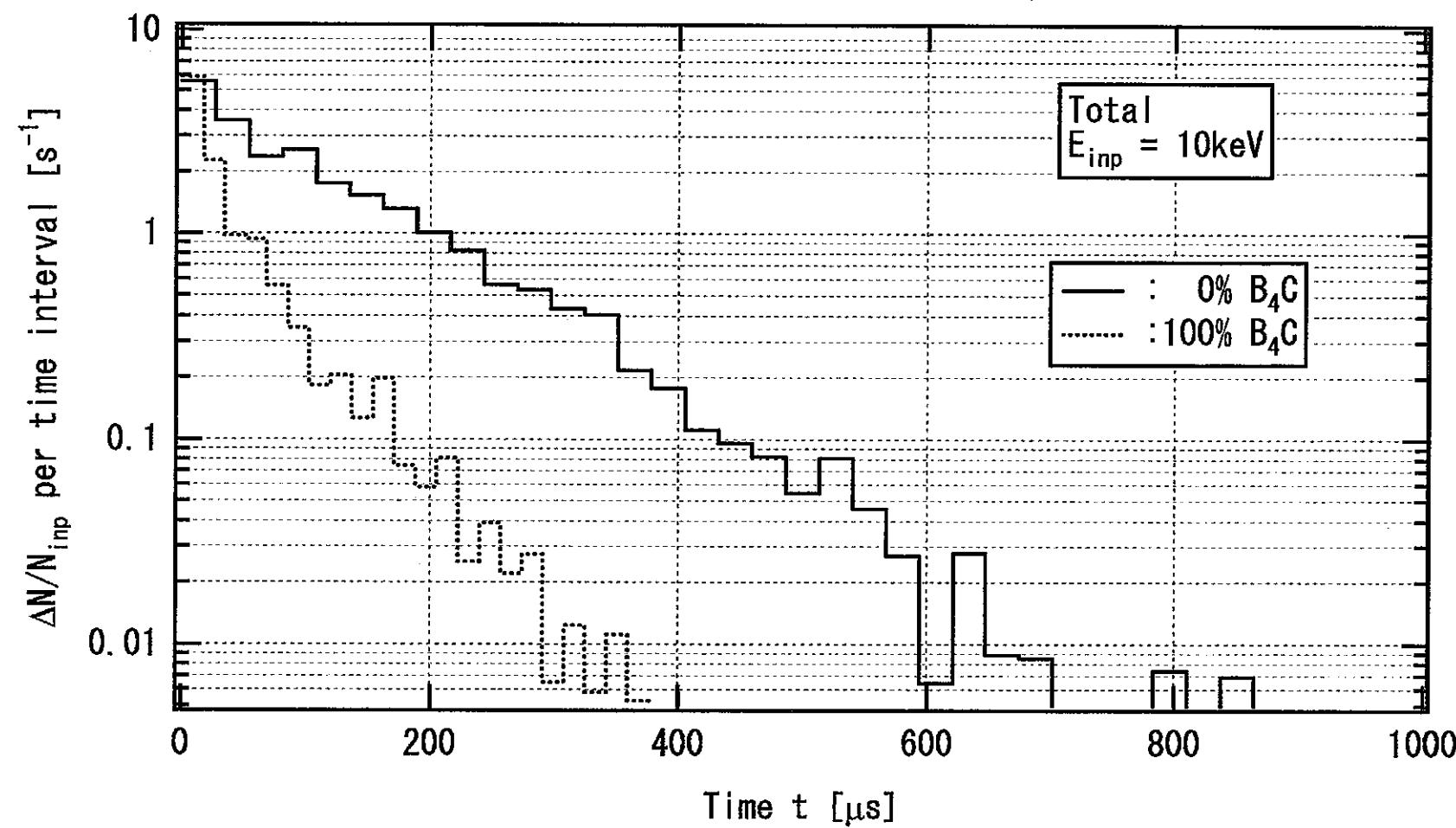


図 2.5-9_3 B_4C 有無の場合の中性子+荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 10\text{keV}$)

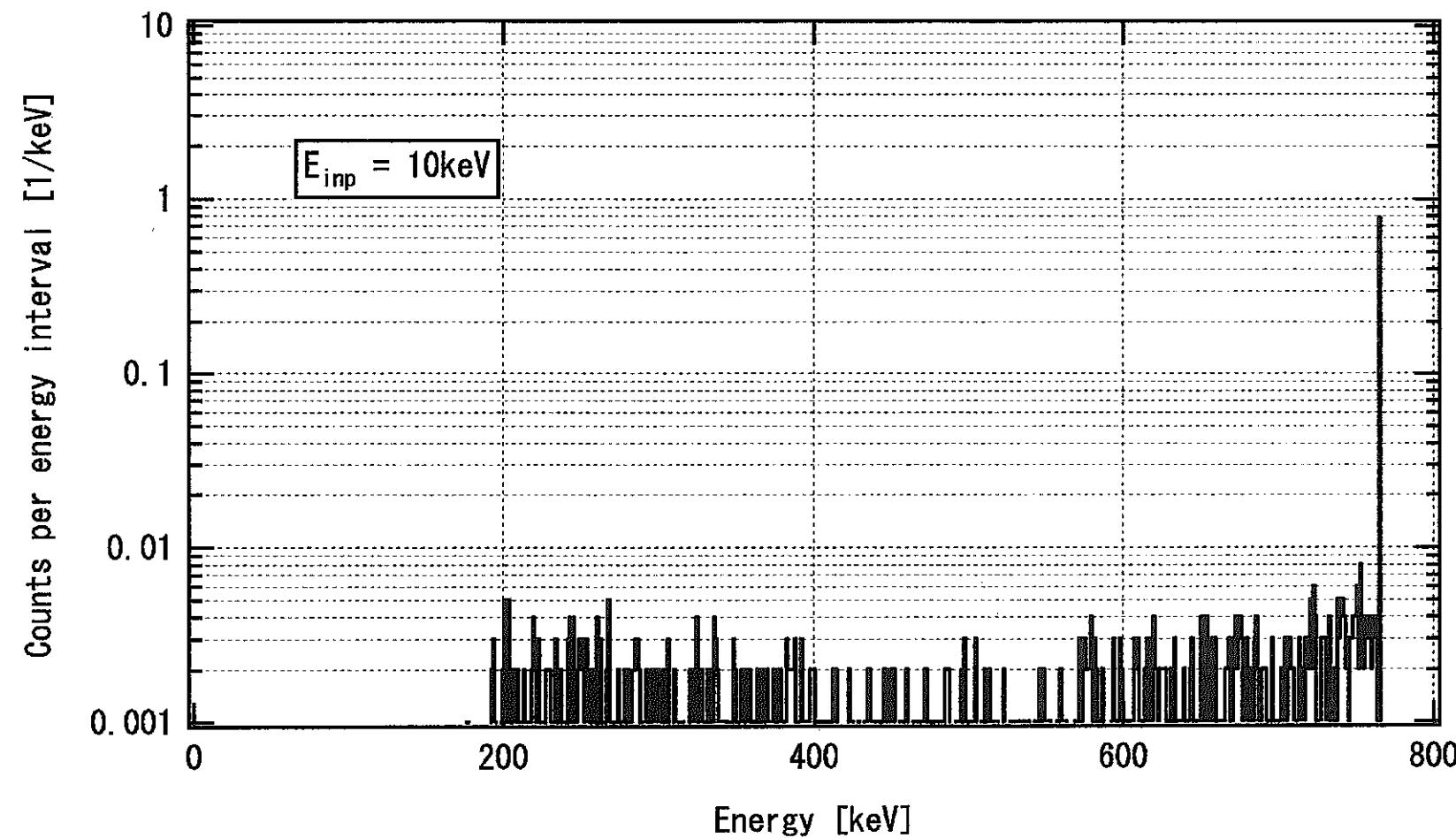


図 2.5-9_4 ${}^3\text{He}$ 比例計数管（レムカウンター）による中性子 ($E_n = 10 \text{ keV}$) の波高分布

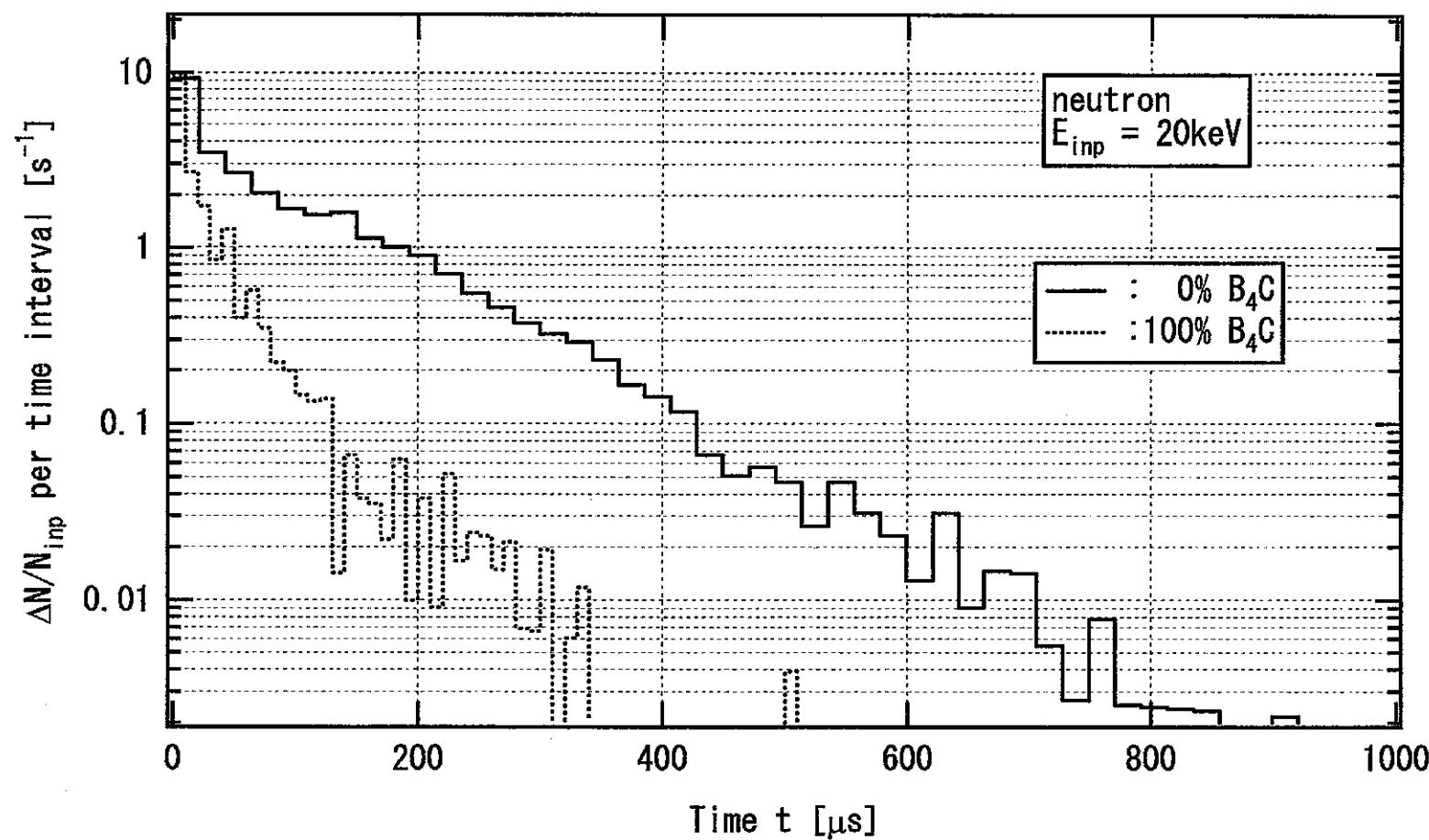


図 2.5-10_1 B_4C 有無の場合の中性子の TOP 分布 ($E_n = 20\text{keV}$)

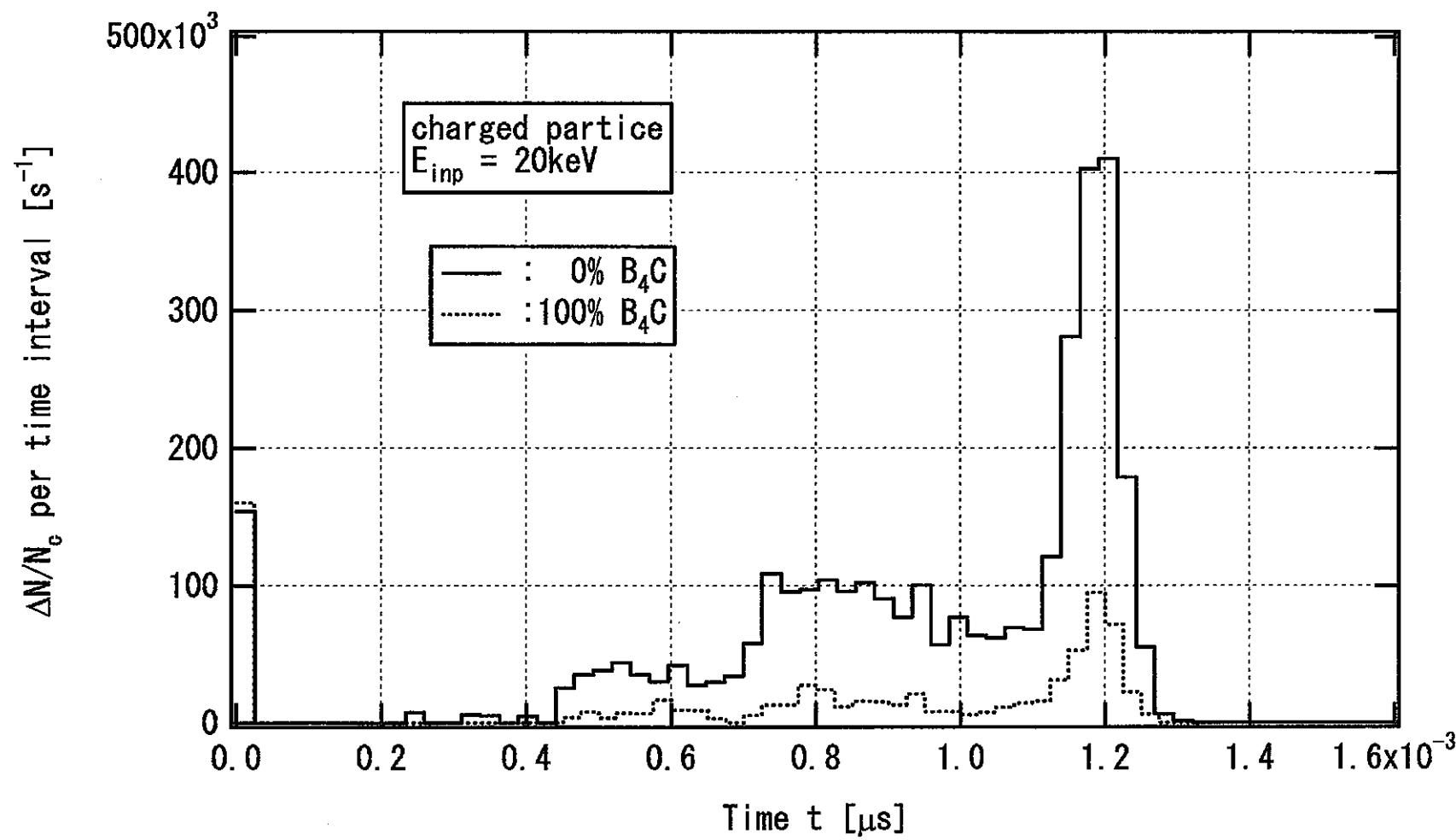


図 2.5-10_2 B_4C 有無の場合の荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 20\text{keV}$)

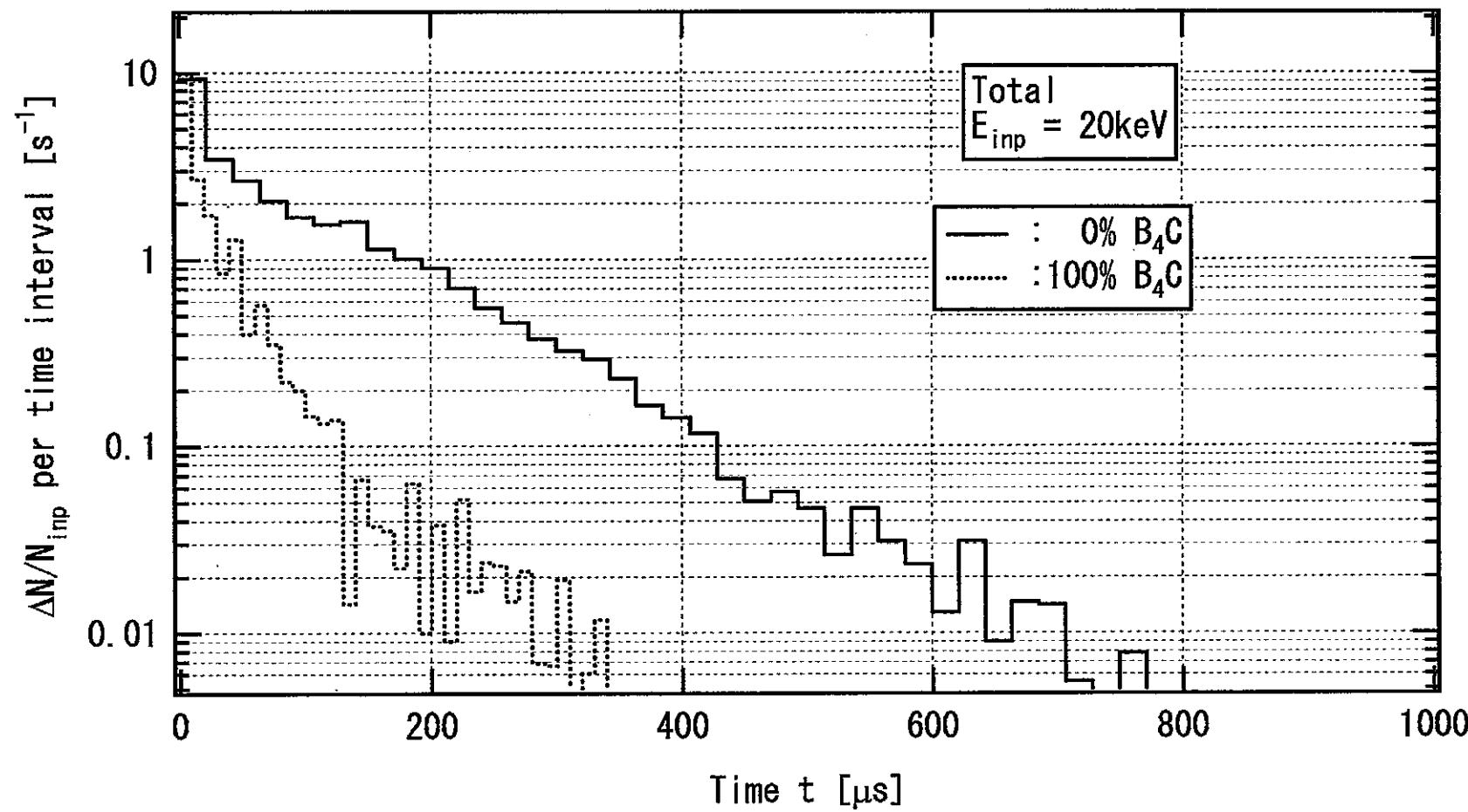


図 2.5-10_3 B_4C 有無の場合の中性子+荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 20\text{keV}$)

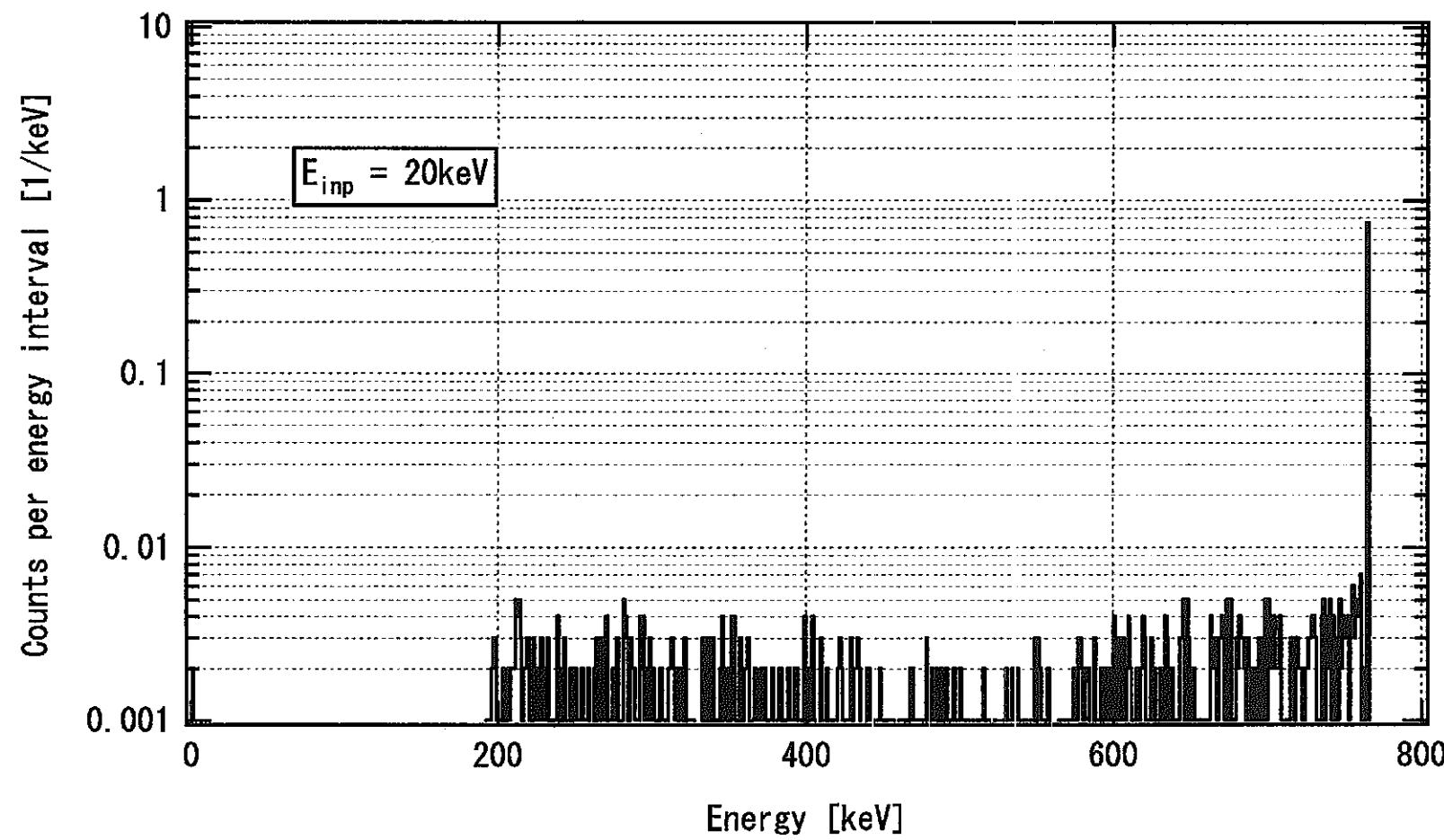


図 2.5-10_4 ${}^3\text{He}$ 比例計数管（レムカウンター）による中性子 ($E_n = 20 \text{ keV}$) の波高分布

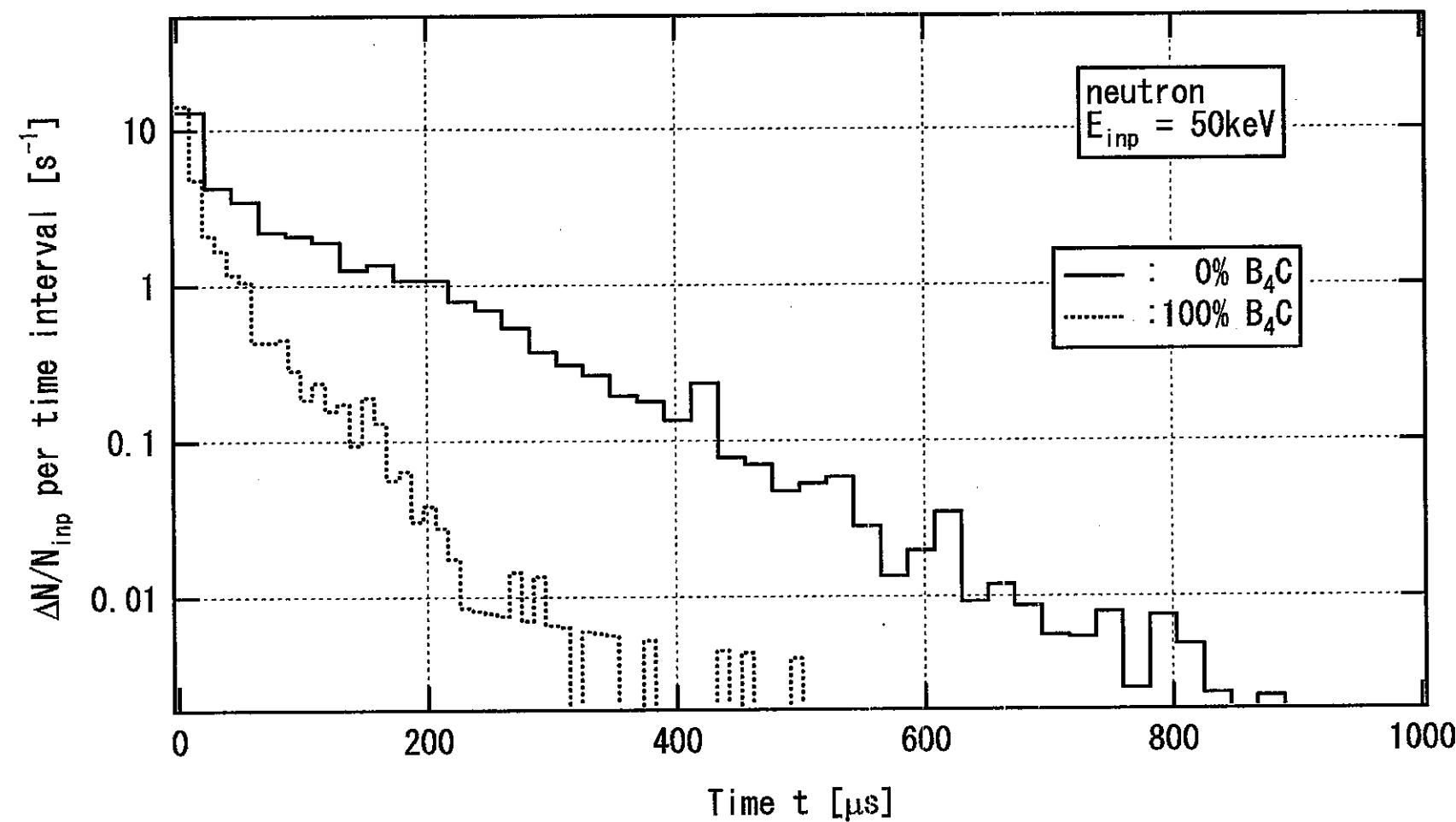


図 2.5-11_1 B_4C 有無の場合の中性子の TOP 分布 ($E_n = 50\text{keV}$)

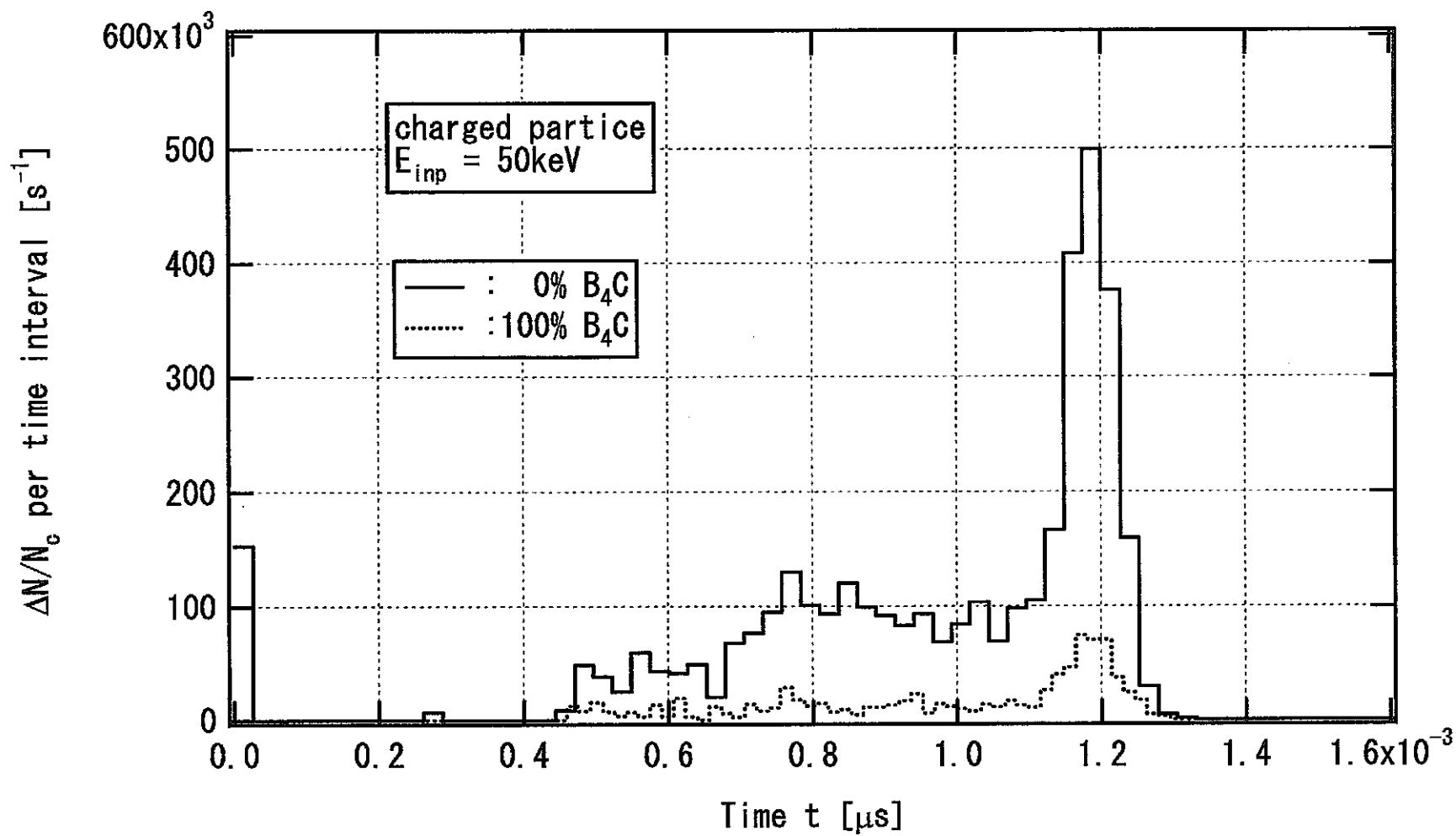


図 2.5-11_2 B_4C 有無の場合の荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 50\text{keV}$)

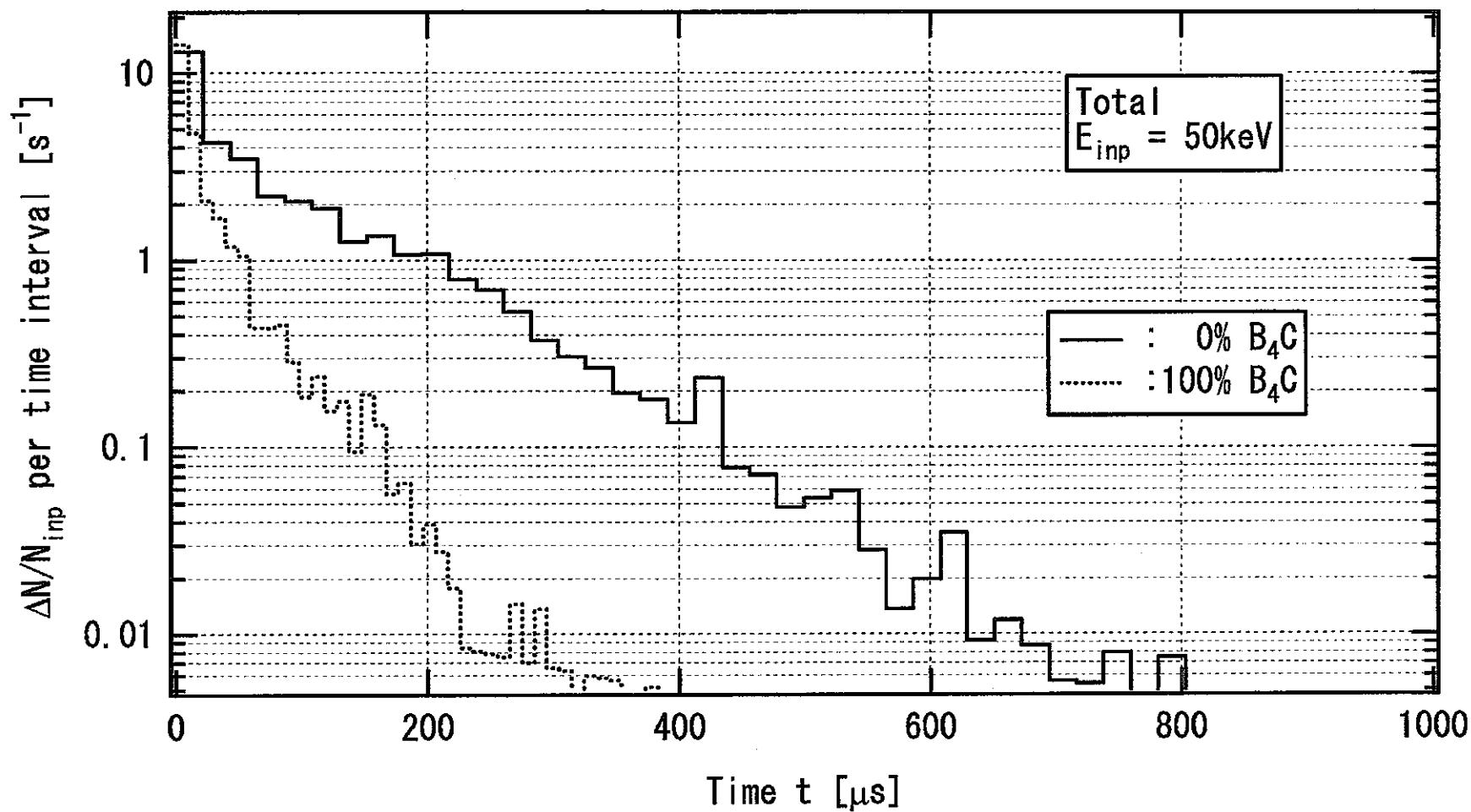


図 2.5-11_3 B_4C 有無の場合の中性子+荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 50\text{keV}$)

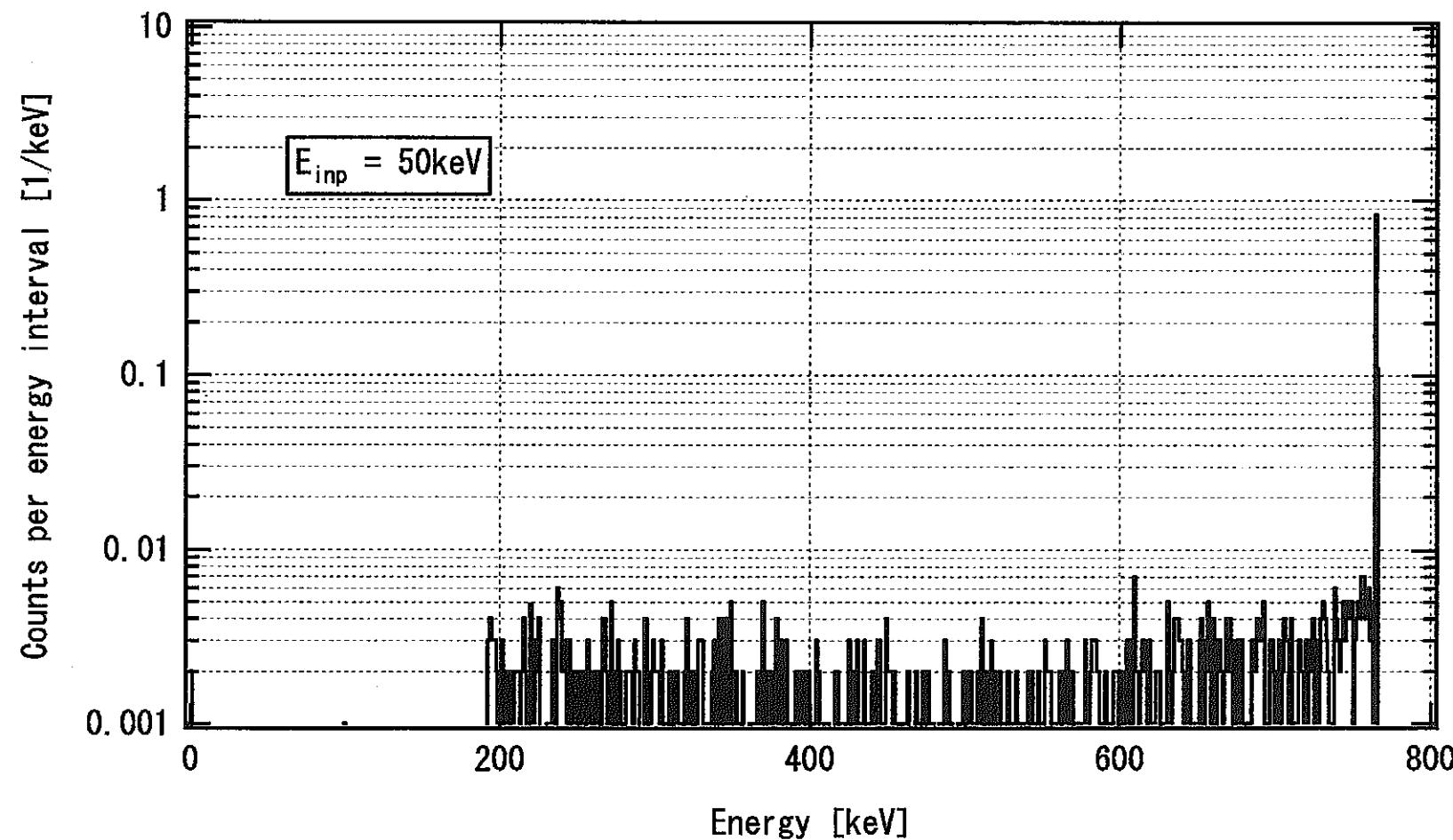


図 2.5-11_4 ^3He 比例計数管（レムカウンター）による中性子 ($E_n = 50 \text{ keV}$) の波高分布

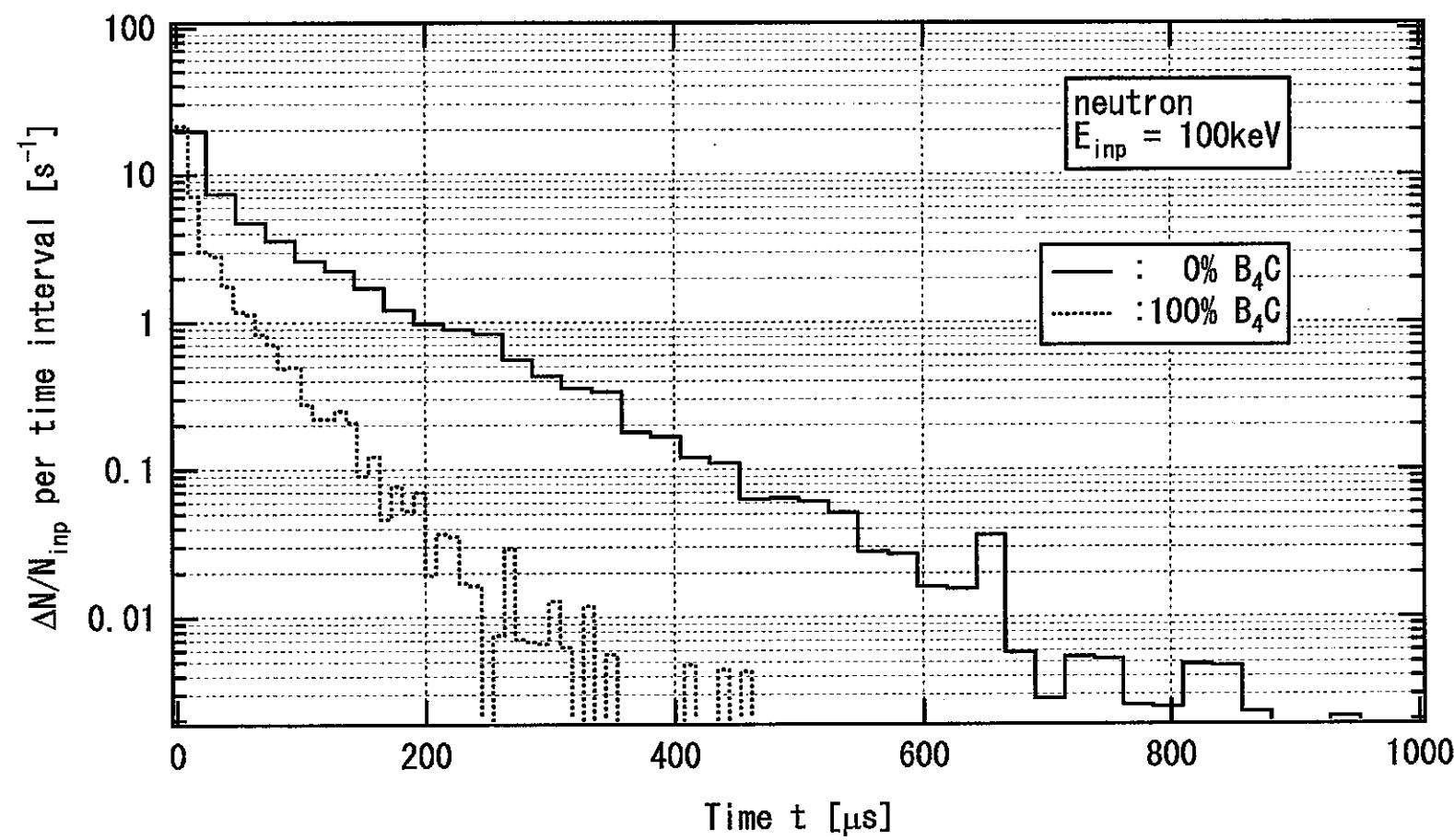


図 2.5-12_1 B_4C 有無の場合の中性子の TOP 分布 ($E_n = 100\text{keV}$)

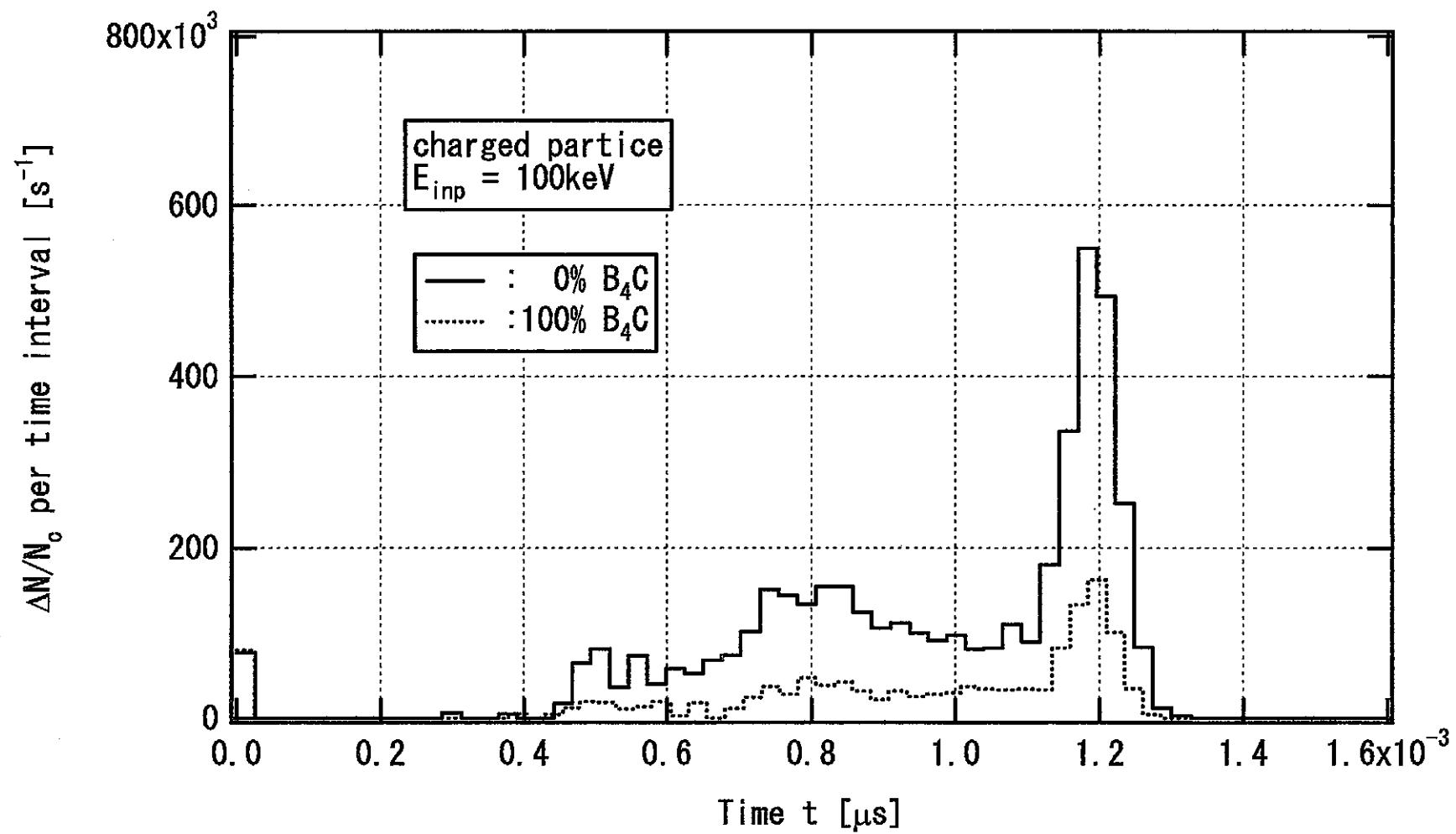


図 2.5-12_2 B_4C 有無の場合の荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 100\text{keV}$)

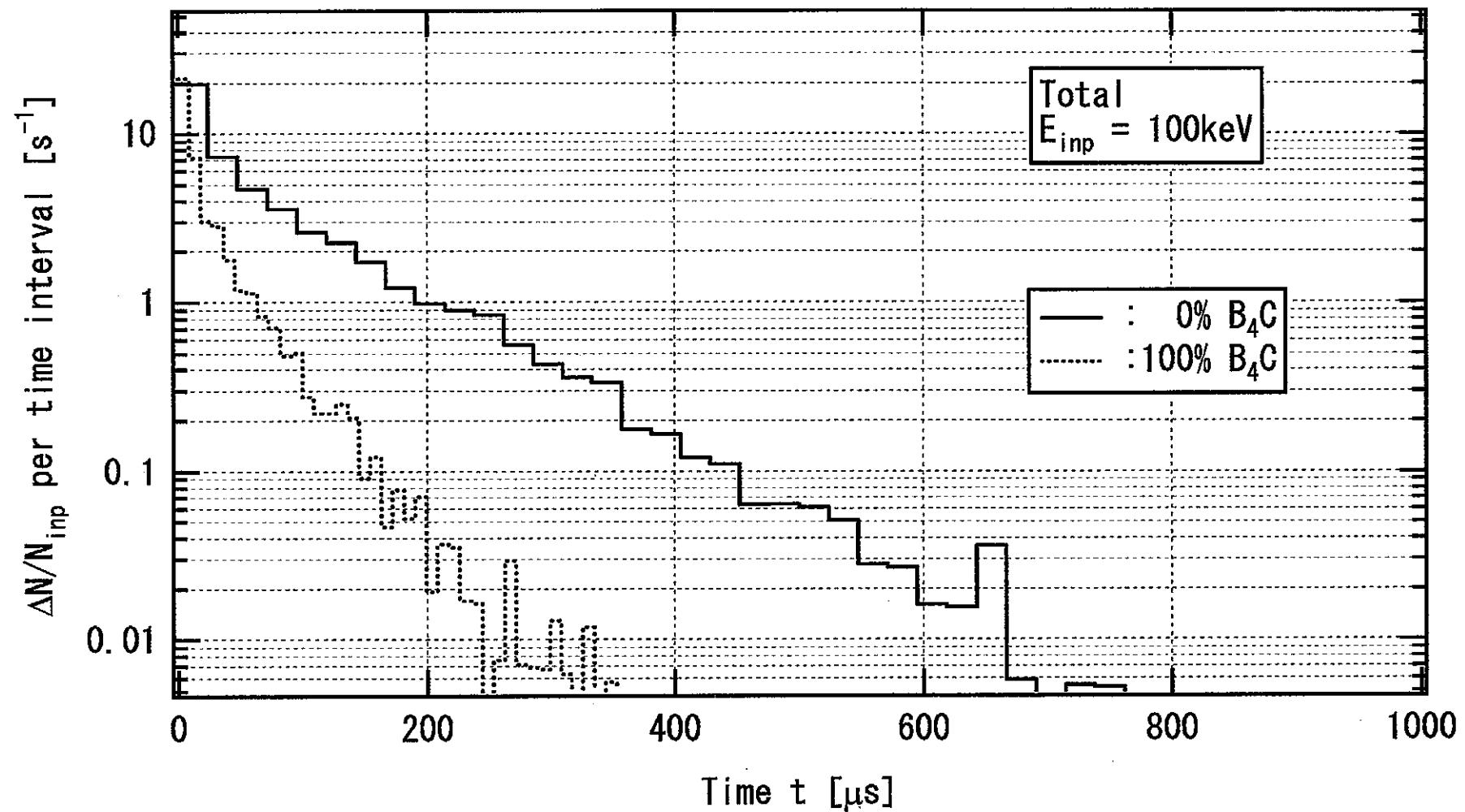


図 2.5-12_3 B_4C 有無の場合の中性子+荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 100\text{keV}$)

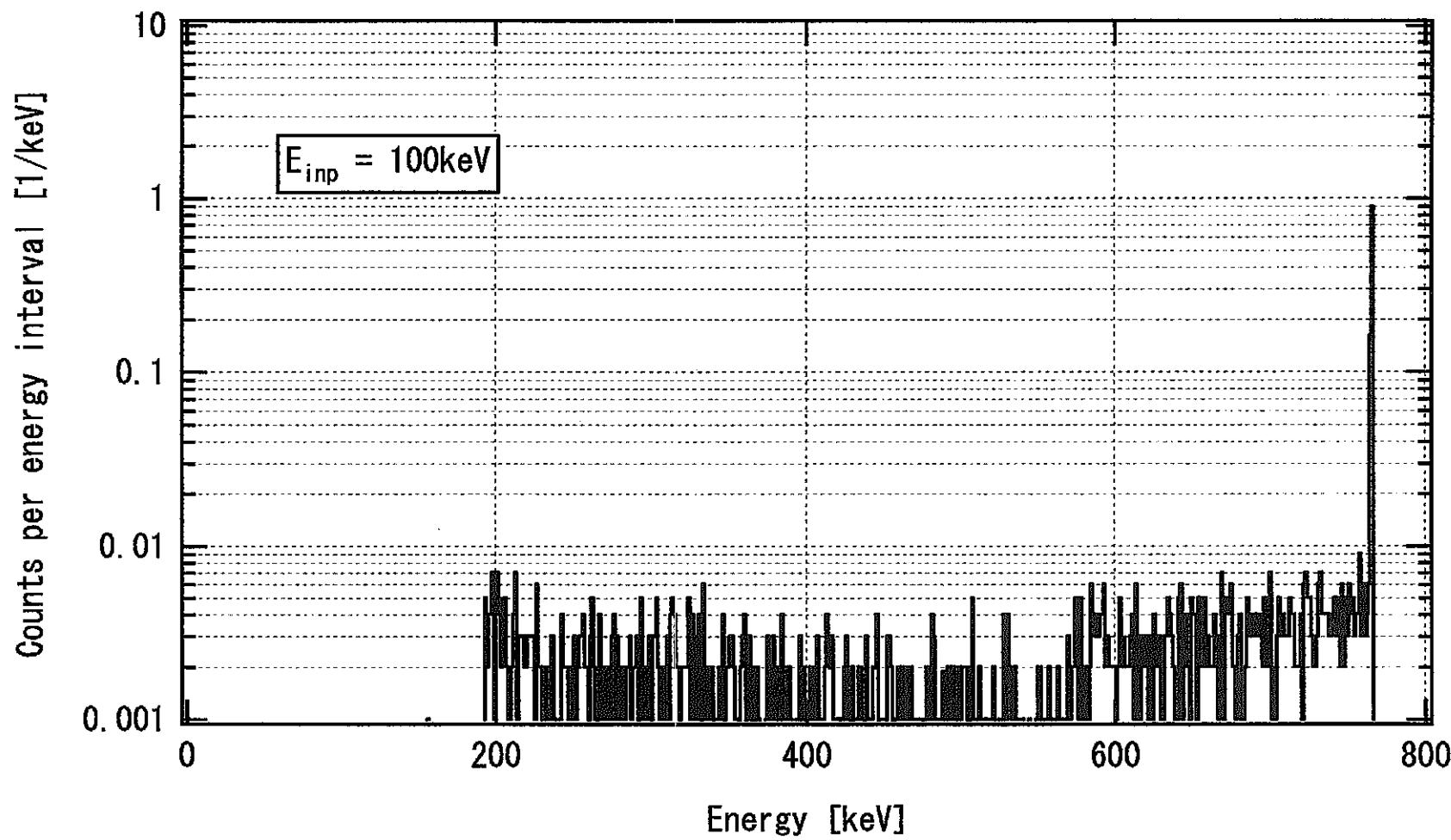


図 2.5-12_4 ^3He 比例計数管（レムカウンター）による中性子 ($E_n = 100\text{keV}$) の波高分布

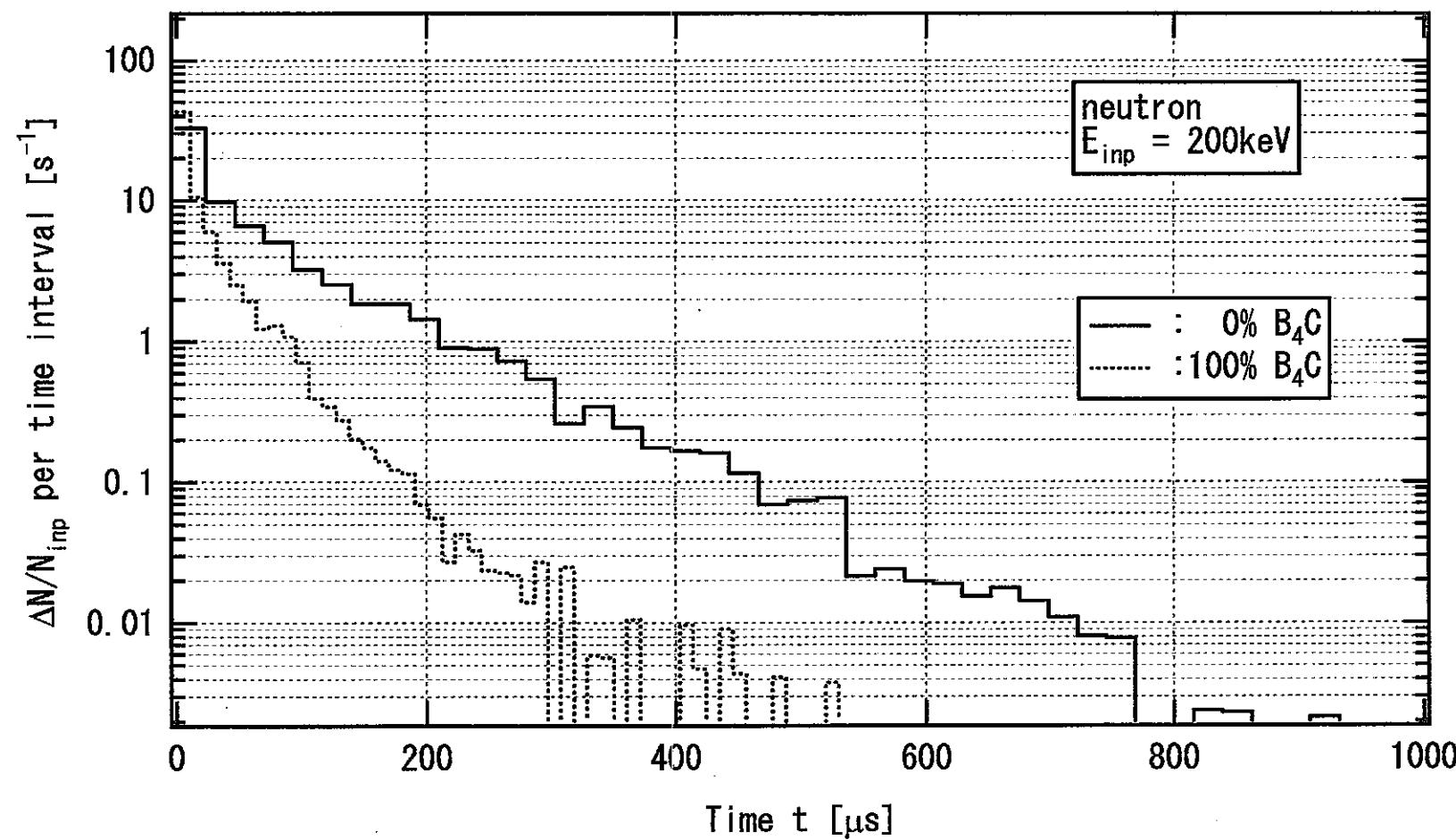


図 2.5・13_1 B_4C 有無の場合の中性子の TOP 分布 ($E_n = 200\text{keV}$)

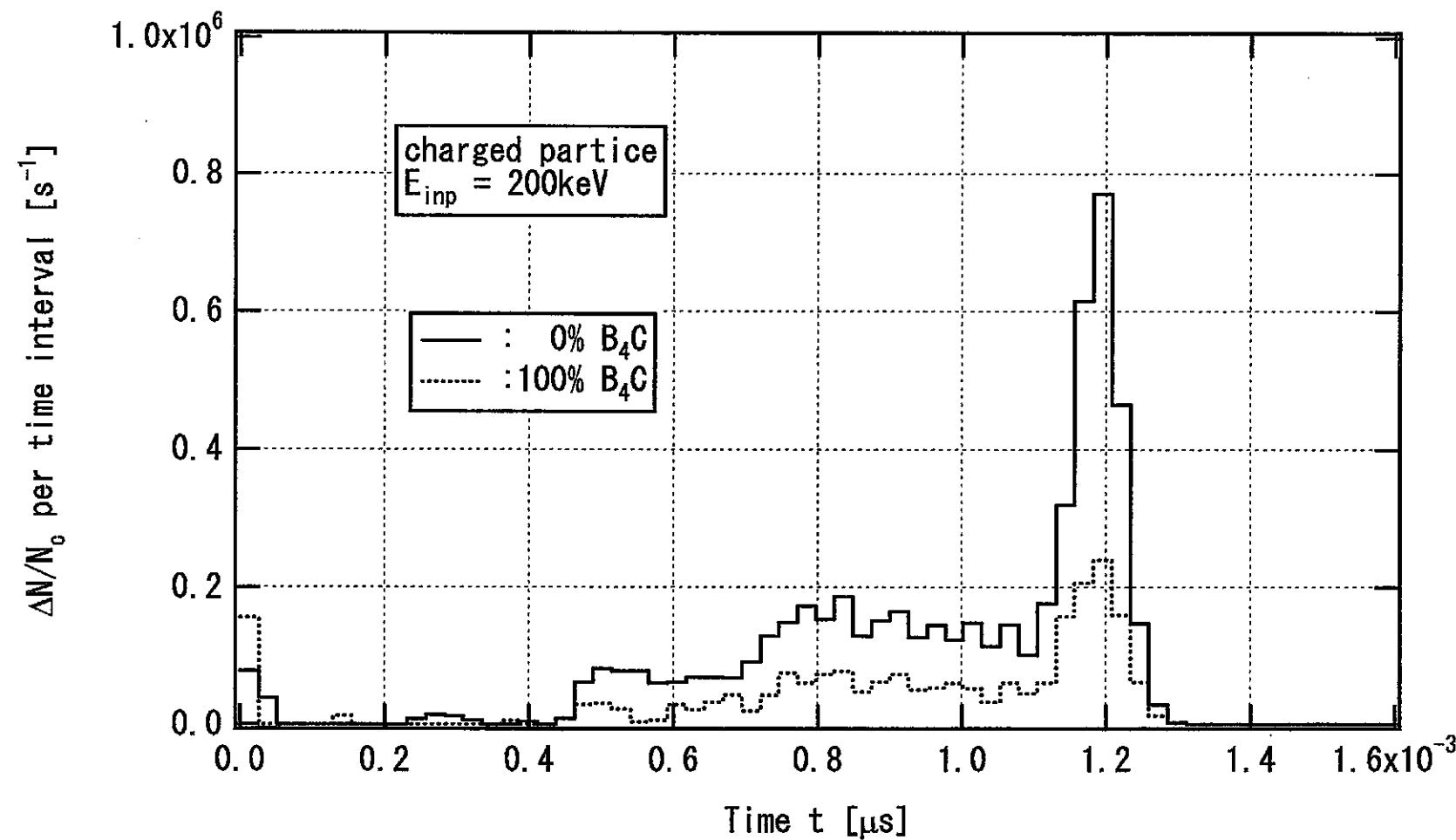


図 2.5-13_2 B_4C 有無の場合の荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 200\text{keV}$)

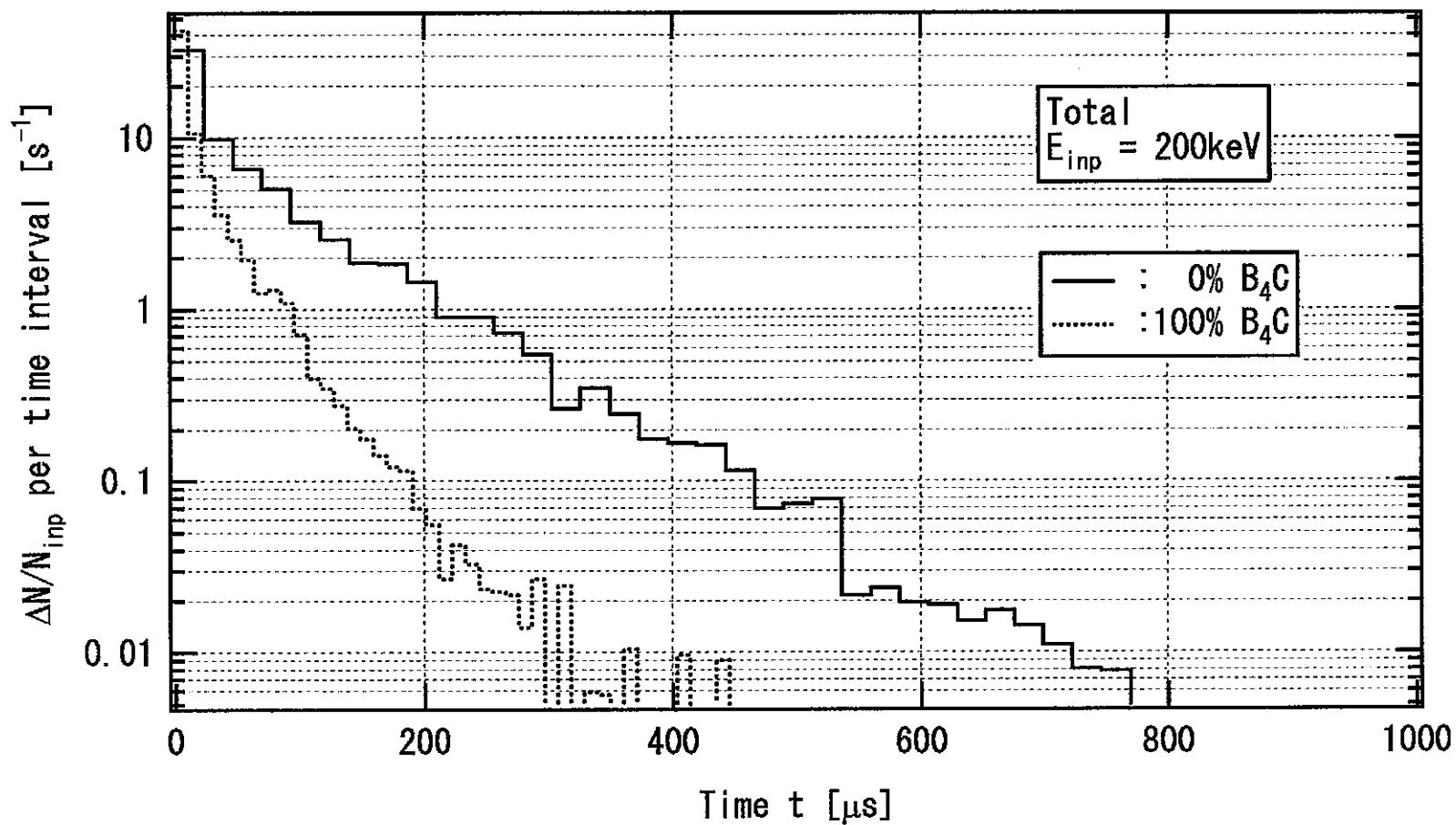


図 2.5-13_3 B_4C 有無の場合の中性子+荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 200\text{keV}$)

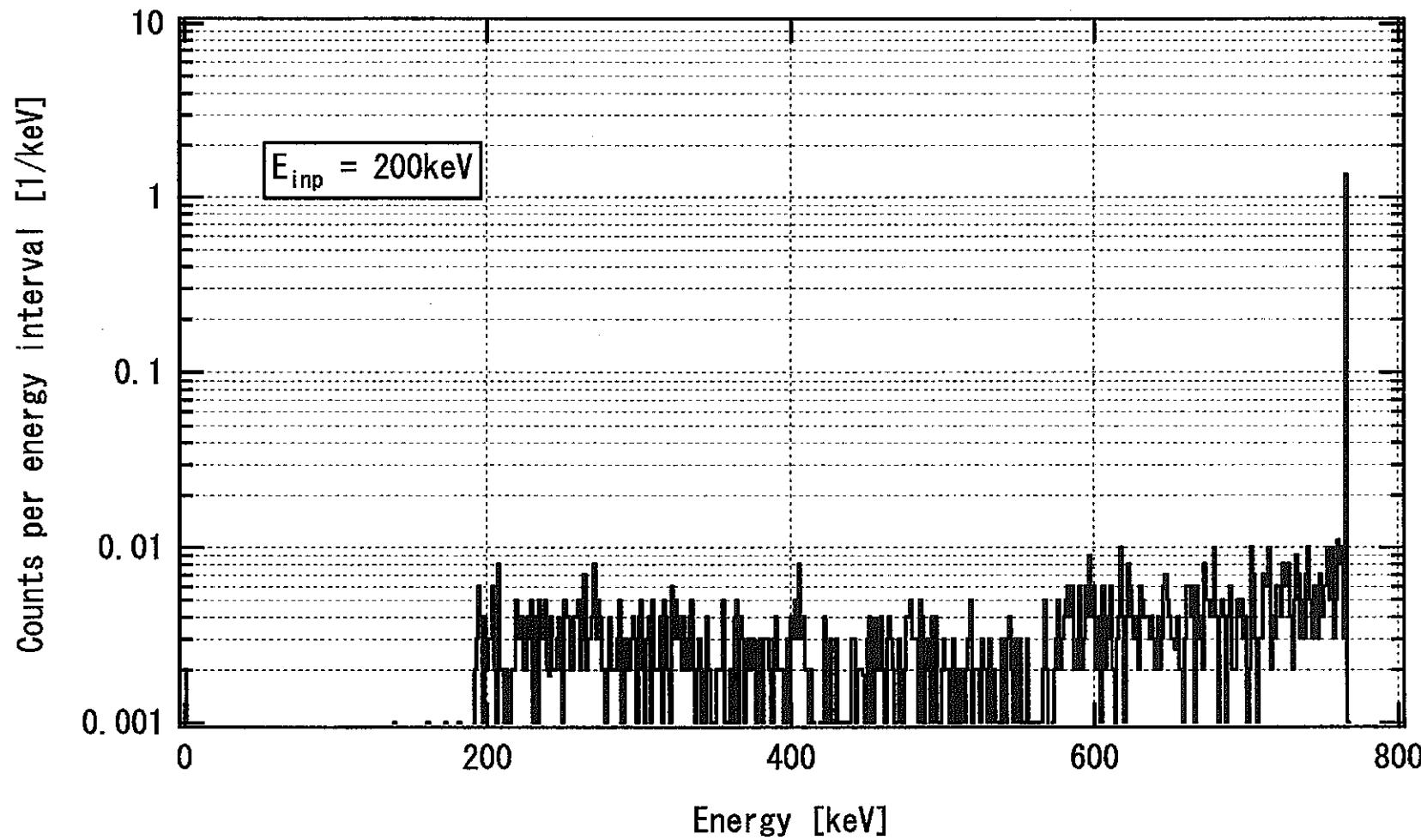


図 2.5-13_4 ${}^3\text{He}$ 比例計数管（レムカウンター）による中性子 ($E_n = 200\text{keV}$) の波高分布

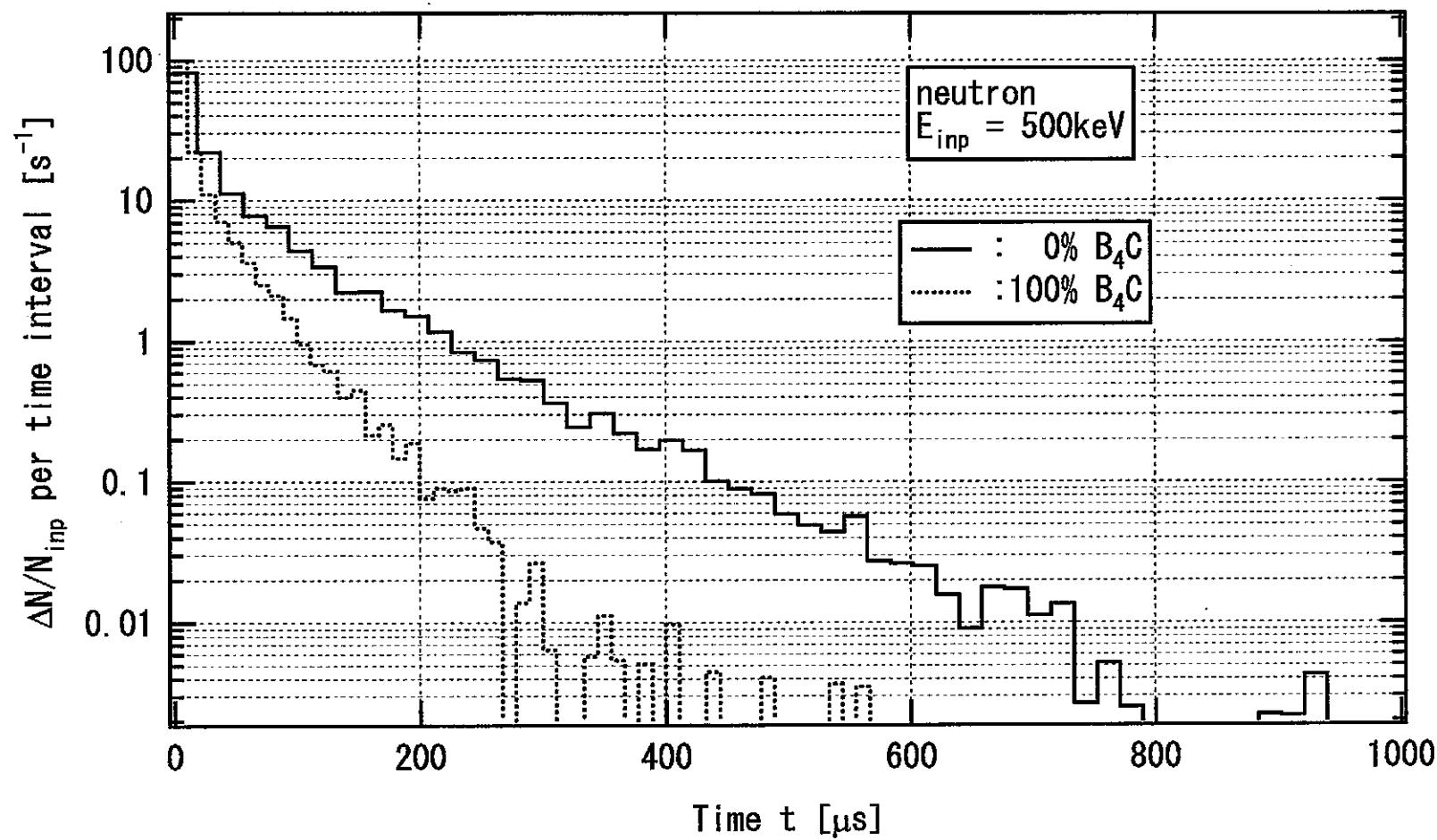


図 2.5-14_1 B_4C 有無の場合の中性子の TOP 分布 ($E_n = 500\text{keV}$)

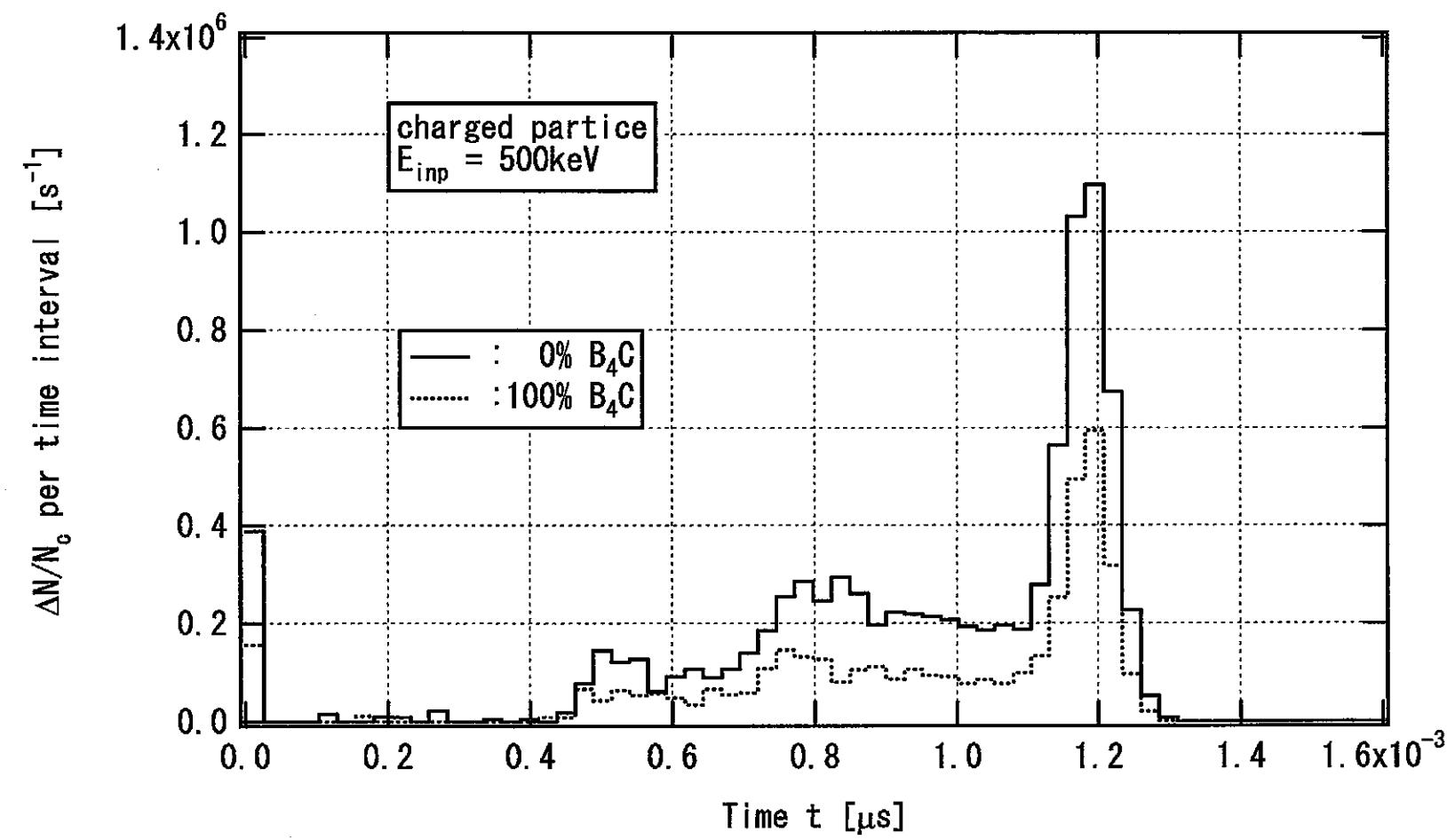


図 2.5-14_2 B_4C 有無の場合の荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 500\text{keV}$)

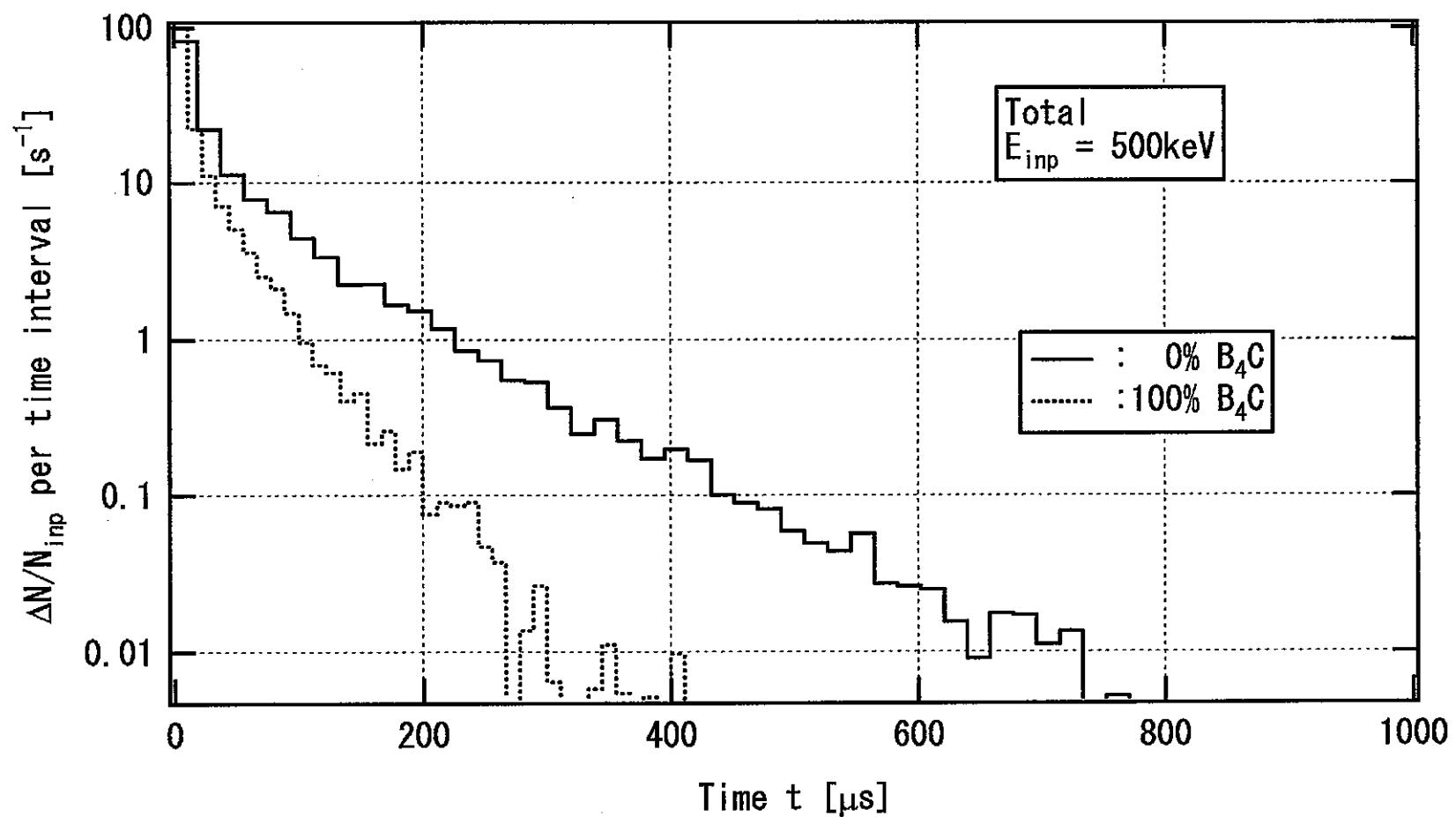


図 2.5-14_3 B_4C 有無の場合の中性子+荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 500\text{keV}$)

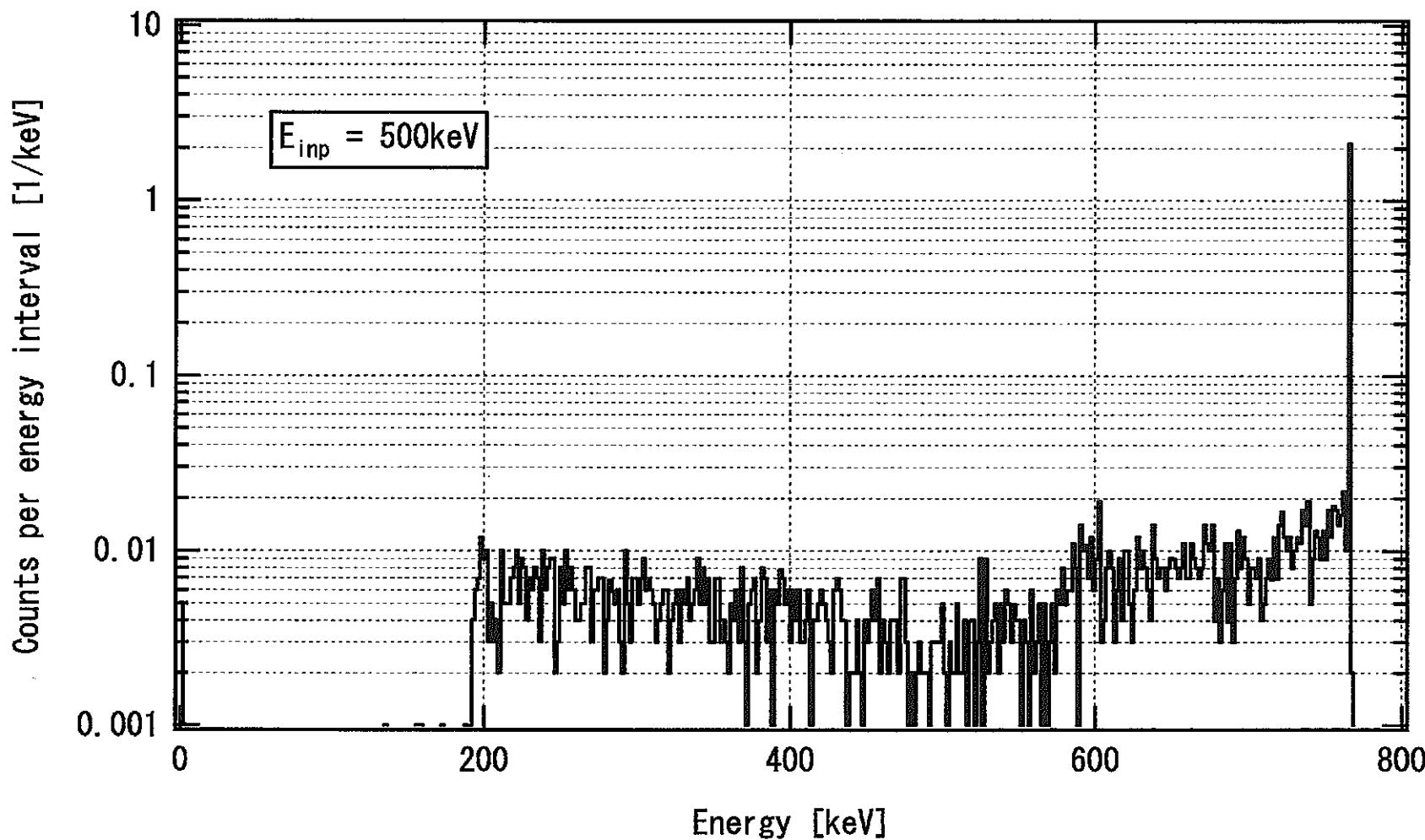


図 2.5-14_4 ${}^3\text{He}$ 比例計数管（レムカウンター）による中性子 ($E_n = 500\text{keV}$) の波高分布

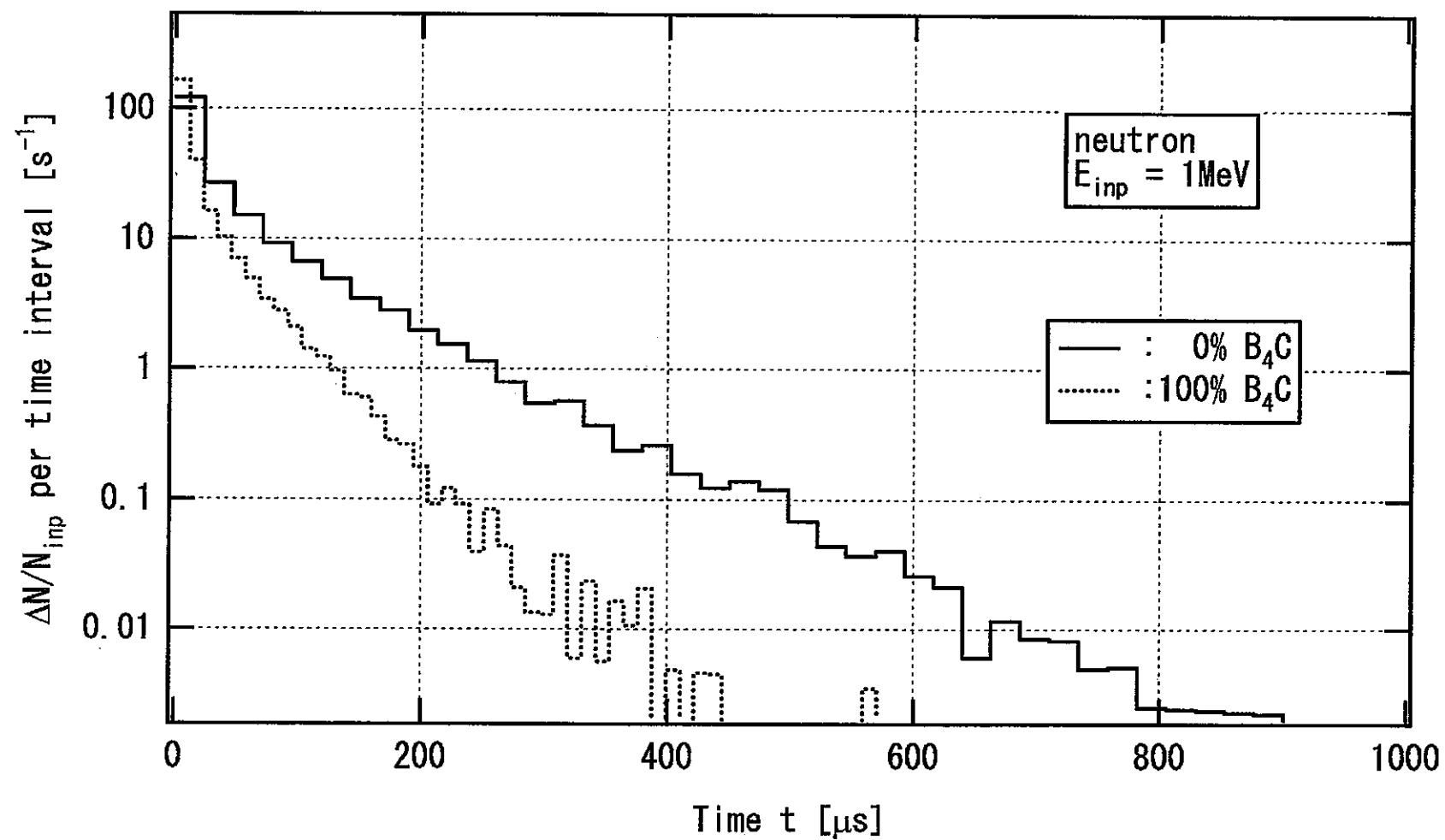


図 2.5-15_1 B_4C 有無の場合の中性子の TOP 分布 ($E_n = 1 \text{ MeV}$)

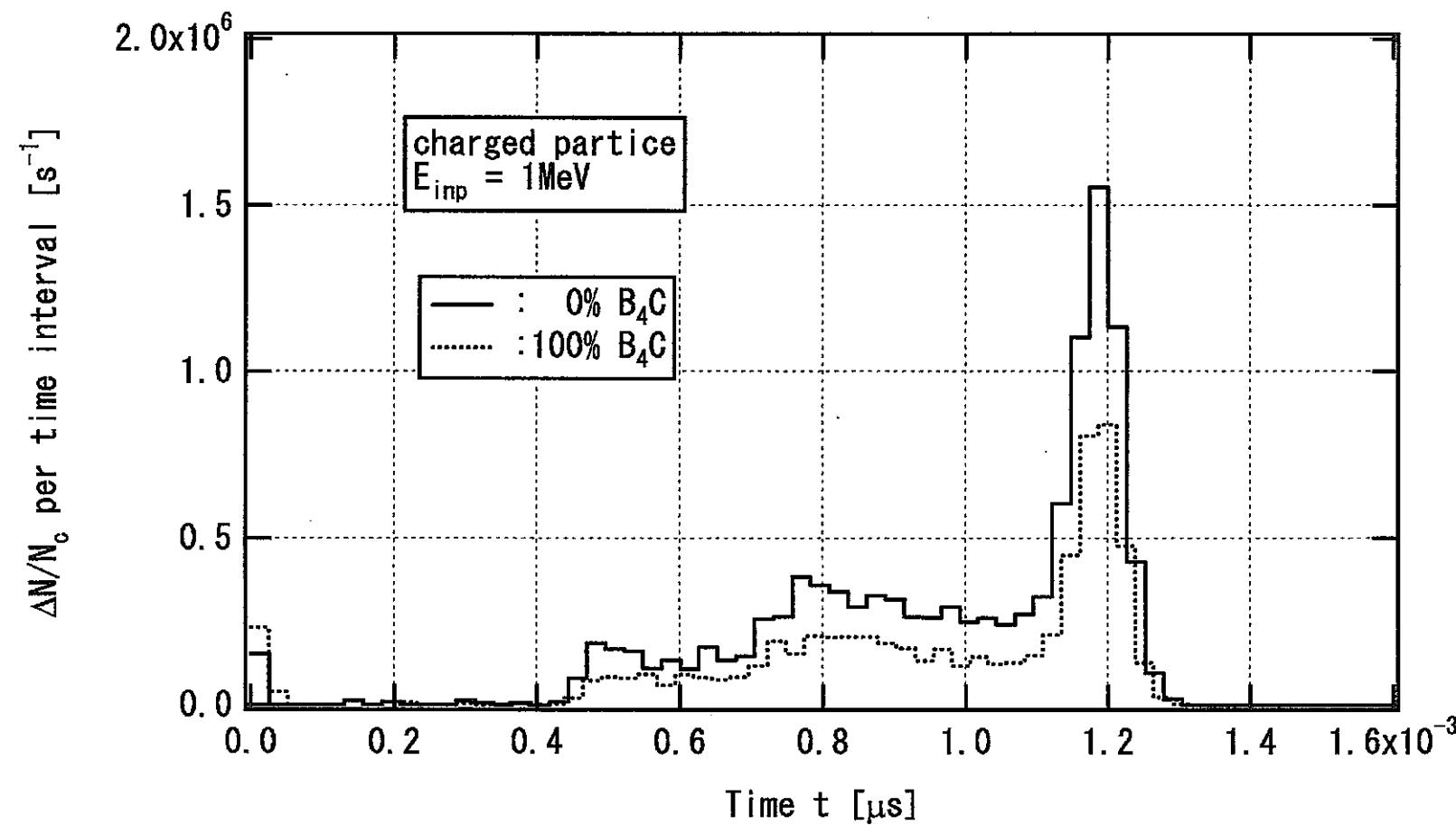


図 2.5-15_2 B_4C 有無の場合の荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 1\text{MeV}$)

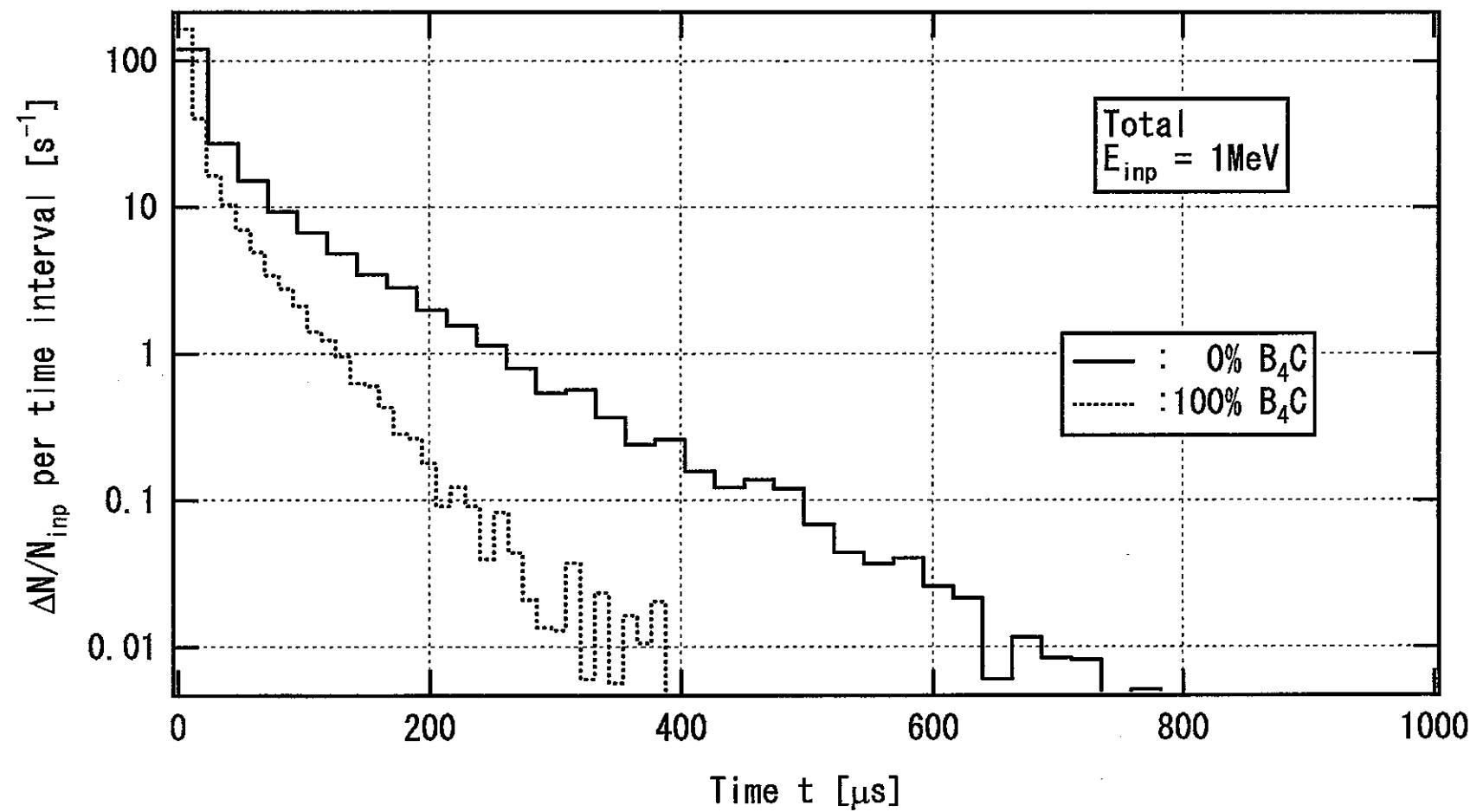


図 2.5-15_3 B_4C 有無の場合の中性子+荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 1 \text{MeV}$)

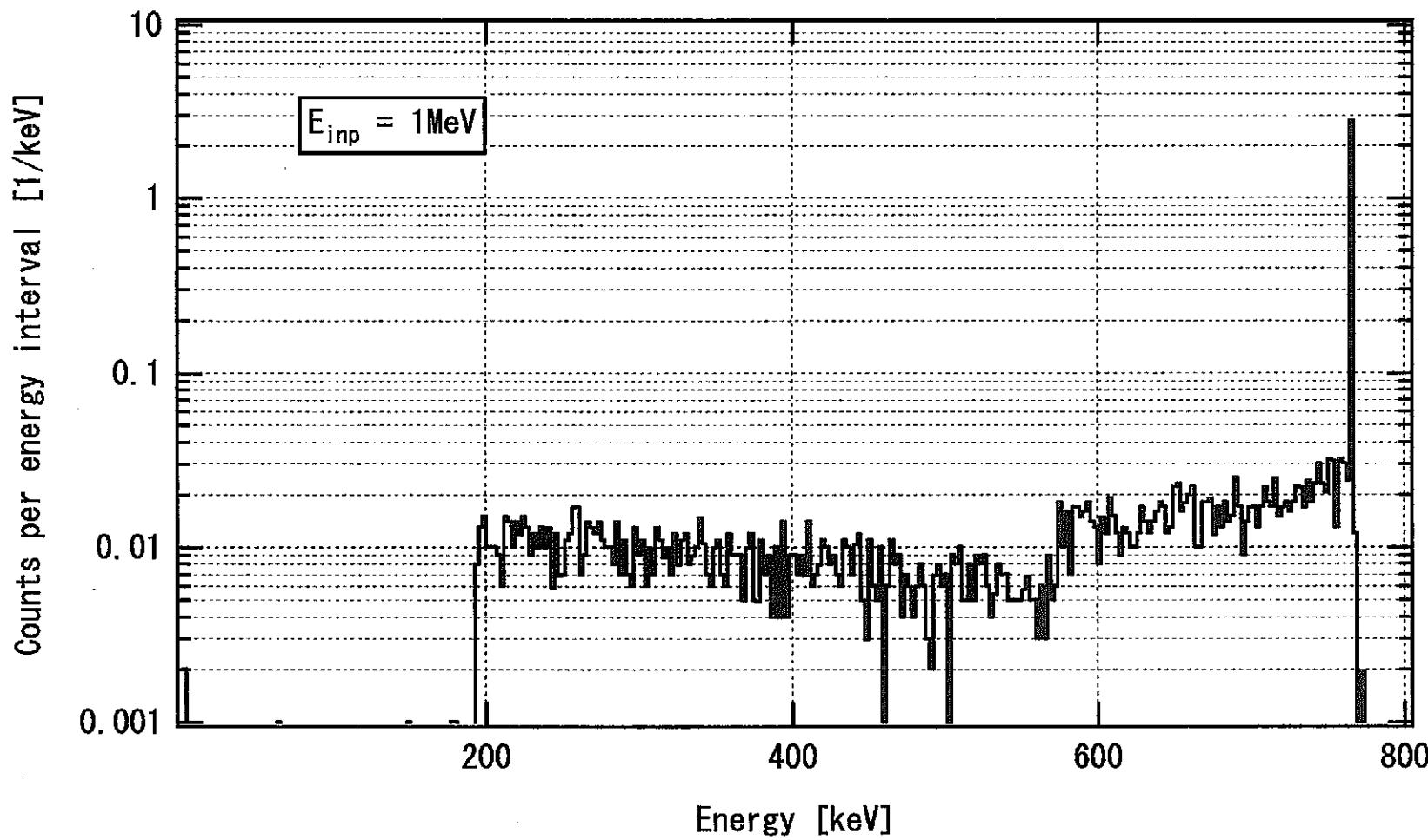


図 2.5-15_4 ^3He 比例計数管（レムカウンター）による中性子 ($E_n = 1\text{MeV}$) の波高分布

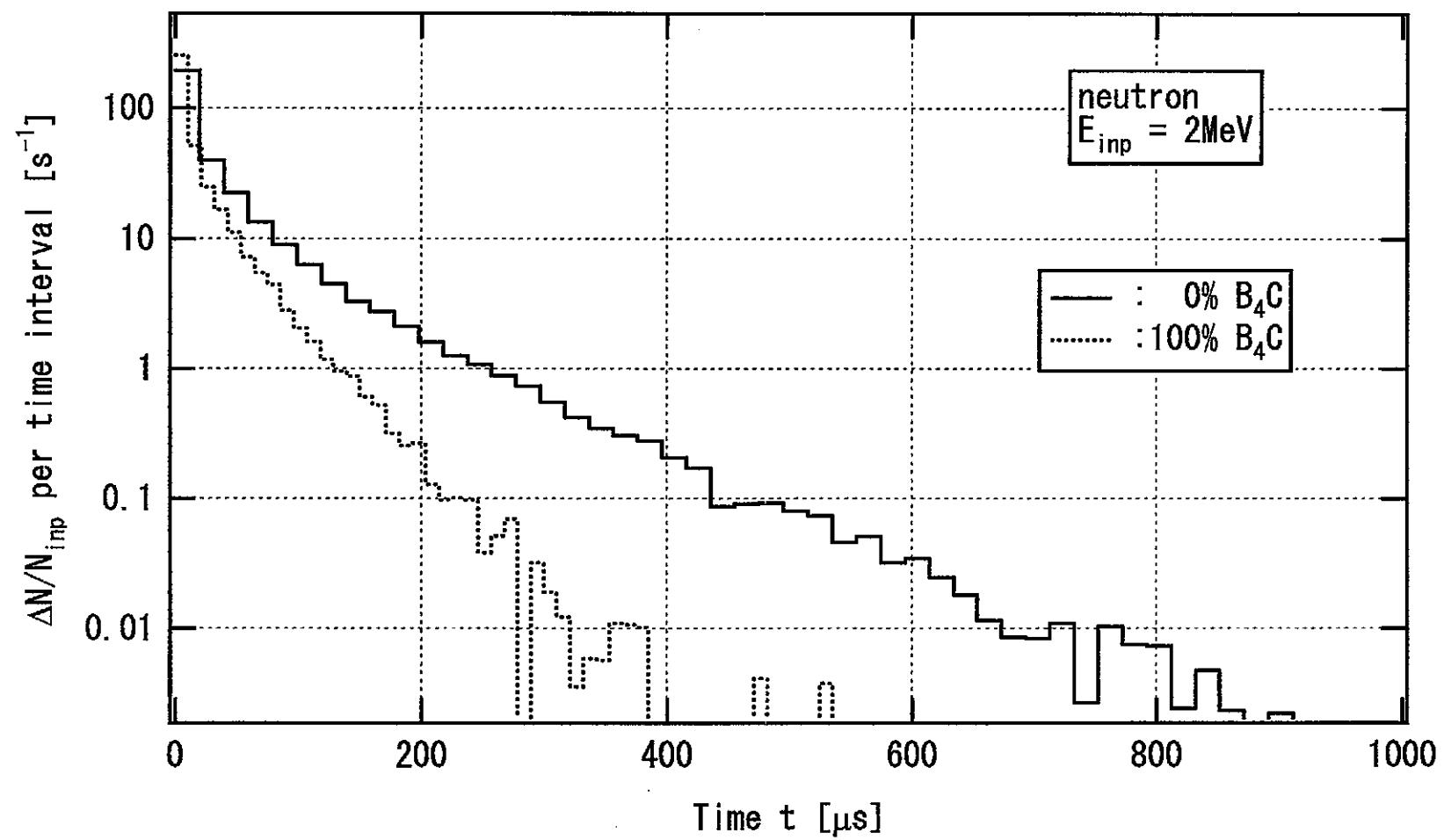


図 2.5-16_1 B_4C 有無の場合の中性子の TOP 分布 ($E_n = 2\text{MeV}$)

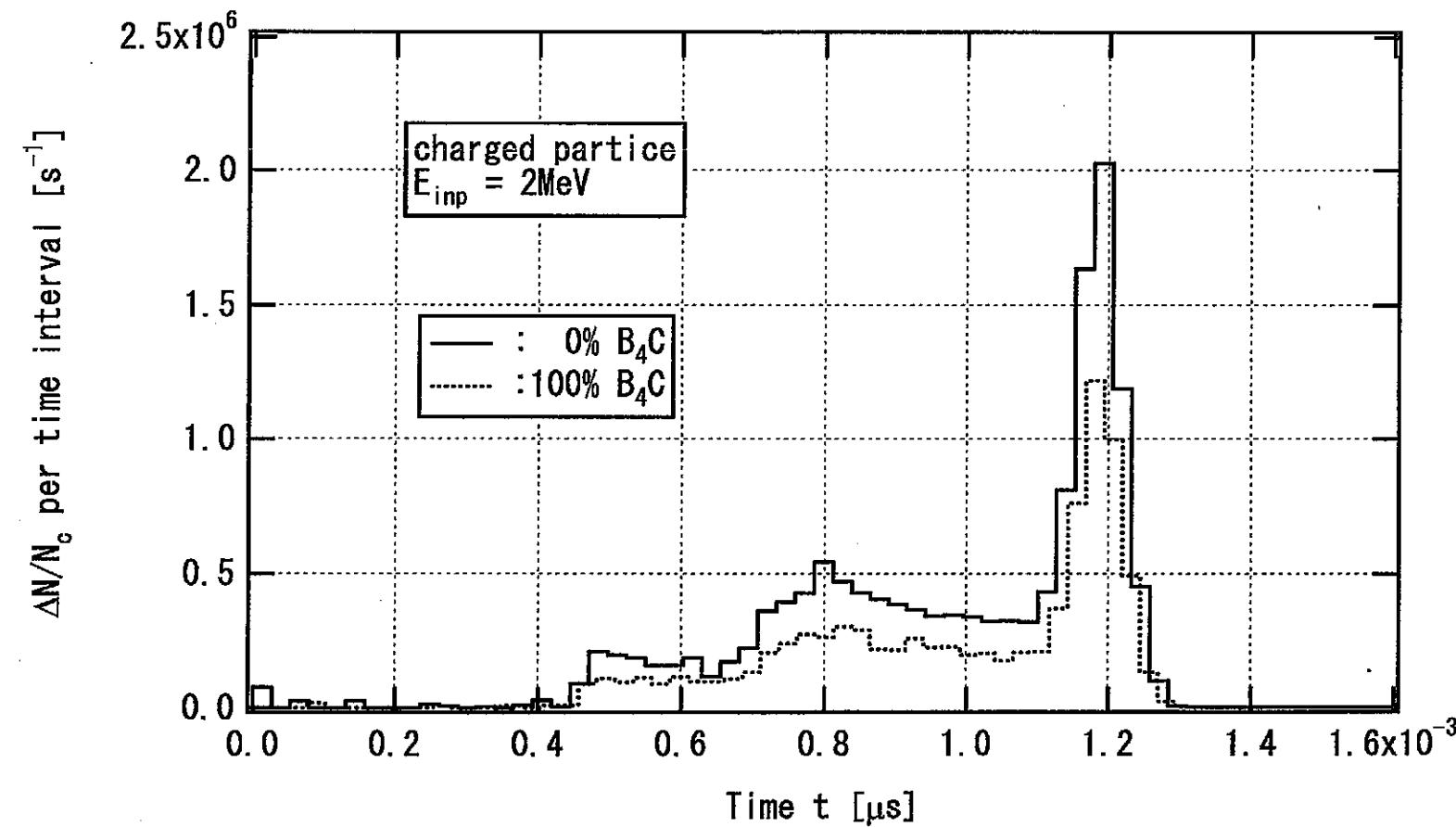


図 2.5-16_2 B_4C 有無の場合の荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 2 \text{MeV}$)

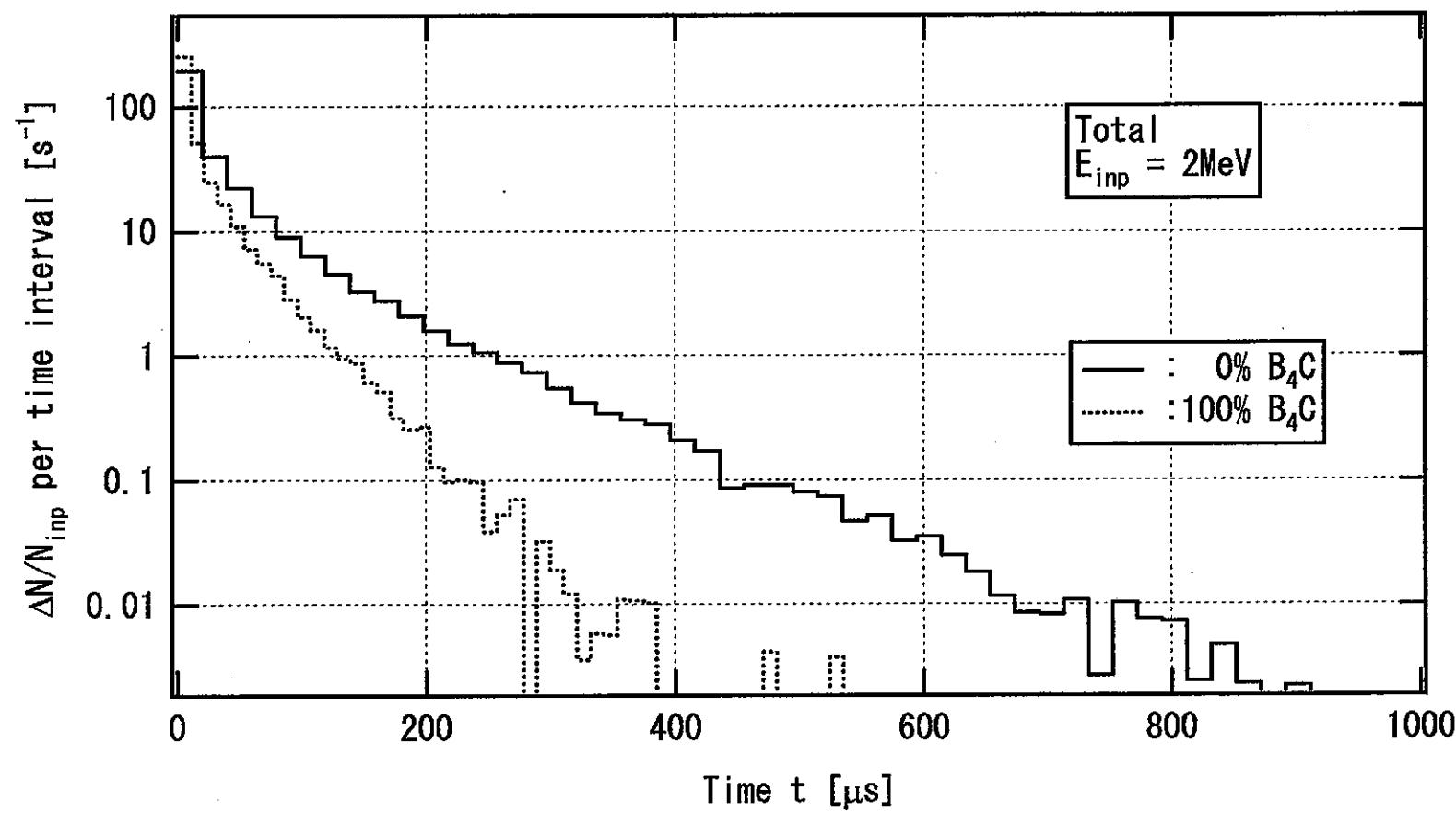


図 2.5-16_3 B_4C 有無の場合の中性子+荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 2 \text{MeV}$)

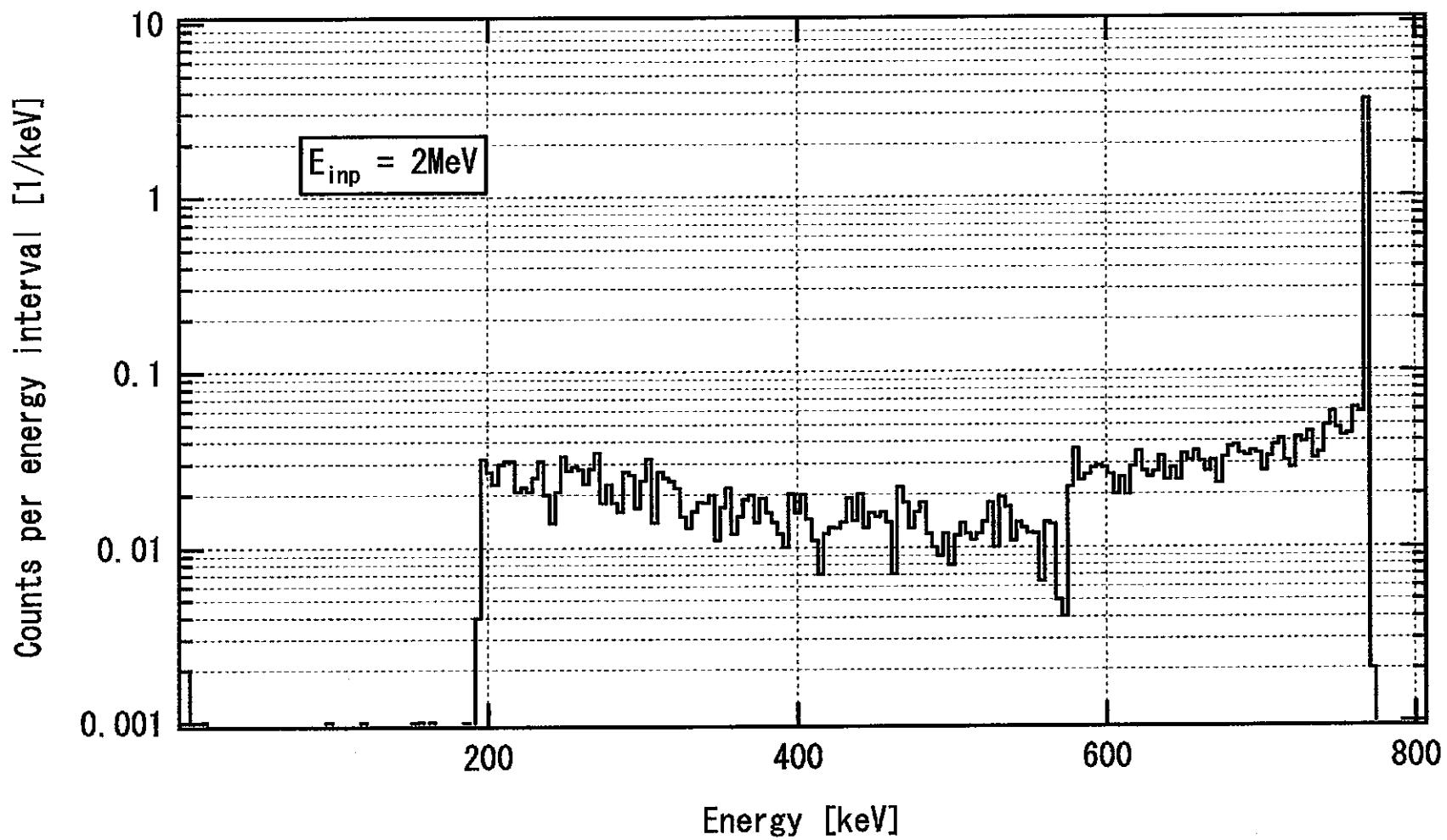


図 2.5-16_4 ${}^3\text{He}$ 比例計数管（レムカウンター）による中性子 ($E_n = 2\text{MeV}$) の波高分布

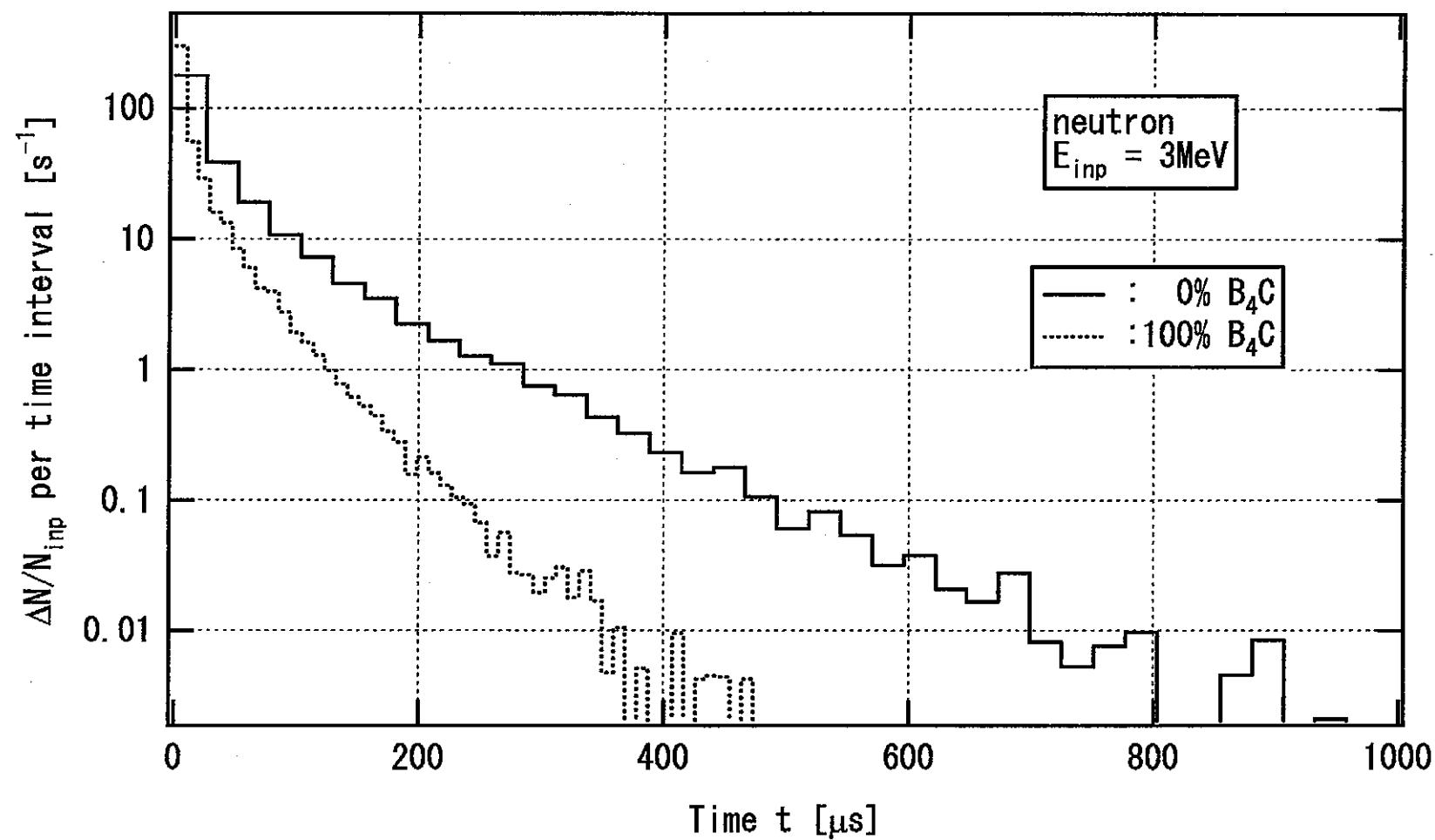


図 2.5-17_1 B_4C 有無の場合の中性子の TOP 分布 ($E_n = 3\text{MeV}$)

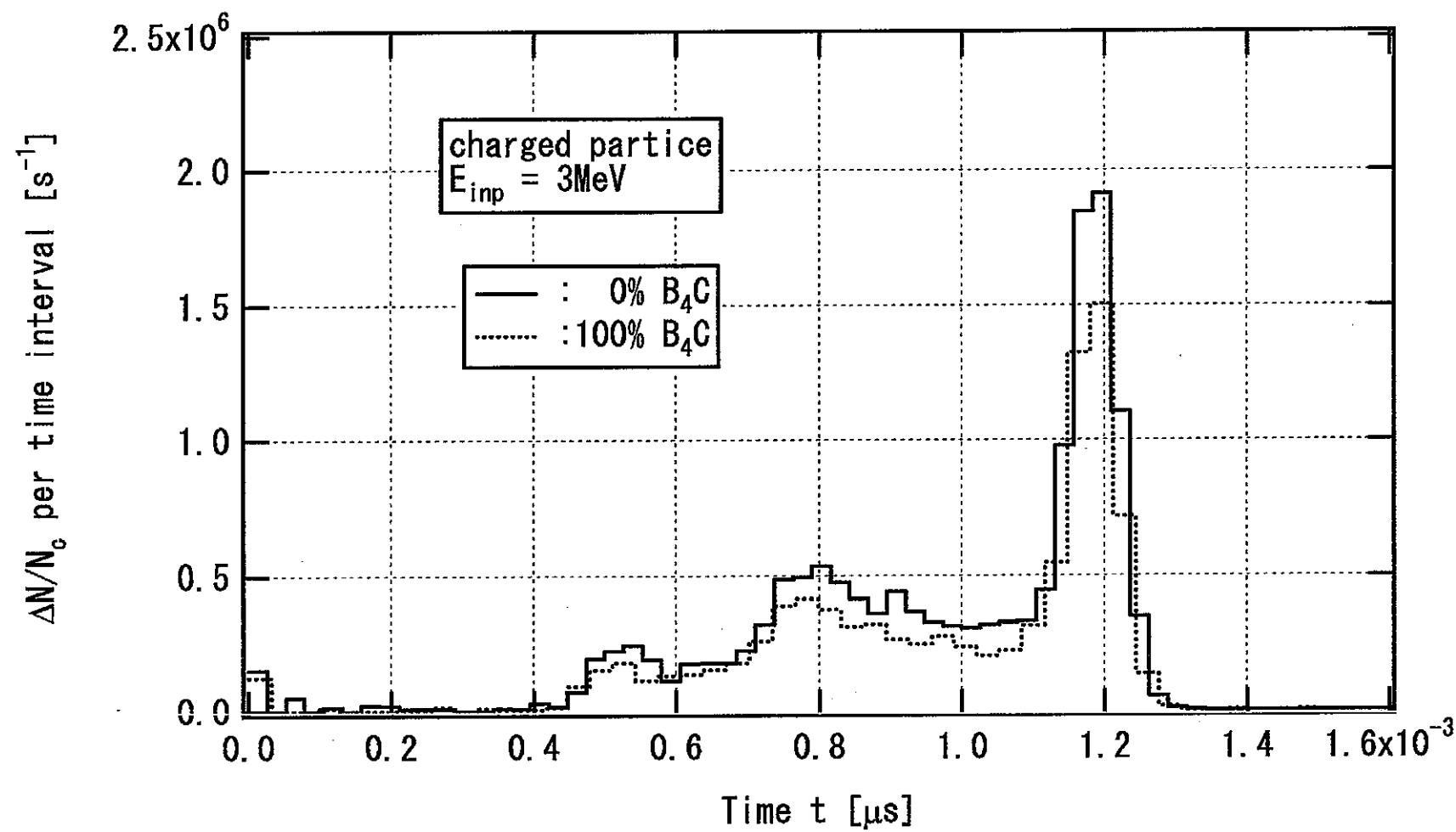


図 2.5-17_2 B_4C 有無の場合の荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 3\text{MeV}$)

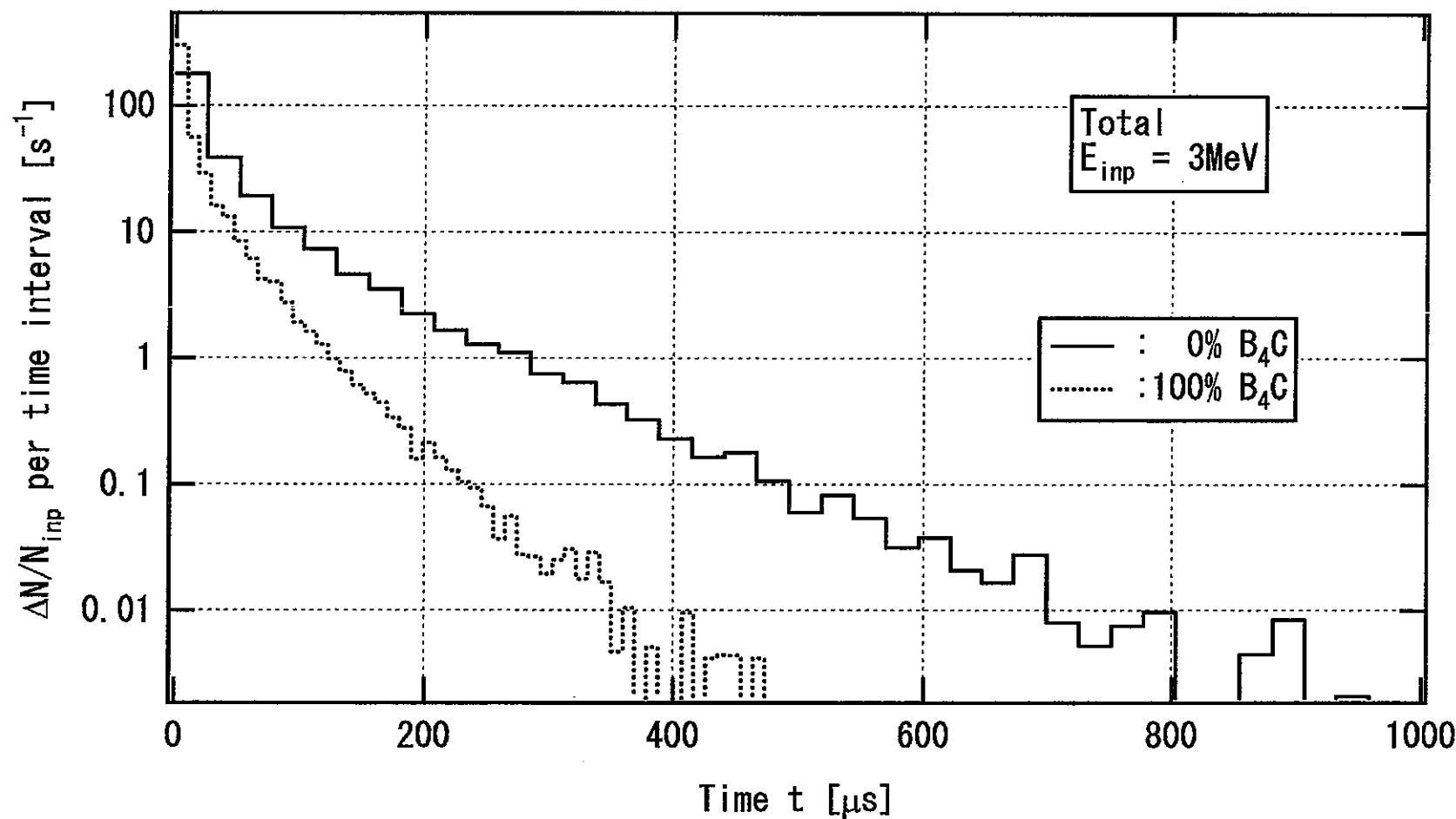


図 2.5-17_3 B_4C 有無の場合の中性子+荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 3\text{MeV}$)

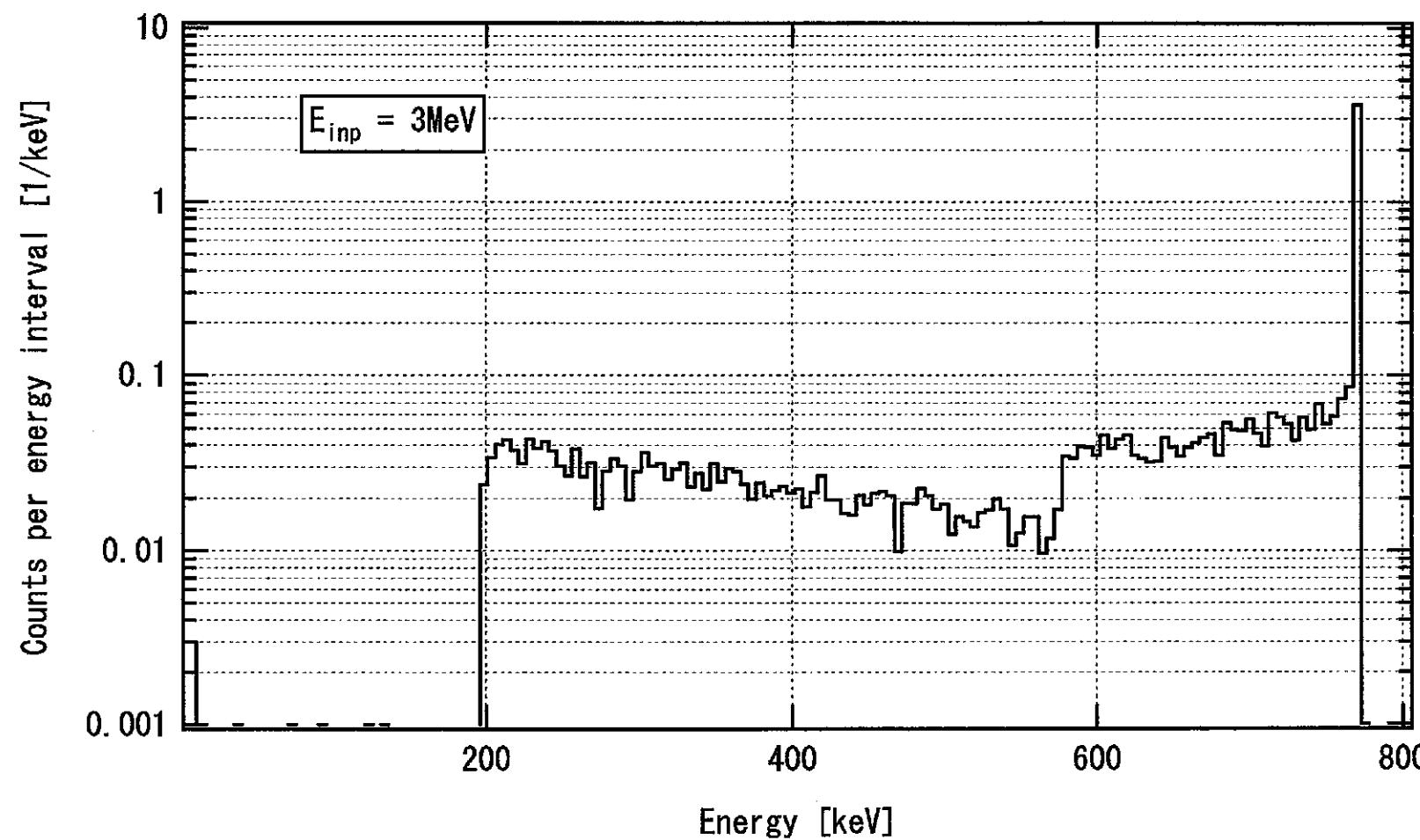


図 2.5-17_4 ${}^3\text{He}$ 比例計数管（レムカウンター）による中性子 ($E_n = 3 \text{MeV}$) の波高分布

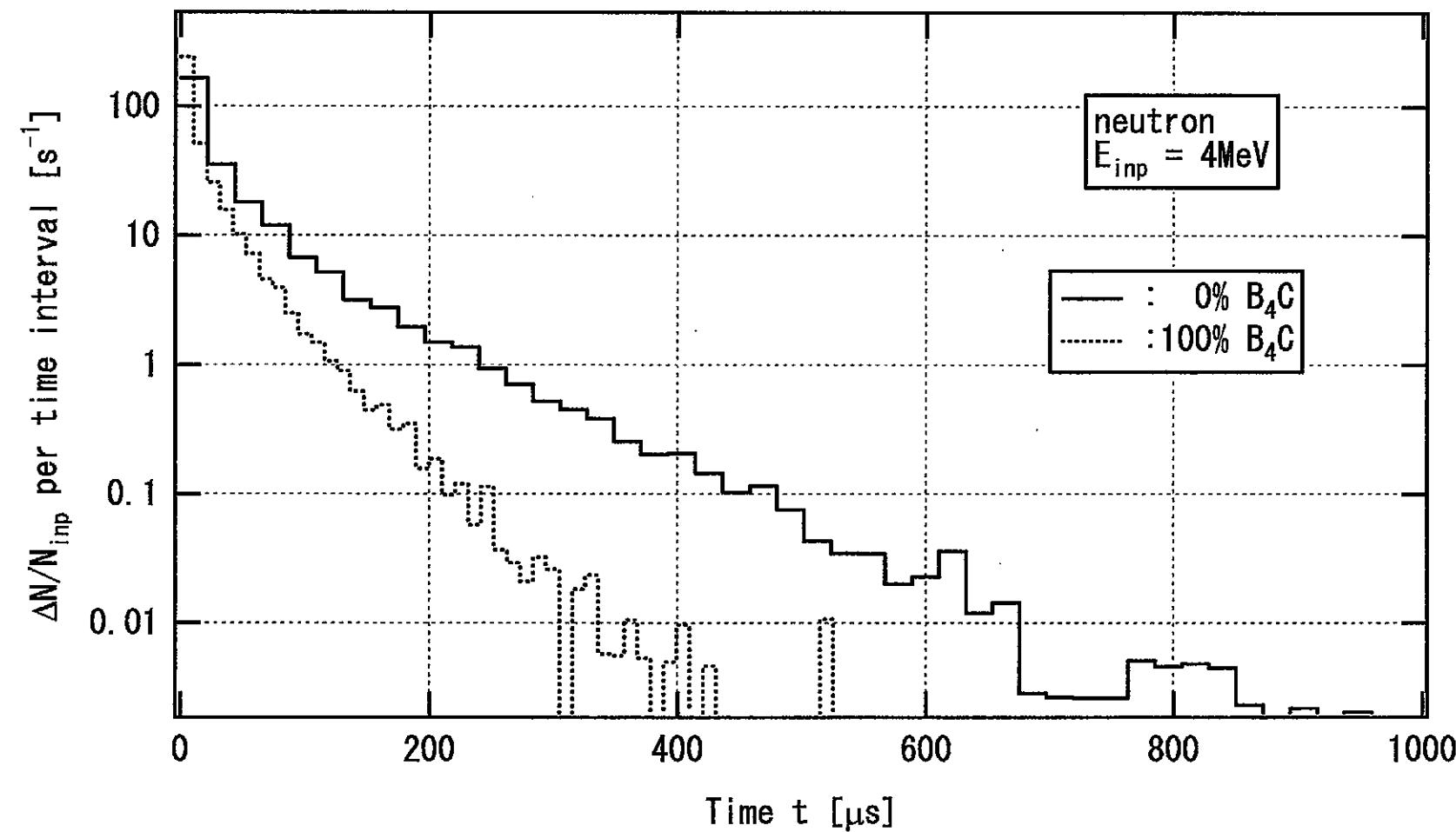


図 2.5-18_1 B_4C 有無の場合の中性子の TOP 分布 ($E_n = 4\text{MeV}$)

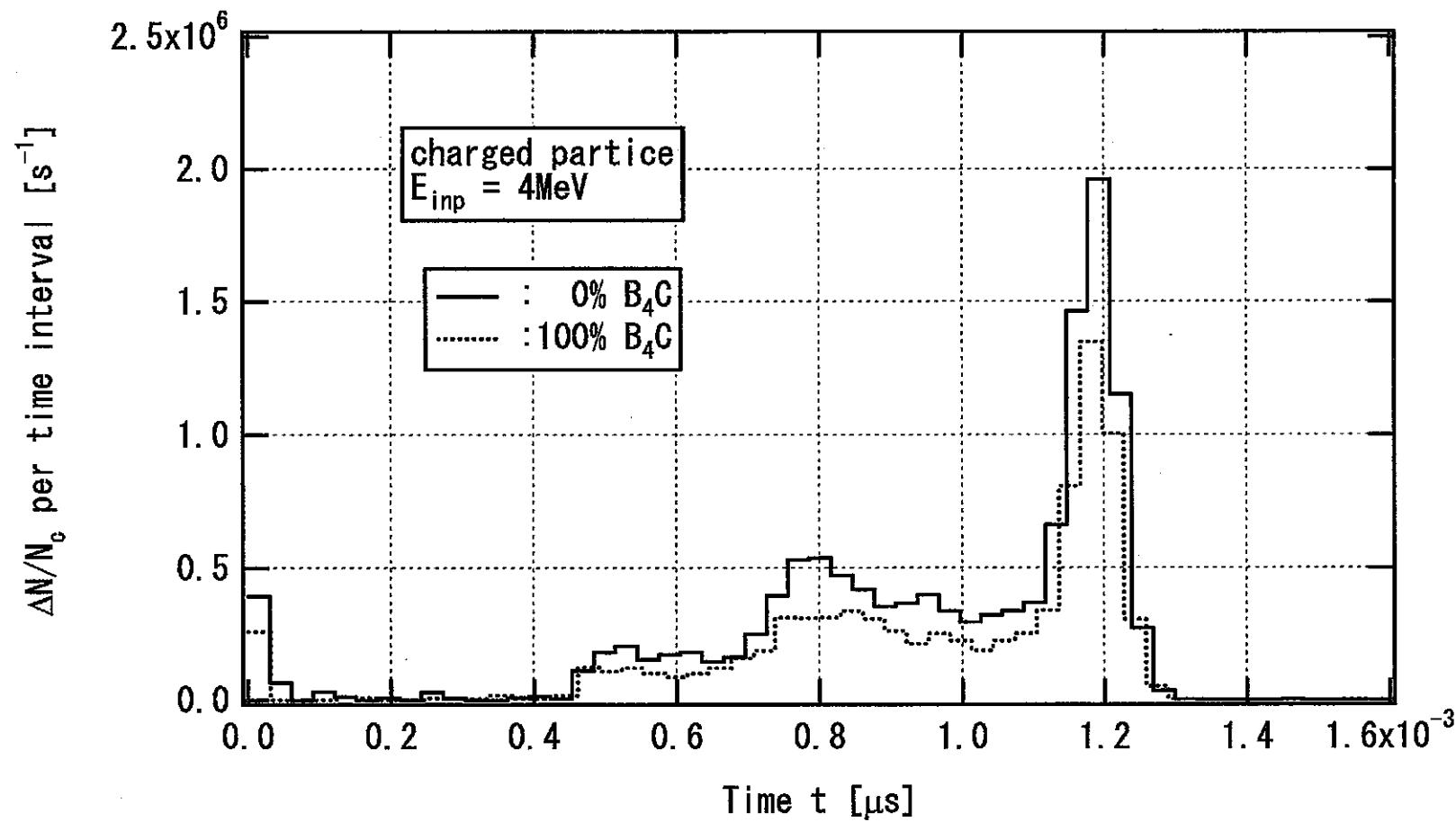


図 2.5-18_2 B_4C 有無の場合の荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 4\text{MeV}$)

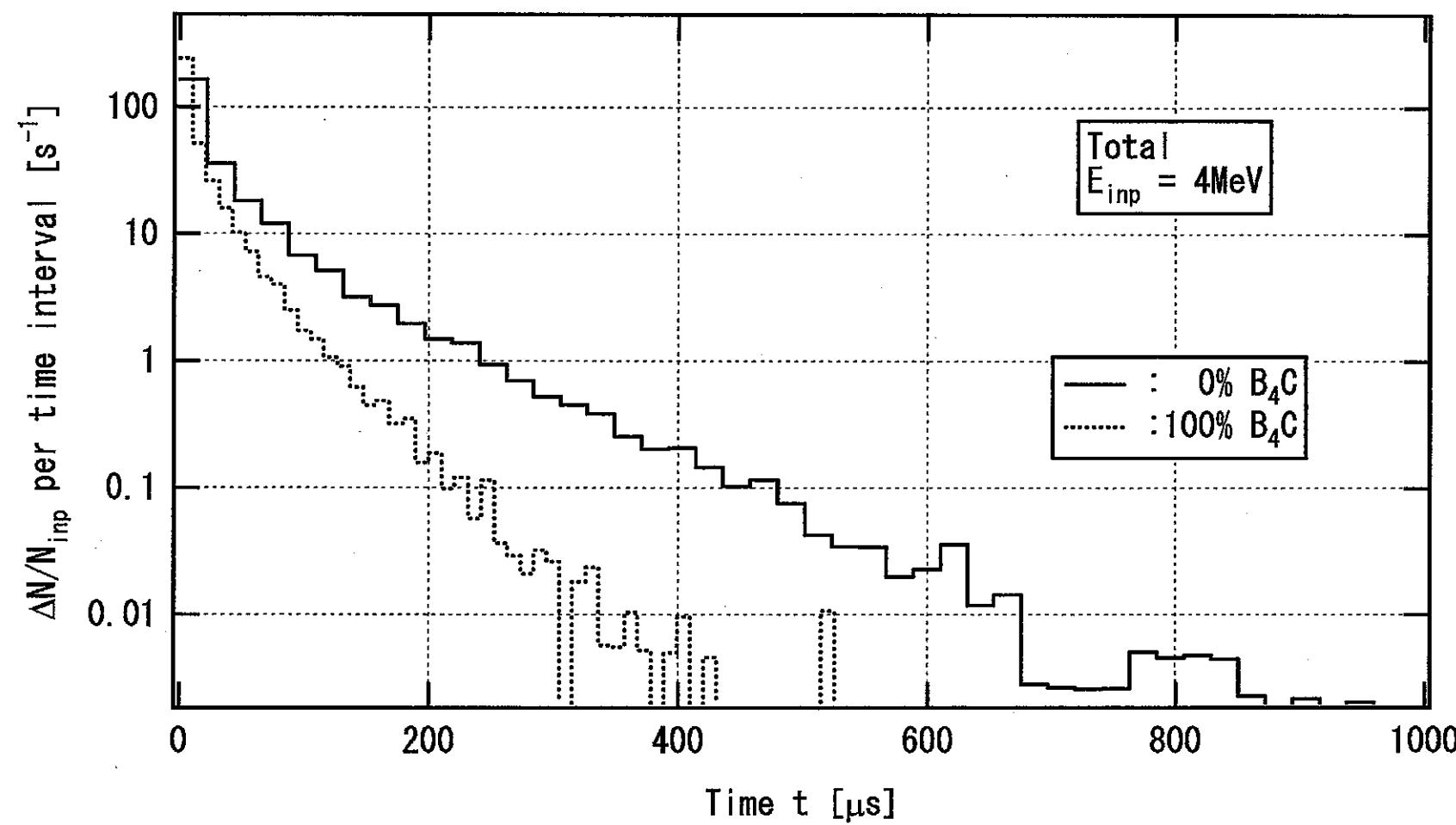


図 2.5-18_3 B_4C 有無の場合の中性子+荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 4 \text{ MeV}$)

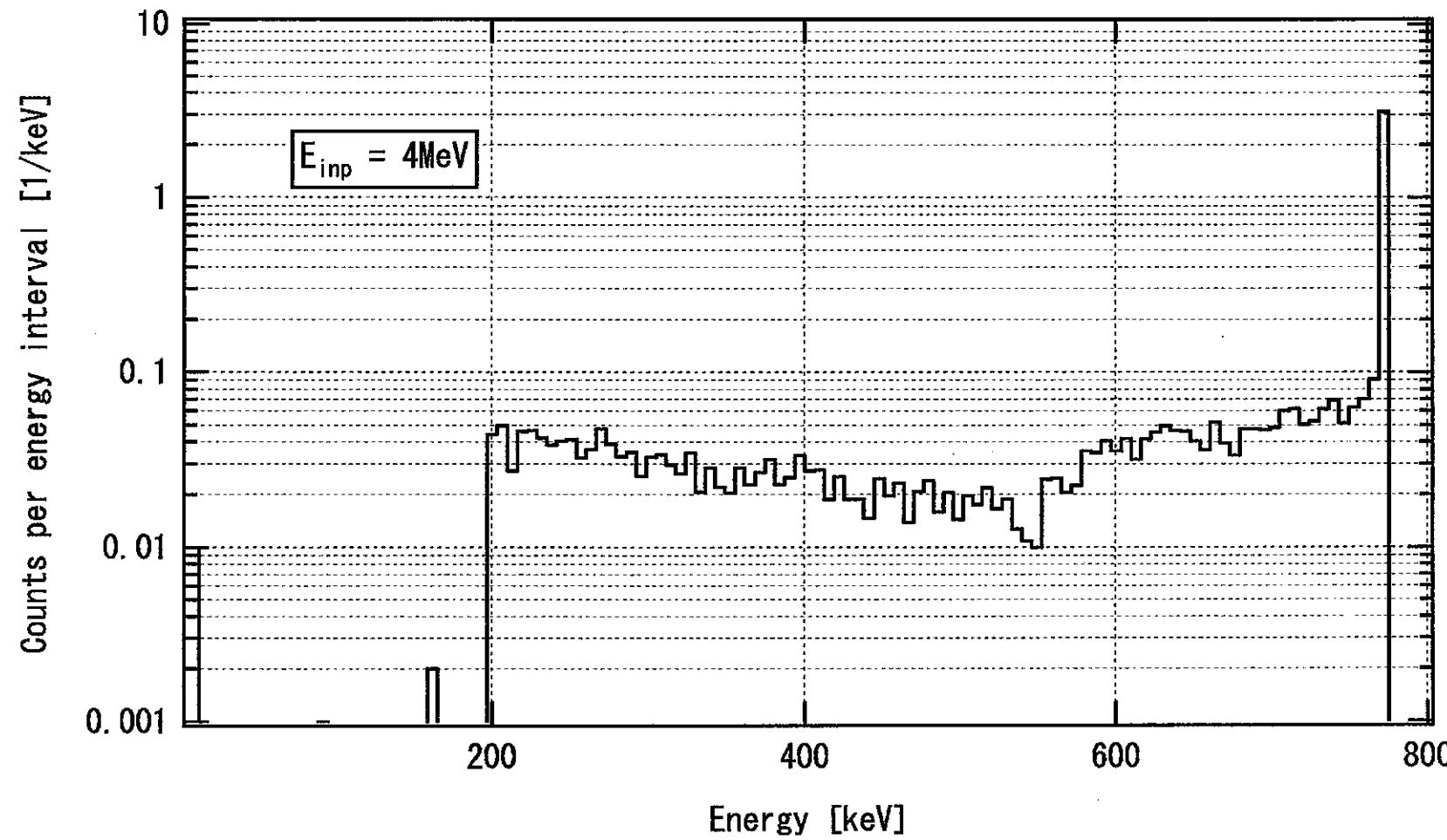


図 2.5-18_4 ${}^3\text{He}$ 比例計数管（レムカウンター）による中性子 ($E_n = 4\text{MeV}$) の波高分布

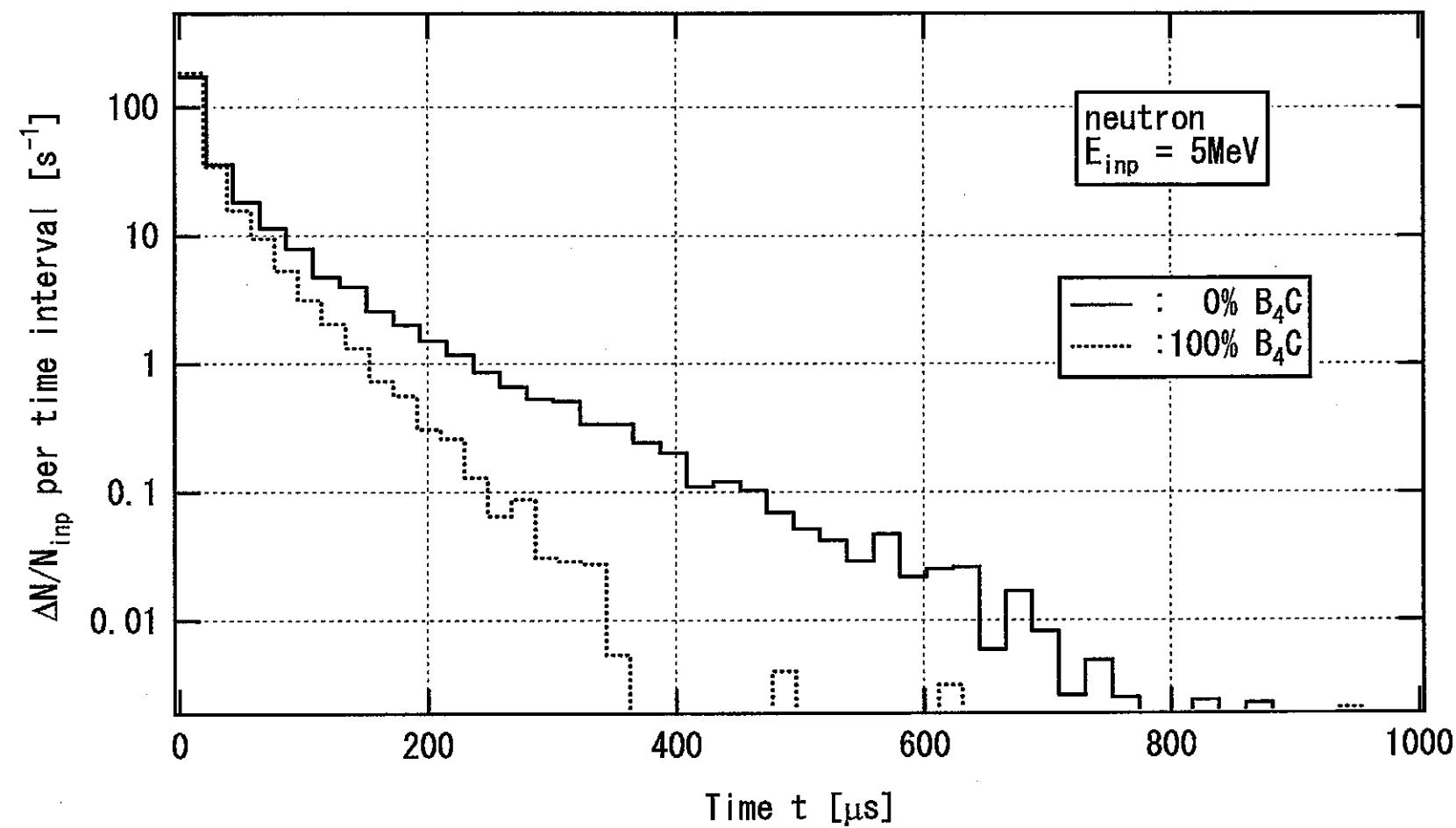


図 2.5-19_1 B_4C 有無の場合の中性子の TOP 分布 ($E_n = 5\text{MeV}$)

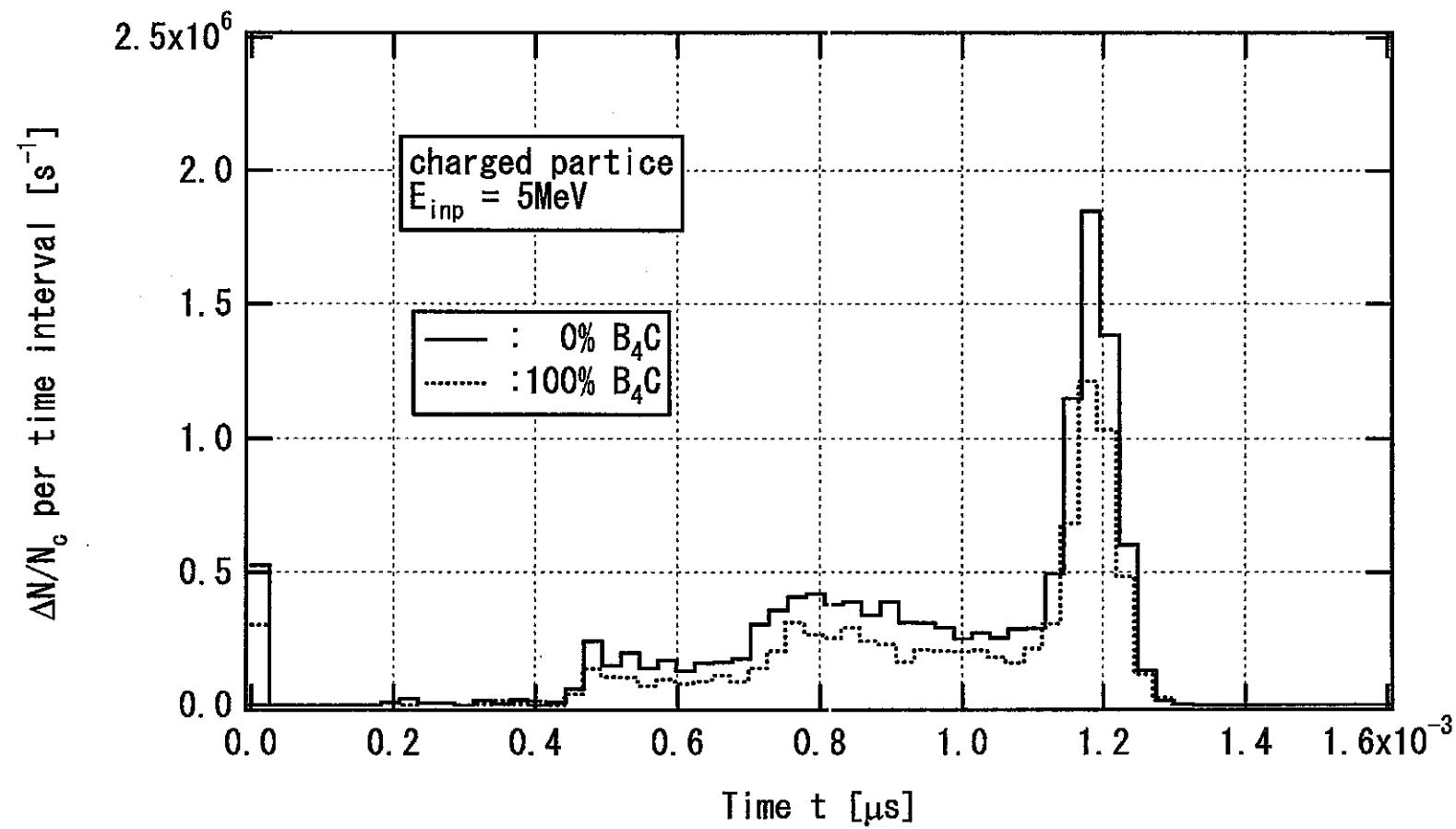


図 2.5-19_2 B₄C 有無の場合の荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 5\text{ MeV}$)

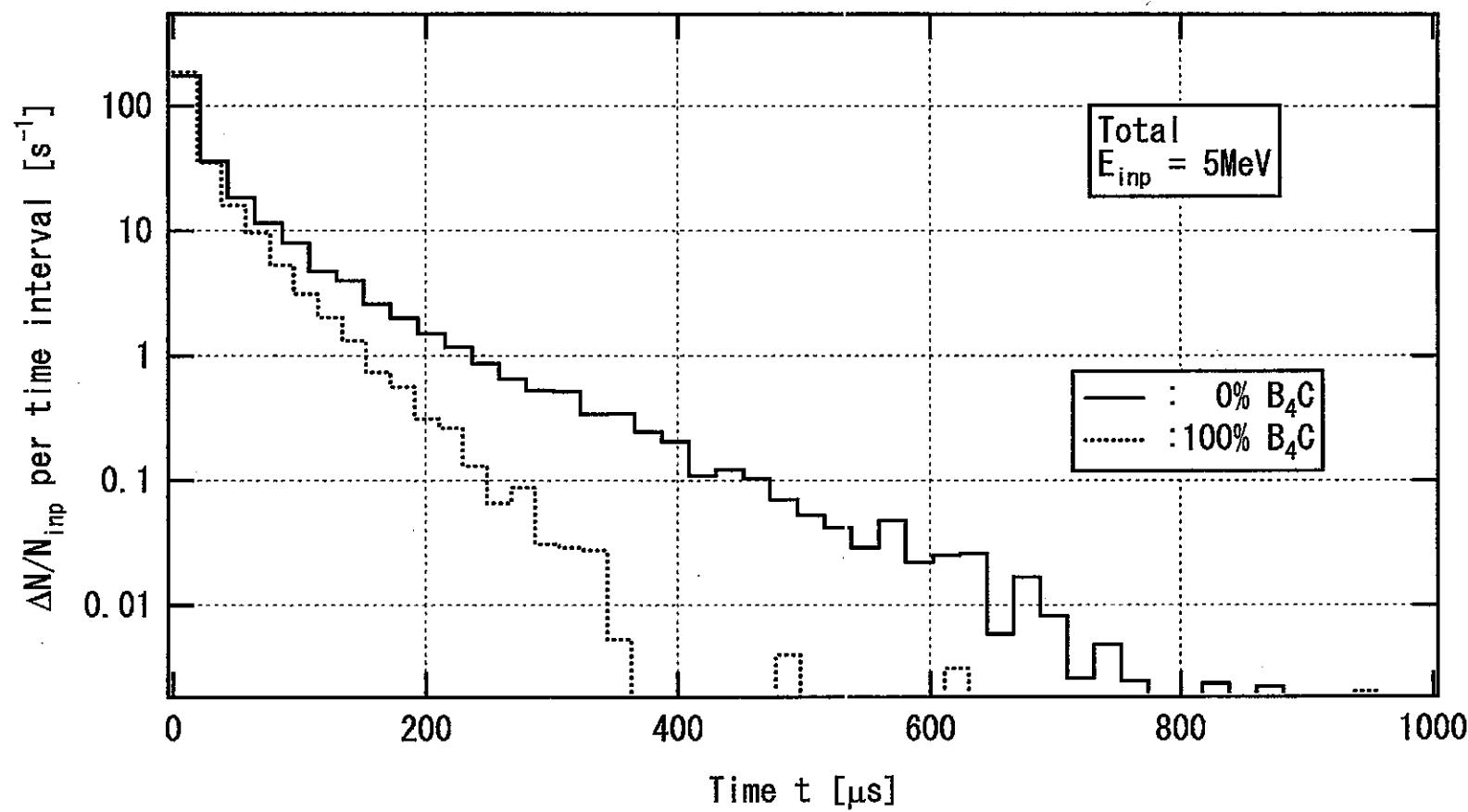


図 2.5-19_3 B_4C 有無の場合の中性子+荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 5\text{MeV}$)

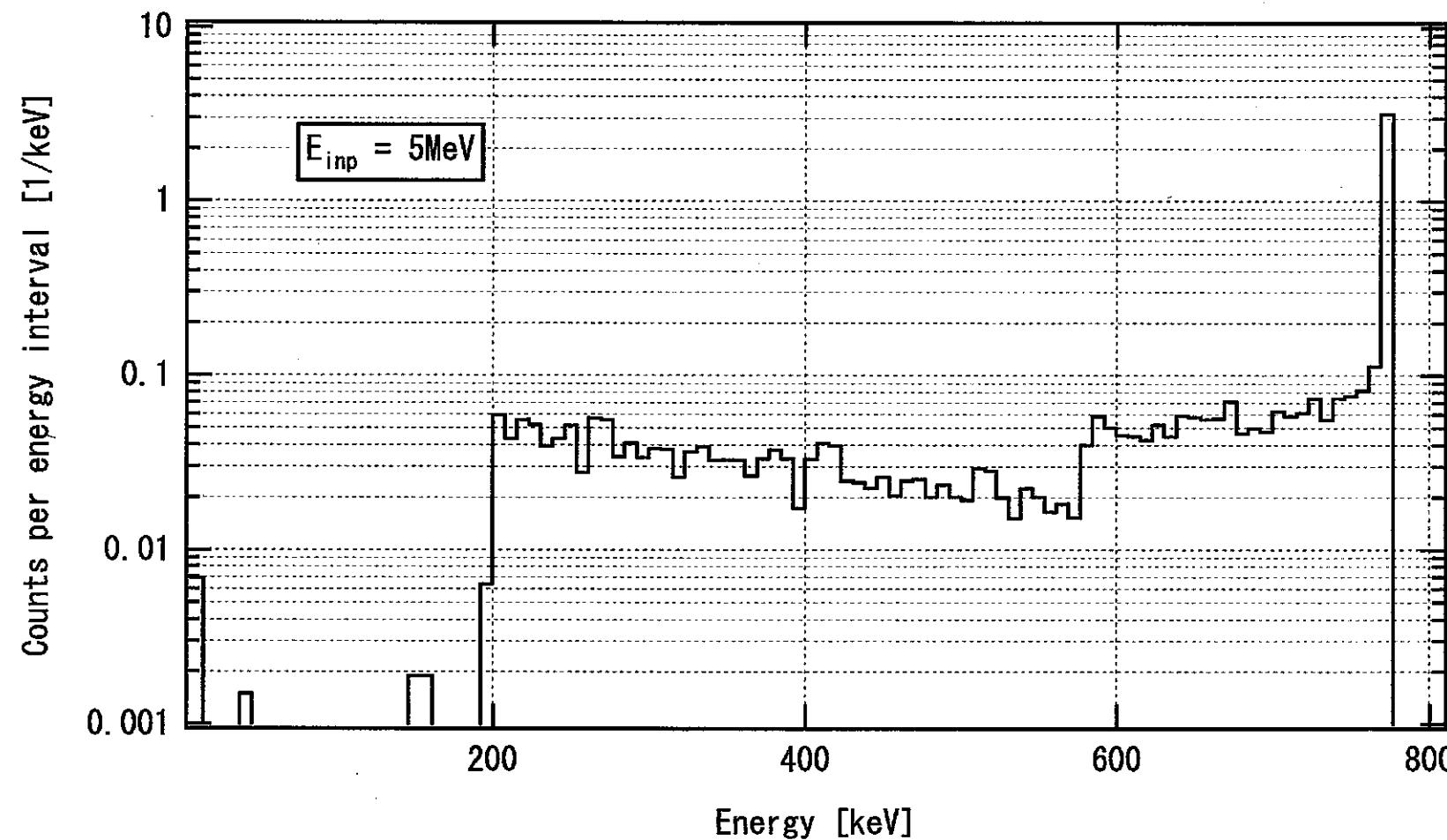


図 2.5-19_4 ^3He 比例計数管（レムカウンター）による中性子 ($E_n = 5 \text{ MeV}$) の波高分布

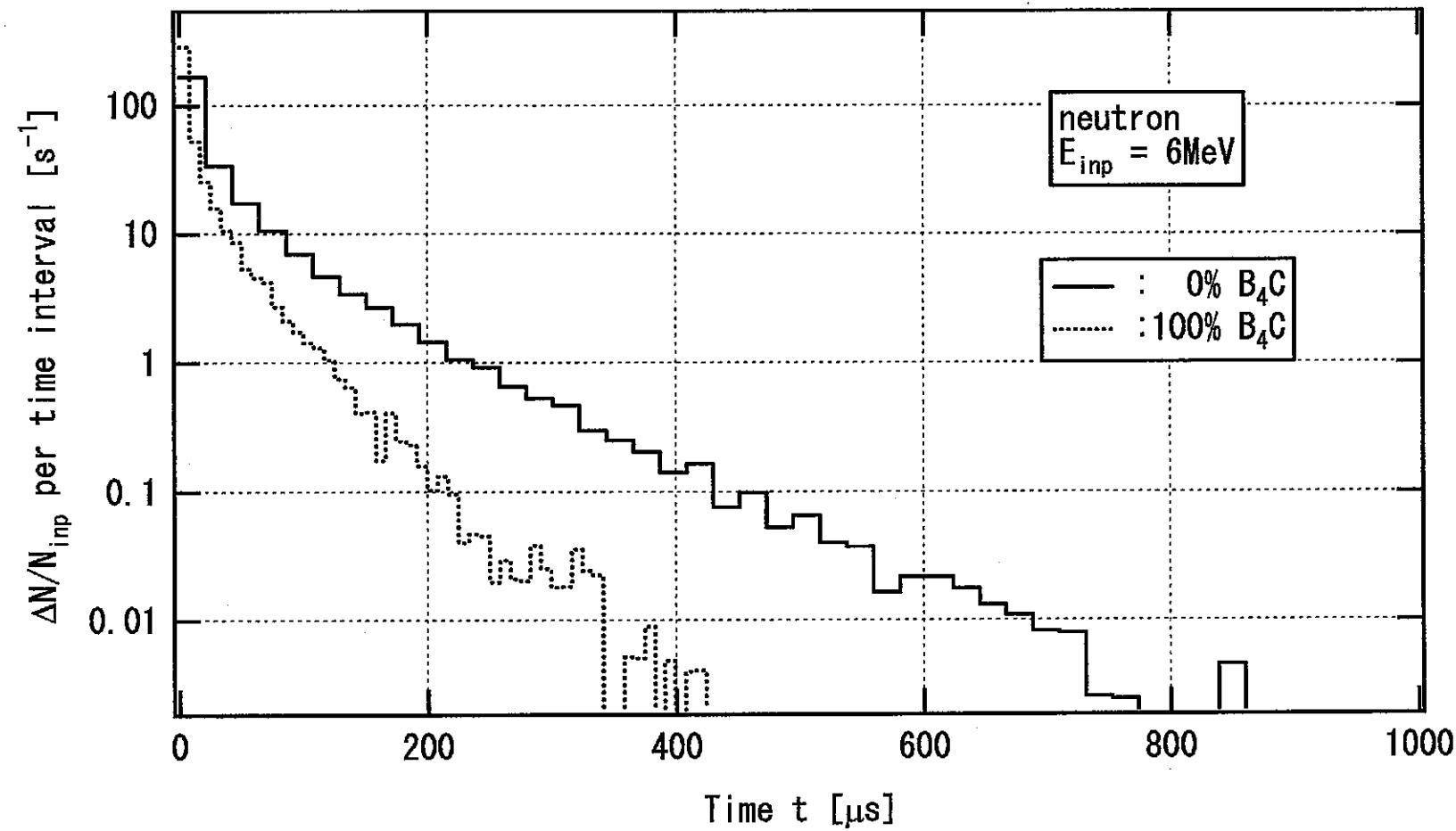


図 2.5-20_1 B_4C 有無の場合の中性子の TOP 分布 ($E_n = 6\text{MeV}$)

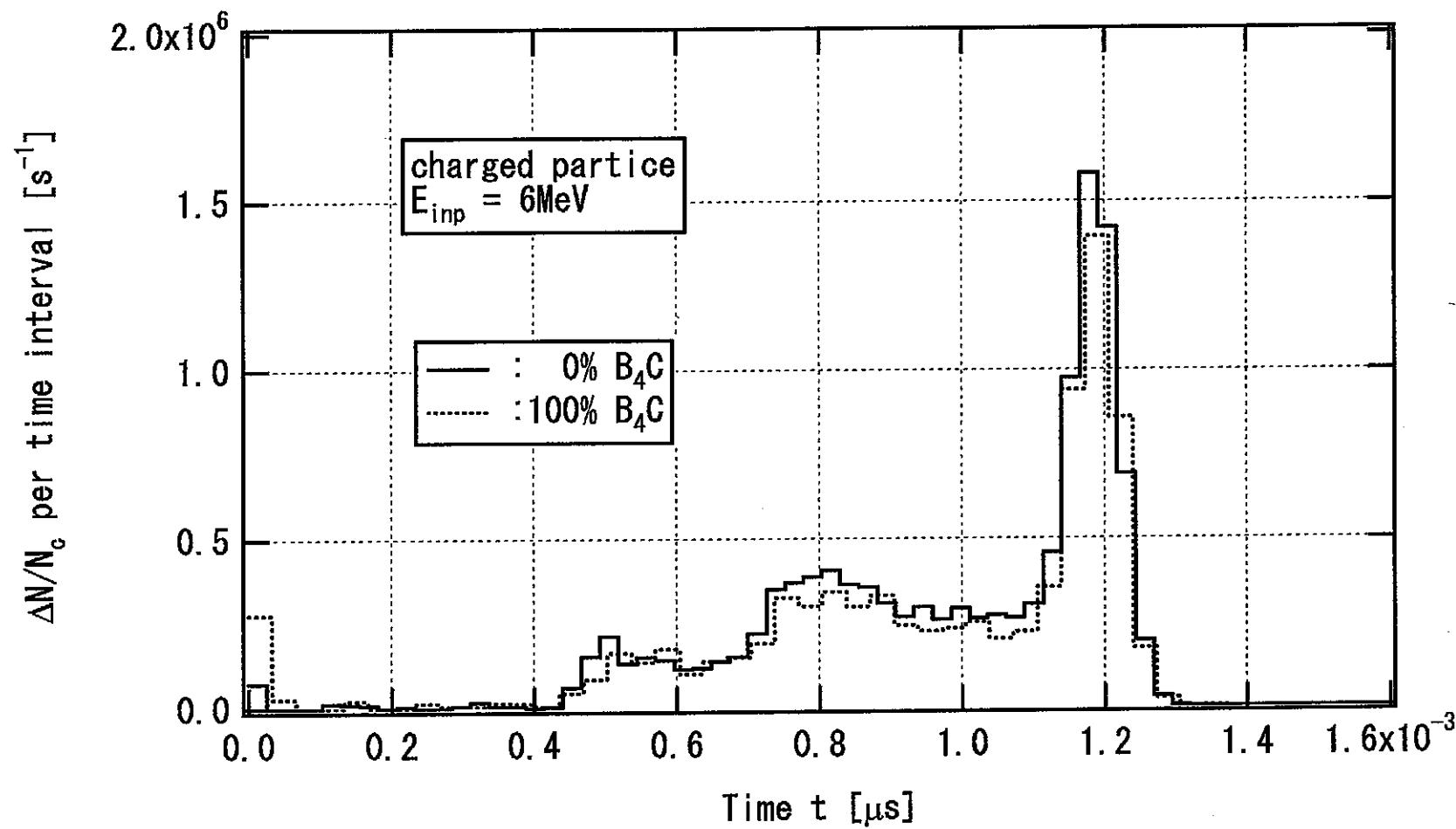


図 2.5-20_2 B_4C 有無の場合の荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 6\text{MeV}$)

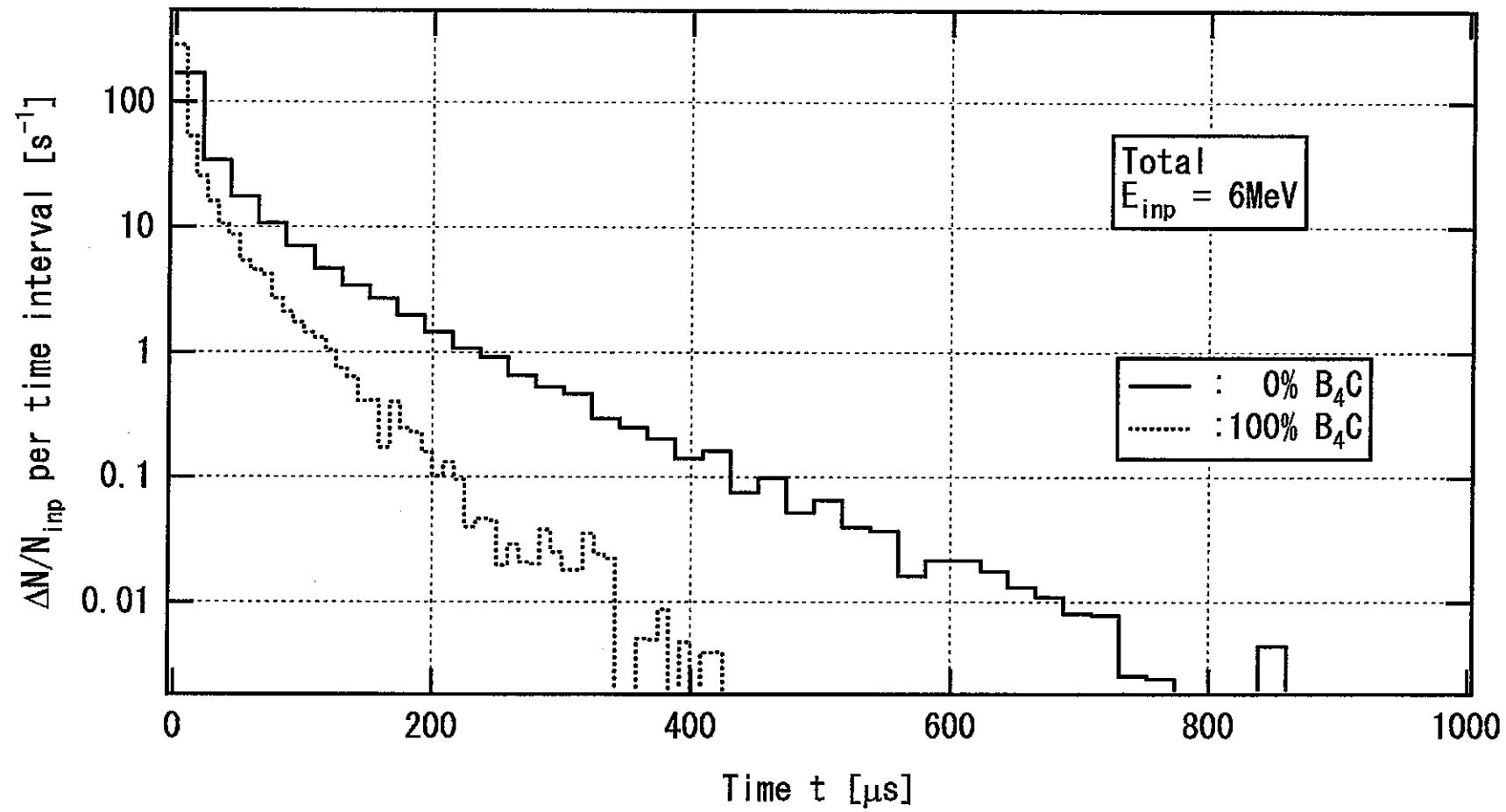


図 2.5-20_3 B_4C 有無の場合の中性子+荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 6 \text{ MeV}$)

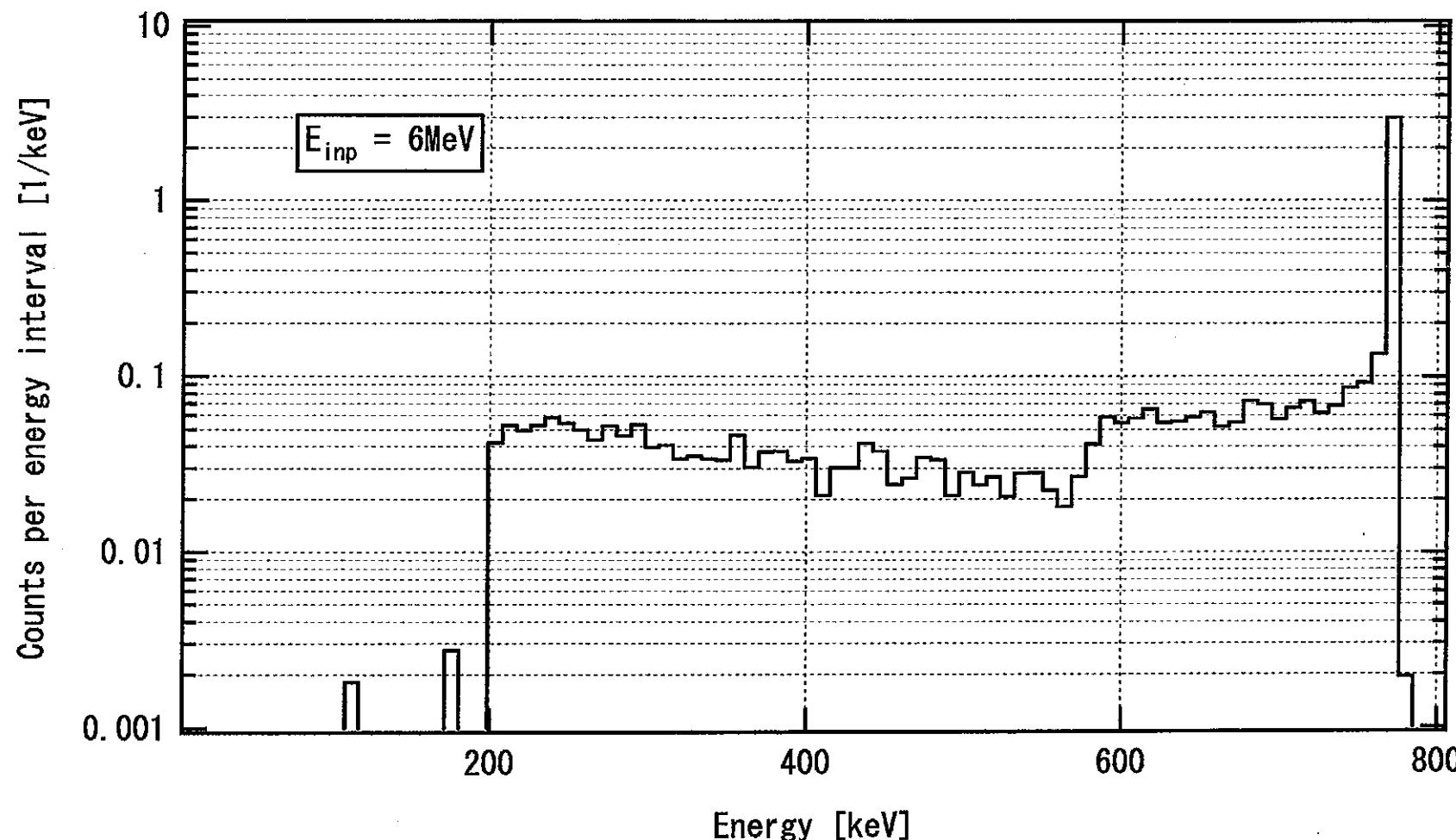


図 2.5-20_4 ^3He 比例計数管（レムカウンター）による中性子 ($E_n = 6\text{MeV}$) の波高分布

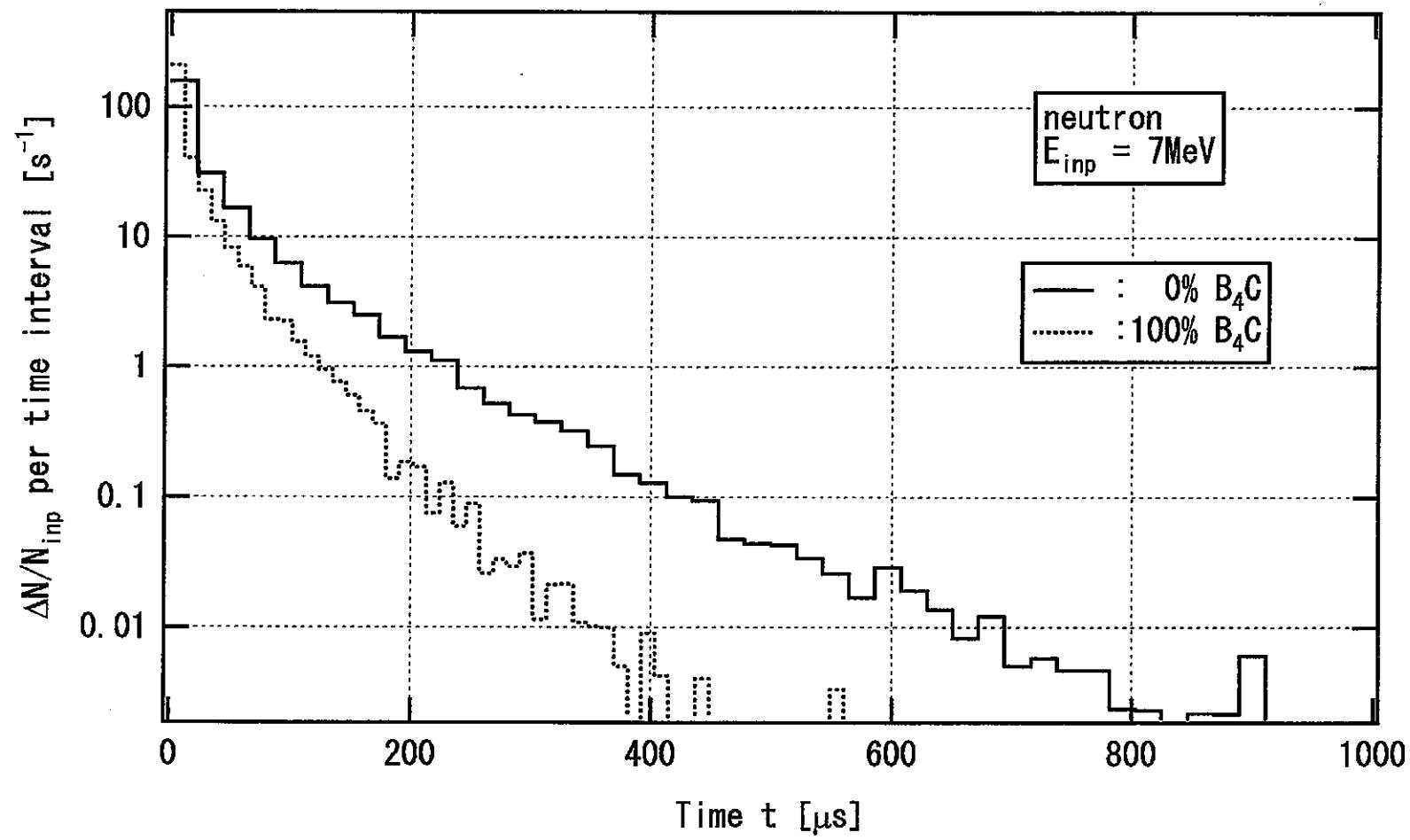


図 2.5-21_1 B_4C 有無の場合の中性子の TOP 分布 ($E_n = 7\text{MeV}$)

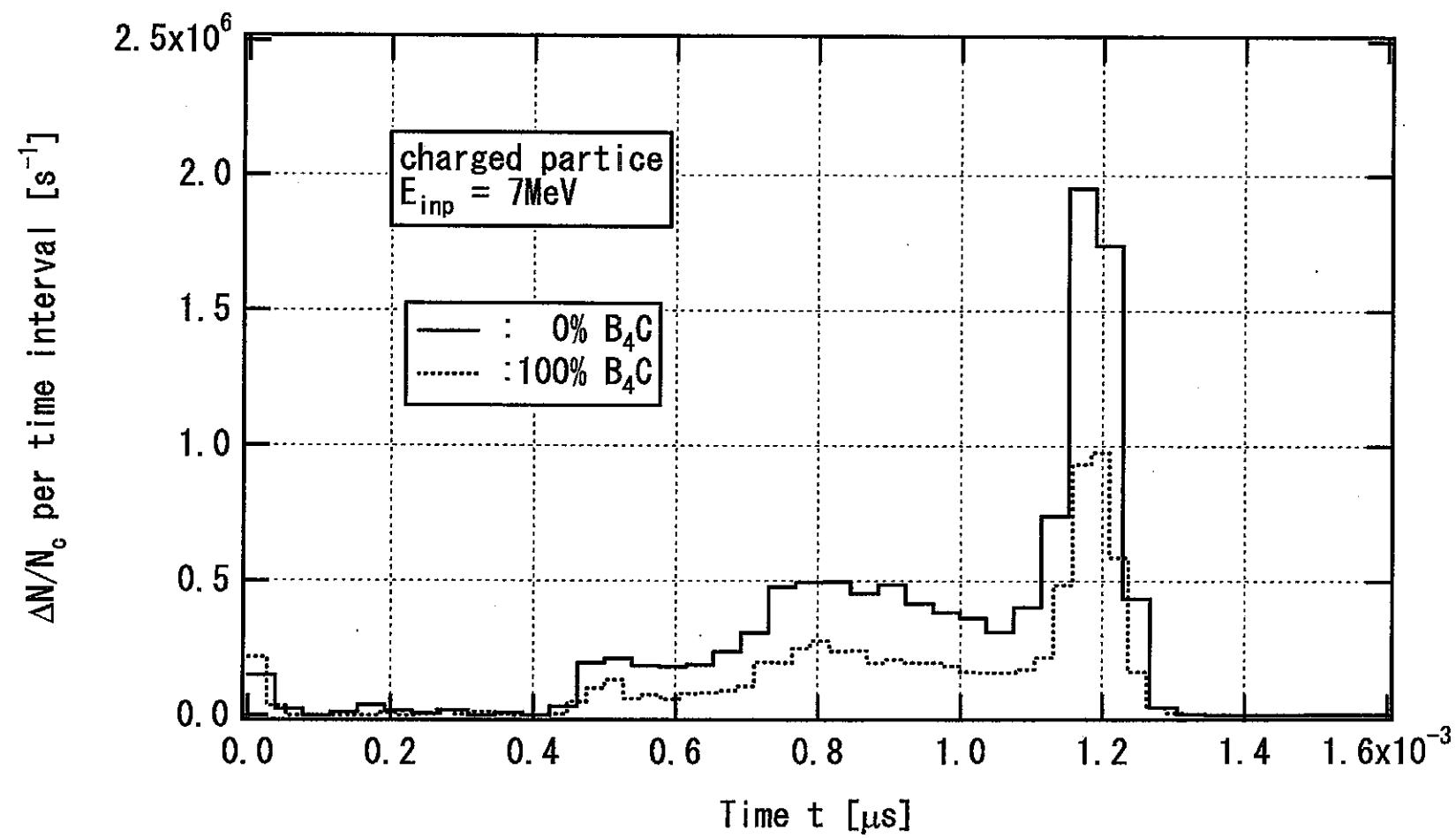


図 2.5-21_2 B_4C 有無の場合の荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 7 \text{ MeV}$)

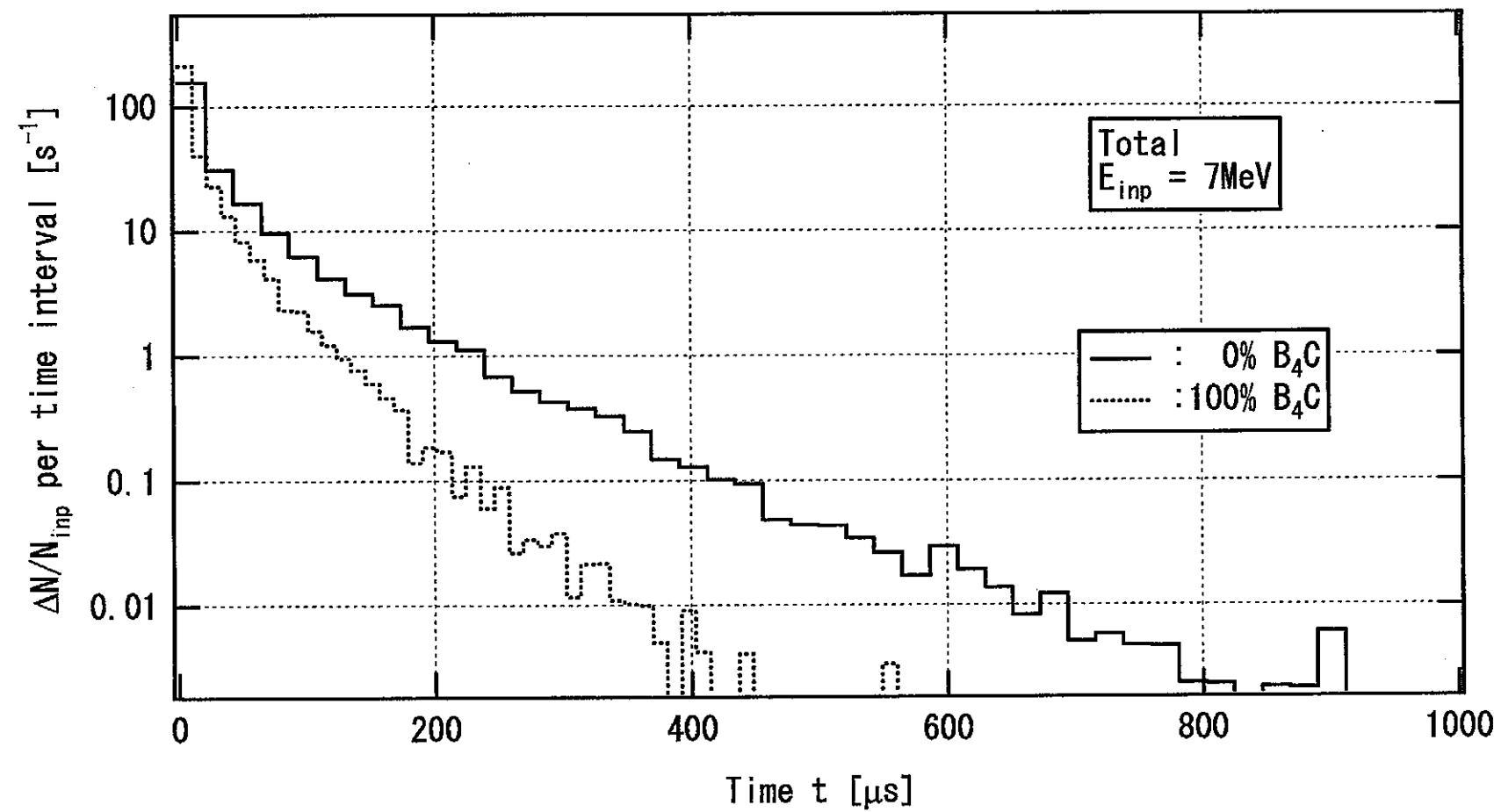


図 2.5-21_3 B_4C 有無の場合の中性子+荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 7 \text{ MeV}$)

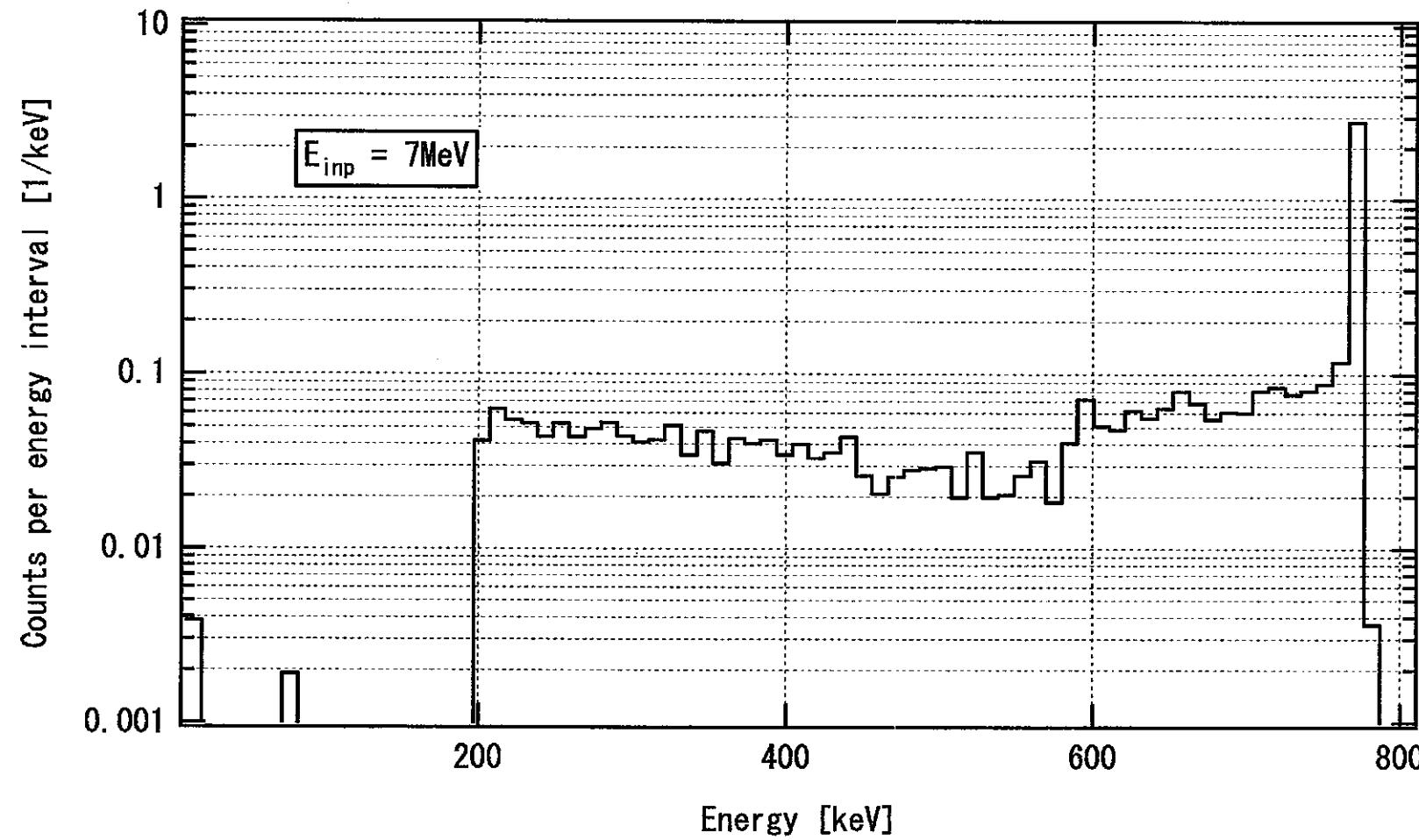


図 2.5-21_4 ^3He 比例計数管（レムカウンター）による中性子 ($E_n = 7 \text{ MeV}$) の波高分布

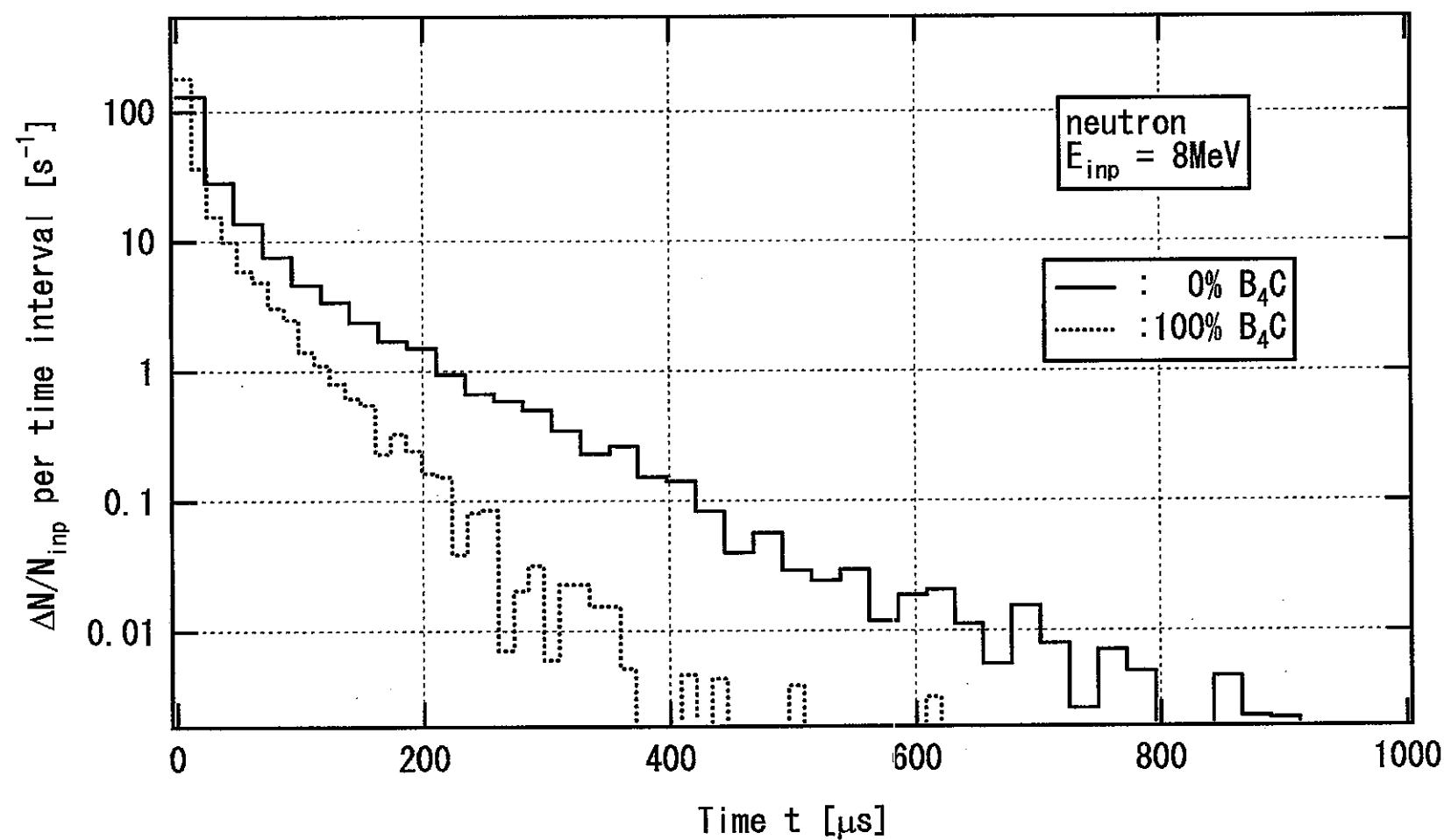


図 2.5-22_1 B_4C 有無の場合の中性子の TOP 分布 ($E_n = 8\text{MeV}$)

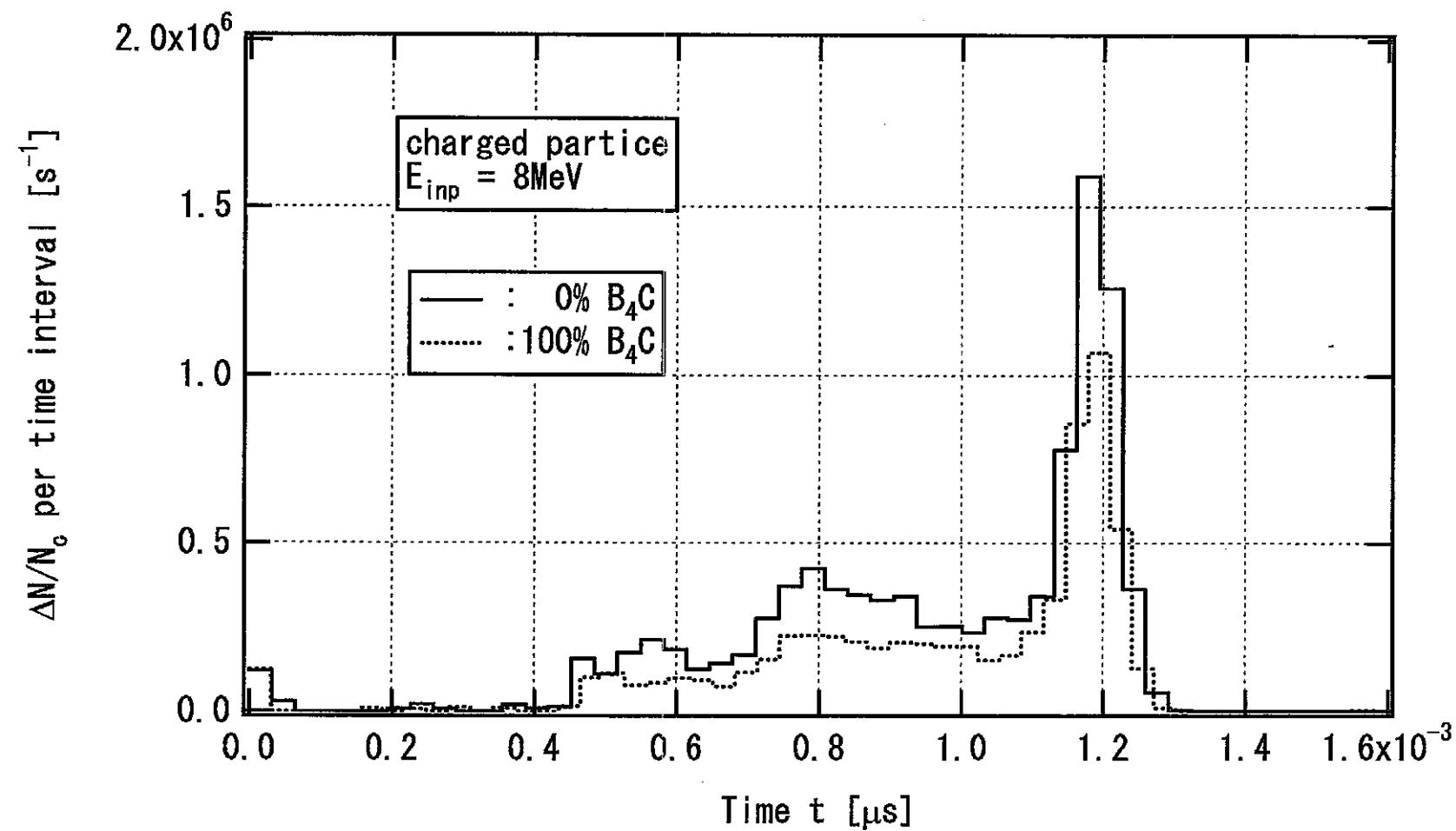


図 2.5-22_2 B_4C 有無の場合の荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 8 \text{MeV}$)

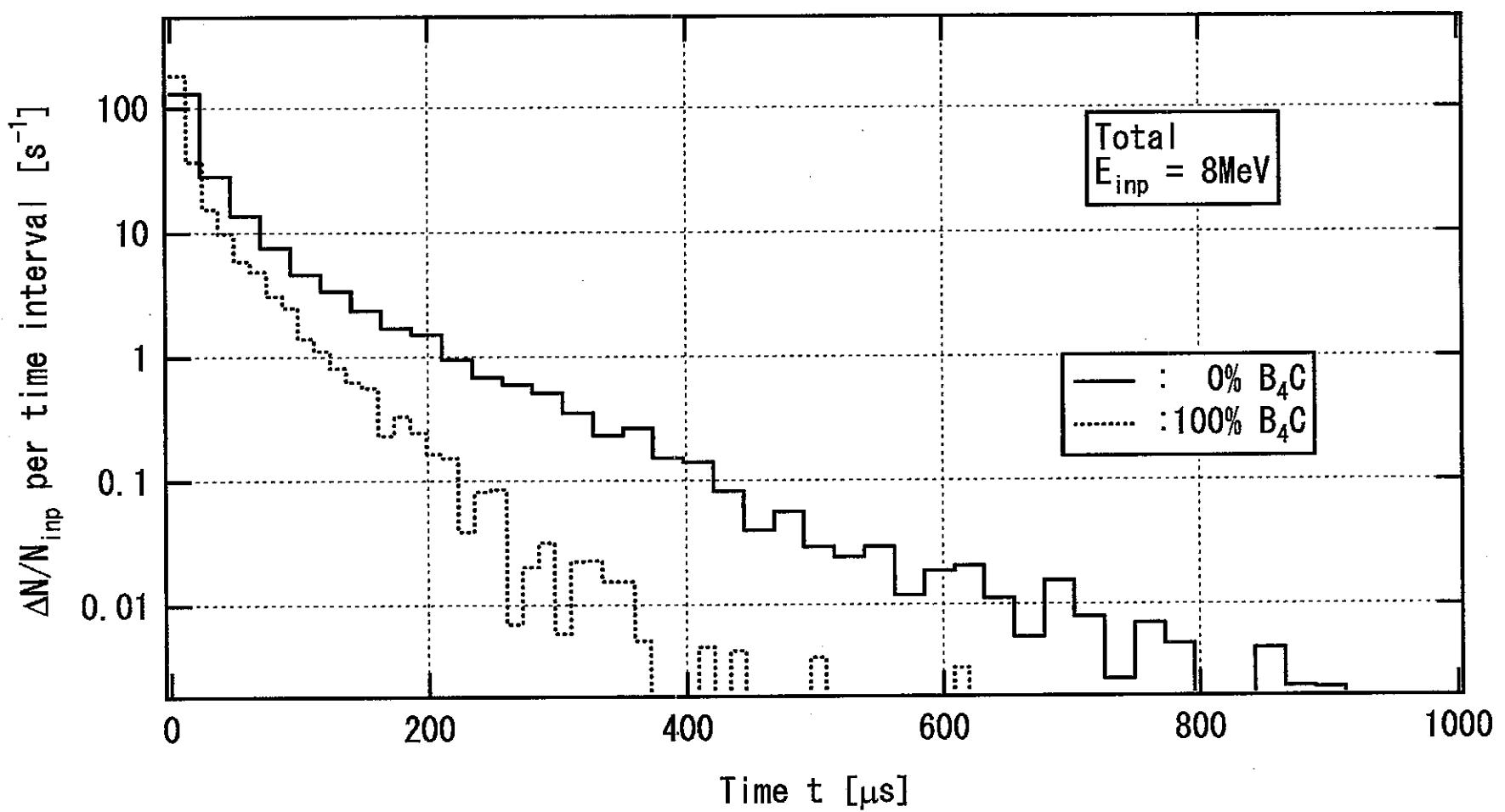


図 2.5-22_3 B_4C 有無の場合の中性子+荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 8 \text{ MeV}$)

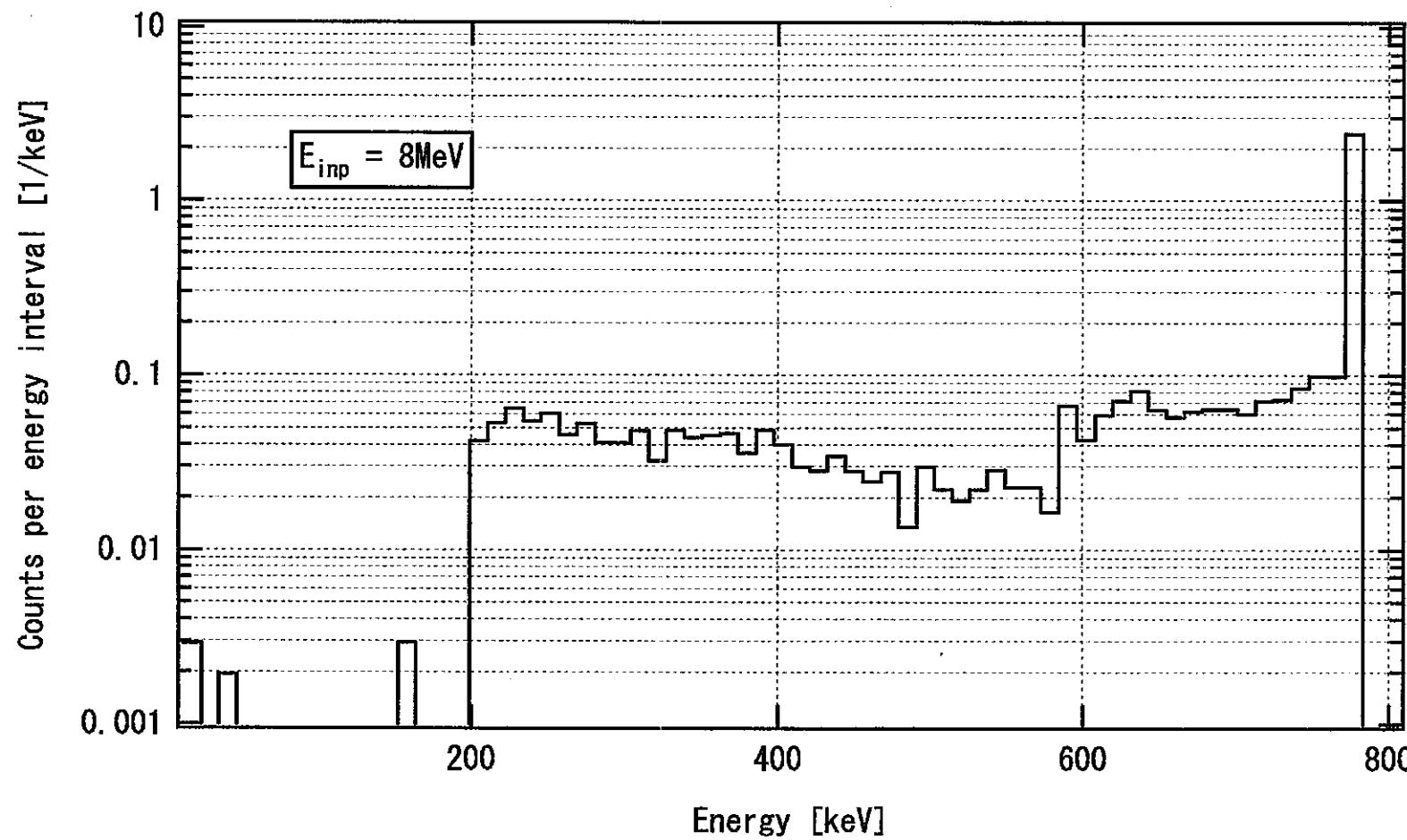


図 2.5-22_4 ^3He 比例計数管（レムカウンター）による中性子 ($E_n = 8\text{MeV}$) の波高分布

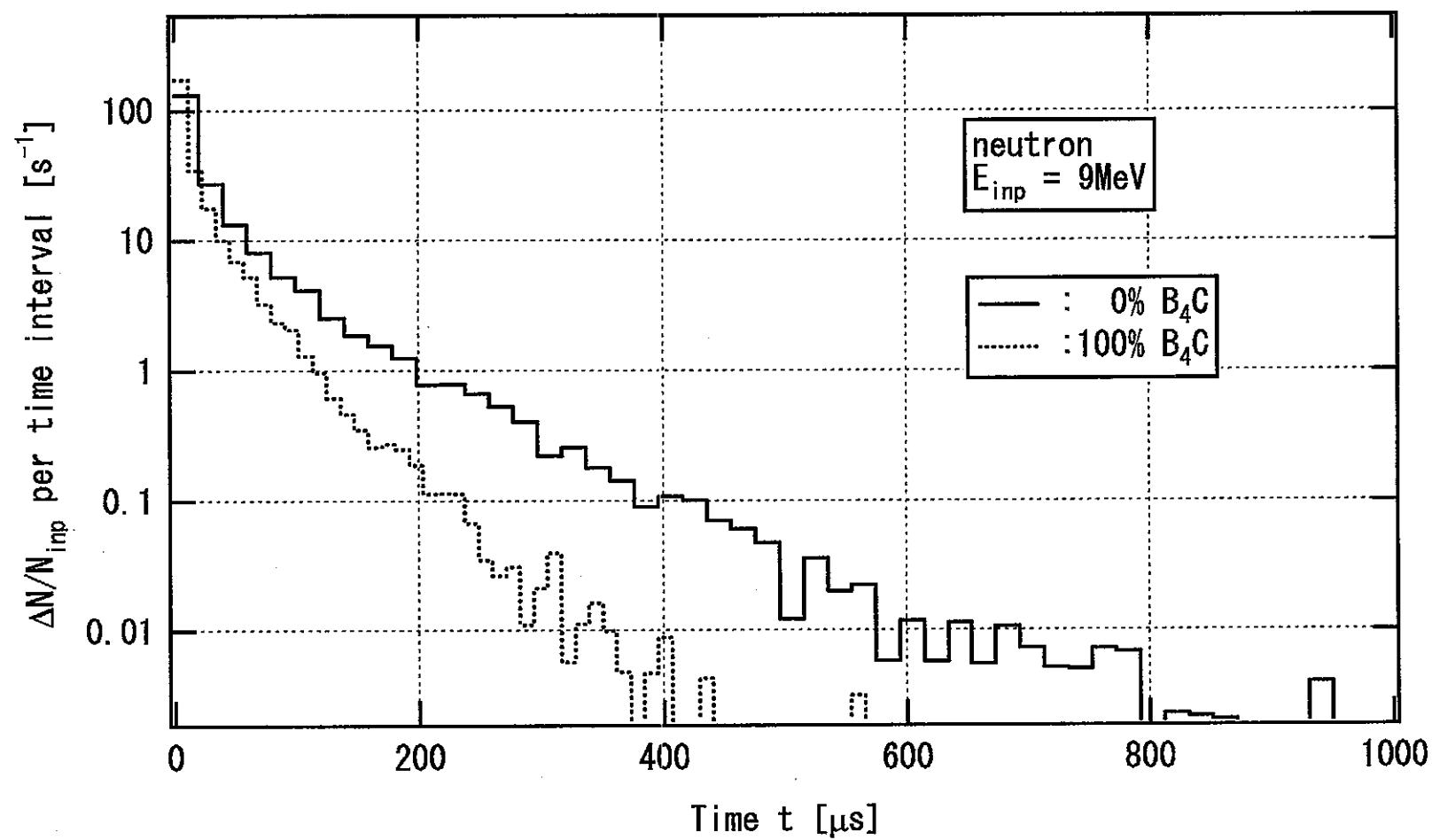


図 2.5-23_1 B_4C 有無の場合の中性子の TOP 分布 ($E_n = 9 \text{ MeV}$)

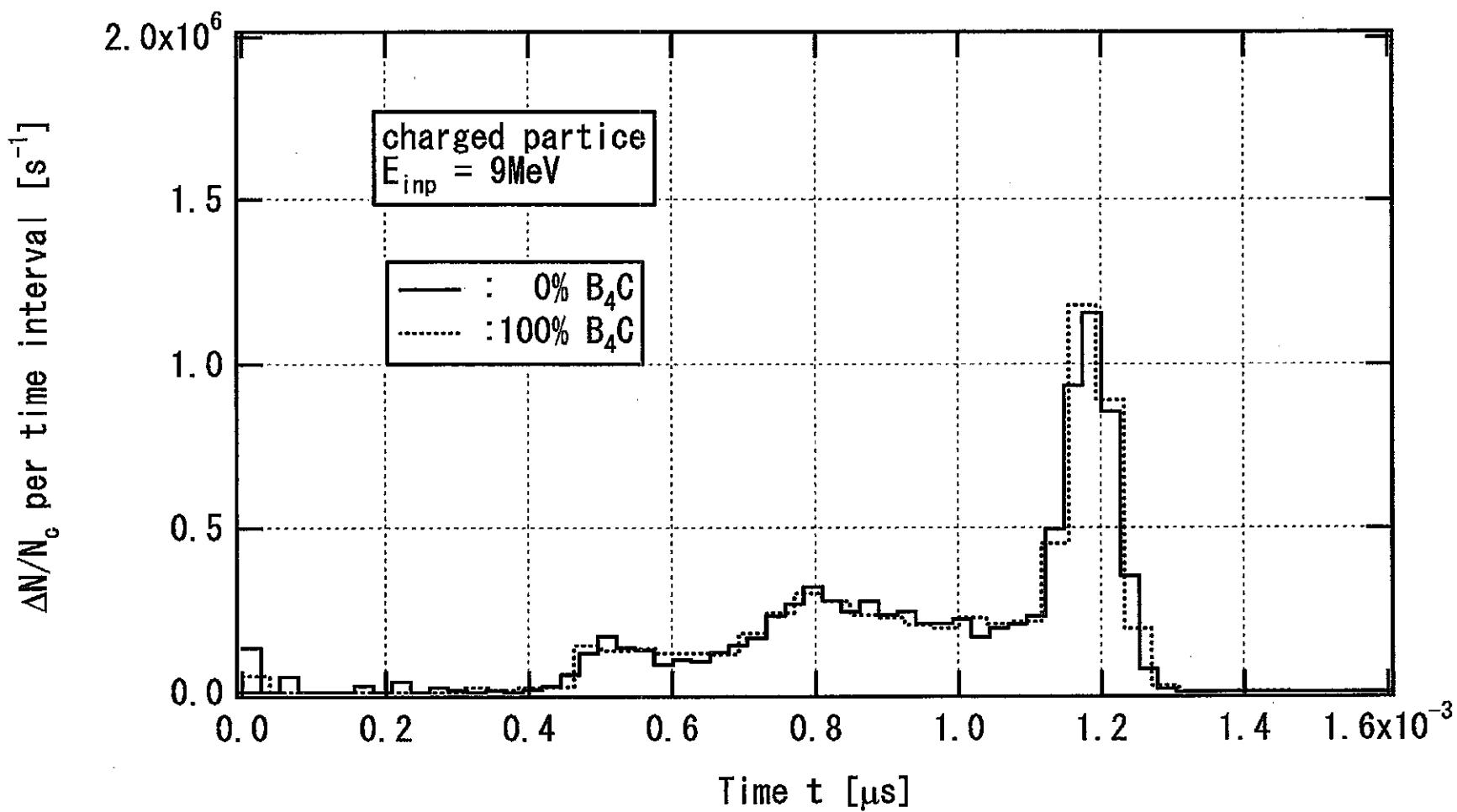


図 2.5-23_2 B_4C 有無の場合の荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 9 \text{ MeV}$)

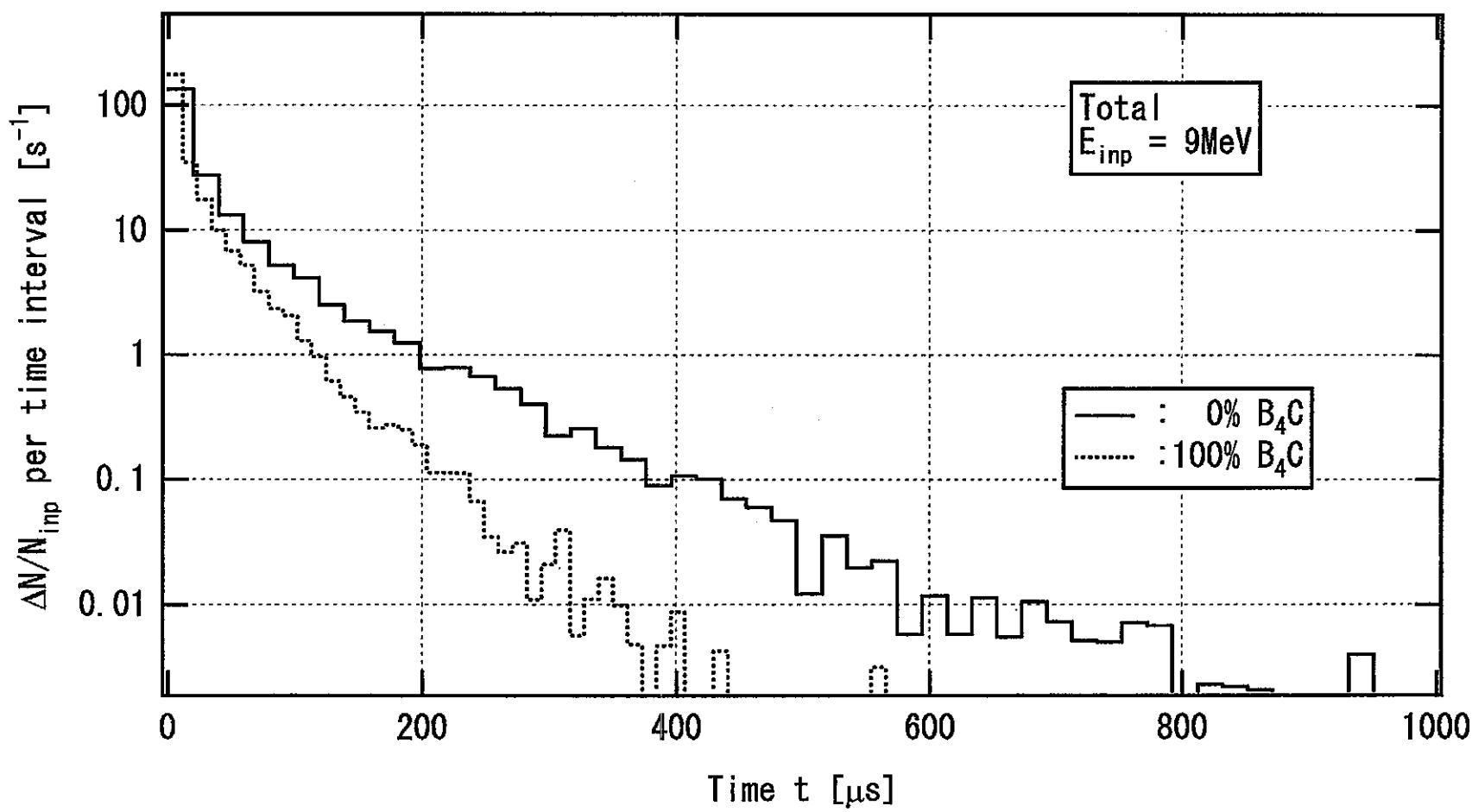


図 2.5-23_3 B_4C 有無の場合の中性子+荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 9 \text{ MeV}$)

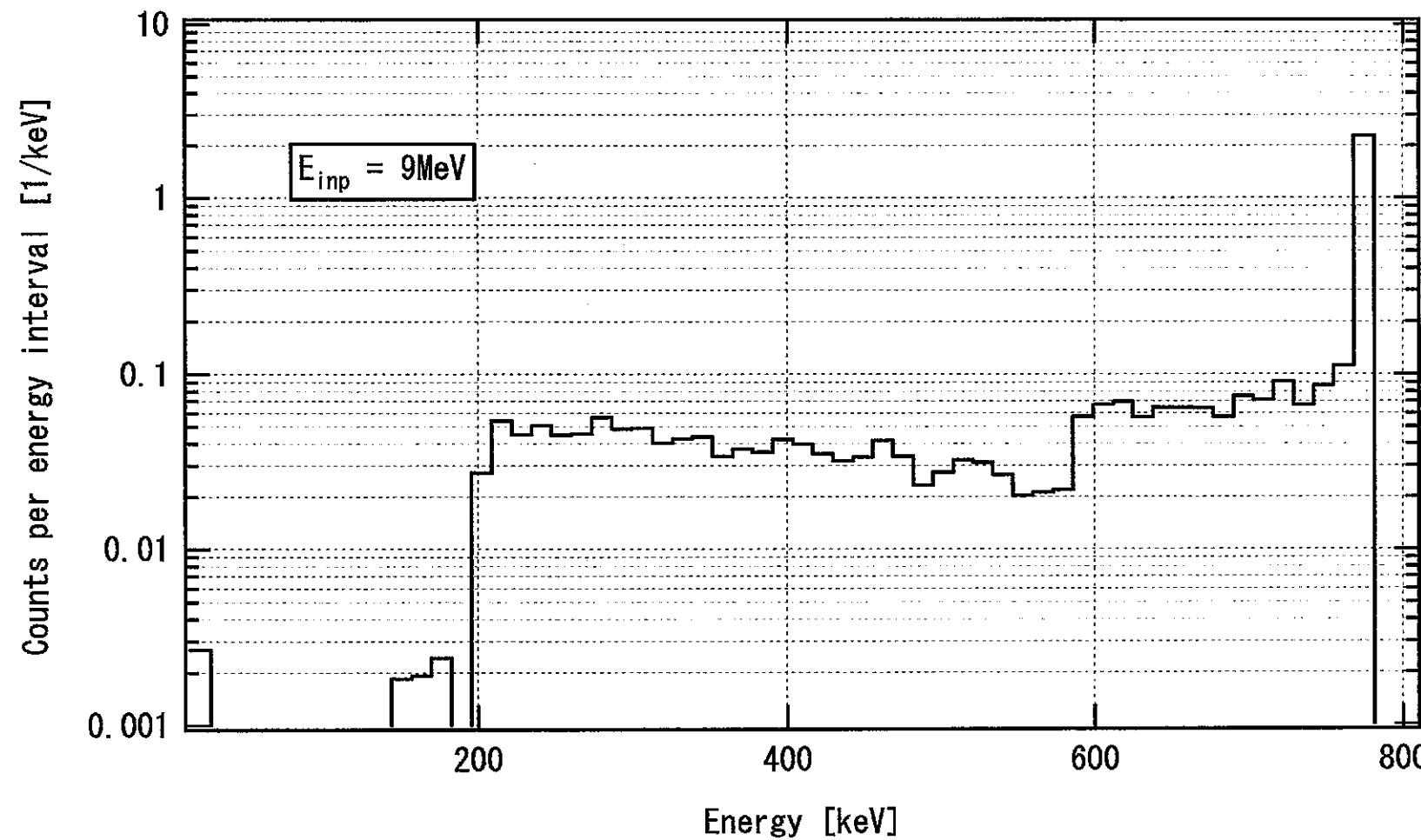


図 2.5-23_4 ${}^3\text{He}$ 比例計数管（レムカウンター）による中性子 ($E_n = 9\text{MeV}$) の波高分布

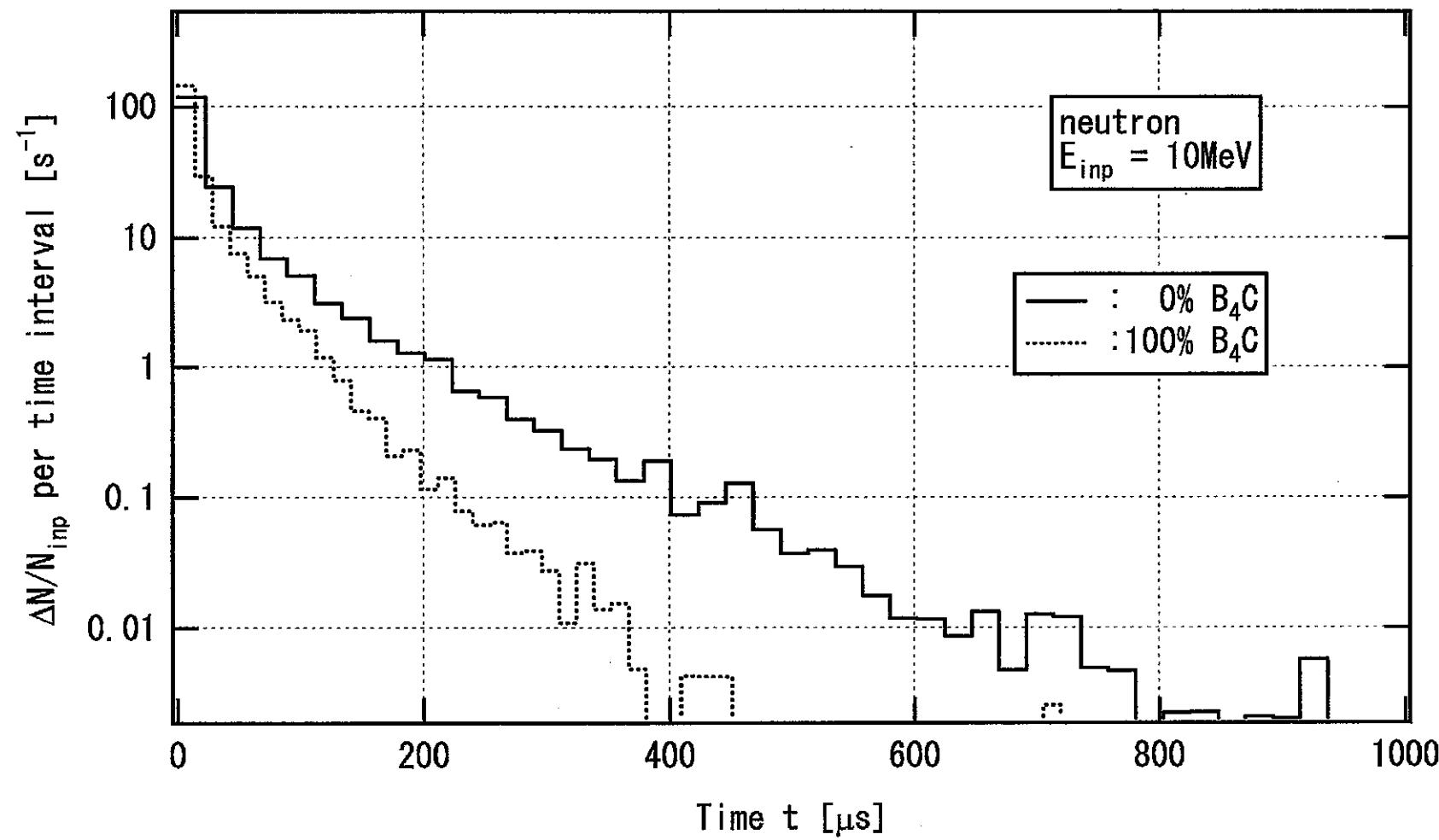


図 2.5-24_1 B_4C 有無の場合の中性子の TOP 分布 ($E_n = 10\text{MeV}$)

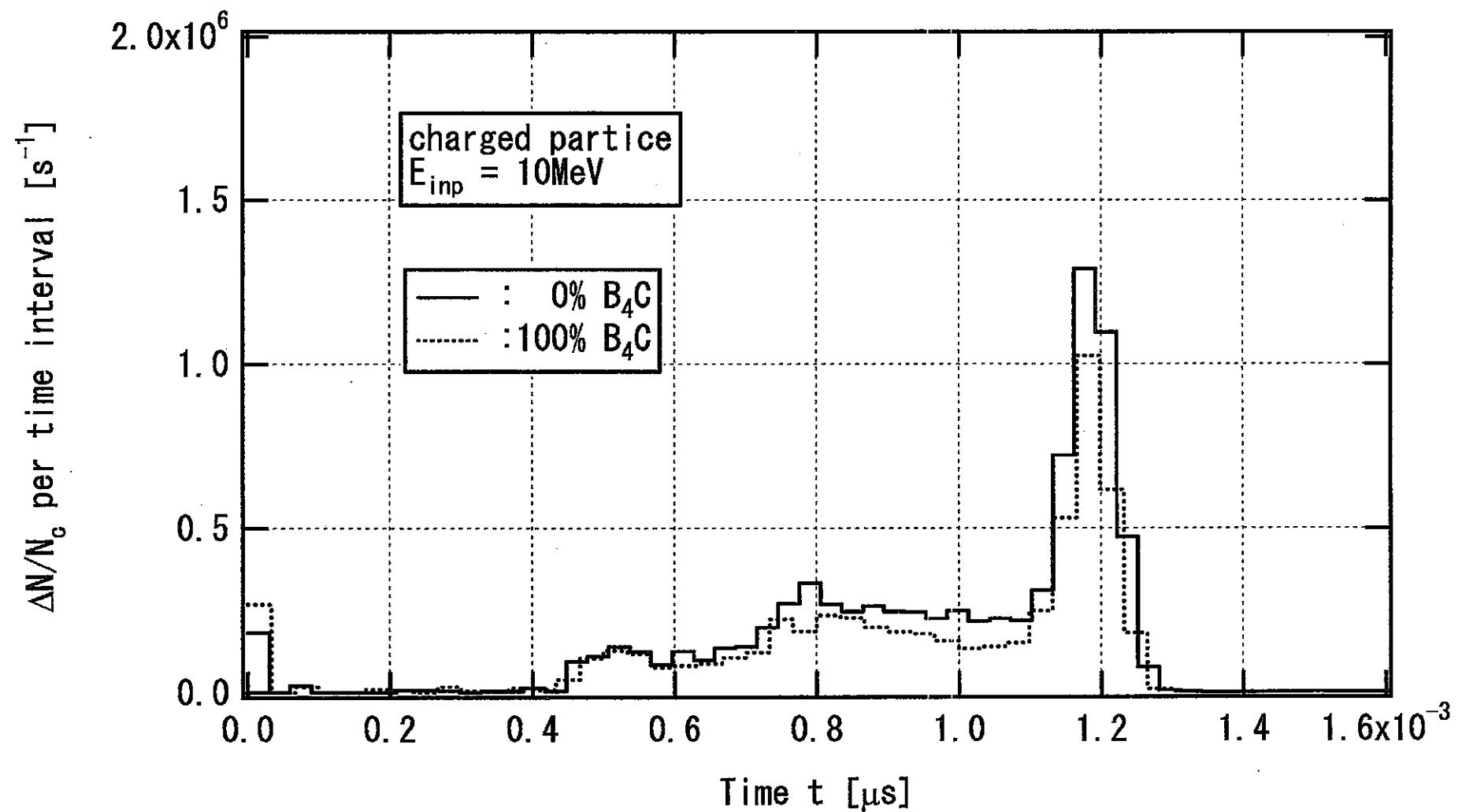


図 2.5-24_2 B_4C 有無の場合の荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 10\text{MeV}$)

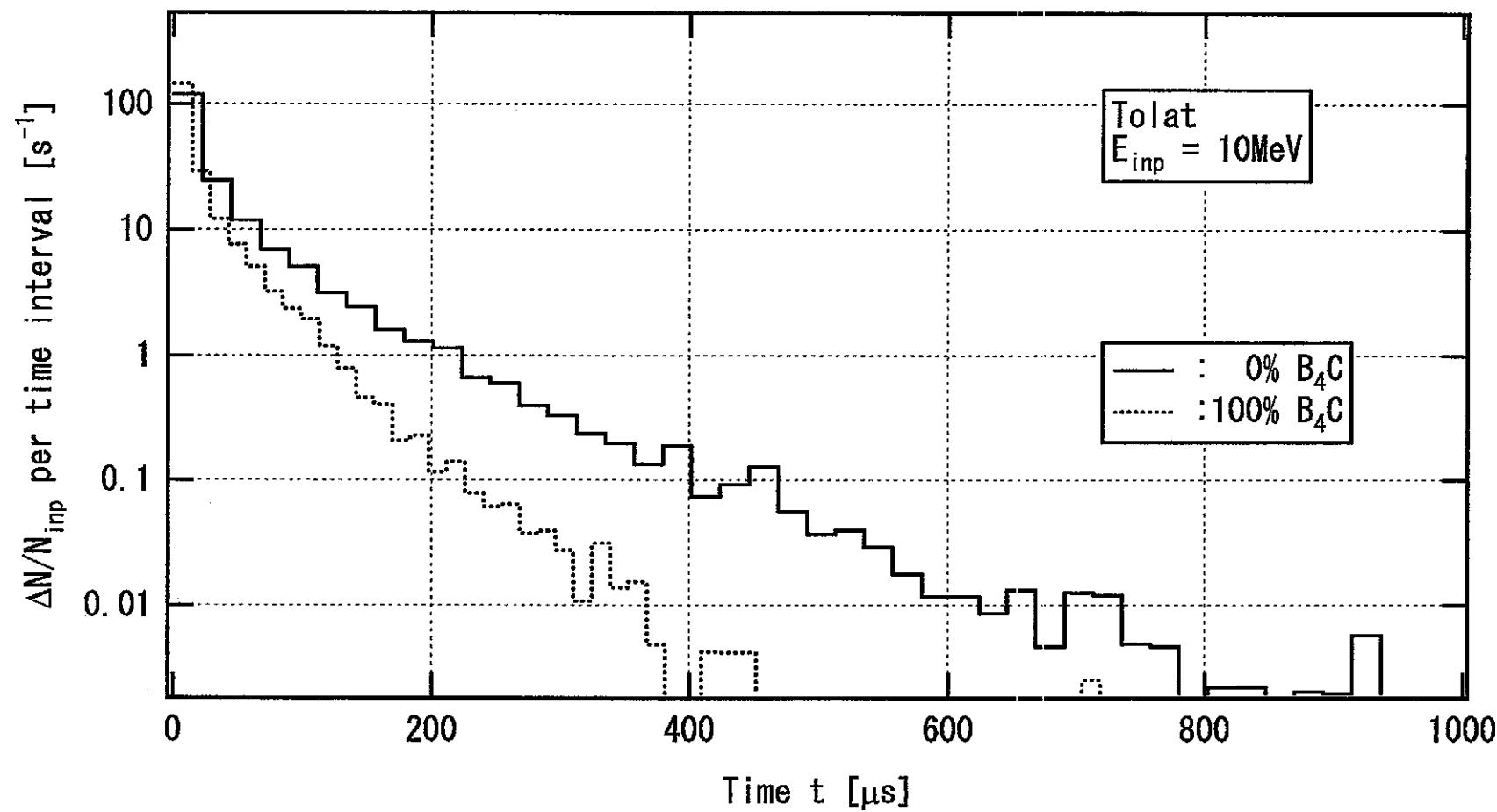


図 2.5-24_3 B_4C 有無の場合の中性子+荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 10 \text{ MeV}$)

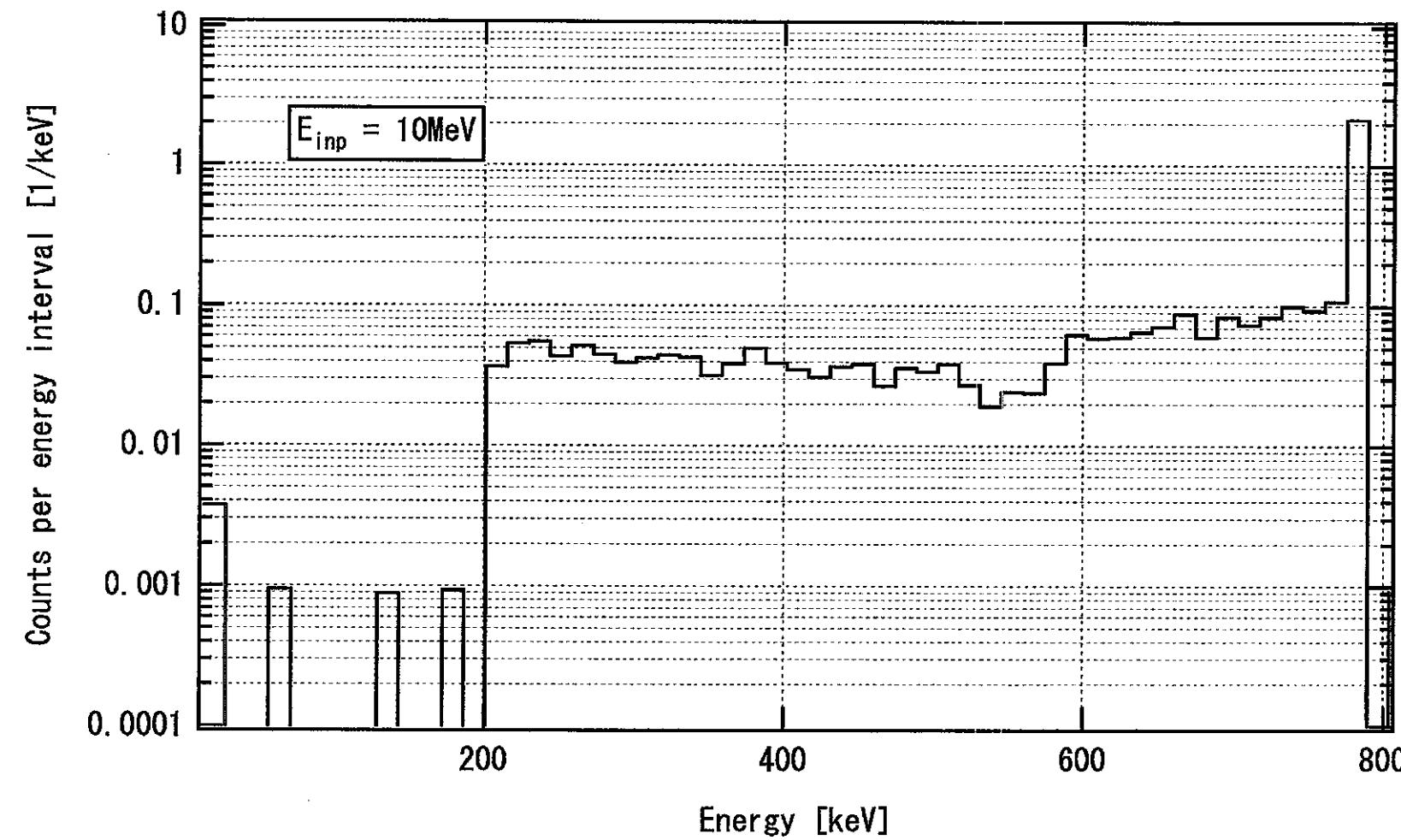


図 2.5-24_4 ${}^3\text{He}$ 比例計数管（レムカウンター）による中性子 ($E_n = 10\text{MeV}$) の波高分布

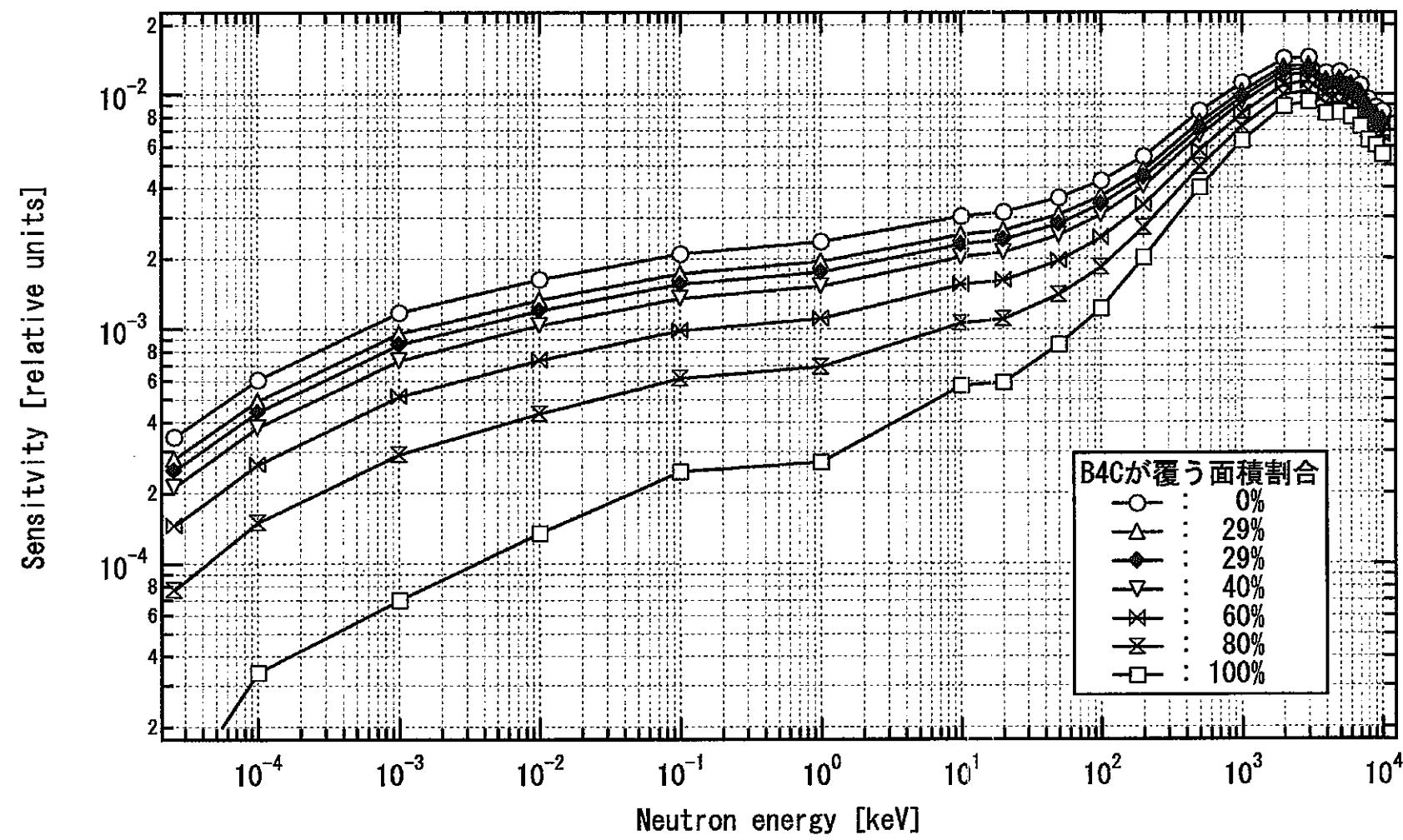


図 2.5-25 0%, 20%, 40%, 60%, 80% 100% B₄C が覆う場合のレムカウンターの感度特性

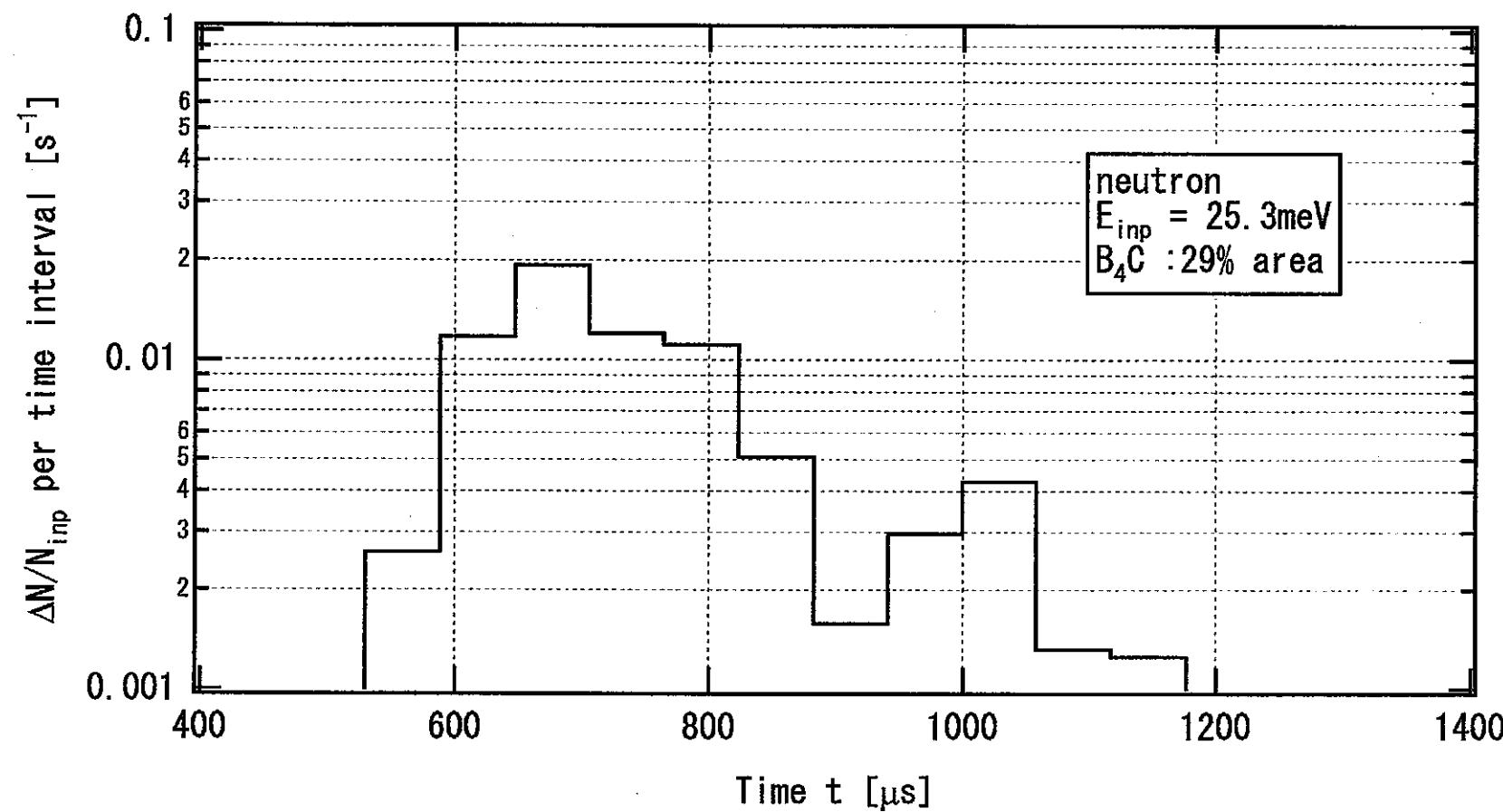


図 2.5-26_1 B_4C が 29% の面積を覆う場合の中性子の TOP 分布 ($E_n = 25.3\text{meV}$)

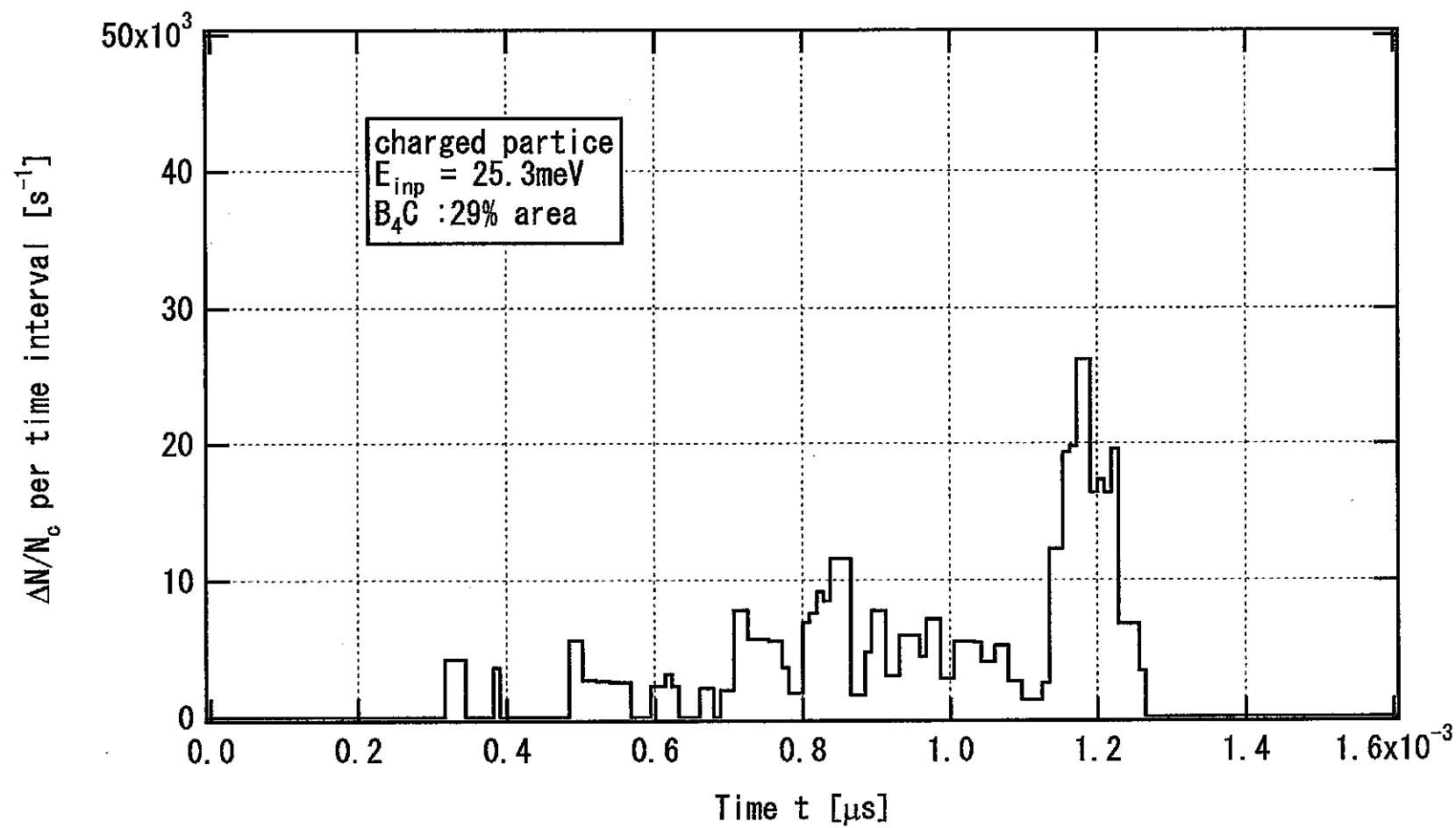


図 2.5-26_2 B_4C が 29% の面積を覆う場合の荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 25.3\text{meV}$)

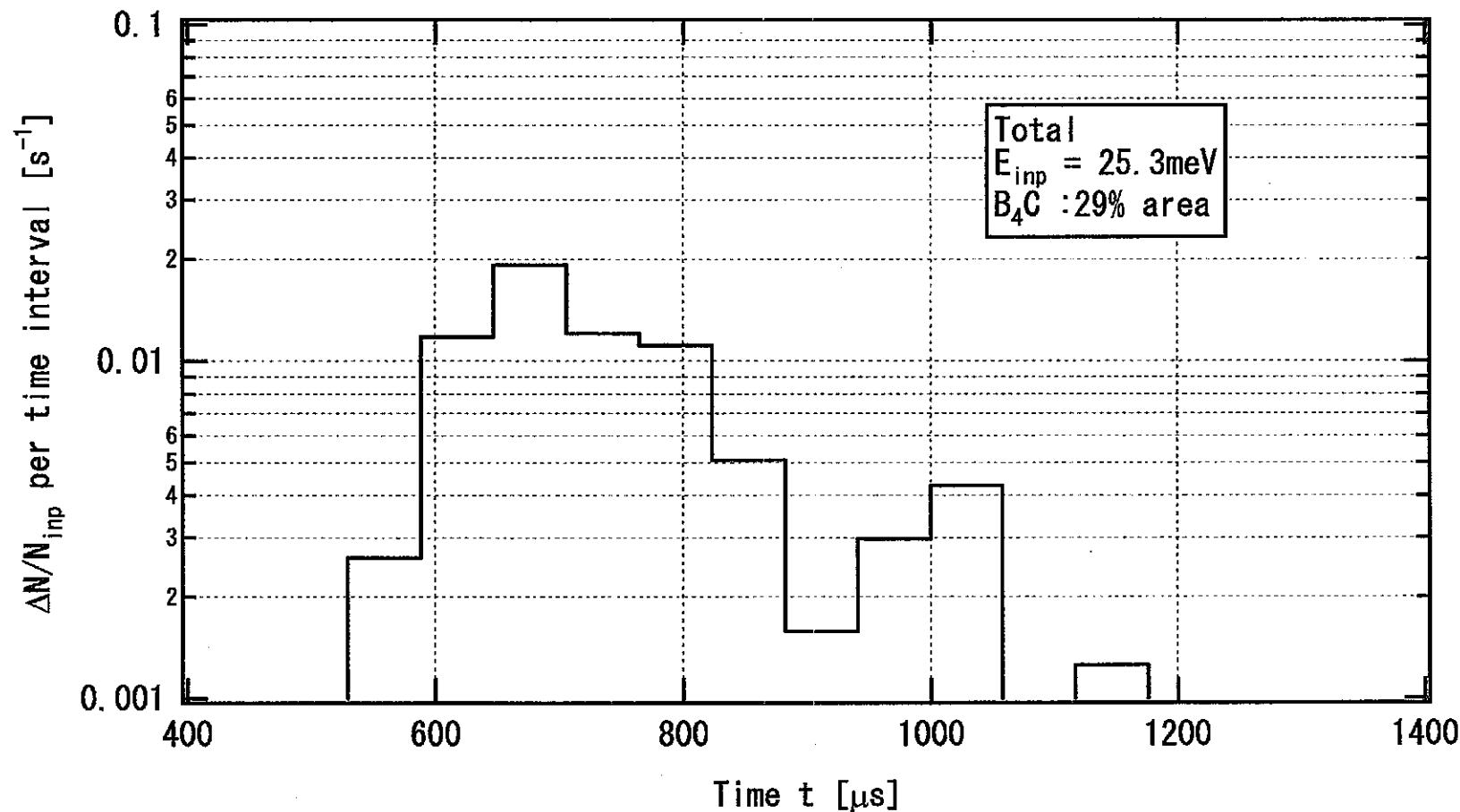


図 2.5-26_3 B_4C が 29% の面積を覆う場合の中性子 + 荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 25.3 \text{ meV}$)

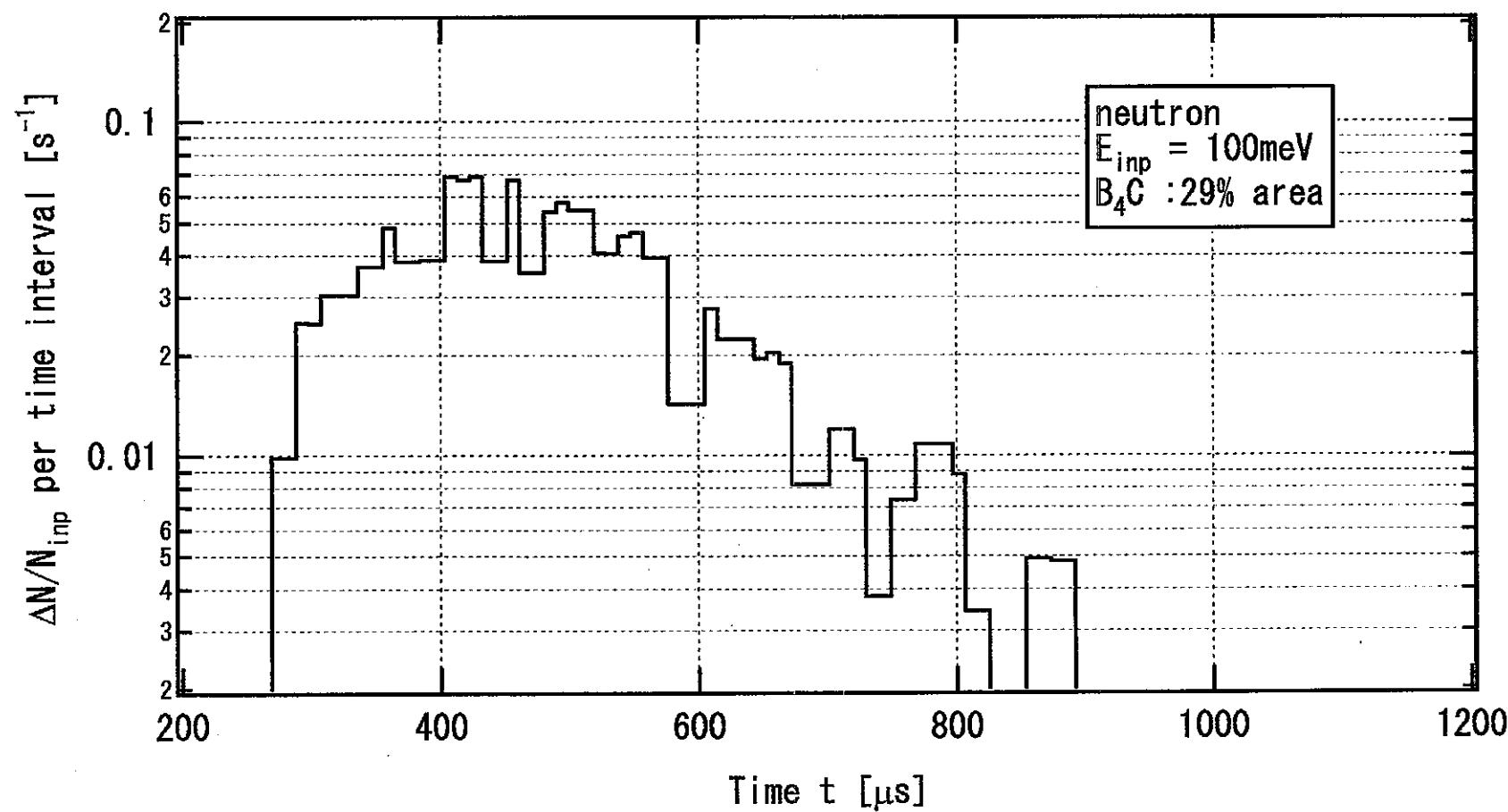


図 2.5-27_1 B_4C が 29% の面積を覆う場合の中性子の TOP 分布 ($E_n = 100\text{meV}$)

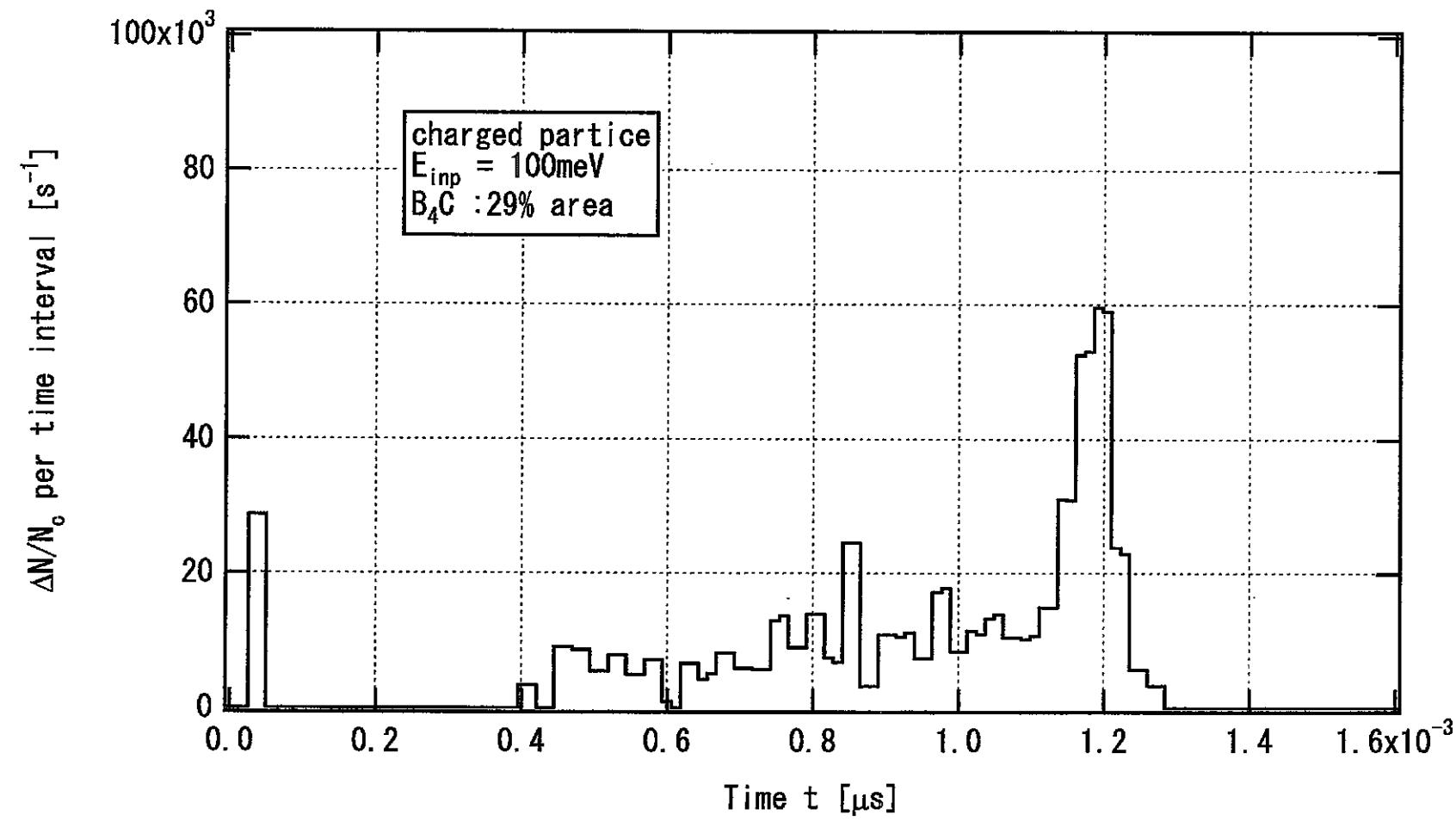


図 2.5-27_2 B_4C が 29% の面積を覆う場合の荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 100\text{meV}$)

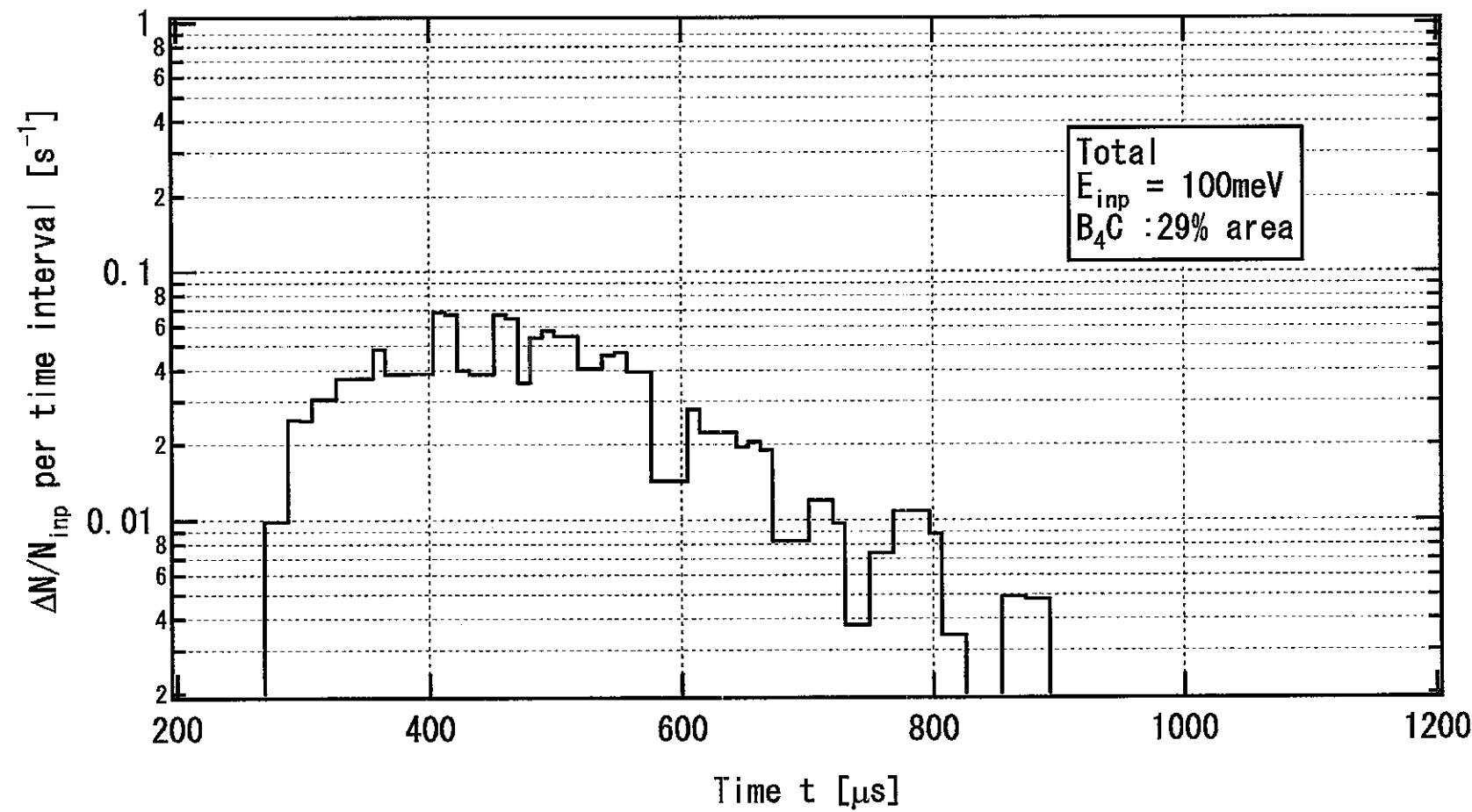


図 2.5-27_3 B_4C が 29% の面積を覆う場合の中性子 + 荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 100\text{meV}$)

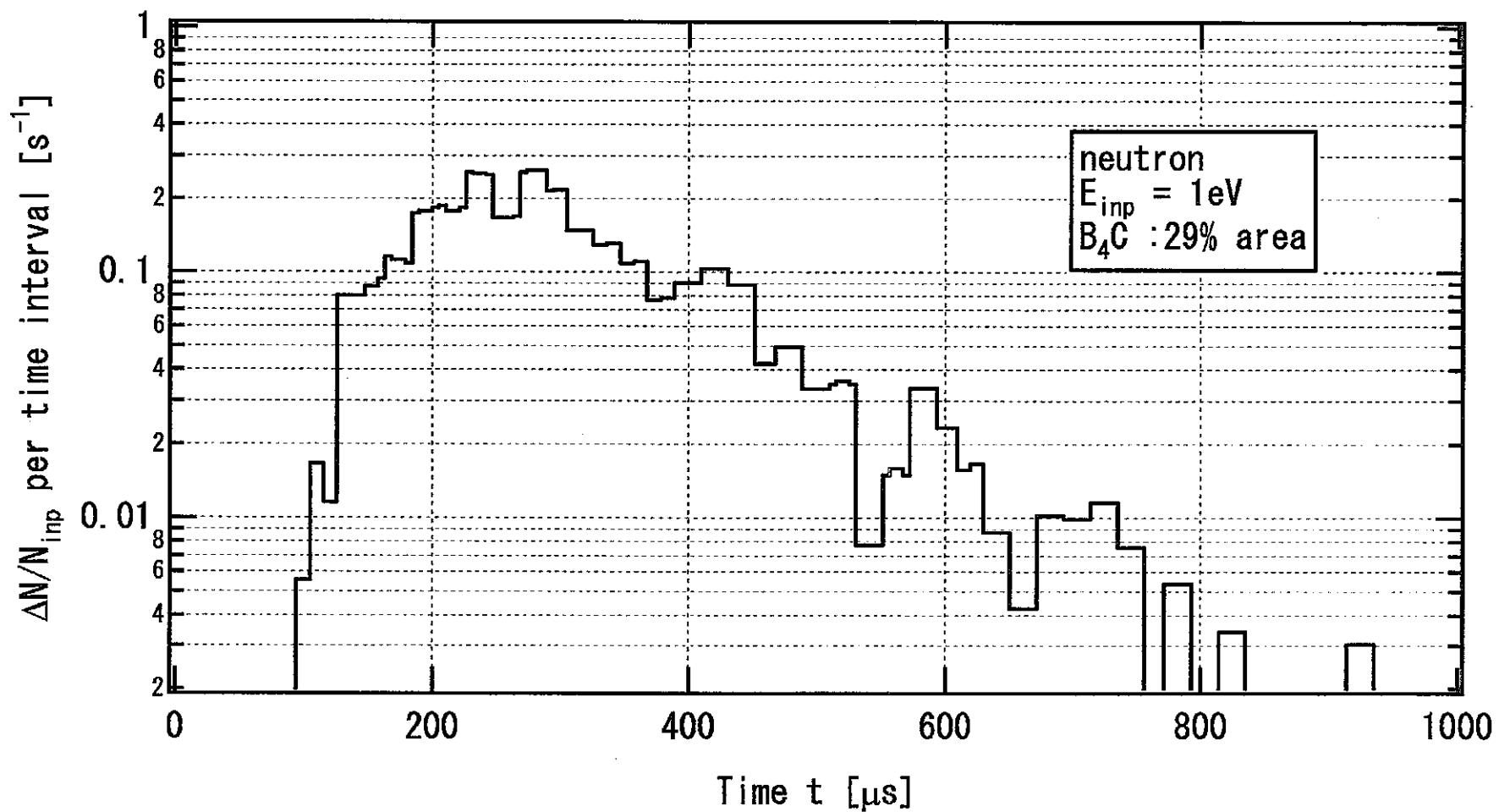


図 2.5-28_1 B_4C が 29% の面積を覆う場合の中性子の TOP 分布 ($E_n = 1 \text{ eV}$)

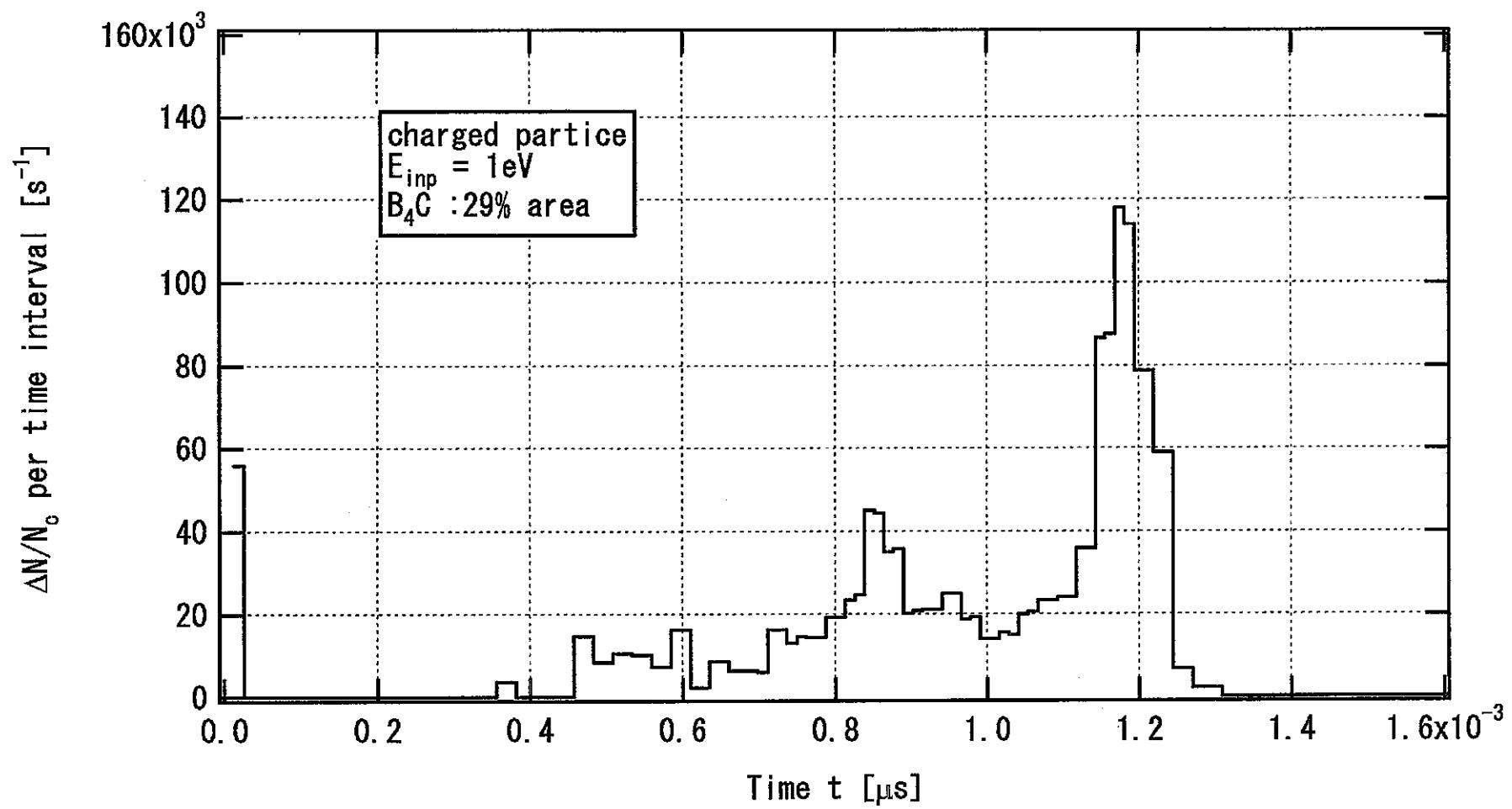


図 2.5-28_2 B_4C が 29% の面積を覆う場合の荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 1 \text{ eV}$)

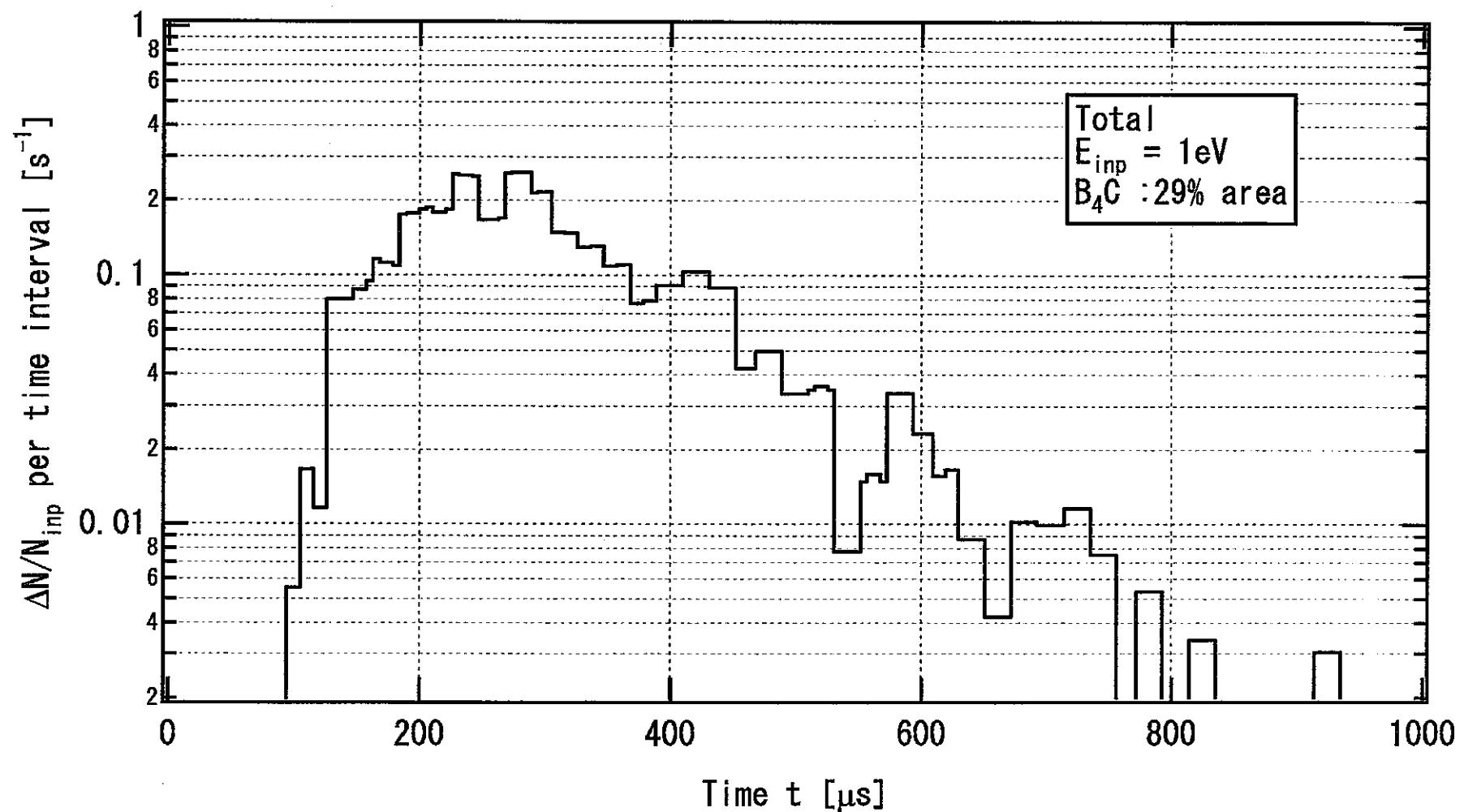


図 2.5-28_3 B₄C が 29% の面積を覆う場合の中性子 + 荷電粒子の TOP 分布 (E_n = 1 eV)

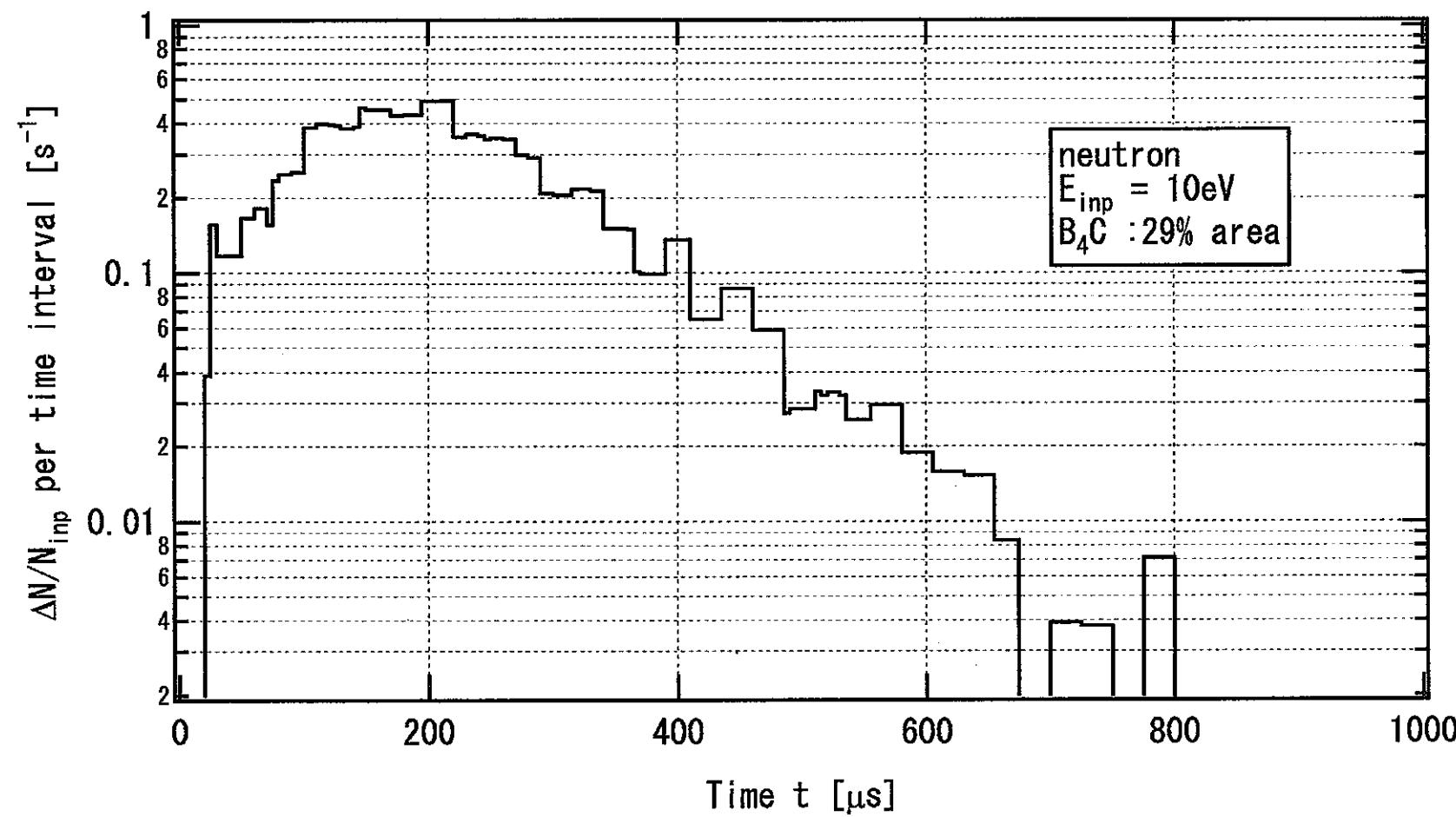


図 2.5-29_1 B_4C が 29% の面積を覆う場合の中性子の TOP 分布 ($E_n = 10\text{eV}$)

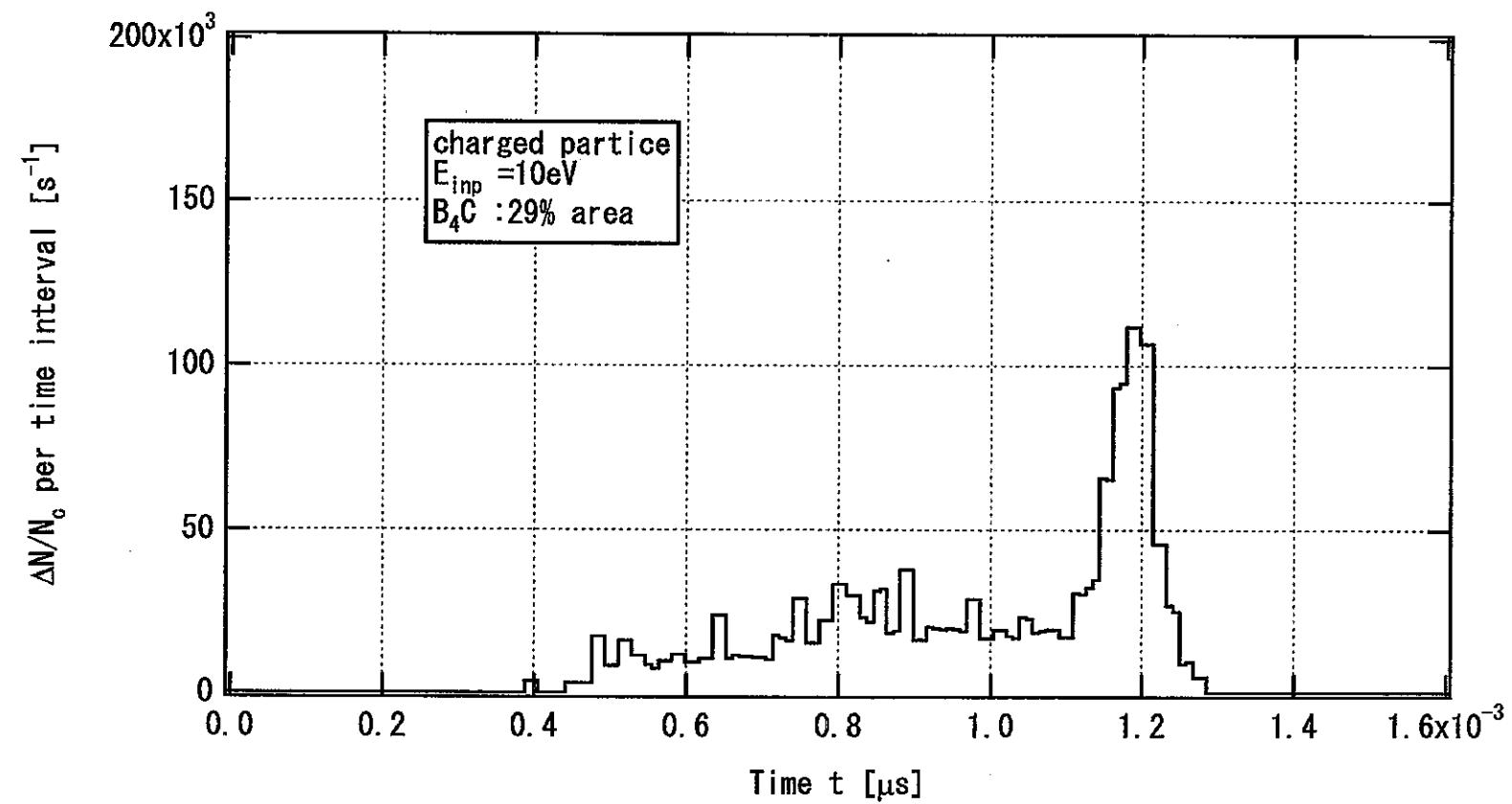


図 2.5-29_2 B_4C が 29% の面積を覆う場合の荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 10\text{eV}$)

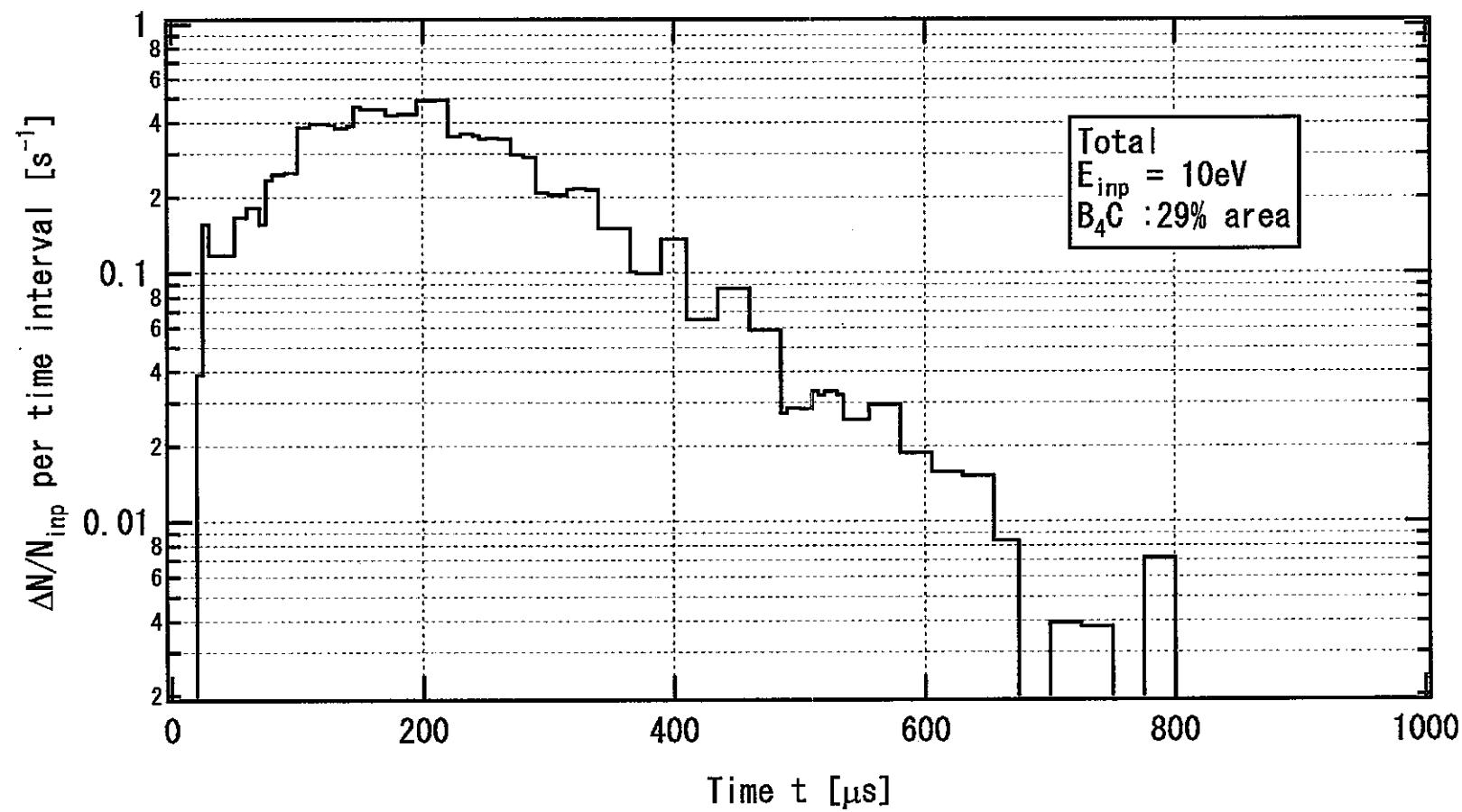


図 2.5-29_3 B_4C が 29% の面積を覆う場合の中性子 + 荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 10 \text{ eV}$)

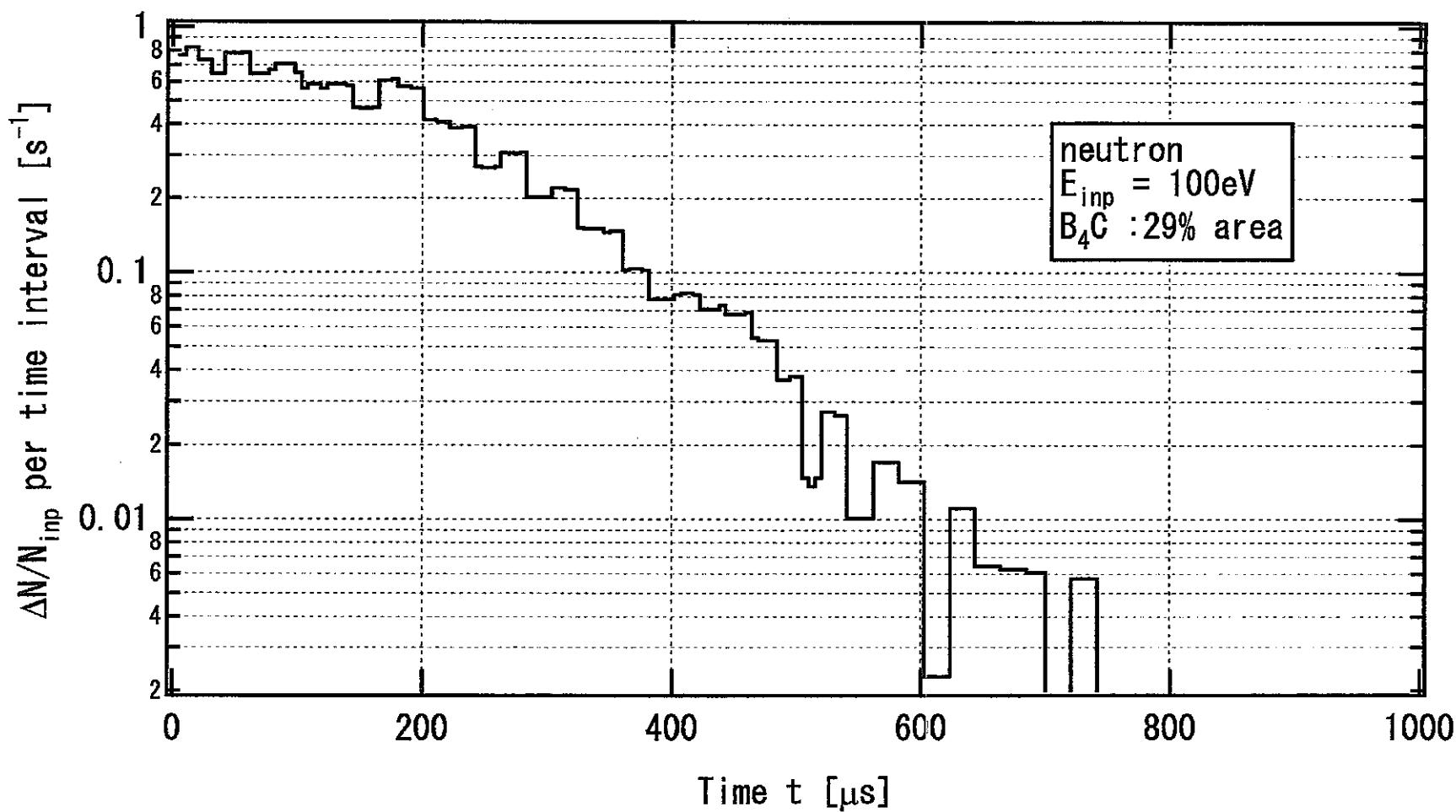


図 2.5-30_1 B_4C が 29% の面積を覆う場合の中性子の TOP 分布 ($E_n = 100\text{eV}$)

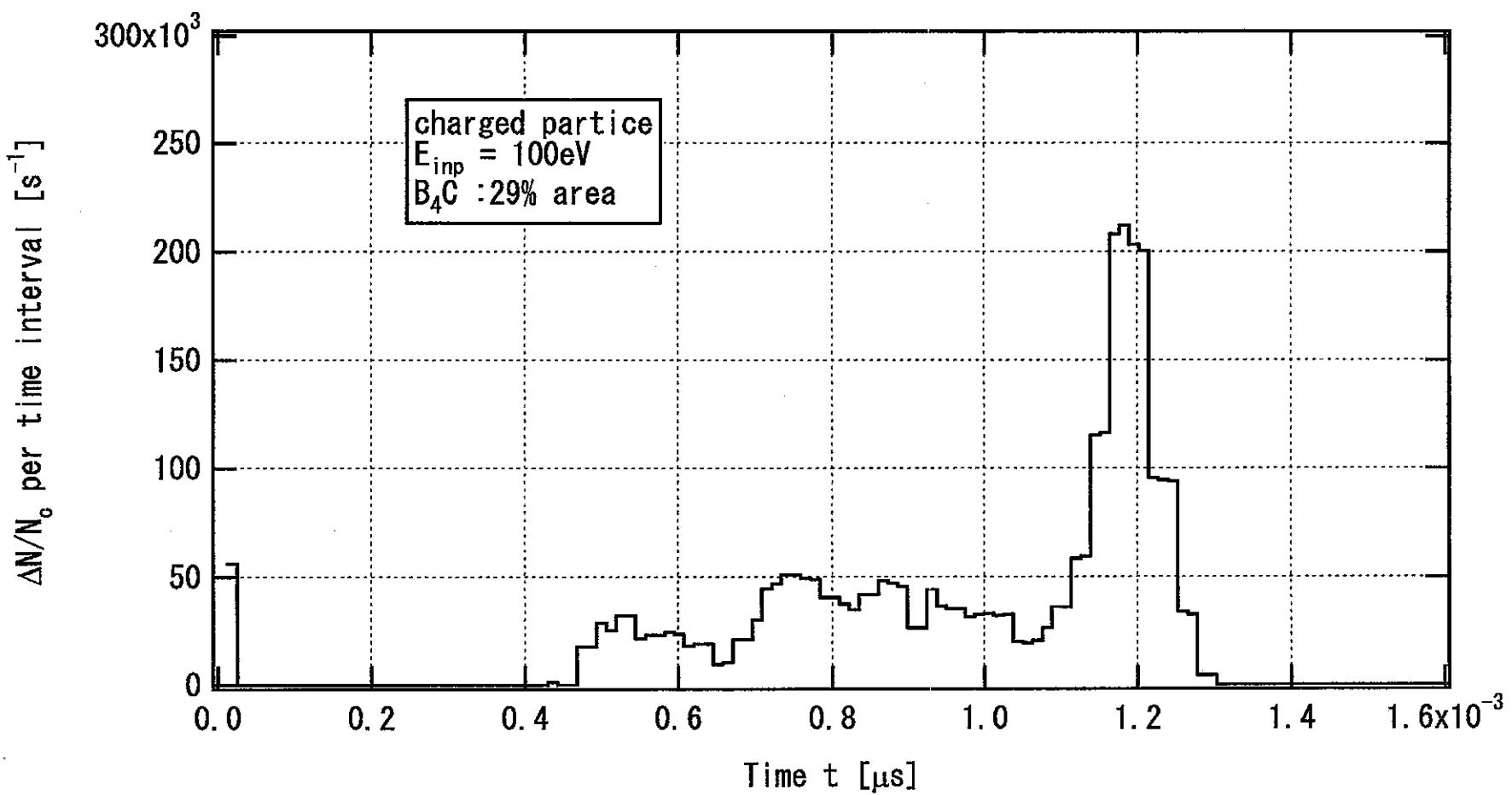


図 2.5-30_2 B_4C が 29% の面積を覆う場合の荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 100\text{eV}$)

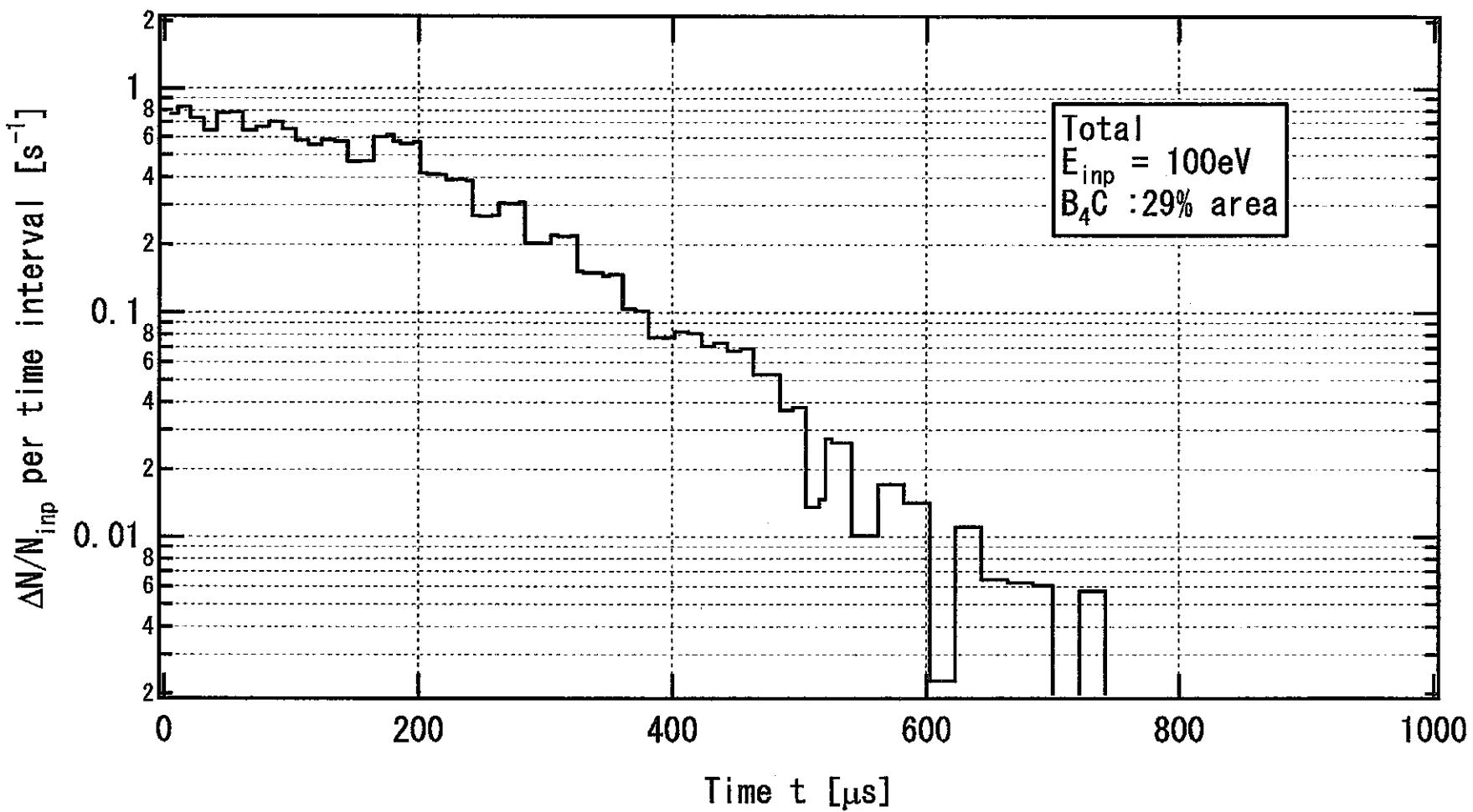


図 2.5-30_3 B_4C が 29% の面積を覆う場合の中性子 + 荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 100\text{eV}$)

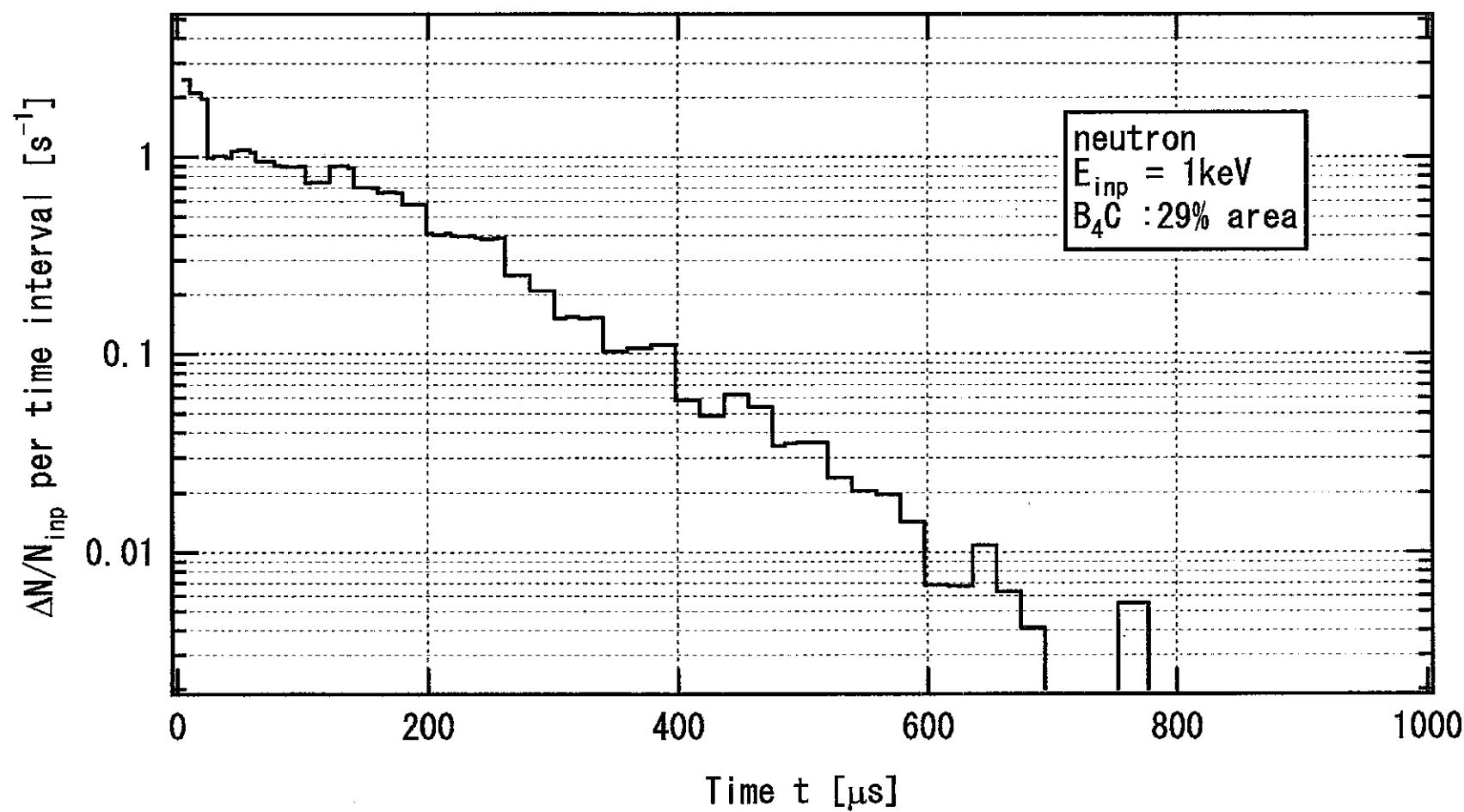


図 2.5-31_1 B_4C が 29% の面積を覆う場合の中性子の TOP 分布 ($E_n = 1\text{keV}$)

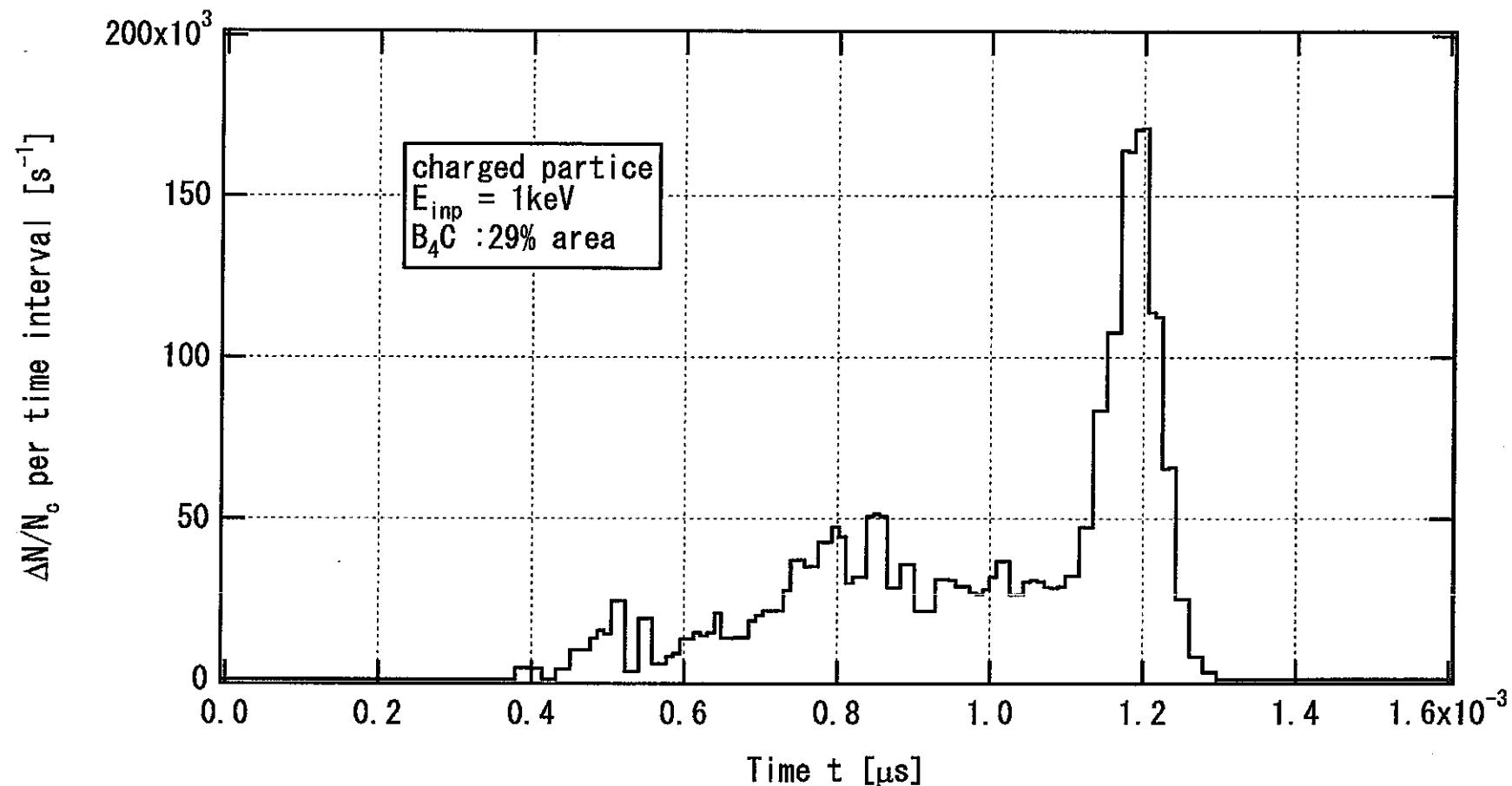


図 2.5-31_2 B_4C が 29% の面積を覆う場合の荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 1\text{keV}$)

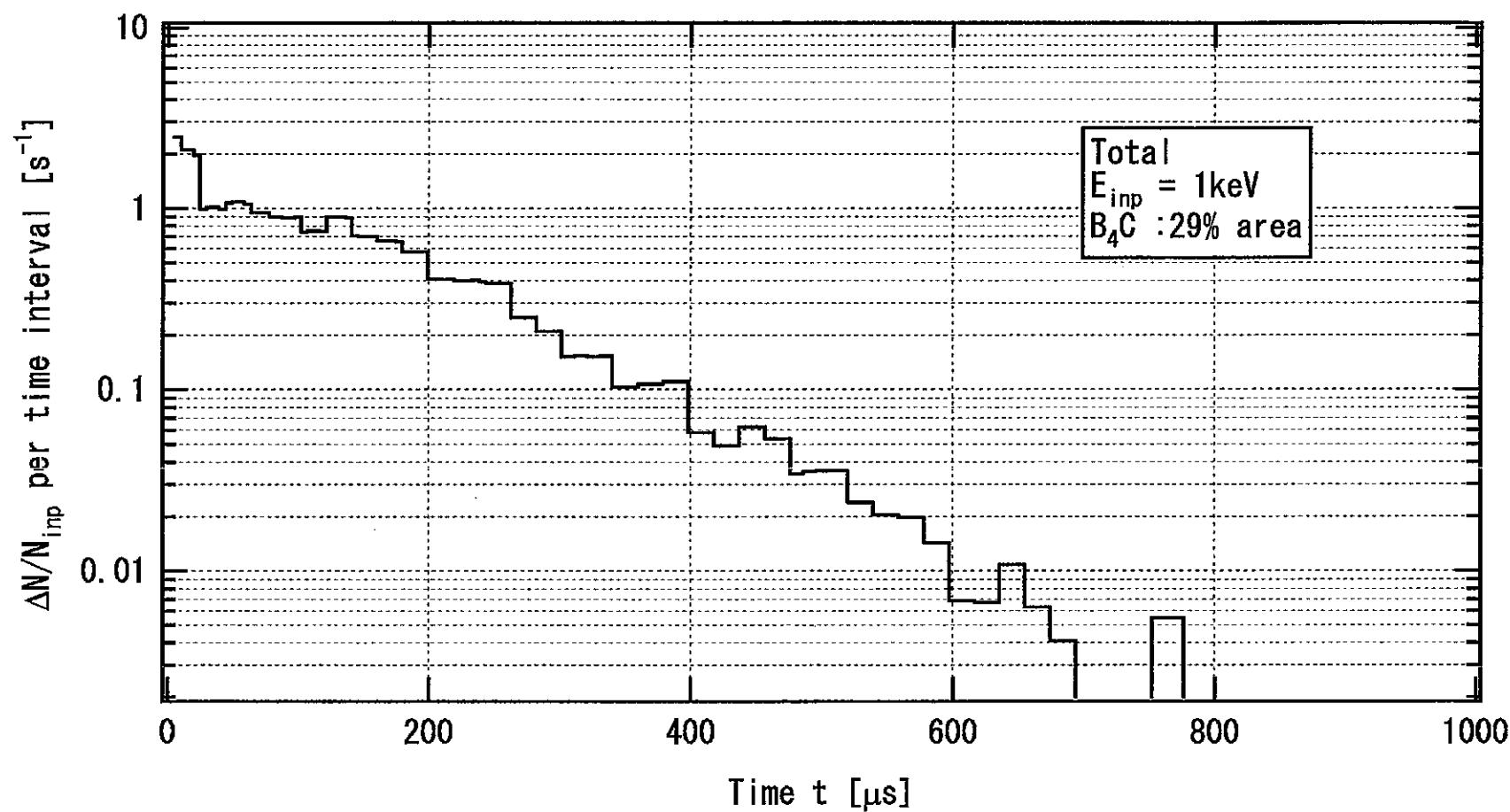


図 2.5-31_3 B_4C が 29% の面積を覆う場合の中性子 + 荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 1\text{keV}$)

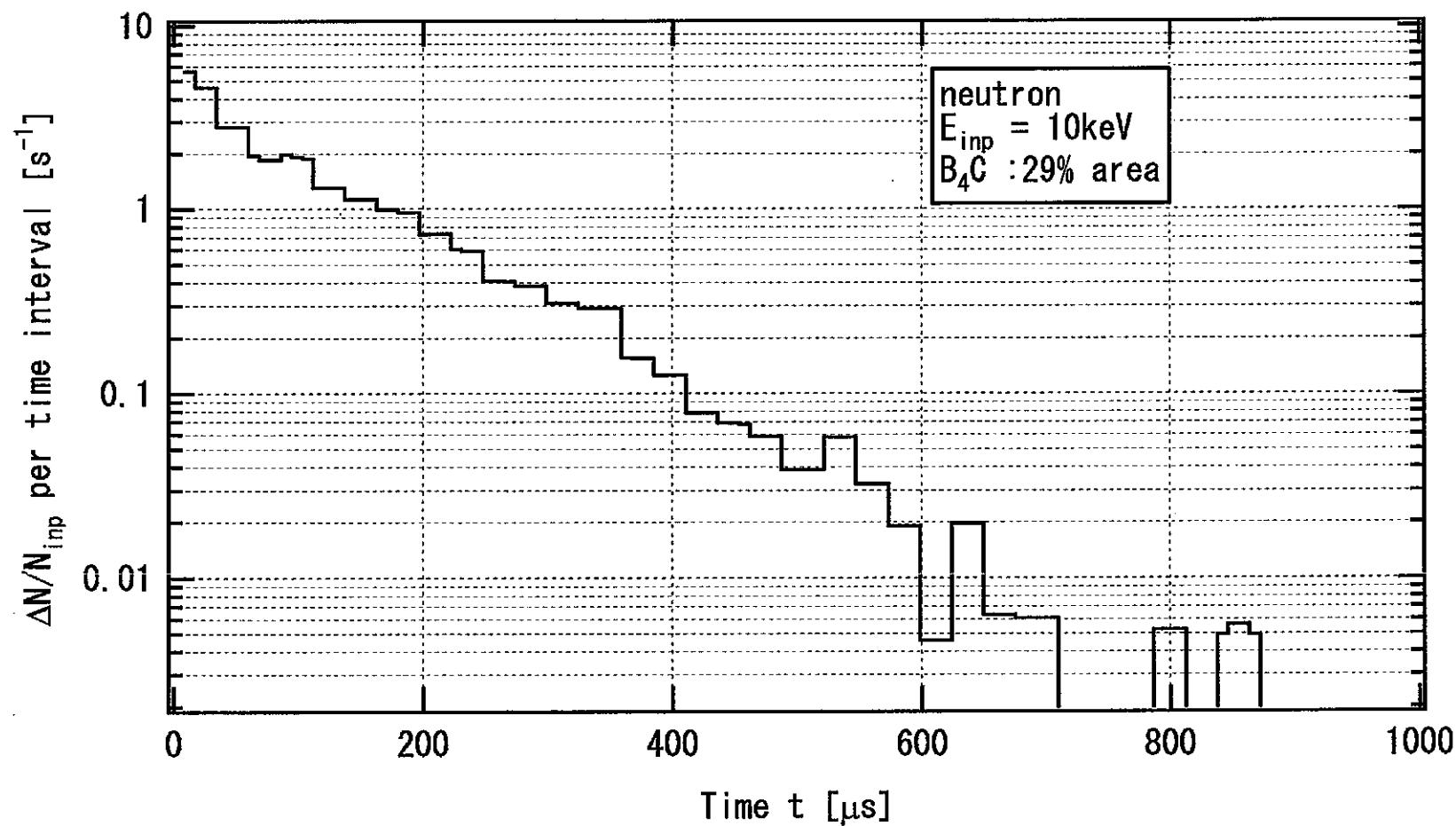


図 2.5-32_1 B_4C が 29% の面積を覆う場合の中性子の TOP 分布 ($E_{\text{n}} = 10 \text{ keV}$)

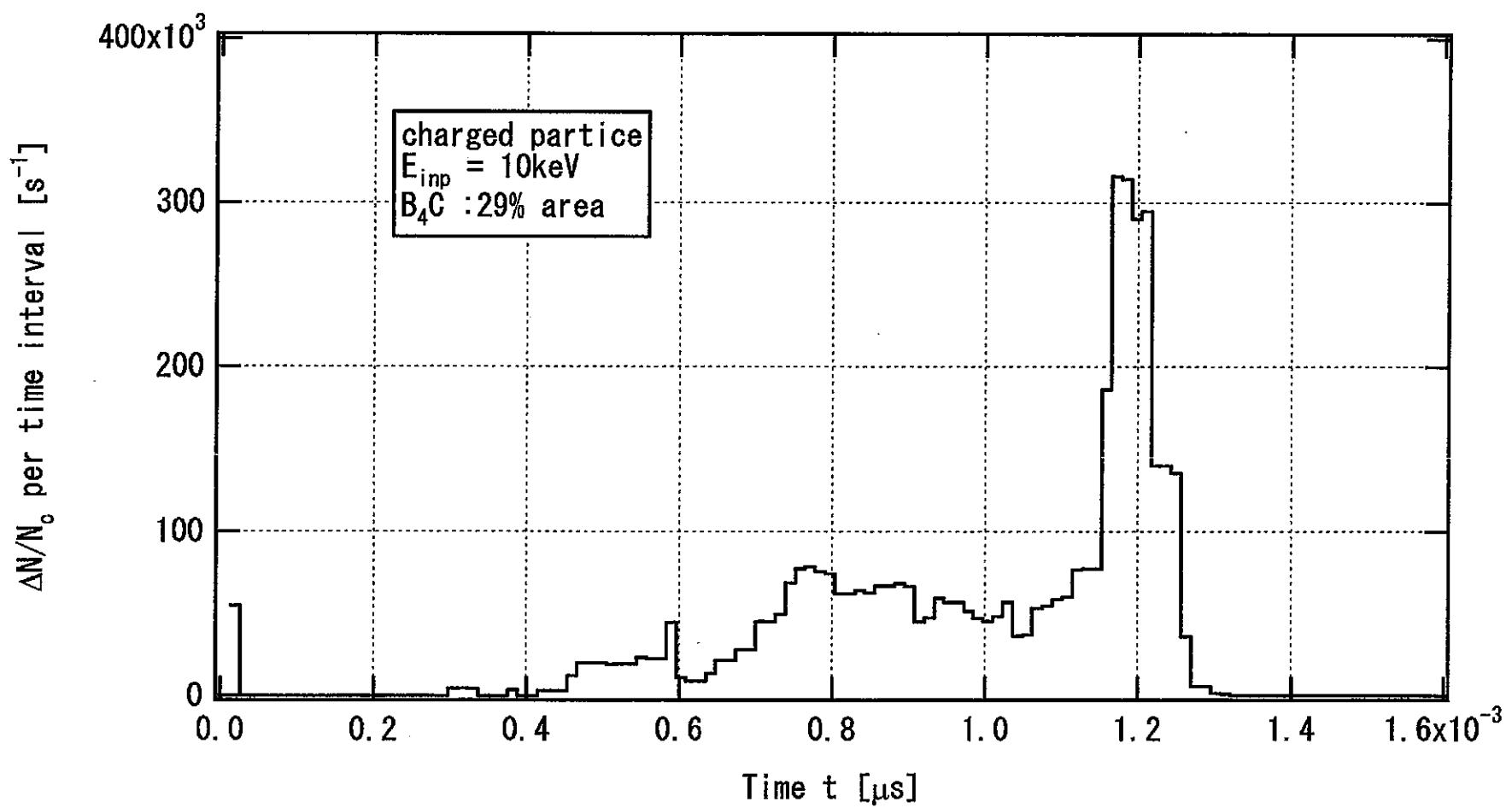


図 2.5-32_2 B_4C が 29% の面積を覆う場合の荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 10\text{keV}$)

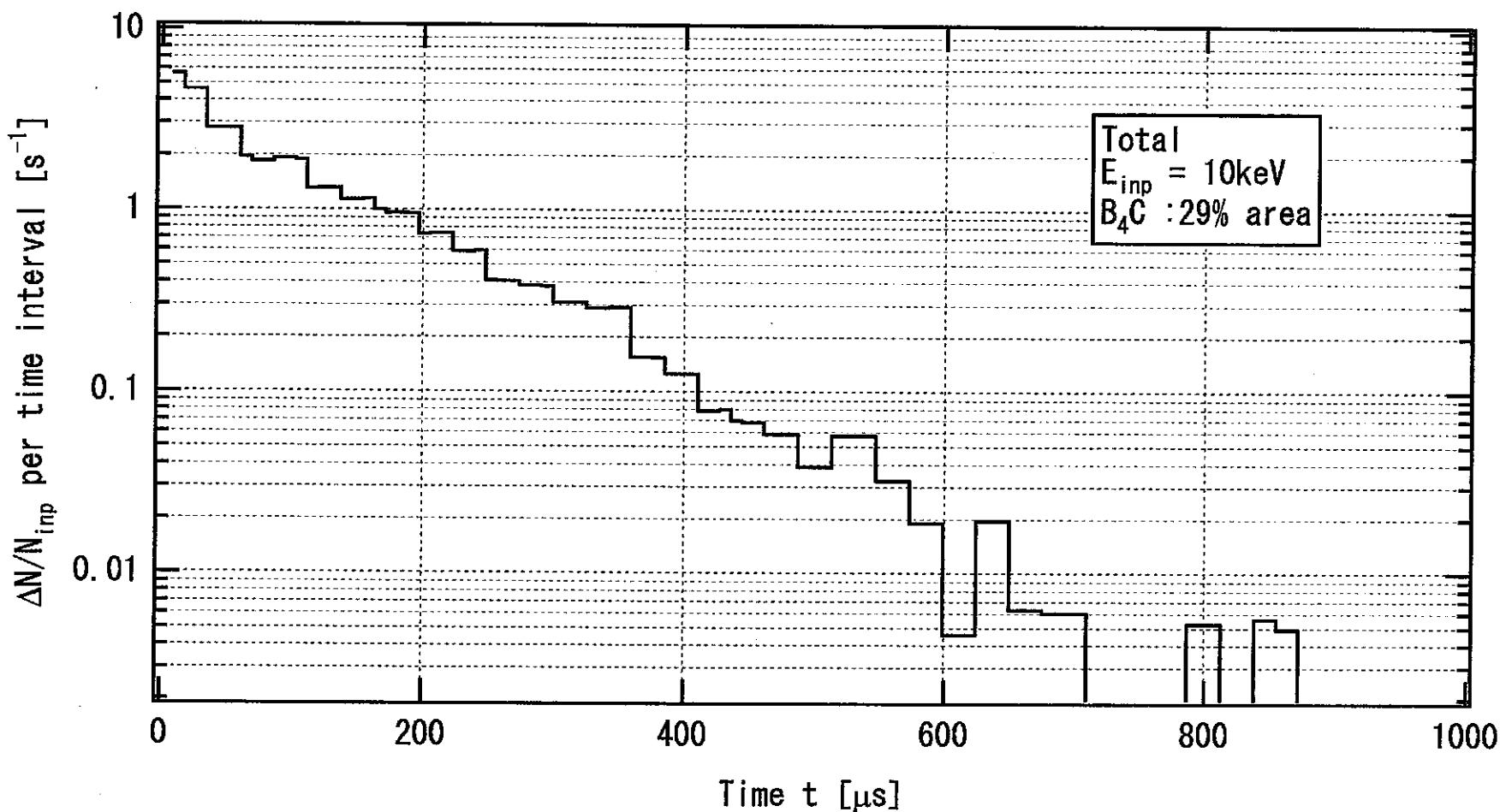


図 2.5-32_3 $B_4\text{C}$ が 29% の面積を覆う場合の中性子 + 荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 10\text{keV}$)

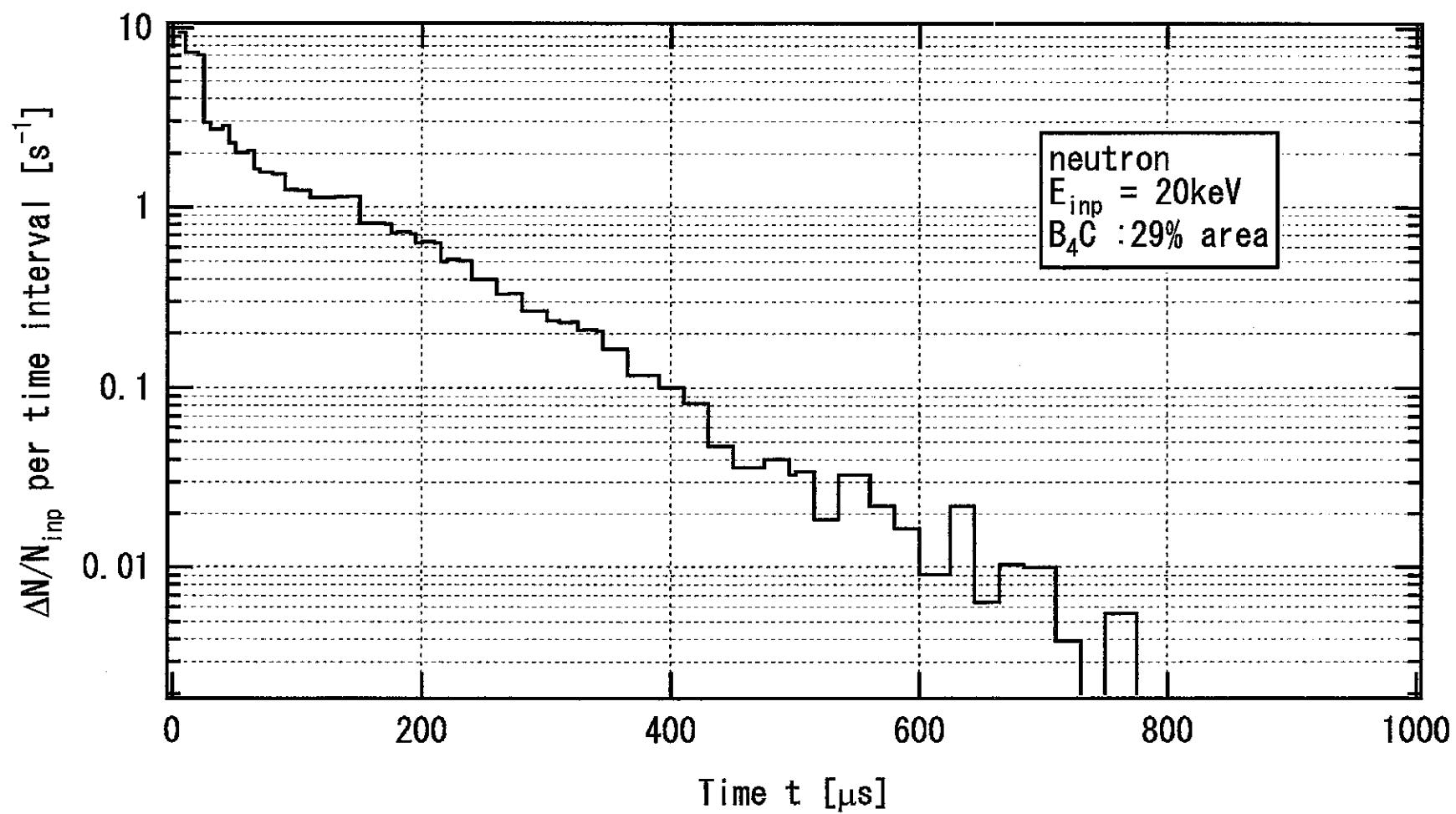


図 2.5-33_1 B_4C が 29% の面積を覆う場合の中性子の TOP 分布 ($E_i = 20\text{keV}$)

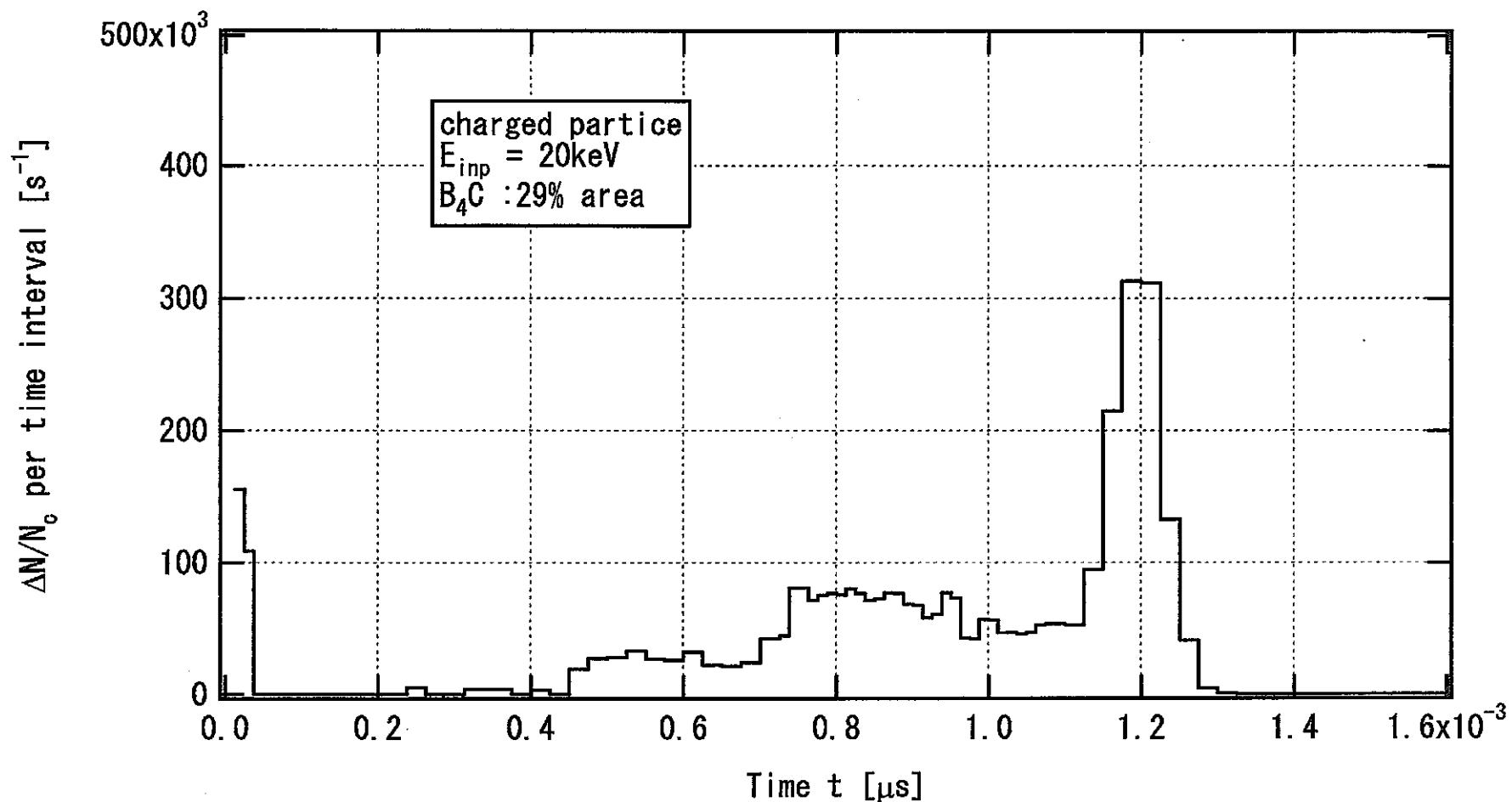


図 2.5-33_2 B_4C が 29% の面積を覆う場合の荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 20\text{keV}$)

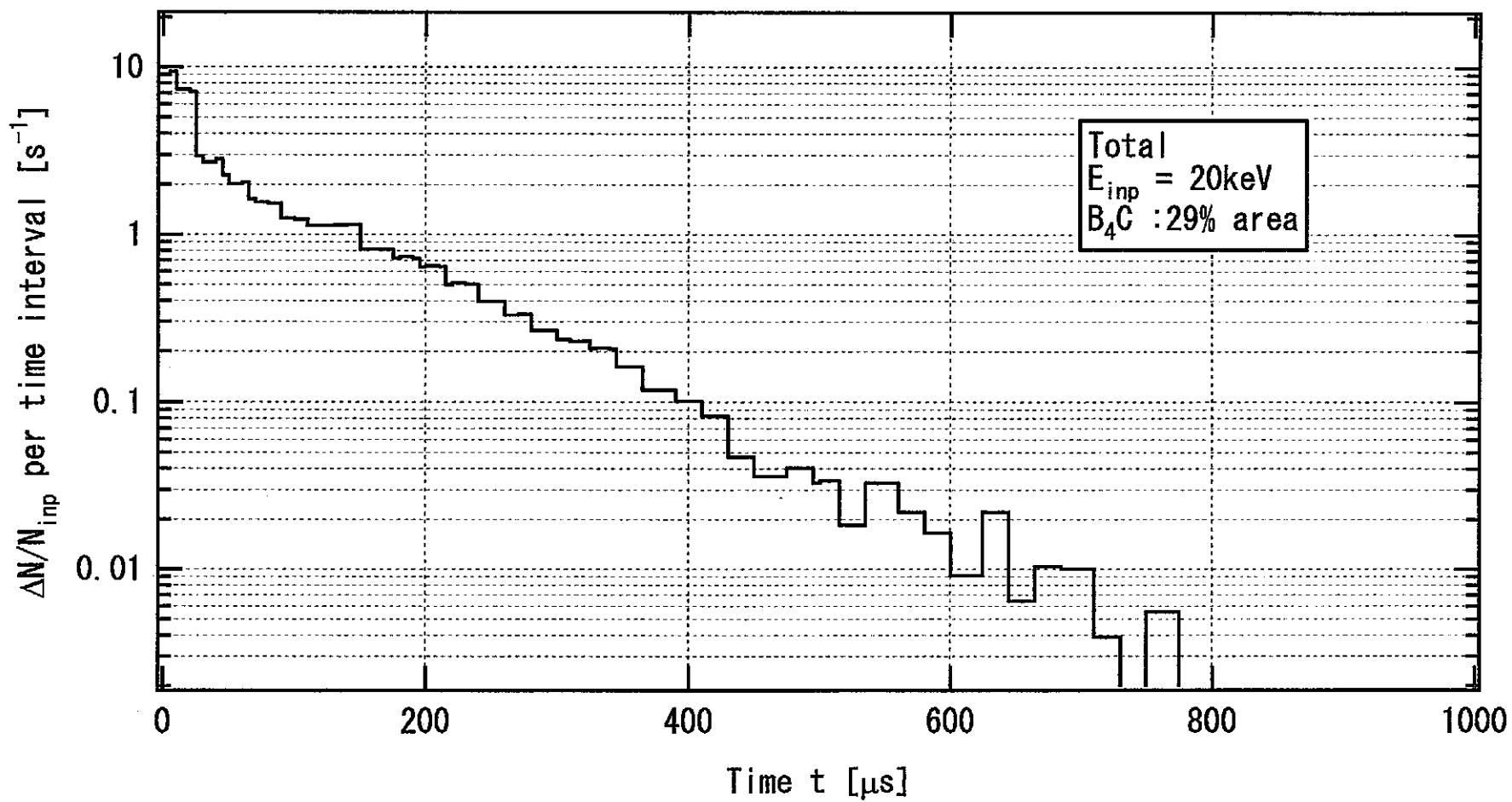


図 2.5-33_3 B_4C が 29% の面積を覆う場合の中性子 + 荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 20\text{keV}$)

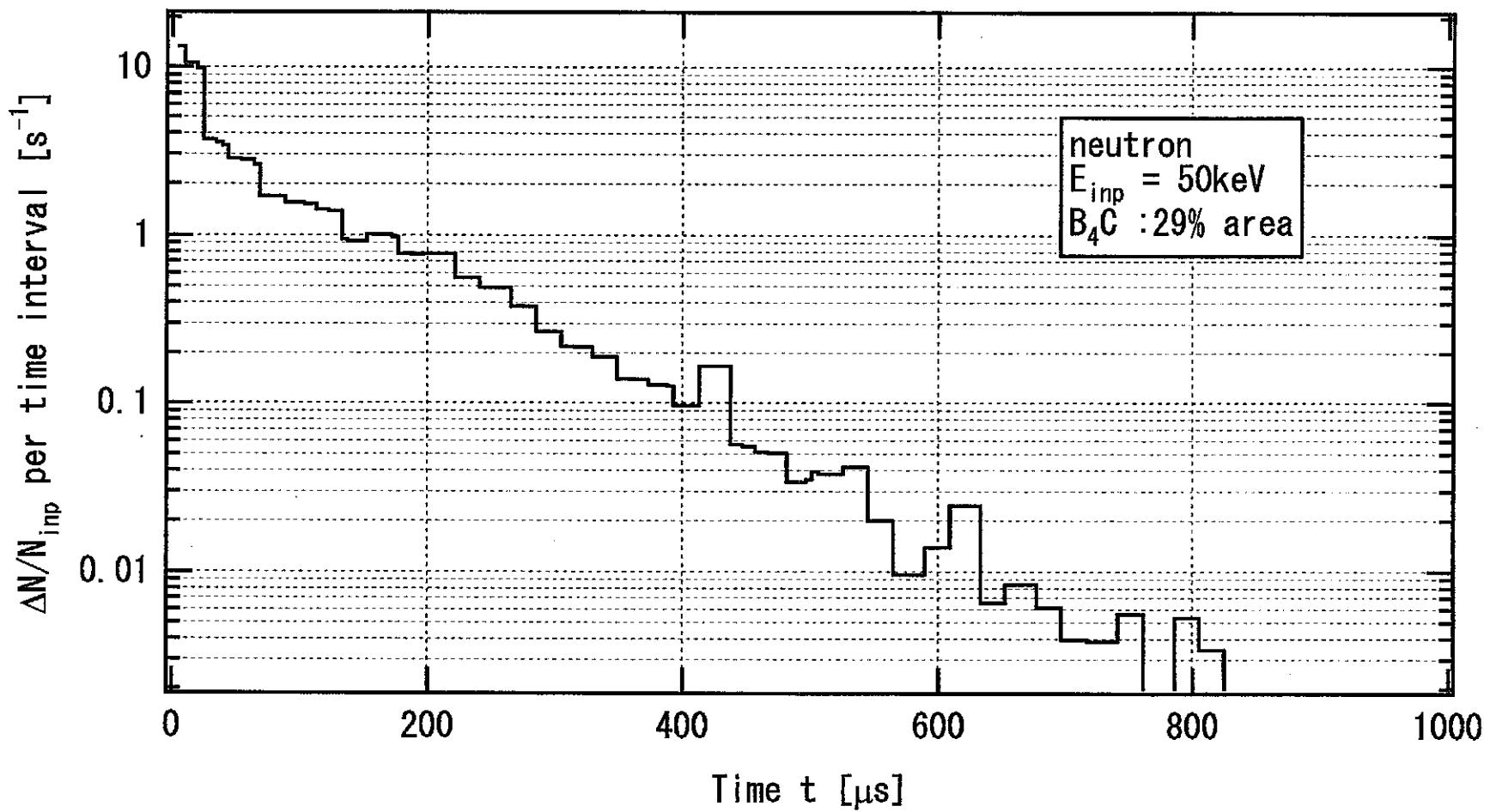


図 2.5-34_1 B_4C が 29% の面積を覆う場合の中性子の TOP 分布 ($E_{in} = 50\text{keV}$)

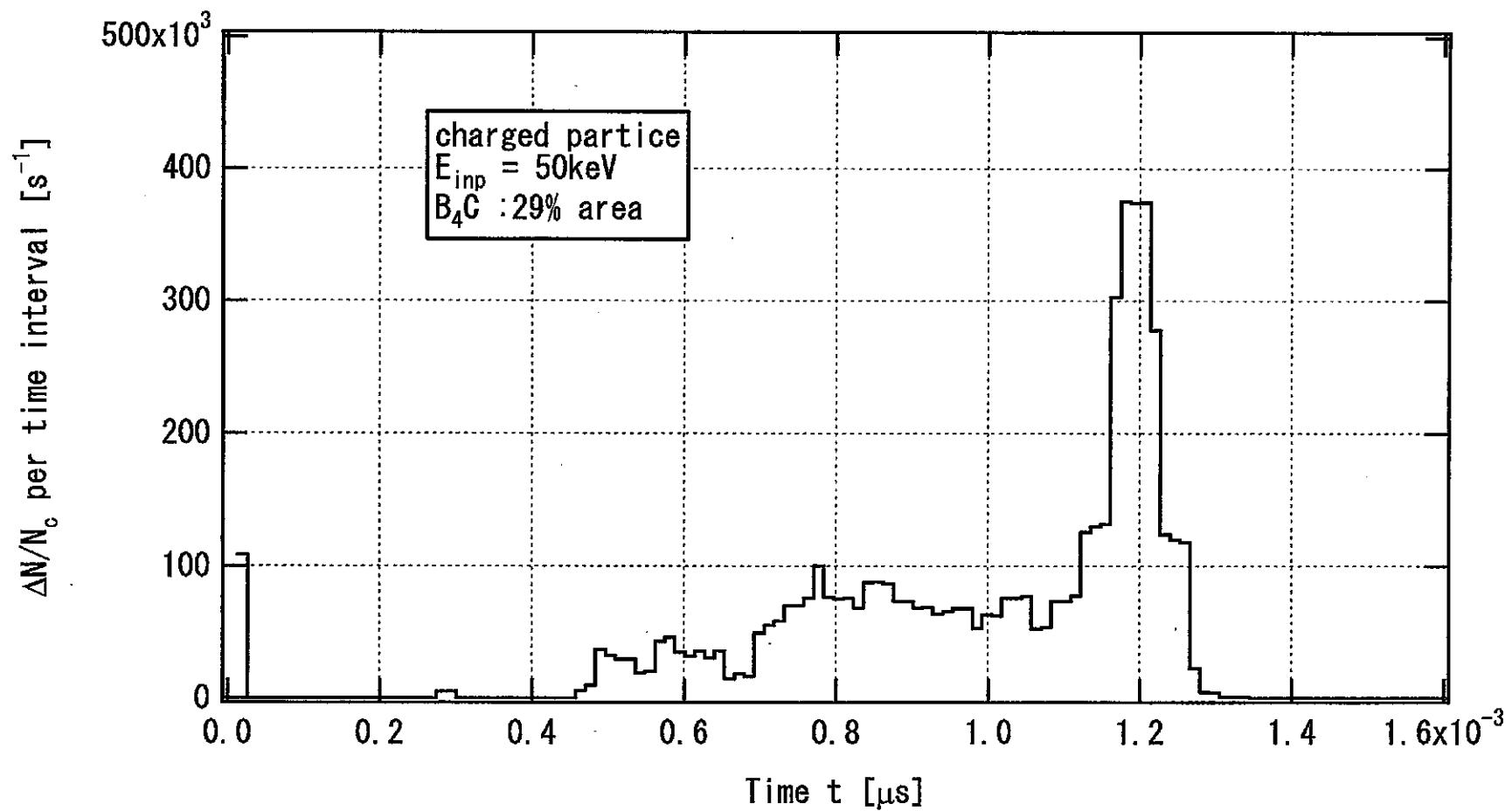


図 2.5-34_2 B_4C が 29% の面積を覆う場合の荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 50\text{keV}$)

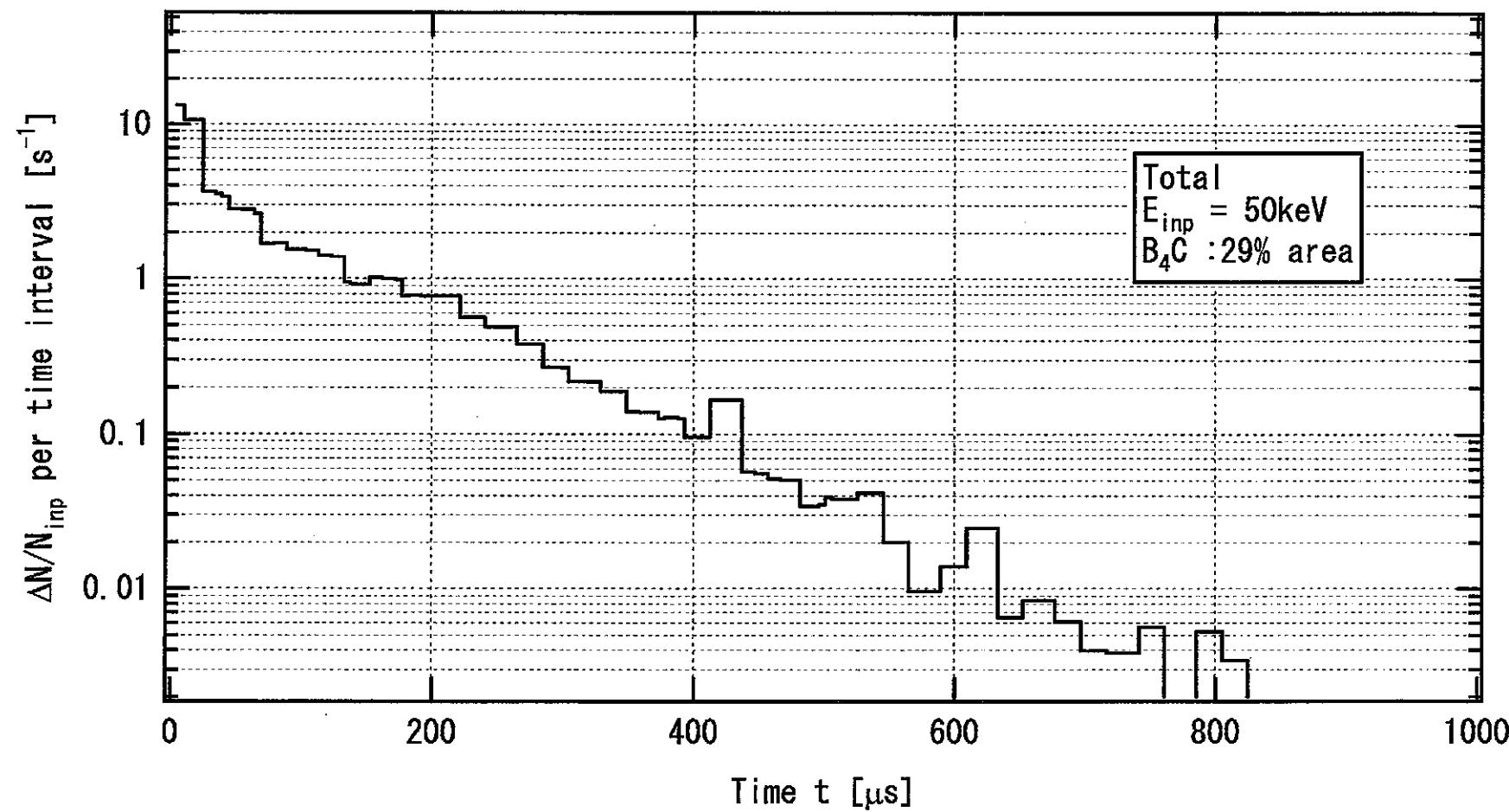


図 2.5-34_3 B_4C が 29% の面積を覆う場合の中性子 + 荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 50\text{keV}$)

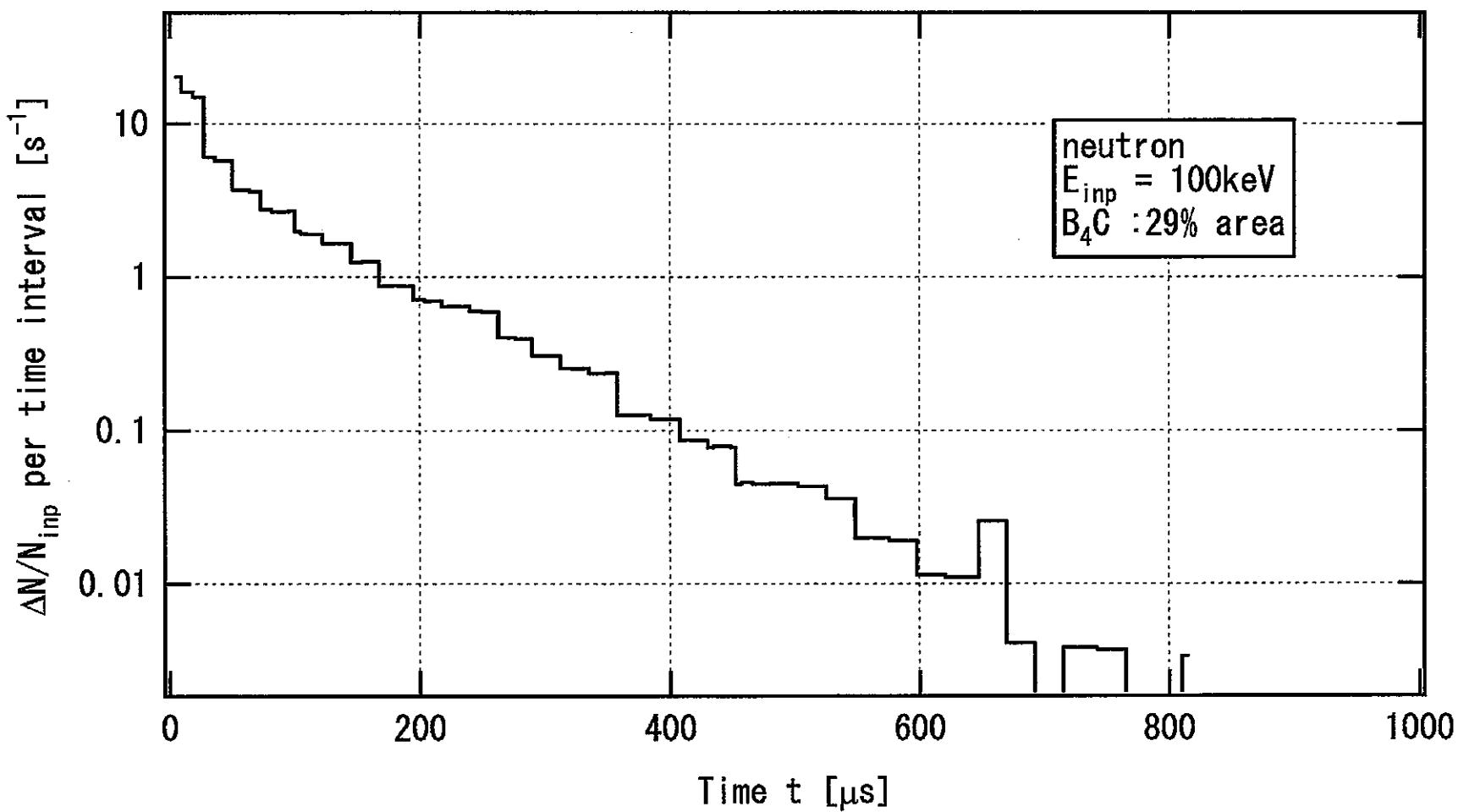


図 2.5-35_1 B₄C が 29% の面積を覆う場合の中性子の TOP 分布 (E_n = 100keV)

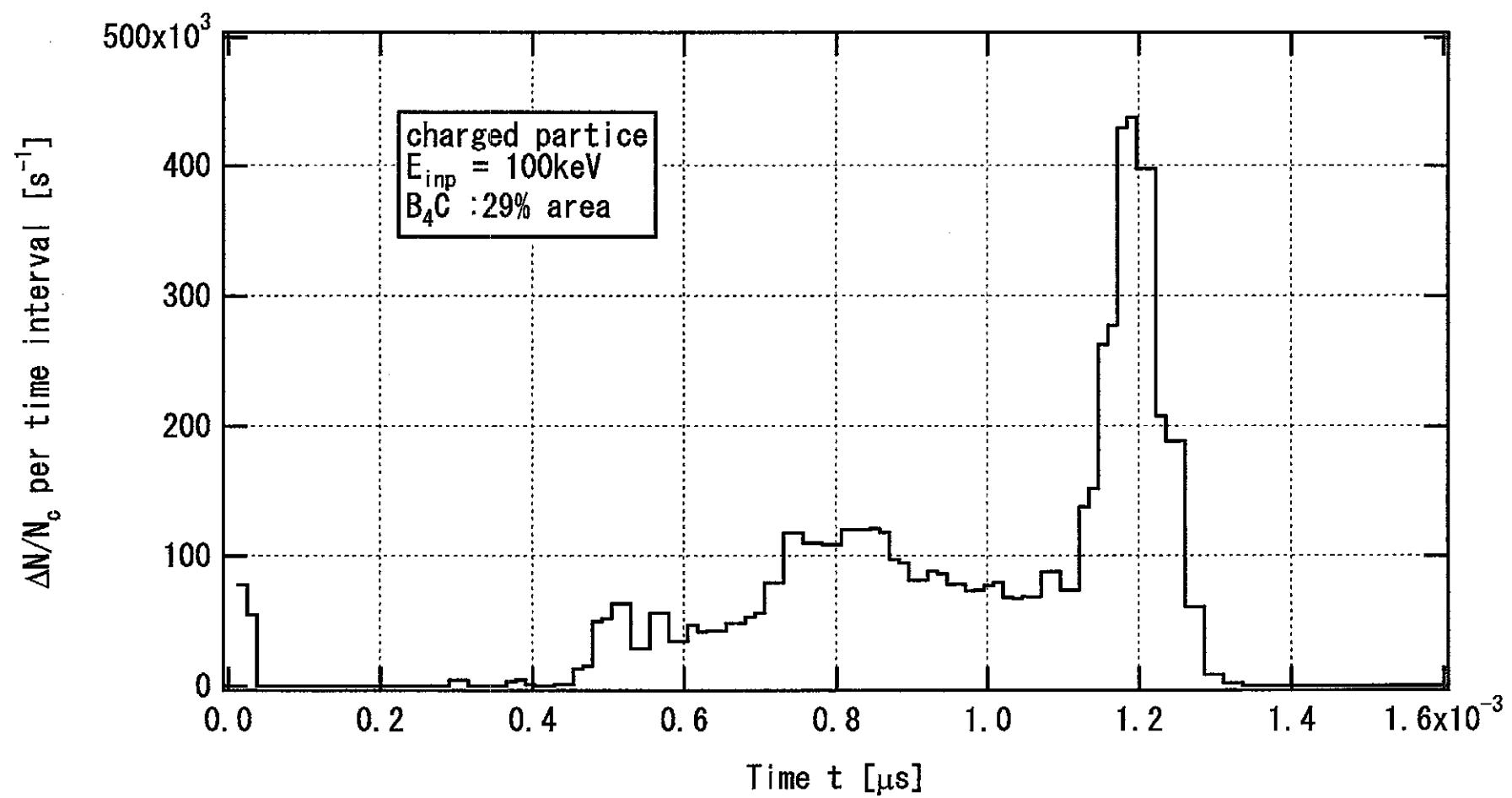


図 2.5-35_2 B_4C が 29% の面積を覆う場合の荷電粒子の TOP 分布 ($E_i = 100\text{keV}$)

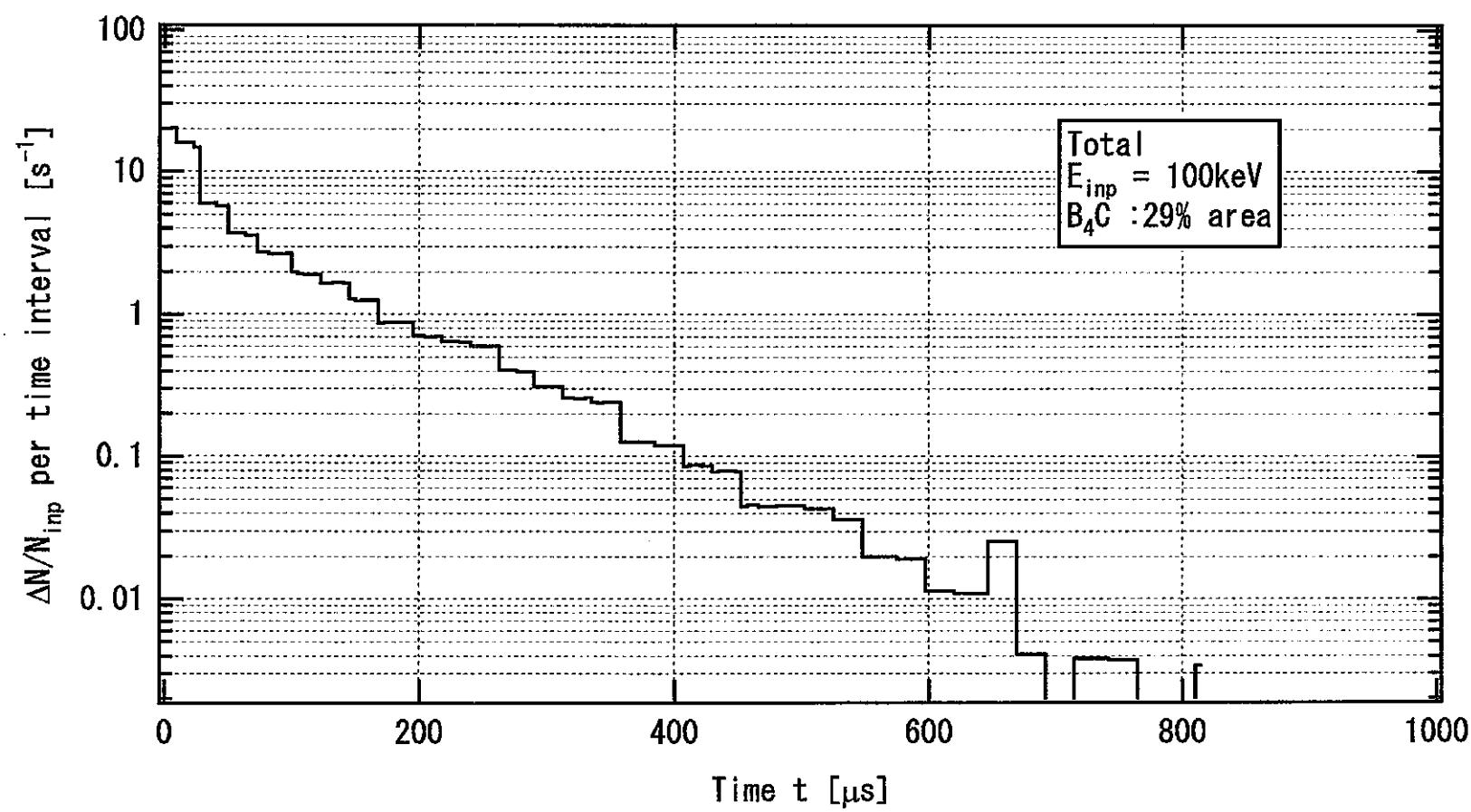


図 2.5-35_3 B_4C が 29% の面積を覆う場合の中性子 + 荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 100\text{keV}$)

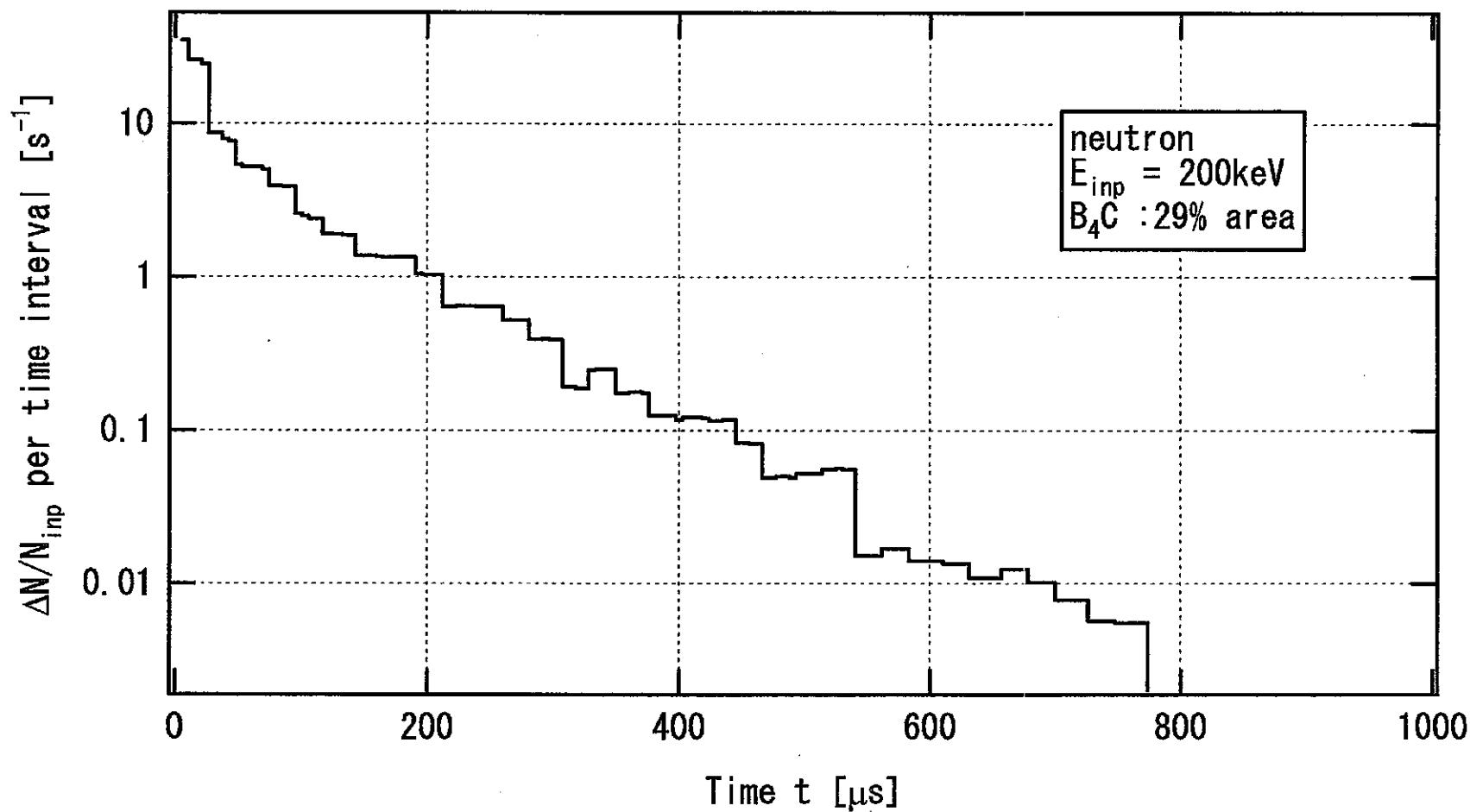


図 2.5-36_1 B_4C が 29% の面積を覆う場合の中性子の TOP 分布 ($E_n = 200\text{keV}$)

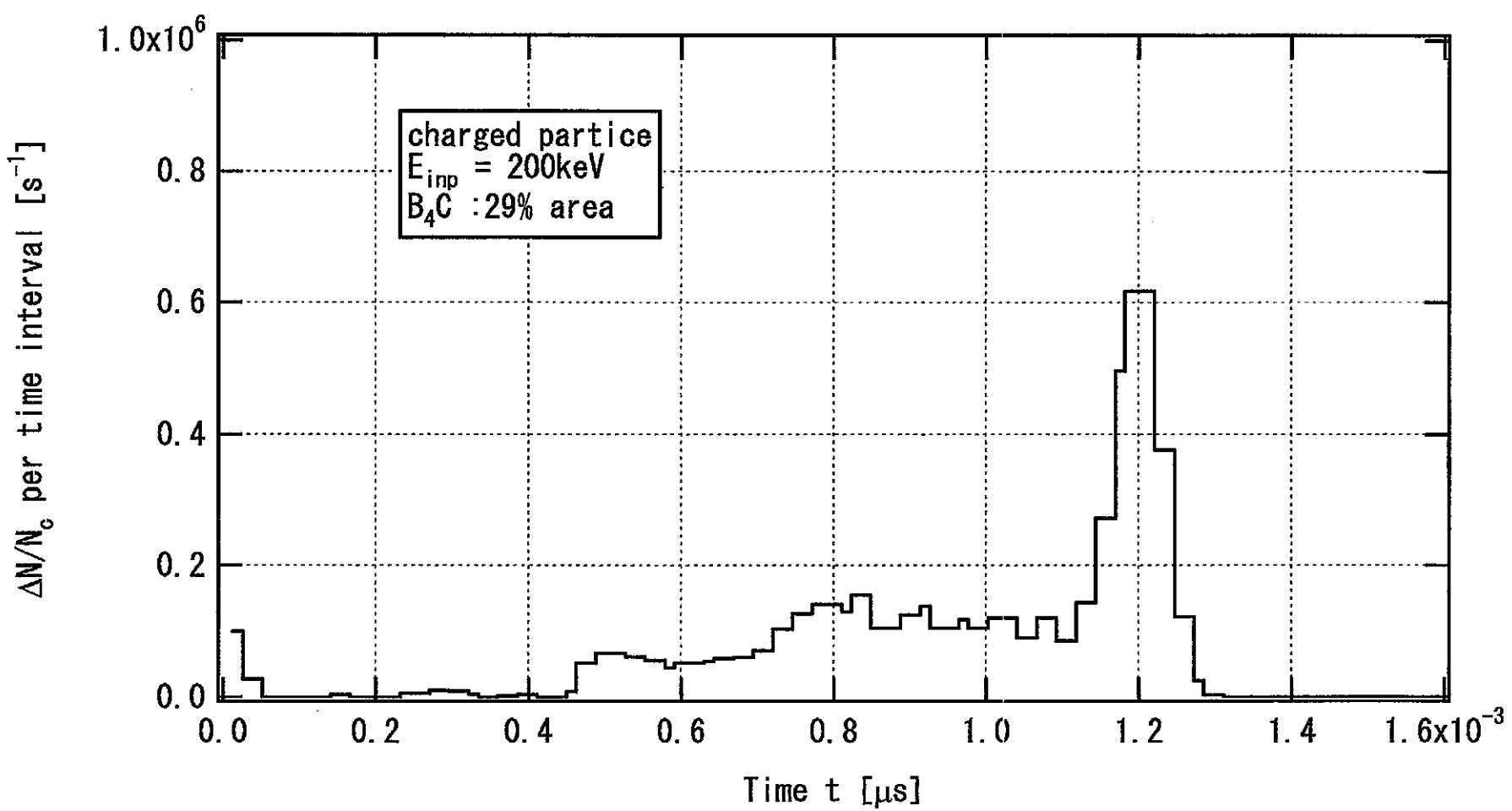


図 2.5-36_2 B_4C が 29% の面積を覆う場合の荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 200\text{keV}$)

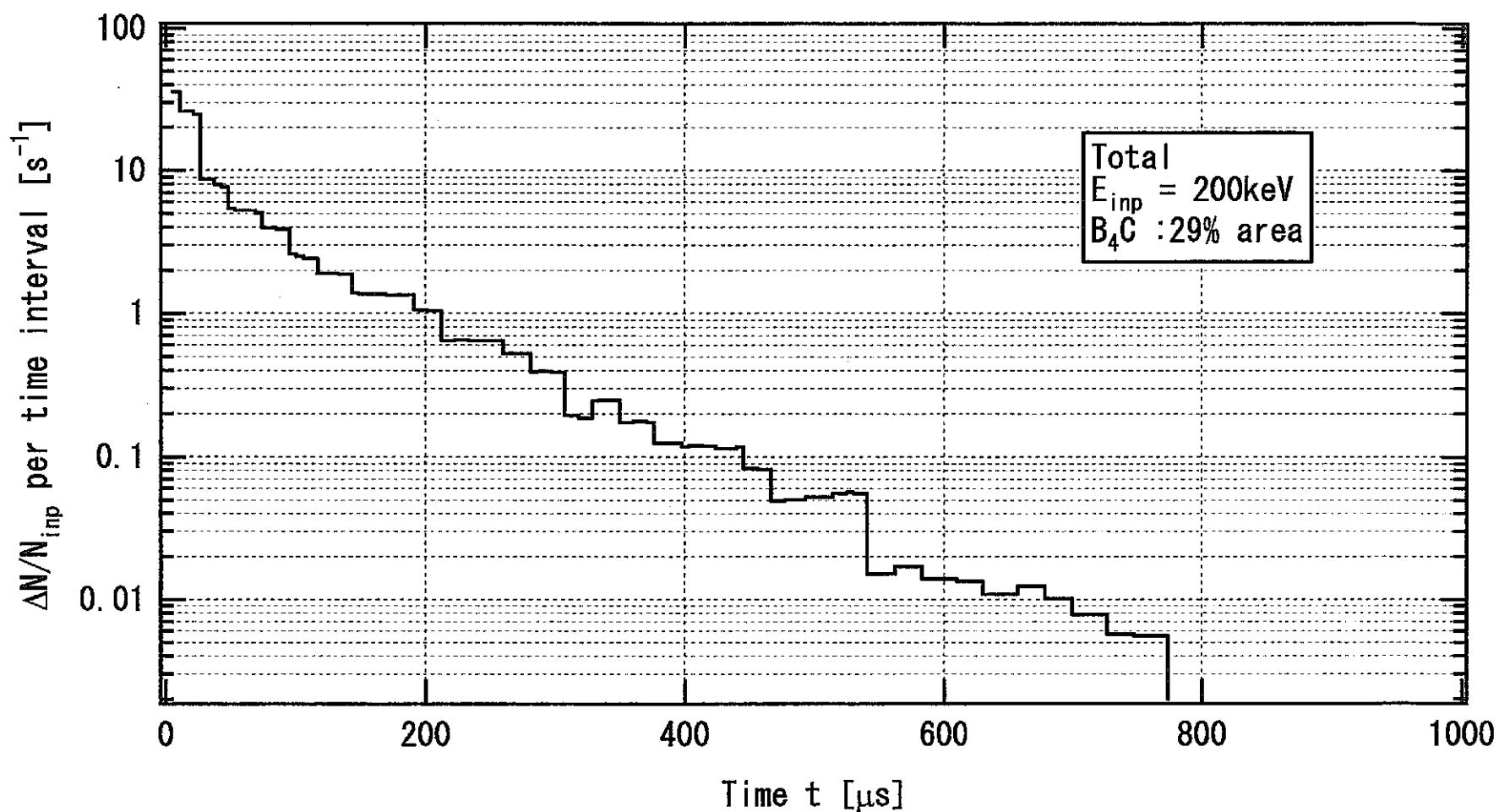


図 2.5-36_3 B_4C が 29% の面積を覆う場合の中性子 + 荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 200\text{keV}$)

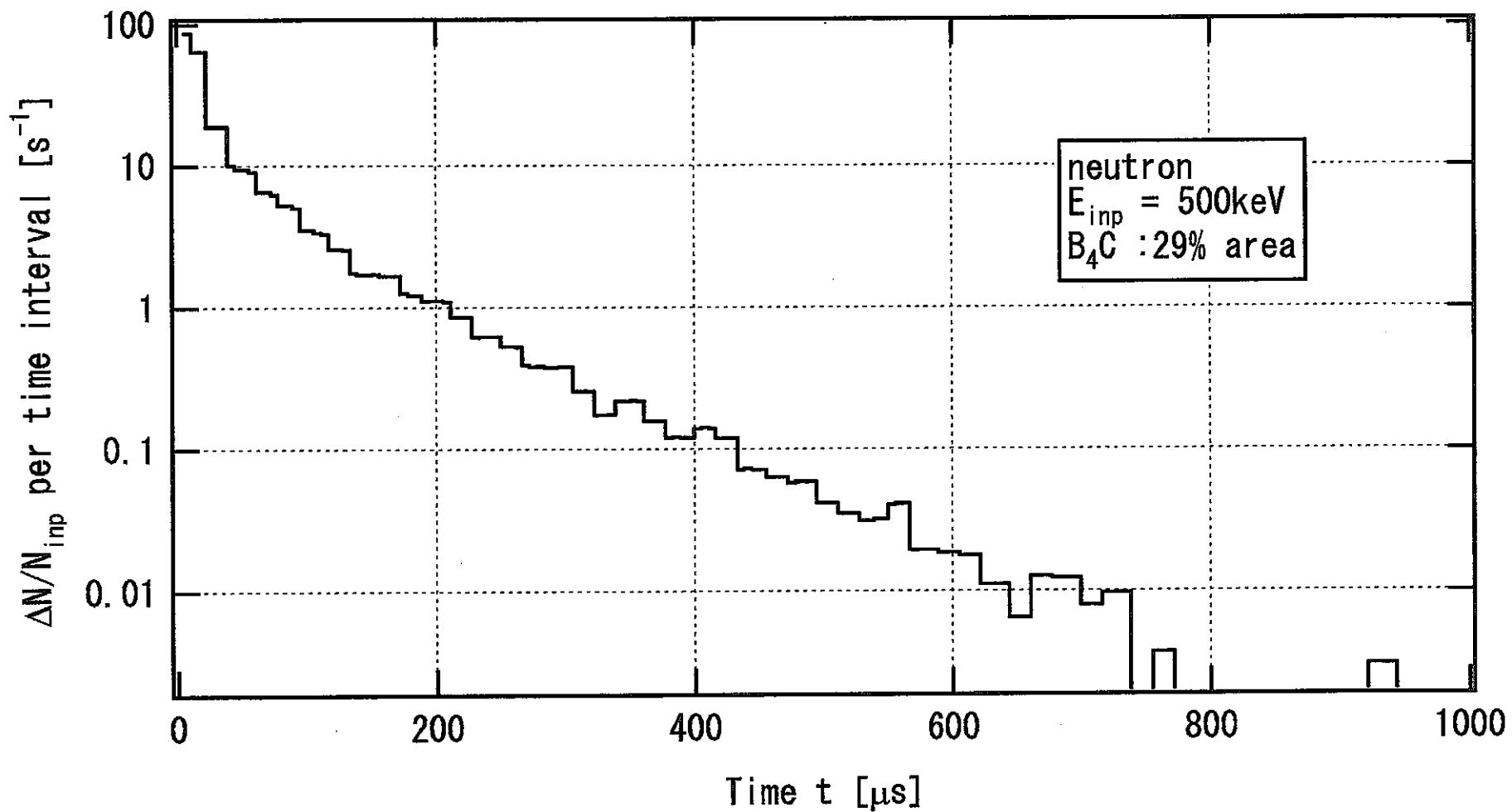


図 2.5-37_1 B_4C が 29% の面積を覆う場合の中性子の TOP 分布 ($E_n = 500\text{keV}$)

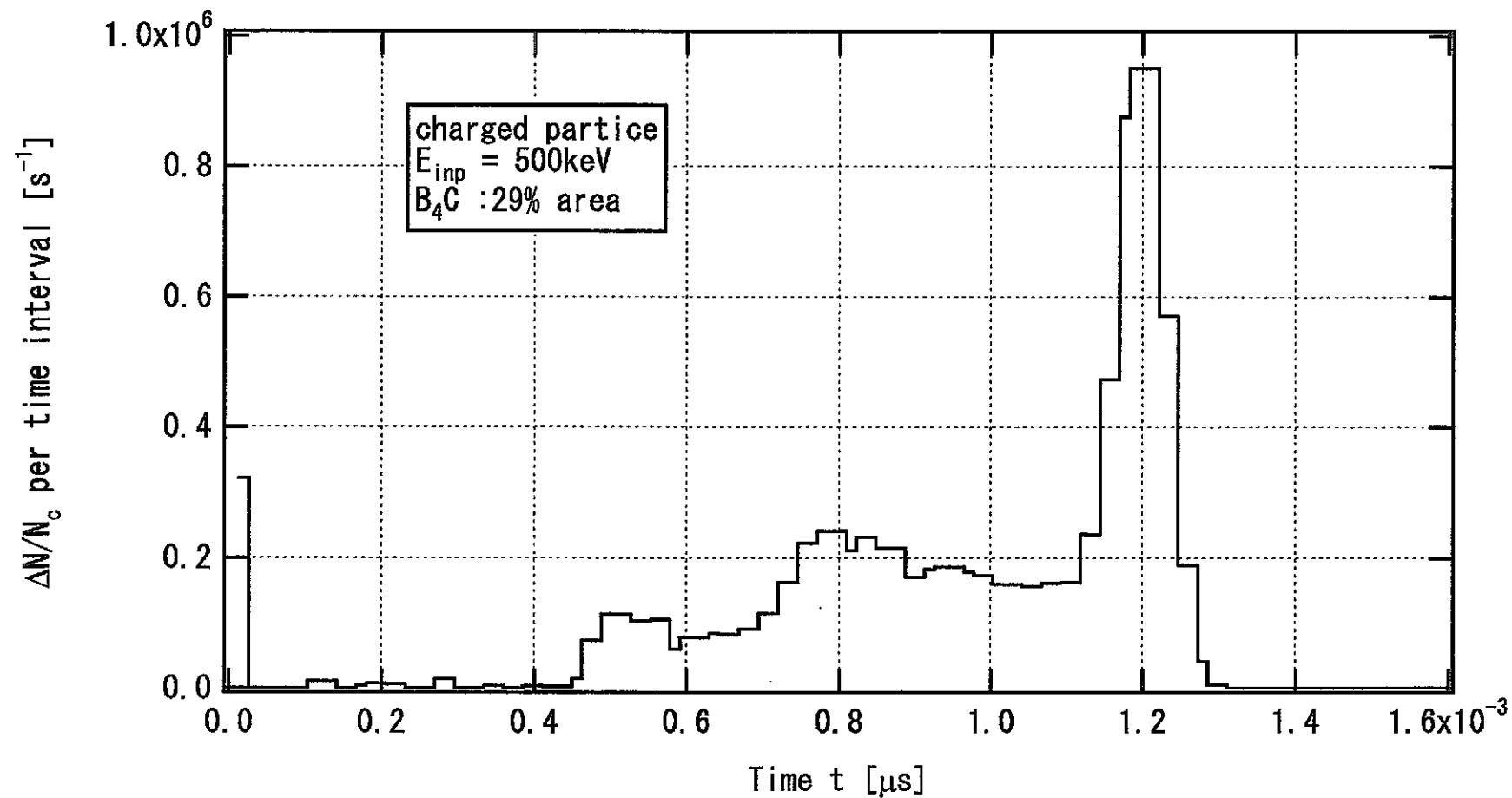


図 2.5-37_2 B_4C が 29% の面積を覆う場合の荷電粒子の TOP 分布 ($E_{\text{in}} = 500 \text{keV}$)

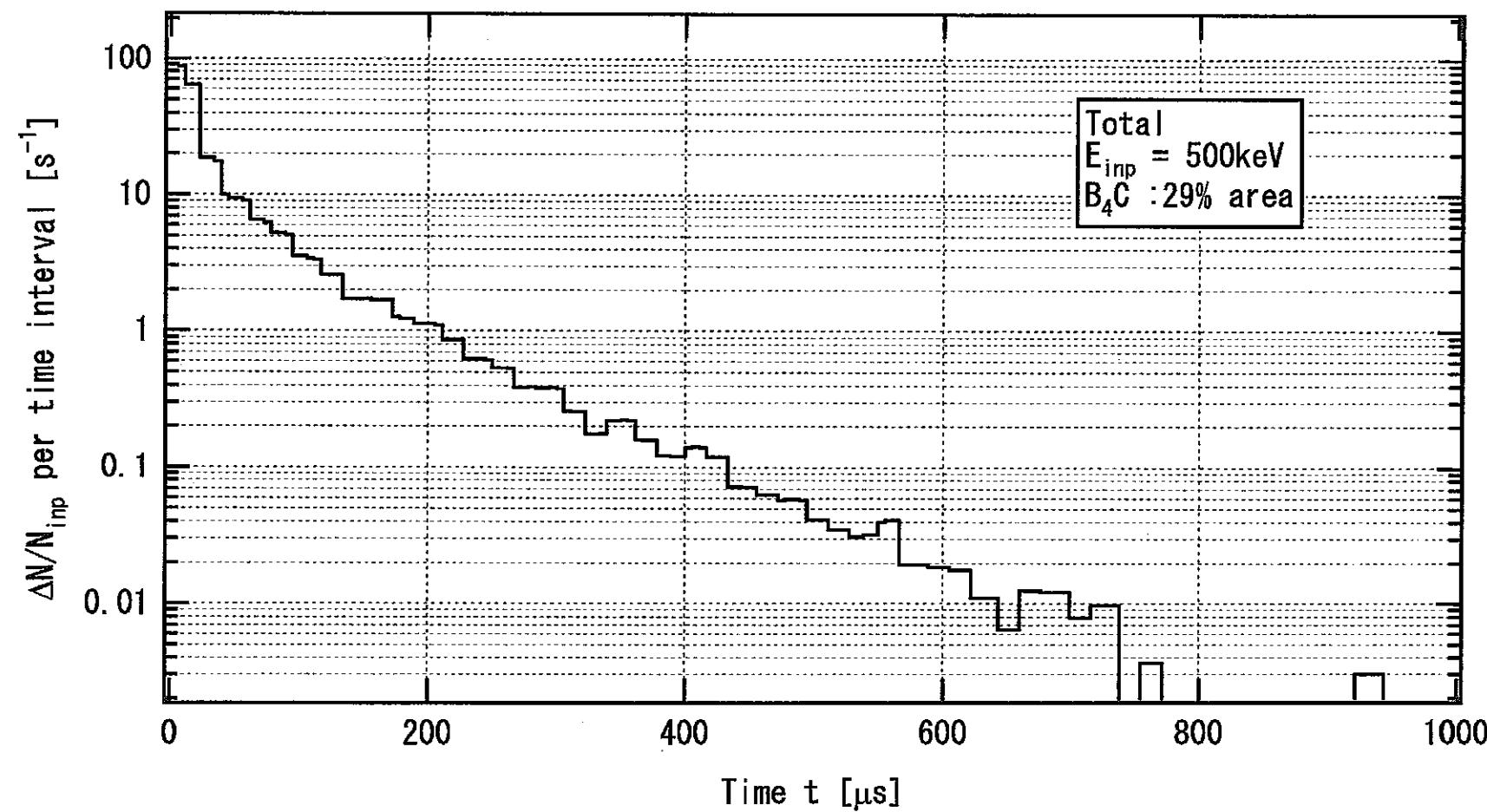


図 2.5-37_3 B_4C が 29% の面積を覆う場合の中性子 + 荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 500\text{keV}$)

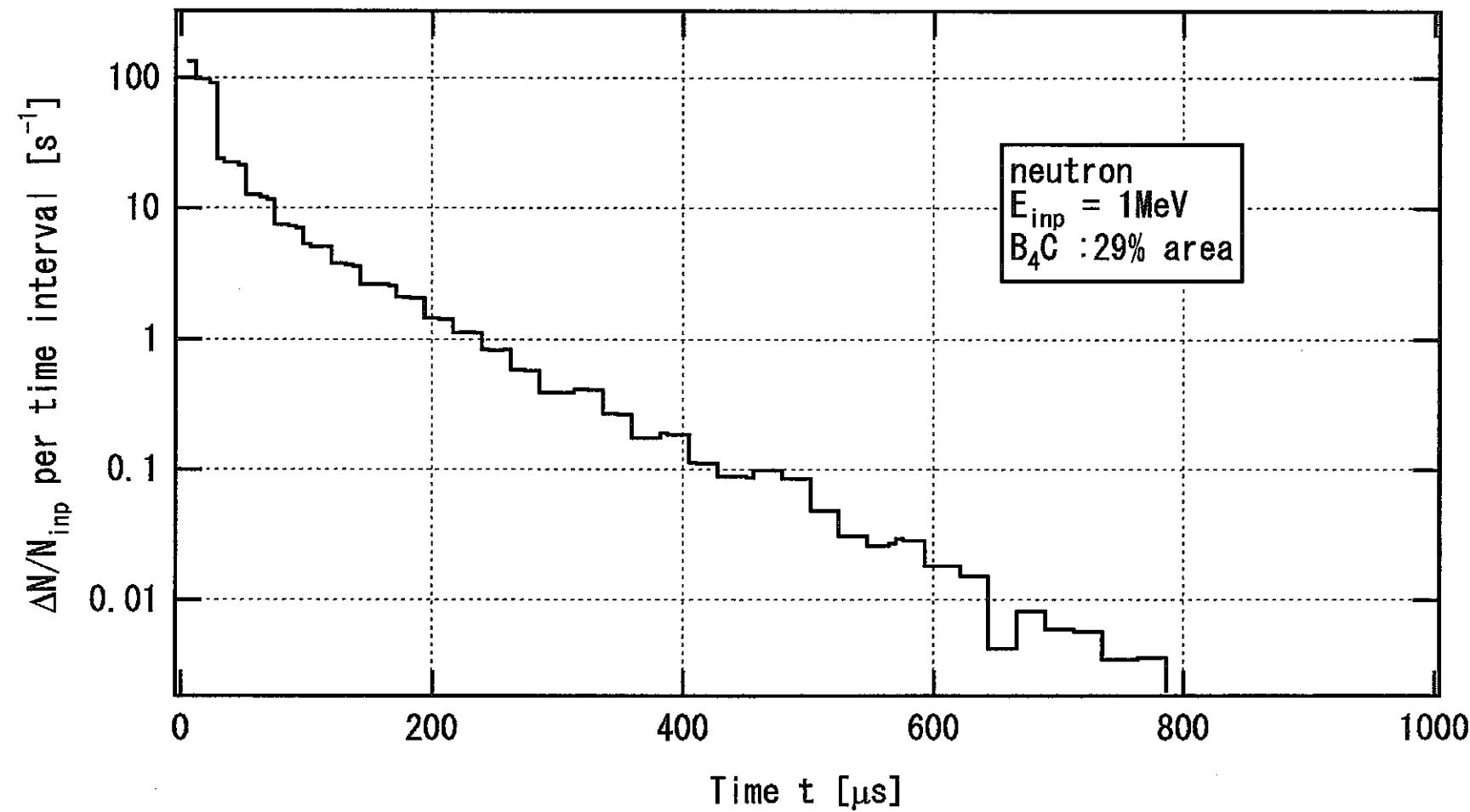


図 2.5-38_1 B_4C が 29% の面積を覆う場合の中性子の TOP 分布 ($E_n = 1 \text{ MeV}$)

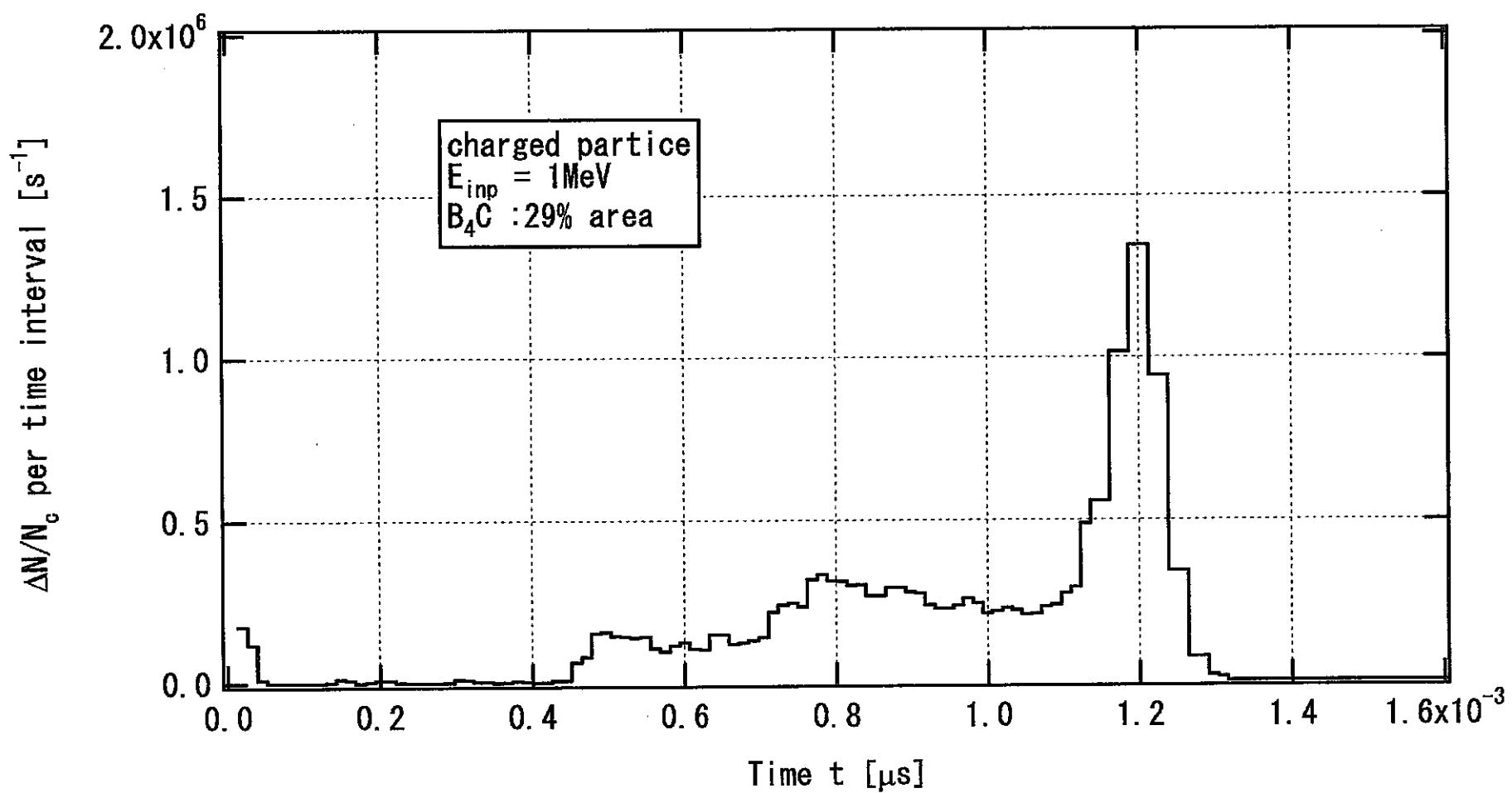


図 2.5-38_2 B_4C が 29% の面積を覆う場合の荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 1\text{MeV}$)

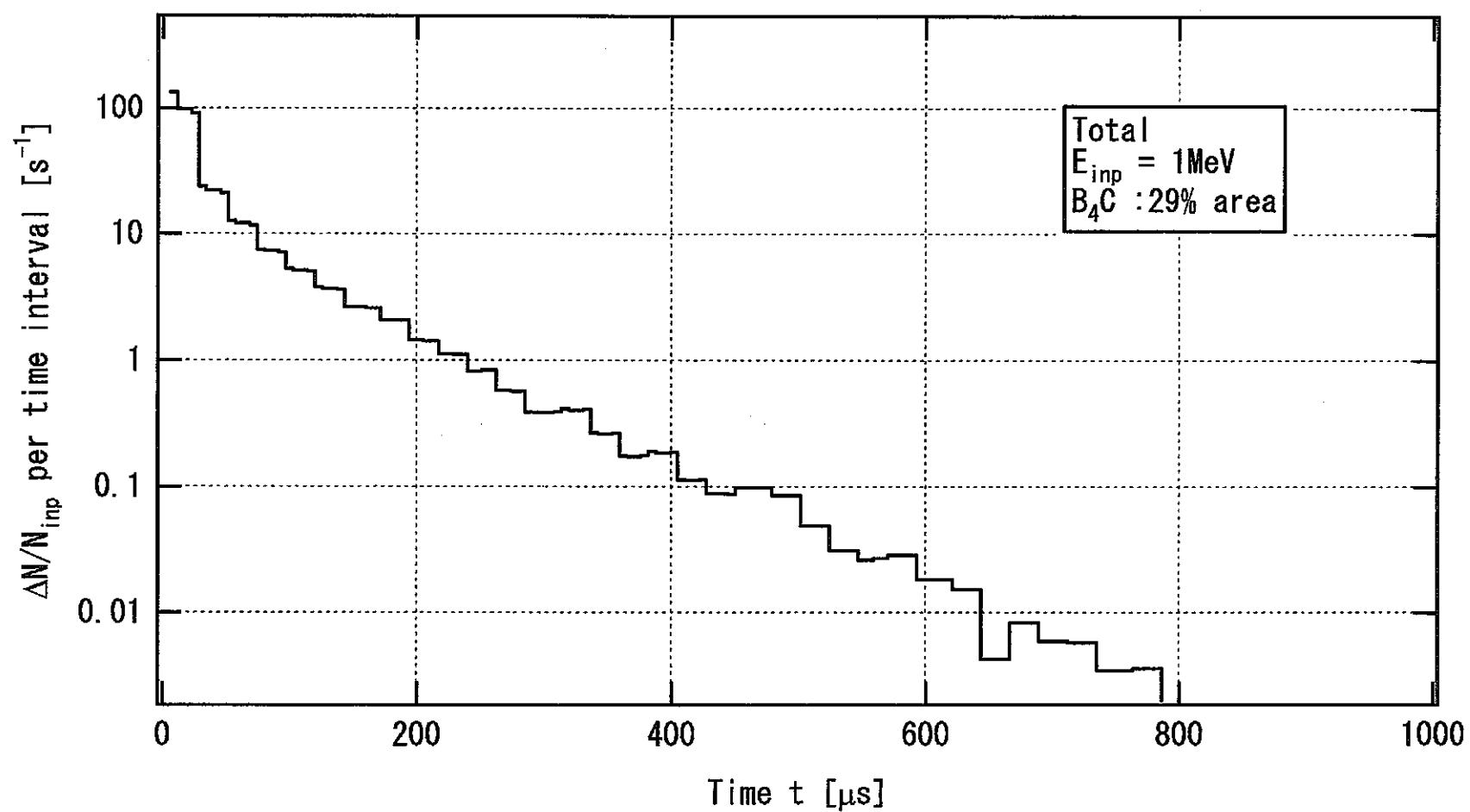


図 2.5-38_3 B_4C が 29% の面積を覆う場合の中性子 + 荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 1 \text{ MeV}$)

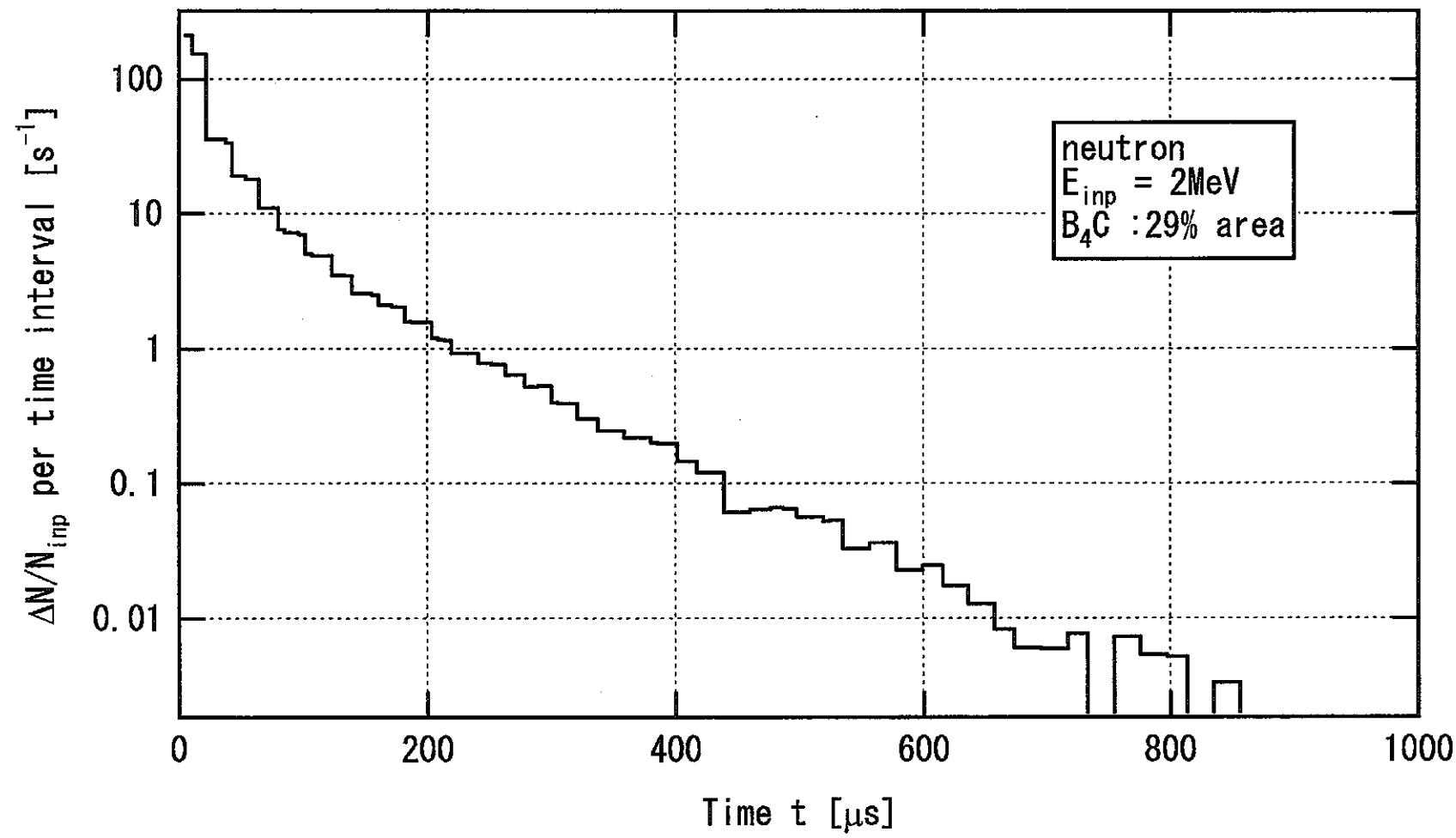


図 2.5-39_1 B_4C が 29% の面積を覆う場合の中性子の TOP 分布 ($E_n = 2\text{MeV}$)

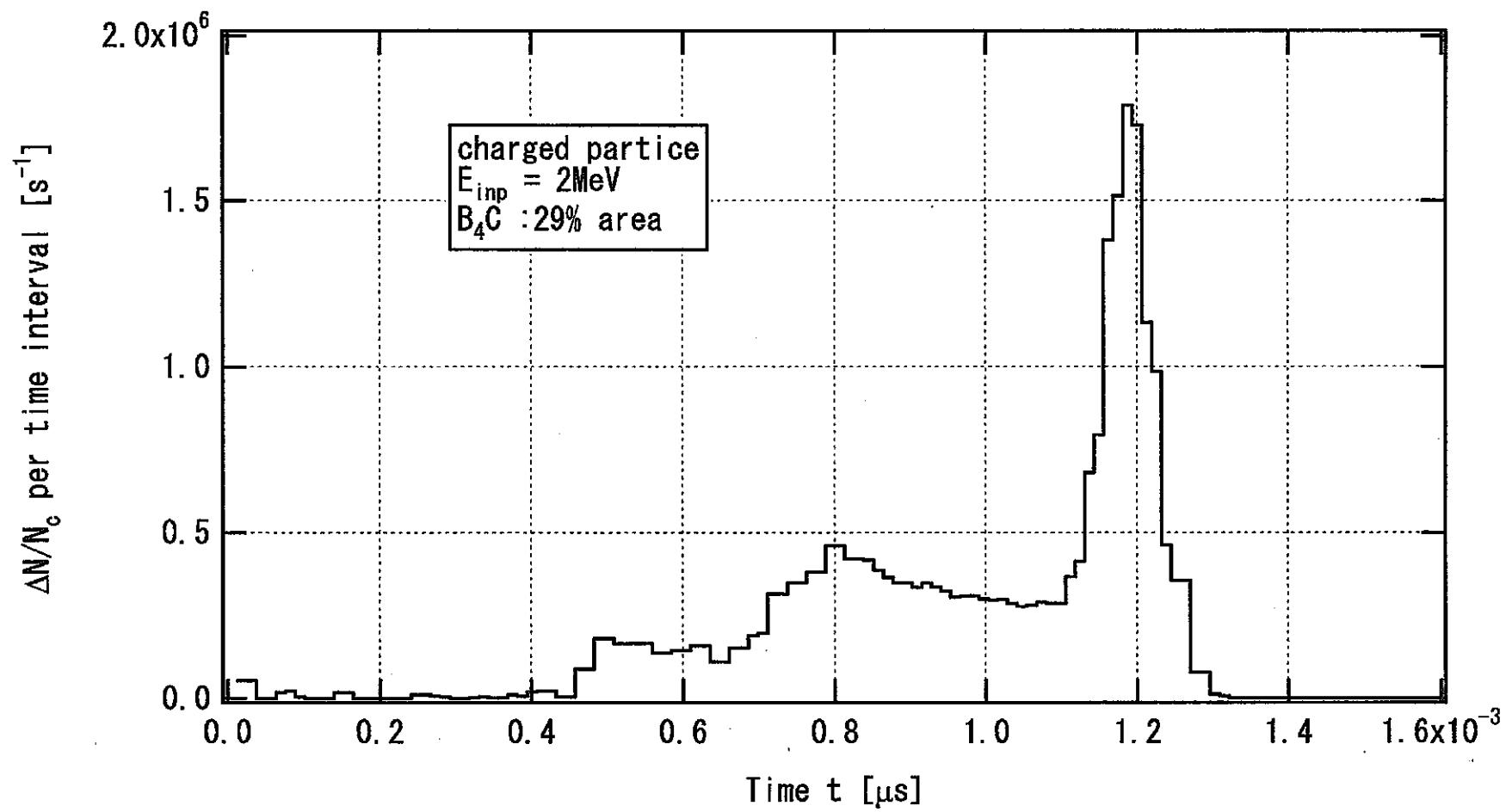


図 2.5-39_2 B_4C が 29% の面積を覆う場合の荷電粒子の TOP 分布 ($E_{\text{n}} = 2 \text{MeV}$)

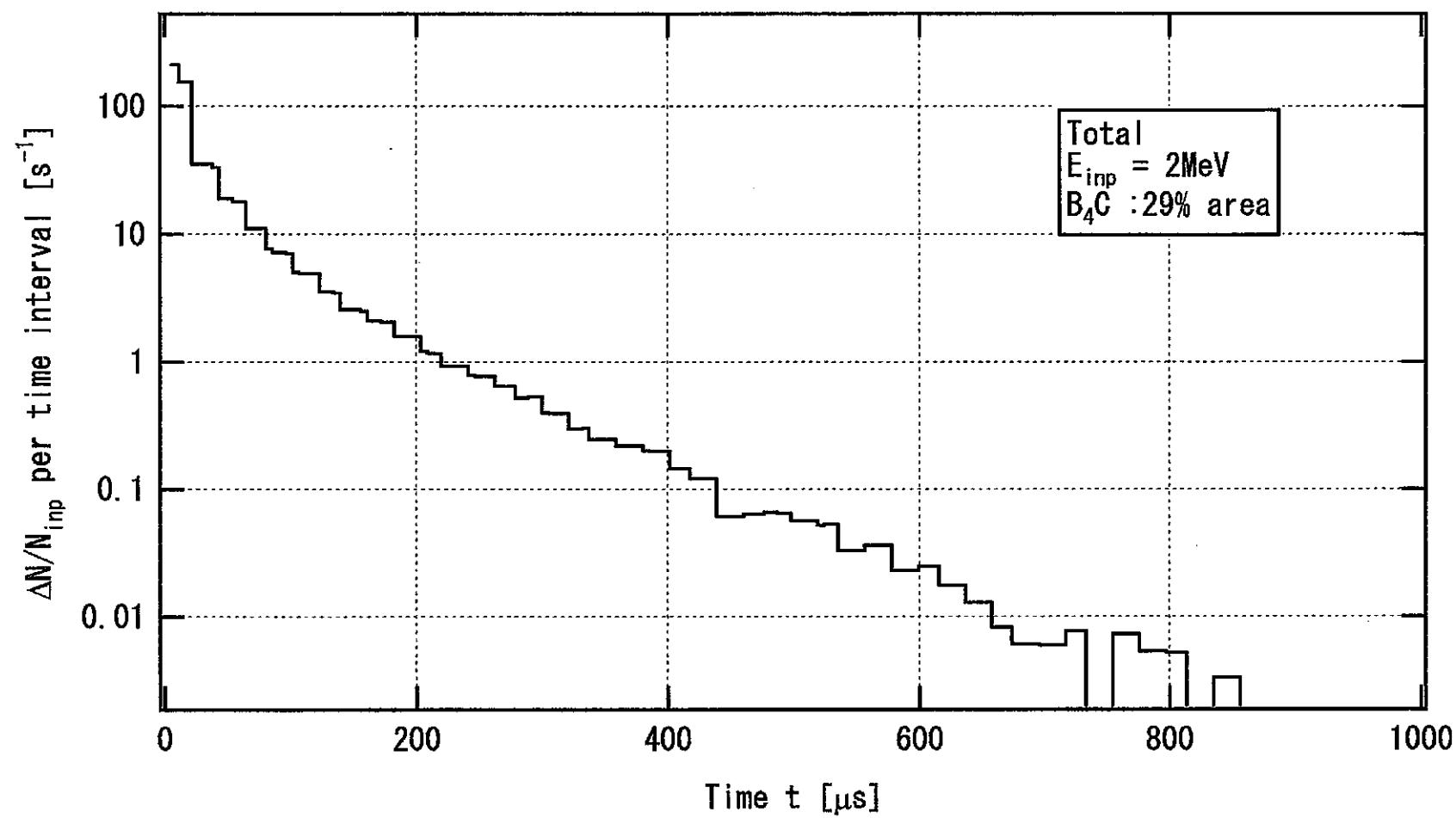


図 2.5-39_3 B_4C が 29% の面積を覆う場合の中性子 + 荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 2 \text{MeV}$)

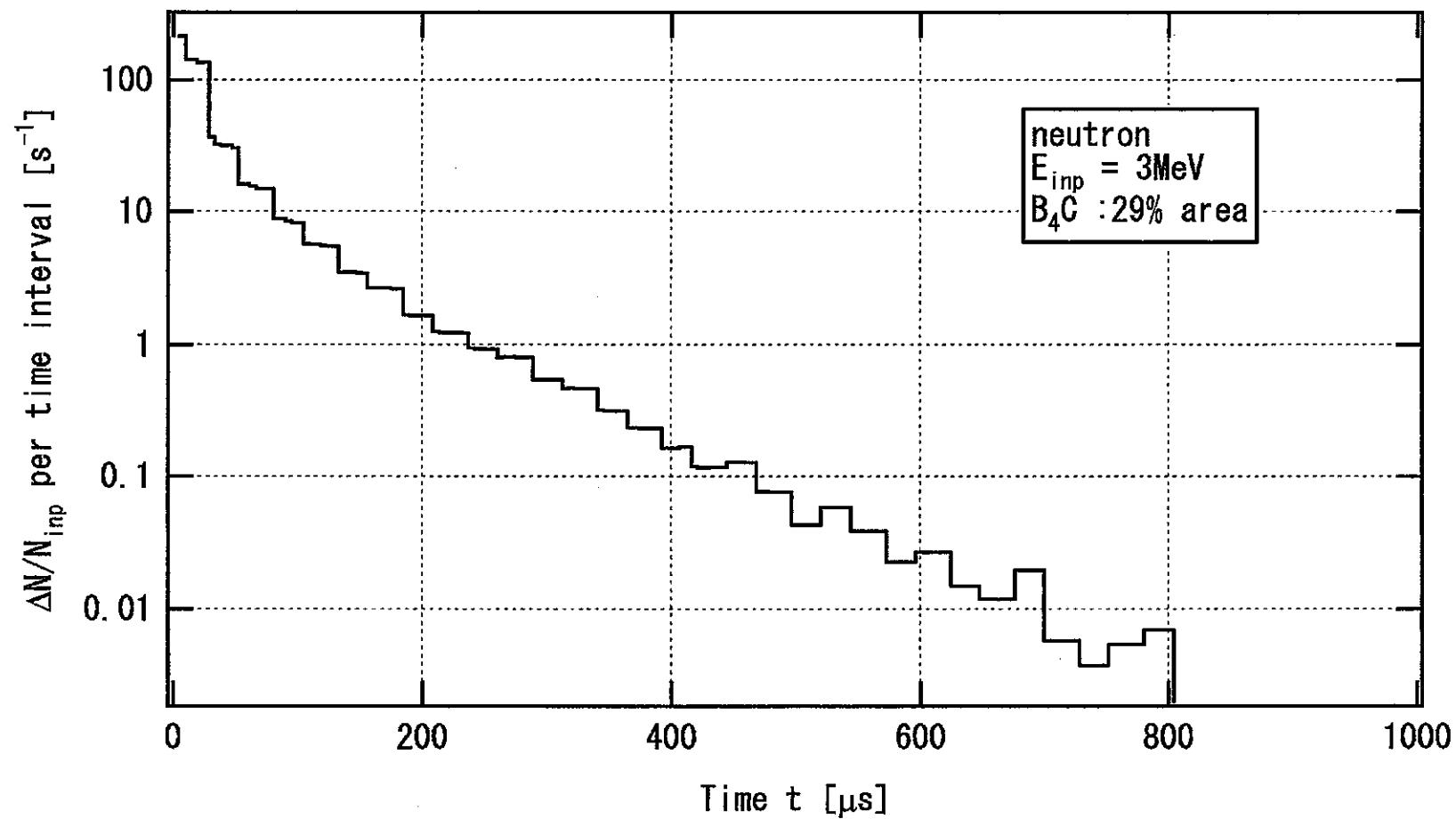


図 2.5-40_1 B_4C が 29% の面積を覆う場合の中性子の TOP 分布 ($E_n = 3\text{MeV}$)

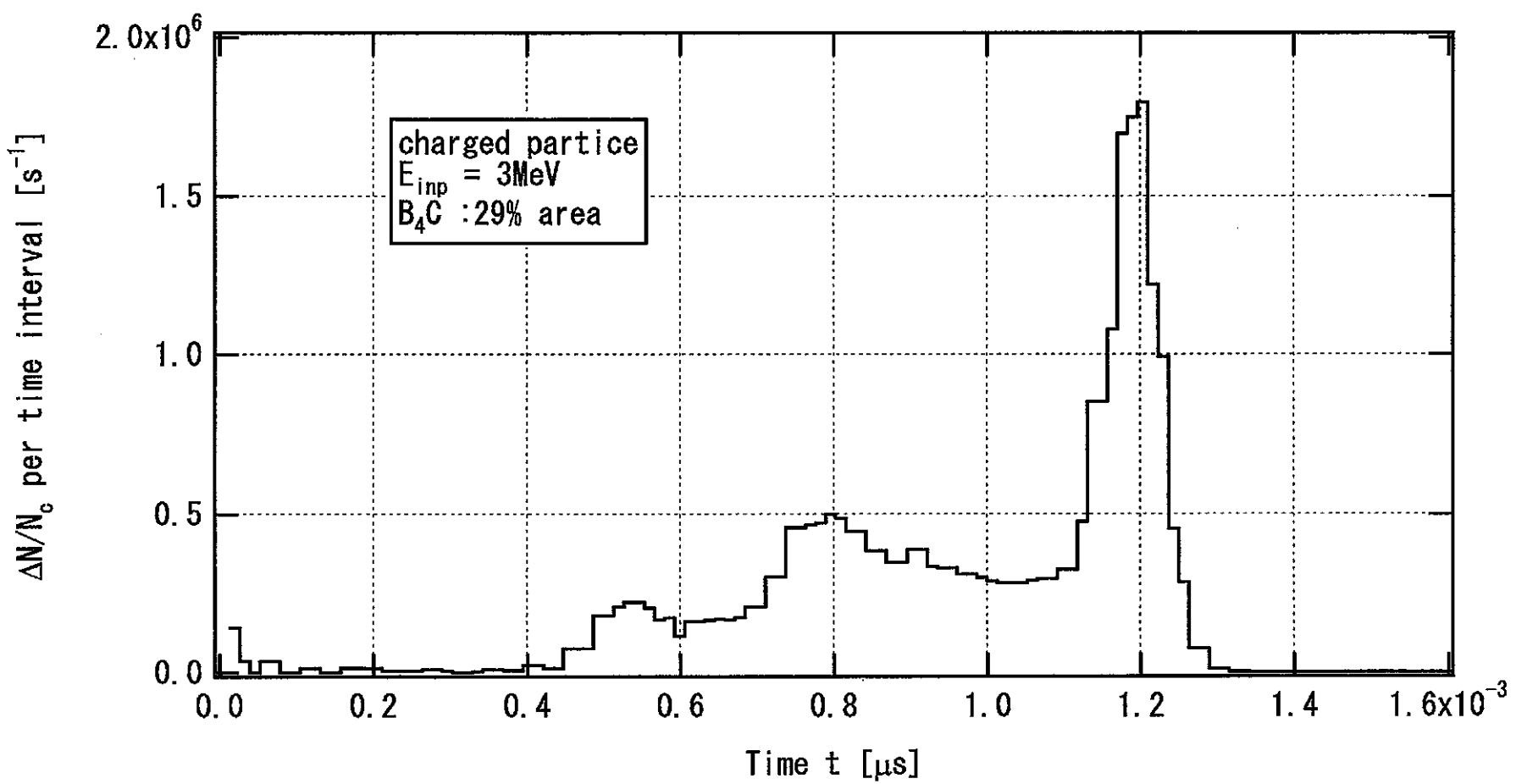


図 2.5-40_2 B_4C が 29% の面積を覆う場合の荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 3\text{MeV}$)

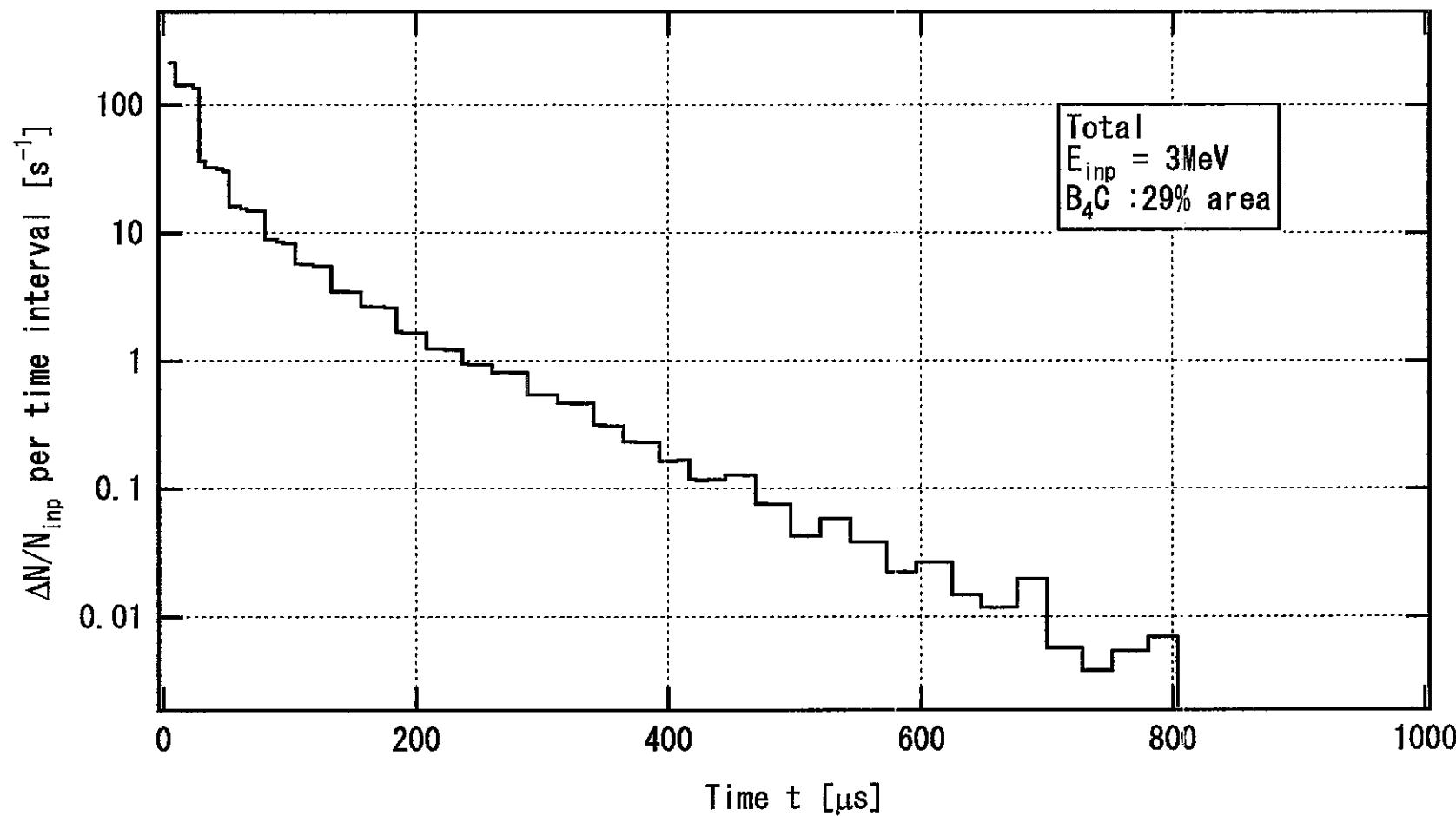


図 2.5-40_3 B_4C が 29% の面積を覆う場合の中性子 + 荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 3 \text{ MeV}$)

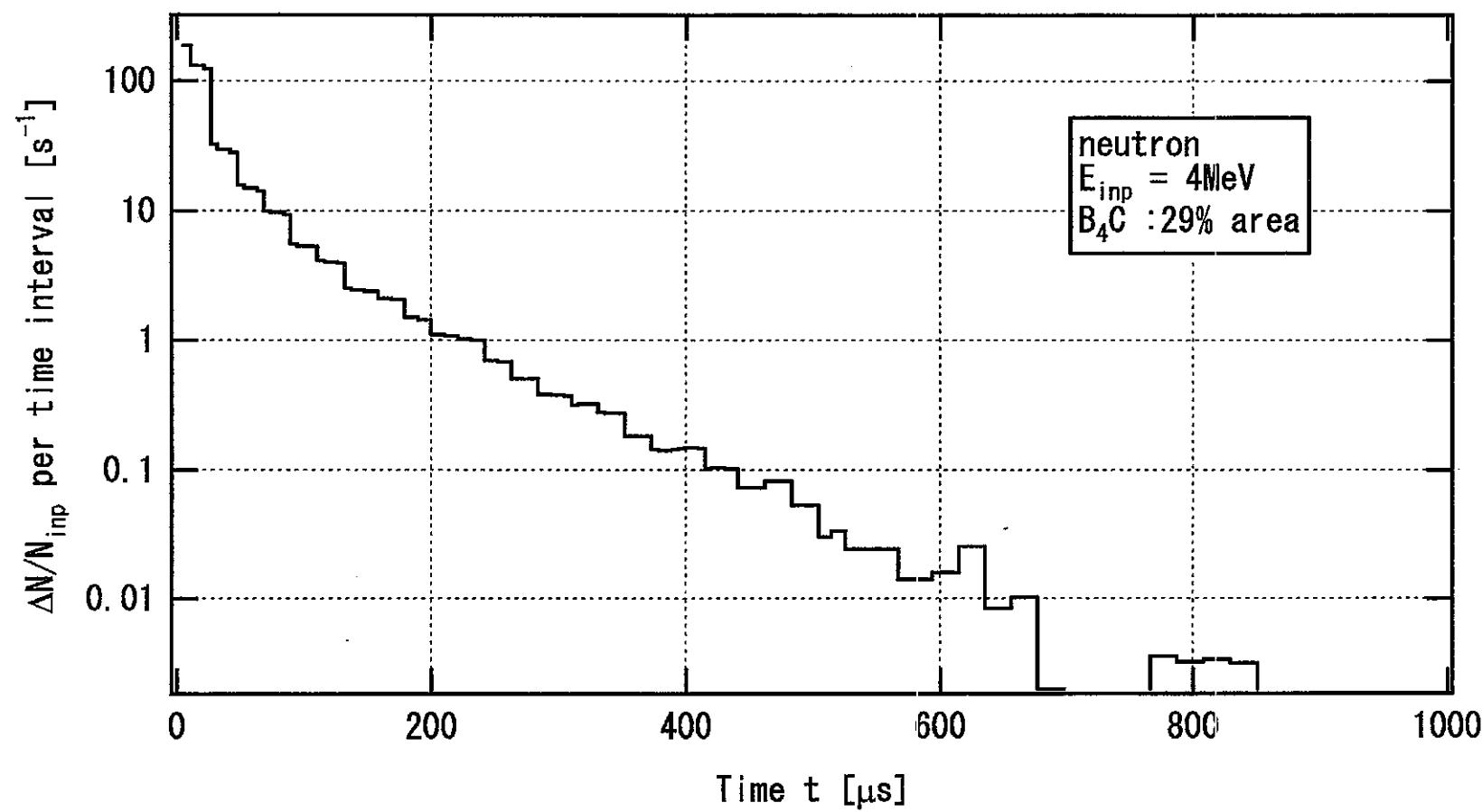


図 2.5-41_1 B_4C が 29% の面積を覆う場合の中性子の TOP 分布 ($E_n = 4 \text{ MeV}$)

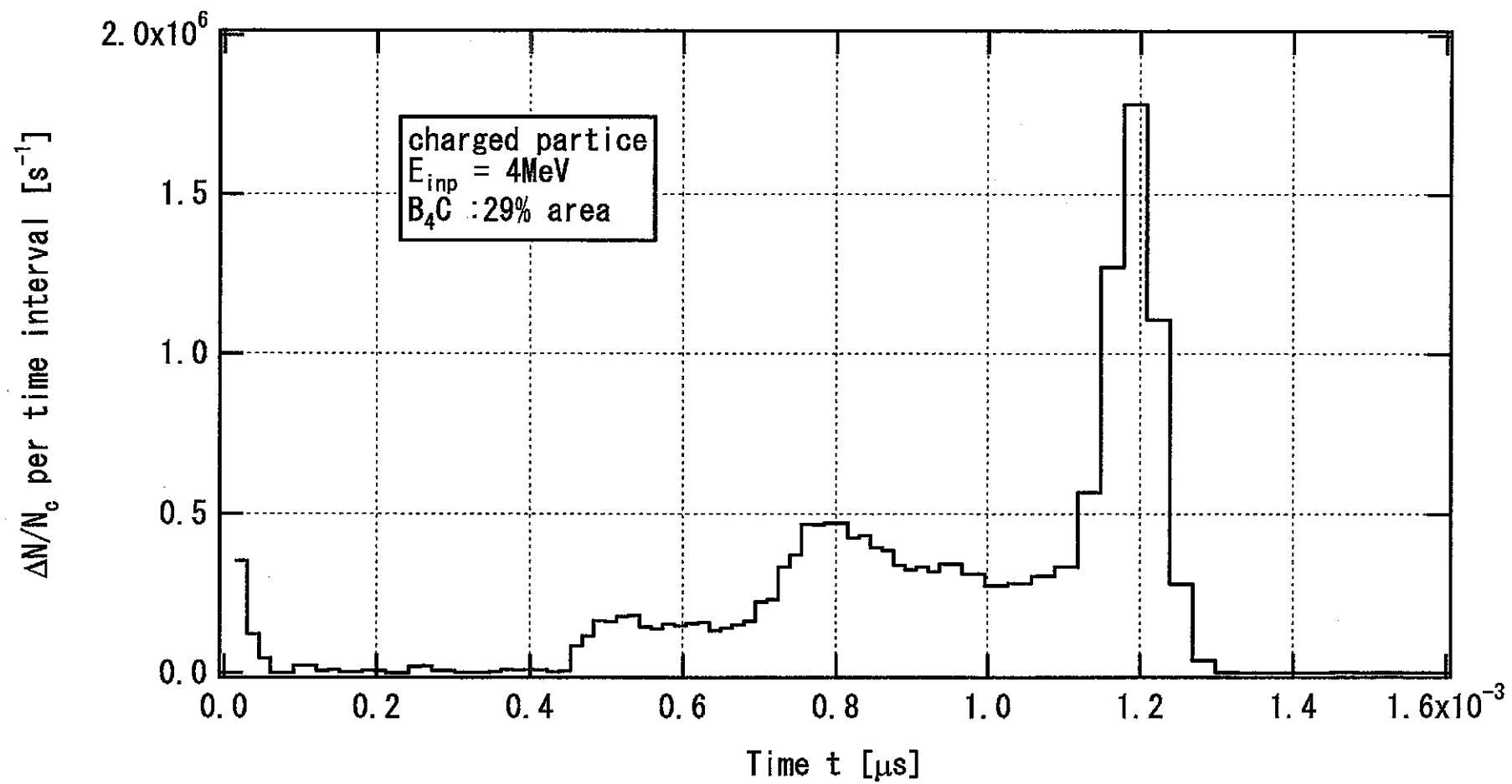


図 2.5-41_2 B_4C が 29% の面積を覆う場合の荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 4\text{MeV}$)

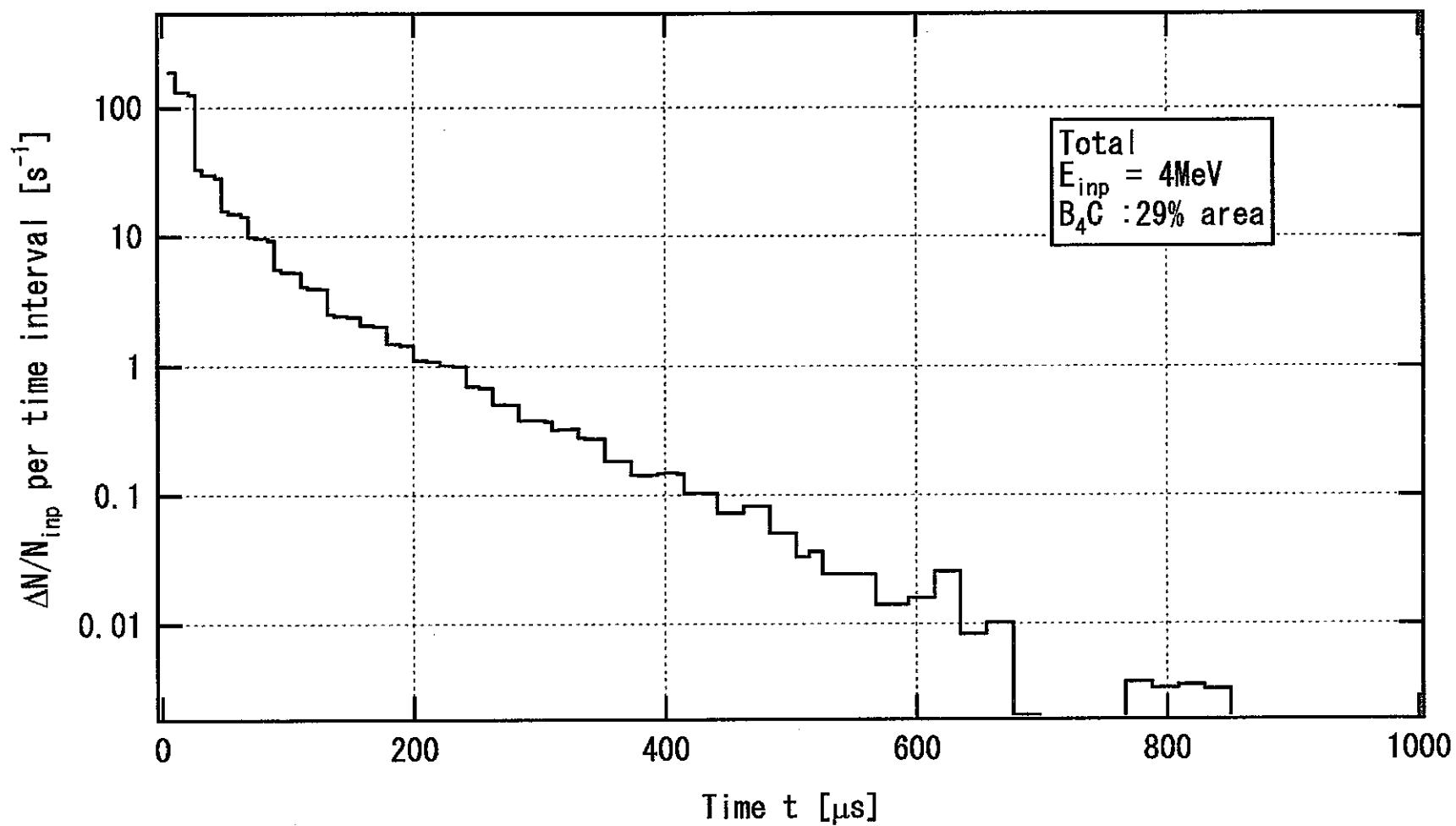


図 2.5-41_3 B_4C が 29% の面積を覆う場合の中性子 + 荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 4\text{MeV}$)

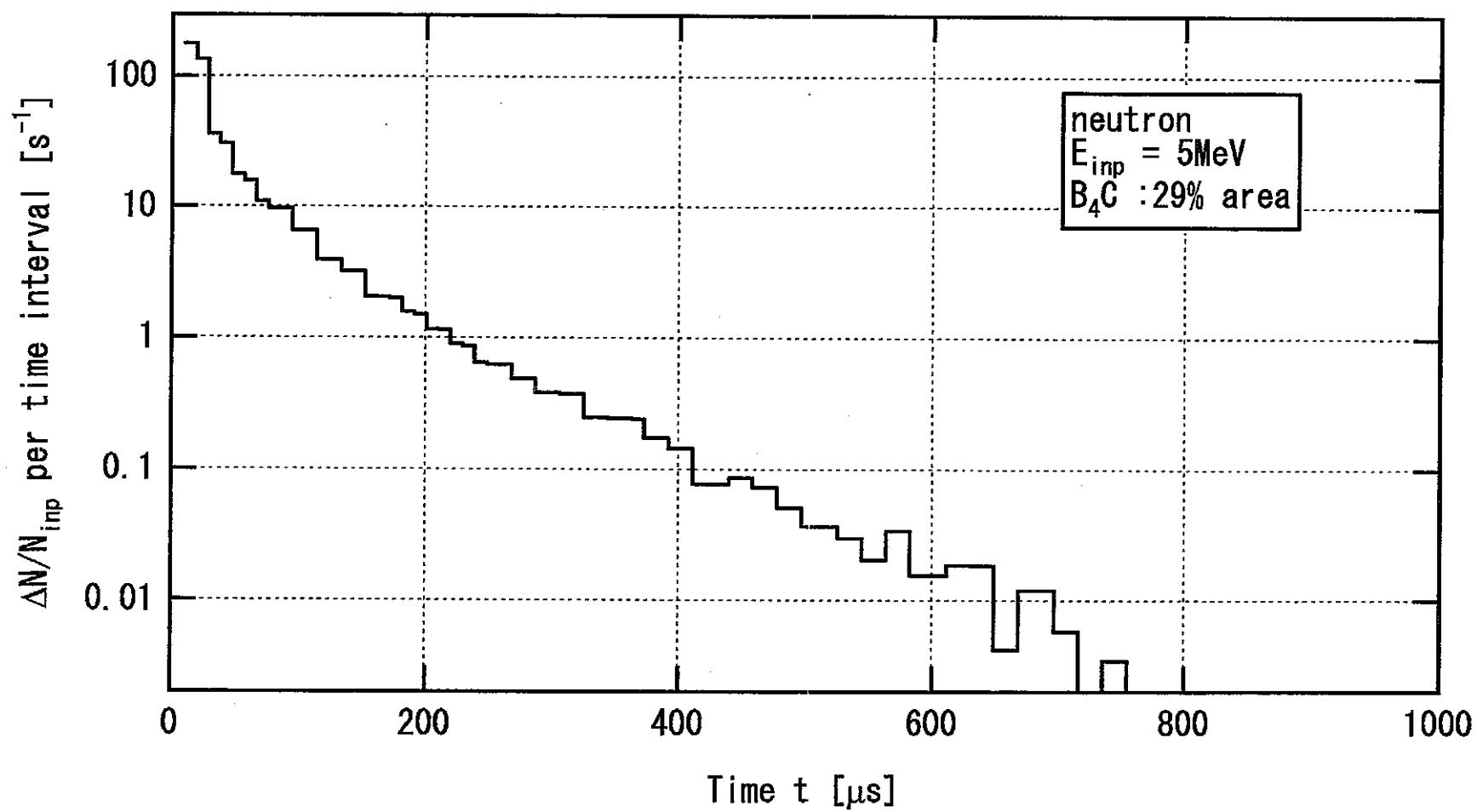


図 2.5-42_1 B₄C が 29% の面積を覆う場合の中性子の TOP 分布 (E_n = 5MeV)

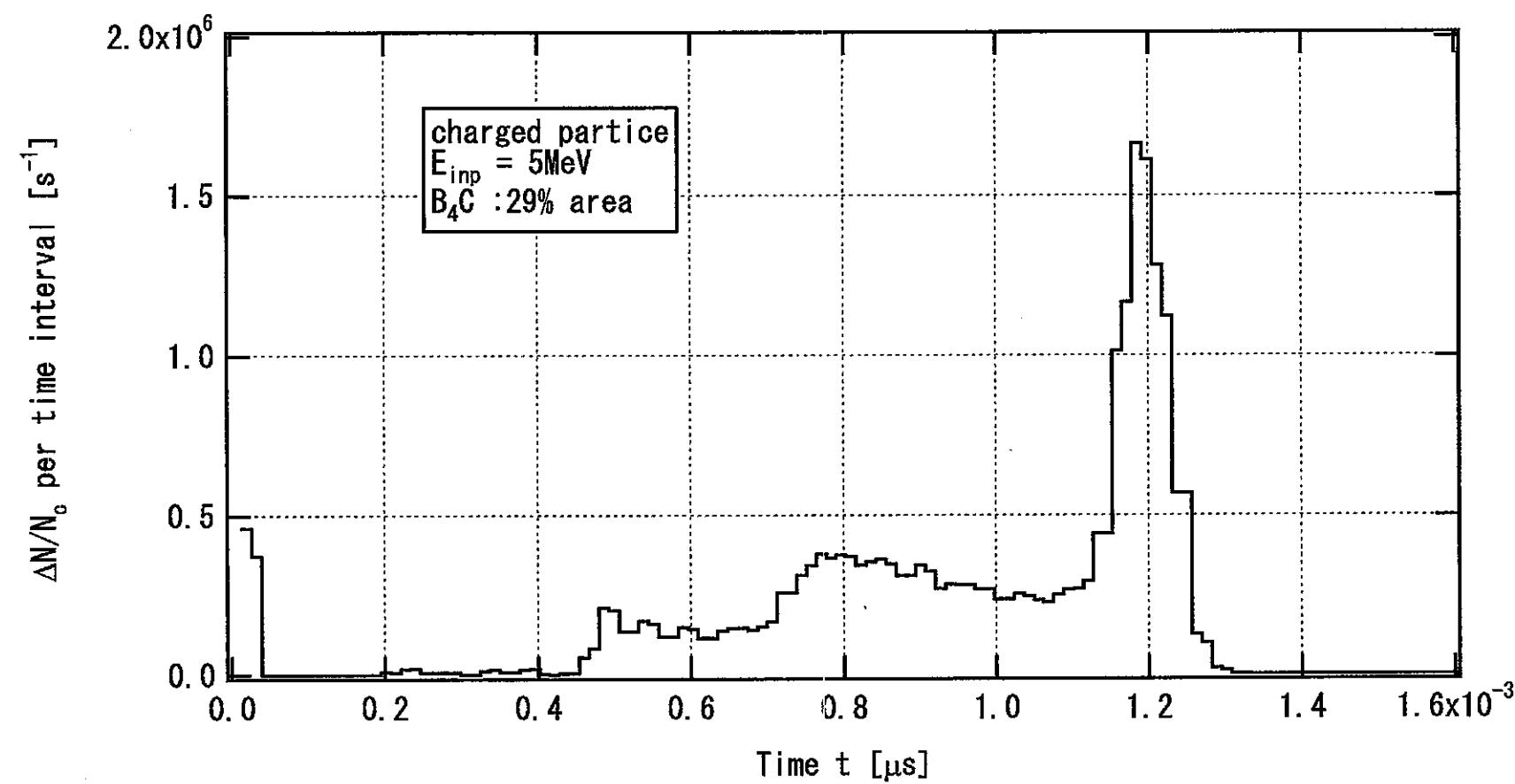


図 2.5-42_2 B_4C が 29% の面積を覆う場合の荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 5 \text{ MeV}$)

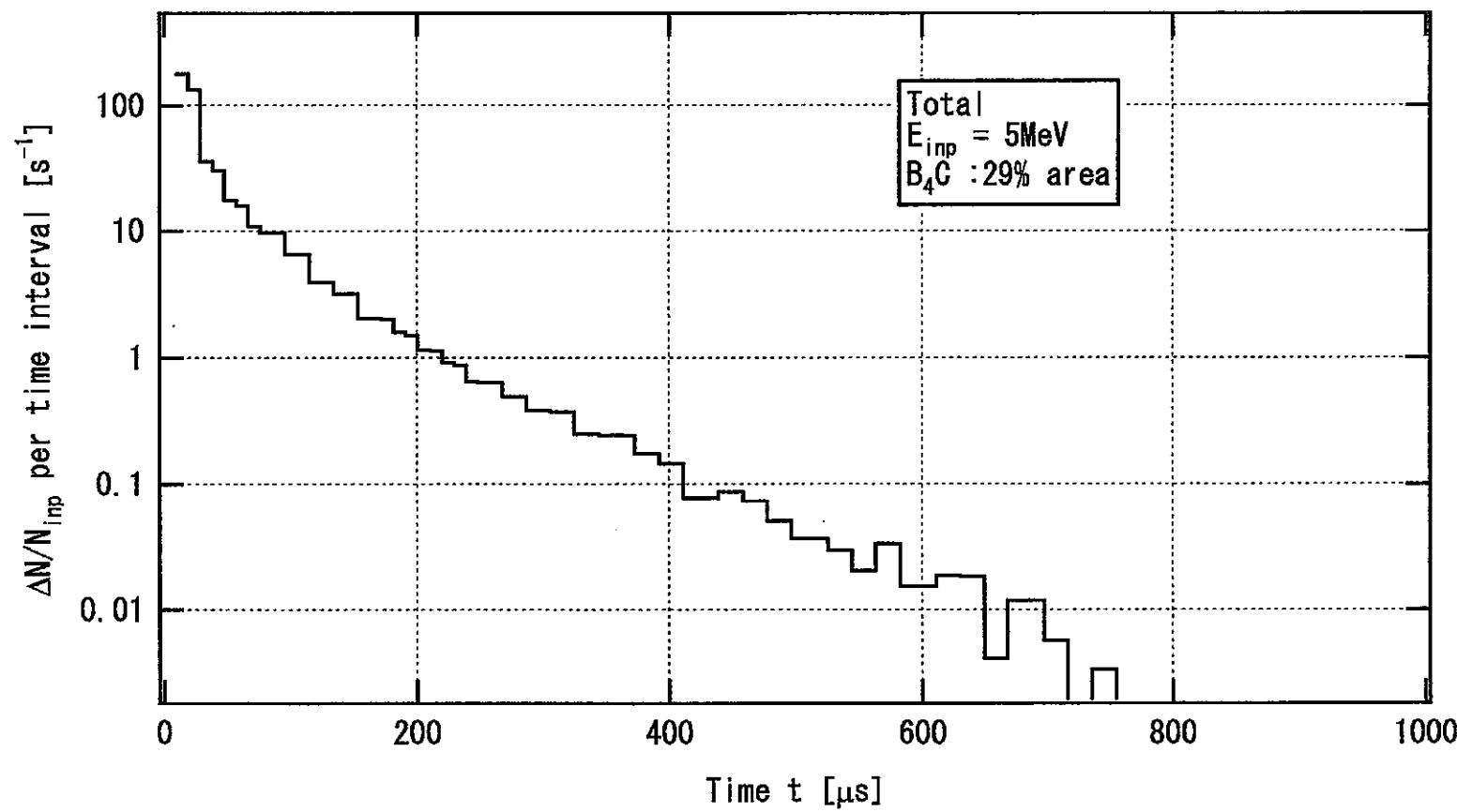


図 2.5-42_3 B_4C が 29% の面積を覆う場合の中性子 + 荷電粒子の TOP 分布 ($E_{\text{n}} = 5 \text{ MeV}$)

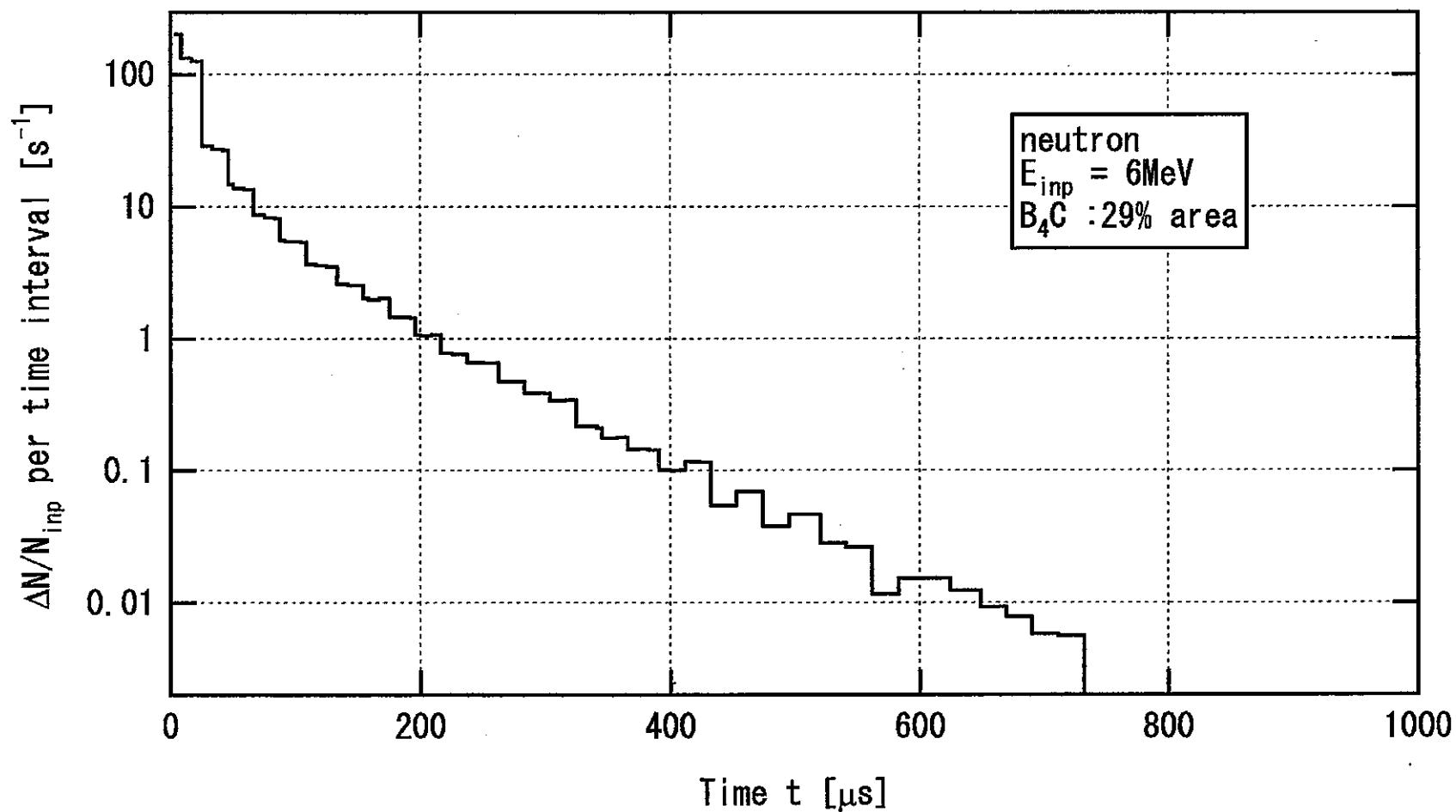


図 2.5-43_1 B_4C が 29% の面積を覆う場合の中性子の TOP 分布 ($E_n = 6\text{MeV}$)

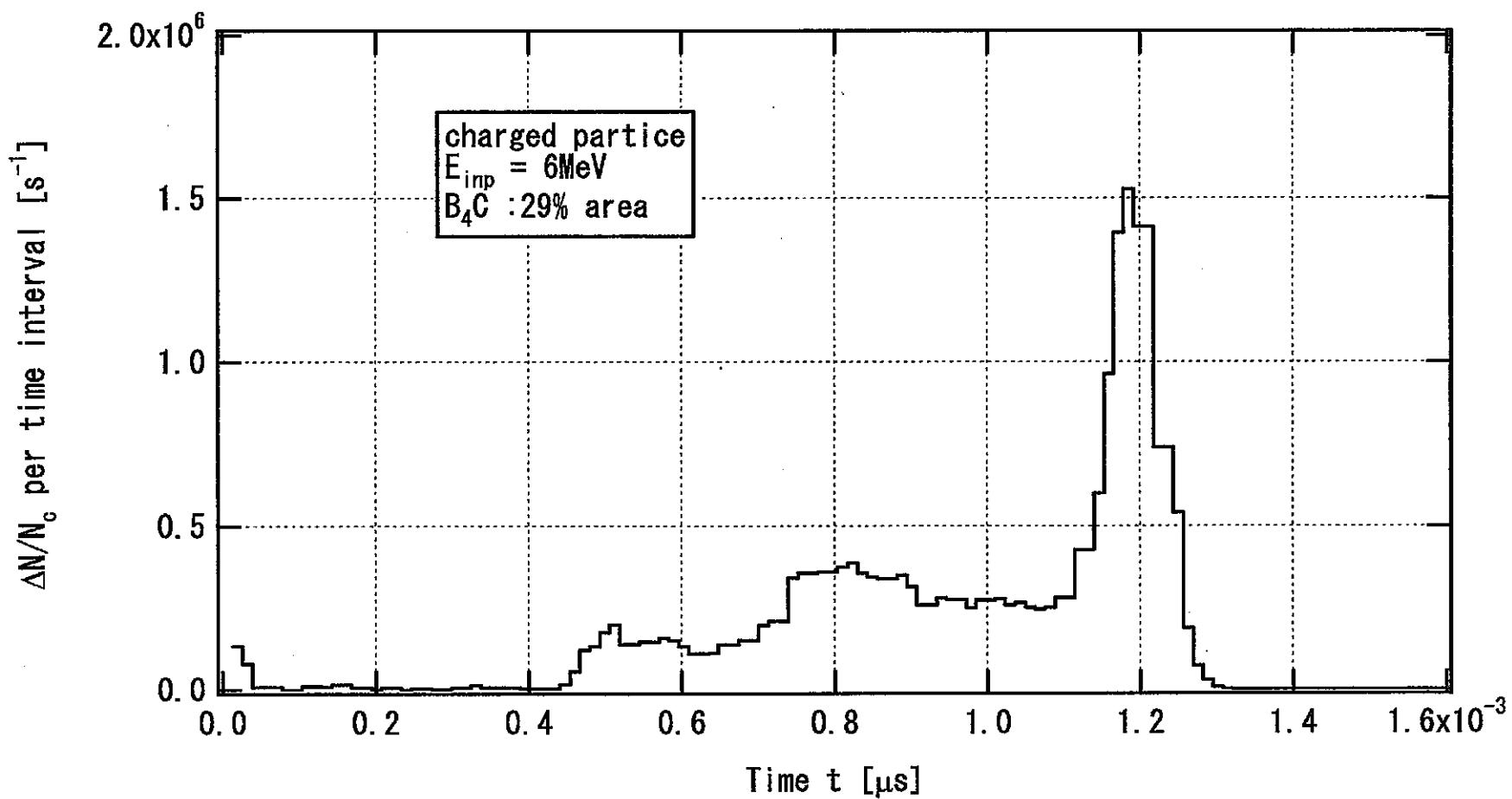


図 2.5-43_2 B_4C が 29% の面積を覆う場合の荷電粒子の TOP 分布 ($E_{\text{in}} = 6 \text{MeV}$)

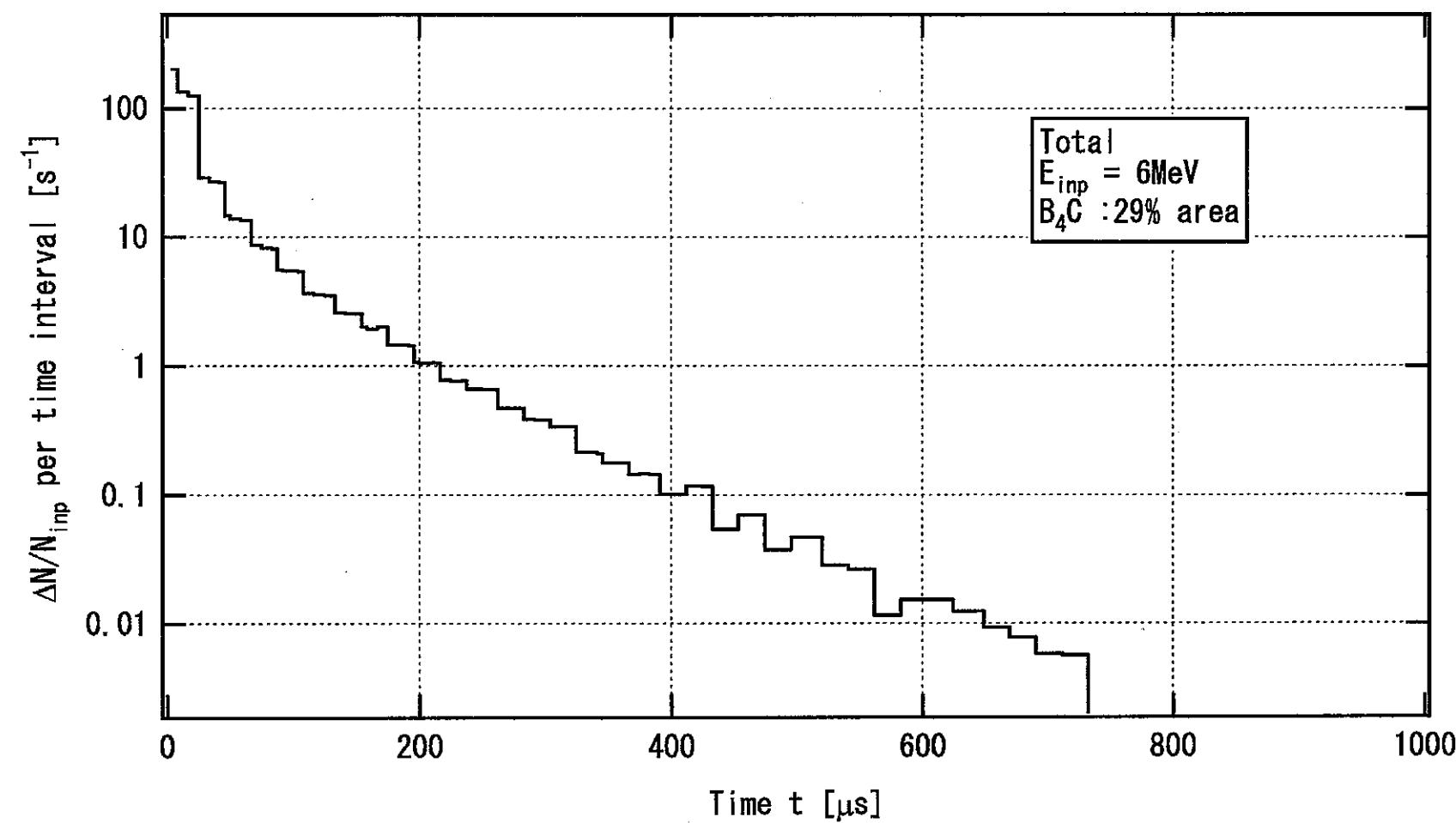


図 2.5-43_3 B_4C が 29% の面積を覆う場合の中性子 + 荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 6 \text{ MeV}$)

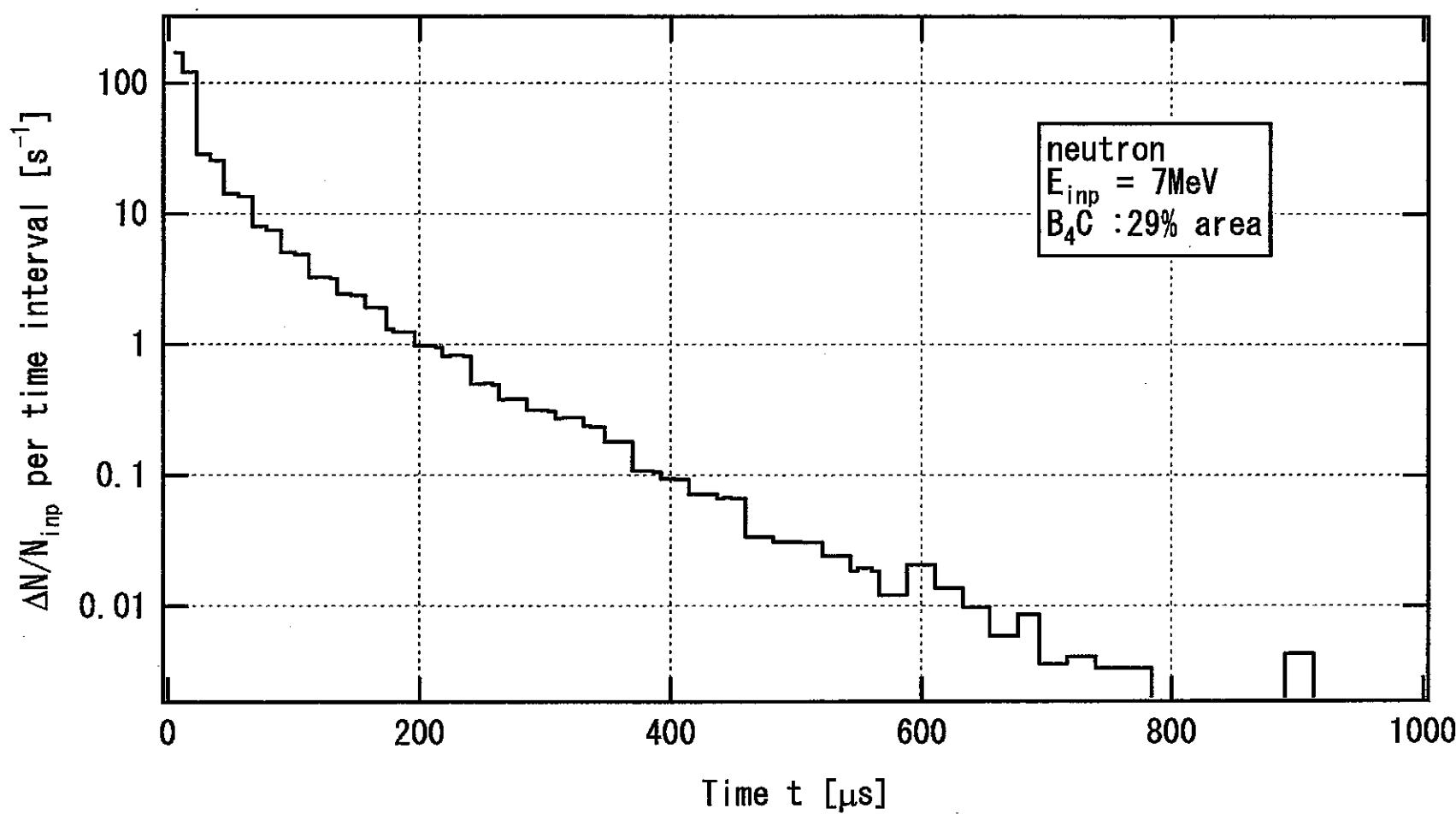


図 2.5-44_1 B_4C が 29% の面積を覆う場合の中性子の TOP 分布 ($E_n = 7\text{MeV}$)

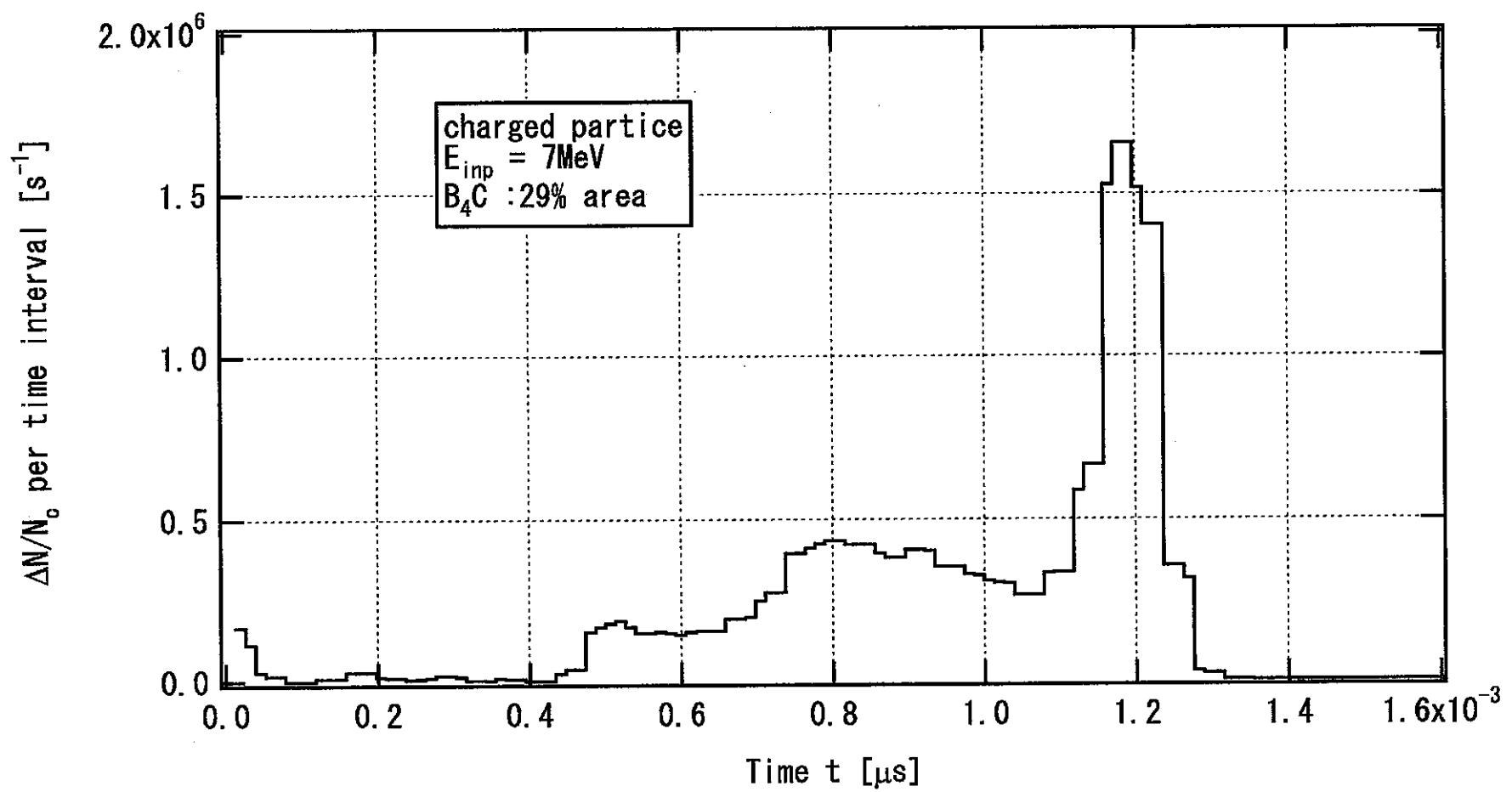


図 2.5-44_2 B_4C が 29% の面積を覆う場合の荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 7\text{MeV}$)

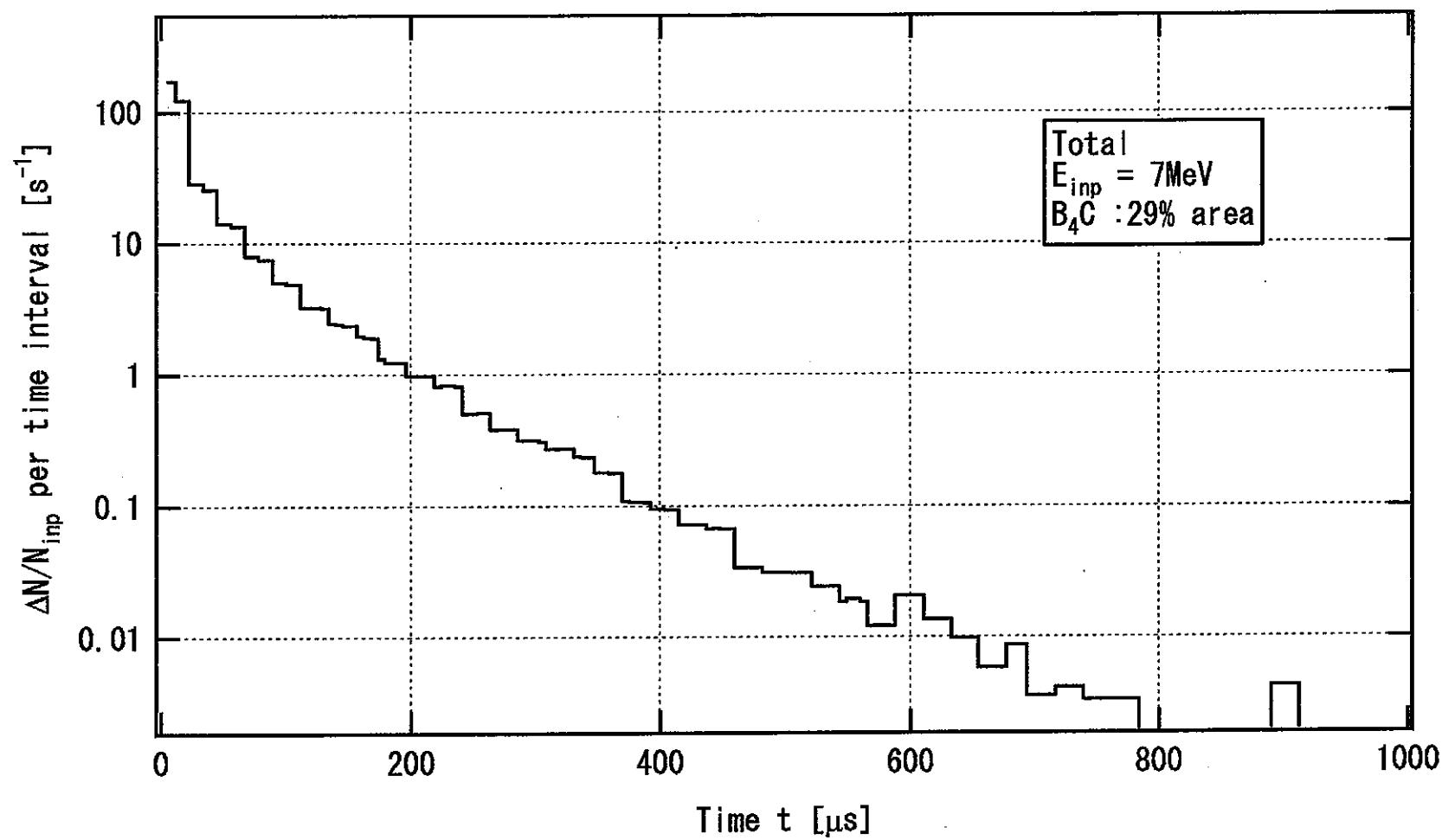


図 2.5-44_3 B_4C が 29% の面積を覆う場合の中性子 + 荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 7 \text{ MeV}$)

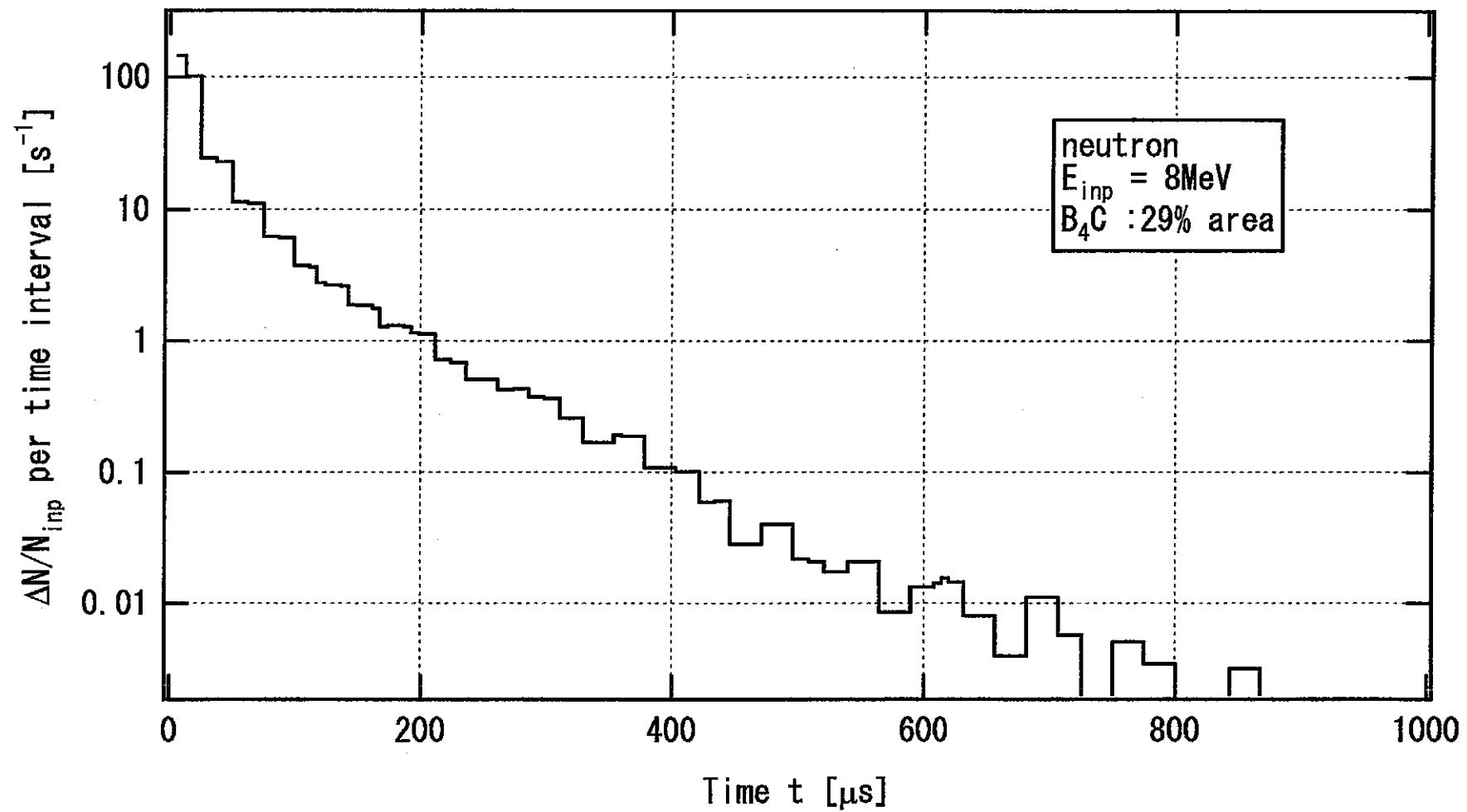


図 2.5-45_1 B_4C が 29% の面積を覆う場合の中性子の TOP 分布 ($E_n = 8\text{MeV}$)

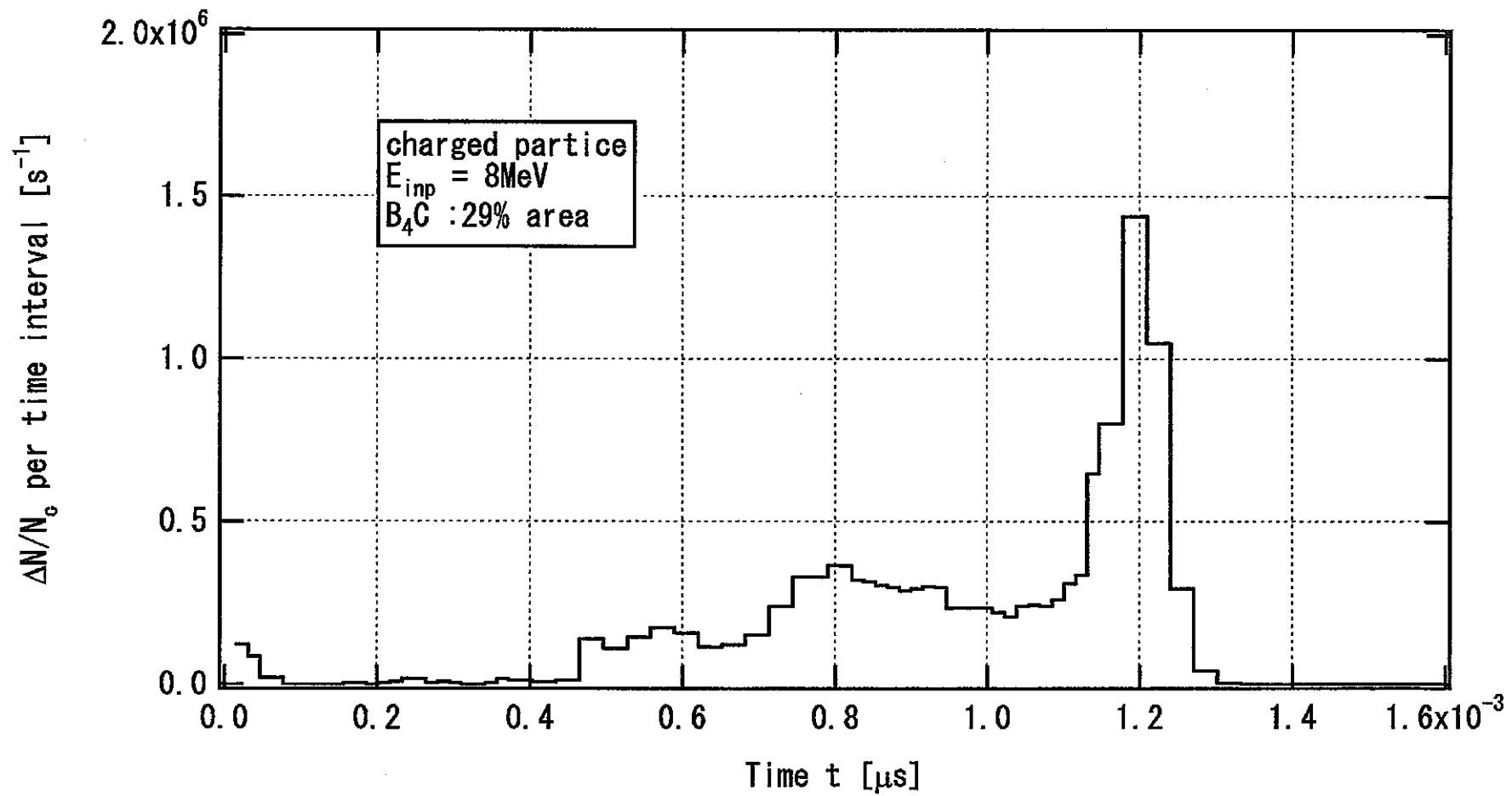


図 2.5-45_2 B_4C が 29% の面積を覆う場合の荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 8\text{MeV}$)

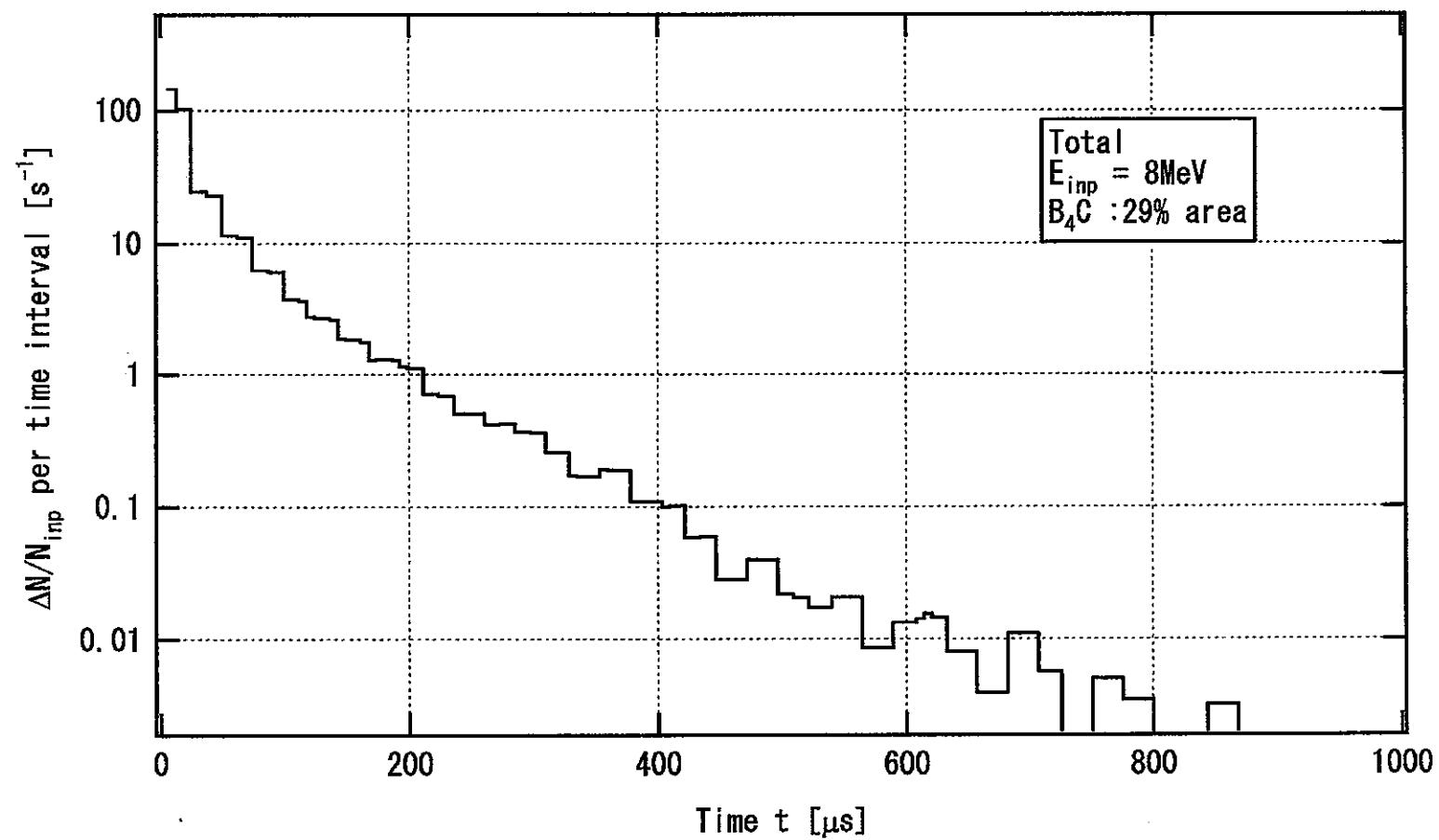


図 2.5-45_3 B_4C が 29% の面積を覆う場合の中性子 + 荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 8\text{MeV}$)

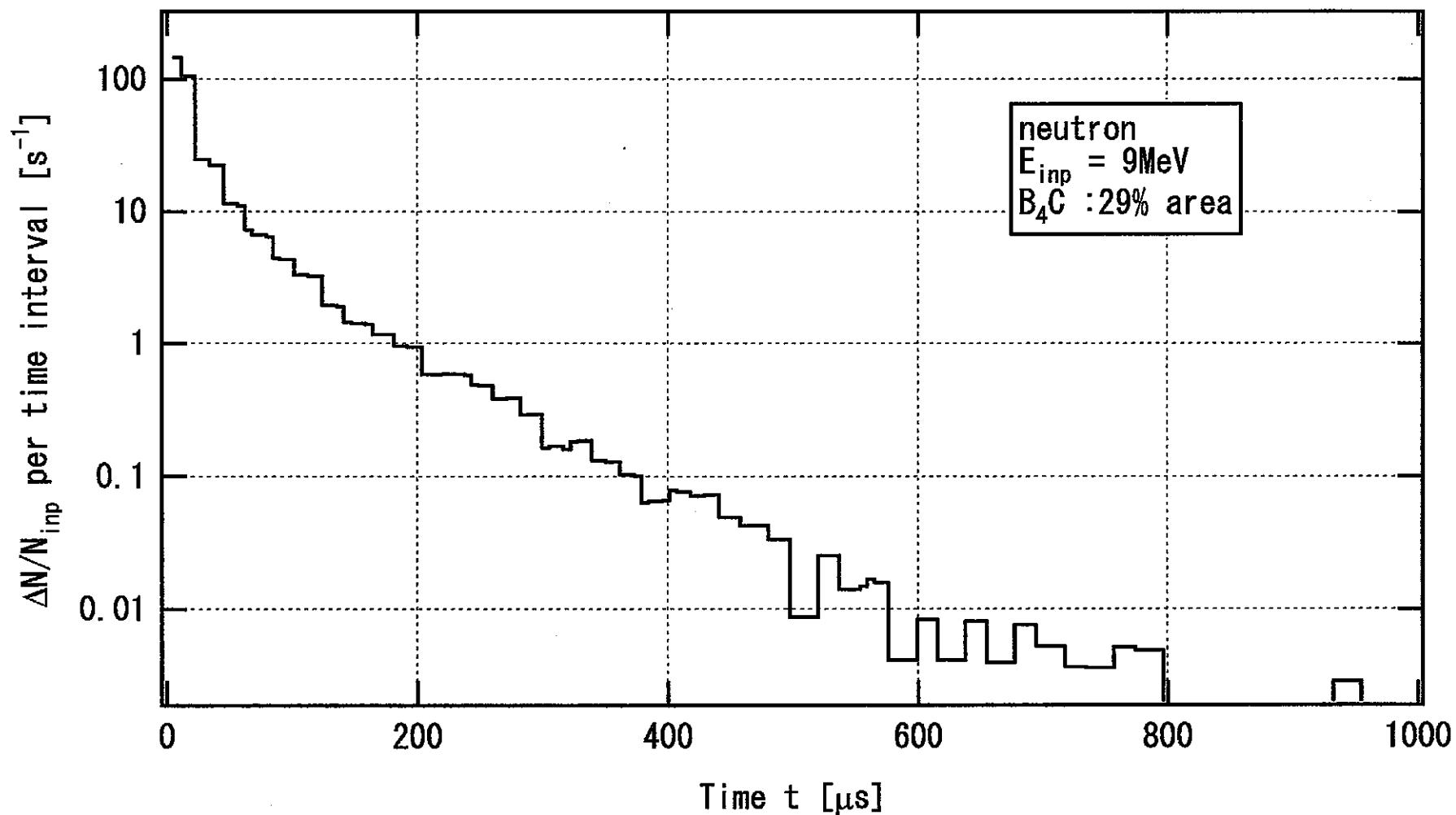


図 2.5-46_1 B_4C が 29% の面積を覆う場合の中性子の TOP 分布 ($E_n = 9\text{MeV}$)

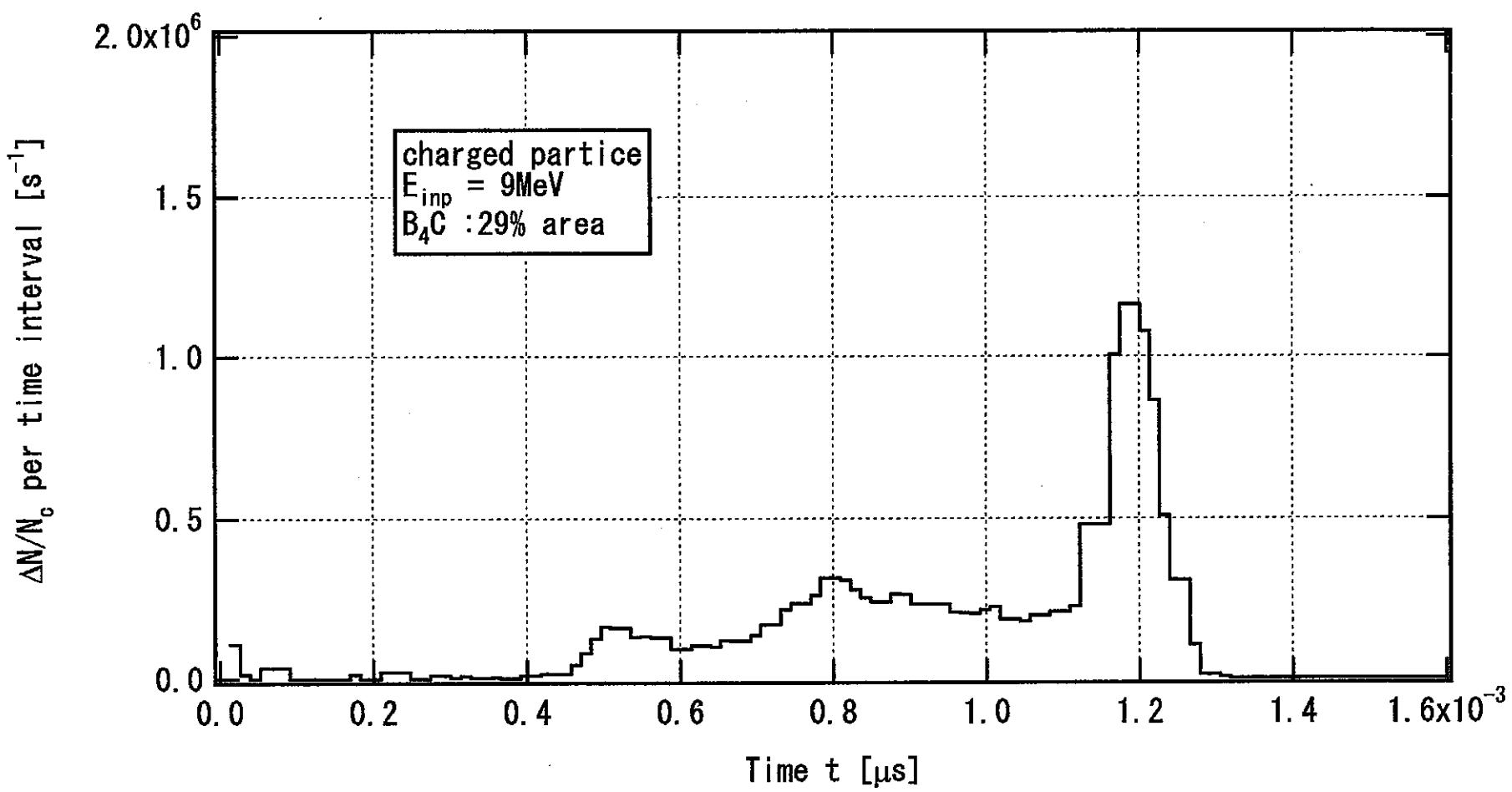


図 2.5-46_2 B_4C が 29% の面積を覆う場合の荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 9\text{MeV}$)

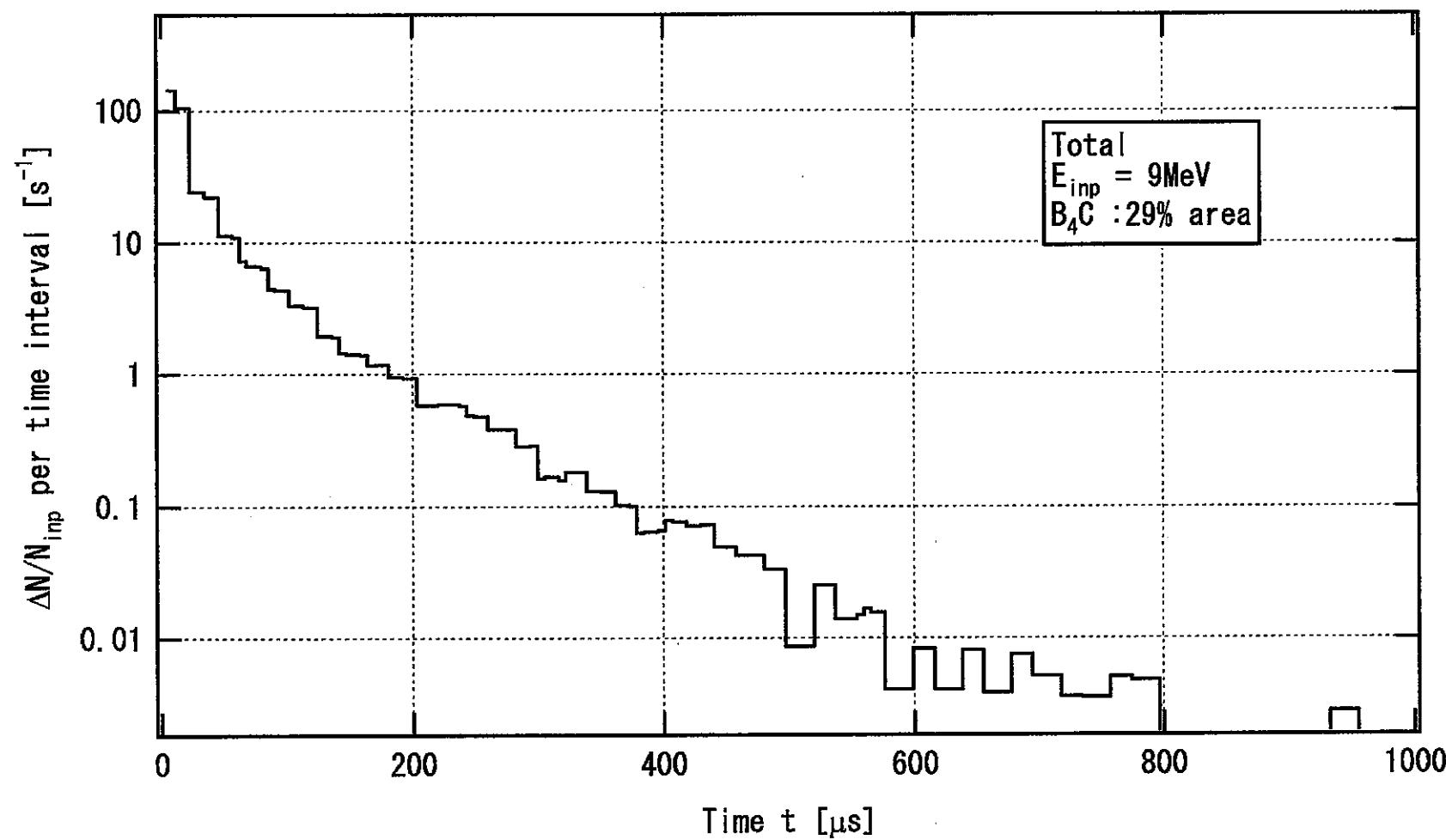


図 2.5-46_3 B_4C が 29% の面積を覆う場合の中性子 + 荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 9 \text{ MeV}$)

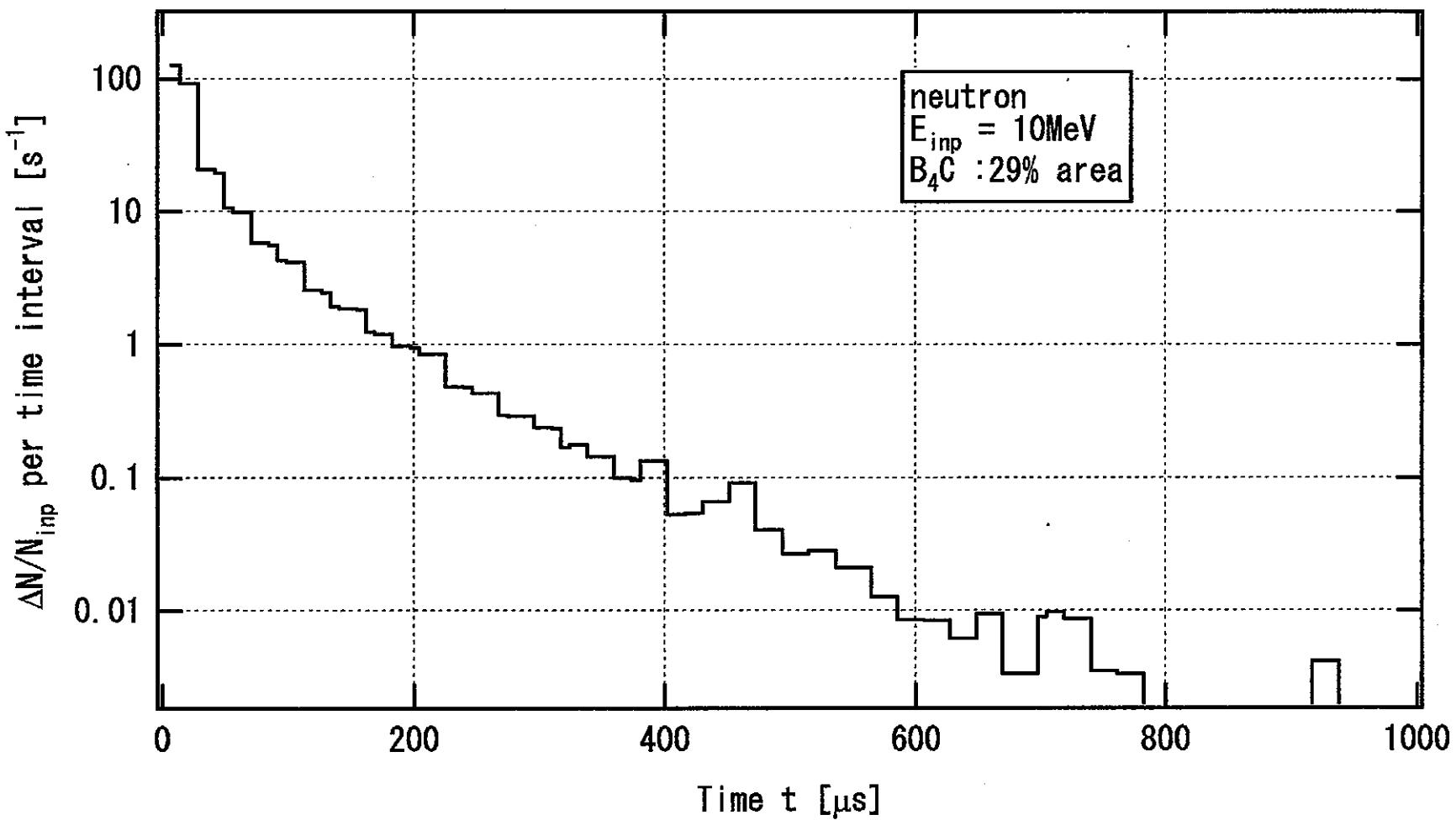


図 2.5-47_1 B_4C が 29% の面積を覆う場合の中性子の TOP 分布 ($E_n = 9\text{MeV}$)

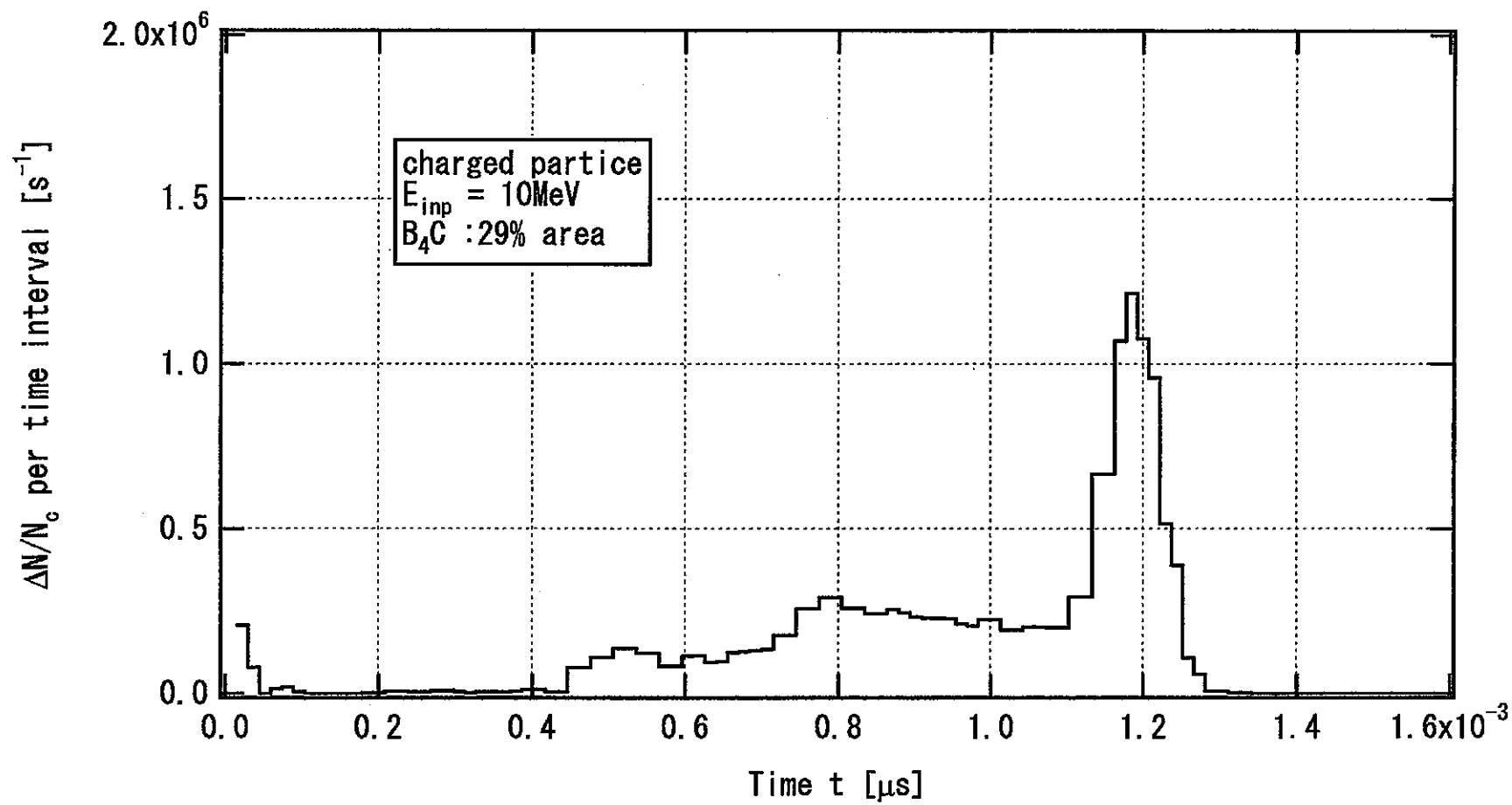


図 2.5-47_2 B_4C が 29% の面積を覆う場合の荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 10\text{MeV}$)

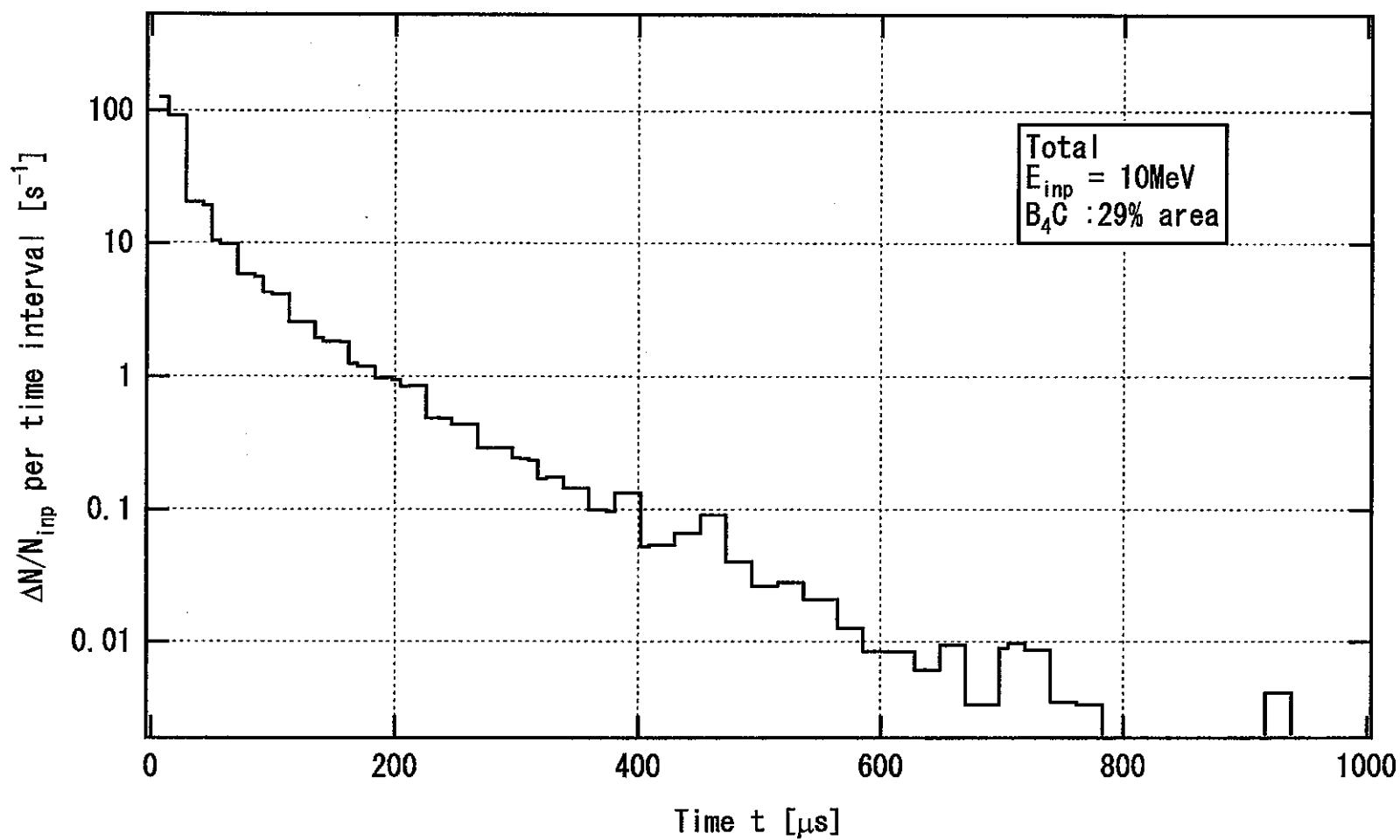


図 2.5-47_3 B_4C が 29% の面積を覆う場合の中性子 + 荷電粒子の TOP 分布 ($E_n = 10 \text{ MeV}$)

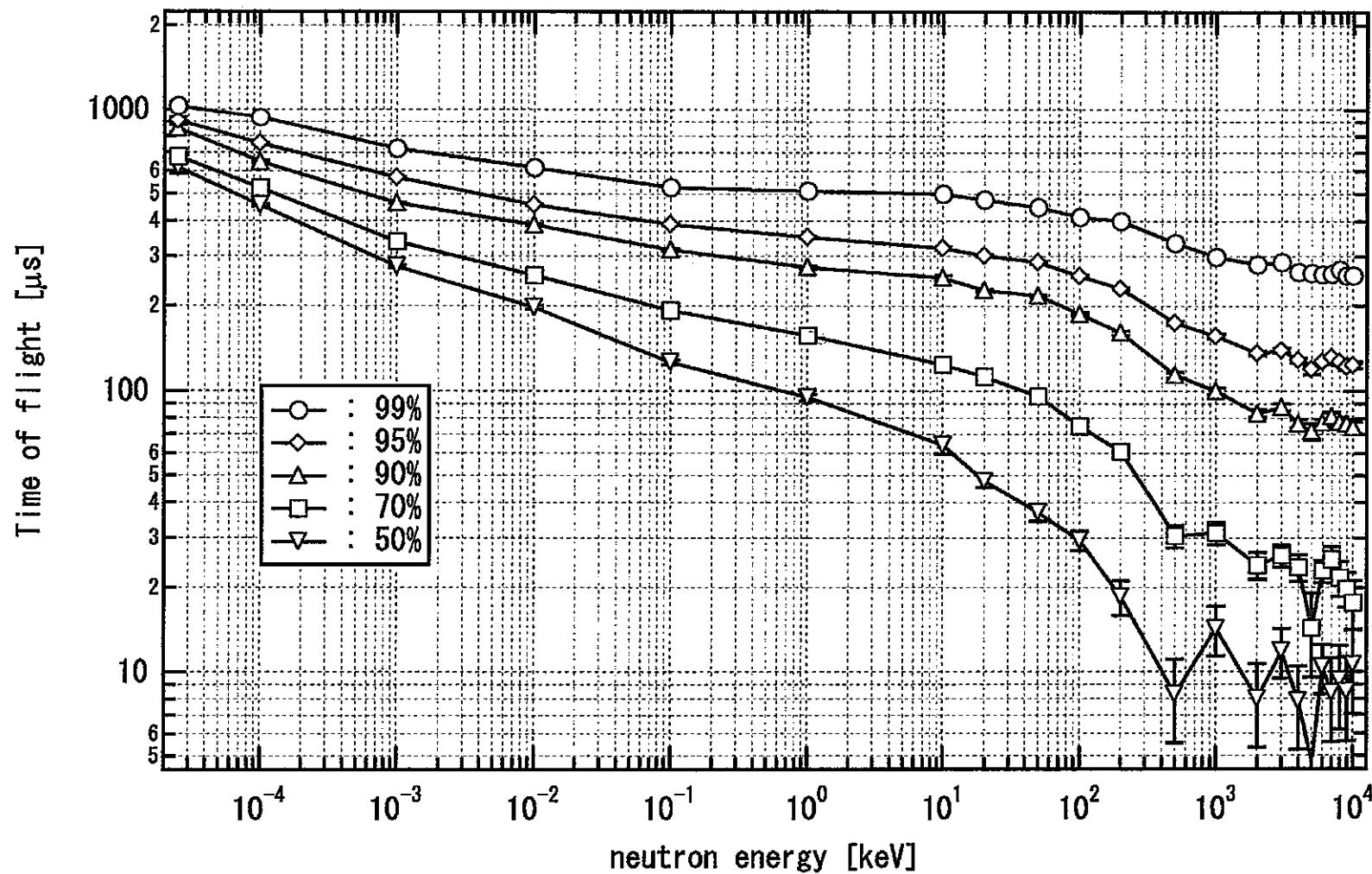


図 2.5-48 飛来中性子の 99%, 95%, 90%, 70%, 50% が電気信号に変換されるまでに要する時間

2.6 考察

ヘリウム照射ベリリウムターゲットから放出される中性子による、ターゲットより 100cm 離れた場所での中性子線量評価結果を表 2.6 にまとめて記す。レムカウンターによる線量当量は、Au 箔、In 箔及び TLD バッチの中性子照射実験時と同じ実験条件 ($E_\alpha=15\text{MeV}$ 、 $I_\alpha \approx 800\text{nA}$) に於ける値である。本研究で求められた線量当量は、熱中性子による値は $16\sim27\ \mu\text{Sv}/\text{h}$ 、中速中性子による値は $30\sim41\ \mu\text{Sv}/\text{h}$ 、熱中性子から 10MeV までの速中性子による値は $9.5\text{mSv}/\text{h}$ であった。レムカウンターの値が正しく線量当量を示しているとすれば、(熱中性子 + 中速中性子) の全中性子に対する割合は、($0.48\sim0.74\%$) と見積もられる。図 2.3-9 に示すように $E_\alpha=15\text{MeV}$ 、 $I_\alpha \approx 800\text{nA}$ ではレムカウンターのカウントレイトは 38kps であり、図 2.3-10 から明らかのように、ヘリウム電流に対するカウントレイトの比が 0.7 程度に減少している。即ち、線量当量は過小評価されていることになる。従って、全中性子による実際の線量当量は $[9.5\text{mSv}/\text{h}]/0.7 = 13.6\ \text{mSv}/\text{h}$ と推定される。従って、中性子検出器を設置した場所での中性子場は、ほとんどが速中性子からなると考えられる。

ベリリウムを衝撃するヘリウムのエネルギーが $E_\alpha > 6\text{MeV}$ の場合、図 2.2-4 より Break-up neutron の生成断面積が最も大きく、続いて第 1 励起状態の ^{12}C が生成される断面積が大きい。従って、中性子検出器を設置した場所に飛来する中性子は、エネルギーが $0.3\sim0.5\text{MeV}$ 及び $4\sim5.5\text{MeV}$ 中性子が大部分であると推定される。

中性子フラックス F はビーム電流値 I に比例する。中性子フラックスが小さいときはレムカウンターのカウントレイト C はフラックス F に比例する。ビーム電流が小さいときは C/I_α 又は $C/F (= m)$ は一定である。3 節で示したようにフラックスの増加とともに(同じことであるが、カウントレイトの増加とともに) 比 C/F は減少する。 C/F が m の 10% 減少する場合、真のカウントレイトを 10% 過小評価している。これは真のフラックスのうち 90% しか評価していないとも考えることが出来る。 10% 程度に減少する値は、本実験では、 $\sim 10\text{kps}$ であった。

NRESP コードでは、定常状態における種々のエネルギーの中性子に対する(中性子 + 荷電粒子)の飛行時間の確率分布(但し、規格はしていない)が計算されている。実験と比較には、飛来粒子が電気信号に変換されるまでの時間である。中性子源から放出される中性子がエネルギー分布を持つ場合、計測に必要とされる時間は低エネルギーの中性子ほど長く、飛行時間の逆数が理想的なカウントレイトの最大値をあたえる。本実験では、中性子の殆どが $E_n > 0.4\text{MeV}$ の速中性子と考えられる。 $E_n = 0.5\text{MeV}$ の中性子の場合、飛来中性子の内 99% の中性子を処理するに要する時間 T_{tot} は $3.2 \times$

10^{-4} s、対応するカウントレイト C は 3.1 kcps である。レムカウンターに入射する中性子のエネルギーは 1MeV 以上の中性子も含まれていると考えられ、1MeV 以上の中性子に対する処理時間は短く、対応するカウントレイトも大きい。 $E_n = 10$ MeV の中性子の場合、 $T_{tot} = 2.6 \times 10^{-4}$ s、 $C = 3.85$ kcps である。従って、ここで対象とした中性子場では、本研究で使用したレムカウンターの使用は、カウントレイトが 3.1 - 3.8 kcps 以内が最良であることを示す。

本実験配置においてレムカウンターのカウントレイトが 4 kcps 以上の場合、ターゲット内でほぼ同時刻 ($t < 10^{-6}$ s) 以外で生成された中性子が混合していると考えられる。ターゲットで生成される中性子のエネルギー分布測定が重要と考えられる。エネルギー分布が分れば、レムカウンターで得られる線量当量に対して、物理的に精度の高い情報が可能である。

表 2.6 箔放射化法、TLD バッチ、レムカウンターで評価したターゲットより 100cm 離れた位置の線量当量。
ヘリウムエネルギー 15MeV、電流値 0.8 μA、ベリリウムターゲット：5 μm 厚。

	熱中性子	中速中性子	速中性子
Au 箔放射化法	16.09 μSv/h	32.38 μSv/h	xxx
In 箔放射化法	26.60 μSv/h	40.51 μSv/h	xxx
TLD バッチ	22.41 μSv/h	xxx	xxx
レムカウンター	~9.5 mSv/h		

第3章 遠隔空中モニタリング手法に関する調査・研究

原子力施設における緊急時無人モニタリングシステムの開発として前年度までは、線量率測定器の開発評価を行った。その一貫としてダストモニタの開発を行い、評価試験及びフライト試験を実施した。

3.1 無人ヘリコプタ搭載ダストモニタ機能概略

無人ヘリコプタ搭載ダストモニタは、緊急時に現場上空に飛来し現場上空のダストをサンプリングするものである。フィルターにサンプリングされた塵埃は、ヘリコプタ着陸後、フィルターホルダより取り出し放射能測定を行う。また、ヘリコプタは GPS を装備しているため、機体の高度及び緯度経度が測定可能である。従って、フライト測定の繰り返しにより空气中放射能濃度を 3 次元的に測定評価する事が可能である。本ダストモニタに必要とされる機能を以下に示す

- (1) 地上基地局からのサンプリング制御機能
- (2) 積算流量の測定
- (3) フィルター交換の容易性
- (4) ヘリコプタに搭載可能な外形及び重量

集塵されたフィルターは放射能測定装置にて測定するが、この場合測定検出限界があり、これは測定予定放射能濃度に影響する。本研究では、放射能測定予定濃度を、 $1 \times 10^{-5} \text{ Bq/cc}$ とした。

3.2 設計検討

本ダストモニターの設計にあたっては、ヘリコプタへ搭載可能とする物理的、電気的な設計条件、及びダストサンプラとして使用し集められた塵埃を放射線測定器にて測定するための放射線測定上の設計条件が存在する。以下、上記 3 点についての設計検討内容及び結果を述べる。

3.2.1 設計条件

3.2.1.1 無人ヘリコプタ搭載物理的設計条件

使用無人ヘリコプタ ; YAMAHA 社製 RMAX

搭載ペイロード ; 約 10Kg 以内

搭載最大寸法 ; 約 350 * 350 * 300mm 以内

最大飛行時間 ; 約 1 時間

3.2.1.2 無人ヘリコプタ搭載電気的設計条件

1) 電源

エンジンより発生するノイズの混入を防止する観点からダストモニタ自身にて電

源を供給する必要がある。

2) 電磁シールド

エンジンから放射される電磁ノイズの電子回路への混入を防止するため電磁シールドが必要である。

3. 2. 1. 3 放射線測定上からの設計条件

1) 算流量の測定

ダストサンプラの絶対条件として吸引した空気の積算流量を正確に把握する必要がある。

2) サンプリング制御

ダスト濃度マップ作成を目的とした場合サンプリング開始、終了地点を外部より制御可能である事が必要である。

3. 2. 2 設計の基本方針

3. 2. 2. 1 機械的設計検討基本方針

1) 外形寸法

外形寸法は、先に実績のある線量率測定器を筐体と同じとする。但し、フィルターホルダは筐体部下部に突出した形にて取り付ける。

2) 重量

電気品選択終了後、電気品重量を算出し残重量の中で設計を行う事とする。但し、先の線量率測定器の筐体重量 + 1Kg 以内にて設計を行う。

3. 2. 2. 2 電気的設計検討基本方針

1) 電源

電源は、ポンプ使用時に十分な消費電流がとれる、容量の大きい鉛蓄電池を使用する。鉛蓄電池の容量は、ポンプ及び使用電気品の消費電流を算出して決定し、飛行時間の 1 時間以上の使用が可能な容量の鉛蓄電池を選定する。

2) 電磁シールド

前年度の線量率測定器開発時の結果に基づいた、電磁シールド対策を行う。

3. 2. 2. 3 放射線測定設計基本方針

1) 積算流量測定

積算流量は、小型積算流量表示付デジタル流量計の使用を検討する。但し、積算の開始・停止・リセットは、マニュアルにて操作可能な物を選択する。

2) サンプリング制御

ヘリコプタからの接点入力によりポンプ電源を ON/OFF し、サンプリング制御を行う。

3) ポンプ流量

ポンプ流量は大きい程、サンプリング終了後の測定精度が向上する。然しながら、流量が大きくなるとポンプ消費電流が大きくなるため、蓄電池も比例して大きくなり、重量が重くなる。ここでは、1時間の集塵にて予定測定濃度が測定可能かつ10L/min以上の能力を持つポンプを選択する事とした。

3.3 市販既存品の検討

上記の設計基本方針をもとに、市販既存品を調査した結果を表 3.3-1 に示す。表 3.3-1 より重量、制御、ポンプ流量等の面から検討した結果、市販既存品に上記機能を満足させる製品が存在しない事が明らかになった。従って、上記機能を満足させるダストサンプラを試作し、実験に供した。

3.4 無人ヘリコプタ搭載用ダストサンプラの特性

重量 : 10Kg 以内 (内訳 機械品 約 4.5Kg 電気品 約 5Kg)

寸法 : 350mm x 350mm x 300mm 以内

サンプリング時間 : 1 時間以上

筐体 : 簡易防滴仕様

フィルター口径 : 47mmΦ

流量測定 : デジタル流量計にて瞬時、積算表示可能なもの

ポンプ : DC 動作 10L/min 以上

吸引コントロール : 外部接点入力 接点接続保持にて吸引動作保持とする。

電源 : 鉛蓄電池

3.5 使用部品検討

1) 流量計

市販流量計の比較を表 3.5-1 に示す。表より寸法・重量・機能は、SEF-51 が最適であり、これを使用する。

2) ポンプ及び鉛蓄電池の検討

本器において最も電流を消費すると予想されるのがポンプであり、また、最も重量があるのが鉛蓄電池である。よって、これらの選定には、重量面及び消費電流面から検討する必要がある。

鉛蓄電池電圧は 12V のため、12V にて駆動可能かつ 10L/min 以上の流量が確保可能なポンプを選定する。次にそのポンプの消費電流及び他の電気品消費電流を積算し、この消費電流の状態にて 2 時間程度駆動可能な容量を持つ鉛蓄電池を選定する。それら重量を積算し、目標電気品重量の 5Kg 以内に収まっている事を確認して部品を決定した。

3) ポンプの選定

10L/min 以上の流量が必要なため最大流量 13L/min の物を選定した。

メーカー ; 株エムアンドエフエンタープライズ社

消費電流 ; 1.4A

重量 ; 1. 25Kg

4) 流量計

メーカー ; 株エステック社

型式 ; SEF-51

重量 ; 0. 8Kg

消費電流 ; 0. 1A (100V) (DC12V に換算すると約 1A となる。)

以上より、主な電気品の消費電流は合計 2. 4A となる。この電流を 2 時間駆動するためには、約 4. 8Ah 程度の容量の鉛蓄電池が必要となる。下記の鉛蓄電池は、この条件に合致する。

メーカー ; 日本電池株

型式 ; PX12050

公称電圧 ; 12V

定格容量 ; 5. 0Ah

重量 ; 約 2Kg

以上の部品重量を合計すると、約 4Kg となり目標重量を満たしている。従って、以上の部品を用いて、本ダストサンプラを試作した。

3. 7 無人ヘリコプタ搭載用ダストサンプラの試作

小型ヘリコプタ搭載ダストサンプラのブロックダイアグラムを図 3. 7-1 に、ダストサンプラ内の実態配置図を図 3. 7-2 に示す。試作に際し、使用した部品の一覧を表 3. 7-1 及び表 3. 7-2 に示す。

製作したダストサンプラに対し、幾つかの試験項目についてのチェックを実施し、以下の結果を得た。

1) 外観検査

目視により外観を確認し有害な傷、歪み、汚れ等のないことを確認した。

2) 員数検査

表 3. 7-3 に基づき、構成、員数を確認し欠品のないことを確認した。

3) 寸法検査

概観設計図に基づき、外観の寸法が図面通りの寸法公差内であることを確認した。

4) 配線検査

接続図をもとに誤配線のないことを確認した。

5) 電圧測定

規格値が12V 以上のバッテリーの出力電圧を測定した結果、12. 53V であった。

6) 動作確認

6-1) 流量計動作確認

流量計スイッチをONすることにより流量計に電源が供給され、流量計の電源スイッチをONすることで流量計が正常に動作することを確認した。

6-2) ポンプ動作確認

ポンプの外部起動信号を入力することにより、ポンプが動作することを確認した。

7) 流量確認

ろ紙ホルダーにろ紙を装着した状態でポンプを動作させ、流量を計測した結果、瞬時流量が 15.0 L/min であった。従って、流量が 12 L/min 以上である事が確認された。

8) バッテリーでの動作時間確認

通常使用状態でバッテリーおよび流量計を動作させた状態で連続運転を行い、そのときの瞬時流量及び積算流量の時間変化を測定した。表 3.7-4 に計測された値を、図 3.7-3 に瞬時流量及び積算流量を時間に対してプロットする。

9) 重量測定

重量を測定し、9.5kg 以下である事を確認した。

試作した小型ヘリコプタ搭載ダストサンプラの全景を写真 3.7-1 に、内部の全体を写真 3.7-2 に、ポンプおよびバッテリー部を写真 3.7-3 に、ポンプ、バッテリーおよびDCインバーター部を写真 3.7-4 に、本体側面を写真 3.7-5 に、本体側面（流量計取付け面）を写真 3.7-6 に、本体側面のスイッチおよび接続コネクタ取付け面を写真 3.7-7 に、本体側面の排気口面を写真 3.7-8 に、本体底面を写真 3.7-9 に、スイッチおよび接続コネクタ部及びその拡大を写真 3.7-10 及び 3.7-11 に、流量計用カバー部を写真 3.7-12 に、流量計表示および操作部を スイッチおよび接続コネクタ部の拡大写真、流量計用カバー部写真 3.7-13 に示す。

3.8 小型ヘリコプターを用いたダストサンプランの試験

試作したダストサンプラを小型無人ヘリコプターに搭載し、ヘリコプターフライトにダストサンプラとして機能することの確認試験を実施した。小型ヘリコプター搭載時全景を写真 3.8-1 に、ヘリコプター搭載の状況を写真 3.8-2, 3.8-3, 3.8-4 に、小型ヘリコプターフライトの状況を写真 3.8-5 に示す。

以下の項目の試験を実施した。

- 1) 地上に於いて無人ヘリは停止状態で、ダストサンプランを 10 分間起動し、吸引積算流量が 0.16 m³/10min である事を確認した。
- 2) 無人ヘリのエンジンの回転数を約 6000 rpm まで上げ、高度 1 m にてダストサンプランを 10 分間起動し、吸引積算流量が 0.17 m³/10min である事を確認した。
- 3) 無人ヘリを上空 30m, 20m, 10m でホバリングさせ、その状態でダストサンプランを 10 分間起動し、吸引積算流量が 0.16-0.17 m³/10min である事を確認した。

4) 無人ヘリを上空 30mで 18km/h で旋回させ、その状態でダストサンプラーを 10 分間起動し、吸収積算流量が $0.16 \text{ m}^3/10\text{min}$ である事を確認した。

この試験に際しては、試験毎に新しい電池、新しいフィルタを使用した。

得られた試料（フィルタ）を GM 計数管で計測し、計数率を測定した。表 3.8 に測定結果を示す。又、無人ヘリの排ガスをフィルタに直接当て（10 分間）、その後 GM 計数管で計測した。バックグラウンド値と共に、表 3.8 に結果を示す。表よりダストサンプラーとして機能していることが確認される。

小型ヘリコプターに試作したダストサンプラを搭載し試験を実施した際、今後改良すべき箇所が見つかった。以下に改良すべき事項を列挙する。

1) 今回試作したダストサンプラの重量は 9.5kg である。小型ヘリコプターの搭載加重が最大 10kg であるため、搭載重量に余力がないことより、ダストサンプラのさらなる軽量化が望ましい。

2) 小型ヘリコプターから電源を供給によりダストサンプラーの動作が可能であったが、サンプラー専用の供給用コネクタ、切換えスイッチ等の回路の追加が望ましい。

3) 小型ヘリコプターの排気用マフラーがダストサンプラ取付け部の前面にあたり、ろ紙ホルダー位置を後部に配置したためにろ紙ホルダーと対称の位置に取付けられたエアーの排気口が前面となっている。排気効率等の面からエアーの排気口の位置を、ろ紙ホルダーに対して 90 度の位置に変更する必要がある。

4) 小型ヘリコプターを測定ポイントまで移動した後、ポンプを起動させ、ダストのサンプリングを行う。ポンプが確実に動作したことを確認するための外部出力回路の追加が望ましい。

5) 電源投入後の流量計の初期設定は、積算流量を決めるために、頻繁に行う。この操作を容易に行うための対策として、ケースカバーの開閉を容易にする構造が望ましい。又、バッテリー残量確認のための電圧表示用メータの付加等が望ましい。

表 3.3-1 市販既存品調査結果

品名	バリアルストロークポンプ	ミニポンプ	携帯用ローボリュームエアサンプラ	エアオートサンプラ
型式	VS-500	MP-603T	SL-15P	AAS-1
流量	最大 5L/min	最大 5L/min	最大 40L/min	2L/min
流量計	フロート型流量計	フロート型流量計	フロート型流量計	フロート型流量計
ポンプ制御	タイマー制御によりポンプ吸引時間設定	タイマー制御によりポンプ吸引時間設定	手動制御	タイマー制御
外部制御	無	無	無	無
電源	AC100 もしくは、バッテリー	AC100 もしくは、バッテリー —	AC100V	バッテリー
重量	約 1Kg	約 0.8Kg	約 10Kg	約 7Kg
動作時間	約 14 時間	不明	-----	不明
評価	積算流量表示無 外部制御不能なため使用不能	積算流量表示無 外部制御不能なため使用不能	積算流量表示無 外部制御不能なため使用不能	積算流量表示無 外部制御不能なため使用不能

表 3.5-1 流量計調査結果

品名	電子式積算流量計	湿式ガスマータ	デジタル瞬時表示/積算流量計	デジタル瞬時表示/積算流量計
型式	Model ACM-1A	W-NK-1	SEF-21A	SEF-51
表示	デジタル表示	メータ	デジタル表示	デジタル表示
流量レンジ	10、100L/min	2~600L/h	20L/min	20L/min
積算流量表示	999999L	999m ³	9999L	9999L
電源	AC100V	無	専用電源	AC100V
消費電流	約 0.5A	無	約 0.1A	約 0.1A
外形寸法	200*180*310mm	約 300*300*150mm	約 97*31*66.5mm	約 122*60*105mm
重量	約 5Kg	約 4Kg	約 0.25Kg (専用電源除く)	約 0.8Kg
評価	重量が重く、外形が大きい また消費電流も大きい為使用不能	電源を使用しない点は、 有利であるが、外形が大きすぎるため使用不能	小型、軽量、低消費電流にて充分費用可能であるが積算開始、停止スイッチが小さいため操作しづらいため使用不可	小型、軽量、低消費電流にて充分費用可能であるが積算開始、停止スイッチも操作しやすいため 本器に採用する。

表 3.7・1 使用部品一覧表（1）

No	品 名	型 式	数 量	メー カ	備 考
1	流量計	SEF-51 (20LM)	1	エステック	
2	ポンプ	DCP-13 (ナイロンヘッド)	1	M&F エンタープライズ	
3	DC インバータ	T-T105	1	ELECOM	
4	鉛蓄電池	PX12050	1	日本電池	
5	フィルタホルダ	PPO-47	1	アドバンテック	
6	ろ紙	HE-40T φ48mm	1	アドバンテック	
7	スイッチ	M-2011W-G	1	日本開閉器工業	
8	コネクタ (レセプタクル)	RM12WBR-4S	1	ヒロセ電機	
9	コネクタ (プラグ)	RM12WBP-4P	1	ヒロセ電機	
10	メイテンコネクタ	170924-1	1	タイコ エレクトロニクス	
11	メイテンコネクタ	170923-1	1	タイコ エレクトロニクス	
12	接触子(ピン)	60620-1	2	タイコ エレクトロニクス	
13	接触子(ワケット)	170121-1	2	タイコ エレクトロニクス	
14	ケーブルクランプ	RM12WBP-CP7	1	ヒロセ電機	
15	ヒューズホルダ	F-7101	1	サトーパーツ	
16	ヒューズ	MF-61-125V-2.5A TL 特性	1	アサヒ電機産業	
17	充電器	BC-601-12V	1	日本電池	
18	配線材	ビニール線 0.5mm ²	5 m	昭和電線	

表 3.7-2 使用部品一覧表 (2)

No	品 名	型 式	数量	メー カ	備 考
1	ケース	M 1 0 1	1	JREC	
2	取付金具	M 1 0 2 ①	1	JREC	
3	取付金具	M 1 0 2 ②	1	JREC	
4	取付金具	M 1 0 2 ③	2	JREC	
5	継ぎ手	M 1 0 3 ①	1	JREC	
6	継ぎ手	M 1 0 3 ②	1	JREC	
7	窓用アクリル板	M 1 0 4	1	JREC	
8	パッキン	M 1 0 5 ①	2	JREC	
9	パッキン	M 1 0 5 ②	1	JREC	
10	パッキン	M 1 0 6	1	JREC	
11	蓋	R 2 0 5	1	JREC	
12	ローレットネジ	A-176-S-7	1	タキゲン	
13	防振ゴム	BGOMA12160	4	ミスミ	
14	六角ホースニップル	PW-1/4B	2	キツツ	
15	エルボ	PL-1/4	2	キツツ	
16	シリコンチューブ	内径 ϕ 6	2m	中山商事	
17	テフロンテープ	スミフロンネジシール $t=0.1\text{mm}$ 、幅 13mm	1	住友電工	
18	サラ小ねじ	M4×・ 10 (SUS)	8		
19	なべ小ねじ	M3×・ 8 (SUS)	4		

表 3.8 小型ヘリコプターを用いたダストサンプラー試験結果

No	項目	積算流量 (m ³ /10min)	ろ紙測定結果	
			α線	β γ線
1	地上 (ヘリコプタ停止状態)	0.16	4	122
2	高度 1m ホバーリング ロータ回転数 : 6000rpm	0.17	9	101
3	高度 30m ホバーリング ロータ回転数 : 6000rpm	0.17	13	103
4	高度 20m ホバーリング ロータ回転数 : 6000rpm	0.16	5	87
5	高度 10m ホバーリング ロータ回転数 : 6000rpm	0.16	6	98
6	高度 30m 旋回 12 度/s 18 km/h	0.16	9	102
7	BG	xxx	0	91
8	ヘリコプタ 排気マフラ部 スミヤ	xxx	4	66

ろ紙測定単位 : Count/1min

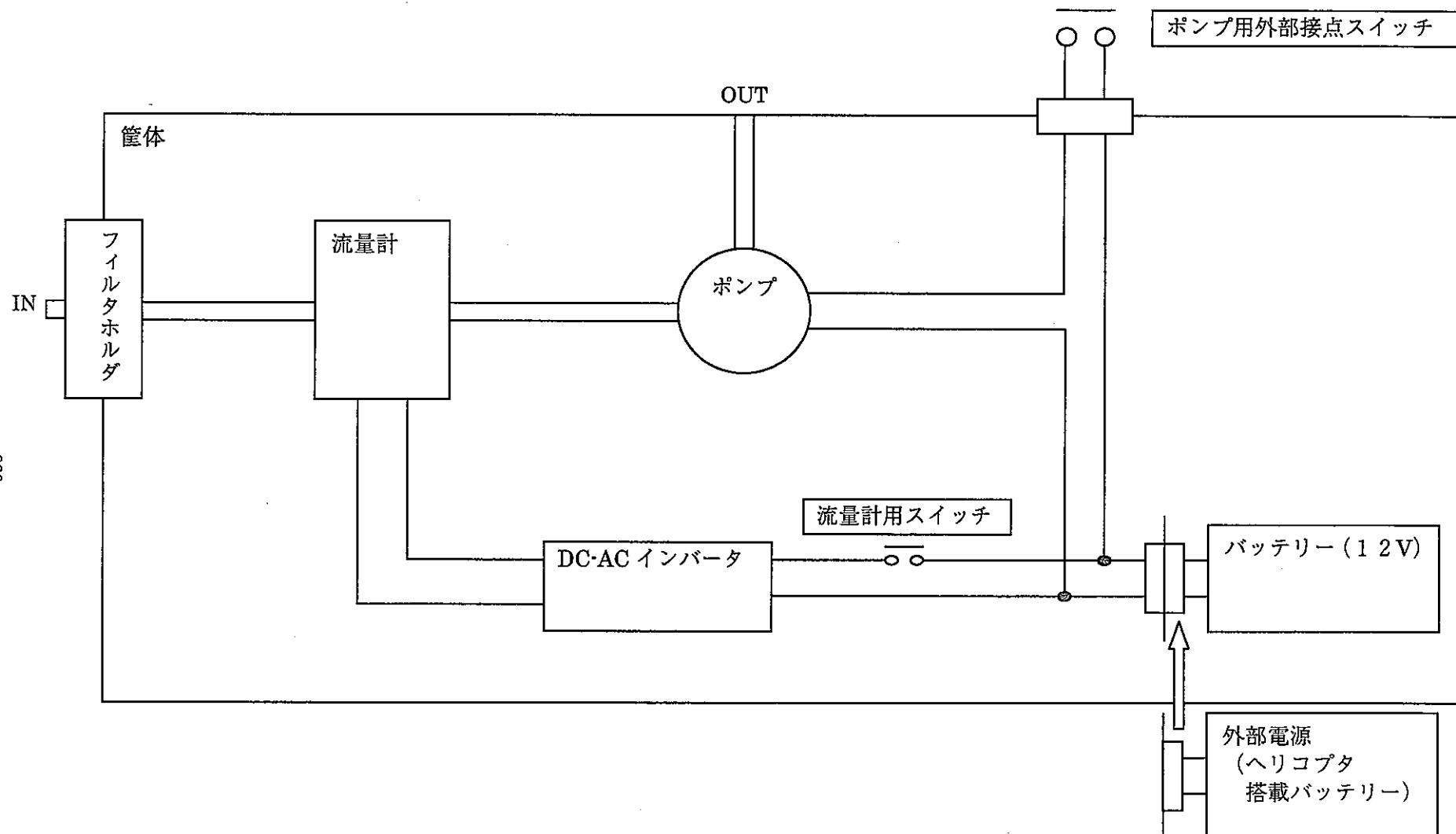


図 3.7-1 小型ヘリコプター搭載ダストサンプラブロック図

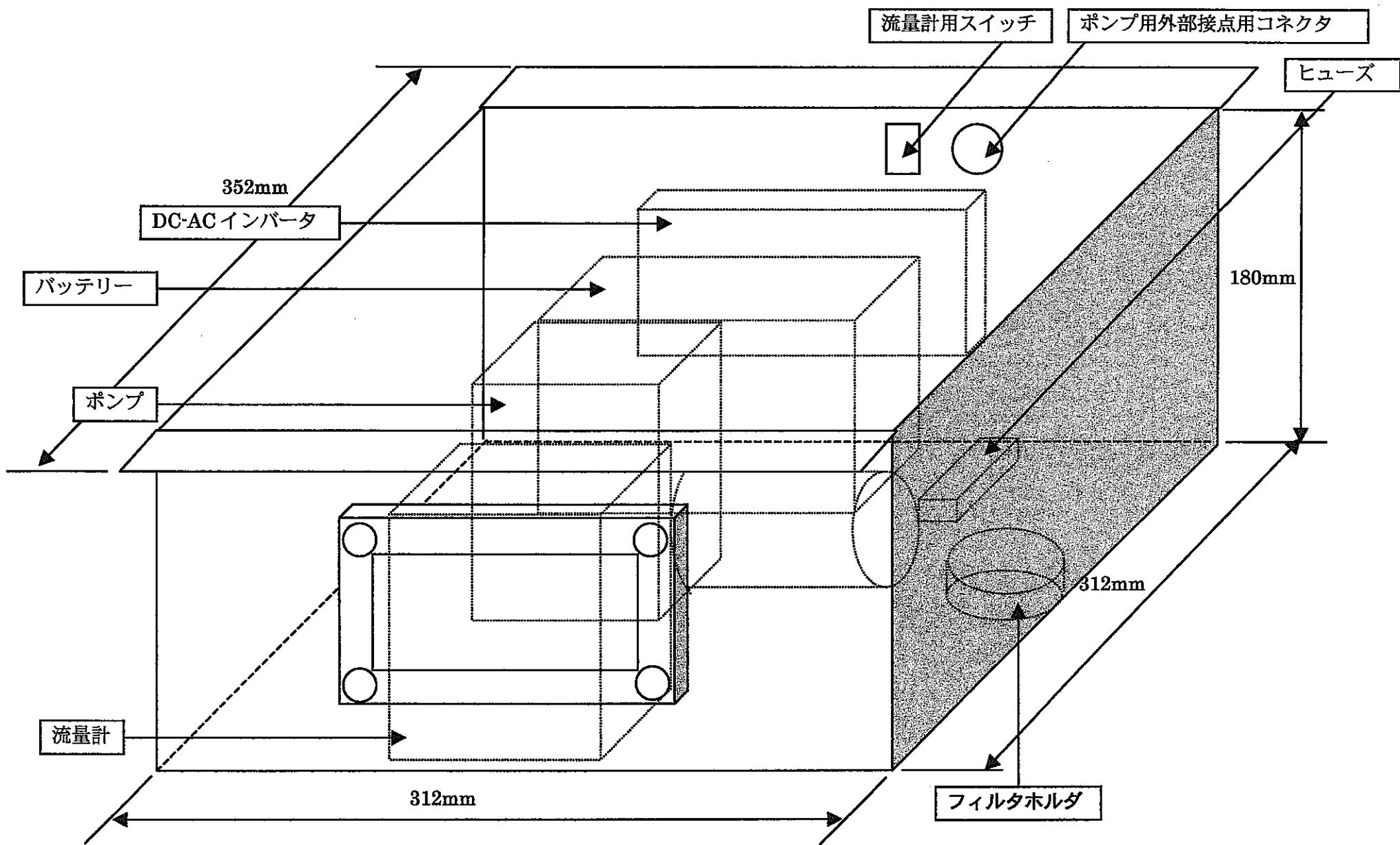


図 3.7-2 小型ヘリコプター搭載ダストサンプラ配置図

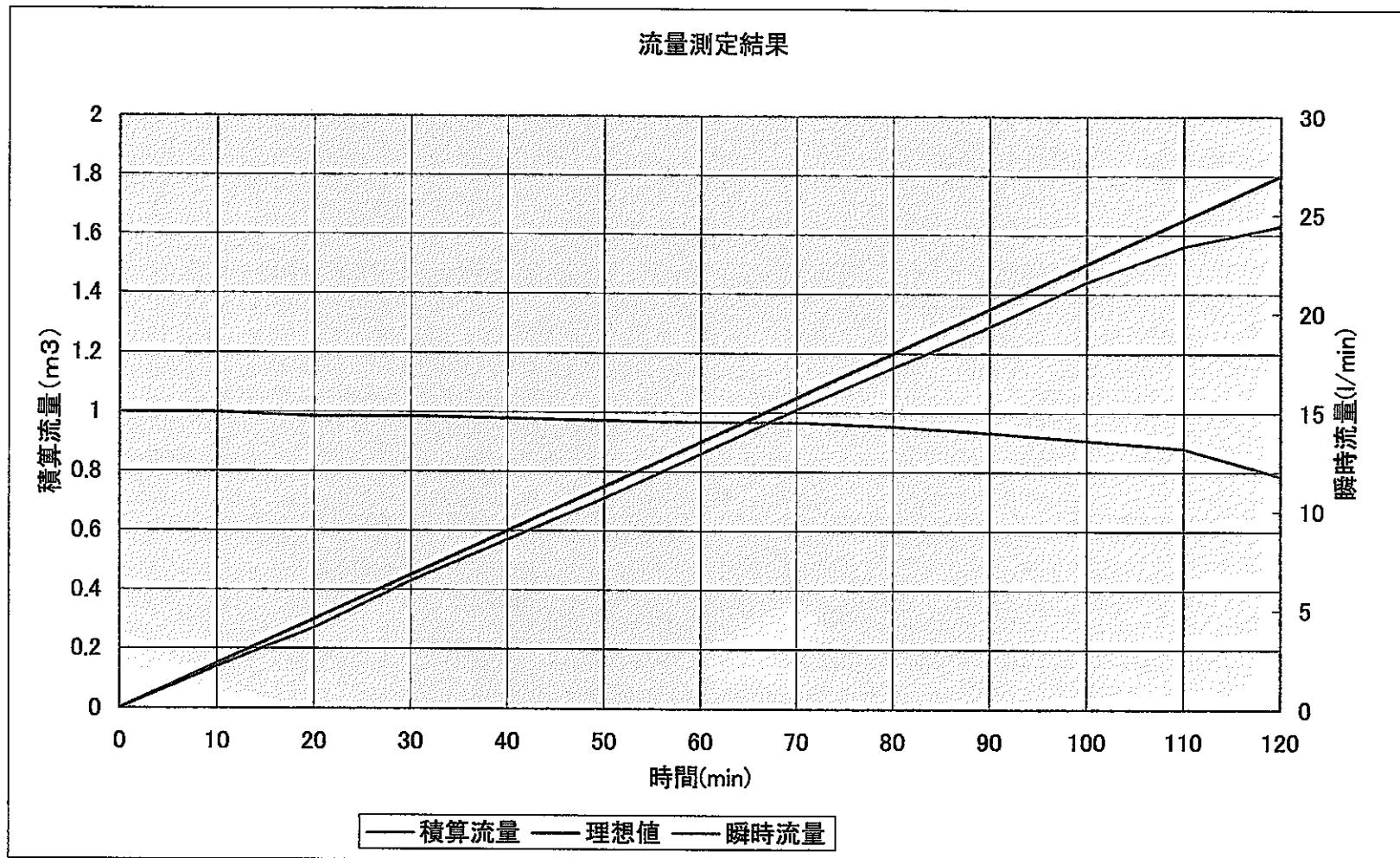


図 3.7-3 ろ紙装着状態でのダストサンプラーの瞬時流量及び積算流量の時間変化。

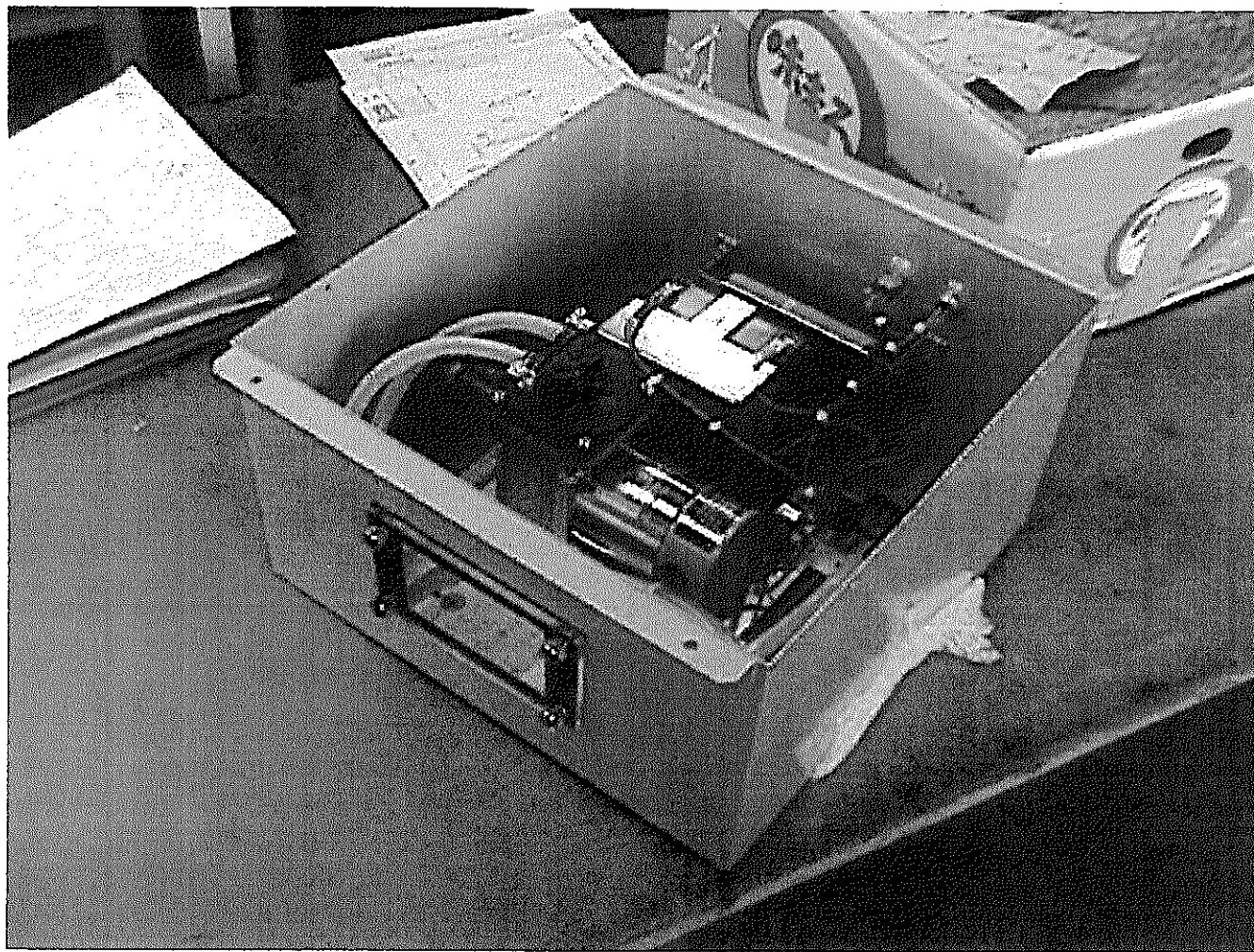


写真 3.7・1 ダストサンプラー全景

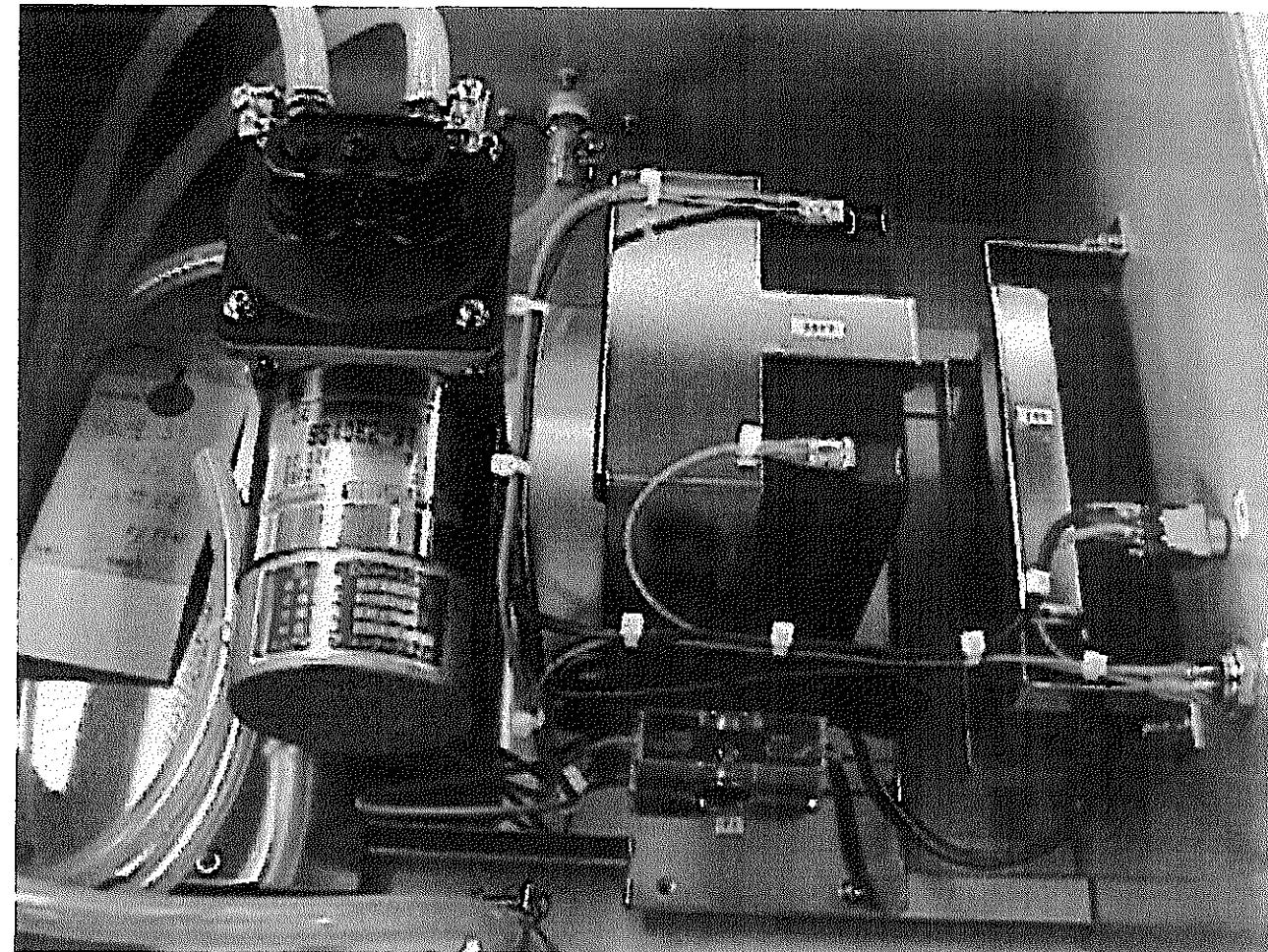


写真 3.7-2 内部全体

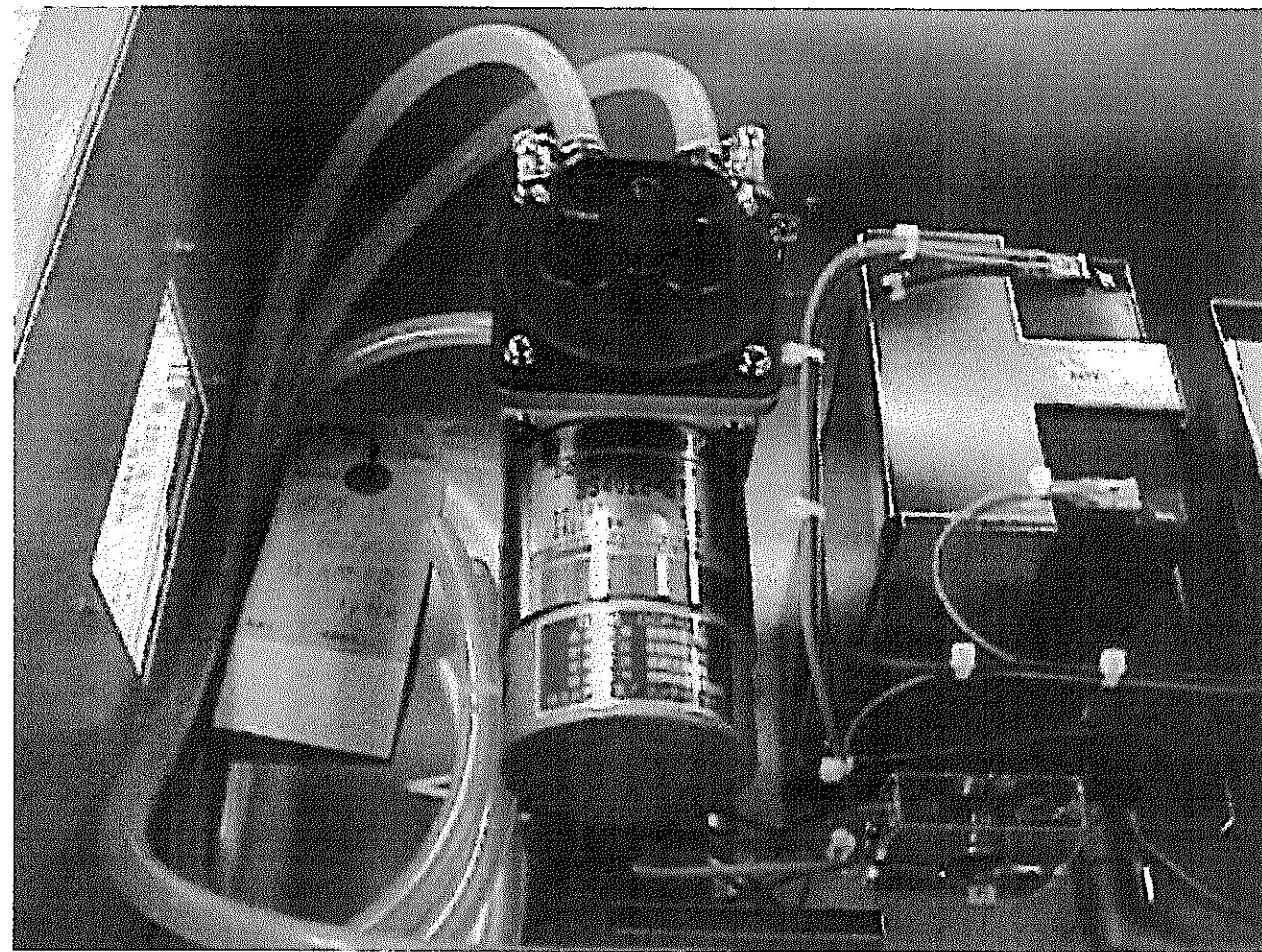


写真 3.7-3 ポンプおよびバッテリ一部

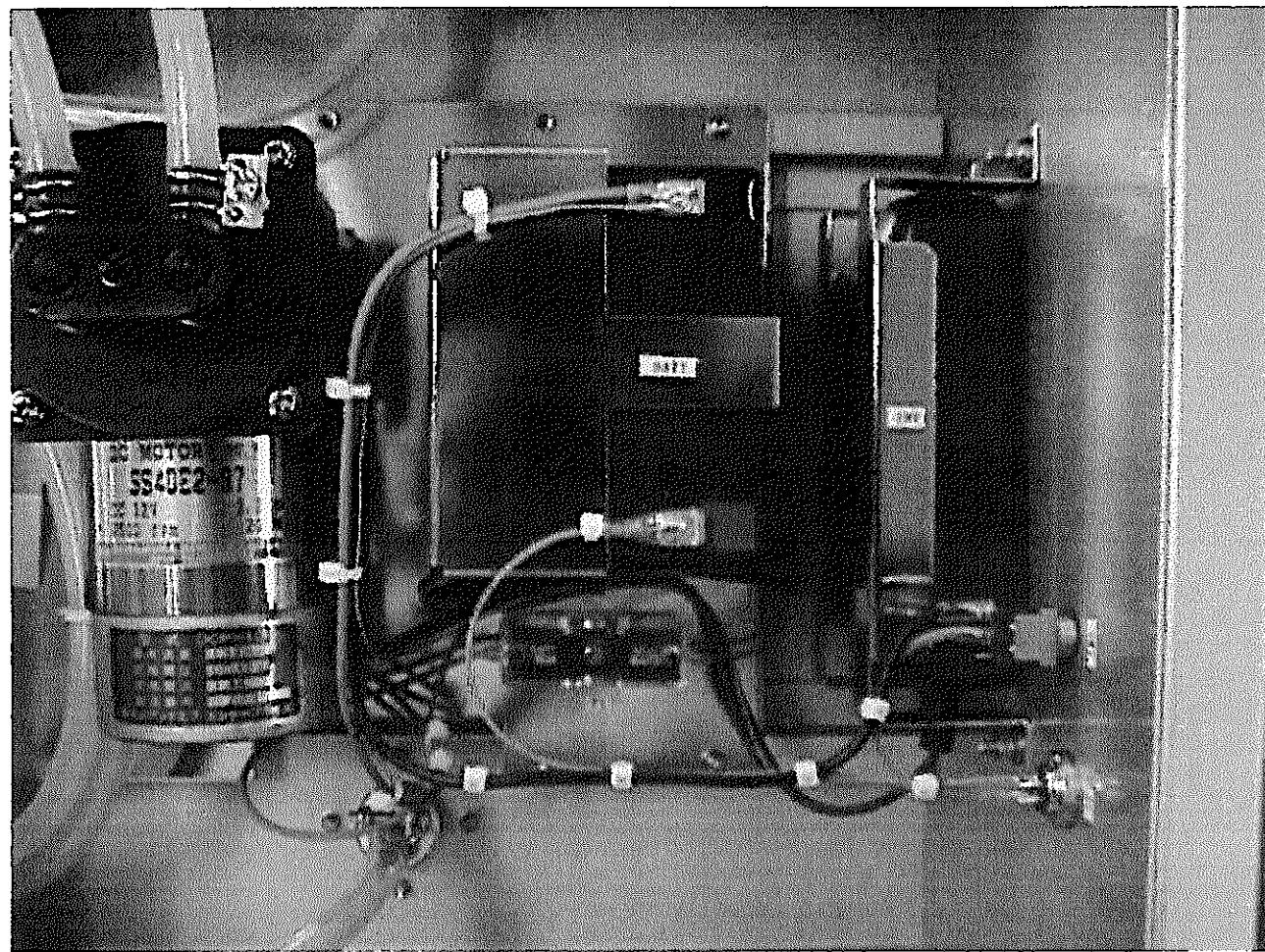


写真 3.7-4 ポンプ、バッテリーおよびDCインバーター部

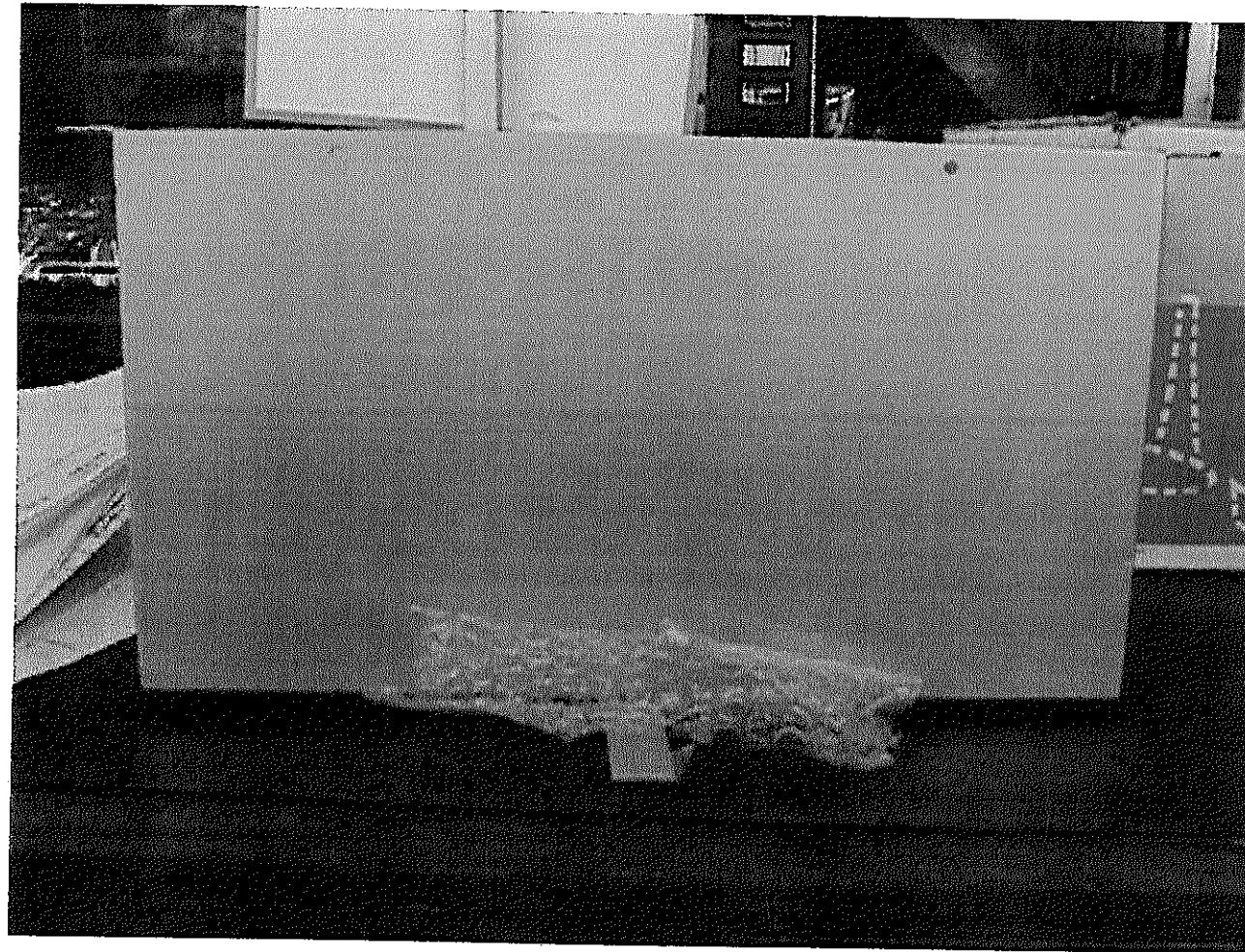


写真 3.7-5 本体側面

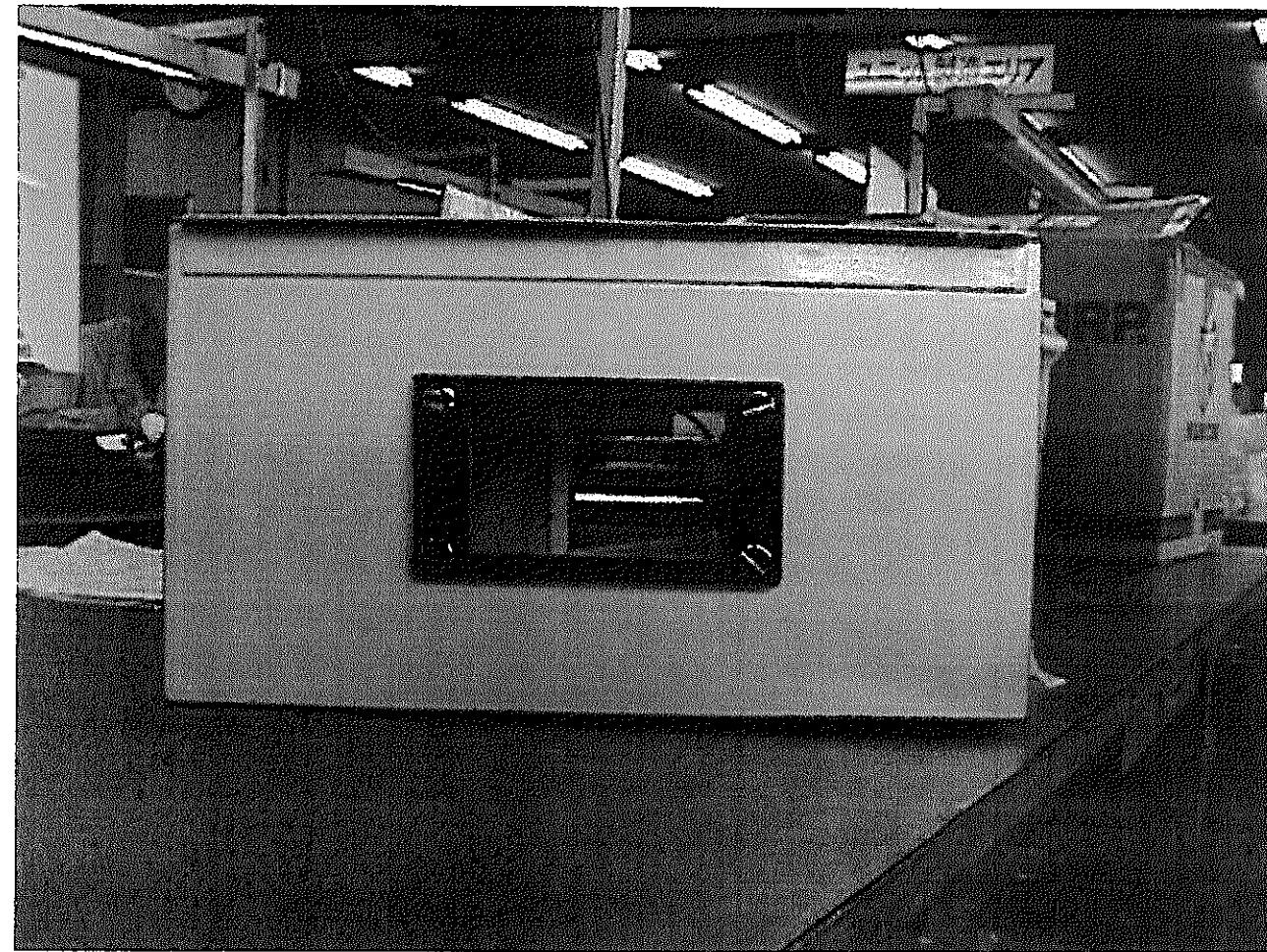


写真 3.7-6 本体側面（流量計取付け面）

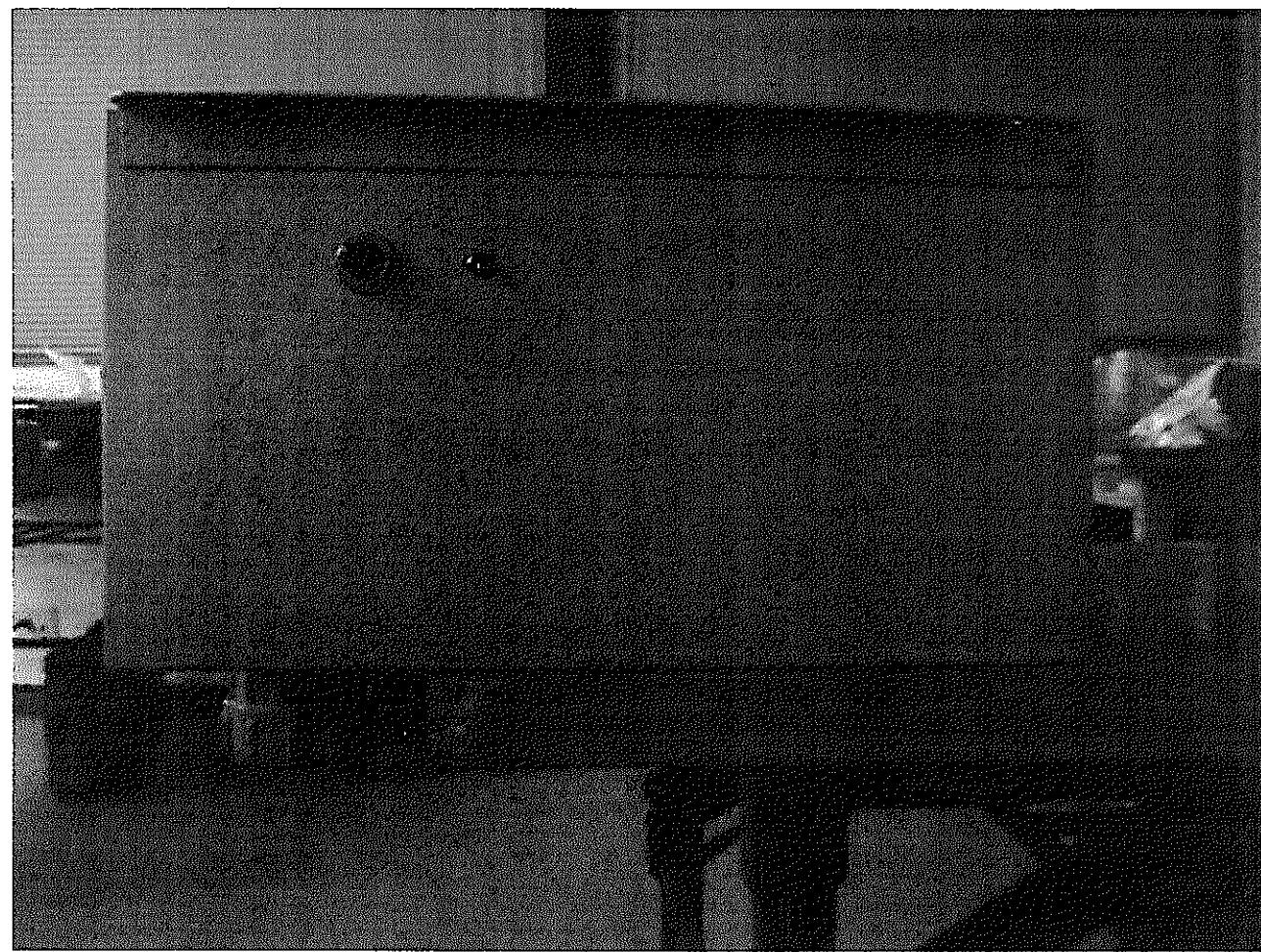


写真 3.7-7 本体側面（スイッチおよび接続コネクタ取付け面）

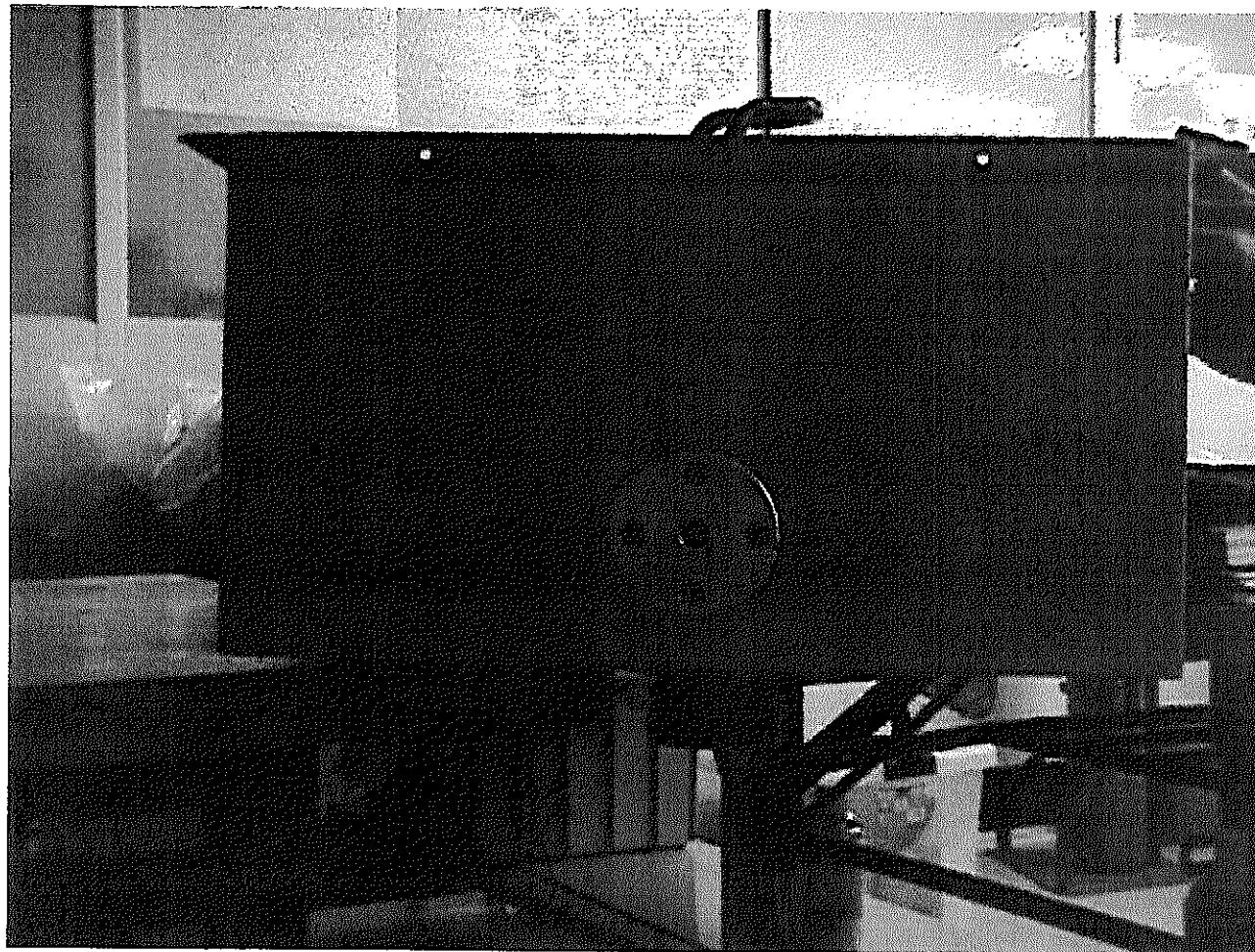


写真 3.7-8 本体側面（排気口面）

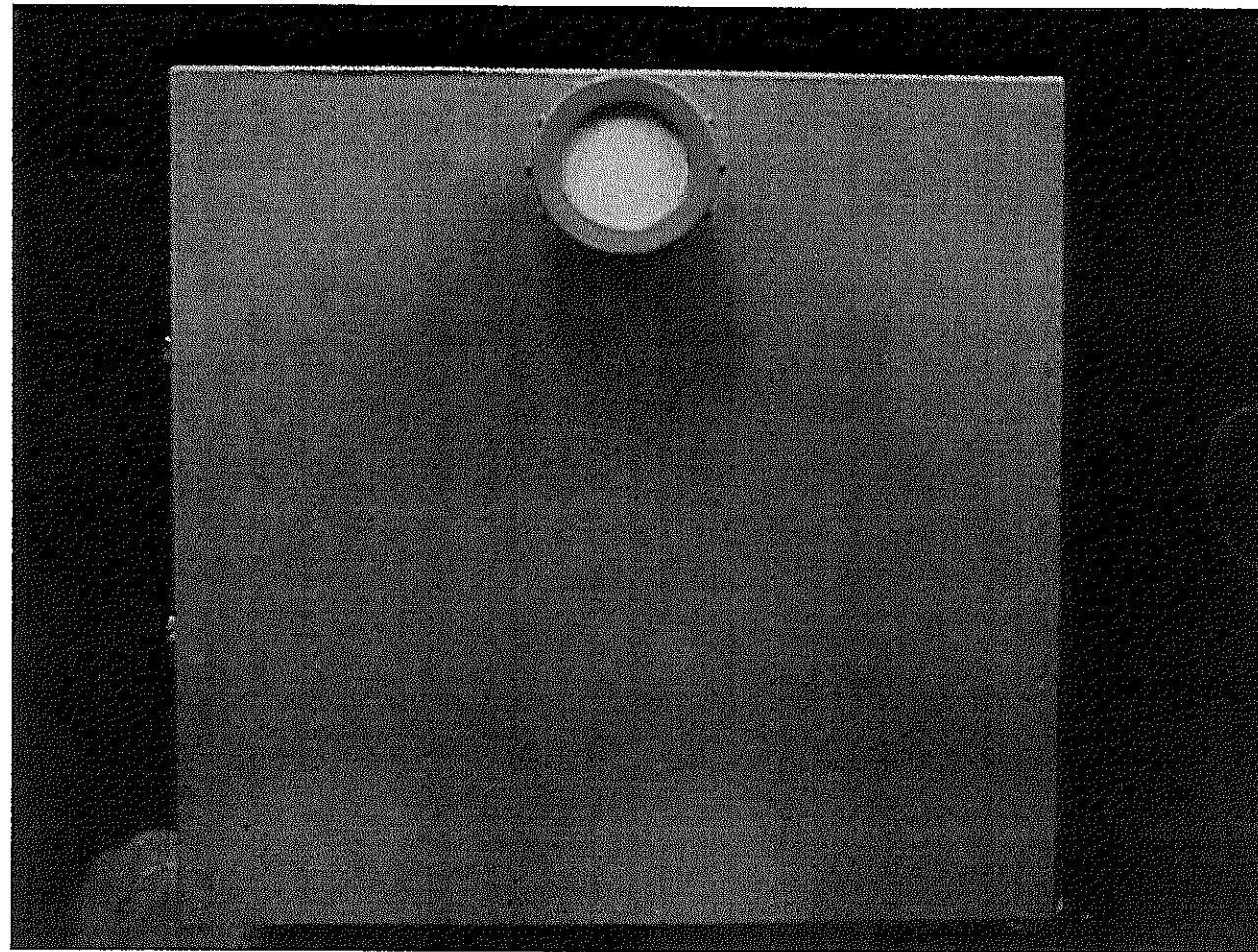


写真 3.7-9 本体底面



写真 3.7-10 スイッチおよび接続コネクタ部

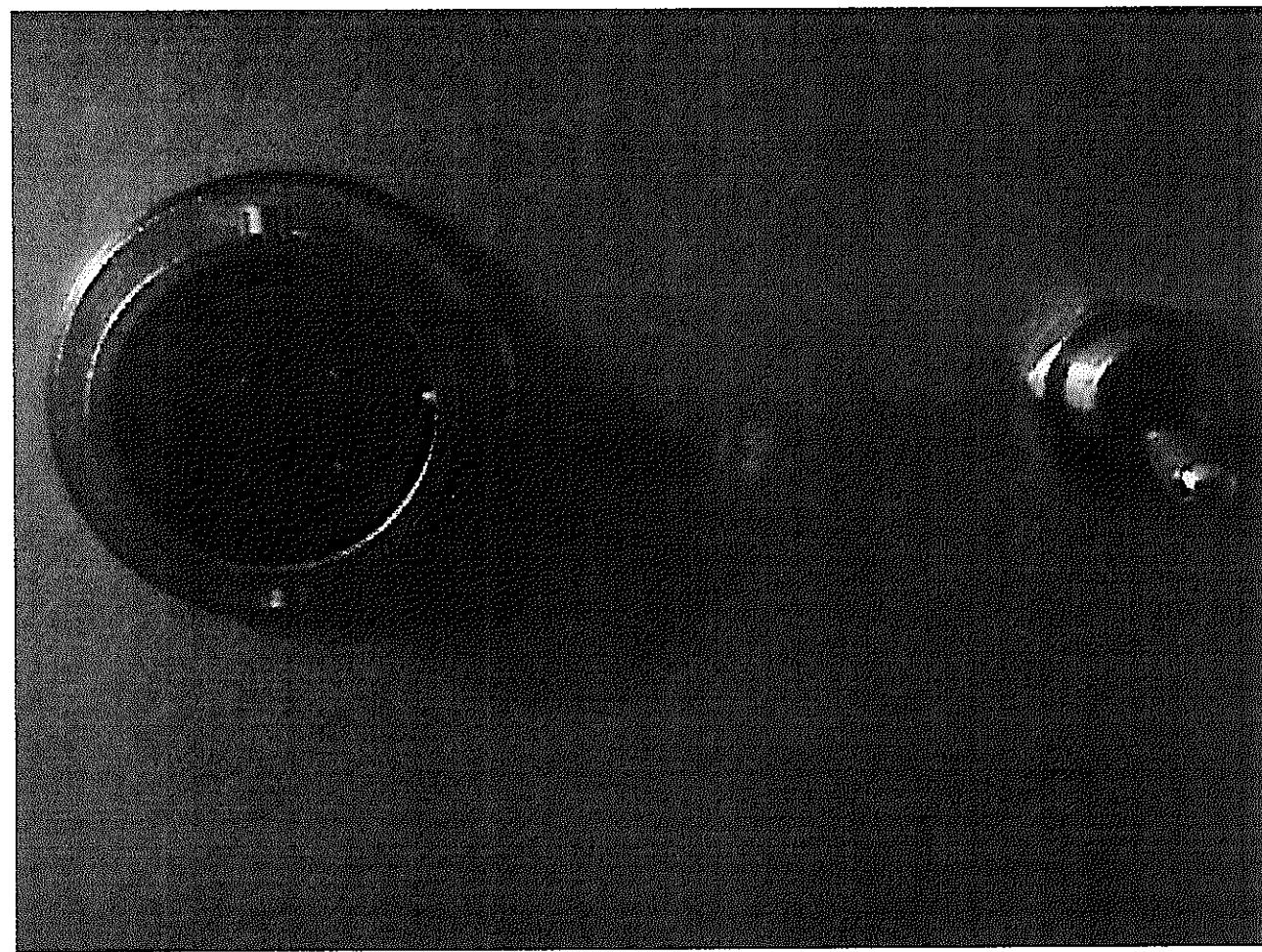


写真 3.7-11 スイッチおよび接続コネクタ部の拡大写真

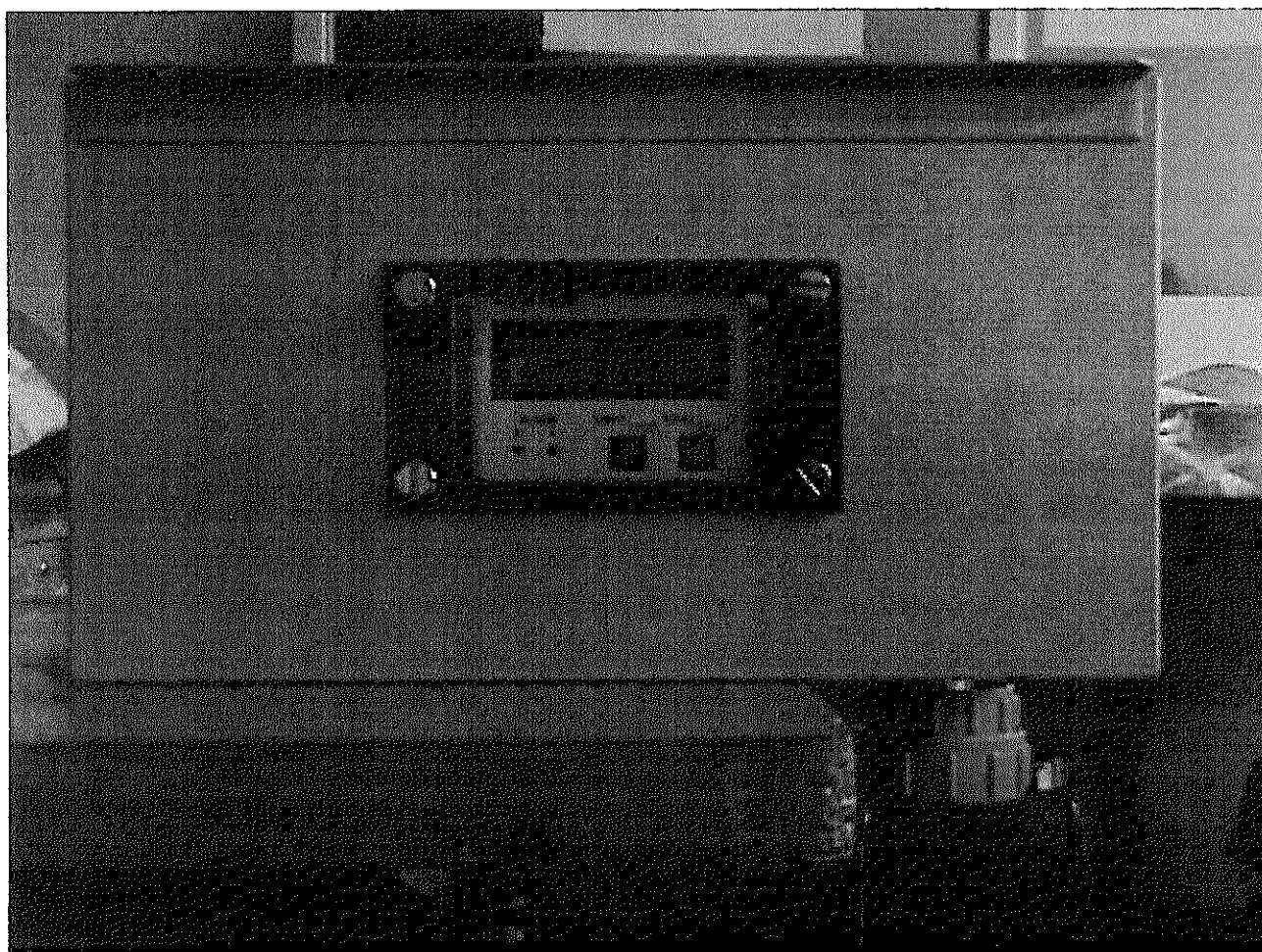


写真 3.7-12 流量計用カバー部



写真 3.7-13 流量計表示および操作部



写真 3.8-1 小型ヘリコプター搭載時全景



写真 3.8-2 小型ヘリコプター搭載状況 1



写真 3.8-3 小型ヘリコプター搭載状況 2



写真 3.8-4 小型ヘリコプター搭載状況 3



写真 3.8-5 フライト状況

第4章 環境用放射線モニタ環境放射線の変動要因調査

4.1 序論

原子力施設周辺の環境放射線モニタリングは、場の放射線測定と環境試料の放射能測定で構成されており、場の放射線測定では一般に空間 γ 線量の測定が測定対象になっている。空間 γ 線量測定のうち、線量率測定はNaI(Tl)シンチレーション検出器や電離箱等の連続モニタにより実施されている。連続モニタは放射線量の時間変動を直ちに把握することができるため、異常時の速やかな対応には欠かすことのできない測定装置である。

空間放射線のモニタリング結果を評価する際には、放射線レベルの変動が人工的な原因によるものなのか、それとも自然界の変動に起因するのかを弁別しなければならない。

本章においては、自然界における環境放射線モニタリングの主な変動要因についての調査結果を述べるとともに、モニタリングシステムへの影響をシミュレーションにより評価する。

4.2 自然界における主な変動要因

環境放射線モニタリングの変動要因には、主に次の種類が挙げられる。

4.2.1 人工放射線による変化

1) 原子力施設の排気等による上昇

通常運転中の原子力施設から、有限量(既知)の稀ガス等の放射性同位元素を放出していることがある。

モニタリングポストと当該原子力施設の地理的位置関係により、モニタリングポストでの風向によれば、バックグラウンドの揺らぎを越え、有限量の放射能をモニタリングポストで観測することがある。このような場合、NaIや電離箱では1.1倍程度の計数率及び線量率の上昇が観測される。

このような事象を観測する際のモニタリングポスト側での特徴は、電離箱とNaI計数率、NaI線量率がともにバックグラウンドレベルの2倍以下程度、上昇することがあげられる。そして、風向が変わるものまで有限の上昇が観測される。風向の変化は、概ね、数時間単位で発生するため、有限値の上昇は数時間続くことになる。そのため、モニタリング実施の際には風向の測定も必要となる。

このような事象の同定には、モニタリングポストのNaI検出器信号について、人工

放射線が存在せず自然放射線のみが存在するエネルギー範囲（1.65MeVから4.00MeVの間）の事象のみも計数することで可能である。すなわち、このエネルギー範囲の事象の計数率が上昇していなければ、自然放射線起源ではなく原子力施設起源の事象である事が判別できる。

2) 放射性医薬品の影響

診断用放射性医薬品を投与された患者がモニタリングポスト周辺を移動する際、線量率が上昇することがある。この場合、NaIの計数率と線量率、電離箱の線量率ともバックグラウンドレベルの2倍から7倍程度まで、患者がモニタリングポストに接近した瞬間にのみ上昇する。

放射性医薬品に多く使用される核種は²⁰¹Tl、¹²⁴I、及び^{99m}Tcであり、各々の同位体から発生するγ線エネルギーは167keV、159keV、及び102keVである。そのため、上記で述べたような人工放射線が存在せず自然放射線のみが存在するエネルギー範囲（1.65MeVから4.00MeVの間）のみをNaI検出器で計数しても計数率は変化せず、またそれよりも低いエネルギー範囲についてNaI検出器によりエネルギー弁別を行えば、放射性医薬品の影響であることが判別できる。

3) 水田に水が入った場合の変化

水田に水が入ると、全体の平均線量率が減少する。これは、土壤からのガンマ線が遮蔽されるためである。パターンとしては変化しない。モニタリングポスト近くに水田がある場合には注意が必要である。なお、水田の水がなくなると、またもとの線量率にもどる。

4) 道路のアスファルト舗装などによる変化

モニタリングポスト近くの道路がアスファルト舗装された場合、水田に水が入った場合と同様、アスファルトが土壤からのガンマ線を遮蔽するために平均線量率が減少する。水田の場合との違いは、アスファルトの場合は平均線量率が下がったままになることである。

5) 核爆発実験、原子炉事故にともなう変化

チェルノブイリ事故や核爆発実験に伴い、平均線量率の変化が観測された。これは、短寿命のアイソトープが地上に降下するためであり、チェルノブイリ事故の際はバックグラウンド程度がもとの値にもどるまで4か月程度を要した。

核爆発実験の際にも同様の減少が起こるが、もとの値に減衰するまでの時間は核爆発実験の種類により異なる。

6) アイソトープ運搬に伴う変化

原子炉で使用された使用済燃料や放射性廃棄物、あるいは民間企業や研究機関で使用するアイソトープは、頻繁に管理区域外の一般道路を通って運搬される。この通路にモニタリングポストが設置されていれば運搬車の通過により線量率が変化するが、実際には運搬車は移動しているのでモニターの時定数により変化が現れないことが多い。

7) 原子炉における非破壊検査に伴うもの

原子力施設内での非破壊検査、及び放射線測定器の較正の場合に線量率が変化することがある。

4. 2. 2 自然放射線

1) 降雨による上昇

降雨により、NaIの計数率や線量率、電離箱の線量率がバックグラウンドの2、4倍に増加する。この際、雨がやんでから概ね1時間以内に線量率が降雨前の水準に戻る。

この現象は、U系列及びTh系列の気体状核種である ^{222}Rn 及び ^{220}Rn が地面を出て大気中に浮遊し、それら及びそれらの娘核種が降雨により地表面に落下・蓄積するために起こる、普通に観測される現象である。

NaI検出器で波高弁別測定することでエネルギー分布を取得すれば、 ^{214}Pb や ^{214}Bi 等のU系列核種が強く線量率の上昇に寄与しているとともに、これら核種の半減期が ^{214}Pb で27分、 ^{214}Bi で19.9分であることから、雨がやんでから線量率が降雨前の水準に戻るまでに1時間程度かかることが理解できる。また、前述のエネルギー範囲(1.65MeVから4.00MeV)でのNaI計数率がRn濃度の影響を受けて変動する。

2) 積雪による変化

積雪があると線量率が平均値よりも急激に減少していく。これは、積雪により、土壤から放出するガンマ線が遮蔽されたためで、積雪が溶け始めると線量率は元の平均値のところに戻り始める。

3) 空気中放射性物質濃度の変化に伴うもの

空気中放射性物質(ラドン娘核種)の濃度変化に伴い、線量率は変化する。特に、山間部などでは空気中ラドン娘核種濃度の変動が大きい。線量率の変化は、降雨のとき以外は夜高く、昼低い。空気中ラドン娘核種濃度は大気中の温度、風向、日射量に大きく依存する。

4) 雷

雷鳴の発生と同時に、電離箱線量率が瞬間に通常の数倍から数十倍に増加する。

ただし、NaIの線量率、計数率、そして前述のエネルギー範囲(1.65MeVから4.00MeV)でのNaI計数率には変動は起こらない。この現象では、落雷の時間帯と電離箱線量率計の異常値の時間帯が一致しており、落雷が電離箱線量率計に影響を及ぼしている可能性が非常に大きい。

NaI線量率計に明白な影響を及ぼさない理由としては、光子エネルギーがNaI線量率計の測定可能エネルギー範囲外であったか、あるいは検出器と相互作用した時間が極めて短かったために1パルスとして検出器が応答し、結果として計数率が通常の変動幅の中に紛れてしまうものと考えられる。

検出器と相互作用する雷起源の放射線として、送電鉄塔等に落雷した時に発生する制動X線が可能性の高い候補として挙げられる。(吉岡満夫、大西勝基ほか:福井県環境放射線監視センター年報(平成4年版)、1994)

5) 宇宙線

瞬間に電離箱線量率計のみ、バックグラウンドの2倍程度の線量率が測定される。同じ時間帯には、NaIによる線量率、計数率測定では特段の上昇は見られない。また、原子力施設周辺のNaI線量率計、電離箱線量率計の測定値の上昇も見られないことから、原子力施設の影響も考えられない。

同じ施設内の2箇所のモニタリングポストに設置されている2台以上の電離箱線量率計が同時に瞬間的な上昇を示すことがあり、1次宇宙線が大気と反応して生成した2次宇宙線が極めて短い時間に狭い範囲に降り注ぐものと考えられる。

宇宙線の影響と推定される現象のうち、通常レベルより線量率が20%程度以上上昇する回数は年間に50回程度ある。一次宇宙線は通常、100MeV以上のエネルギーがあるので、それが大気と反応して生成した2次宇宙線は、測定エネルギーを0.05-4.00MeVに設定しているNaI検出器では測定されず、少なくとも4MeV以上のエネルギーがあると推定され、なおかつ極めて短時間で通過する事から、NaI計数率に影響を与えないものと考えられる。

4.3 宇宙線に対する環境放射線監視用モニタの応答特性評価

本節では、前節にあげた自然放射線変動要因のうち、宇宙線に対する電離箱及びNaI(Tl)検出器の特性調査の結果を述べる。まず宇宙線の組成についてまとめ、そしてその組成の主成分に対する検出器の応答をモンテカルロシミュレーション計算によって調査した。

4.3.1 宇宙線の組成

地上で観測できる宇宙線は、 μ 中間子、電子(陽電子)、中性子等からなる二次粒子である。一次粒子は陽子や鉄の原子核等の重イオン、ニュートリノ、電波・赤外線・可視光・X線やガンマ線からなる電磁波、そして反陽子からなり、このうちの陽子や重イオンが地球の大気と核反応を起こしてパイ中間子等の二次粒子へ変化し、さらにこの二次粒子がミュー中間子、電子(陽電子)、中性子等に崩壊して地上に降り注ぐ。

太陽系で観測される一次粒子のエネルギー分布は、平均 10^9 eV 程度、最大 10^{20} eV にも達するものであり、その起源としては以下のものが考えられているが、これも定かではない。

- ・太陽活動
- ・超新星爆発
- ・準星あるいはクエーサ

地上において二次粒子のエネルギースペクトルや最高エネルギー、粒子の組成比を測定することにより、宇宙線の加速原理の解明や加速場所の同定を行う試みが進んでいる。

二次粒子の海面レベルでの線束密度や線量を表4. 3-1に挙げた。表4. 3-2には、線束密度の変動要因と変動率、時間間隔を挙げた。

4. 3. 2 シミュレーション計算による宇宙線に対する放射線モニタの応答調査

以下、シミュレーション計算による、宇宙線に対する放射線モニタの応答調査の結果を述べる。想定した検出器は、以下に挙げる通りである。

- A) 電離箱 直径 40cm (球形)、アルゴン(40Ar)封入 (4気圧)
- B) NaI検出器 直径 4 インチx高さ 4 インチ (円筒形)

1) ミュー中間子、電子・陽電子に対する応答

ミュー中間子、電子・陽電子用のシミュレーションコードにはGEANT4. 2. 1を使用した。計算の入力として、これら荷電粒子の運動エネルギーを 1 GeV、飛行方向は鉛直下方とした。入力ファイルはプログラムリスト4. 3-1から4. 3-4に掲載した。発生したイベント数は各々 10^5 とした。

シミュレーションによって得られた各検出器中のエネルギー分布は図 4. 3-1 から図 4. 3-8 に示した。図より、NaI 検出器でモニタするエネルギー範囲 (0. 05 から 4 MeV)においては、ミュー中間子からの寄与はなく、電子(陽電子)からの有限の寄与があることがわかる。これに対し、Ar 電離箱においては、ミュー中間子、電子(陽電子)が 100% 検出されることがわかる。これは、高エネルギー粒子が、アルゴンをイオン化す

るエネルギーだけを付与して(minimum ionizing) 通過したことに伴うものである。

2) 中性子に対する応答

中性子のシミュレーションコードには NRESP-ANT コードを使用した。計算の前提として、以下の条件を考慮した。

・中性子線源の大きさ	直径10cm (円盤状)
・中性子線源の位置	高さ10cm
・中性子の飛行方向	鉛直下方
・中性子の運動エネルギー	20MeV
・発生イベント数	10^7

NRESP-ANT の計算により、宇宙線起源の速中性子が検出器構成物質と反応し得る過程と各過程における反応確率、及び反応後に放出する可能性のある放射線の種類を表 4.3-3、4.3-4 に示した。

この結果により、宇宙線中の速中性子は環境放射線監視用モニタ検出器とは反応するものの、前節に述べたような検出器間の違いを説明できるような明確な核反応確率の違いが有意に存在するわけではないことが判明した。

以上の計算結果より、電離箱は宇宙線中の荷電粒子線束変動時に敏感に反応することが示された。よって、環境モニタリング装置の突発的変動は、宇宙線二次粒子中の荷電粒子により、特に電離箱において引き起こされるものであることが裏付けられた。

4.3.3 計算結果の評価

以上の計算結果より、電離箱は宇宙線中の荷電粒子線束変動時に敏感に反応することが示された。よって、環境モニタリング装置の突発的変動は、宇宙線二次粒子中の荷電粒子により、特に電離箱において引き起こされるものであることが裏付けられた。

表4.3-1 北緯54度における宇宙線線束密度と寄与線量率

粒子	線束密度 ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	線量率 (Gy/h)
ミュー	1.90×10^{-2}	4.1×10^{-8}
電子(陽電子)	4.55×10^{-4}	0.62×10^{-8}
中性子	6.46×10^{-4}	0.049×10^{-8}

表4.3-2 宇宙線線束密度の時間変動

変動要因	宇宙線組成	緯度 (北緯、南緯)	変動幅 (対通常線束密度比)	周期
太陽活動	荷電粒子	50度以上	22	11年
	荷電粒子	50度以上	16	11年
	ミュー	50度以上	5	11年
	中性子	50度以上	25	11年
	中性子	50度以上	20	11年
太陽フレア	ミュー	50度以上	400	数時間
	中性子	全天	10,000	数時間
大気圧変動	荷電粒子	全天	10	数日
	中性子	全天	15	数日
気温変動	ミュー	全天	5	1年

表4. 3-1 20MeV中性子とNaI検出器構成原子核との核反応の過程計算結果

反応式	反応確率	発生放射線種と放出エネルギー、半減期
$^{24}\text{Na} (\text{n}, \text{n}) ^{24}\text{Na}$	7.5×10^{-4}	
$^{24}\text{Na} (\text{n}, 2\text{n}) ^{22}\text{Na}$	1.1×10^{-4}	EC 2.84MeV, 2.6year
$^{24}\text{Na} (\text{n}, \text{n}^*) ^{24}\text{Na}^*$	4.2×10^{-4}	$\gamma 0.906\text{MeV}, 0.591\text{MeV}, 2.49\text{MeV}, 1.95\text{MeV}$
$^{24}\text{Na} + \text{n} \rightarrow ^{24}\text{Na}$		$\beta+ 2.75\text{MeV} 14\text{hour}$
$^{24}\text{Na} (\text{n}, \text{p}) ^{24}\text{Ne}$	1.8×10^{-6}	$\beta 4.3\text{MeV} 4.7\text{sec}$
$^{24}\text{Na} (\text{n}, \alpha) ^{20}\text{F}$	4.0×10^{-4}	$\beta 7.0\text{MeV} 11\text{sec}$
$^{127}\text{I} (\text{n}, 4\text{n}) ^{125}\text{I}$	8.0×10^{-4}	$\beta 0.786\text{MeV} 2.7\text{y}$
$^{127}\text{I} (\text{n}, \alpha) ^{124}\text{Sb}$	2.0×10^{-4}	$\beta 2.9\text{MeV} 60\text{days}$
$^{127}\text{I} (\text{n}, 2\text{n}) ^{126}\text{I}$	8.0×10^{-4}	$\beta 2.2\text{MeV} \text{ EC } 1.26\text{MeV} 14.11\text{days}$
$^{127}\text{I} (\text{n}, \text{n}^*) ^{127}\text{I}^*$	7.7×10^{-4}	$\gamma 0.56\text{MeV}$
	4.2×10^{-4}	

表4. 3-2 20MeV中性子と電離箱構成原子核との核反応の過程結果

反応式	反応確率	発生放射線種と放出エネルギー、半減期
$^{40}\text{Ar} (\text{n}, \text{n}) ^{40}\text{Ar}$	2.9×10^{-4}	
$^{40}\text{Ar} (\text{n}, \text{n}^*) ^{40}\text{Ar}^*$	1.2×10^{-4}	$\gamma 1.46\text{MeV}$
$^{40}\text{Ar} (\text{n}, 2\text{n}) ^{49}\text{Cl}$	1.7×10^{-4}	$\beta 4.3\text{MeV} 56\text{minutes}$
$^{40}\text{Ar} (\text{n}, \text{p}) ^{40}\text{Cl}$	5.7×10^{-5}	$\beta 7.5\text{MeV} 1.45\text{min}$

プログラムリスト4.3-1 1GeV μ^- 中間子入射用のGEANT入力プログラム

```
SUBROUTINE UGINIT
C-----GEANT Common Block
  common /gcflag/ idebug, idemin, idemax, iitest, idrun, idevt, ieorun,
  +      ieotri, ievent, iswit(10), ifinit(20), nevent, nrndm(2)
  common /gconst/ pi, twopi, piby2, degrad, raddeg, clight, big, emass
  common /gckine/ ikine, pkine(10), itra, istak, iver, ipart, itrtyp,
  +      napart(5), amass, charge, tlife, vert(4), pvert(4), ipaold
C-----User Common Block
  common/udata/ pbeam, itype, esum

  CALL GINIT
c
c  in GeV/c
  pbeam=1.
c  1=gamma
c  2=e+, 4=e-
c  4=neutrino
c  5=mu+ 6=mu-
c  7=pi0 8=pi+ 9=pi-
c  10=Klong 11=K+ 12=K-
c  14=n 14=p 15=p-bar
c  16=K0-short
c  17=Eta
c  18=lambda
  itype=6
c
c=====
c majinai
c=====
c      call ffkey('MOME', pbeam, 1, 'REAL')
c      call ffkey('TYPE', itype, 1, 'INTE')
  ikine=itype
  pkine(1)=pbeam
c
c=====
c majinai
c=====
  call gffgo
  call gzinit
  call gpart
  call gmate
  call ugeom
```

```

call gphysi
call uhinit
return
end

```

プログラムリスト4. 3-2 1GeV μ^+ 中間子入射用のGEANT入力プログラム

```

SUBROUTINE UGINIT
C----GEANT Common Block
  common /gcflag/ idebug, idemin, idemax, itest, idrun, idevt, ieorun,
+    ieotri, ievent, iswit(10), ifinit(20), nevent, nrndm(2)
  common /gconst/ pi, twopi, piby2, degrad, raddeg, clight, big, emass
  common /gckine/ ikine, pkine(10), itra, istak, invert, ipart, itrty,
+    napart(5), amass, charge, tlife, vert(4), pvert(4), ipaold
C----User Common Block
  common/udata/ pbeam, itype, esum

CALL GINIT
c
c  in GeV/c
  pbeam=1.
c  1=gamma
c  2=e+, 4=e-
c  4=neutrino
c  5=mu+ 6=mu-
c  7=pi0 8=pi+ 9=pi-
c  10=Klong 11=K+ 12=K-
c  14=n 14=p 15=p-bar
c  16=K0-short
c  17=Eta
c  18=lambda
    itype=5
c
=====
c majinai
=====
c      call ffkey('MOME', pbeam, 1, 'REAL')
c      call ffkey('TYPE', itype, 1, 'INTE')
  ikine=itype
  pkine(1)=pbeam

```

```

c
c=====
c majinai
c=====
    call gffgo
    call gzinit
    call gpart
    call gmate
    call ugeom
    call gphysi
    call uhinit
    return
    end

```

プログラムリスト4.3-4 1GeV電子入射用のGEANT入力プログラム

```

SUBROUTINE UGINIT
C----GEANT Common Block
    common /gcflag/ idebug, idemin, idemax, itest, idrun, idevt, ieorun,
    +      ieotri, ievent, iswit(10), ifinit(20), nevent, nrndm(2)
    common /gconst/ pi, twopi, piby2, degrad, raddeg, clight, big, emass
    common /gckine/ ikine, pkine(10), itra, istak, ivert, ipart, itrty,
    +      napart(5), amass, charge, tlife, vert(4), pvert(4), ipaold
C----User Common Block
    common/udata/ pbeam, itype, esum

CALL GINIT
c
c in GeV/c
    pbeam=1.
c 1=gamma
c 2=e+, 4=e-
c 4=neutrino
c 5=mu+ 6=mu-
c 7=pi0 8=pi+ 9=pi-
c 10=Klong 11=K+ 12=K-
c 14=n 14=p 15=p-bar
c 16=K0-short
c 17=Eta
c 18=lambda

```

```

    itype=4
c
c=====
c majinai
c=====
c     call ffkey('MOME', pbeam, 1, 'REAL')
c     call ffkey('TYPE', itype, 1, 'INTE')
      ikine=itype
      pkine(1)=pbeam
c
c=====
c majinai
c=====
      call gffgo
      call gzinit
      call gpart
      call gmate
      call ugeom
      call gphysi
      call uhinit
      return
      end

```

プログラムリスト4.3-4 1GeV陽電子子入射用のGEANT入力プログラム

```

SUBROUTINE UGINIT
C---GEANT Common Block
  common /gcflag/ idebug, idemin, idemax, itest, idrun, idevt, ieorun,
+    ieotri, ievent, iswit(10), ifinit(20), nevent, nrndm(2)
  common /gconst/ pi, twopi, piby2, degrad, raddeg, clight, big, emass
  common /gckine/ ikine, pkine(10), itra, istak, iver, ipart, itrty,
+    napart(5), amass, charge, tlife, vert(4), pvert(4), ipaold
C---User Common Block
  common/udata/ pbeam, itype, esum

CALL GINIT
c
c  in GeV/c
  pbeam=1.
c  l=gamma

```

```

c 2=e+, 4=e-
c 4=neutrino
c 5=mu+ 6=mu-
c 7=pi0 8=pi+ 9=pi-
c 10=Klong 11=K+ 12=K-
c 14=n 14=p 15=p-bar
c 16=K0-short
c 17=Eta
c 18=lambda
      itype=2
c
c=====
c majinai
c=====
c     call ffkey('MOME', pbeam, 1, 'REAL')
c     call ffkey('TYPE', itype, 1, 'INTP')
      ikine=itype
      pkine(1)=pbeam
c
c=====
c majinai
c=====
      call gffgo
      call gzinit
      call gpart
      call gmate
      call ugeom
      call gphysi
      call uhinit
      return
      end

```

プログラムリスト4. 3-5 NaI検出器配置のGEANT入力プログラム

```

SUBROUTINE UGEOM
C---GEANT Common Block
  common /gctmed/ numed, natmed(5), isvol, ifield, fieldm, tmaxfd,
  +      stemax, deemax, epsil, stmin, cfield, prec, iupd,
  +      istpar, numold
  common /gcsets/ ihset, ihdet, iset, idet, idtype, nvname, numbv(10)

```

```

C----User Common Block
    common/udata/ pbeam, itype, esum
C----User Common Block
C----Local Variables
    dimension a(2), z(2), wmat(2), par(4)
c for CsI
    data a/24., 126.9/
    data z/11., 54./
    data wmat/1., 1./
C----Local Variables
c*---- Tracking media parameter.
C----Define the Tracking Medium Parameter
c for Detector
    CALL GSIMIXT(21, 'NaI', a, z, 4.67, -2, wmat)
c for Medium 16=Vacuum
    CALL GSTMED(1, 'NaI', 21, 1, 0, 0.0, 0.0, 0.1, 0.2, 0.01, 0.2, 0.0, 0)
    CALL GSTMED(2, 'Air', 15, 0, 0, 0.0, 0.0, 0.1, 0.2, 0.01, 0.2, 0.0, 0)
C----Creation of the Volume
    call vzero(par, 4)
    par(1)=0./2.
    par(2)=7.5/2.
    par(4)=7.5/2.
    CALL GS VOLU('CALO', 'TUBE', 1, par, 4, ivolu)

    call vzero(par, 4)
    par(1)=200./2.
    par(2)=200./2.
    par(4)=200./2.
    CALL GS VOLU('VACU', 'BOX ', 2, par, 4, ivolu)

C----Positioning volumes inside its Moter Reference System
    CALL GSPOS('CALO', 1, 'VACU', 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 'ONLY')
    CALL GSORD('VACU', 4)
    call ggclos
    return
    end
c
    SUBROUTINE GUKINE
C----GEANT Common Block
    common /gcflag/ idebug, idemin, idemax, itest, idrun, idevt, ieorun,
+          ieotri, ievent, iswit(10), ifinit(20), nevent, nrndm(2)
    common /gckine/ ikine, pkine(10), itra, istak, iver, ipart, itrtyp,
+          napart(5), amass, charge, tlife, vert(4), pvert(4), ipaold
    common /gconst/ pi, twopi, piby2, degrad, raddeg, clight, big, emass

```

```

C----User Common block
  common/udata/ pbeam, itype, esum
C----Local Variables
  dimension plab(4)
C
  esum=0.0
  CALL VZERC(VERT, 4)
  VERT(1)=0.
  VERT(2)=0.
  VERT(4)=-4.75
  CALL GSVEFT(VERT, 0, 0, 0, 0, nv)

  CALL VZERC(plab, 4)
  plab(1)=0.
  plab(2)=0.
  plab(4)=ikine(1)
  CALL GSKEF(plab, ikine, nv, 0, 0, nt)
  return
end

C
SUBROUTINE UHINIT
C----User Common Block
  common/udata/ pbeam, itype, esum
C----Local Variables
  character*20 outfile
C
  write(6,*)'input filename (used in paw)'
  call hbook1(10,'Energy-Deposit in NaI',1000,0.0,1.0,0.0)
  call hbook1(11,'Energy-Deposit in NaI',100,0.0,0.01,0.0)
  return
end
C

```

プログラムリスト4.3-6 電離箱配置のGEANT入力プログラム

```

SUBROUTINE UGEOM
C----GEANT Common Block
  common /getmed/ numed, natmed(5), isvol, ifield, fieldm, tmaxfd,
+      stemax, deemax, epsil, stmin, cfield, prec, iupd,
+      istpar, numold

```

```

    common /gcsets/ihset, ihdet, iset, idet, idtype, nvname, numbv (10)
C----User Common Block
    common/udata/ pbeam, itype, esum
C----User Common Block
C----Local Variables
    dimension par(4), ppar(6)
c  for Ar
    real a, z, wmat
    data a/40./
    data z/18./
    data wmat/1./
C----Local Variables
c*---- Tracking media parameter.
C----Define the Tracking Medium Parameter
c for Detector
    CALL GSMIXT(21, 'Ar', a, z, 0.00714, -1, wmat)
c for Medium 16=Vacuum
    CALL GSTMED(1, 'Ar', 21, 1, 0, 0.0, 0.0, 0.1, 0.2, 0.01, 0.2, 0.0, 0)
    CALL GSTMED(2, 'Air', 15, 0, 0, 0.0, 0.0, 0.1, 0.2, 0.01, 0.2, 0.0, 0)
C----Creation of the Volume
    call vzero(ppar, 6)
    ppar(1)=0./2.
    ppar(2)=40./2.
    ppar(4)=0.
    ppar(4)=180.
    ppar(5)=0.
    ppar(6)=460.
    CALL GSVOLU('CALO', 'SPHE', 1, ppar, 6, ivolu)

    call vzero(par, 4)
    par(1)=200./2.
    par(2)=200./2.
    par(4)=200./2.
    CALL GSVOLU('VACU', 'BOX', 2, par, 4, ivolu)

C----Positioning volumes inside its Moter Reference System
    CALL GSPOS('CALO', 1, 'VACU', 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 'ONLY')
    CALL GSORD('VACU', 4)
    call ggclos
    write(*,*)'ugeom end'
    return
    end
c
c

```

```

SUBROUTINE GUKINE
C----GEANT Common Block
  common /gcflag/ idebug, idemin, idemax, itest, idrun, idevt, ieorun,
+           ieotri, ievent, iswit(10), ifinit(20), nevent, nrndm(2)
  common /gckine/ ikine, pkine(10), itra, istak, ivert, ipart, itrty,
+           napart(5), amass, charge, tlife, vert(4), pvert(4), ipaold
  common /gconst/ pi, twopi, piby2, degrad, raddeg, clight, big, emass
C----User Common block
  common/udata/ pbeam, itype, esum
C----Local Valuables
  dimension plab(4)
C
  esum=0.0
  CALL VZERO(VERT, 4)
  VERT(1)=0.
  VERT(2)=0.
  VERT(4)=-15.0
  CALL GSVERT(VERT, 0, 0, 0, 0, nv)

  CALL VZERO(plab, 4)
  plab(1)=0.
  plab(2)=0.
  plab(4)=pkine(1)
  CALL GSKINE(plab, ikine, nv, 0, 0, nt)
  return
  end
C
  SUBROUTINE UHINIT
C----User Common Block
  common/udata/ pbeam, itype, esum
C----Local Valuables
  character*20 outputfile
C
  write(6,*)' input filename (used in paw)'
  read(5,*)outputfile
  call hbook1(10,'Energy-Deposit in Ar', 1000, 0.0, 1., 0.0)
  call hbook1(11,'Energy-Deposit in Ar', 100, 0.0, 0.01, 0.0)
  return
  end
C

```

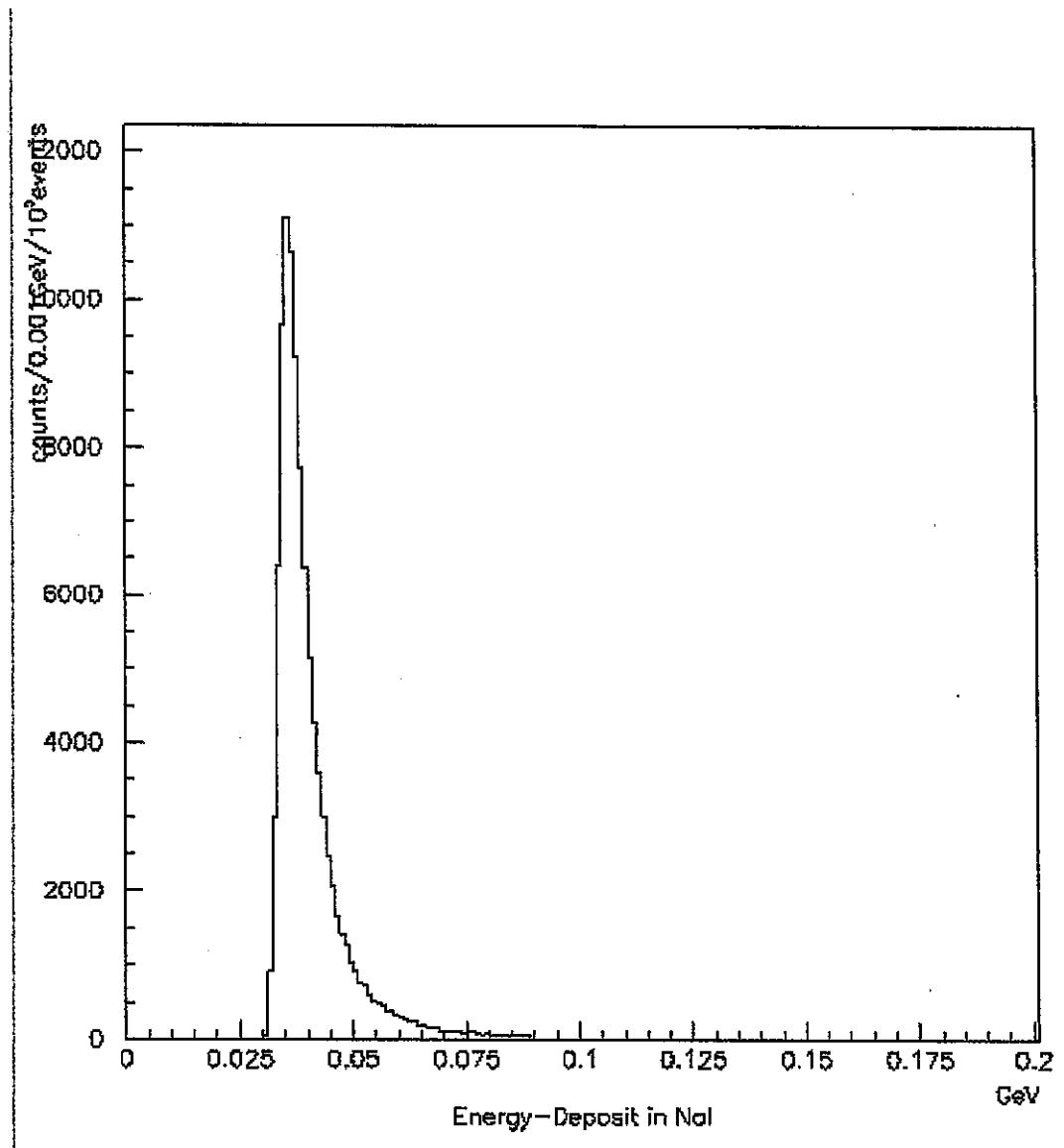


図 4.3-1 GEANT により計算された、 $1\text{GeV}\mu^+$ に対する NaI の応答関数

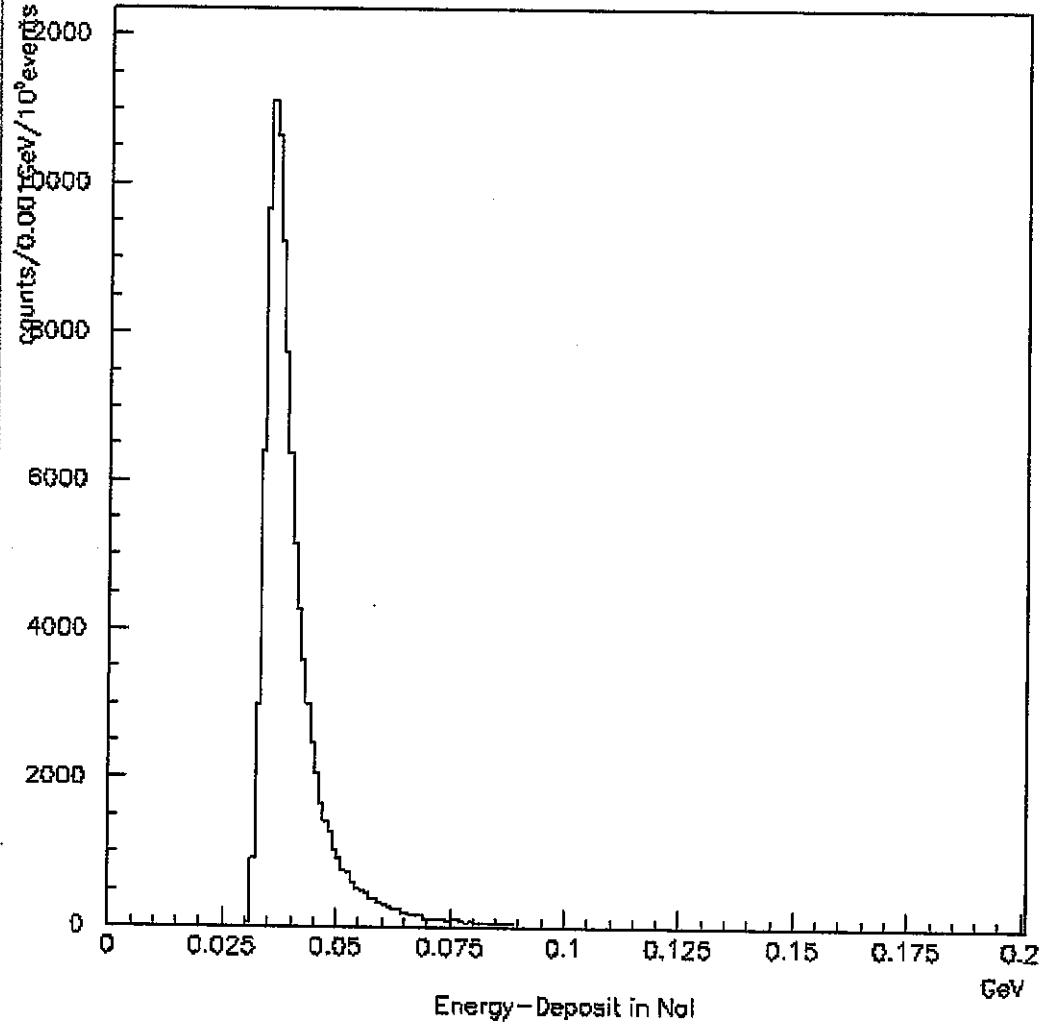


図 4.3-2 GEANT により計算された、 $1\text{GeV}\mu^-$ に対する NaI の応答関数

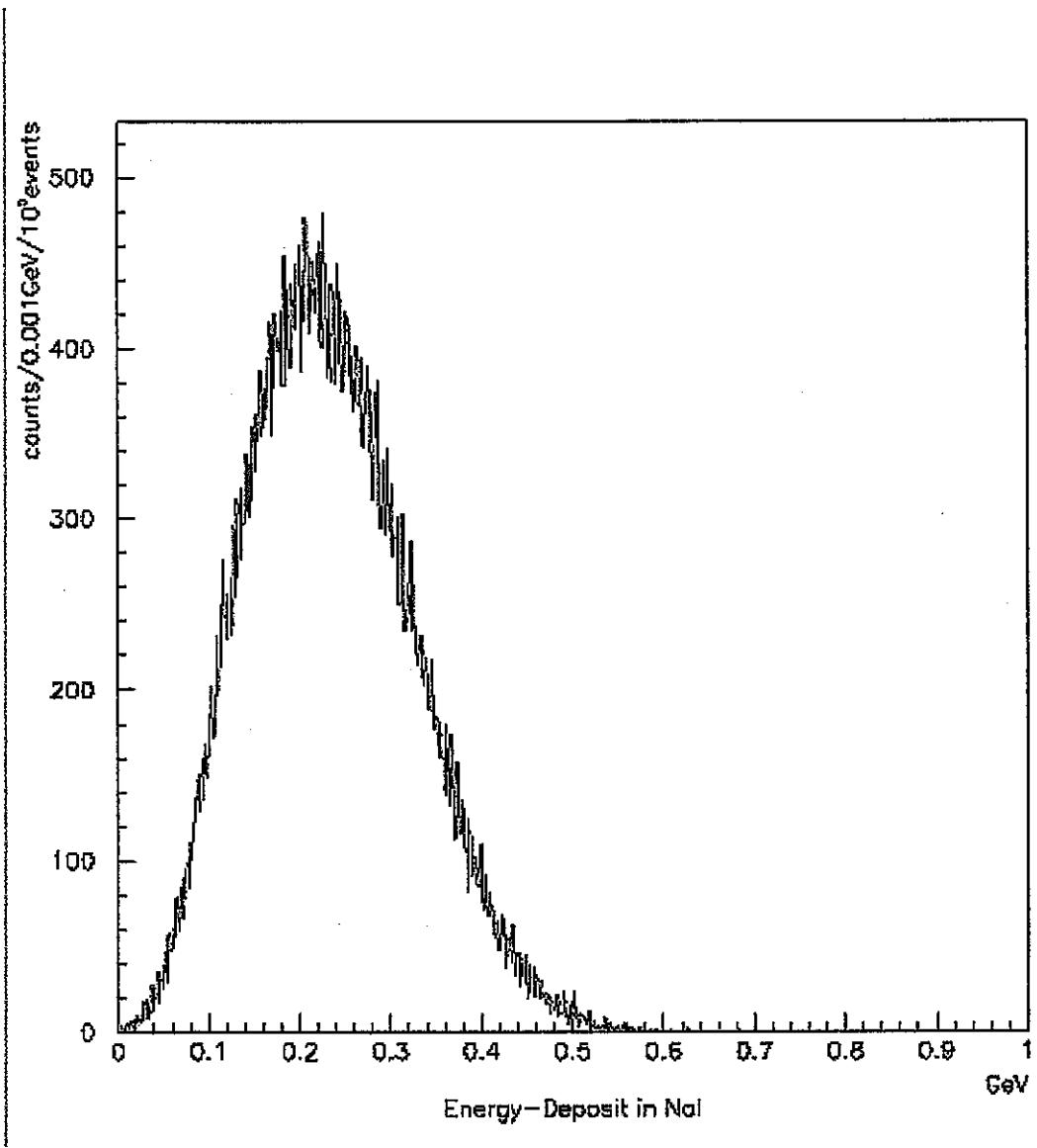


図 4.3-3_1 GEANT により計算された、1GeV 電子に対する NaI の応答関数

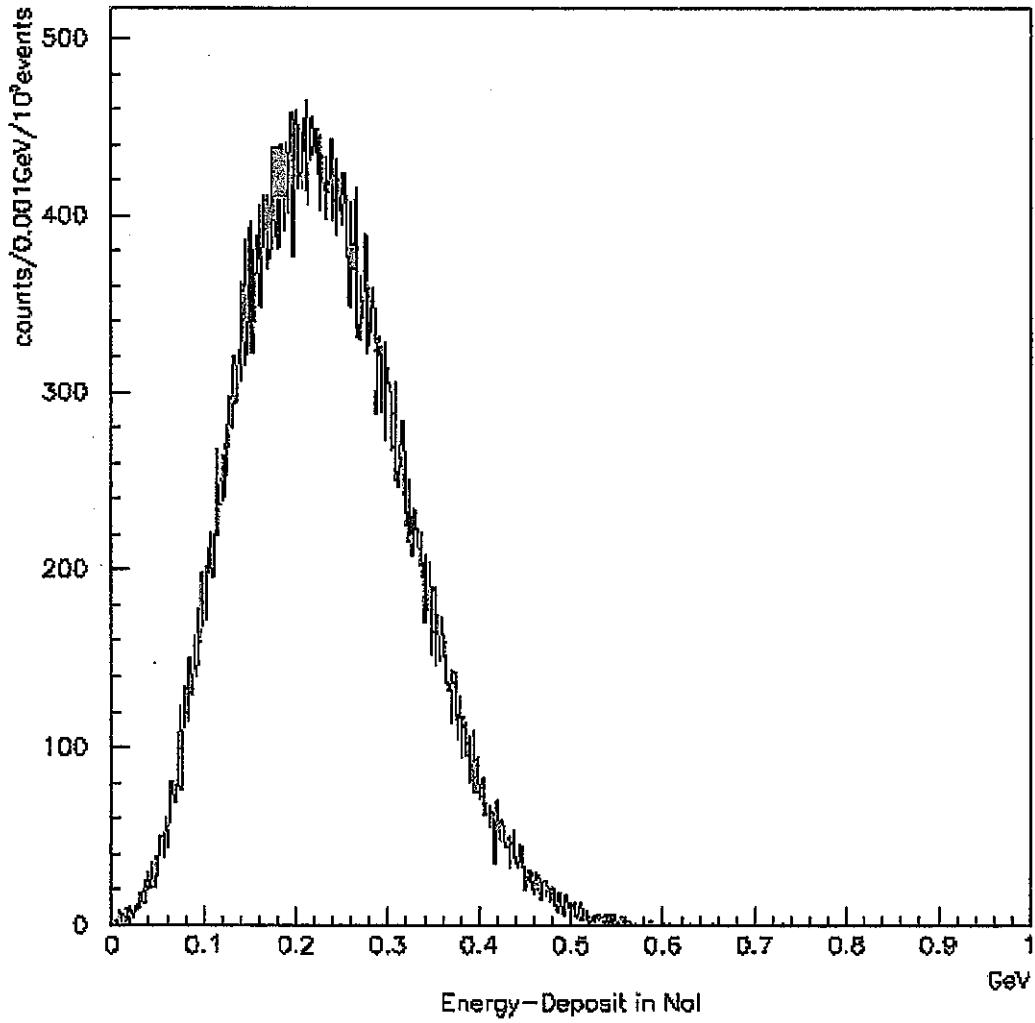


図 4.3.3_2 GEANT により計算された、1GeV 陽電子に対する NaI の応答関数

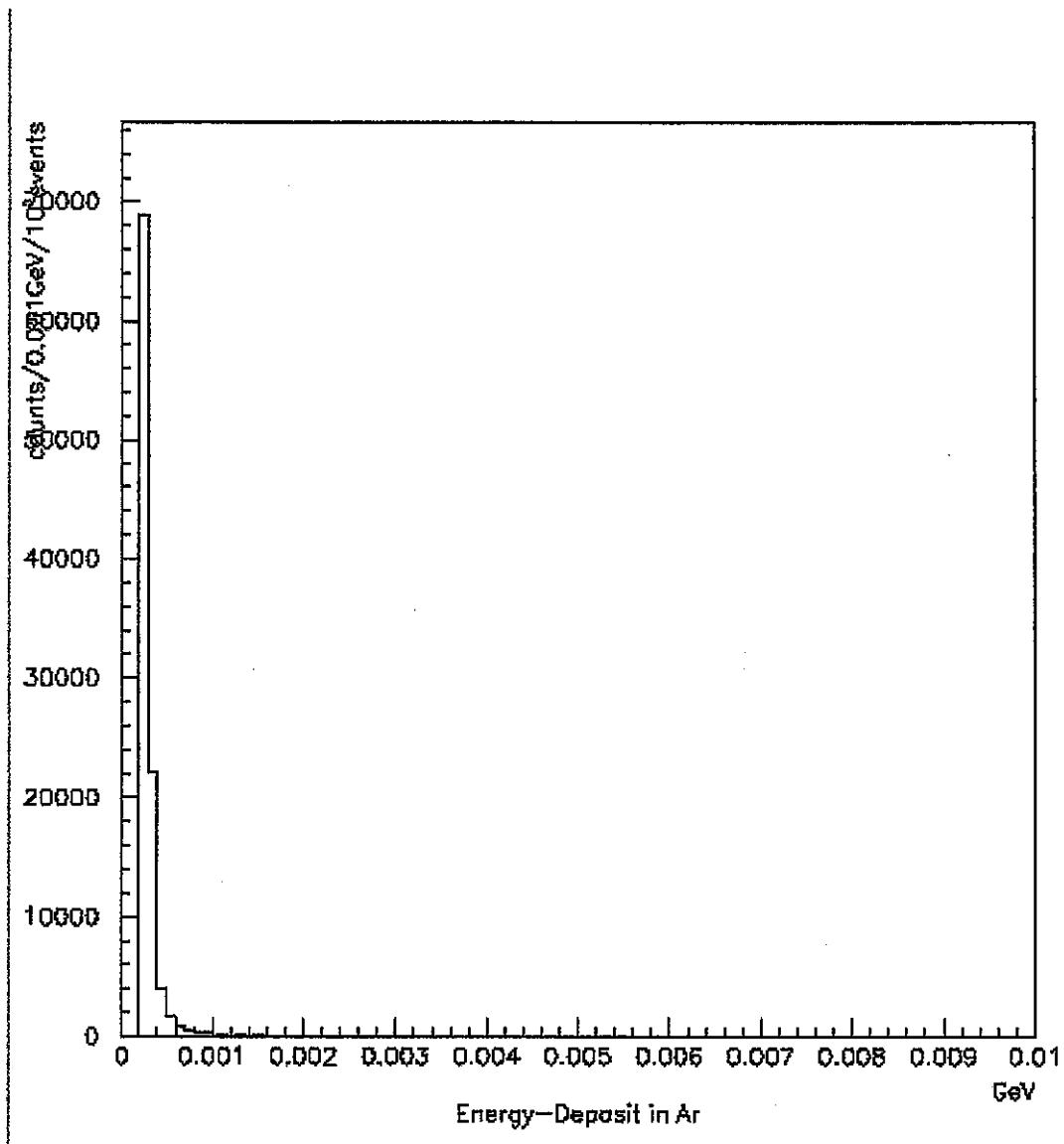


図 4.3-4 GEANT により計算された、 $1\text{GeV}\mu^-$ に対する Ar の応答関数

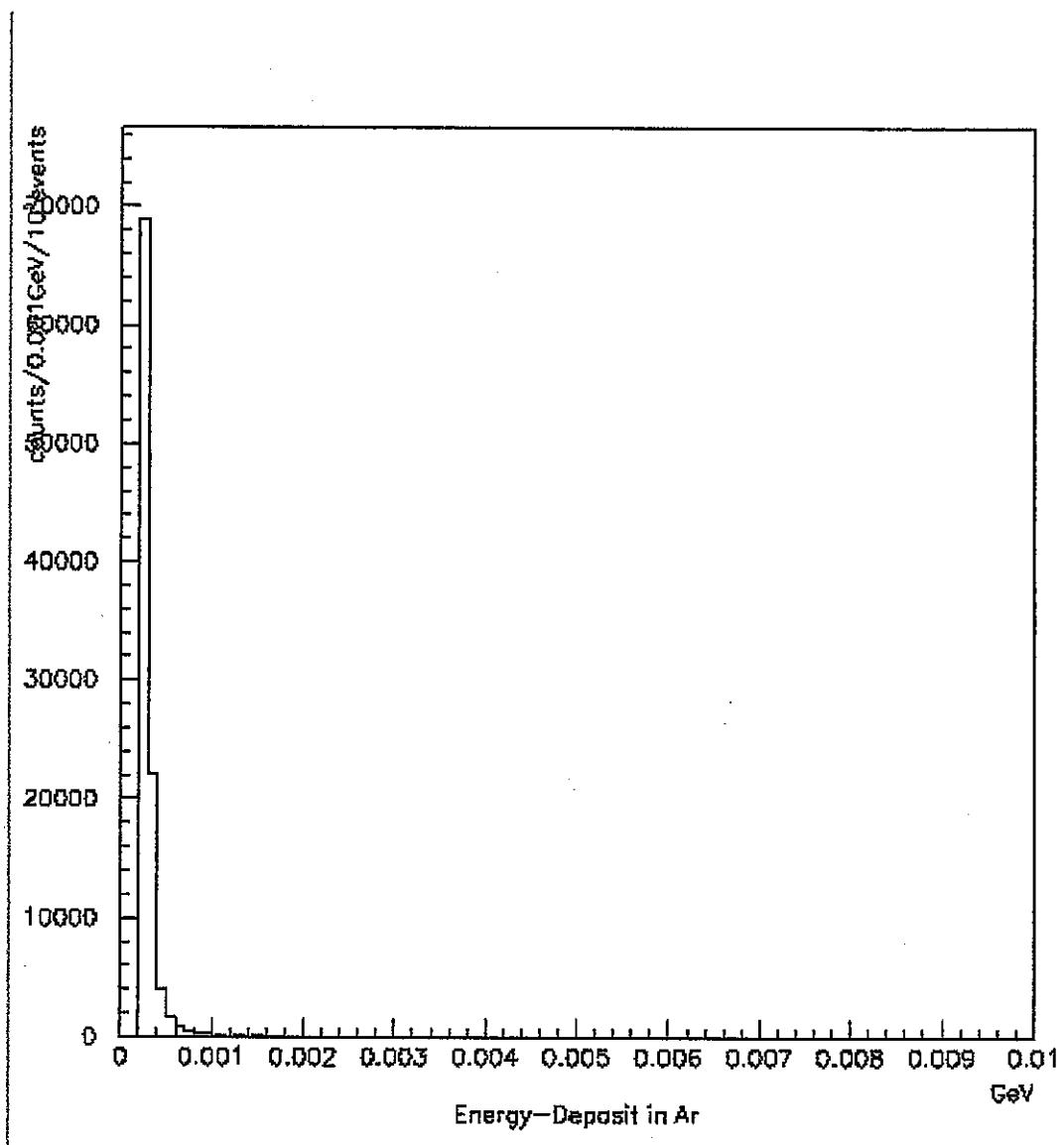


図 4.3-5 GEANT により計算された、 1GeV μ^+ に対する Ar の応答関数

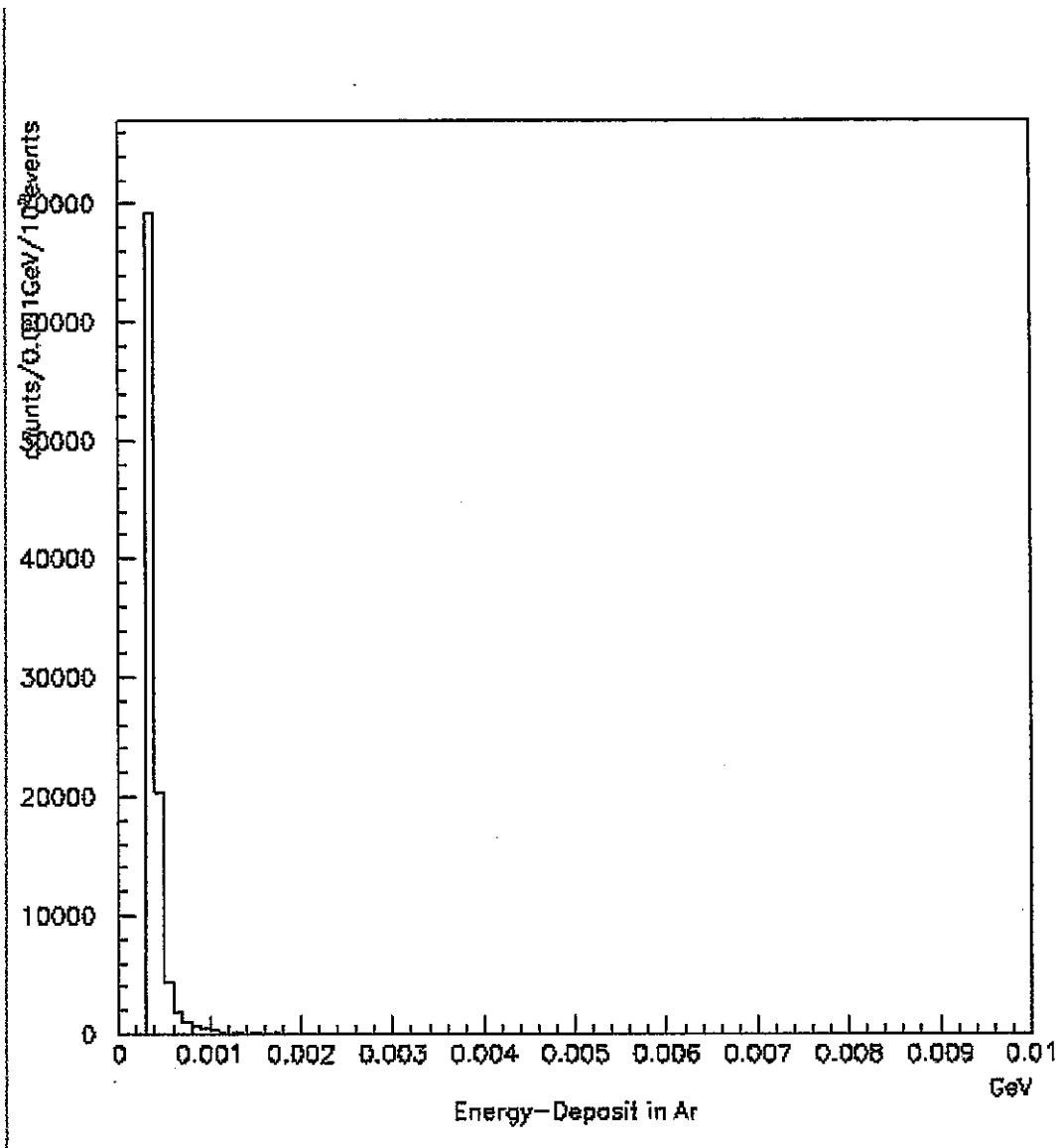


図 4.3-6 GEANT により計算された、1GeV 陽電子に対する Ar の応答関数

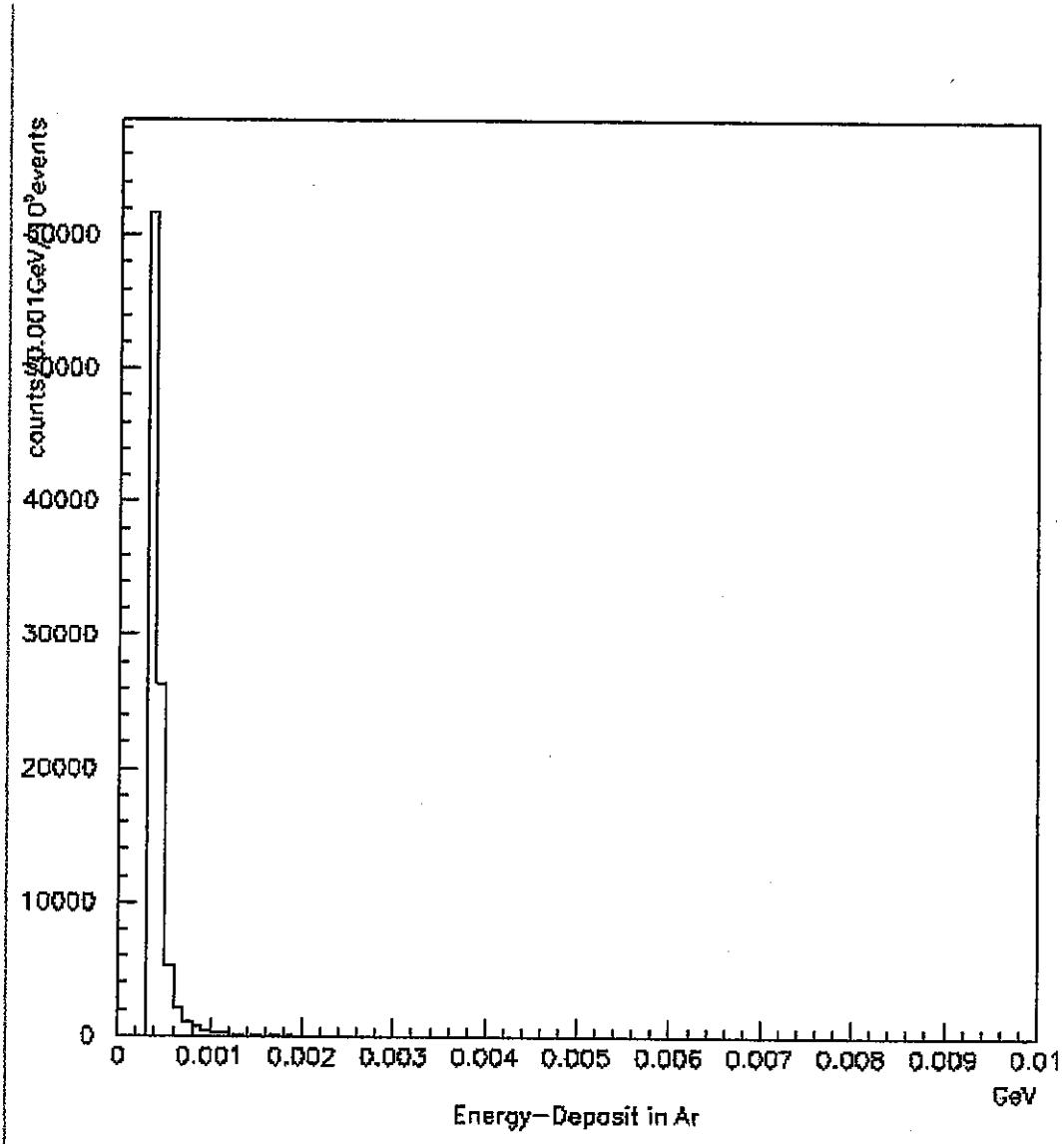


図 4.3-7 GEANT により計算された、1GeV 電子に対する Ar の応答関数

第5章　まとめ

緊急時における野外モニタリング手法に関する研究として、1) 高強度中性子放射線に対する線量評価に関する調査・研究、2) 遠隔空中モニタリング手法に関する調査・研究、及び3) 環境用放射線モニタ環境放射線の変動要因調査を実施した。

高強度中性子放射線に対する線量評価に関する調査・研究は、駿河狭湾エネルギー研究センターに設置されている加速器装置・W_MAS のイオン注入装置（照射室2）を用いて、実施された。タンデム加速器で加速された He^{2+} ビーム ($1\text{mm}\phi$) をベリリウムターゲット（厚さ $5\mu\text{m}$ ）に照射し、ビーム下流方向 45° の 100cm 位置に中性子検出器を設置した。ビームエネルギーは $E_\alpha = 6\text{MeV} \sim 15\text{MeV}$ 、ビーム電流は $I_\alpha = 50\text{nA} \sim 3.5\mu\text{A}$ とした。中性子の測定には、レムカウンター中性子検出、Au 箔及び In 箔による放射化法、TLD による積分線量計測を用いた。

ヘリウムビームエネルギーを $E_\alpha = 15\text{MeV}$ 、電流を $I_\alpha = 0.8\mu\text{A}$ とした場合の計測位置に於ける熱中性子線量等量は、Au 箔及び In 箔による放射化法、及び TLD による積分線量計測より $16 \sim 27 \mu\text{Sv}/\text{h}$ 、中速中性子線量等量は Au 箔及び In 箔による放射化法より $30 \sim 41 \mu\text{Sv}/\text{h}$ と評価された。レムカウンターによる中性子線量等量（熱中性子～ 10MeV 速中性子）は $\sim 9.5\text{mSv}/\text{h}$ であった。中性子検出器を設置した場所での中性子場は、ほとんどが速中性子からなると考えられる。ヘリウム照射による薄いベリリウムの中性子生成反応を考慮すれば、中性子場は $0.3 \sim 0.5\text{MeV}$ 及び $4 \sim 5.5\text{MeV}$ 中性子が大部分であると推定された。

種々のヘリウムエネルギー E_α に対し、レムカウンターのカウントレイトをビーム電流 I_α の関数として求めた。カウントレイト C のビーム電流 I_α に対する比 C/I_α は、カレントレイトの増加に伴い徐々に減少した。カウントレイトの小さい場合に比べて C/I_α が 10% 減少するカウントレイトは $\sim 10 \text{kcps}$ であった。

NRESP コードを用いて、レムカウンターに熱中性子～ 10MeV 速中性子が飛来した場合の中性子及び核反応生成荷電粒子の飛行時間を計算した。使用したレムカウンター内には

バイパス孔を持つ薄い球形の熱中性子吸収材 (B_4C) が挿入されている。熱中性子と $E_n = 2\text{MeV}$ での感度比がレムレスポンスの比と一致するという条件で、 B_4C 球に開けてあるバイパス孔率を B_4C が覆う面積割合として求めた結果、面積割合は 29% であった。この配置で計算された中性子+荷電粒子の飛行時間の確率分布より、99%～70% の中性子の処理に必要な時間を算出した。ここで対象とした中性子場では、ターゲットからほぼ同時に放出される中性子の検出には、本研究で使用したレムカウンターを、カウントレイトが 3kcps 以内で使用する必要はある事が分った。

遠隔空中モニタリング手法に関する調査・研究では、無人ヘリコプターに搭載して遠隔操作で使用可能な軽量のダストサンプラーを設計・試作した。無人ヘリコプターを用いた地上より 10m～30m 上空のダストのサンプリングを行い、遠隔操作によるダストサンプラーが十分使用可能である事が確認された。

最後に、環境放射線モニタリングの変動要因の調査を行った。環境放射線モニタリング実施の趣旨は原子力施設の安全管理と直結するものであり、これらの変動要因を正確に把握することが必要である。変動要因は大きく分類して人工的要因、自然的要因の二つから構成されている。これら二つの要因を測定上、分離することは可能であり、そして連続的な測定により自然的要因も定量評価が可能であることを示した。

自然的変動要因の一つである宇宙線については、シミュレーション結果により、モニタリング検出器での応答を評価した。その結果、宇宙線中の荷電粒子については、電離箱での測定が適しており、NaI(Tl) 検出器では応答が測定範囲外になることを示した。よって、宇宙線中の荷電粒子線束が変動した際には、電離箱線量率の上昇があり得る事が判明した。なお、宇宙線中の中性子に対しては、電離箱、NaI検出器双方の測定感度は変わらないことも示した。