

JNC TJ4440 2004-005

# 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)

2005年3月

(財)若狭湾エネルギー研究センター

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\*、遠藤伸之\*、大谷暢夫\*

要旨

原子力施設に於ける臨界事故においては、立ち上がりが高く持続時間が1ms～1sのバースト状パルス放射線が発生する。緊急時に於ける線量評価手法の確立に資する事を目的として、高線量バースト状放射線測定システムを検討すると共に、高線量放射線が測定可能な直流電流方式の中性子検出系を試作し、タンデム加速器で得られる9-15MeV  $\text{He}^{2+}$ がBeを衝撃する時に発生する放射線を用いて検出器応答実験を実施した。本実験により以下のことが明らかにされた

- 1) n- $\gamma$ 分別法による放射線計測により、10cm幅の鉛ブロックをNE213前面に設置することにより、中性子の個数割合が0.63から0.77となることが分かった。
- 2) 実験配置を考慮した計算機シミュレーションにより、検出系に入射する中性子は、エネルギーが7-8MeVの範囲の中性子圧倒的に多いことが分かった。
- 3) 直流モードで観測されたパルス1個の波形の半値全幅は~16.4nsであり、最大カウントレートは~60Mcpsと評価された。
- 4) カウントレートが~5Mkcps以上の範囲で、放射線強度はHe電流に対し良好な比例関係が確認された。

電子スピン共鳴法を用いた放射線線量計測法の確立を目指し、基礎的な研究としてカルシウム塩粉末にガンマ線を照射することで生成する安定ラジカルをESR装置で測定し、精密な信号解析を行い、高感度化を目指した線量評価特性の調査を実施した。また、これらの安定ラジカルが化学反応によって生体分子への影響を及ぼすかを検討した。

---

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 研究開発部

Research on Environment Monitoring of Radiation Emergency

Yoshifumi ITO\*, Nobuyuki ENDO\*, Nobuo OTANI\*

Abstract

In a case of a nuclear accident at nuclear facilities, strong radiation such as neutrons and  $\gamma$ -rays might radiate at a burst form in the initial stage. In order to establish dose estimation system for such accidents, a current mode detection system with a huge data acquisition was investigated. The experiments on the response of the DC current mode detector to radiation were also carried out using neutrons from the Be target irradiated by the  $\text{He}^{+2}$  beam of a Tandem accelerator in the W-MAST, and the following results were obtained:

- 1) The observed signal due to the radiation was composed with a pulse shape of  $\sim 16.4\text{ns}$  of full half width,  $\sim 6.6\text{ns}$  of rising time (10% $\rightarrow$ 90%) and  $\sim 17.7\text{ns}$  of falling time(90% $\rightarrow$ 10%). The neutron more than 60Mcps is expected to be measured using this detector.
- 2) Linearity of out put of the current mode detector vs neutron flux was checked in the wide range of count rate range less than 5Mcps in this experiment.

In order to establish the method of the dose of radioactivity measuring using the electron spin resonance (ESR) technique, stable free-radicals generated in the calcium salt by gamma-ray irradiation as basis research was measured with ESR equipment, precise signal analysis was performed, and the dose evaluation characteristic of having purpose at higher sensitivity was investigated. It was confirmed reactive oxygen species (ROS) was generated by dissolving the calcium powder that irradiated gamma rays in water. This fact suggests the calcium powder that irradiates gamma rays influencing the biomolecule.

---

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

\*The Wakasa-wan Energy Research Center

# 目 次

## 第 1 章 はじめに

## 第 2 章 大強度バースト状放射線測定システムの検討

2.1 大強度バースト状放射線測定の問題点とシステム検討の経緯

2.2 高線量放射線計測データ取込みシステムの検討

参考文献

## 第 3 章 高線量中性子の計測器応答特性の評価実験

3.1 加速器ビームを用いた実験配置と放射線計測システム

3.2 薄い Be ターゲットを用いた計測器応答特性評価実験

3.3 厚い Be ターゲットを用いた計測器応答特性の評価実験

3.4 計算機シミュレーションによる中性子輸送解析

参考文献

## 第 4 章 大線量 線照射によって生じる安定ラジカルの計測と生体分子への影響調査実験

4.1 ガンマ線照射試料に生成するラジカル種の ESR 測定

4.2 ガンマ線照射試料から観測される ESR 信号の解析

4.3 生成するラジカルの線量依存性

4.4 線源の違いによるラジカル種の比較

4.5 分割照射による積算性の検討

4.6 ガンマ線照射で生じるラジカル種の生体分子への影響調査

## 第 5 章 まとめ

## 第1章 はじめに

原子力施設の事故等では、立ち上がりが高く持続時間が1ms～1sの高線量バースト状パルス放射線が放出される。放射される高線量の放射線の計測高精度に行うには、放射線検出系の応答特性を明確にするとともに、膨大な量のデータを取り込み記録装置に保管する計測システムの検討が必要である。臨界事故を想定とした、バースト状高線量ガンマ線検出システムがメーカーにより開発されているが、中性子検出システムの研究は皆無である。本研究は、臨界事故に直接関係する中性子放射線に対するバースト状高線量放射線検出システムの開発に資する事を目的としている。

第2章では、H15年度に実施した直流電流モード測定法を簡単に総括した後、高線量放射線計測データ取込みシステムを検討するとともに、トリガー回路の設計・動作確認を実施し、より具体的な対処法について述べる。

第3章では、タンデム加速器で加速されたMeV HeビームのBeターゲット照射により生成された放射線を用いた、高速DC電流モード放射線検出器の応答特性について述べる。

緊急時のガンマ線被曝線量の計測法の1つとして、カルシウム塩にガンマ線照射によって生じる安定ラジカルを、電子スピン共鳴法(ESR法)を用いて定量測定を行い、線量を算出する為の研究を実施した。放射線の被曝線量の計測は、事故など緊急被曝時には線量計を着用している作業従事者以外の被曝線量の推定は困難である。ESR法は物質中の不対電子を測定する手法で、信号の形状からラジカルなど不対電子をもつ物質の種類を、信号強度からその量を計測することができる。物質によっては、放射線の照射によって安定なラジカルが生成・蓄積するものがありこれをESR測定することで放射線の線量測定ができる。一般生活のなかで身近にある物質の中にこのような性質を持つものがあれば、緊急時の被曝線量計測が可能になる。

また、ラジカル種は一般的に反応性が高く、有機物と接触することで反応することが多い。ガンマ線照射によって生成するラジカルは塩中に閉じ込められて安定化していると考えられるが、水や有機物と接触することで反応する可能性が高い。

第4章においては、放射線照射によって生成する安定ラジカル種を、ESR法によって高感度・高精度に測定することで線量計測を行う手法の確立をめざした基礎実験、及びガンマ線照射で生成する安定ラジカルの化学反応による生体分子への影響に関する実施した実験研究について述べる。

第5章に、今年度実施した研究成果についてまとめる。

## 第2章 大強度バースト状放射線測定システムの検討

### 2.1 大強度バースト状放射線測定の問題点とシステム検討の経緯

臨界事故で発生する放射線は、極めて短い時間に立上り、1msec～1sec 持続するバースト状の大強度放射線である。波高分布計測等で使用されるパルスモード計測系の放射線計測では、演算処理のためのデッドタイムにより、10kcps 以下（1kcps～3kcps）の放射線を対象とため、大強度バースト状放射線測定に適用する事は出来ない。

放射線の強度は、単位時間・単位面積あたり通過する放射線のエネルギーであり、高線量の放射線では単位時間・単位面積あたり通過する放射線の個数は増大する。ある方向に放出されるエネルギースペクトルが時間的に大きく変化しない場合、その方向で観測される単位時間内の粒子数は、放射線の強度を与える。発生場所から距離  $R$  離れた位置に飛来する放射線の個数は、発生源で等方に放射されると仮定すると検出面の立体角により  $R^{-2}$  に比例する。エネルギーの小さい放射線はエネルギーの大きい放射線に比べて  $R$  に到達するのにより遅れる効果では  $R^{-1}$  に比例する。従って、観測される放射線の個数は距離  $R$  に対し、 $R^{-3}$  に比例すると考えられる。臨界事故で想定される放射線強度は明らかでないが、発生源から観測位置  $R$  を適当に選択すれば、桁外れに強度の大きい(飛来する個々の放射線の時間間隔が極めて短い)放射線を対象とする必要は無い。然しながら、通常の放射線線源に比べて非常に強力な放射線が対象となるため、波高分析で用いられる手法は使用できない。

H15 年度の報告書<sup>1)</sup>に記述したように、富士電機は、プラスチックプローブを用いた DC 電流方式の高線量ガンマ線検出装置を用いた、核分裂物質の臨界安全管理のための「核燃焼取扱い施設における臨界警報装置」を開発している<sup>2)</sup>。この装置では、170mR/h 以上のガンマ線パルスに対し警戒音を発生する仕様となっている。

H15 年度より、臨界事故に直接関係する中性子放射線に対してのバースト状パルス検出システムの開発研究を開始した。H15 年度には、直流電流モード測定法による大線量放射線検出システムの検討が中心であった。パルスモード計測では、中性子  $n$  及びガンマ線  $\gamma$  に起因する発光の立ち上がり時間差を利用した  $n$ - $\gamma$

分別が可能であるが、この手法により放射線を計測する場合、検出器に入射する放射線のカウンtrateを数 kcps 以下にする必要はある。次々に入射する大線量中性子の場合、パルスモード計測は使用できないため、直流電流モードによる中性子計測を採用した。高速のプリアンプ（浜松ホトニクス製、C6438:周波数帯域が 0Hz～50MHz (-3dB)）を通して出力インピーダンスを 50Ω に変換後、周波数帯域が 300MHz (-3dB) のデジタルオシロスコープ（テクトロニクス製）で観測する方式を採用し、200MeV プロトンが銅を衝撃する際に放出される中性子を用いて直流電流モードによる放射線検出器の応答特性について調査した。又、液体シンチレータ(NE213)はガンマ線にも感度をもつため、鉛ブロックによるガンマ線シールドを試み、その効果を調べた。

H15 年度の研究に於いて、

- 1) 放射線検出部の周波数応答は、使用したプリアンプで律速されていること
  - 2) 通常のデジタルオシロスコープによる観測では、臨界事故等への対応が不可能であるため、大量データ取込みシステムの検討が必要であること
- が明らかにされた。1) に対しては、MeV He ビームが Be ターゲットを衝撃する時に放出される中性子を用いた検出系の応答特性を記述している第 3 章で述べる。2) については、次節で述べるように、高線量放射線計測データ取込みシステムを検討するとともに、トリガー回路の設計・動作確認を実施し、より具体的な対処法について考察した。



## 2.2 高線量放射線計測データ取込みシステムの検討

### 2.2.1 高線量放射線計測システム

大強度バースト状放射線測定システムは、大別すると以下の5種の部分から構成される。

- 1) 信号検出部
- 2) データ取込み部
- 3) トリガー発生部
- 4) 警報発生部
- 5) 自己診断部

これらを組み合わせて構築した全体のブロック図を図 2.2.1-1 に示す。

#### 2.2.1-1 信号検出部

液体シンチレータ (NE213)、光電子増倍管、高速プリアンプから構成され、電流モードによる中性子計測を行う。中性子により反跳されたプロトンによる液体シンチレータの発光を光電子増倍管で電気信号に変換し、高速プリアンプにより  $50\Omega$  にインピーダンス変換後、電圧信号として出力する。液体シンチレータはガンマ線にも感度を持つため、検出部の側面を鉛ブロックを配置しガンマ線に対するシールドを行う。検出器前面については、ガンマ線の減衰と中性子の減衰を考慮したシールドを検討する。

予想される電圧出力信号の例を図 2.2.1-2 に示す。中性子によるシンチレータの発光は数 nsec であり、確率的な時間間隔において中性子が飛来するため、パルス状で離散的な信号が観測される。したがって、信号パルスの検出頻度に信号パルスの波高値を乗じた量が中性子線(源)の強度を示すものとなる。なお、信号パルスの波高値は、中性子のエネルギー、プロトンによる発光強度、発光の光電子増倍管への入射条件等に依存する。

検出信号について、想定しているパルスの形状を図 2.2.1-3 に示す。液体シンチレータや光電子増倍管の特性から、立上がりに対して立下りがやや遅いパルスになると考えられる。ここで、パルス信号の幅を半値全幅  $T_{FH}$  を用いて定義する。本研究の検出法による中性子線の強度の最大値は、個々のパルスを重なりなくカ

ウントできる値で決まり、簡単には  $1/T_{FH}$  となる。したがって、検出可能な最大量を広げるためには、なるべくパルス幅  $T_{FH}$  を狭く維持して検出することが望まれる。本測定システムでは、 $T_{FH} = 10\text{ns}$  程度(最大カウント数としては  $100\text{Mcps}$ ) を目標として、優れた時間分解能を有する液体シンチレータ、光電子増倍管、高速プリアンプを想定している。

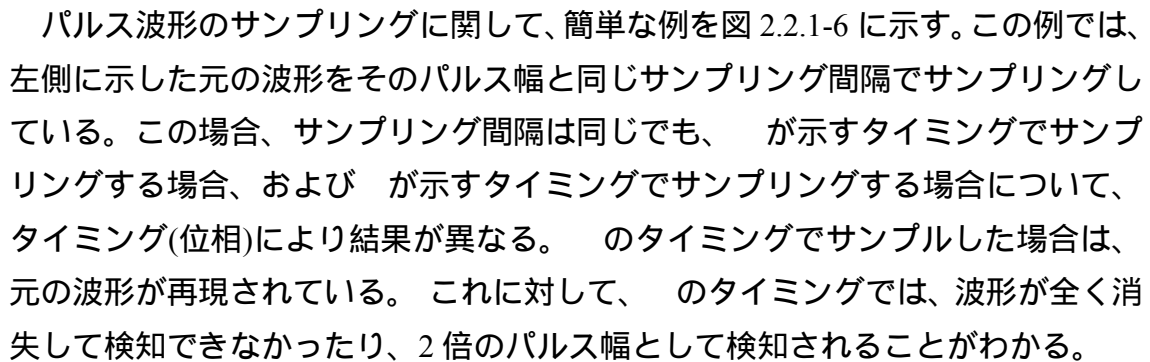
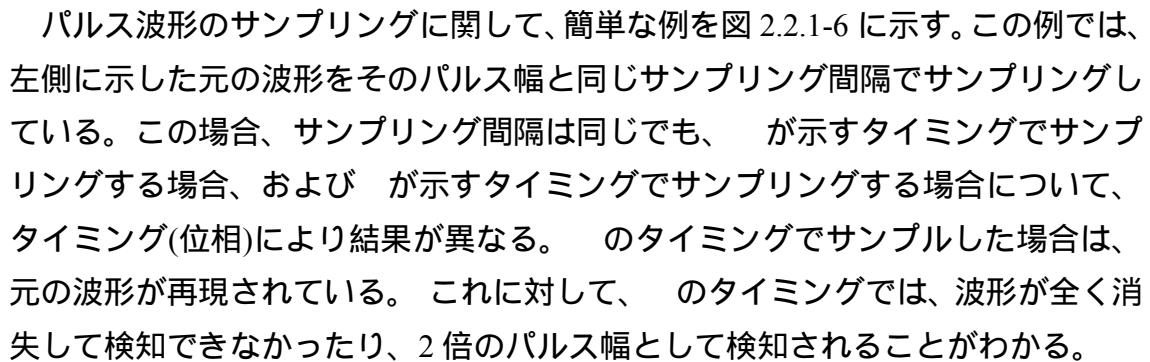
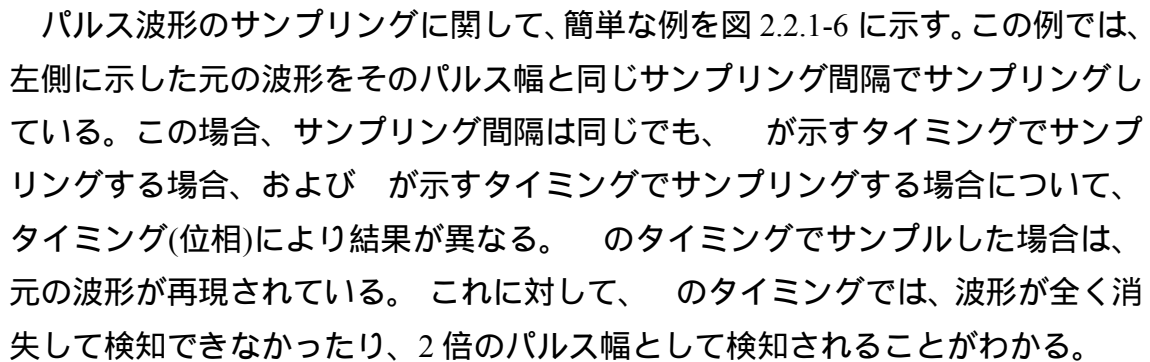
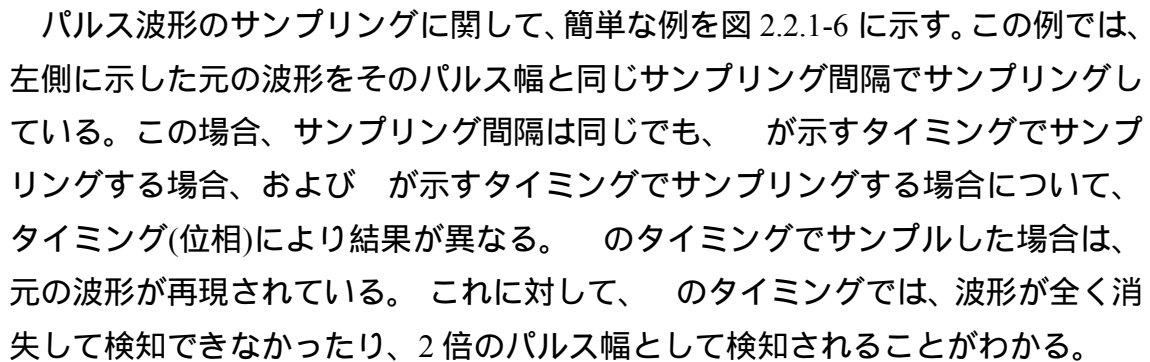
### 2.2.1-2 データ取込み部

データ取込み部の構成を図 2.2.1-4 に示す。入力信号(アナログ)は、A/D コンバータでデジタルデータに変換され、記憶装置に順次格納される。ここで、入力パルス信号のサンプル周波数を  $f_s$  [MHz]( $\equiv$  サンプル速度  $R_s$ [Mword/s])、デジタルデータの分解能(データ幅)を  $W_D$  [ビット]、取込むデータ量(データポイント数)を  $N_a$  [M(メガ)ポイント]とする。また、これらより、サンプリング間隔  $T_s = 1/f_s$  [ $\mu\text{s}$ ]、サンプル時間  $T_d = T_s \times N_a$  [s]も定義される。

#### a) A/D 変換回路

A/D 変換回路は、検出された入力信号をデジタル信号に変換する電子回路である。デジタル化することをサンプリングと呼ぶ。サンプリングに際しては、もとのアナログ信号から必要な情報が失われないように変換する必要がある。図 2.2.1-3 に示した測定信号のモデルを、さらに単純な形状とした図 2.2.1-5 に示す信号を用いて、サンプリングの条件を考察する。この単純な形状信号は、立上がり時間および立下り時間を無視した矩形パルスである。信号のパルス幅を  $T_{FH}$ 、パルス高さを  $V_s$  とする。典型的には、 $T_{FH} = 10 \sim 50 \text{ ns}$ 、 $V_s = 0.1 \sim 2 \text{ V}$  の信号を扱うものとする。

A/D 変換時の操作において、変換精度に影響を与えるのは、サンプリング周波数  $f_s$ 、および分解能  $W_D$  である。分解能  $W_D$  は、現在の回路技術の進歩から 8~24 ビットが選択できるが、実用的にはサンプリング周波数に依存してその選択範囲が狭まるため、先にサンプリング周波数を決めればよい。サンプリング周波数は、定常的な連続信号の場合、シャノンのサンプリング定理より、含まれる最も高い周波数成分の 2 倍以上の周波数とされ、本測定の対象となるパルス信号列の場合もこれに準ずるが、図 2.2.1-5 に示した形状で孤立するパルスに対しては次のように図式的に評価しても問題はない。

パルス波形のサンプリングに関して、簡単な例を図 2.2.1-6 に示す。この例では、左側に示した元の波形をそのパルス幅と同じサンプリング間隔でサンプリングしている。この場合、サンプリング間隔は同じでも、が示すタイミングでサンプリングする場合、およびが示すタイミングでサンプリングする場合について、タイミング(位相)により結果が異なる。のタイミングでサンプルした場合は、元の波形が再現されている。これに対して、のタイミングでは、波形が全く消失して検知できなかつたり、2 倍のパルス幅として検知されることがわかる。

デジタルデータからもとのアナログ波形を再現する方法(内挿)としては、単純に折れ線でサンプル点を接続している。これは  $\text{rect}$ (方形)関数を用いて内挿することと同等である。一般的には、 $\text{sinc}$  関数( $= \sin(x)/x$ )を補間関数に用いて滑らかに接続する方が良いとされている。ただし、これも連続波形の場合であり、パルス波形に用いるとパルスの立上がりおよび立下りの周辺で不要な振動が生じることがあるので注意しなければならないからである。

以上から、ここでは次の方法で経験的にサンプリング周波数(間隔)を設定した。まず、検出したいパルス幅の 1/2 倍 ~ 1/4 倍程度にサンプリング間隔を設定すれば、パルスの消失を防止した検出が可能である。次に 1/10 倍程度にすれば、パルス幅に対して 10%以下の誤差で元の波形が再現できる。すなわち、本計測システムでは、 $T_{\text{FH}} = 10 \text{ ns}$  の波形を考慮して、パルスの消失を防ぐためには、 $f_s = 200 \sim 400 \text{ MHz}$  とし、より高精度には 1GHz 程度とした。さらに、複数のパルスが重なった場合の各パルスの分解性能を重視すると、より細かくサンプリングすることになり、サンプリング間隔はパルスの分離手法も考慮して設定することになる。

デジタル変換時の電圧方向の分解能  $W_D$  は、信号が取り得る電圧レンジが分かっている場合は、8 ビット(-128 ~ 0 ~ +127)が保証されていれば、相対誤差として 1%程度以下となり、本測定におけるパルス波形に対しては十分である。しかし、大きく異なる波高値を持つパルス波形をサンプリングする場合は、A/D コンバータの入力レンジを最大波高値に取らざるを得ないため、小さい波高値のパルスに対しては相対的に粗くサンプリングすることになり、変換誤差が増大する。そのため、可能であれば 10 ビット以上が望ましい。しかし、サンプリング速度を 1GHz とすれば、その周波数で動作可能な A/D コンバータは 8 ビットしか選択できないため、本測定システムにおける A/D 変換の分解能は 8 ビットとしている。

## b) データ記録部

サンプルされたデジタルデータは、まず A/D 変換部内の一時メモリーに蓄えられ、その後データ記録部に転送される。現在のところ、デジタルデータの記録はパーソナルコンピュータ(PC)が適している。その理由は、PC が

- 1) 柔軟なソフトウェアによる制御が可能
- 2) 一般用の最新の電子デバイスが用いられている
- 3) 大容量の記憶装置などが接続可能

等の特徴を備えているためである。本測定システムでは、データ記録部として 1 台の PC と同等な装置を想定している。A/D 変換されたデータは PC のメインメモリーに転送され、演算処理および表示等が行われ、最終的には内蔵ハードディスク(HD)あるいは外部に接続された HD に保管・記録される。

最近では、PC の処理速度が非常に高速化し、ハードディスクについても容量が飛躍的に増大したため、大容量のデータの取込み、保管に関する問題は緩和されつつある。しかし、この 10 年間で、中央演算処理装置(CPU)の処理速度は 1 桁以上向上したのに対し、高速サンプリングされたデータの記録速度に直接影響があるメモリーのアクセス時間や外部・内部でのデータ転送の速度は、高々 2~3 倍程度の向上にすぎない。そのため、大容量データの操作に関しては最新の PC を用いても、PC 内のデータ転送速度に律速され、十分な性能が得られない。本計測システムは、サンプリング周波数が非常に高速であり、臨界事故等で放射線バーストが放射される時間幅も 1ms ~ 1s と考えられる為、取込みデータ量についての検討が必要となる。

$f_s = 1\text{GHz}$ 、 $W_D = 8$  ビット(1 バイト; 1B)とした場合、データ転送速度  $R_T$  は、 $R_T = f_s \times W_D = 1000 \times 8 = 8\text{G}$  ビット/s = 1GB/s である。これに対し、GPIB 等の計測用バスは、1MB/s 前後であり、イーサネットや汎用シリアルバス(USB2)は、平均的には数 MB/s である。そのため、計測用バスやイーサネット等は汎用性はあるが遅すぎる。一方、PC の内部バスに直結する特別なインターフェースを介した転送ならば転送速度は 100MB/s 前後となり、一般に利用できる装置の中では最高速が得られる。ただし、最終的にデータが記録されるハードディスクに関しては、20 ~ 40MB/s 程度にまで低下する。しかも、これは理想的な瞬時値であり、実際の記録速度としてはこの 1/2 ~ 1/10 以下となる。測定システム全体でみれば、この HD での記録速度により律速されることになる。

生成されたデータが前述の  $R_T$  の速度で転送され、ハードディスクへの記録速度

が  $R_R(\text{MB/s})$  で  $R_T > R_R$  とすれば、仮に A/D 変換・データ転送と記録が同時に行えたとしても、すべてのデータをリアルタイムに記録することができない。変換後のデータはいったん A/D 回路内のメモリーに蓄え、A/D 処理を一旦停止して、転送・記録することになる。このような方法を用いた場合の A/D 変換、転送、保存の一連の処理スキームを示すタイムチャートを図 2.2.1-7 に示す。たとえば、 $R_T = 1\text{GB/s}$ 、 $R_R = 20\text{MB/s}$  とした場合、サンプル時間  $T_D$  に対して  $R_T/R_R = 50$  倍の記録時間  $T_R$  となる。たとえば、 $T_D = 16\text{ms}$  とした場合、 $T_R = 16\text{ms} \times 50 = 800\text{ms}$  となり、取込みのサイクルは、データ収集間隔  $T_{\text{INT}} = T_D + T_R = 16 + 800 = 816\text{ms}$  ごとになる。

### 2.2.1-3 トリガー発生部

A/D コンバータと半導体メモリーによる記録のみならば常時動作させておくことが可能だが、機械的な動作を伴う HD による記憶装置を常時動作させると HD を定期交換しなければならない。また、常時動作させると記録量も膨大なものとなる。そのため、本測定システムでは、あらかじめ設定しておいた状態が生じてから信号を記録できるよう、信号自身からデータ記録開始のトリガーを発生させる機構を装備している。ここでは、波高値の異なる非常に幅の狭いパルス(パルス幅 10 ~ 50ns)の検出信号が、単位時間あたりのパルス数 1cps (自然放射線レベル) から 1kcps (線源放射線レベル) になったときにトリガー信号を発生させるものとして議論を進める。その動作を図 2.2.1-8 に示す。

トリガー信号の発生方式には、アナログ信号から信号を発生させるアナログ方式、および A/D 変換後のデジタルデータを処理して信号を発生させるデジタル方式の 2 つの方式が考えられる。アナログ方式は電子回路のみでトリガーを発生させるため、高速で動作可能だが複雑な条件でのトリガーは実現できない。これに対して、デジタル方式では、デジタルデータを高速の信号プロセッサにより処理し、単位時間当たりのパルス数を検出することでトリガーを発生させるため、プログラムにより非常に柔軟な条件設定をすることができる。しかし、本計測システムでは専用の信号プロセッサの搭載を想定していないため、信号処理は PC の CPU を使うことになり、その場合の処理能力は 0.1MB/s 以下の速度のため、サンプリング速度に比べて著しく遅く、直接トリガー判断処理をさせることができない。したがって、本測定システムでは以下に述べるアナログ方式を検討した。

アナログ方式は、前述のようにパルスの頻度によりトリガー信号を発生させる。そのため、オシロスコープに使われているような単純なレベルトリガー回路は適さない。そこで、図 2.2.1-9 に示す回路を検討した。この回路では、まず、後の処理に便利のように比較回路により、しきい値  $V_p$  の大きさを超えたパルスが入力した時、パルスの波高値を一定の電圧とする。次に、それらのパルスは、コンデンサー積分回路を用いて一定のパルス幅  $T_{EXT}$  まで拡大される。このパルス幅  $T_{EXT}$  の信号はコンデンサー積分回路により積分され、その積分時間内( $T_{CR1} + T_{CR2}$ )以内に次のパルスが検出された場合は、2 つのパルスの加算が行われ、単パルスの場合より大きな値となり、ここでレベルトリガーを用いてトリガー信号を発生させる。

#### 2.2.1-4 警報発生部

警報発生には取込んだデータの一部を PC で解析して、あらかじめ設定したパルス数に達すれば警報を出すようにするのが最も確実である。その反面、パソコンによる解析には、数秒から数 10 秒を要する。短反応時間を優先する場合は、2.2.1-3 で述べたトリガー信号を予備的な警報信号とすることができる。

#### 2.2.1-5 自己診断部

本測定システムでは、動作確認機能の整備を想定している。本装置は、動作確認時に検出部の近傍に弱い中性子線源が設置できる事を想定している。この中性子源により検出された信号により、トリガー発生部によりトリガーが発生すればシステムは正常であると判断できる。トリガー発生部に問題が生じトリガーが発生しない場合でも、任意に A/D 変換をスタートできる機能があるので、取込みパルスをソフトウェア的に解析する方法により信号検出部の試験が可能である。

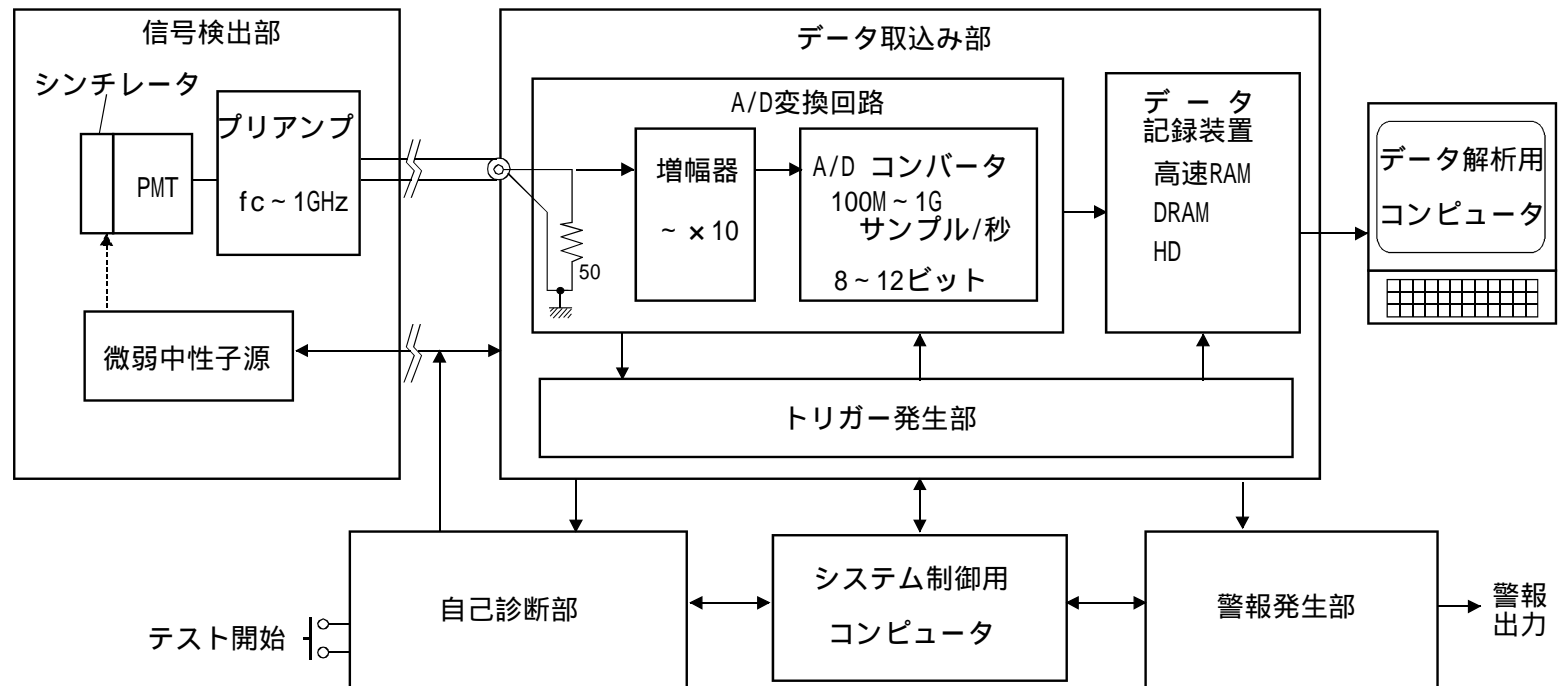


図 2.2.1-1 大強度バースト状放射線測定システムの構成図

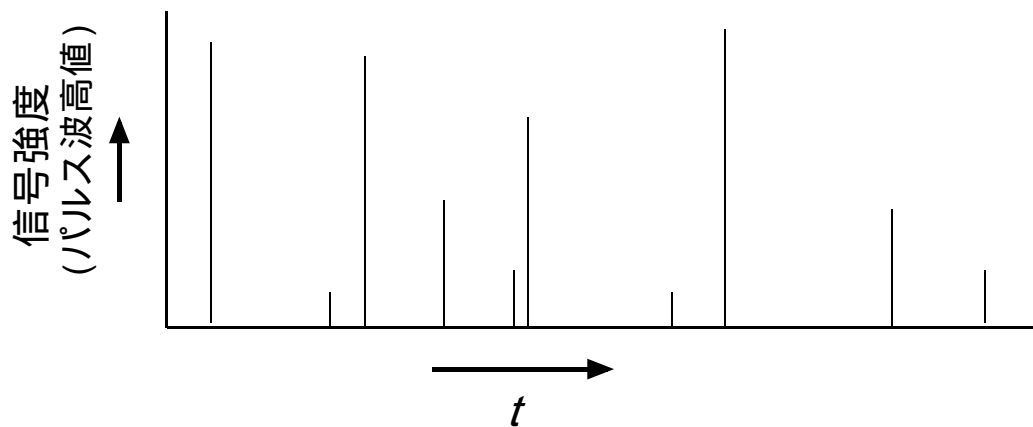


図 2.2.1-2 予想される電圧出力信号例

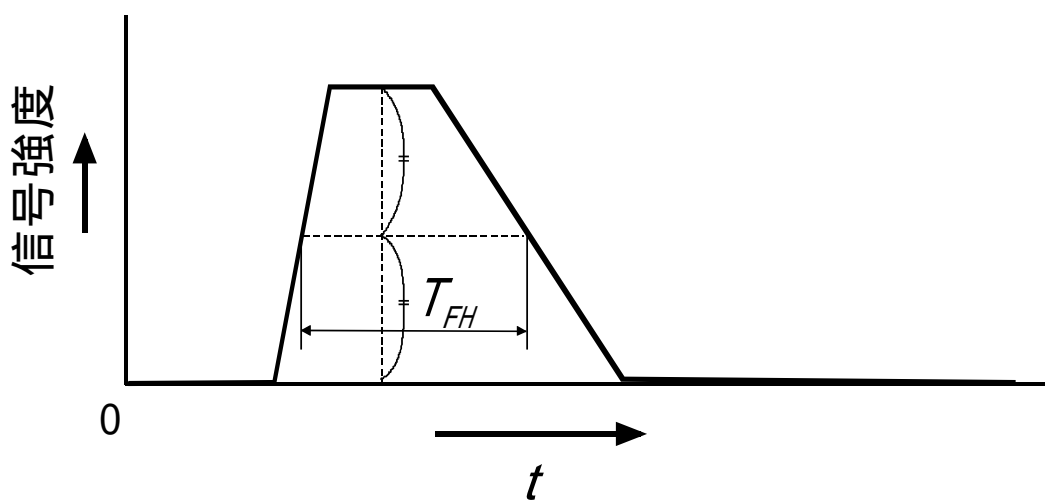


図 2.2.1-3 想定しているパルスの形状



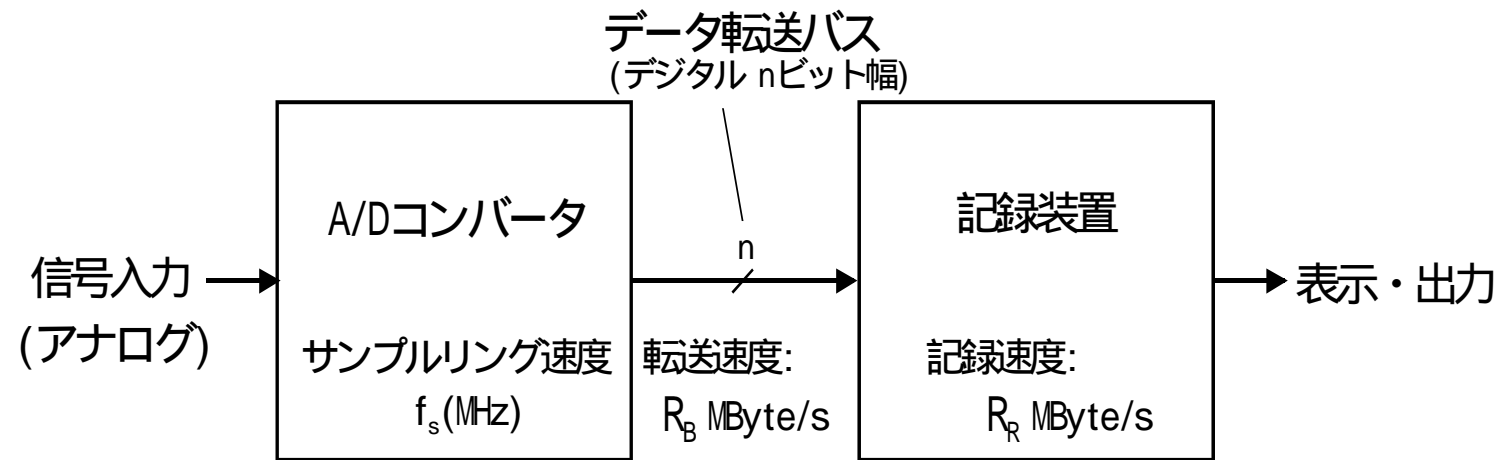


図 2.2.1-4 データ取込み部の構成

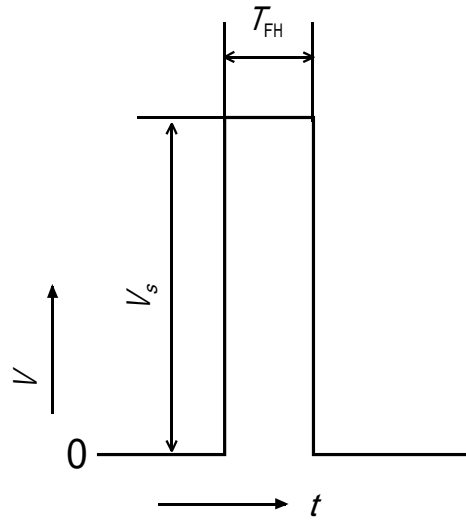


図 2.2.1-5 検出信号のより簡単なモデル波形

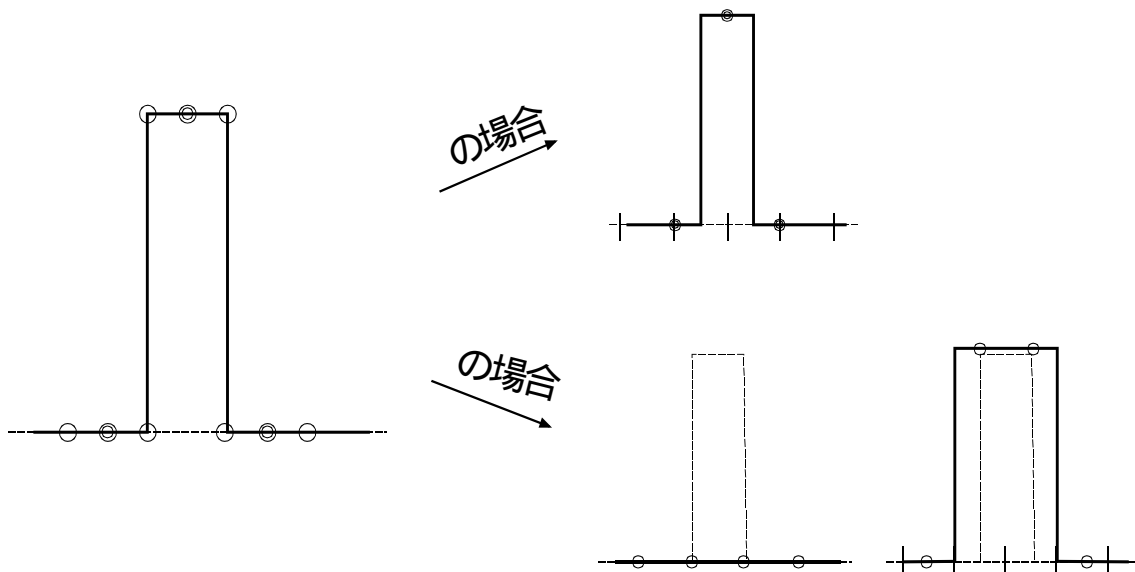


図 2.2.1-6 タイミング(位相)の異なるパルス波形のサンプリングとアナログ波形への再生

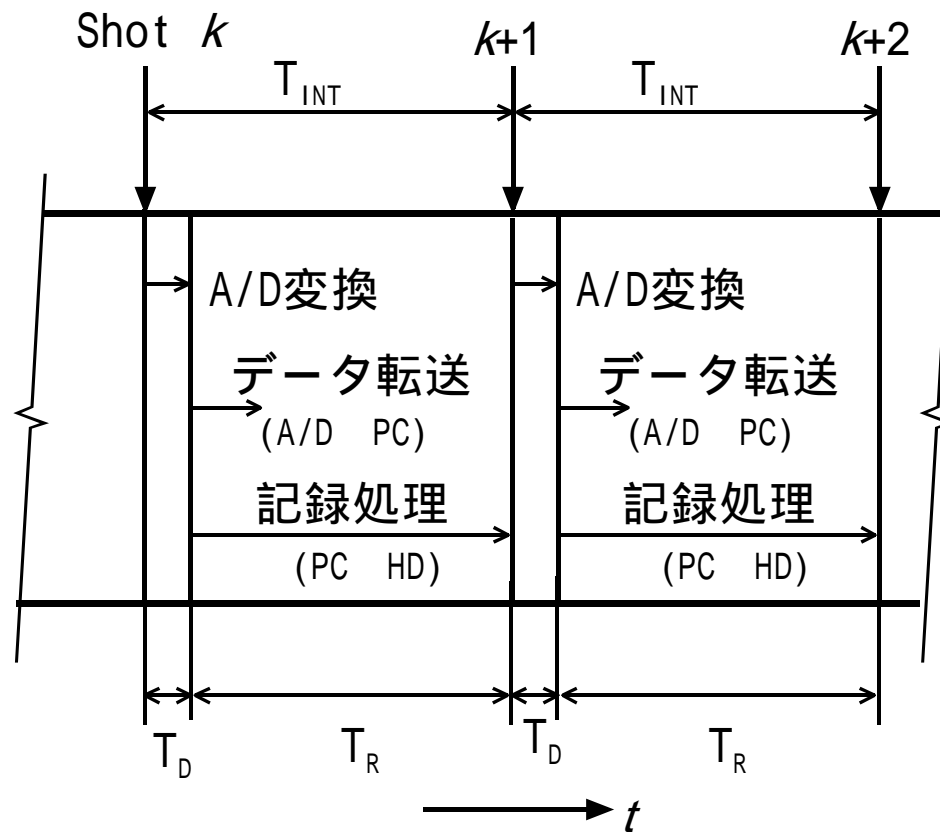


図 2.2.1-7 取込んだデジタルデータの周期的な処理操作のタイムチャート

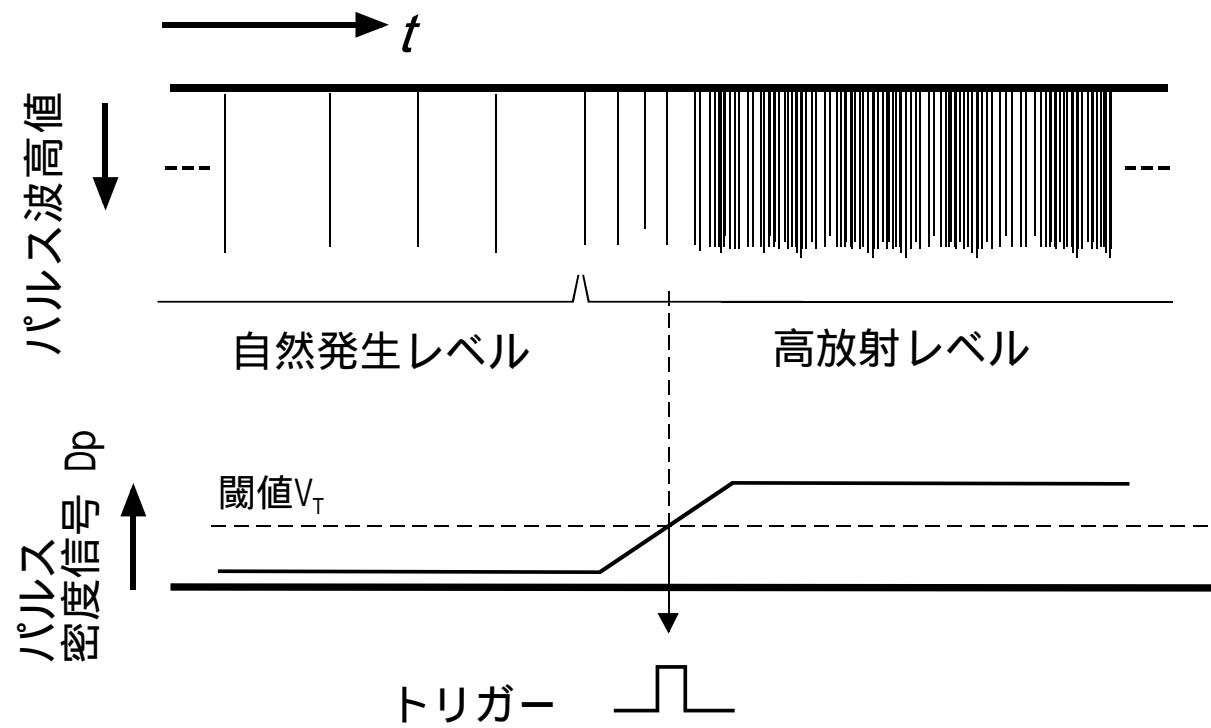


図 2.2.1-8 入力信号からのトリガー発生方法

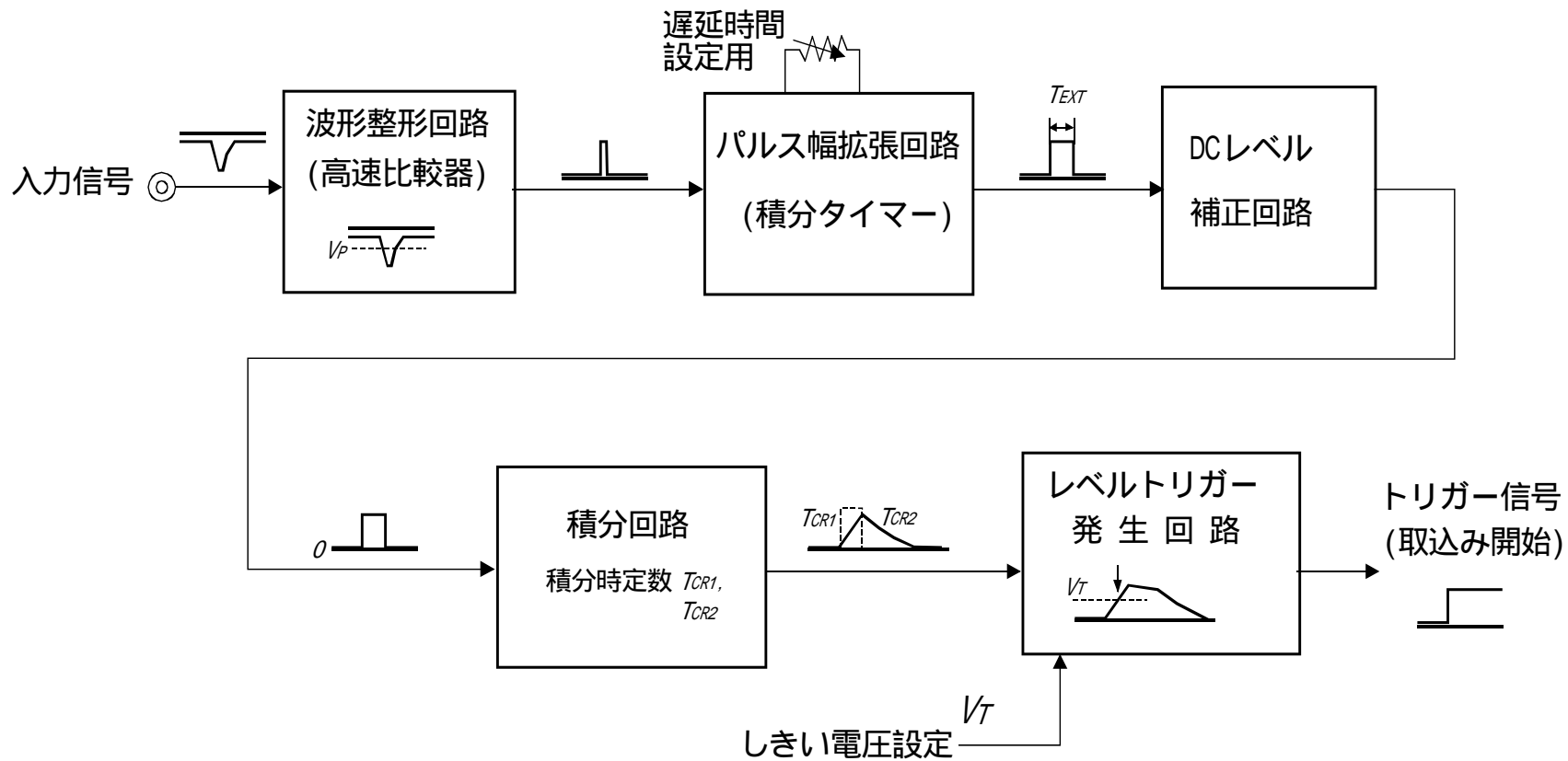


図 2.2.1-9 トリガー発生部のブロック図

## 2.2.2 トリガー信号発生回路の設計と動作確認試験

### 2.2.2-1 トリガー信号発生回路の設計

図 2.2.1-9 に示した構成図のブロックのうち、トリガー信号の発生に主要な役割を担う、

- 1) 波形整形回路の出力に相当するパルス信号源、
- 2) パルス幅拡張回路、
- 3 DC レベル補正回路、
- 4) 積分回路

に相当する回路を設計し、その動作確認を実施した。設計した電子回路を図 2.2.2-1 に示す。上記以外の波形整形回路、およびレベルトリガー発生回路は、動作が単純であり、トリガー信号発生部の特性には特に影響は与えないため省略した。

本回路は、2.2.1-3 で述べたように、検出パルスの状態は、自然放射レベルとバースト時の高放射レベルに分かれ、通常の高放射レベルでは、検出パルスがあってもトリガーを発生しないが、高放射レベルになればトリガーを発生する。これらの状態の指標として検出パルス密度  $D_p$  [cps; カウント/秒] を定義し、自然放射レベルの代表値を  $D_{PL}$  ( $\sim 1$  cps)、高放射レベルの代表値(下限値)を  $D_{PH}$  ( $\sim 1$  kcps) とする。トリガー信号は、 $D_{PL}$  から  $D_{PH}$  までの範囲で適当なしきい値  $D_{PT}$  を設定しておいて、検出パルス密度  $D_p$  がそのしきい値  $D_{PT}$  を超えたとき発生させればよい。

しかし、検出パルス密度の値を正確に求めるには、複数のパルスの統計的な処理が必要となるため、即座にトリガーを発生しなければならない用途には適していない。バースト時には自然放射レベルから瞬時に高放射レベルに移行すると考えられるからでもある。本回路では、連続して検出された 2 つのパルス間の時間が  $1/D_{PH}$  に相当する時間となったときにトリガー信号を発生する手法を採用した。ただし、この手法は自然放射レベルでも、ごく短時間に 2 つのパルスが検出された場合にもトリガー信号が発生してしまう。然しながら、自然放射レベルでごく短時間に 2 つのパルスが検出され、且つその直後に臨界事故は起こる確率は非常に小さく稀にしか起こらないので大きな問題にはならないと考える。

図 2.2.2-1 の各回路および所望の動作に適した各回路定数の値は、以下のように決めた。パルス幅拡張回路では、入力したそのままのパルス波形は非常に幅がせ

まくアナログ回路においては扱いにくいいため、パルス幅が  $T_{FH}$  から  $T_{ext}$  に拡幅される。これには、CR 積分型の単安定マルチバイブレータ(タイマー)回路素子(IC1:NE555)を用いた。パルス幅  $T_{ext}$  は広いほど扱いやすくなるが、トリガーの閾値となるパルス間隔( $1/D_{PT}$ )において重なりあわないような値(1ms 以下、ここでは約  $300\mu$  秒)に設定した。このパルス幅は、図 2.2.2-1 の抵抗 R5 とコンデンサー C2 によって設定でき、概算値であるが、 $T_{ext}[s] = R5[\Omega] \times C2[F] \times 1.1$  で求められる。

DC レベル補正回路は、パルス幅拡張回路の出力に含まれる直流成分の変動をキャンセルする働きを持つ。これは、もし直流分が長時間積分されると、それが微小な値でも積分時間に比例した出力が生じ、後段のレベルトリガー発生回路において誤差を生じさせるからである。実用的には、直流分のレベルを検出して自動補正する回路を用いるが、ここでは簡単のため手動(R7 と R8)の調整としている。

積分回路は、パルスの積分時には約  $T_C = C1 \times R1 (= 10k\Omega \times 10nF = 1ms)$  の時定数をもつ。またパルス積分後は自然放電により積分キャンセルをおこなう。その積分キャンセル時の時定数は、 $T_D = C1 \times R2 (= 100k\Omega \times 10nF = 10ms)$  である。この両方の積分時定数に関して、 $T_C + T_D > 1/D_{PT} (= 1ms)$  とすることにより、本回路では擬似的にパルス密度関数を発生させている。図 2.2.2-2 に示しているようなパルスが積分回路に入力すると、その出力は基本的に三角波となる。ここでは、 $T_C < T_D$  としているので、立下りの方が勾配がゆるやかな波形となっている。もし、パルスが連続して入力され、積分・放電時間( $T_C + T_D$ )以内に次のパルスが来れば、前のパルスの波形に重ねて新たに入力されたパルスの積分波形が加わる。図 2.2.2-2 の上段はそのような状況を示している。この場合は、積分回路の出力波形は 1 つ目のパルスに対しては基本的な三角波(ピーク値  $V_L$ )であるが、2 つ目のパルスに対しては、前パルスの積分波形の立下り部分が加わった波形となり、その分の電圧が上昇している(ピーク値  $V_U$ )。もし、レベルトリガーの発生電圧  $V_T$  の設定値を  $V_L < V_T < V_U$  とすれば、連続するパルスがその設定値  $D_{PT}$  に対応するパルス間隔になったときにトリガーが発生する。

図 2.2.2-2 の下段は、入力パルス密度がトリガー発生設定パルス密度  $D_{PT}$  より 10%程度低い場合である。2 つ目のパルスに対するピーク電圧( $V_L'$ )は上段の場合より低く、トリガー信号は発生しない。厳密には、 $V_L < V_L'$  であるため、 $V_T$  の設定を  $V_L' < V_T < V_U$  とする必要がある。

### 2.2.2-2 トリガー信号発生回路の動作試験

図 2.2.2-1 に示した回路を用いて電子回路シミュレーションにより本設計回路の動作確認を行った。シミュレーションにはパソコン用電子回路シミュレータ Micro-Cap 7/CQ 版を用いた。トリガー発生パルス密度が  $D_{PT} = 1\text{kcps}$  を想定して得られた結果を図 2.2.2-3-a ~ 図 2.2.2-3-c に示す。同図には、それぞれ 3 つの波形が表示されていて、上から順に図 2.2.2-1 に示した A ~ C の波形に相当する。

図 2.2.2-3-a は入力パルス密度  $D_p$  が  $D_p = D_{PT}$  の場合である。積分出力波形(3 段目)を見ると、最初のパルスに対するピーク値□に対して 2 つ目のパルスに対するピーク値□(9V)に上昇が確認できる。そこで、積分後のレベルトリガー発生回路のしきい値を  $V_T = 9\text{V}$  に設定すればよい。

図 2.2.2-3-b は  $D_p > D_{PT}$  の場合である。 $V_T = 9\text{V}$  に設定してあれば、同図の矢印のポイントでトリガー信号が発生する。

図 2.2.2-3-c は  $D_p < D_{PT}$  の場合である。2 つ目のパルスに対するピーク値(矢印)に上昇が確認できる。しかし、 $V_T = 9\text{V}$  に設定してあるので、同図の矢印のポイントでもトリガー信号は発生しない。

所定の検出パルス密度( $D_{PT}$ )に対してトリガー信号が発生できることが確認された。さらにパルス密度が高い信号がこの回路に入った場合のシミュレーション結果を図 2.2.2-4( $D_{PT}=2.5\text{kcps}$ )、図 2.2.2-5( $D_{PT}=3.3\text{kcps}$ )、図 2.2.2-6( $D_{PT}=10\text{kcps}$ )、図 2.2.2-7( $D_{PT}=100\text{kcps}$ )に示す。検出パルス密度の高い信号( $D_{PT} > 3.3\text{kcps}$ )が入力され、それらの間隔が  $T_{ext}(=300\mu\text{s})$  よりも短い場合も、 $T_{ext}$  の時間内では次々とやってくる検出パルスは無視されるが、 $T_{ext}$  の時間が経過すれば、あらためて拡幅パルス(各波形の 2 段目)が発生し、最下段に示した波形の電圧の上昇が起こる。したがって、たとえば 9V でトリガーがかかるようにしてあれば、水平方向の矢印(→)の位置でトリガー信号を発生できる為、 $D_{PT}$  がより高くても問題は生じない。

一度トリガーがかかり、初回のデータの取込みを完了した後の状況を考察する。このとき、依然として検出パルスの密度が高い状態が続いている場合には、即座にトリガー信号を発生する必要がある。然しながら、最下段の波形の電圧は 9V を超えたままであるため、通常のアシロスコープに使われているようなレベルトリガー回路では、再トリガー信号は発生できない。この難点は、取込み完了したときにレベルトリガー回路をリセットする方法により回避出来る。レベルトリガー回路に対して、リセット入力があれば、最下段の信号が設定レベル(今は 9V)を超えていれば、その時点で新たにトリガーされたものとしてデータの記録開始の



指令を出すよう設定すればよい。

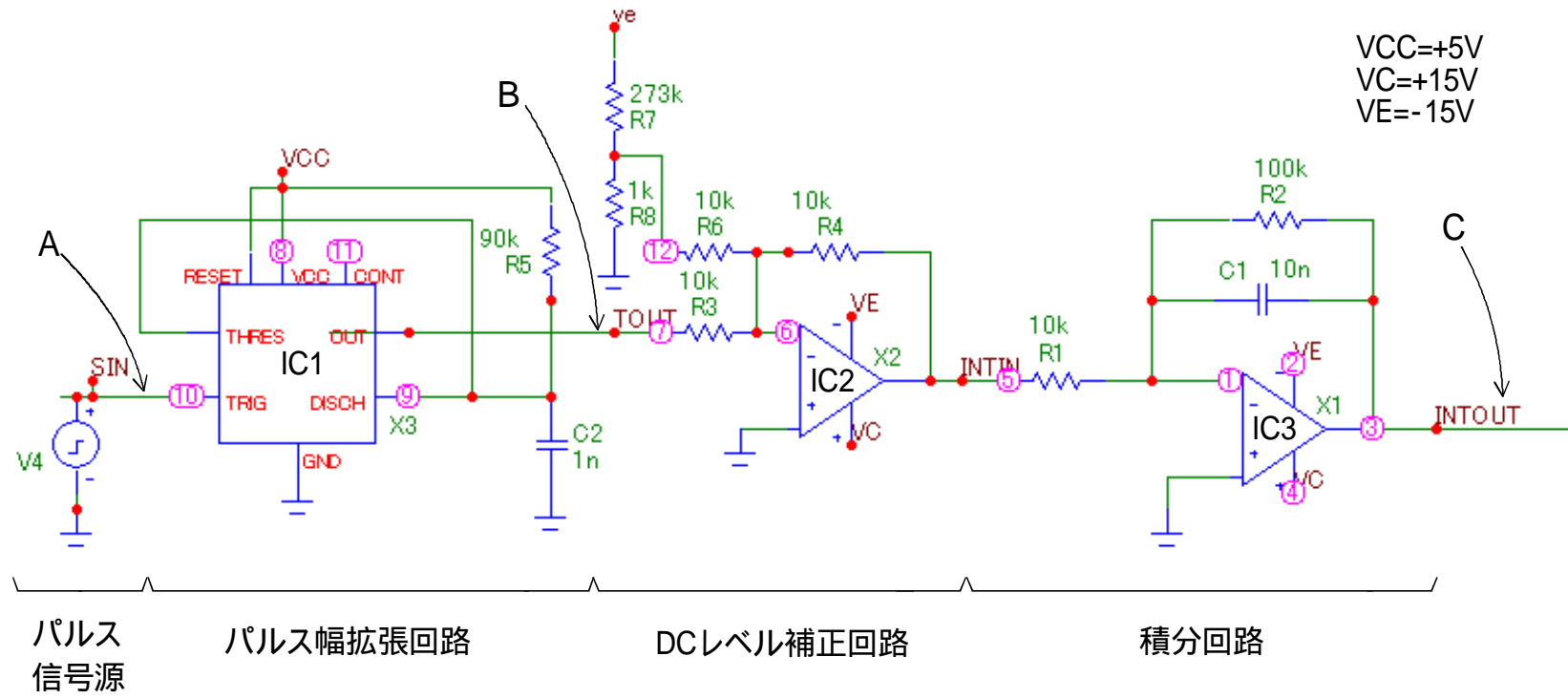


図 2.2.2-1 電子回路シミュレーションに用いたトリガー発生回路

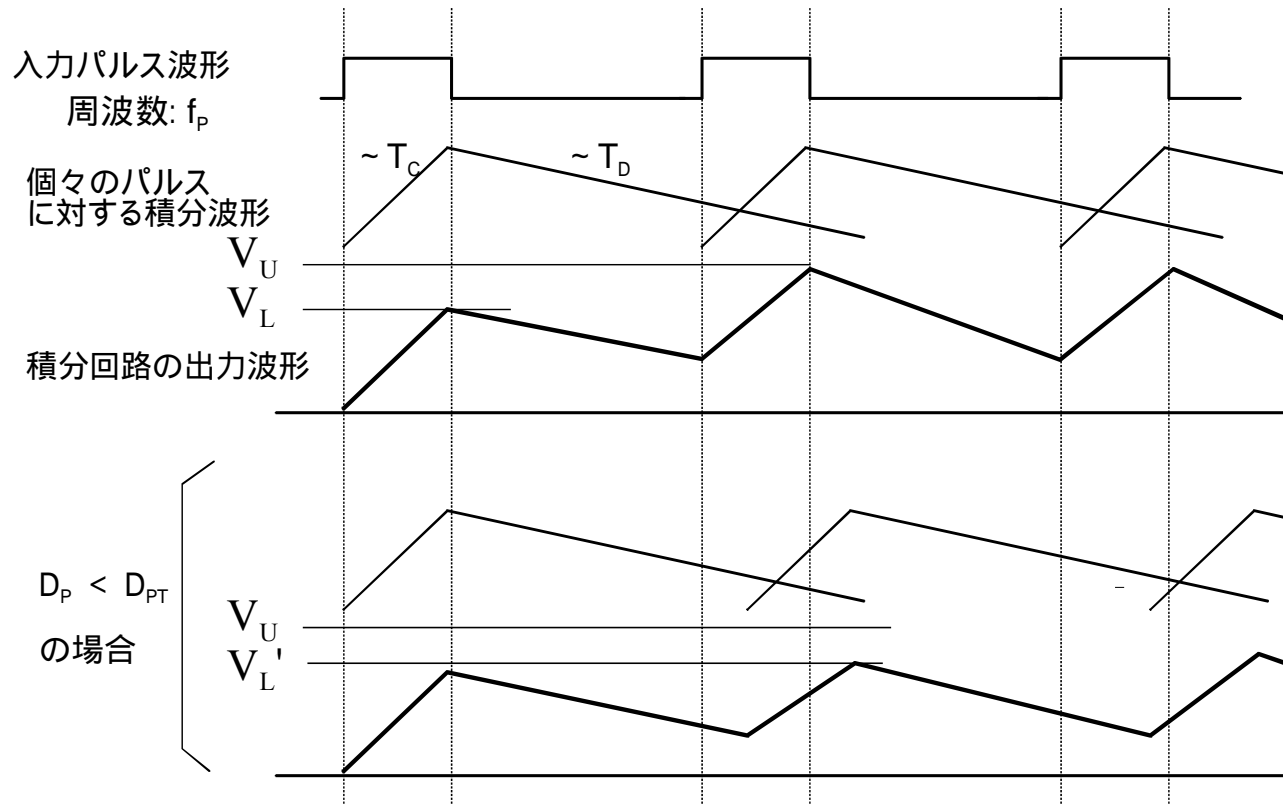


図 2.2.2-2 トリガー発生回路における積分回路の動作

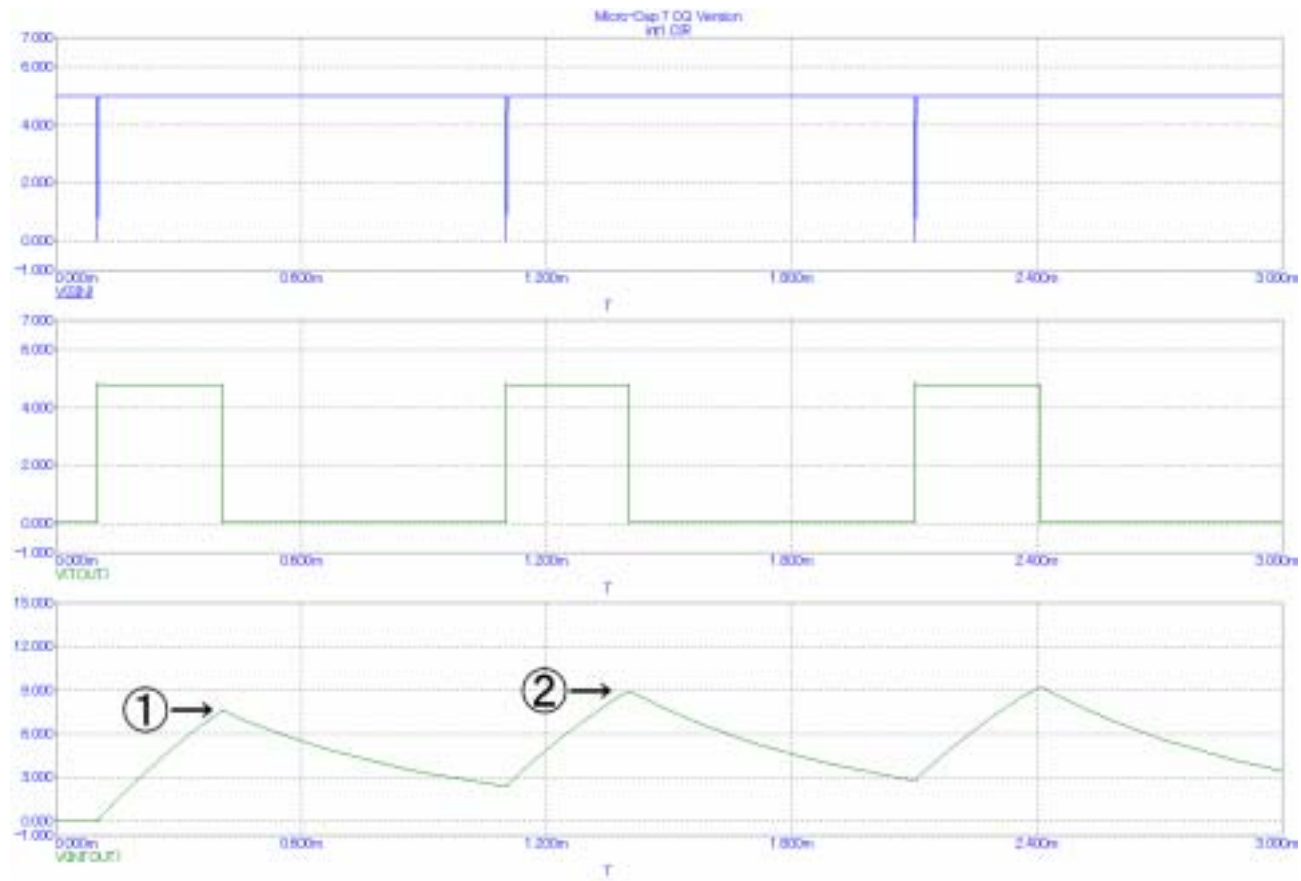


図 2.2.2-3-a  $D_p = D_{PT}$  の場合の電子回路シミュレーションの結果  
 波形は上段から 検出パルス、パルス幅拡大回路出力、積分回路出力に相当する。

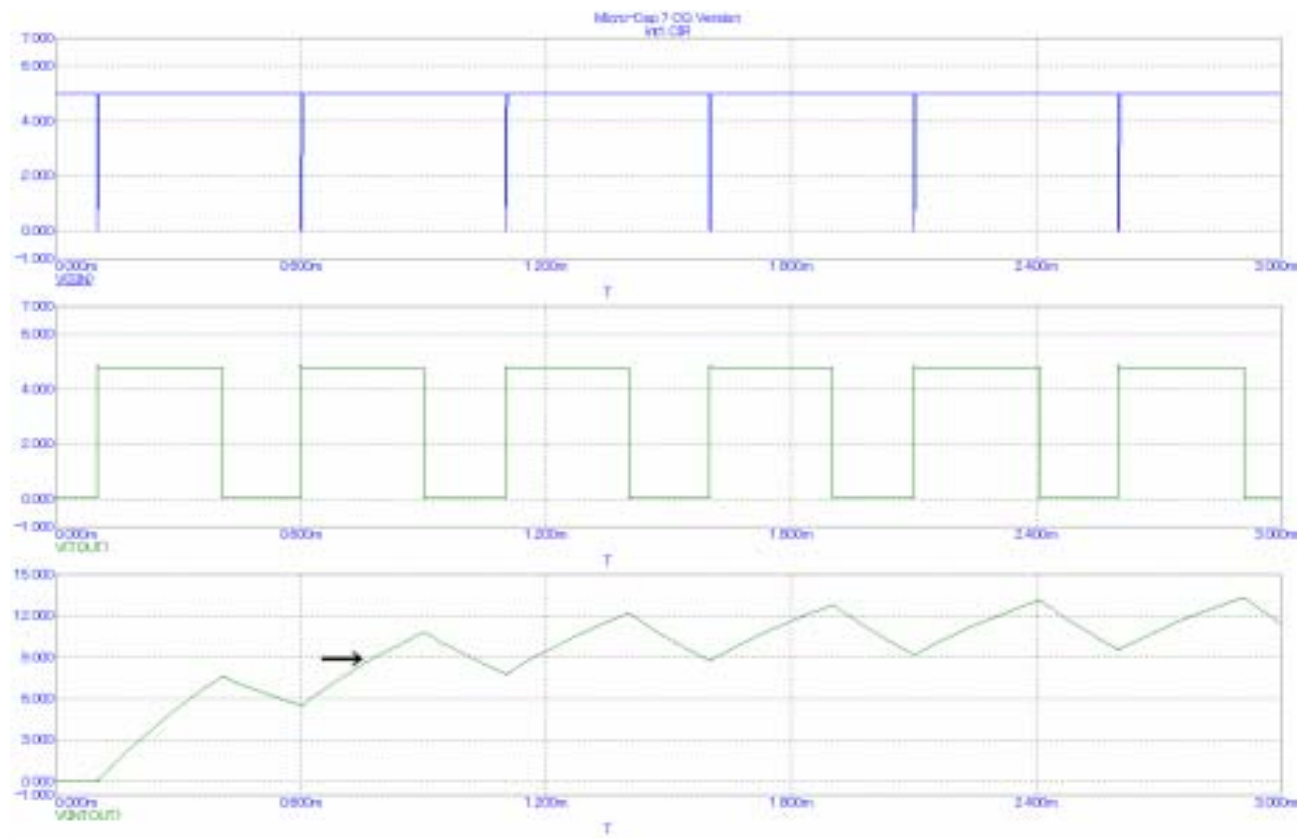


図 2.2.2-3-b  $D_p > D_{PT}$  の場合の電子回路シミュレーションの結果  
 波形は上段から 検出パルス、パルス幅拡大回路出力、積分回路出力に相当する。

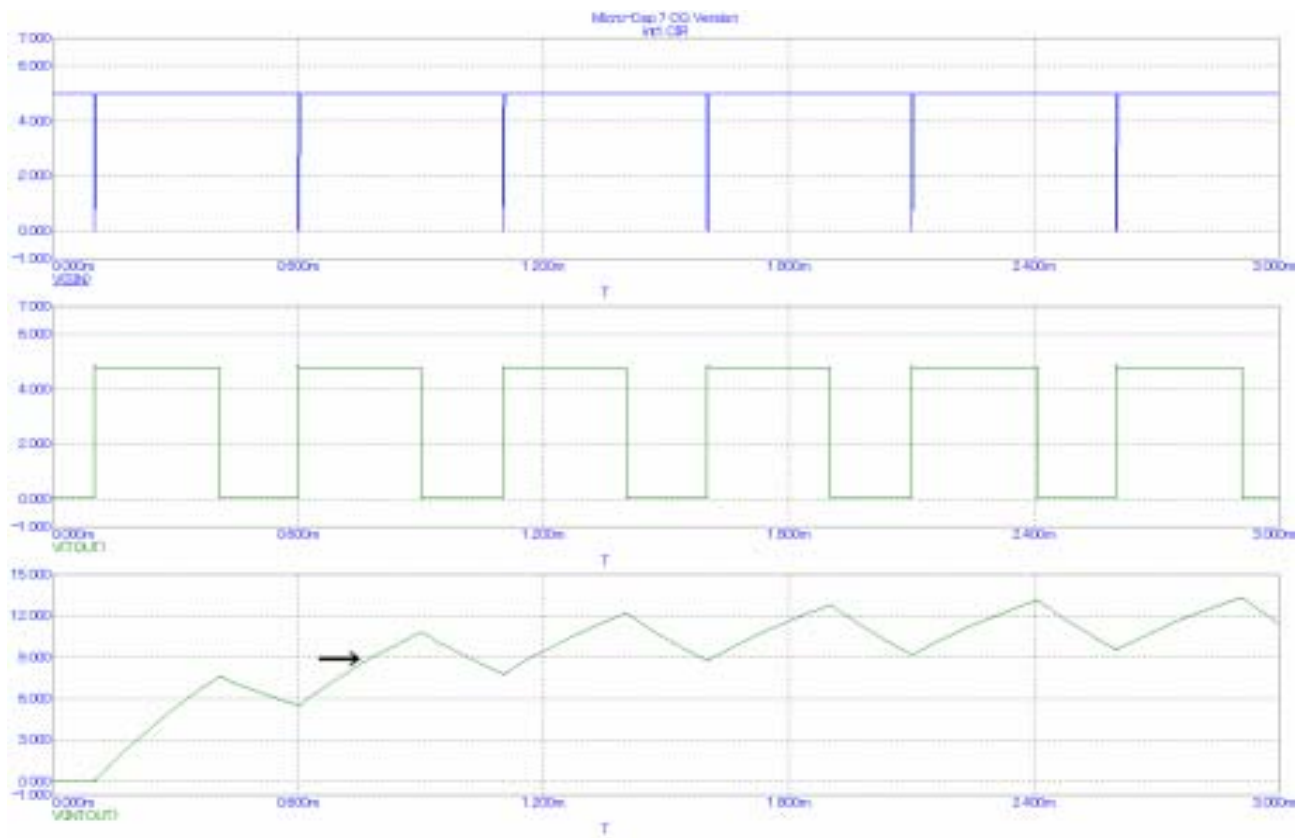


図 2.2.2-3-c  $D_p < D_{PT}$  の場合の電子回路シミュレーションの結果  
 波形は上段から 検出パルス、パルス幅拡大回路出力、積分回路出力に相当する。

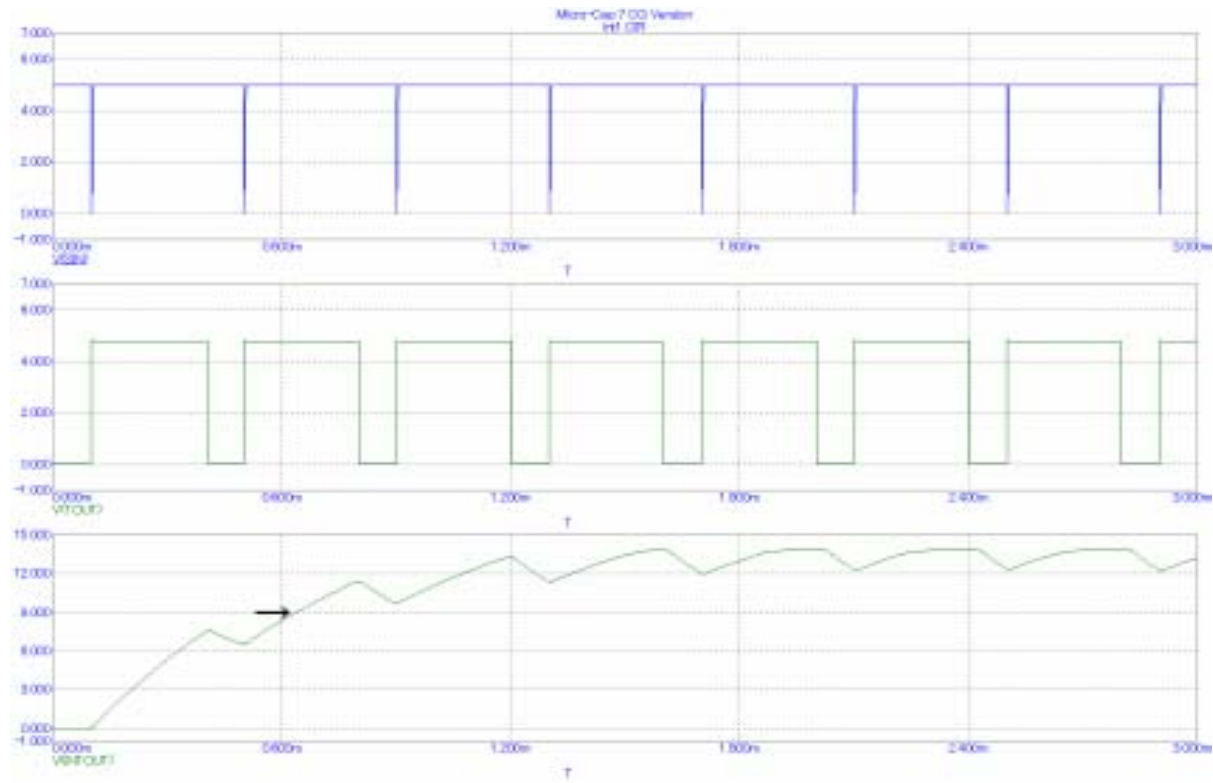


図 2.2.2-4  $D_{PT}=2.5kcp$  のパルス信号が入射した場合のシミュレーション

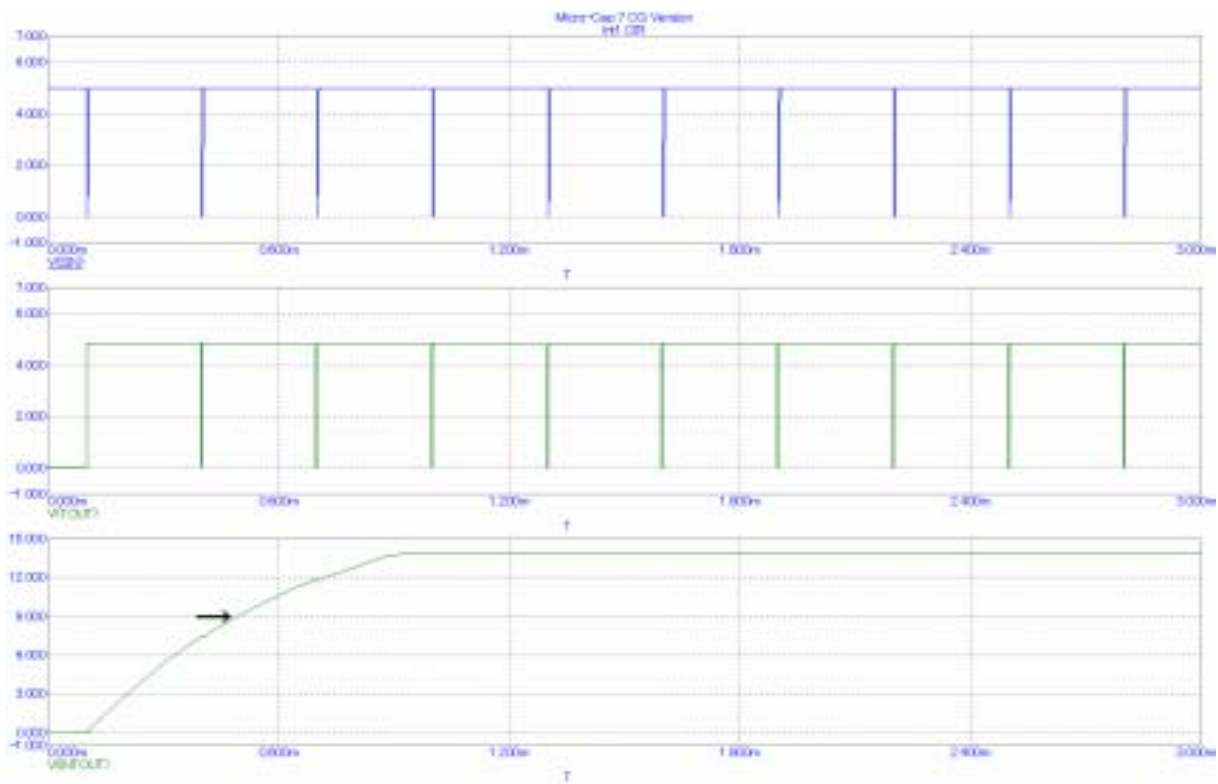


図 2.2.2-5  $D_{PT}=3.3kcp$  のパルス信号が入射した場合のシミュレーション



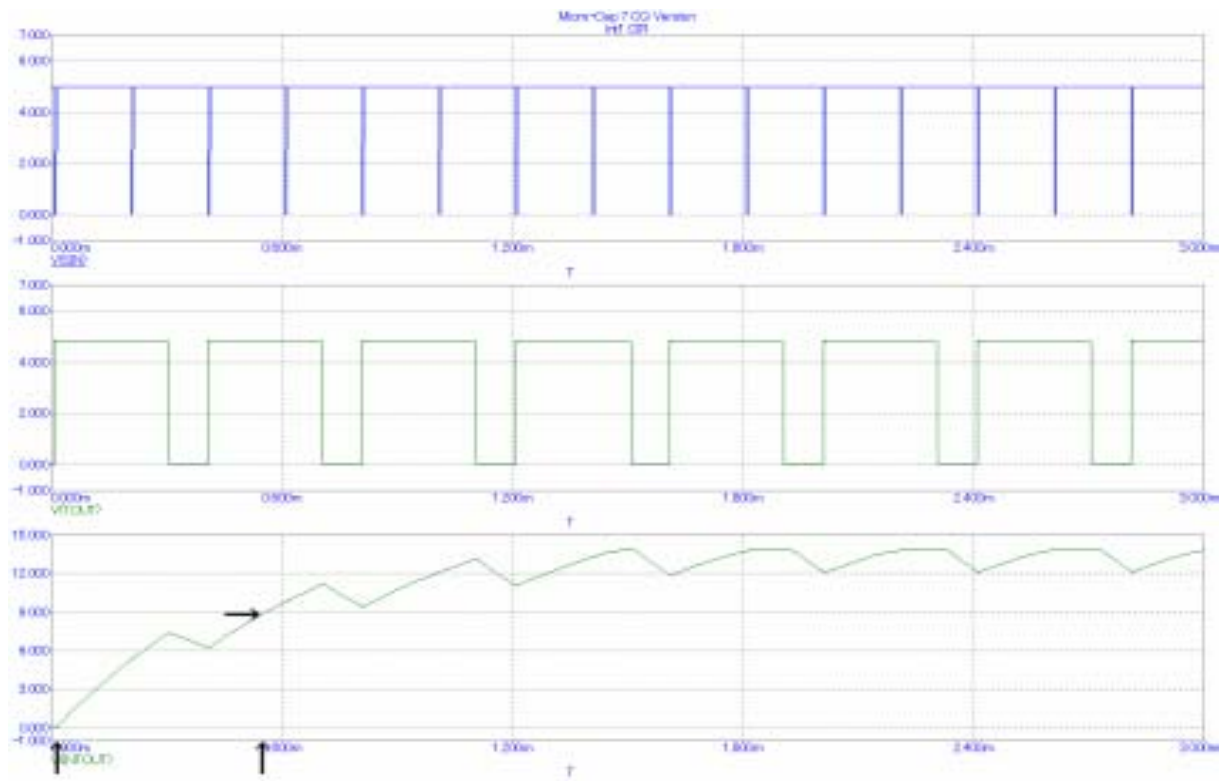


図 2.2.2-6  $D_{PT}=5.0kcp$  のパルス信号が入射した場合のシミュレーション

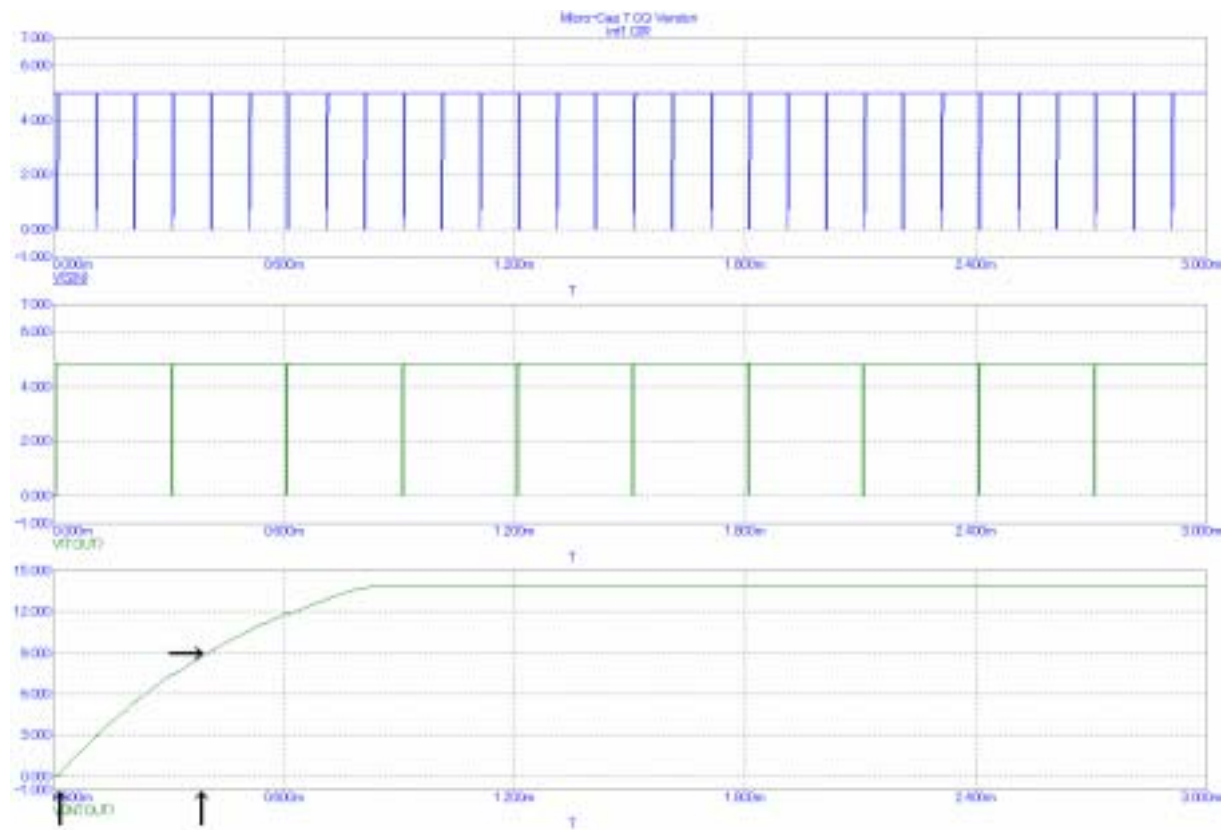


図 2.2.2-7  $D_{PT}=10kcp$  のパルス信号が入射した場合のシミュレーション

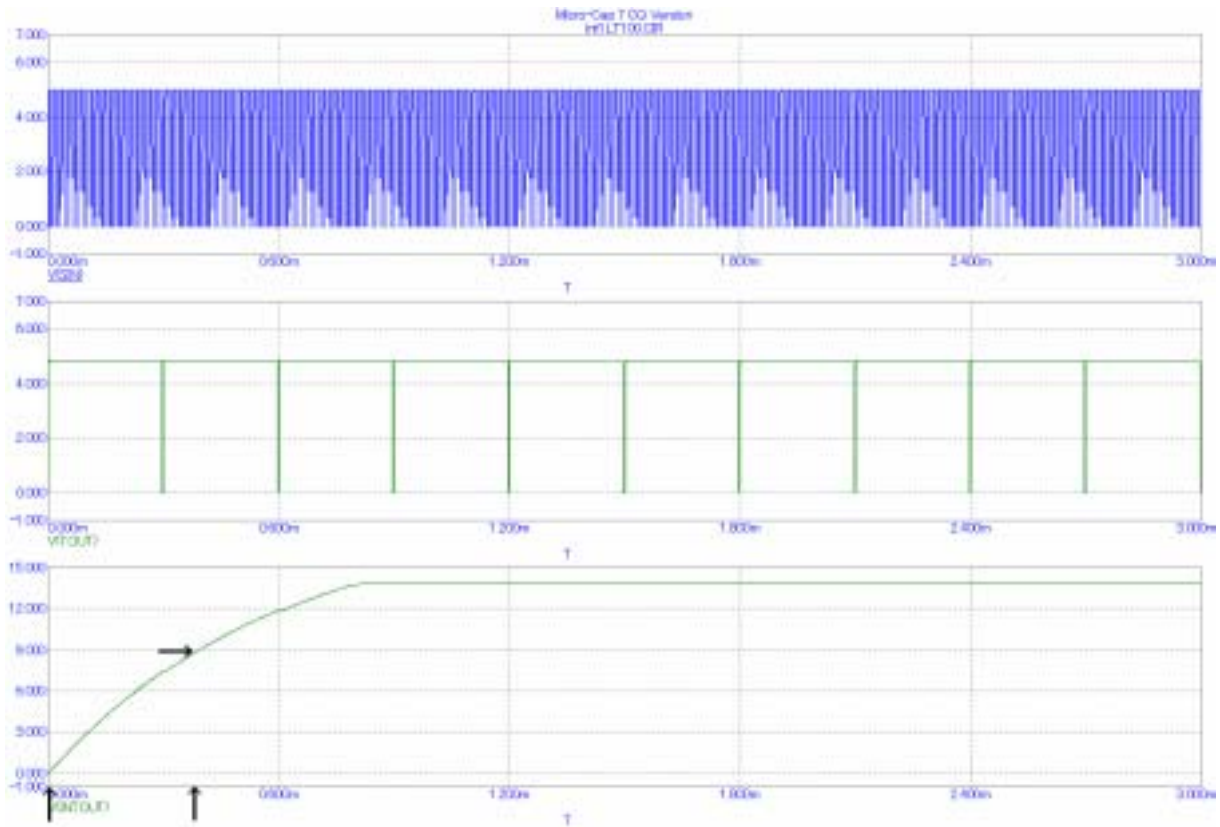


図 2.2.2-8  $D_{PT}=100\text{kcp}$  のパルス信号が入射した場合のシミュレーション

### 2.2.3 大容量データ記録システムの検討

図 2.2.1-1 に示してある測定システムの性能を制限するのは、データ(転送)バスの転送速度  $R_B$  である。記録装置の記録速度  $R_R$  も重要だが、データバスの仕様はバスに接続されるデバイス(ハードディスク(HD)、メモリ等)の入出力仕様に合わせられているので、データバスか記録装置のどちらか片方について選択すればよく、ここではデータバスを中心にして検討する(一般には  $R_B \square R_R$  であるが、 $R_B = R_R$  とする)。現在、よく用いられているデータ転送速度の代表値と用途を表 2.2.3-1 に示す。デジタルデータの分解能を 8 ビット( $W_D = 8\text{bit}$ )とすると、 $f_s = R_B = R_R$  となるので、サンプル速度は記憶装置の記録速度と同等かそれ以下となる。逆にいえば、必要とされるサンプル速度のためには、それに見合う記録速度を持つ記録装置を用意することになる。記録装置の種類と記憶容量面から見た使用例について表 2.2.3-2 に示す。

大容量の記録装置として HD が選択すると、サンプル速度に対して記録装置の速度が遅く、その記録速度により一度に取込むデータ量が制限されるというのが現状である。そこで、A/D コンバータと速度が遅い記録装置を組合わせた基本システムを複数用意し、それらを多重化したシステム構成とすることにより、所望の性能を達成する方法を検討する。図 2.2.3-1 に 2 種類の多重化システムの構成を示す。図 2.2.3-1 -a は、基本システムをそのまま  $k$  台用意して多重化した場合であり、1 台の基本システムのほぼ  $k$  倍の処理能力を持つ。この多重化システムの動作について図 2.2.3-2 に示す。ここでは、まず実際の A/D に要する時間幅  $t_1$  と「転送・記録」に必要な時間幅  $t_2$  との比から多重化度  $k(\sim t_2/ t_1)$  が決まる。実行は、1 台の装置(#1)にて「A/D」を実行した後、「転送・記録」を行なう(BL 1)ことから始まる。引き続き以降の装置(#2 ~ #k)が次々と動作しデータを取りこむ(BL 2 ~ BL k)。より長時間はこのサイクルを繰り返す(BL  $k+1$  ~)。

次に、図 2.2.3-1 -b は、基本システムのうち十分に高速に動作する部分は共通とし、低速部分のみ  $k$  台用意して構成したものであり、その動作は、多重化部分については図 2.2.3-2 に示した動作と同様である。ただし、図 2.2.3-1-a のシステムは既存のシステムをほぼそのまま用いて多重化する場合に適していて、図 2.2.3-1 -b のシステムは新たに設計して開発する場合に有利な方法であると言える。

### 2.2.3-1 デジタルオシロスコープの利用

デジタルオシロスコープについては、サンプル速度が数 GHz のものが市販されており、十分な A/D 性能を持つ。ただし、1 回の取込みサンプル点は 8 ~ 32MB 程度であること、従来は取込んだデータを外部に取り出して利用するには、転送速度の上限が比較的低速のバス(GPIB、イーサネット等)に限られていたため、利用が難しかった。しかし、最近では Windows PC と同等のアーキテクチャを持つデジタルオシロスコープが市販されるに至り、大容量のデータを高速にオシロスコープ内に蓄積できることになり、利用可能性が高くなってきた。

その一例として、TDS5000B(Tektronics) の仕様を表 2.2.3-3 に示す。サンプル速度を 1250MHz とすれば 1 度に最大  $t_1 = 16\text{ms}$  分のデジタルデータが獲得できる。これに対して、デジタルオシロスコープ内部でのデータの転送(表示)、および HD への保存には  $t_2 = 1 \sim 2$  秒を要するため、記録速度としては約 1/100 の速度である。したがって、多重化度( $\sim t_1/t_2$ )を 100 程度にすべく、デジタルオシロスコープを 100 台程度用いて構成することになる。

### 2.2.3-2 PXI バス + 高速 A/D モジュールの利用

デジタルオシロスコープは、汎用計測装置のため、本システムのような用途として最適化することはできず、実際のところは、実現可能性に乏しい。これに対して、個々の構成はほぼ同じながら、高速な計測バスを中心にして、モジュールを組み合わせて構築する場合は、内部仕様を可能な限り最適化できるため、全体の性能は格段に向上する。ここで、その例として、DP140(Acqiris)の仕様を表 2.2.3-4 に示す。サンプル速度を 1GHz とすれば 1 度に 8ms 分のデジタルデータが獲得できる。これに対して、モジュールから外部へのデータの転送は、 $8\text{M}/133\text{M}=60\text{ms}$  を要するため、約 1/8 の速度である。したがって、多重化度を 8 程度にすべく、A/D および記録装置を 8 台程度用意して構成すればよい。

### 2.2.3-3 データ圧縮機能付き取込みシステム

いずれの方法を用いても保存するデータ量は膨大になり、システムの性能は、記録装置の容量と記録速度で制約される。極限的にはリアルタイムでパルス検出処理をすることが考えられるが、今のところ高速データプロセッサを用いても 1 パルスに対して  $20\mu$  秒程度は必要と考えられ、50kcps 程度が最大性能と考えられ

る。取得すべきデータの性質は図 2.2.2-3 (a)に示すように時間的に比較的疎な幅の狭いパルスである。その上、バースト状の高線量放射線は、発生初期段階で強度が強く時間的に密な中性子は検出系に入射するが、時間の経過と共に強度が弱くなり入射するパルスの時間間隔は徐々に粗になると考えられる。このような状況では、リアルタイムでデータを圧縮、すなわち不要なデータを逐次捨てることにより、記憶装置に起因する制約から逃れることができる。たとえば、約 50ns の幅(5 サンプル点)のパルスに対して、最大 2M サイクルまで計測するものとすれば、平均 500ns(50 サンプル点)に 1 つのパルスであるため、 $50 - 5 = 45$  点は無信号期間でほぼゼロのはずである。したがって、それらのデータは直ちに捨てることが可能であり、その結果、約  $5/50 = 10\%$  の量までデータは圧縮できることになる。

図 2.2.2-3 b にデータ圧縮部を加えた取込み装置を示す。高速で動作可能なデータプロセッサの利用には開発要素が存在するが、圧縮アルゴリズムは比較的単純である。また、記憶装置費用が節約でき、後でパルス検出処理をする場合の読み込み速度も向上するなど、付加的効能も期待できる。

#### 2.2.4 今後の進展

大強度バースト状放射線測定システムの構成と動作の概略について検討した。昨今のエレクトロニクス技術の進展により、高速の A/D、高速半導体メモリー、大容量 HD が利用できるようになってきたため、本測定システムは十分に現実可能である。本測定システムの基本性能は、PC のようなデジタルシステムのデータの処理速度や記録速度、HD の記録容量等の今後の高性能化に依存すると言える。ところで、PC を構成する電子デバイスの高性能化について確実視されているのは、メインメモリの高速化と大容量化である。現在、PC でよく使われている DDR SDRAM と呼ばれる DRAM のデータの読み書き速度は、1 ビット分について 266 ~ 400Mbps(メガビット/s)であり、本測定システムで必要とする 1GB/s に多重化手法を用いても対応させるのは多く困難である。しかし、今後開発が予定されている RDRAM (図 2.2.4) に示すように 1Gbps のメモリーが使用可能となれば、A/D コンバータに現在は 16MB 程度に制限されているメモリーの代わりに 1G バイト以上の大容量のメモリーを直接接続することが可能となり、数秒から数分は連続的に、あるいは断続的(追加的)にデータ取り込みが可能となる。

## 参考文献

- 1) Y. Ito, K. Kume, and N. Otani, JNC TJ4440 2003-006 (2004).
- 2) K. Yamaguti, K. Yatsuno, and T. Kusuda, 富士時報、第 48 卷、第 6 号、(1975) 28.

表 2.2.3-1 データ転送バス<sup>1</sup>の種類と性能

種類	転送速度 MByte/s	接続デバイス例 (記憶装置)	搭載装置例
専用超高速バス	1000	超高速 RAM	A/D ボード、デジタルオシロ
高速 PCI バス	133	高速 DRAM	PXI 仕様計測装置
標準 PCI バス	100	DRAM	パソコン PC、C-PCI 計測装置
U - SCSI バス <sup>2</sup>	60	ハードディスク HD	大容量記憶装置

1 ここでは USB やイーサネット等のシリアルバスは除外し、同時に複数のビットするパラレルバスのみを挙げた。

2 HD 用バスはより高速の U - ATA 対応の仕様もあるが、HD そのものが機械的な動作部分を持つ限りアクセス(シーク)タイムがミリ秒に達する場合もあるため、転送速度そのものの性能が発揮されるわけではないことに注意が必要。



表 2.2.3-2 記録装置の種類<sup>1</sup>とコスト

記録(記憶)装置	サンプル 速度例(MB/s)	コスト例 (円/1MB)	1000 秒程度を記憶するための コスト(円) = $\times \times 10^3$
超高速 RAM	1000	$\sim 2 \times 10^4$	$2 \times 10^{10}$
高速 DRAM	133	$\sim 200$	$2.6 \times 10^7$
DRAM	100	$\sim 50$	$5 \times 10^6$
HD	60	$\sim 0.4$	$2.4 \times 10^4$

1 フラッシュメモリー(電源を切っても内容が消えないメモリー)は書き込み速度が 4~6MB/s と遅く省略した。

表 2.2.3-3 デジタルオシロスコープ TDS5052 の仕様

サンプル速度	5GS/s
アナログ帯域	500MHz
取込みデータ量	16MB
サイクルタイム	1 ~ 2 s
記憶装置	ハードディスク ~40MB

表 2.2.3-4 高速デジタイザーモジュール DC140 の仕様

サンプル速度	1 GS/s
アナログ帯域	1 GHz
取込みデータ量	16MB
サイクルタイム	推定 0.13 s
記憶装置	外部装置

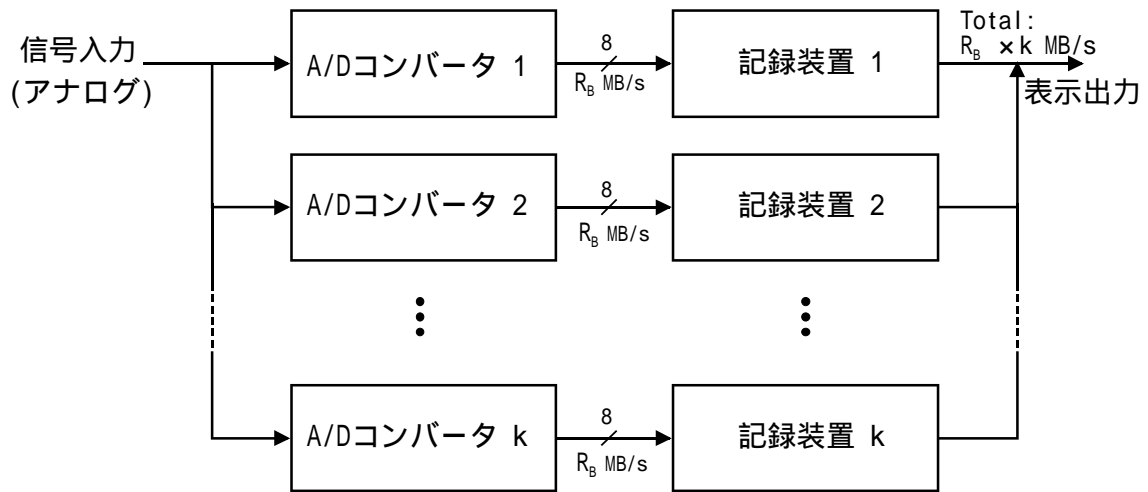


図 2.2.3-1-a 多重化システムの構成例：基本システム  $\times k$  台の場合

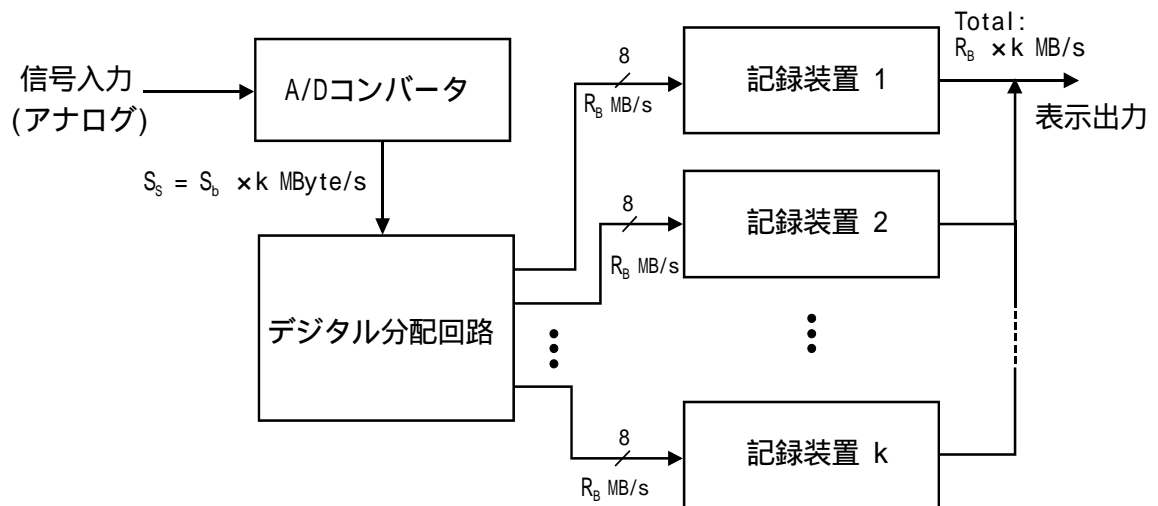


図 2.2.3-1-b 多重化システムの構成例：一部共通型とする場合

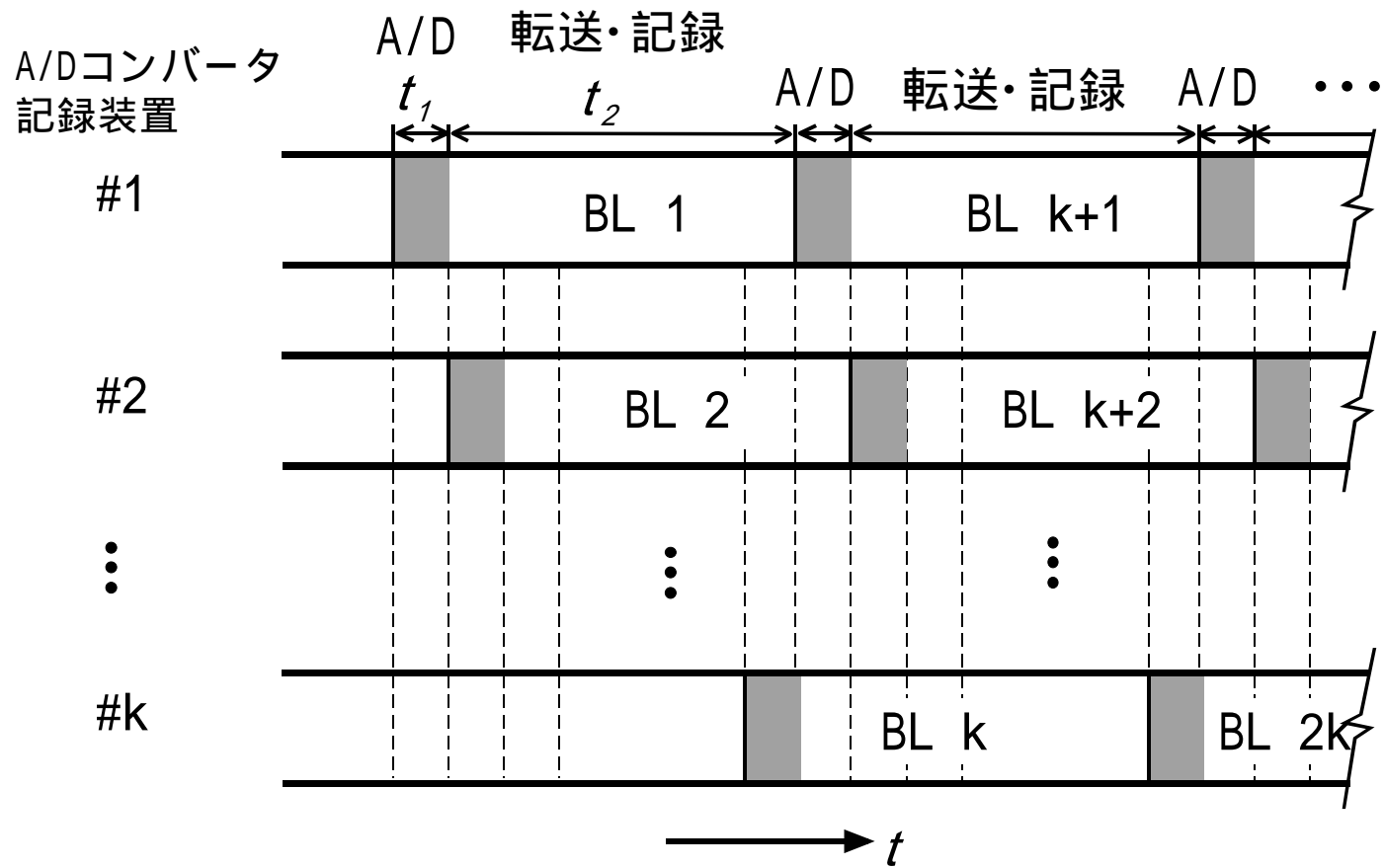


図 2.2.3-2 多重化システムの動作

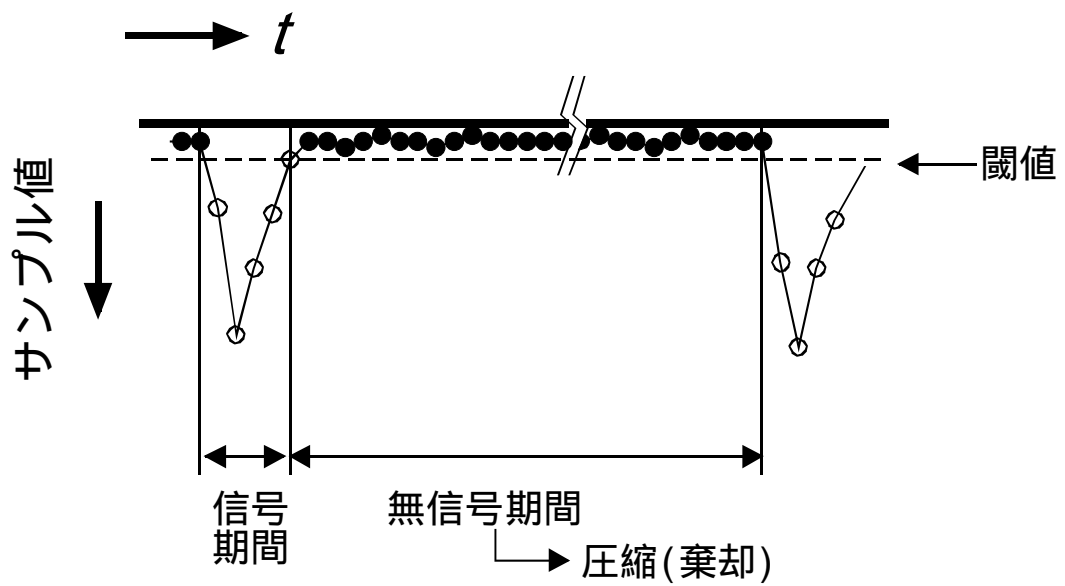


図 2.2.3-3-a データ圧縮機能を持つ測定システム; パルス波形データの圧縮原理

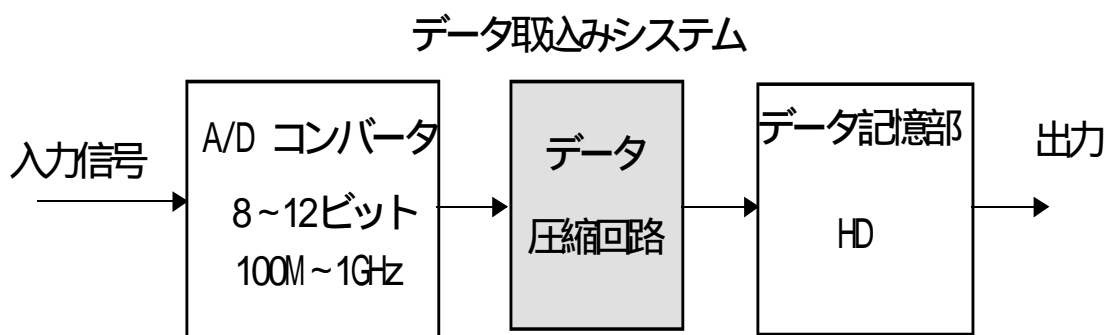


図 2.2.3-3-b データ圧縮機能を持つ測定システム:構成例

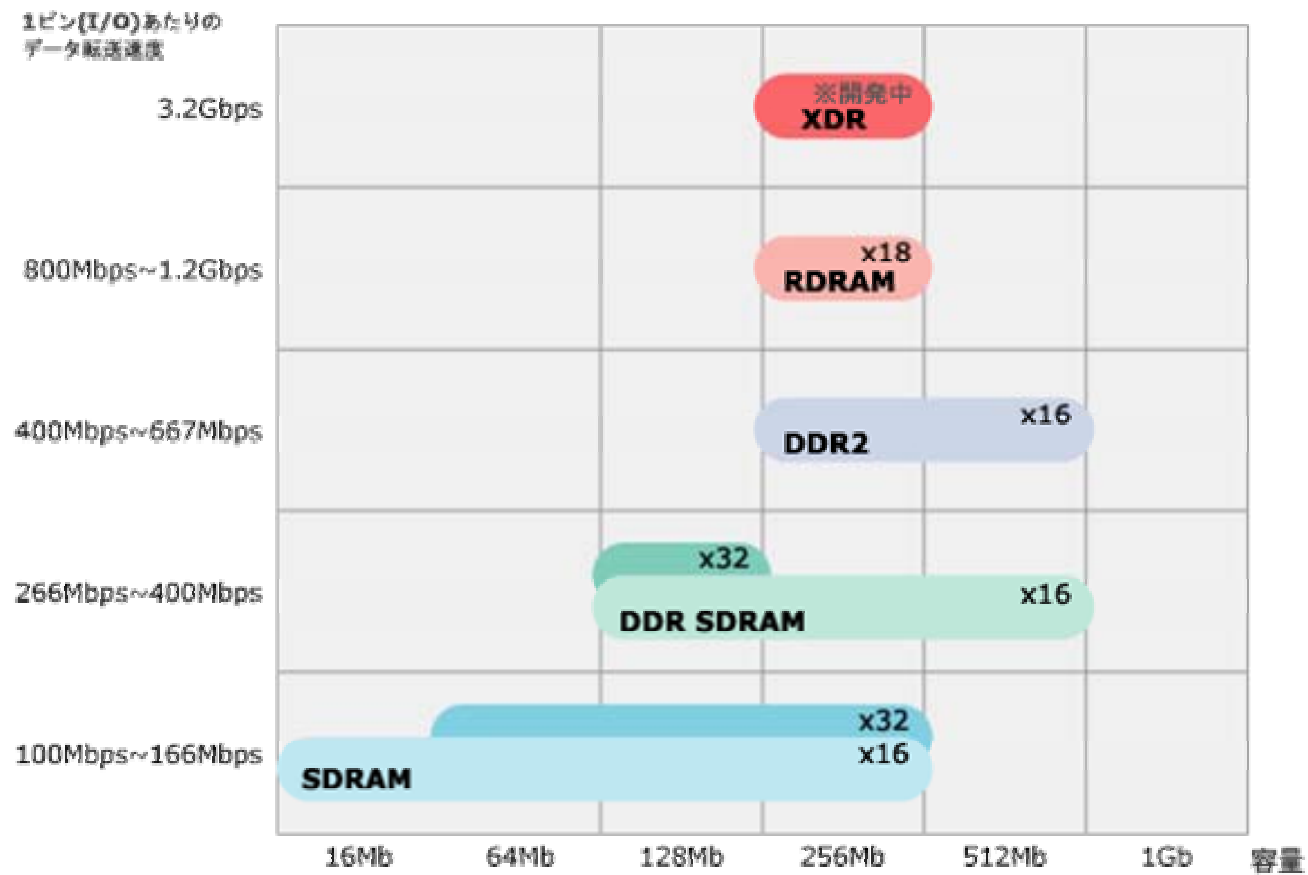


図 2.2-15 PC 用メモリの種類と開発予定例

(エルピーダメモリ株式会社のホームページ <http://www.h-elpida.com/dc/bps.html>から)

## 第3章 高線量中性子の計測器応答特性の評価実験

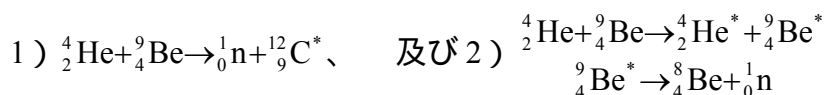
### 3.1 加速器ビームを用いた実験配置と放射線計測システム

福井県若狭湾エネルギー研究センターに設置されている多目的加速器システム W-MAST (Wakasa-wan Multi-purpose Accelerator with Synchrotron and Tandem)を用いて、高線量中性子に対する計測器応答特性の評価実験を実施した。W-MAST 装置全体の概念図を図 3.1-1 に示す。本加速器システムは、2 台の負イオン源、タンデム加速器及びシンクロトロン加速器から構成されており、現在使用可能なイオン種はプロトン、ヘリウムイオン及び炭素イオンである。タンデム加速器のターミナル電圧  $V_T$  の最大値は 10MeV である。従ってタンデム加速器により、プロトンは最大 10MeV、2 価のヘリウムイオン ( $\alpha$  粒子) は、最大 15MeV、6 価の炭素イオンは 35MeV のエネルギーに加速される。加速器イオンビームを用いた実験研究のために 4 つの照射室が設置されている。照射室 1 及び照射室 2 は、タンデム加速器ビームを用いた実験室である。照射室 1 では、 $V_T \leq 1.7MV$  で加速されたイオンビームを用いた RBS (Rutherford-backscattering analysis), PIXE (Particle induced X-ray emission), ERDA (Elastic recoil detection analysis) 等のイオンビーム材料分析に使用される。照射室 2 では、 $V_T \leq 5MV$  で加速されたイオンビームによる実験が行われる。本システムのタンデム加速器は、シンクロトロン加速器への入射器としても使用される。タンデム加速器より入射されたプロトンは、シンクロトロン加速器で最大エネルギー 200MeV まで加速され、照射室 3 又は照射室 4 に入射される。照射室 3 は、陽子線がん治療専用の医療研究に使用される。照射室 4 は、高エネルギーイオンビームを用いた品種改良の為に細胞照射、材料の照射損傷評価実験、放射線検出器開発等の実験研究に使用される。尚、シンクロトロン加速器におけるヘリウム及び炭素イオンの最大加速エネルギーは 55MeV/n である。

放射線計測器応答特性の評価実験は、照射室 2 に設置されているイオン注入コースにおいて実施した。図 3.1-2 にイオン注入コース全体の装置概念図を示す。照射室 2 に導入されたイオンビームは、偏向磁界により僅な角度だけ軌道を修正され、イオン注入コースビームラインの第 1 アパーチャスリット(直径 1mm, 直径 3mm のアパーチャー, 又は全開)及び第 2 アパーチャスリット(直径 1mm, 直

径 3mm, 5mm×5mm 幅のアパーチャー、又は全開) を通過した後、照射用真空容器の中央部にセットされたサンプル(ターゲット) に照射される。第 1、第 2 アパーチャースリット間は 135cm である。本ビームコースには左右・上下にビームを走査するための走査電磁石が設置されており、サンプルへの面内一様照射の際に使用される。イオンビームの電流値は、走査電磁石の下流で第 2 アパーチャースリットの上流の位置に設置されている Faraday Cup (通称、FC232)、及びビームライン終端に設置されている Faraday Cup (通称、FC233) により測定される。ターゲットの厚さが十分薄く、入射イオンビームがターゲットを通過する場合は、イオンビーム照射時の電流量はビームライン終端の FC233 で計測される。

大強度中性子に対する検出器応答評価実験には、ヘリウムがベリリウムを衝撃する時に放射される中性子を用いた。薄いベリリウム膜への高エネルギーヘリウム照射による中性子生成では、



の反応が重要である。E≤10MeV の He エネルギー領域でのこれらの反応微分断面積は、多くの研究者により報告されている。

H14 年度レムカウンターの応答特性評価実験において、レムカウンター、Au 箔及び In 箔放射化法、及び TLD バッチによる中性子線量評価を実施した<sup>1)</sup>。Be ターゲットより前方 45° に ~1m 離れた位置での 15MeV He の Be 衝撃による中性子場では、速中性子、中速中性子、熱中性子の線量比は、1 : 3.5×10<sup>-3</sup> : 2×10<sup>-3</sup> であった。従って、薄い Be ターゲットへの He ビーム照射の際の中性子場は速中性子を測定対象とすることになる。

本研究においては、He ビームが Be ターゲットを衝撃するとき放射される高線量中性子計測に、直流電流モード測定法を用いた。図 3.1-3 に照射用真空容器の断面図を示す。Be ターゲットは、内直径が 306.4mm の円筒状容器の中央部にセットした。ターゲットは 3 軸方向及び 1 軸の回りに回転可能なゴニオメータに設置されている。図 3.1-4 に本研究で用いた電流モードでの計測の実験配置図を示す。イオンビーム進行方向に対し 45° の角度の 80cm 離れた位置に液体シンチレータ (NE213) を設置した。放射線検出系は、液体シンチレータ、光電子増倍管、高速プリアンプからなる。用いた NE213 の大きさは、直径 2 インチ、長さ 2 イン



チである。光電子増倍管は浜松ホトニクス製 R329-02 を用いた。又、プリアンプには周波数帯域が 50kHz ~ 1.5GHz(-3dB)の C5594(浜松ホトニクス製)を用い、光電子増倍管の出力へ直結するようにセットした。図 3.1-5 に中性子検出系を示す。NE213 はガンマ線に対しても感度をもつため、前面及び側面を鉛ブロックでシールドした。前面の鉛ブロックは、中性子と共にターゲット方向から検出素子に入射するガンマ線の影響を調査するために、容易に厚さを 0cm, 5cm, 10cm, 15cm と変えることが可能なように設置されている。

Be ターゲットへの He 照射により生成される放射場の評価、及びシンチレータ前面にガンマ線遮蔽用に設置された鉛が中性子のエネルギースペクトルに及ぼす影響の評価のために、パルスモード計測による n- $\gamma$  分別法を用いた実験も実施した。この実験に於いては、信号処理時間のためのデッドタイムを考慮して、入射する放射線の個数を 1 ~ 3keps 以下とするために、Be ターゲットより十分はなれた位置に検出器を設置した。n- $\gamma$  分別実験の配置図を図 3.1-6 に示す。実験室内の空間的な制約から、検出器をビーム入射方向に対して $\sim 78^\circ$ 、ターゲットより $\sim 3m78cm$  離れた位置に設置した。使用した検出系の放射線検出部は、直径 2 インチ、長さ 2 インチの液体シンチレータ NE213,光電子増倍管 ( R329-02、浜松ホトニクス社 ) である。

厚さが  $5\mu m$  及び 0.2mm の Be ターゲットに MeV He が衝撃するとき放射される中性子を用いて、直流電流モードの放射線検出器の特性評価実験を実施した。 $5\mu m$  厚の Be より放出される中性子数は、0.2mm 厚の Be をした場合に比べて 1 桁以上少ない。パルスモードによる n- $\gamma$  分別実験は、直流電流モードの放射線計測実験と同時に進行する為、検出器に入射するカウントレートを考慮して、Be の厚さが  $5\mu m$  の場合のみ実施した。

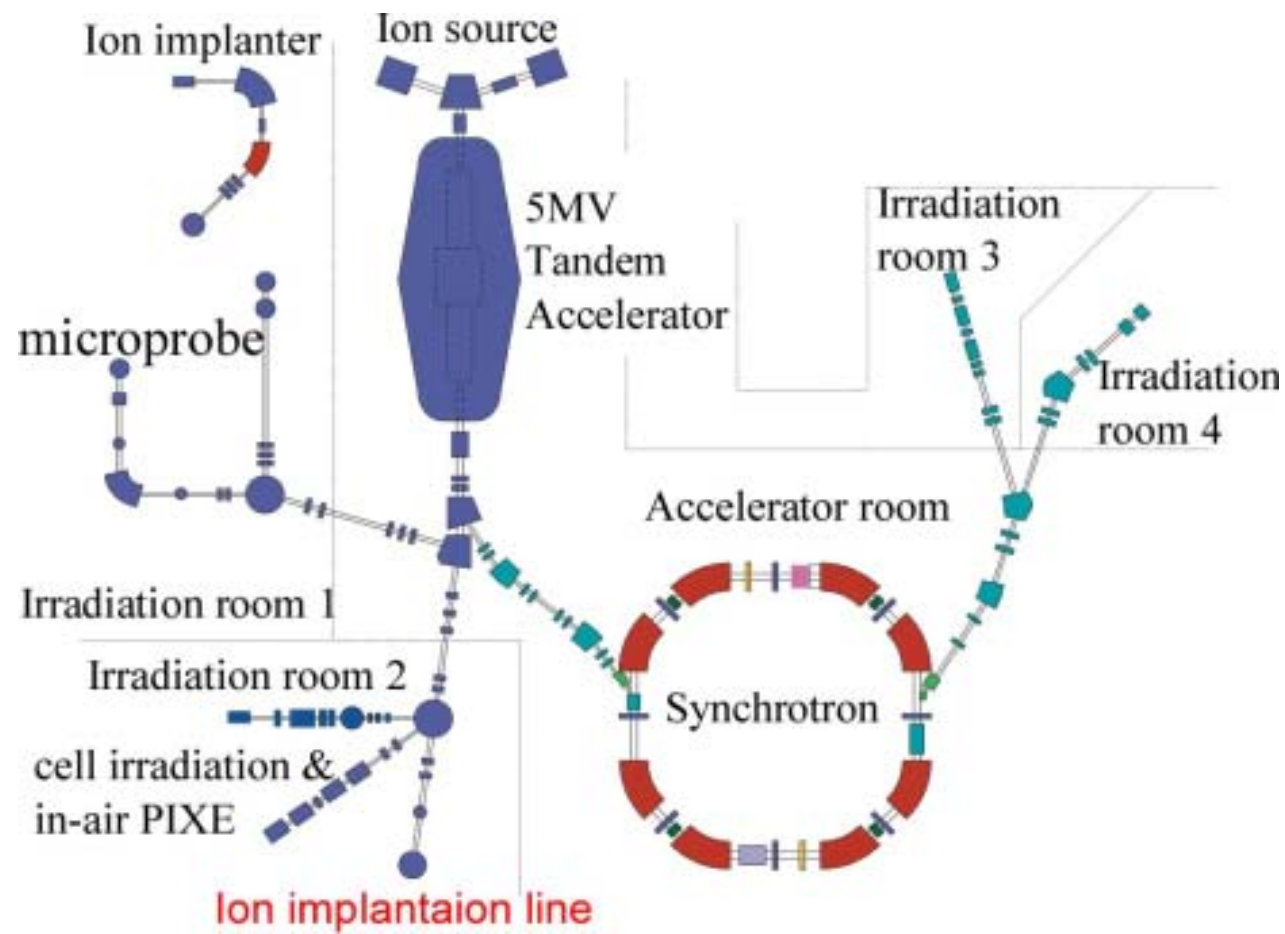


図 3.1-1 多目的加速器システム W-MAST 全体の装置概念図

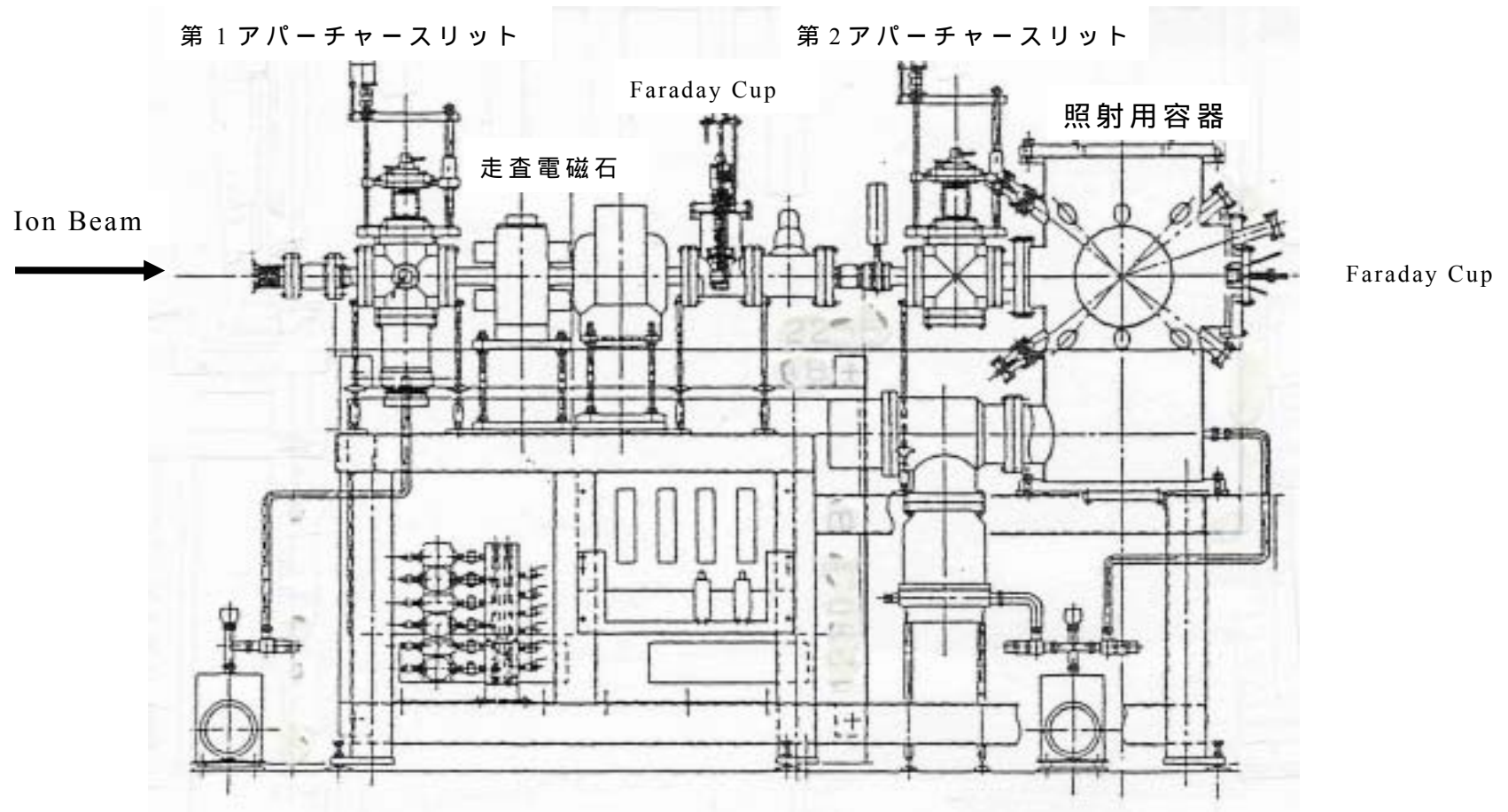


図 3.1-2 イオン注入コース全体の装置概念図

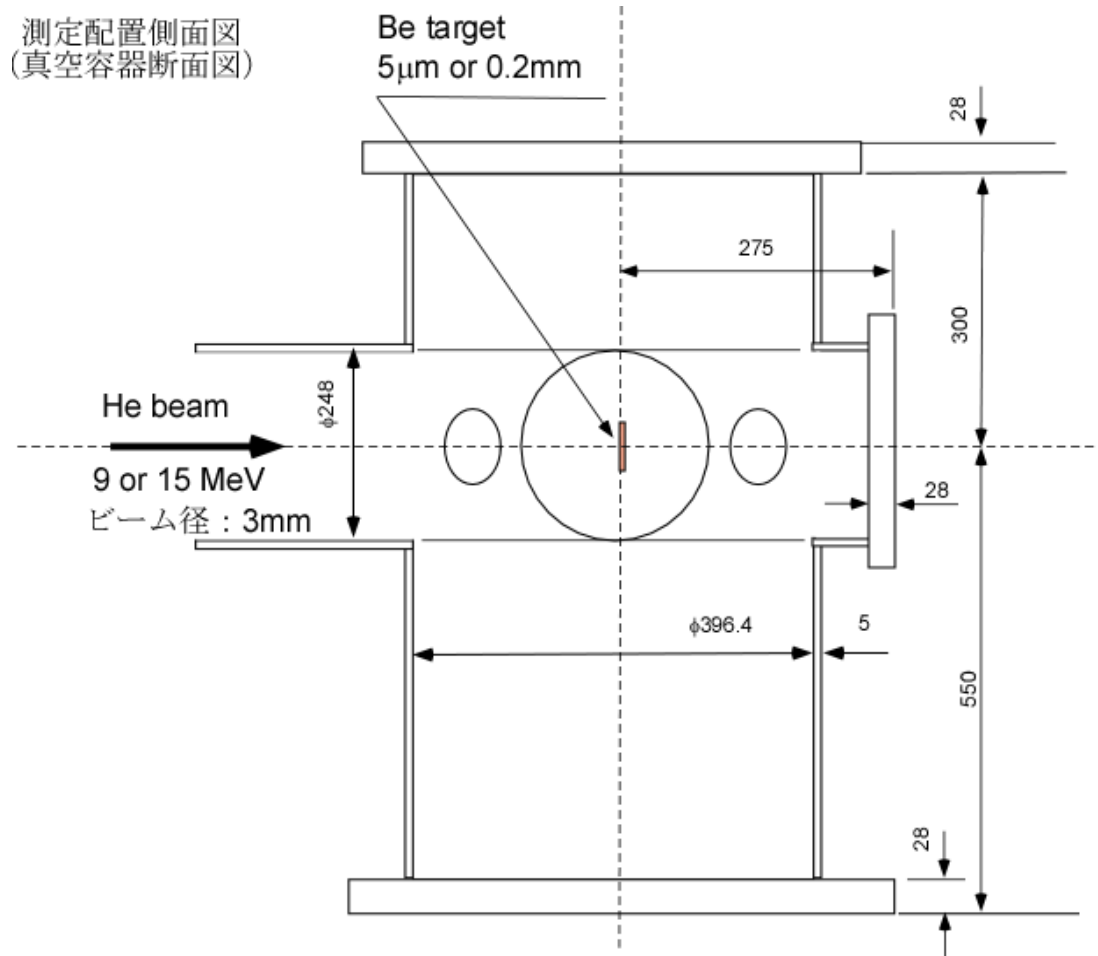


図 3.1-3 照射用真空容器の断面図

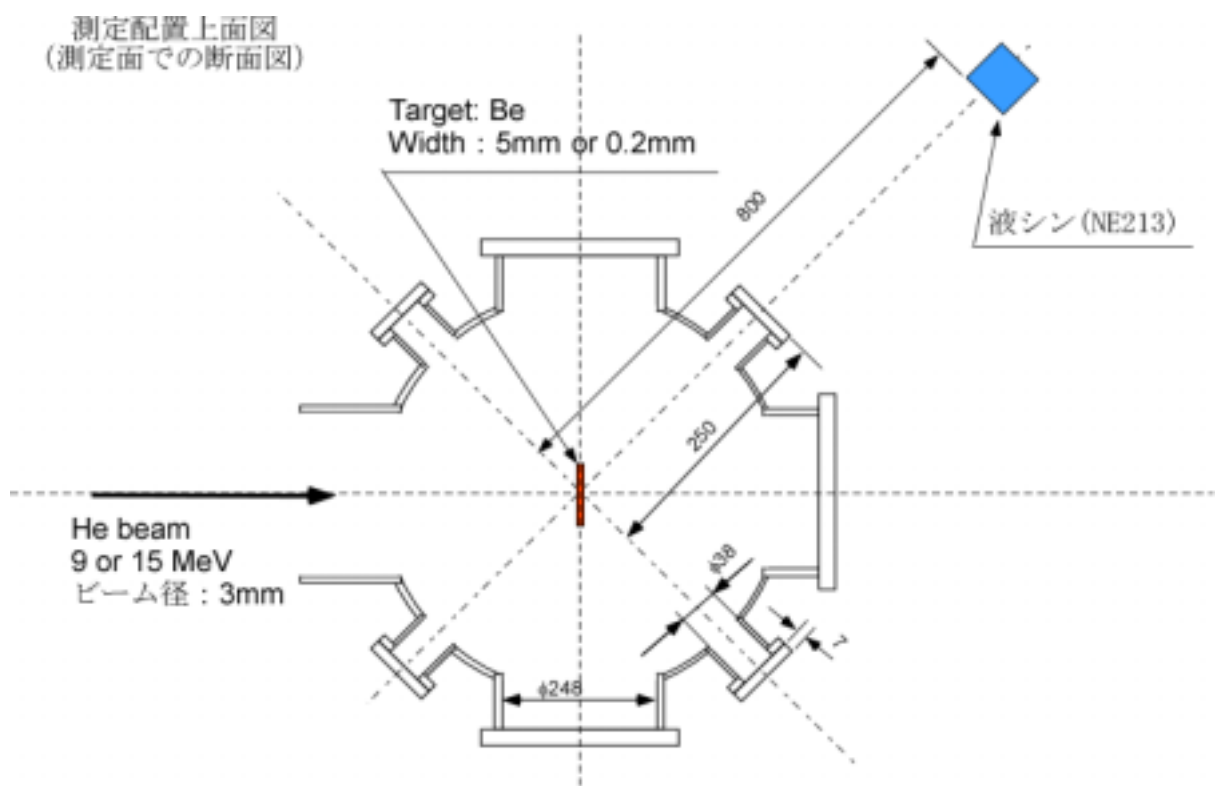


図 3.1-4 電流モード計測実験配置図



検出部

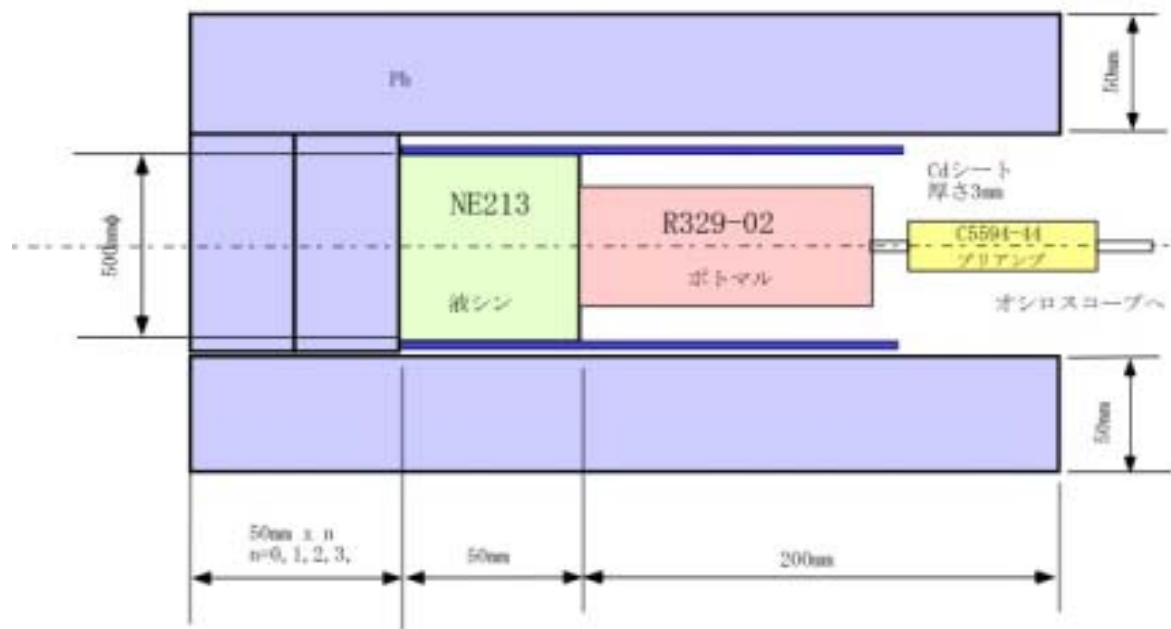


図 3.1-5 中性子検出系の概念図

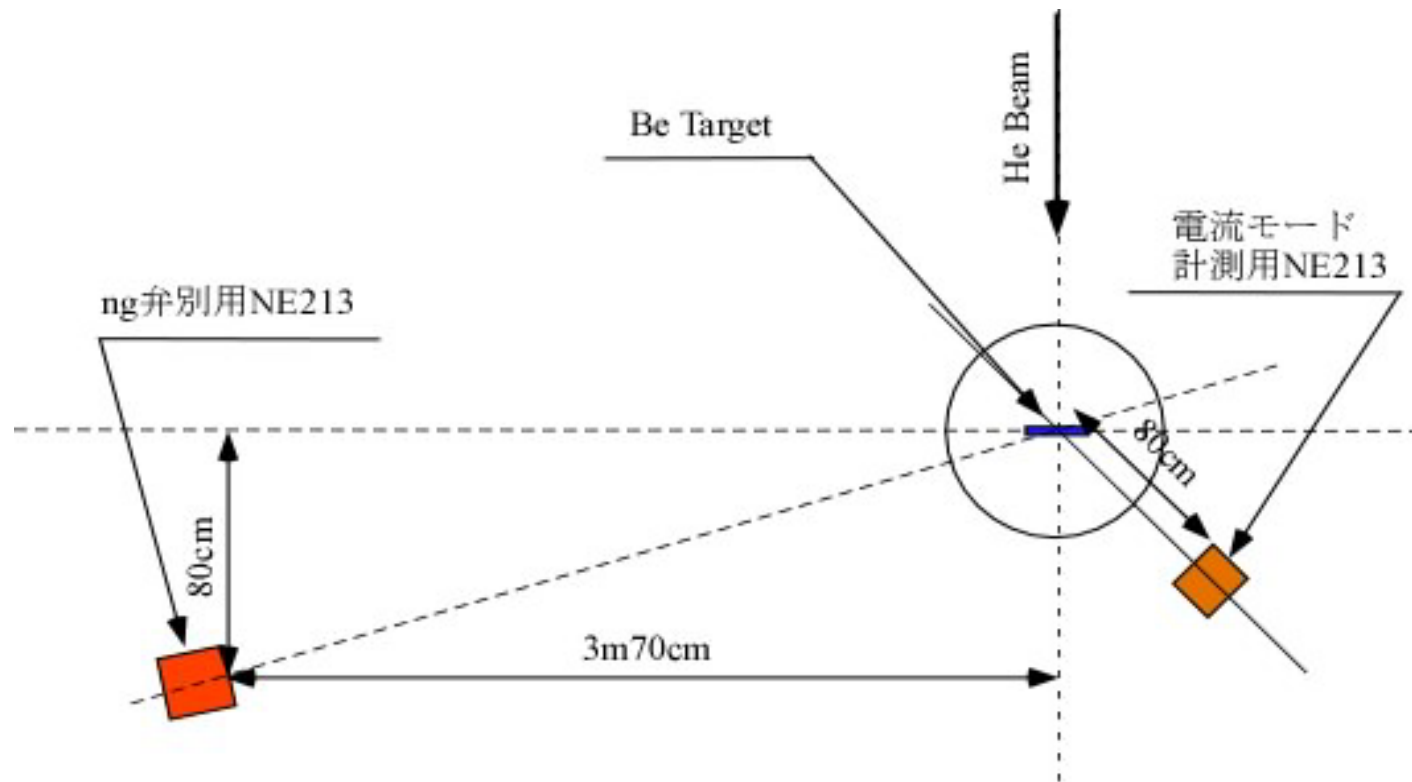


図 3.1-6  $n\gamma$  弁別実験時の検出素子(NE213)の配置図



## 3.2 薄い Be ターゲットを用いた計測器応答特性評価実験

### 3.2.1 15MeV He 照射 5 $\mu$ m Be 放出中性子計の電流モード計測

エネルギー $E_{\text{He}}$ が 15MeV の He ビームを厚さ 5 $\mu$ m の Be に照射した時に放射される放射線を、ターゲットより 80cm に設置した検出系のプリアンプ出力（出力インピーダンス、50 $\Omega$ ）を直接オシロスコープに入力し電圧信号を記録した。使用したオシロスコープは周波数帯域 500MHz, 最大サンプリングレート 5GS/s のデジタルオシロスコープ(TDS5052B, Tektronixs 製)である。液体シンチレータ NE213、光電子増倍管、高速プリアンプ、高速オシロスコープで構成される放射線測定系全体の周波数応答は極めて良好で、数 ns の変動に対しても十分追従する。

本実験を通して、イオン注入コース内の第 1 及び第 2 アパーチャスリットに直径 3mm のアパーチャーを使用した。Be ターゲット位置にアルミナの発光板を設置した形状測定により、He ビームの直径は $\sim$ 3mm であることを確認した。

15MeV He ビームは厚さ 5 $\mu$ m の Be ターゲット内で僅かにエネルギーを失う。Bethe の与えた非弾性散乱による高エネルギー粒子の材料内での阻止能を用いて、15MeV He の 5 $\mu$ m 厚 Be 内でのエネルギー減衰を評価すると、0.4MeV であった。5 $\mu$ m 厚の Be に入射した 15MeV He は、Be を貫通してターゲット下流の Faraday Cup (FC233) に入射する。Be ターゲットに入射するイオン電流は FC233 で測定した。

デジタルオシロスコープ TDS5052B によるデータの取得では、本実験研究を通して、分解能を 800ps、サンプリング時間を  $8 \times 10^{-10}$ s、記憶時間長を 3.2ms、記録個数を  $4 \times 10^6$  個とした。4M 個の数値データは、実験中はハードディスク内に保管し、実験終了後別の PC に移しデータ処理・解析等を行った。

5 $\mu$ m 厚のベリリウムへの 15MeV ヘリウム照射による検出器応答評価のための実験条件を、Data number 毎に表 3.2.1 にまとめる。入射ヘリウムビームの電流を一定とし、液体シンチレータ NE213 の前面の鉛 Pb を 0cm, 5cm, 10cm と変えた場合、観測された信号の 3.2ms 間の時間変化を図 3.2.1-1 (Pb\_0cm), 図 3.2.1-2 (Pb\_5cm), 図 3.2.1-3 (Pb\_10cm), 図 3.2.1-4 (Pb\_15cm) に示す。ここでは、光電子増倍管に印加電圧 HV は-1.2kV、プリアンプへの電圧  $V_{\text{Amp}}$  は 15V とした。同一実験条件に対し、3 つのデータを記録した。図では、3.2ms の出力信号を 10 分割し、

320 $\mu$ s 毎に示している。Pb\_0cm では、200~300kcps 程度の個数の放射線が観測されている。

本研究を通して、3.2ms 間の各データに含まれるパルス信号のピーク値及び半値全幅を求め、ピーク値 $\times$ 半値全幅の値を 3.2ms 間にわたっての和を取った。放射線強度と類似な（又は放射線強度に比例する）物理量であるため、本研究ではパルス信号のピーク値 $\times$ 半値全幅をたし合せた値を放射線強度と呼ぶ。パルス波形の半値全幅は殆ど計測系で決まると考えられるので、上記の積分出力値は 3.2ms 間のパルスのピーク値の和とほぼ等しいと考えられる。

検出器に入射する放射線による放射線強度が検出器前面に設置した鉛ブロックによりどの様になるかを評価する為に、夫々のショットでのヘリウム電流値で規格した。規格化放射線強度の鉛厚に対する依存性を図 3.2.1-5 プロットする。10cm 厚の鉛で液シンの前面を覆う事により、He 電流値で規格したプリアンプ出力の積分値強度は 1/2 となる。

得られた出力信号を 1 個のパルス信号まで拡大してした波形を図 3.2.1-6 に示す。1 個の放射線（中性子又は高エネルギー光子）が検出器に入射して出力される電圧波形は、半値全幅は $\sim$ 16.4ns、立上り時間(10% $\rightarrow$ 90%)は $\sim$ 6.6ns、立下り時間(90% $\rightarrow$ 10%)は $\sim$ 17.7ns である。半値全幅程度のパルス信号まで分解可能であるので、本研究で使用した電流モード放射線検出系の最大カウントレートは $\sim$ 60Mcps であることが分かる。

液シンの前面の鉛厚を 15cm 厚と固定し、光電子増倍管の電圧を-1.3kV, -1.4kV と増加した場合の出力信号の時間変化を図 3.2.1-7 (HV=-1.3kV), 図 3.2.1-8 (HV=-1.4kV)に示す。図 3.2.1-9 に、放射線強度の光電子増倍管印加電圧に対する依存性を示す。HV $\leq$ -1.4kV で使用すれば、光電子増倍管での飽和現象は無視しうると考えられる。

液シンの前面の鉛厚を 15cm 厚、光電子増倍管印加電圧 HV を-1.4kV と固定し、He ビーム電流  $I_{He}$  を  $I_{He}=3.45\mu A$ ,  $2.05\mu A$ ,  $1.00\mu A$  と減少させた場合の出力信号の 3.2ms 間の時間変化を図 3.2.1-10 ( $3.45\mu A$ ), 図 3.2.1-11 ( $2.05\mu A$ ), 図 3.2.1-12( $1.00\mu A$ ) に示す。放射線強度の He 電流依存性を、図 3.2.1-13 に示す。 $1.00\mu A \leq I_{He} \leq 3.45\mu A$  の領域のでは、出力電圧が He 電流に線形的に依存している事が分かる。

パルス信号が重なる事象の可能性も考えて、以後に実験では光電子増倍管の電圧を-1.3kV、プリアンプの電圧を 13V と固定した。He イオン電流値  $I_{He}$  を  $3.33\mu A$

から 22.1nA まで減少させ、照射電流値に対する出力電圧の依存性を調べた。3.2ms 間の出力信号の時間変化を図 3.2.1-14 (3.33 $\mu$ A), 図 3.2.1-15 (1.96 $\mu$ A), 図 3.2.1-16(1.07 $\mu$ A), 図 3.2.1-17 (0.68 $\mu$ A), 図 3.2.1-18 (390nA), 図 3.2.1-19(210nA), 図 3.2.1-20 (95.4nA), 図 3.2.1-21(43.8nA) 図 3.2.1-22 (22.1nA)に示す。HV=-1.3kV とした時の、放射線強度の He イオン電流値  $I_{\text{He}}$  に対する依存性を図 3.2.1-23 に示す。 $I_{\text{He}} \geq 2\mu\text{A}$  の領域では直線性は良好である。広範囲の領域で、直線性を示していないのは、 $I_{\text{He}} \leq 2\mu\text{A}$  の領域で検出器に飛来する放射線の個数が少ない為に生じたシステムティックエラーと考えられる。測定回数を増加する事によりこの問題は解決される。

表 3.2.1 5 $\mu$ m 厚のベリリウムへ 15MeV ヘリウム照射による検出器応答

評価実験条件

Data number	E <sub>He</sub> [MeV]	Be width [ $\mu$ m]	I <sub>FC233</sub> [ $\mu$ A]	Pb [cm]	HV [kV]	V <sub>Amp</sub> [V]
No1.1.01-1_151615	15	5	3.610	0	-1.2	15
No1.1.01-2_151736	15	5	3.610	0	-1.2	15
No1.1.01-3_151907	15	5	3.610	0	-1.2	15
No1.1.02-1_152940	15	5	3.660	5	-1.2	15
No1.1.02-2_153133	15	5	3.660	5	-1.2	15
No1.1.02-3_153238	15	5	3.660	5	-1.2	15
No1.1.03-1_154434	15	5	3.620	10	-1.2	15
No1.1.03-2_154542	15	5	3.620	10	-1.2	15
No1.1.03-3_154658	15	5	3.620	10	-1.2	15
No1.1.04-1_155956	15	5	3.540	15	-1.2	15
No1.1.04-2_160150	15	5	3.540	15	-1.2	15
No1.1.04-3_160257	15	5	3.540	15	-1.2	15
No1.1.05-1_161959	15	5	3.470	15	-1.3	15
No1.1.05-2_162142	15	5	3.470	15	-1.3	15
No1.1.05-3_162304	15	5	3.470	15	-1.3	15
No1.1.06-1_163849	15	5	3.450	15	-1.4	15
No1.1.06-2_164007	15	5	3.450	15	-1.4	15
No1.1.06-3_164127	15	5	3.450	15	-1.4	15
No1.1.07-1_164448	15	5	2.050	15	-1.4	15
No1.1.07-2_164545	15	5	2.050	15	-1.4	15
No1.1.07-3_164659	15	5	2.050	15	-1.4	15
No1.1.08-1_165012	15	5	1.000	15	-1.4	15
No1.1.08-2_165129	15	5	1.000	15	-1.4	15
No1.1.08-3_165551	15	5	1.000	15	-1.4	15
No1.1.09-1_173639	15	5	3.330	15	-1.3	13
No1.1.09-2_173756	15	5	3.330	15	-1.3	13

No1.1.09-3_173906	15	5	3.330	15	-1.3	13
No1.1.10-1_174035	15	5	1.960	15	-1.3	13
No1.1.10-2_174134	15	5	1.960	15	-1.3	13
No1.1.10-3_174248	15	5	1.960	15	-1.3	13
No1.1.11-1_174453	15	5	1.070	15	-1.3	13
No1.1.11-2_174621	15	5	1.070	15	-1.3	13
No1.1.11-3_174722	15	5	1.070	15	-1.3	13
No1.1.12-1_174937	15	5	0.680	15	-1.3	13
No1.1.12-2_175047	15	5	0.680	15	-1.3	13
No1.1.12-3_175206	15	5	0.680	15	-1.3	13
No1.1.13-1_175446	15	5	0.390	15	-1.3	13
No1.1.13-2_175553	15	5	0.390	15	-1.3	13
No1.1.13-3_175705	15	5	0.390	15	-1.3	13
No1.1.14-1_175958	15	5	0.210	15	-1.3	13
No1.1.14-2_180122	15	5	0.210	15	-1.3	13
No1.1.14-3_180241	15	5	0.210	15	-1.3	13
No1.1.15-1_180935	15	5	0.095	15	-1.3	13
No1.1.15-2_181206	15	5	0.095	15	-1.3	13
No1.1.15-3_181321	15	5	0.095	15	-1.3	13
No1.1.16-1_181533	15	5	0.044	15	-1.3	13
No1.1.16-2_181643	15	5	0.044	15	-1.3	13
No1.1.16-3_181801	15	5	0.044	15	-1.3	13
No1.1.17-1_182123	15	5	0.022	15	-1.3	13
No1.1.17-2_182232	15	5	0.022	15	-1.3	13
No1.1.17-3_182336	15	5	0.022	15	-1.3	13

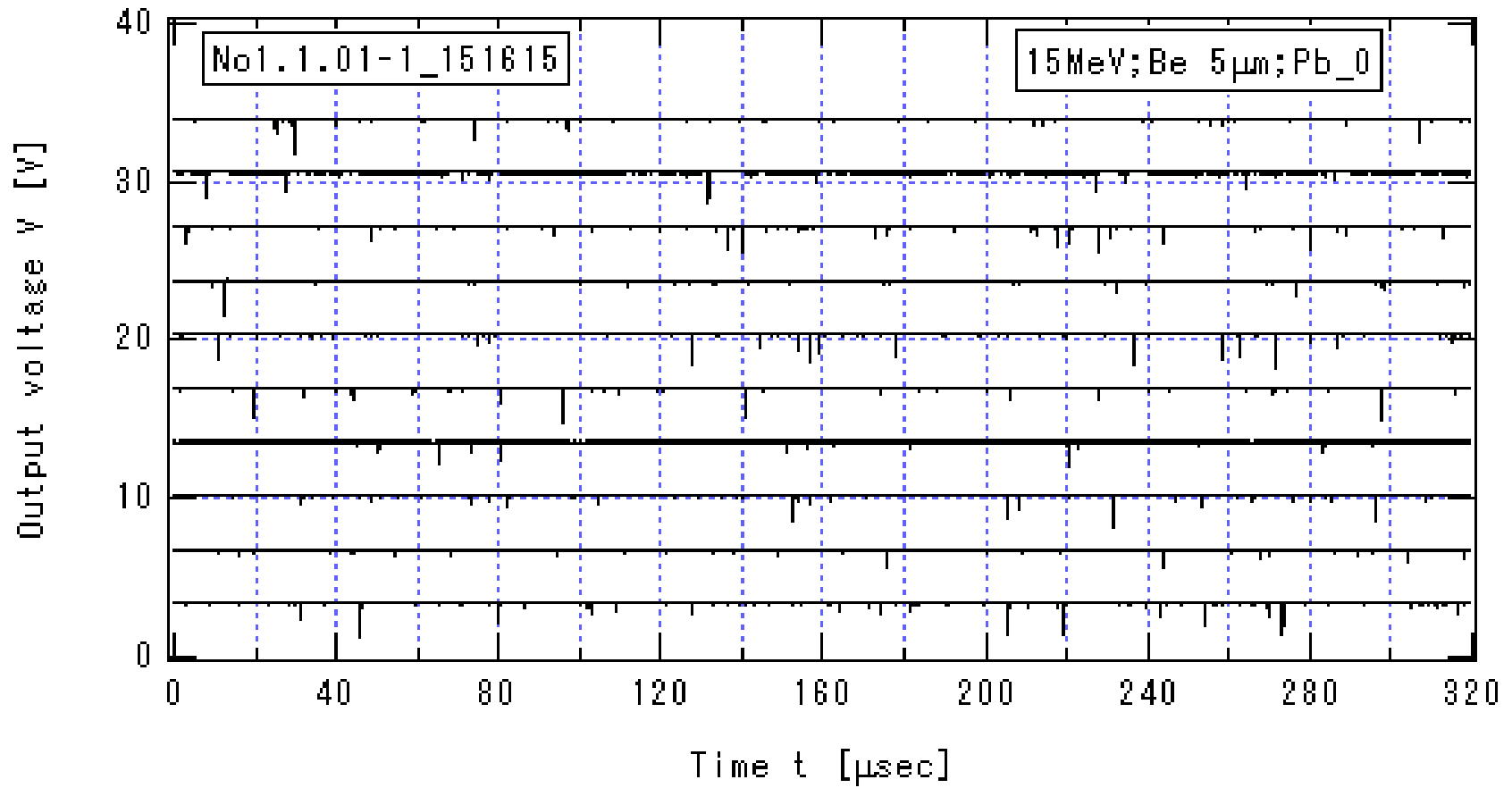


図 3.2.1-1\_1  $E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $0\text{cm}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1)

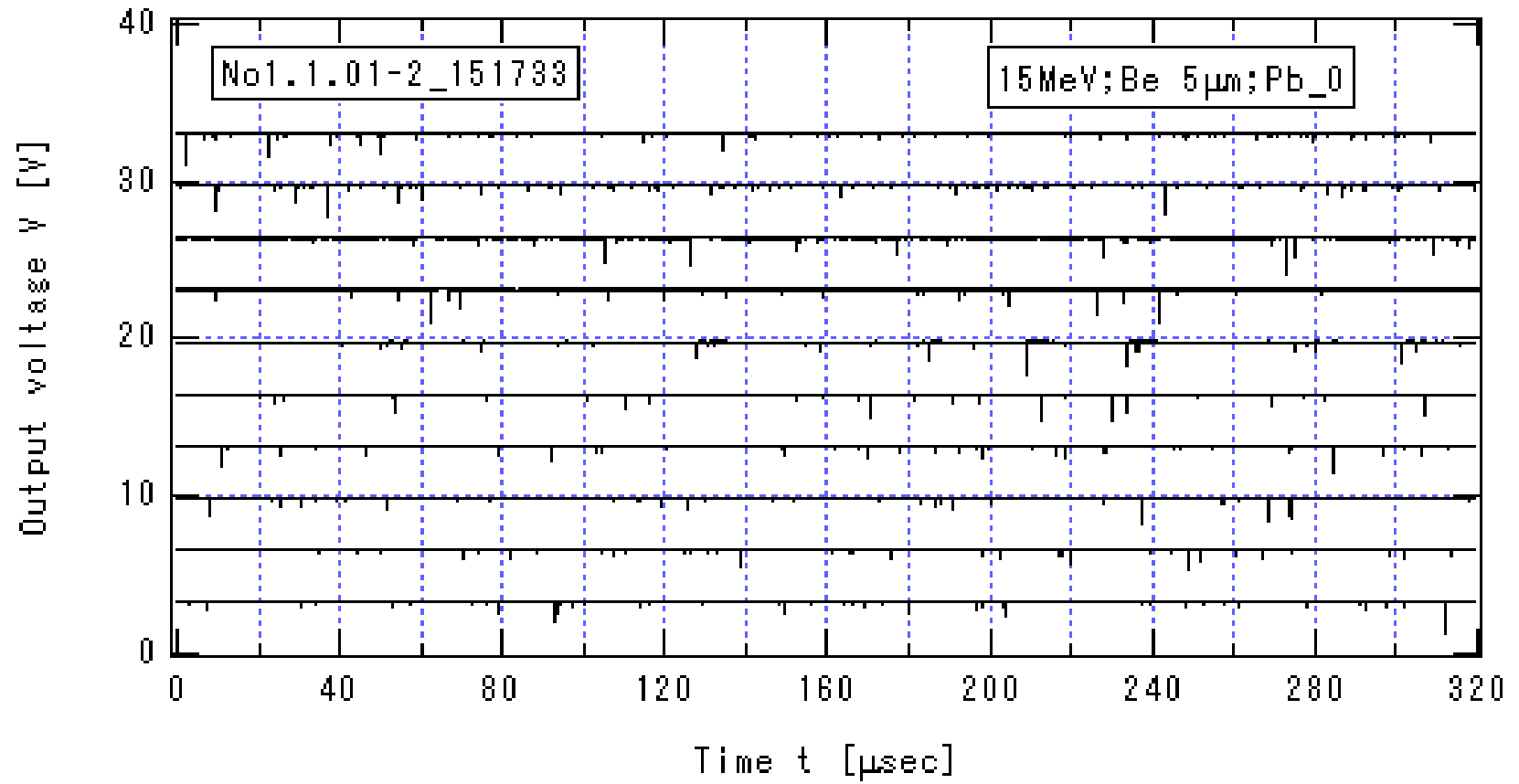


図 3.2.1-1\_2  $E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $0\text{cm}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2)

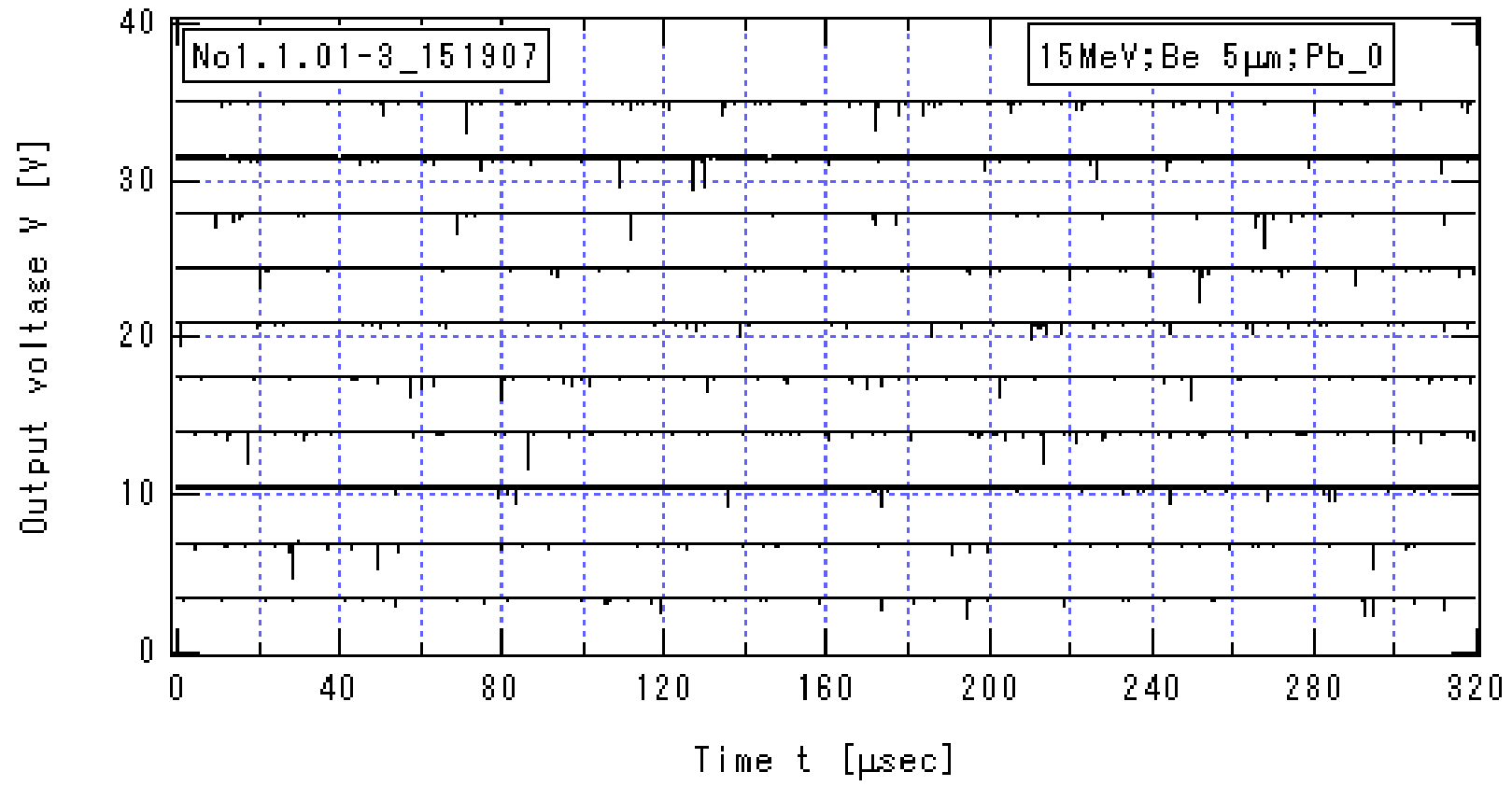


図 3.2.1-1\_3  $E_{He} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $0\text{cm}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3)



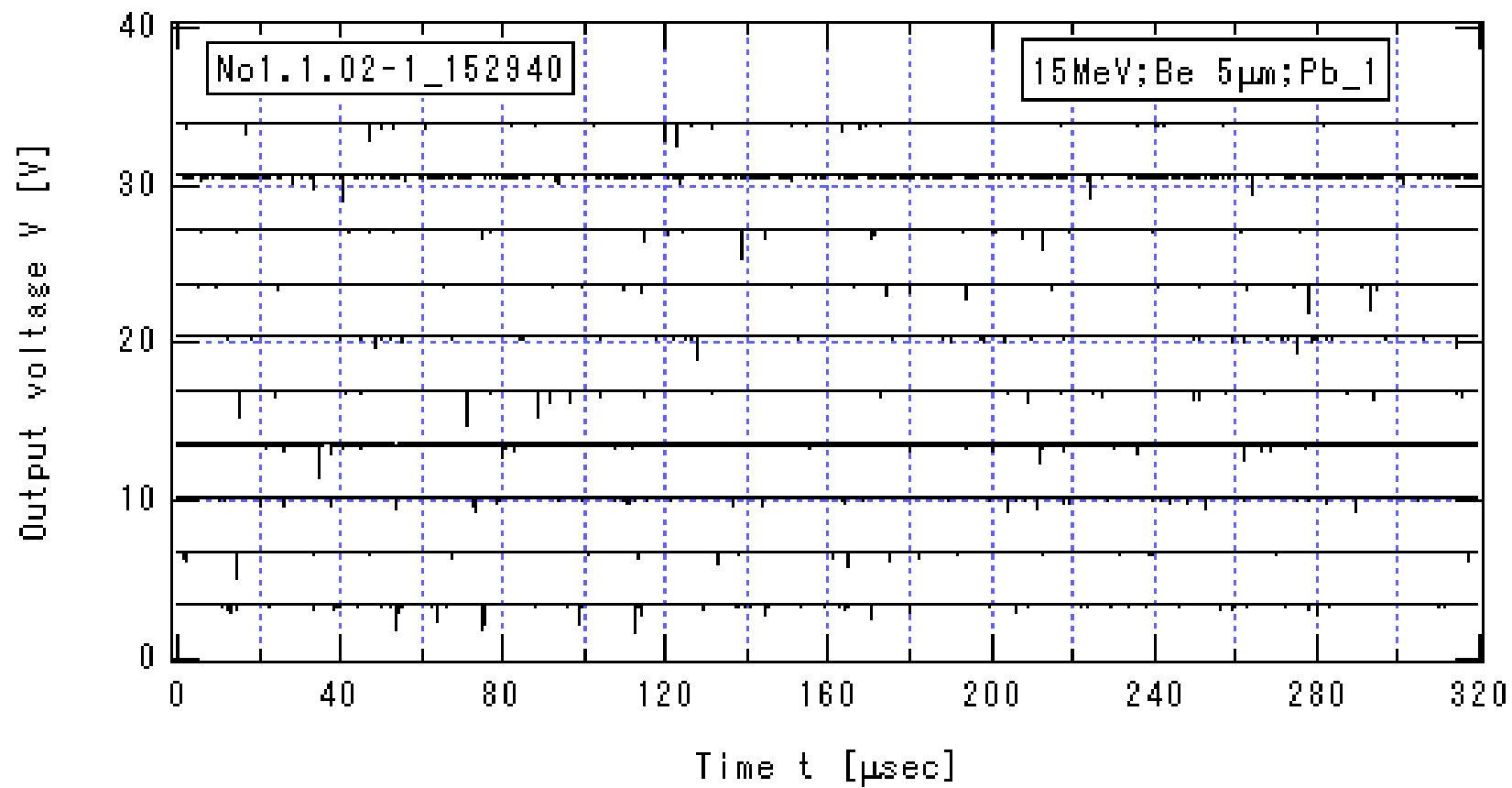


図 3.2.1-2\_1  $E_{He} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $0\text{cm}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1)

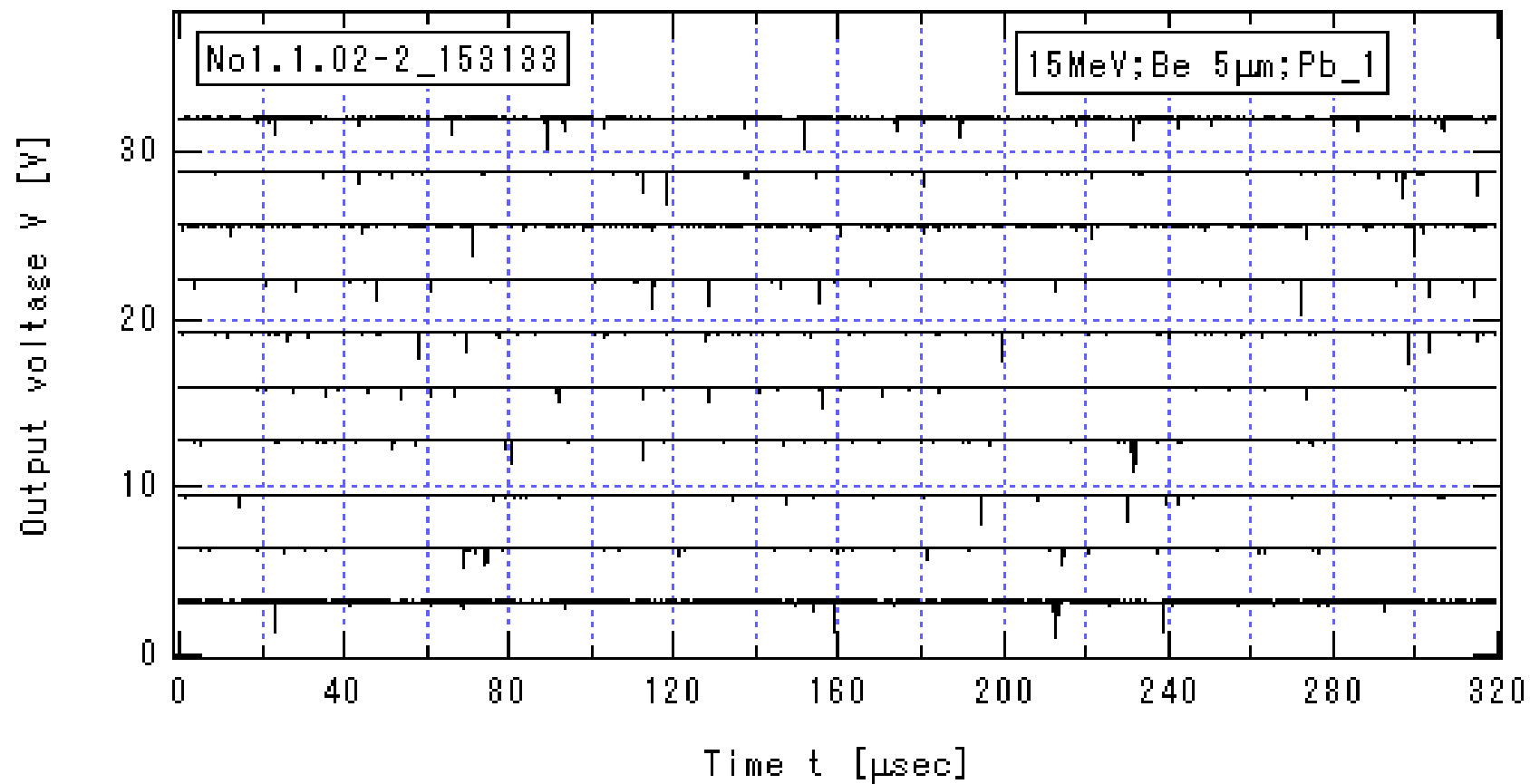


図 3.2.1-2\_2  $E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 5 $\mu\text{m}$ , Pb の厚さ 0cm の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2)

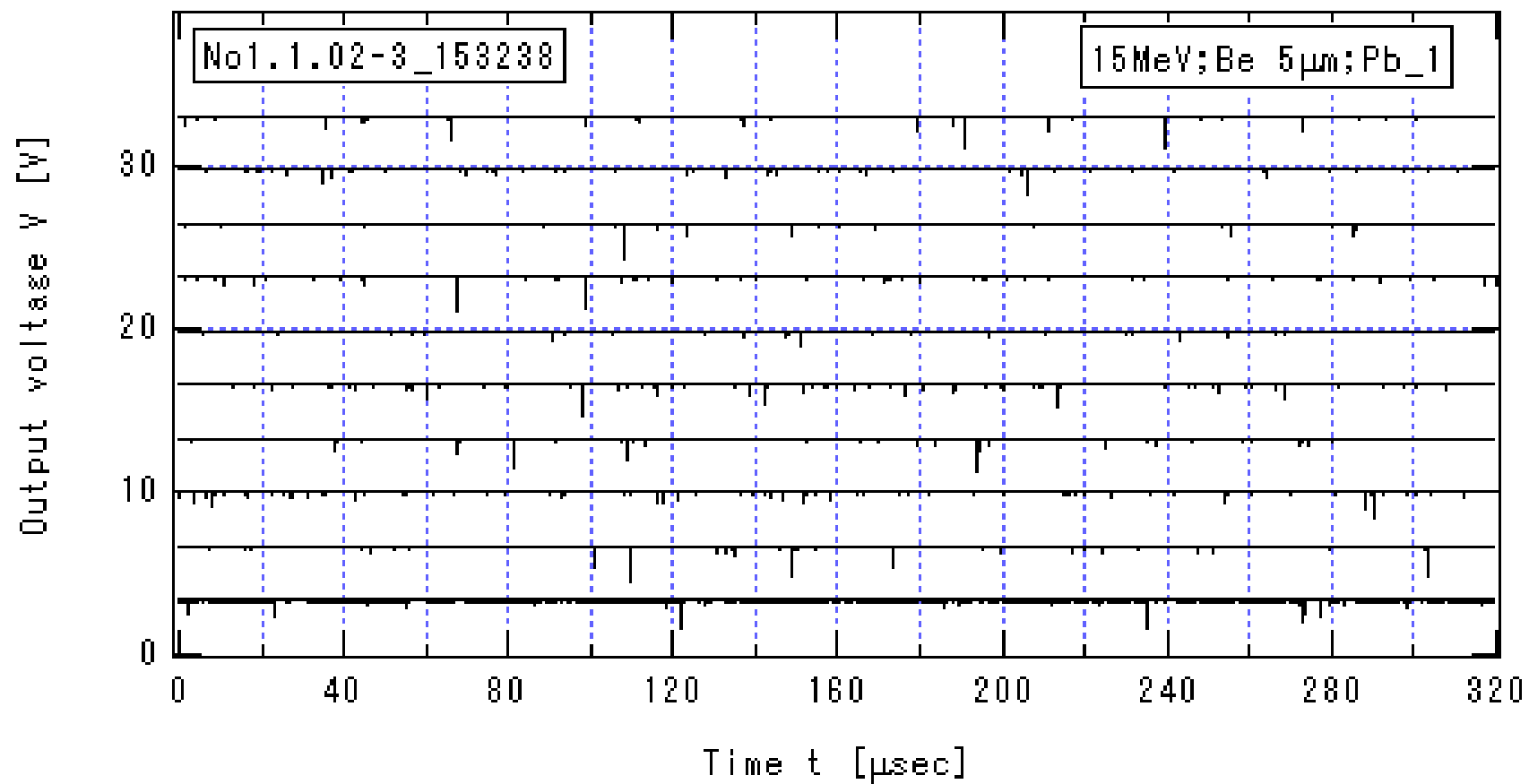


図 3.2.1-2\_3  $E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $0\text{cm}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3)

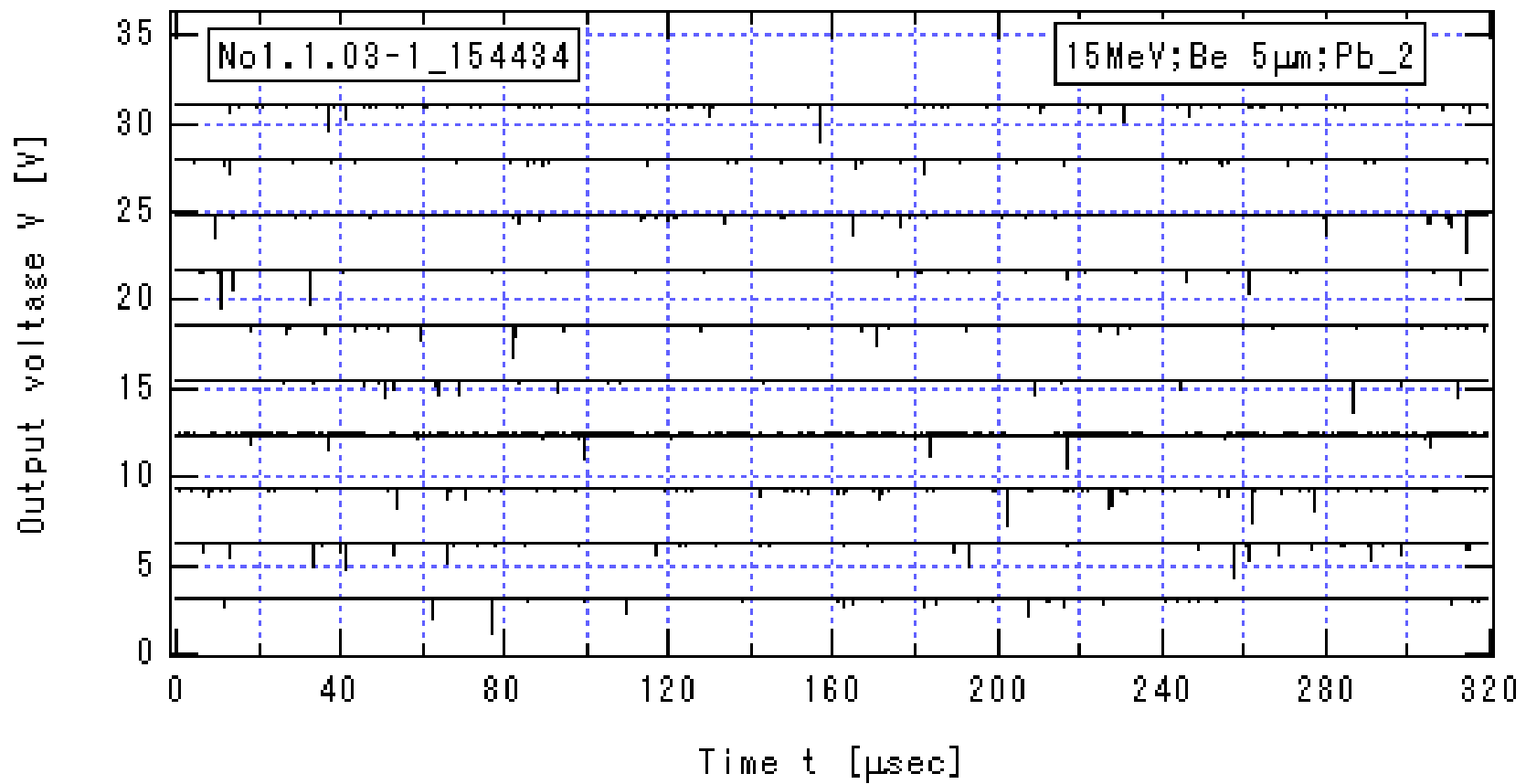


図 3.2.1-3\_1  $E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $0\text{cm}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1)

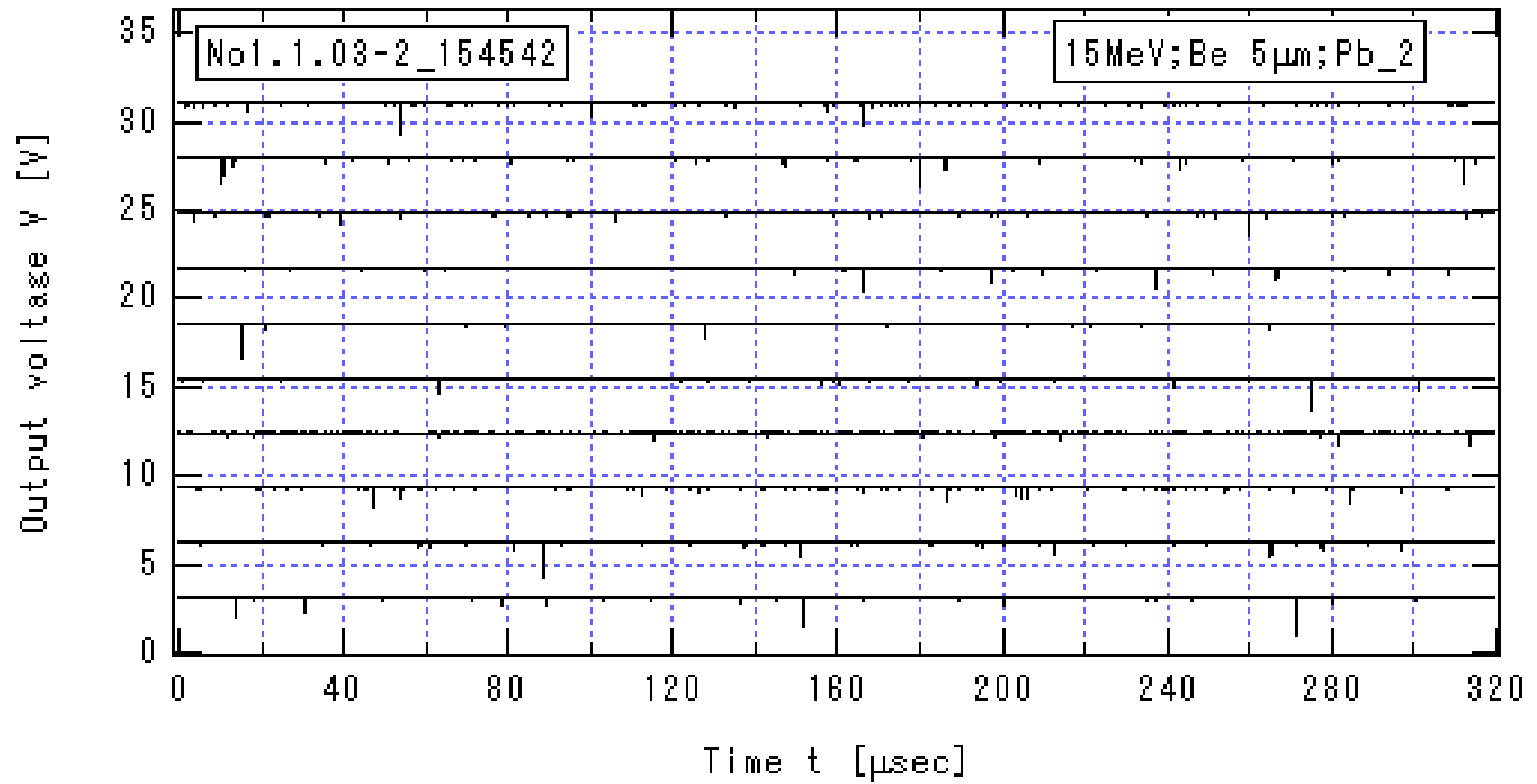


図 3.2.1-3\_2  $E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $0\text{cm}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2)

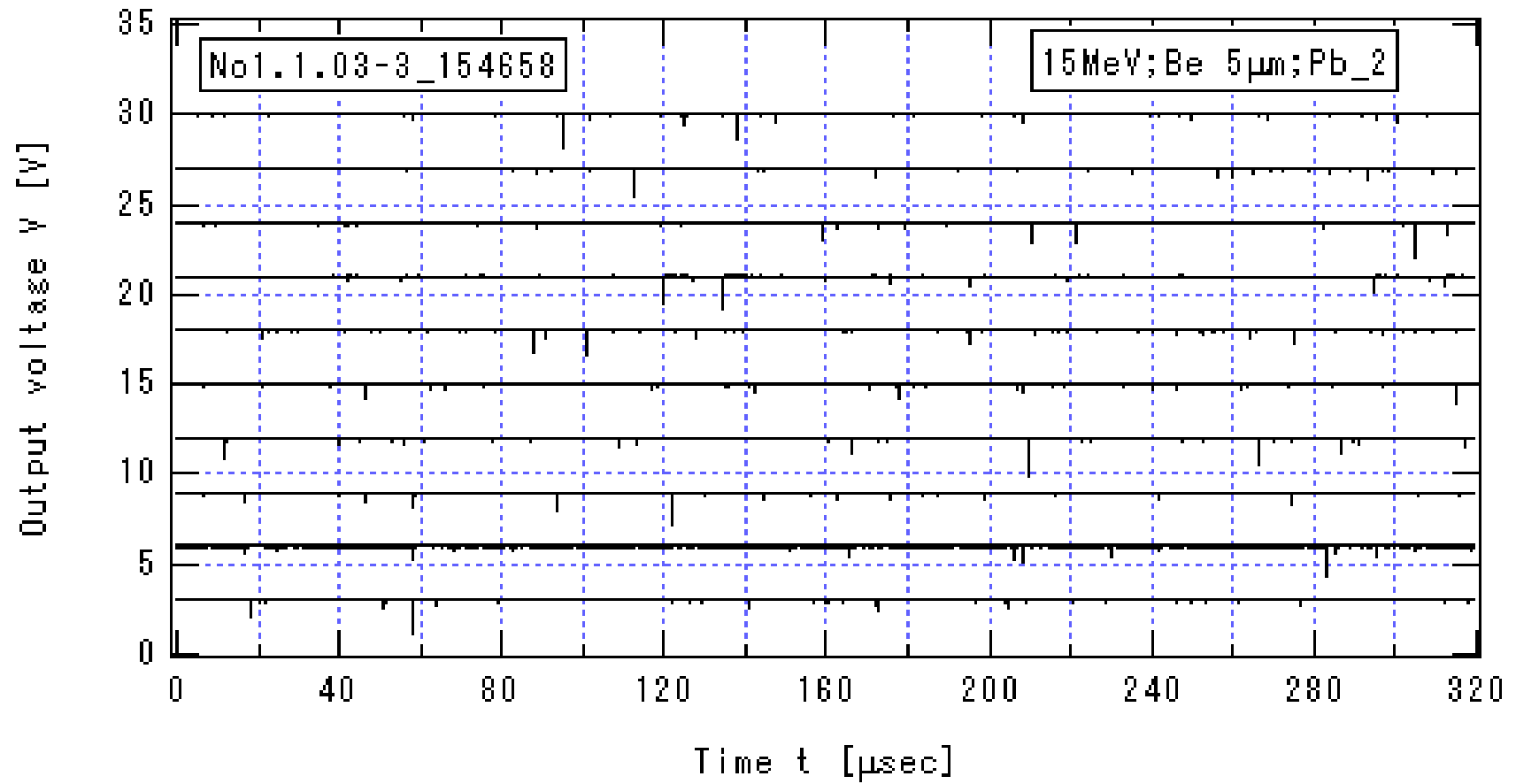


図 3.2.1-3\_3  $E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $0\text{cm}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3)

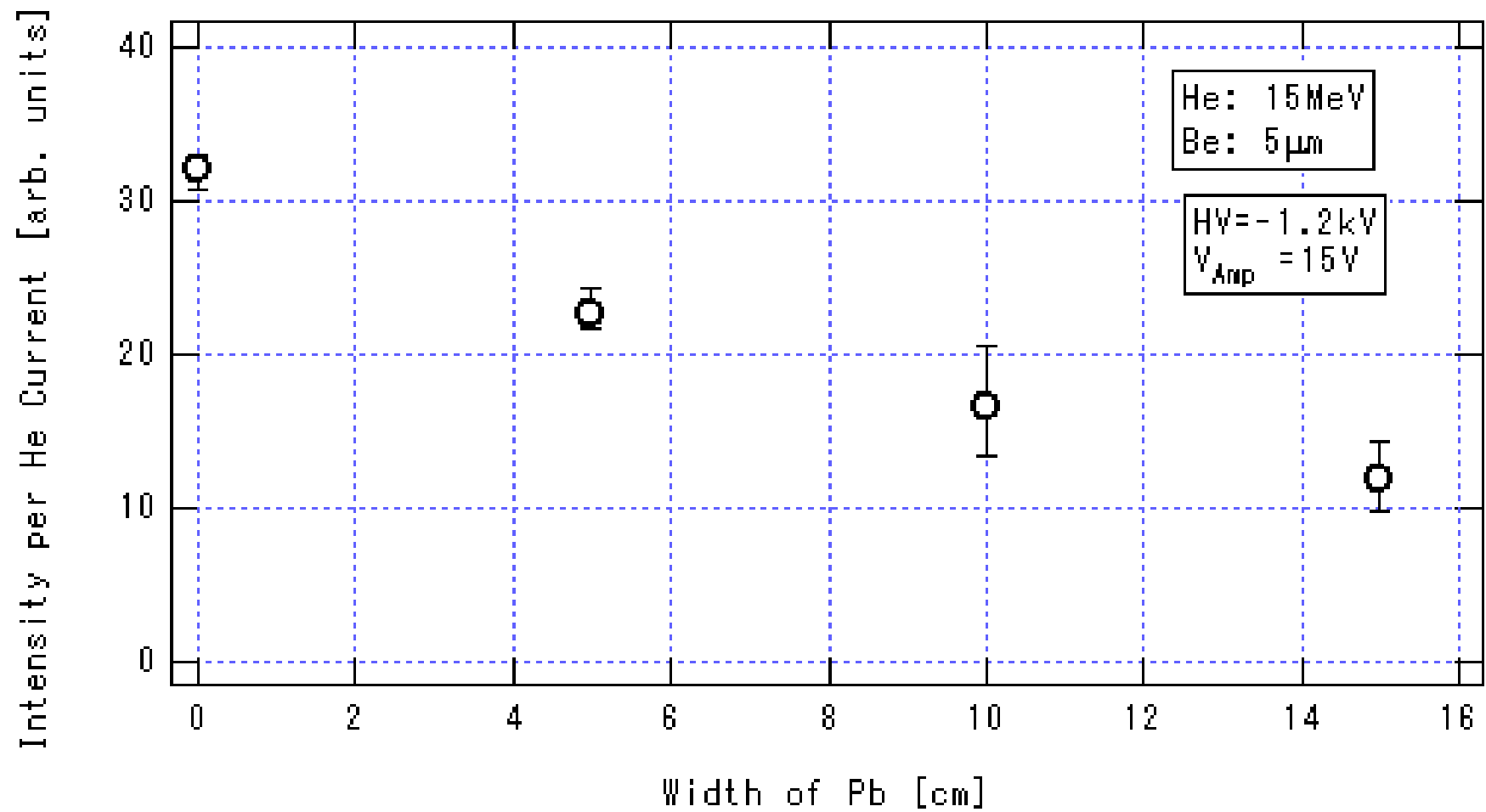


図 3.2.1-5 電流値で規格した放射線強度の液シン NE213 の前面の鉛厚に対する依存性

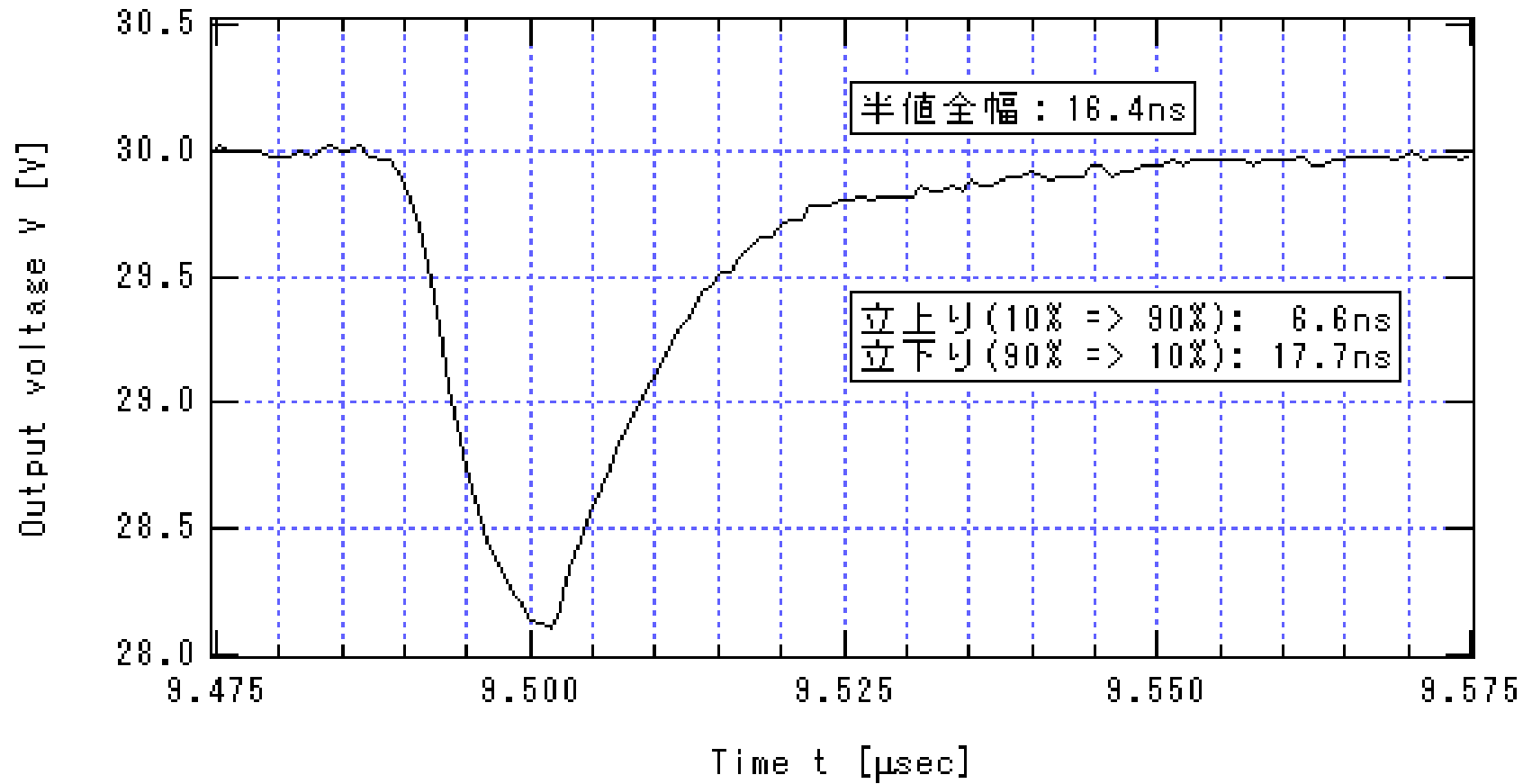


図 3.2.1-6 測定パルス信号の波形



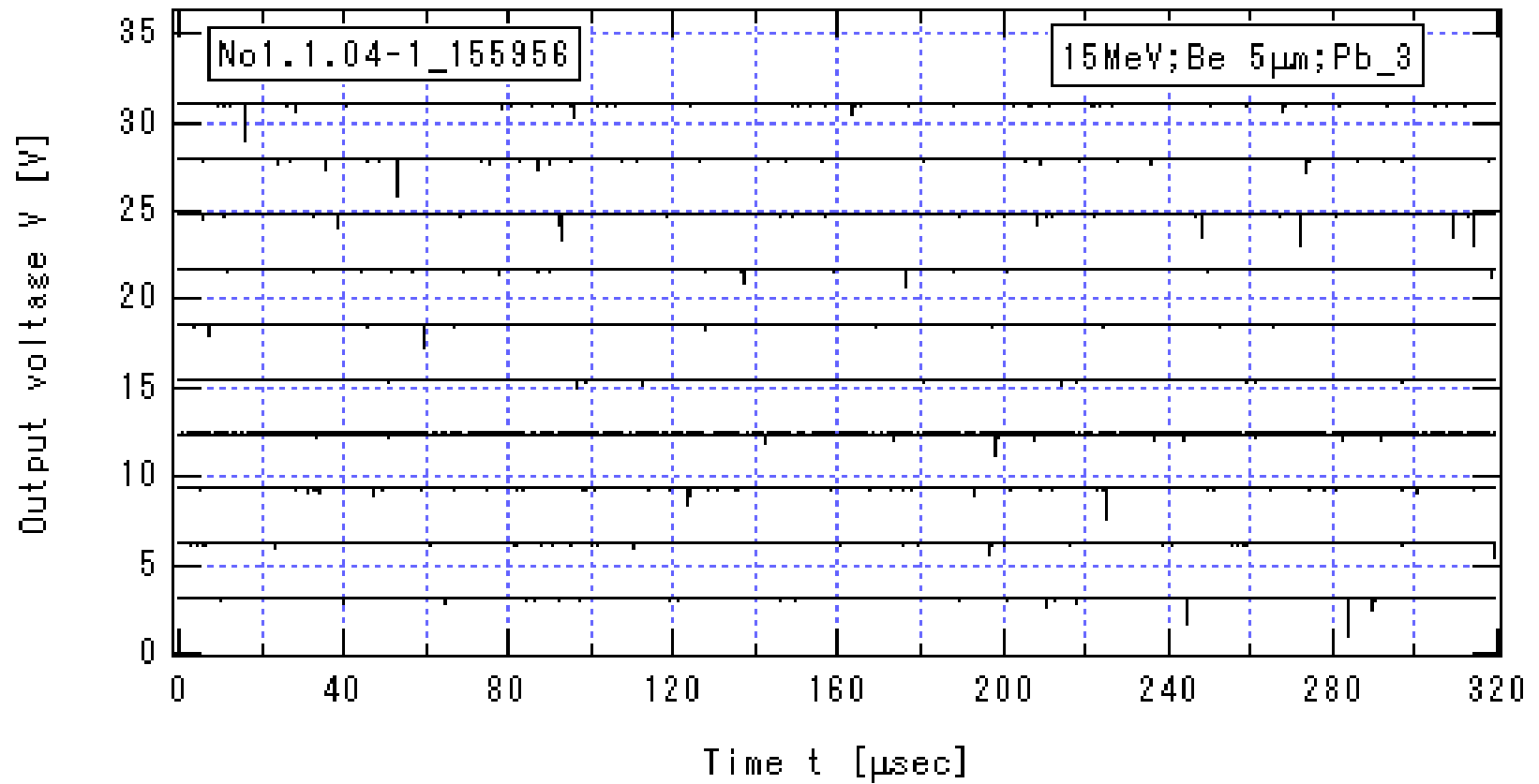


図 3.2.1-7\_1 HV=-1.3 kV の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $15\text{cm}$

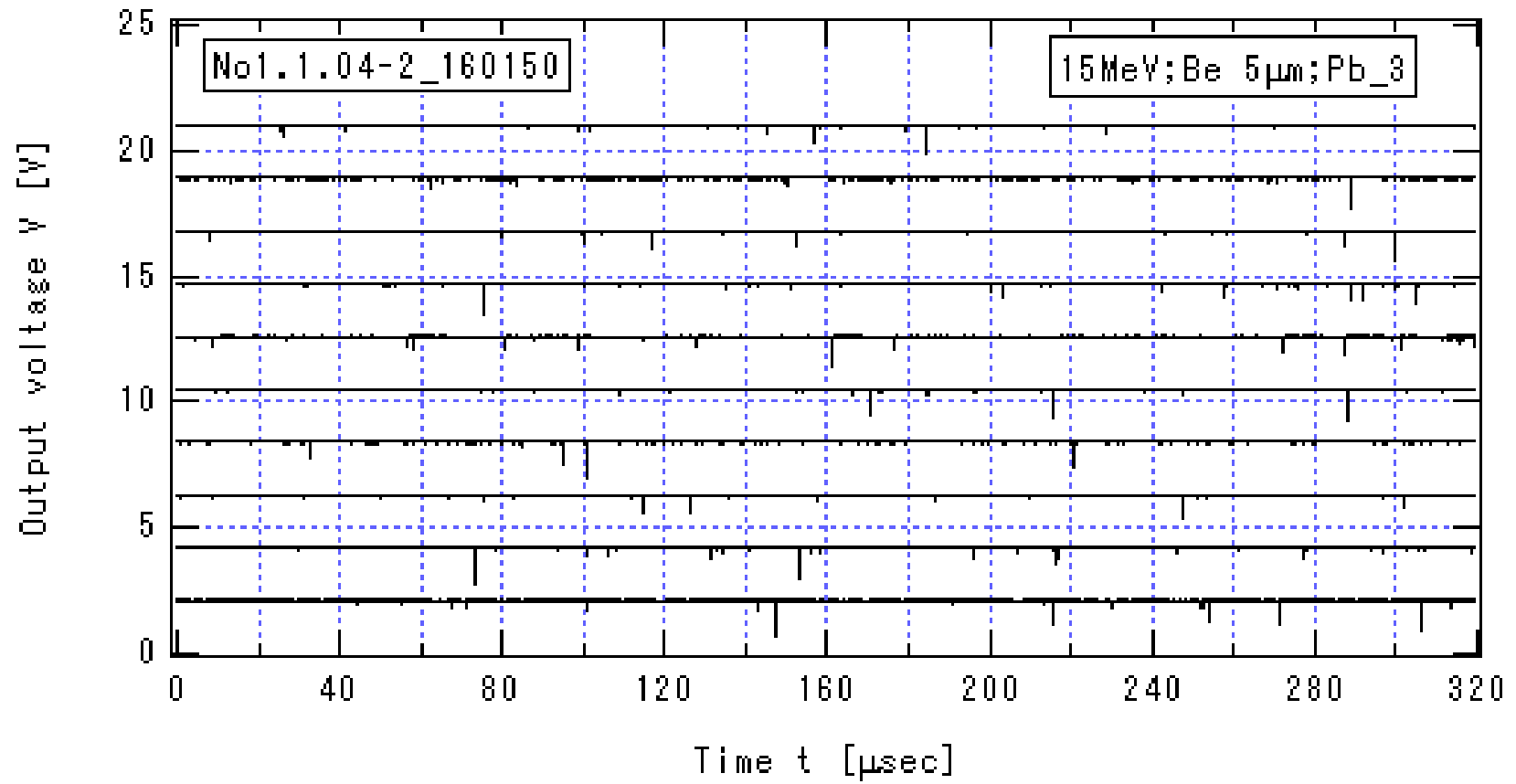


図 3.2.1-7\_2 HV=-1.3 kV の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $15\text{cm}$

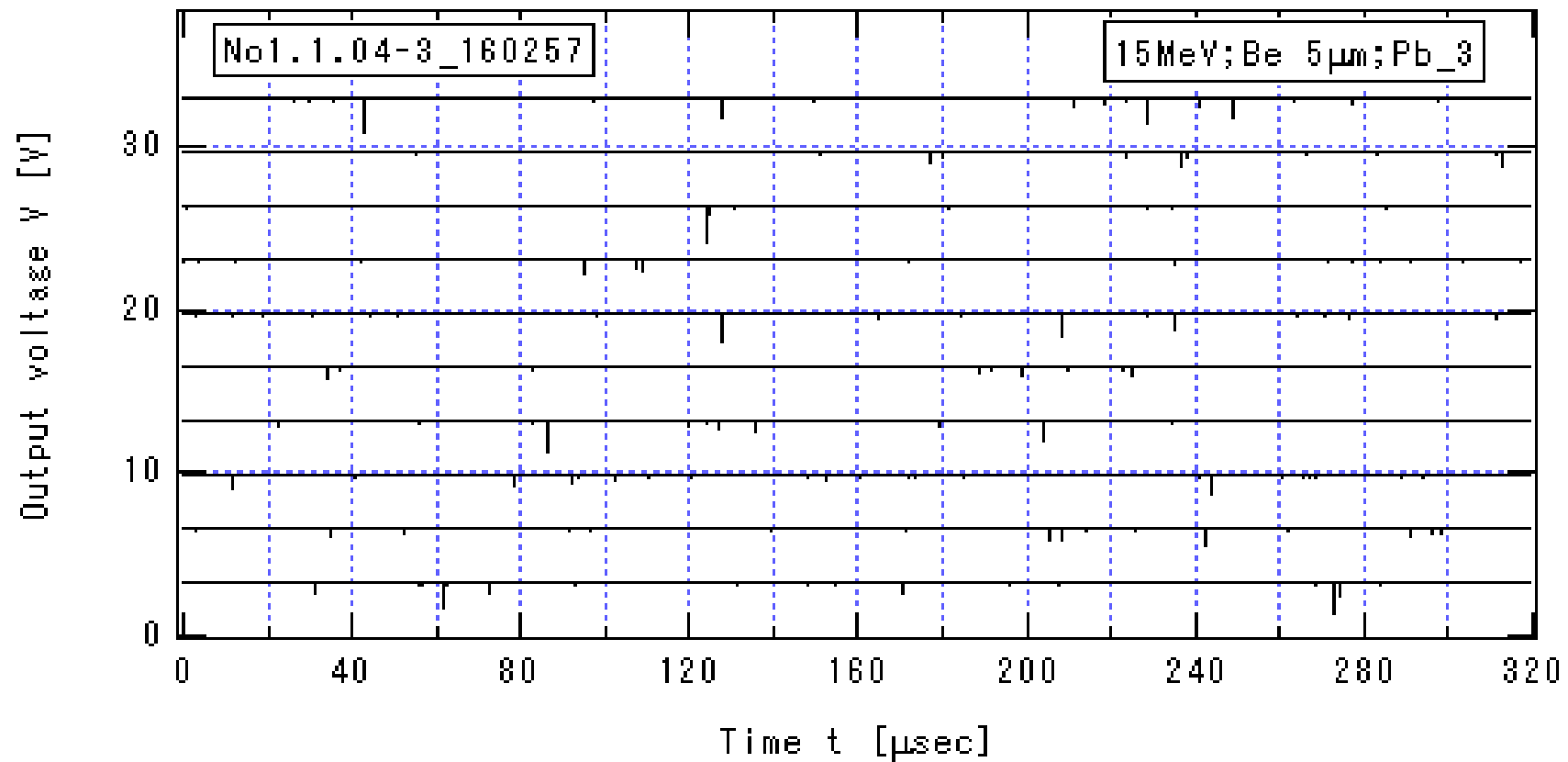


図 3.2.1-7\_3 HV=-1.3 kV の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $15\text{cm}$

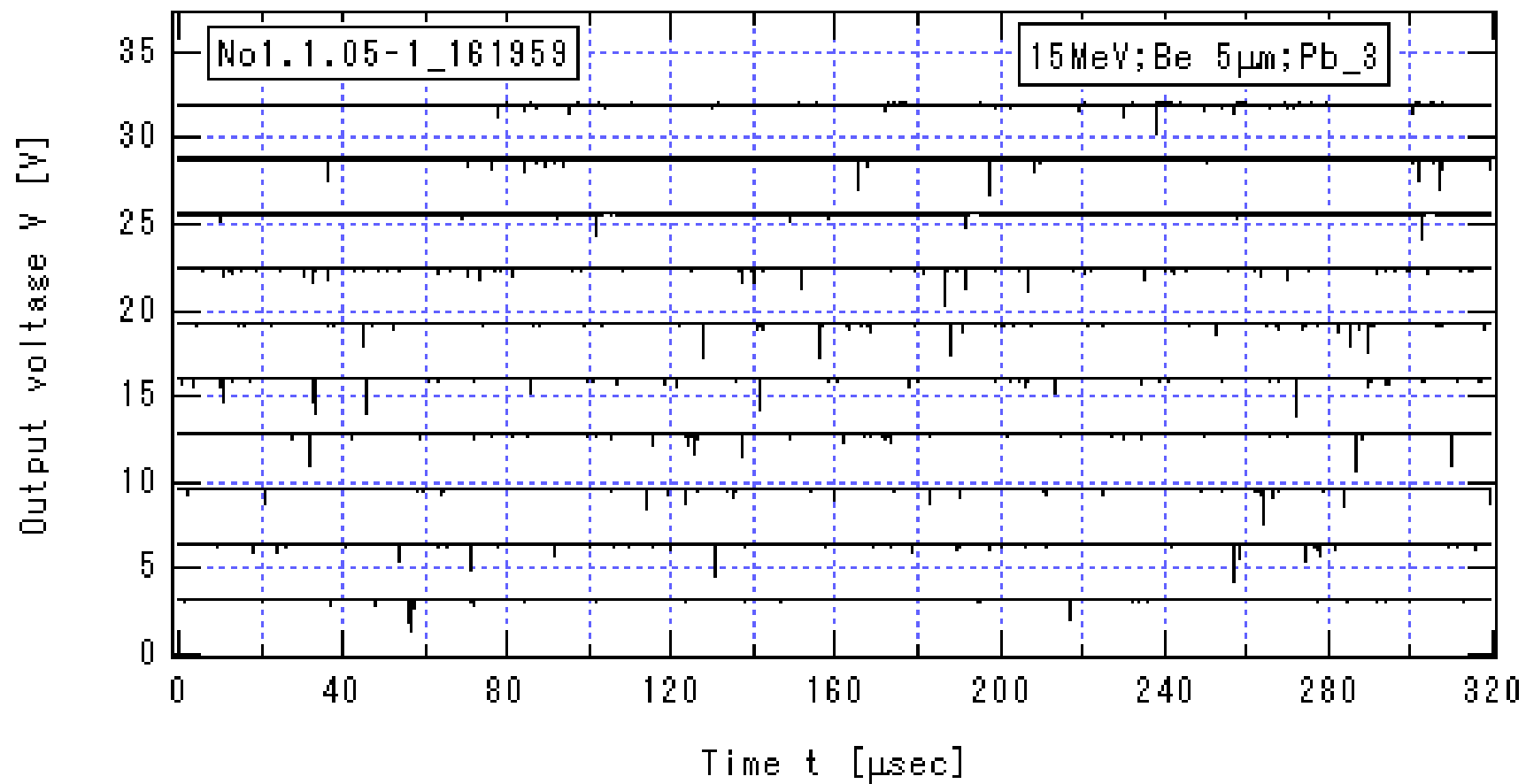


図 3.2.1-8\_1 HV=-1.4 kV の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $15\text{cm}$

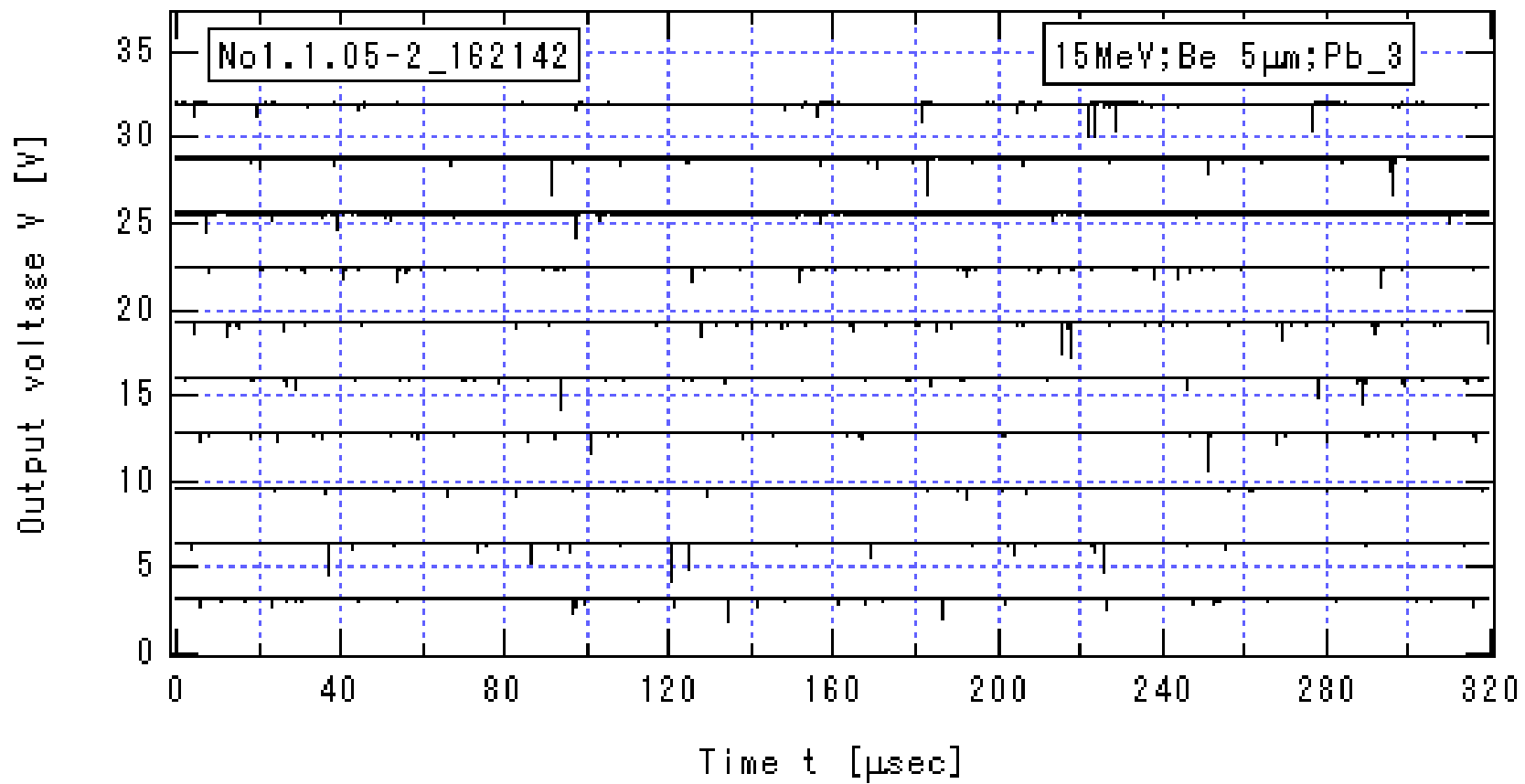


図 3.2.1-8\_2 HV=-1.4 kV の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $15\text{cm}$

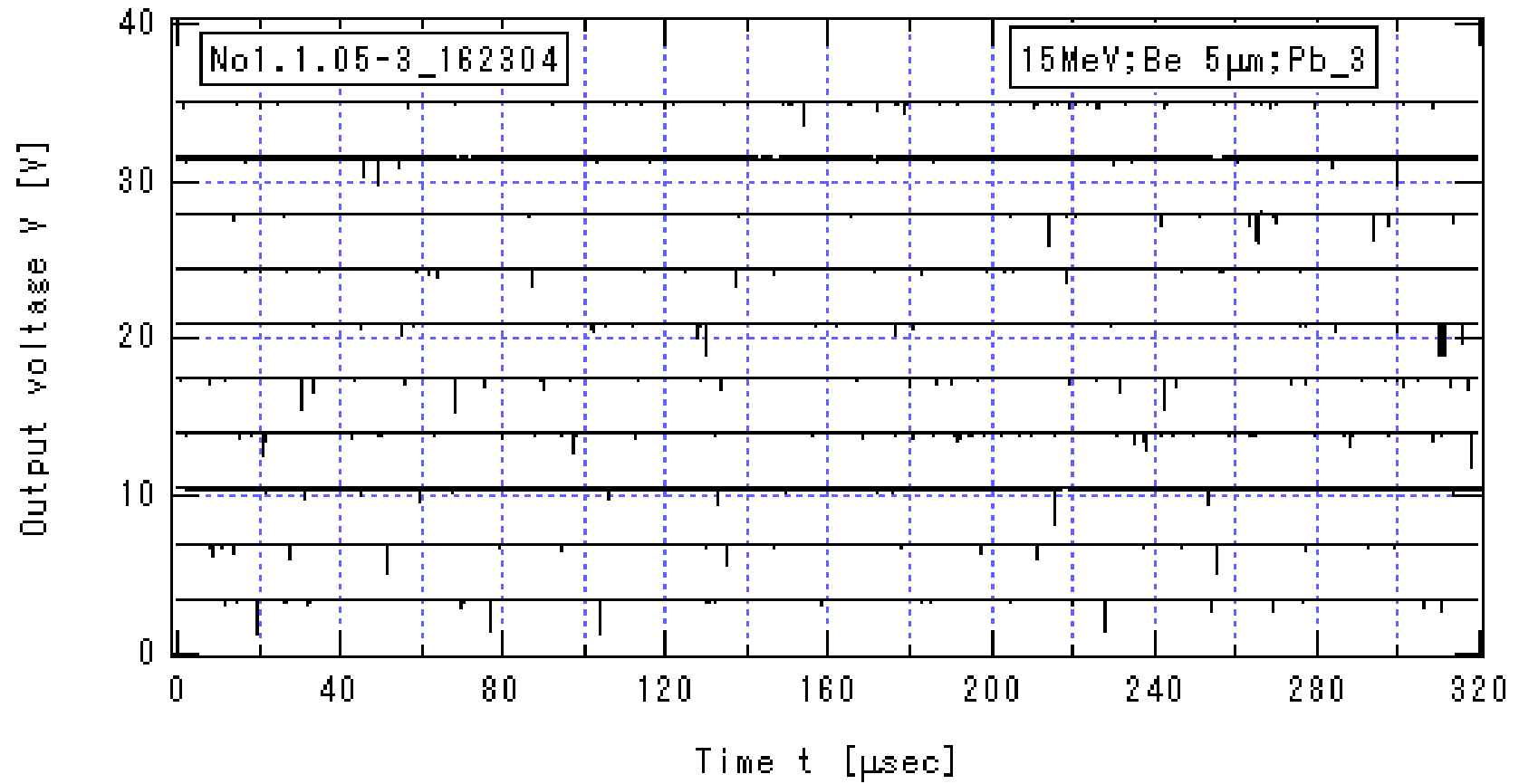


図 3.2.1-8\_3 HV=-1.4 kV の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $15\text{cm}$

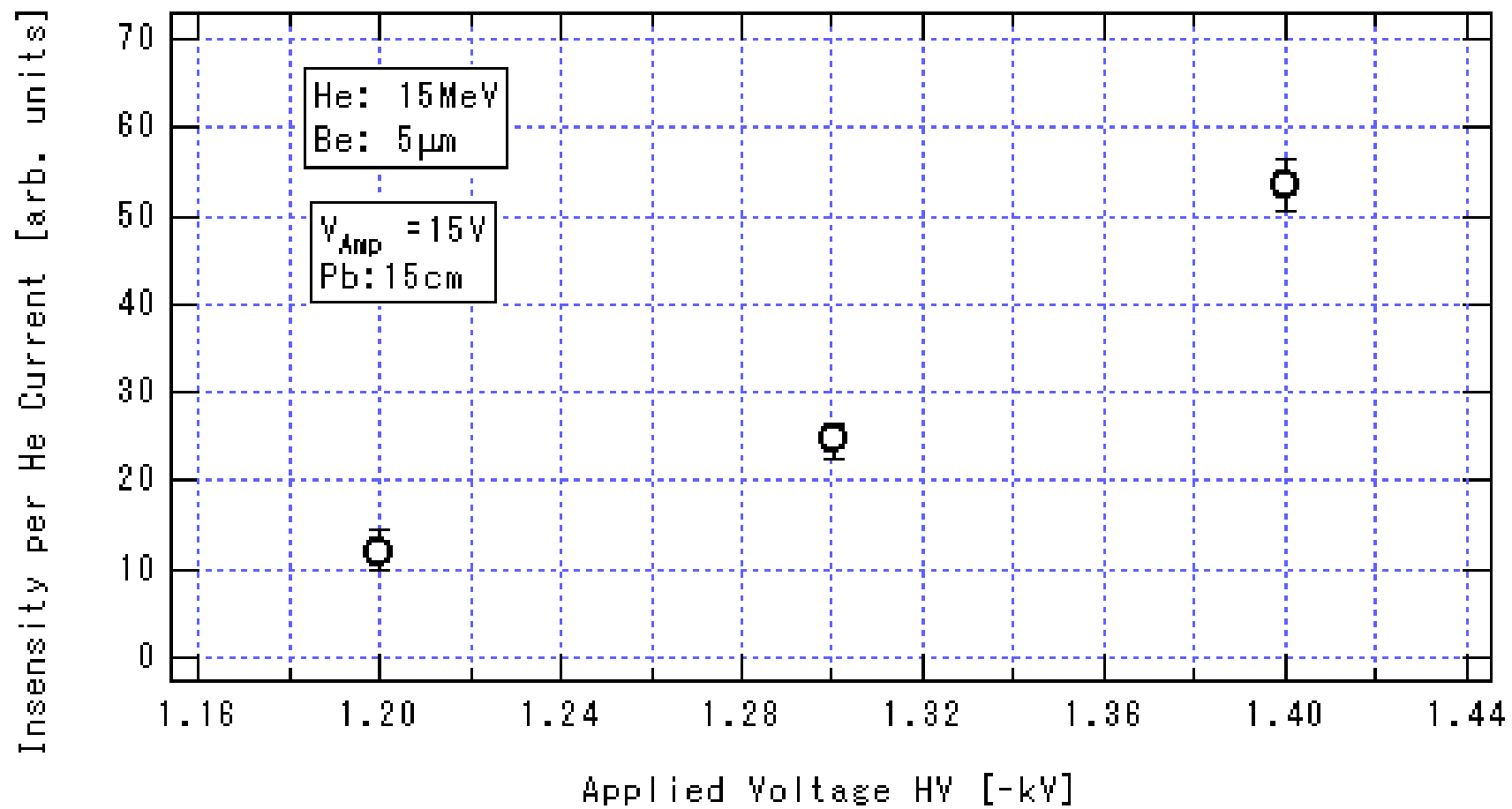


図 3.2.1-9 放射線強度の光電子増倍管印加電圧に対する依存性

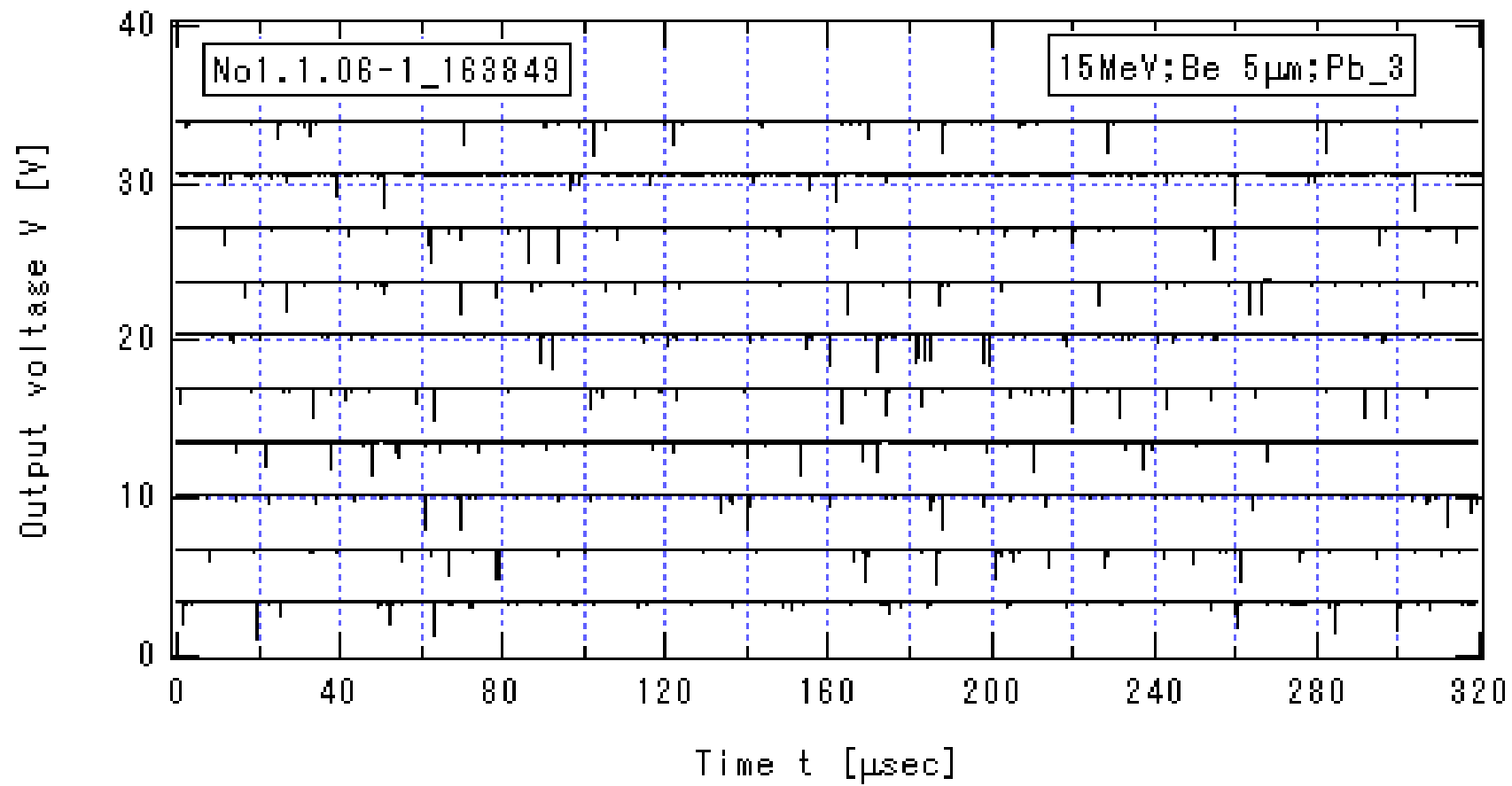


図 3.2.1-10\_1  $I_{\text{He}}=3.45\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $15\text{cm}$ ,  $\text{HV}=-1.4\text{kV}$



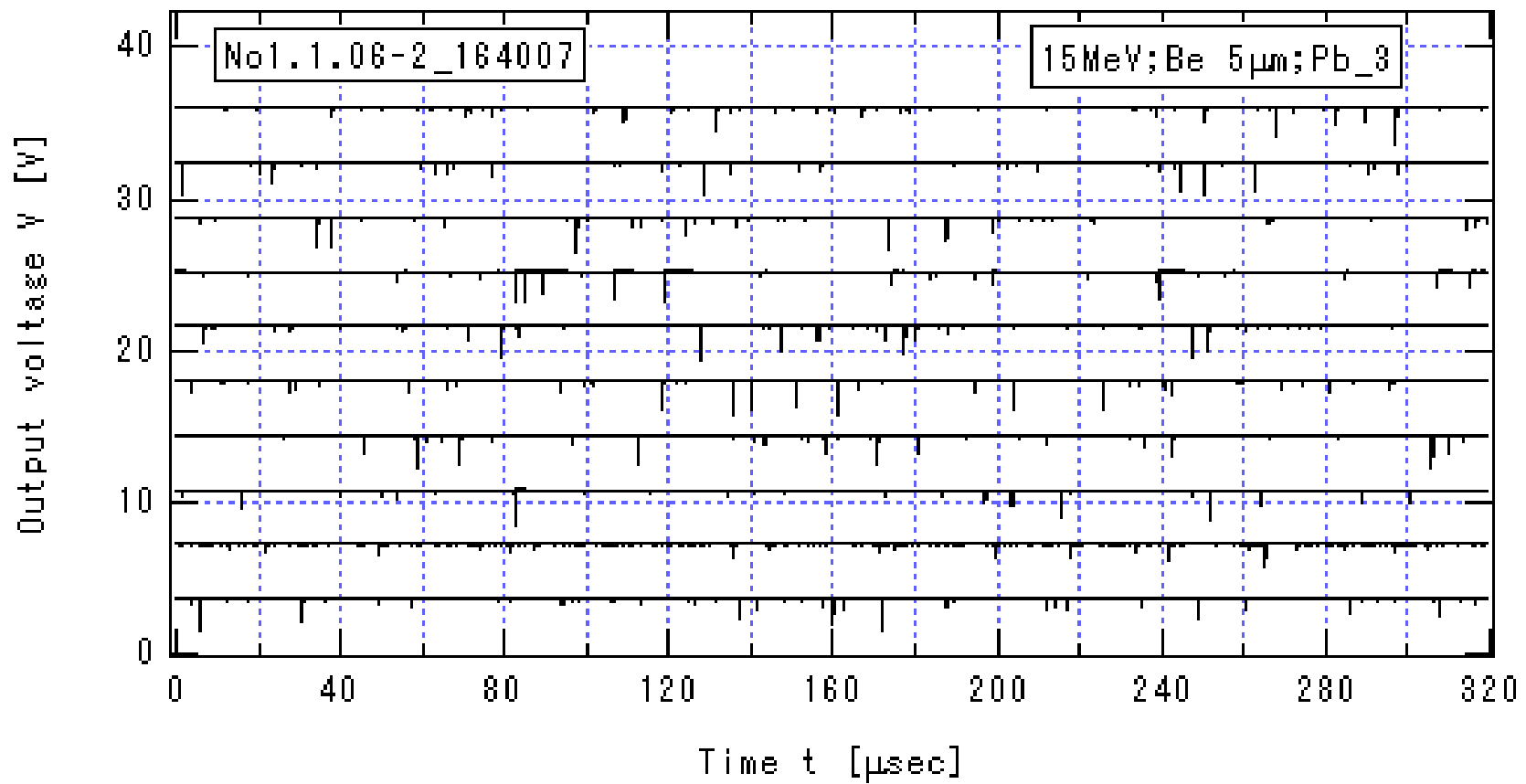


図 3.2.1-10\_2  $I_{\text{He}}=3.45\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $15\text{cm}$ ,  $\text{HV}=-1.4\text{kV}$

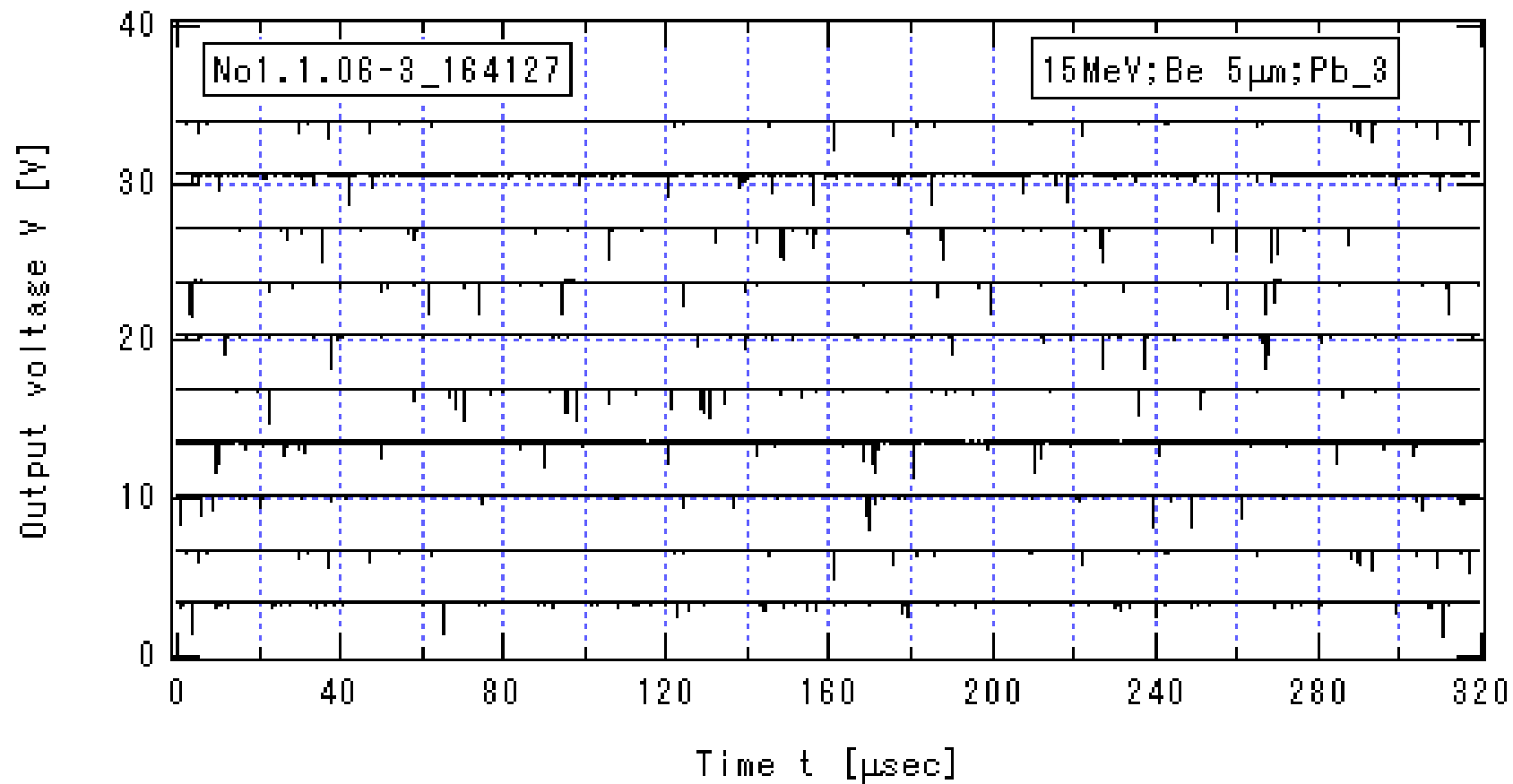


図 3.2.1-10\_3  $I_{\text{He}}=3.45\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $15\text{cm}$ ,  $\text{HV}=-1.4\text{ kV}$

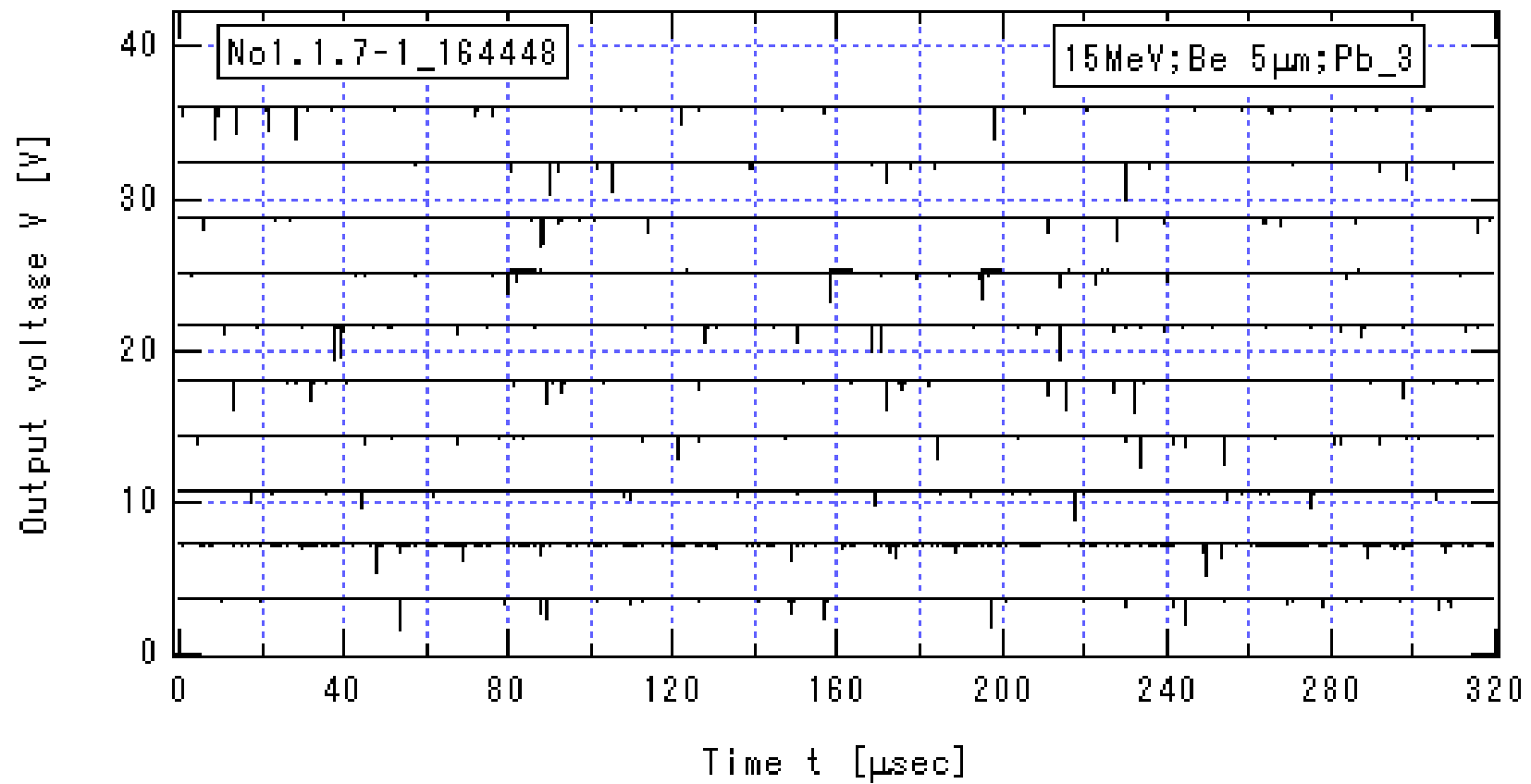


図 3.2.1-11\_1  $I_{\text{He}}=2.05\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $15\text{cm}$ ,  $HV=-1.4\text{kV}$

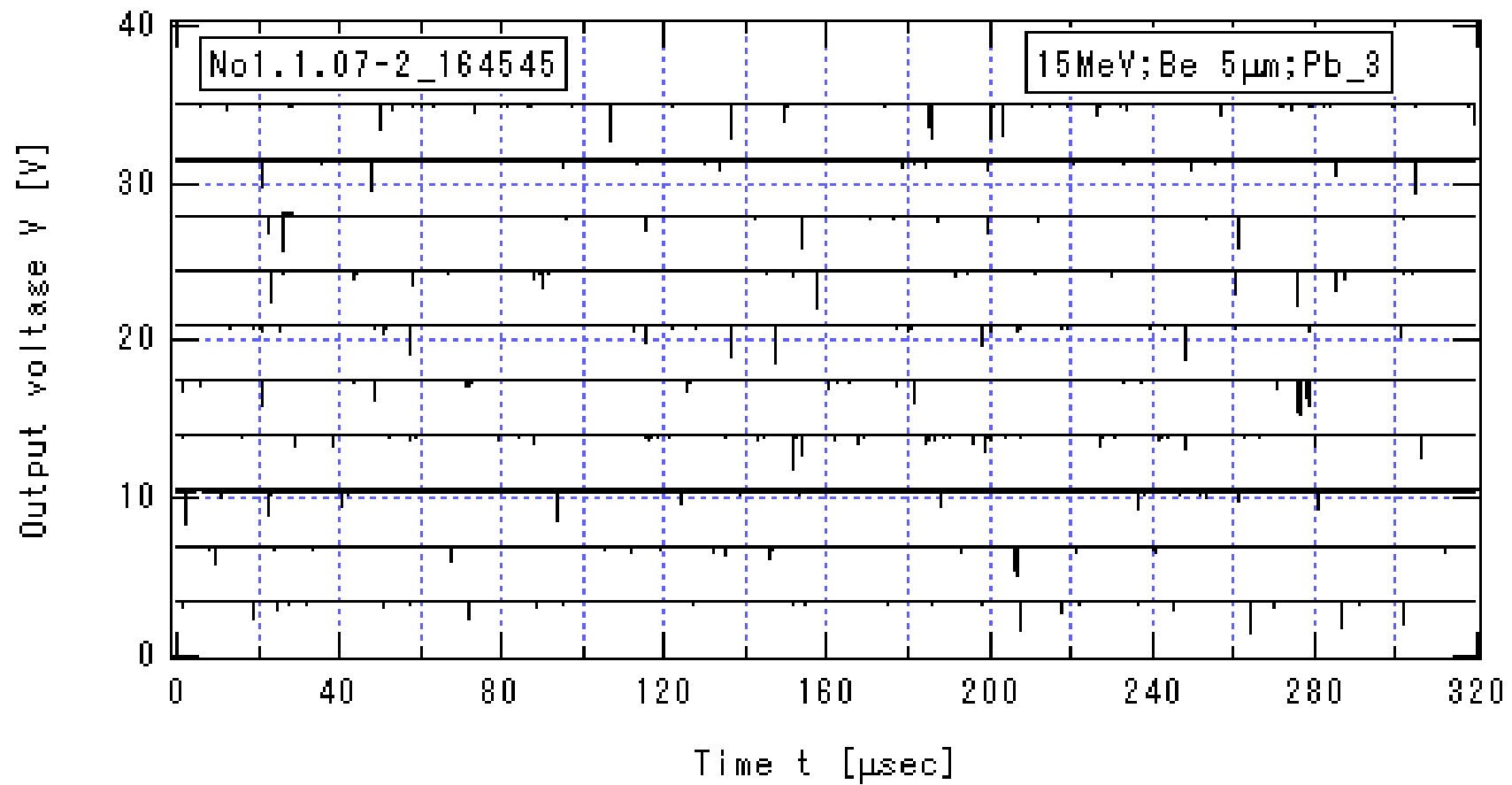


図 3.2.1-11\_2  $I_{\text{He}}=2.05\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $15\text{cm}$ ,  $\text{HV}=-1.4\text{kV}$

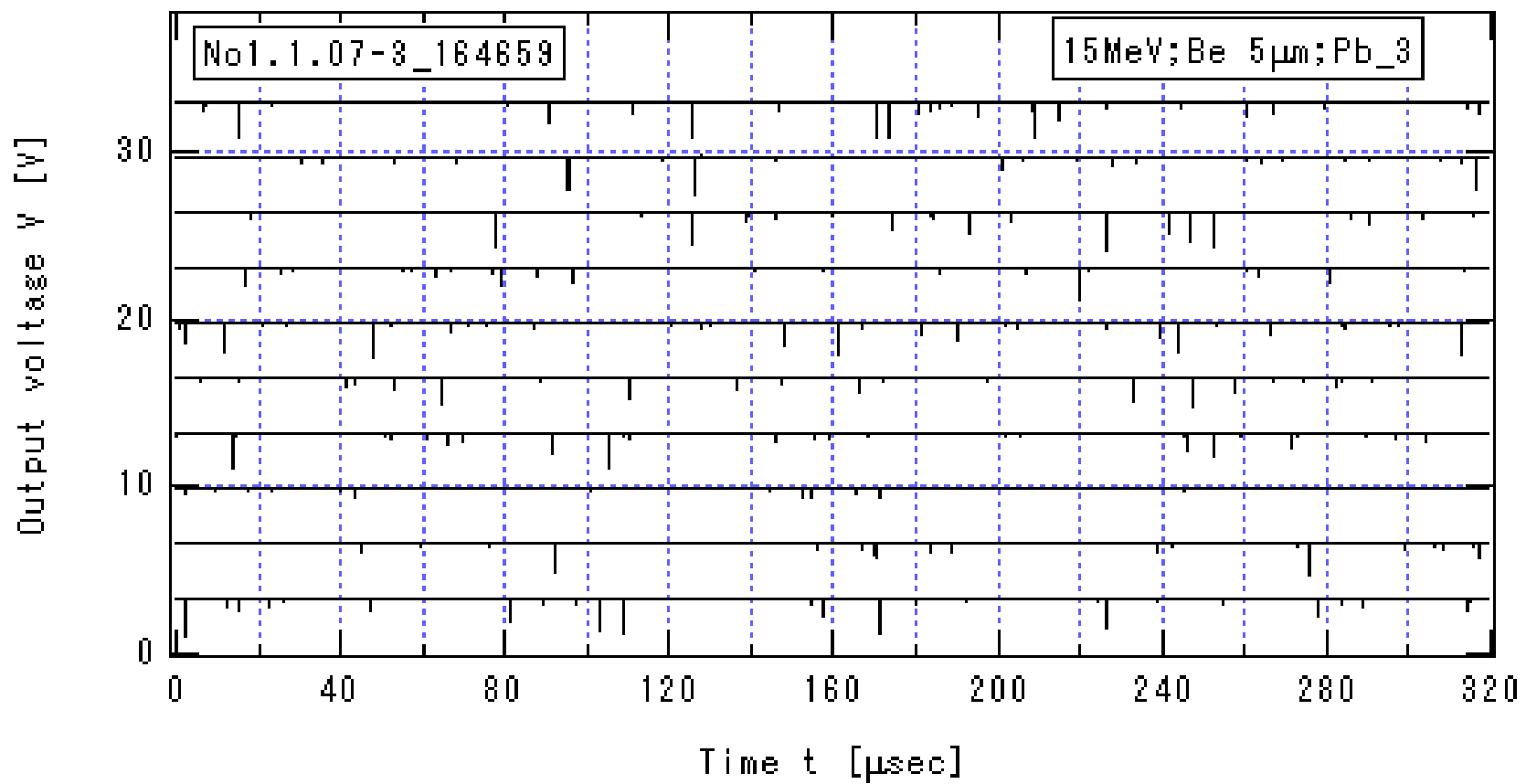


図 3.2.1-11\_3  $I_{\text{He}}=2.05\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3)

$E_{\text{He}}=15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $15\text{cm}$ ,  $\text{HV}=-1.4\text{kV}$

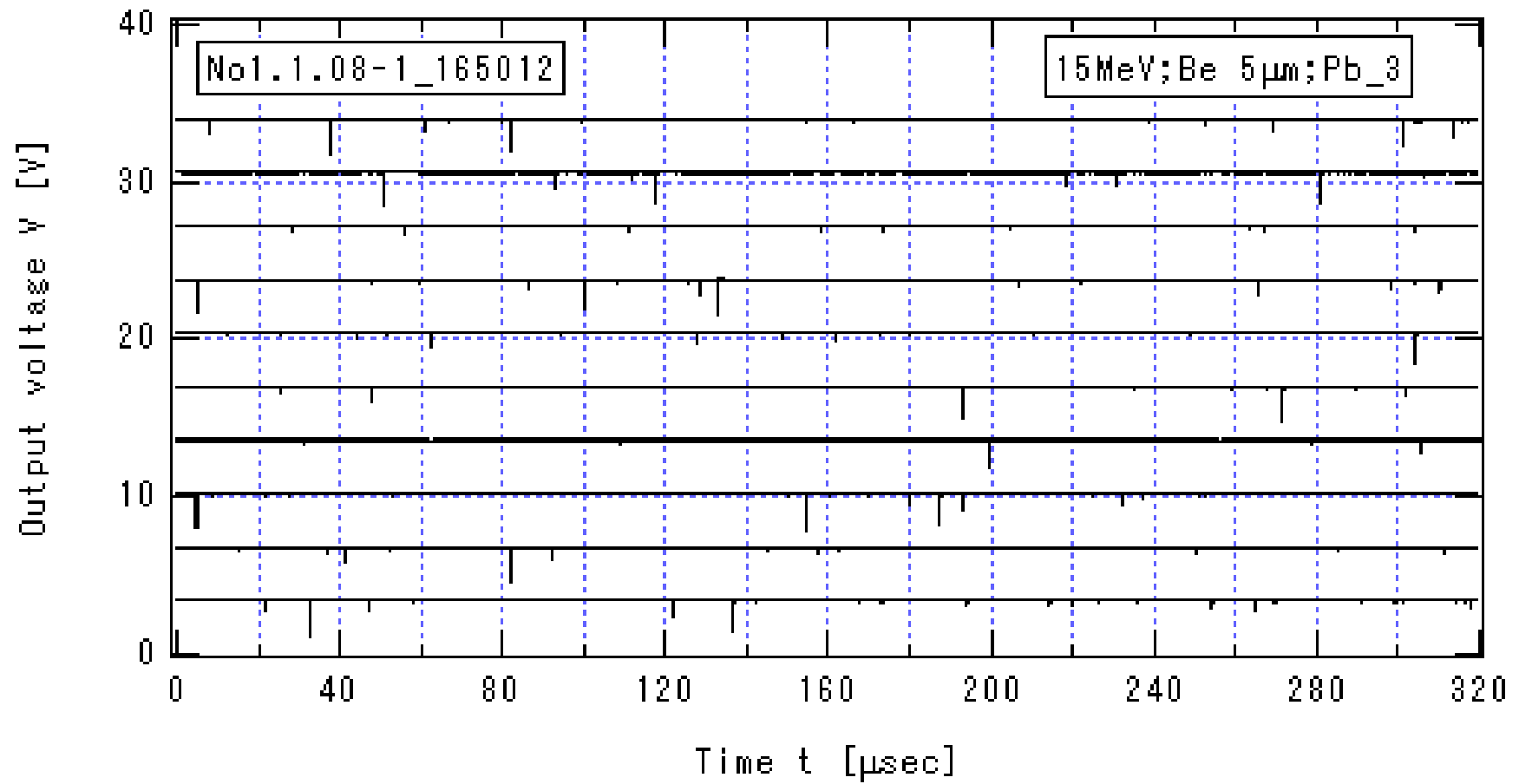


図 3.2.1-12\_1  $I_{\text{He}}=1.00\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $15\text{cm}$ ,  $HV=-1.4\text{kV}$

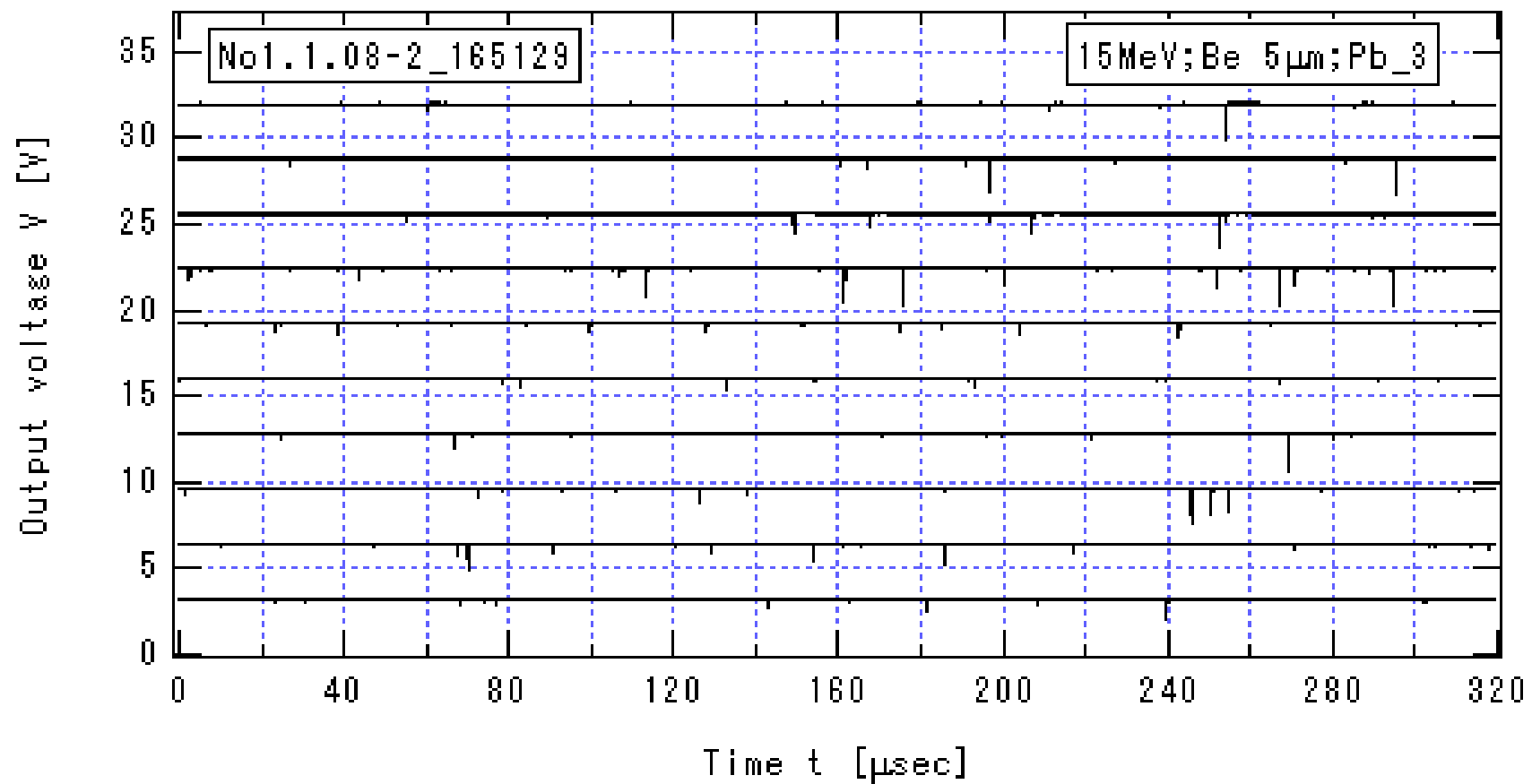


図 3.2.1-12\_2  $I_{\text{He}}=1.00\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $15\text{cm}$ , HV=-1.4 kV

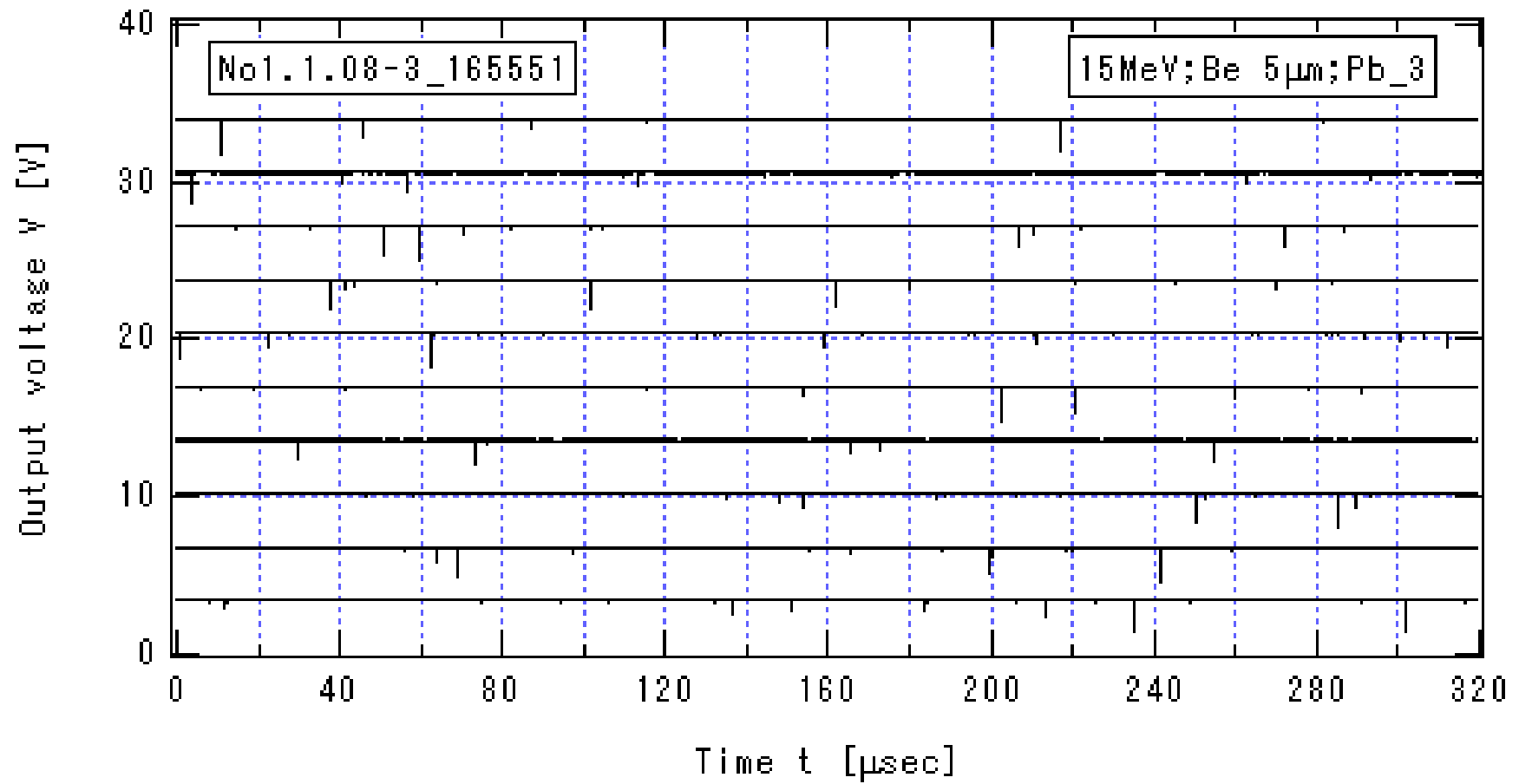


図 3.2-12\_3  $I_{\text{He}}=1.00\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $15\text{cm}$ ,  $\text{HV}=-1.4\text{kV}$



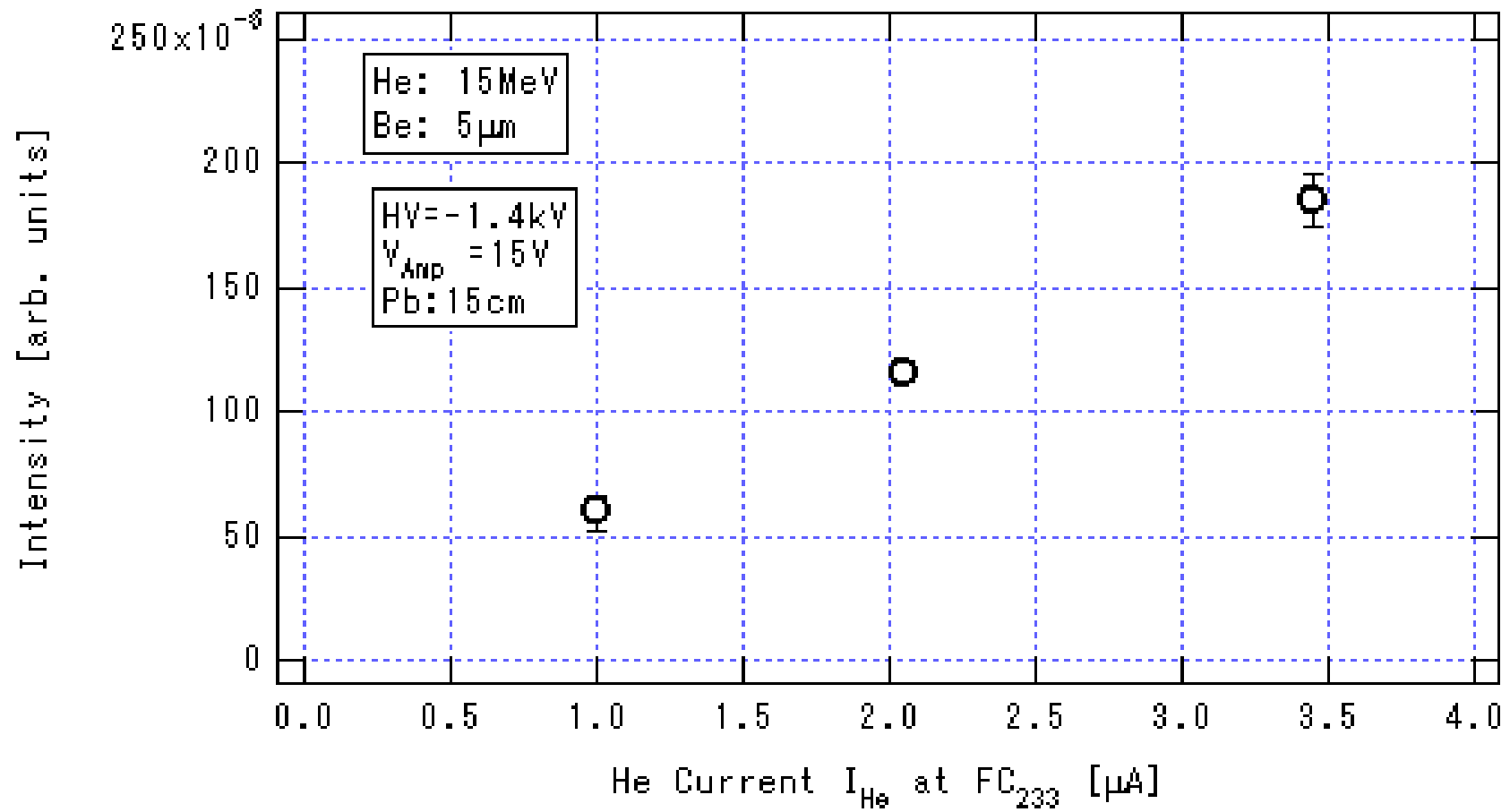


図 3.2.1-13 放射線強度の He 電流依存性

$E_{\text{He}} = 15 \text{ MeV}$ , Be 厚  $5 \mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $15 \text{ cm}$ ,  $\text{HV} = -1.4 \text{ kV}$

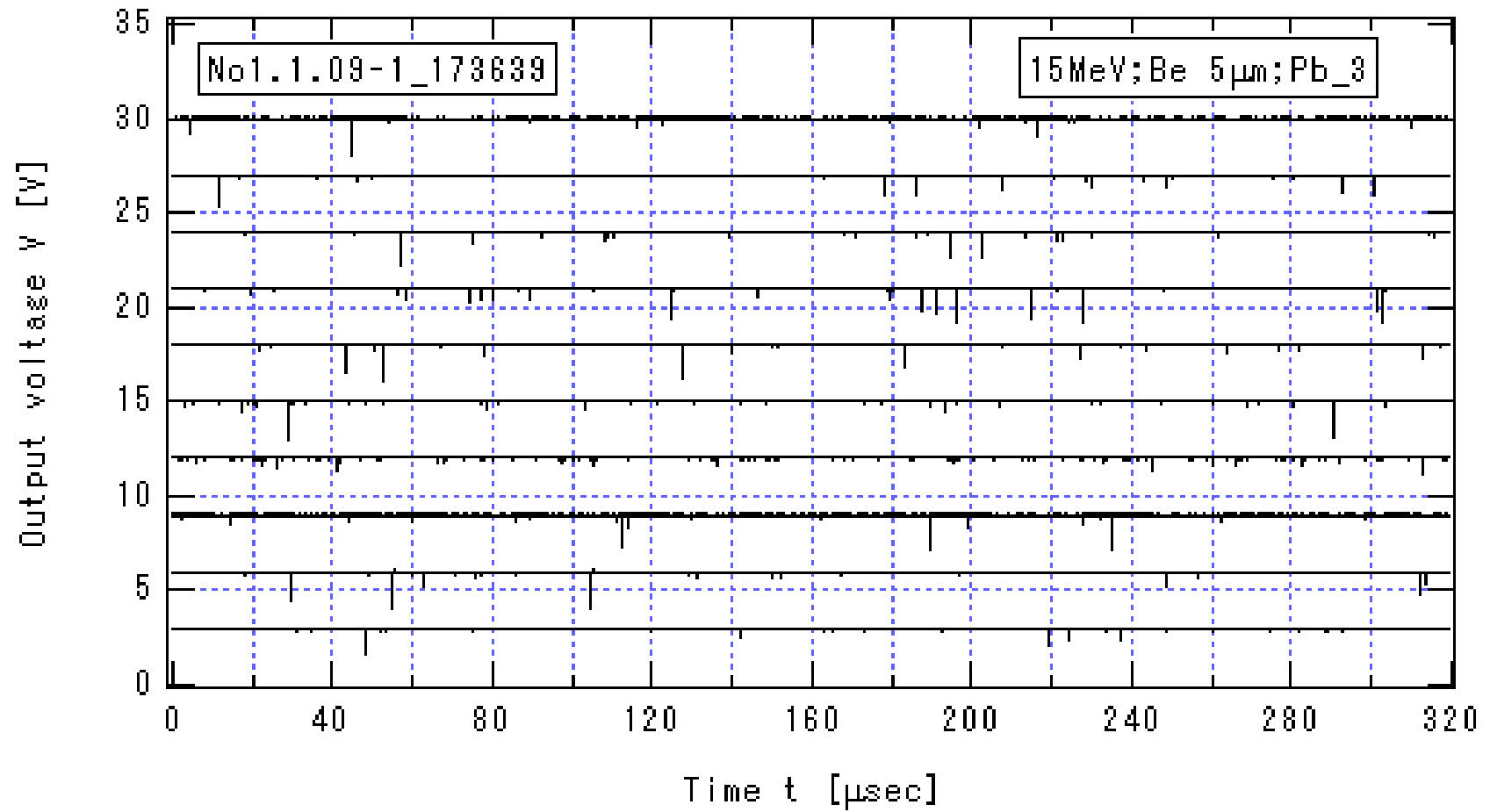


図 3.2.1-14\_1  $I_{\text{He}}=3.33\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $15\text{cm}$ ,  $HV=-1.3\text{kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

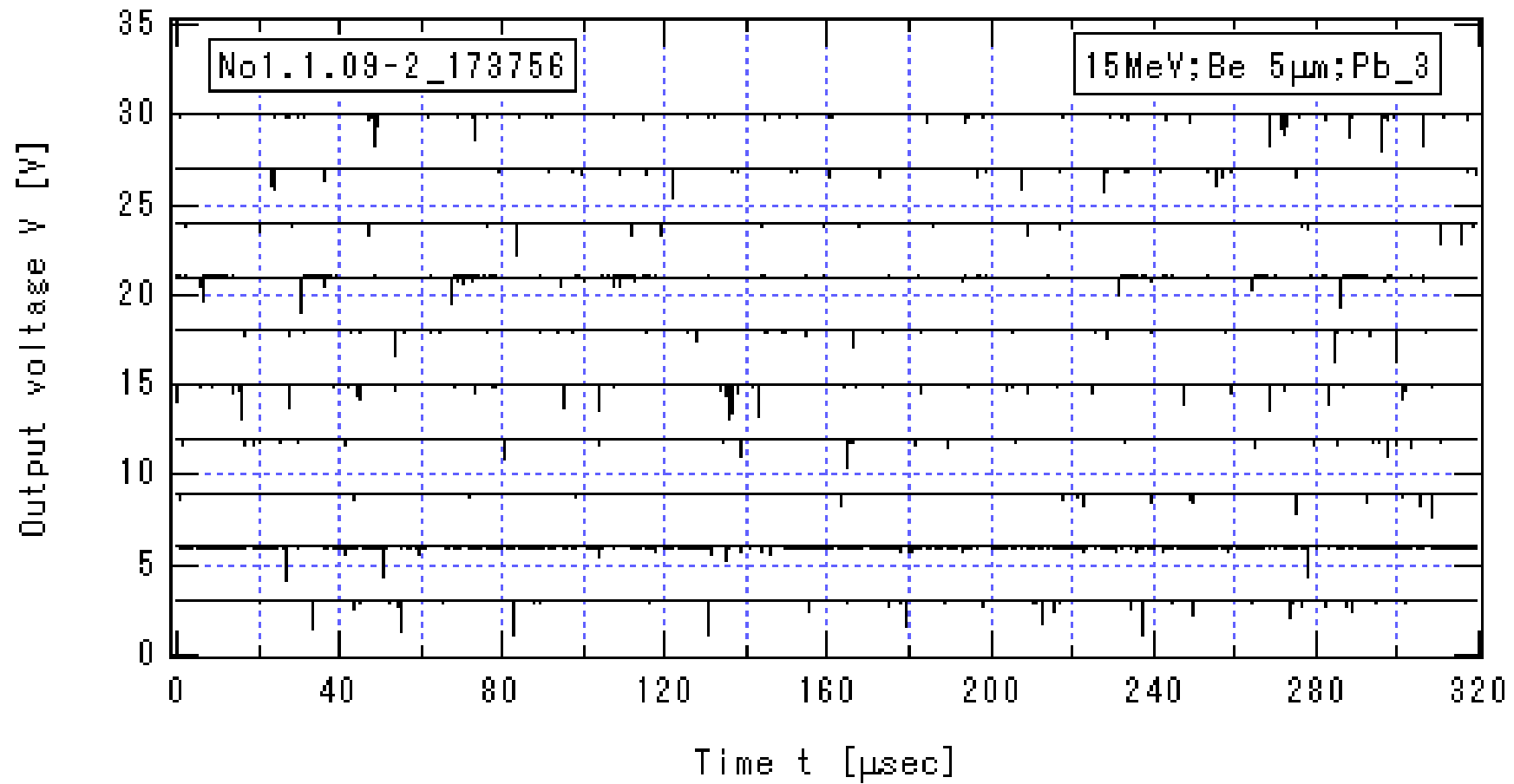


図 3.2.1-14\_2  $I_{\text{He}}=3.33\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $15\text{cm}$ ,  $HV=-1.3\text{kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

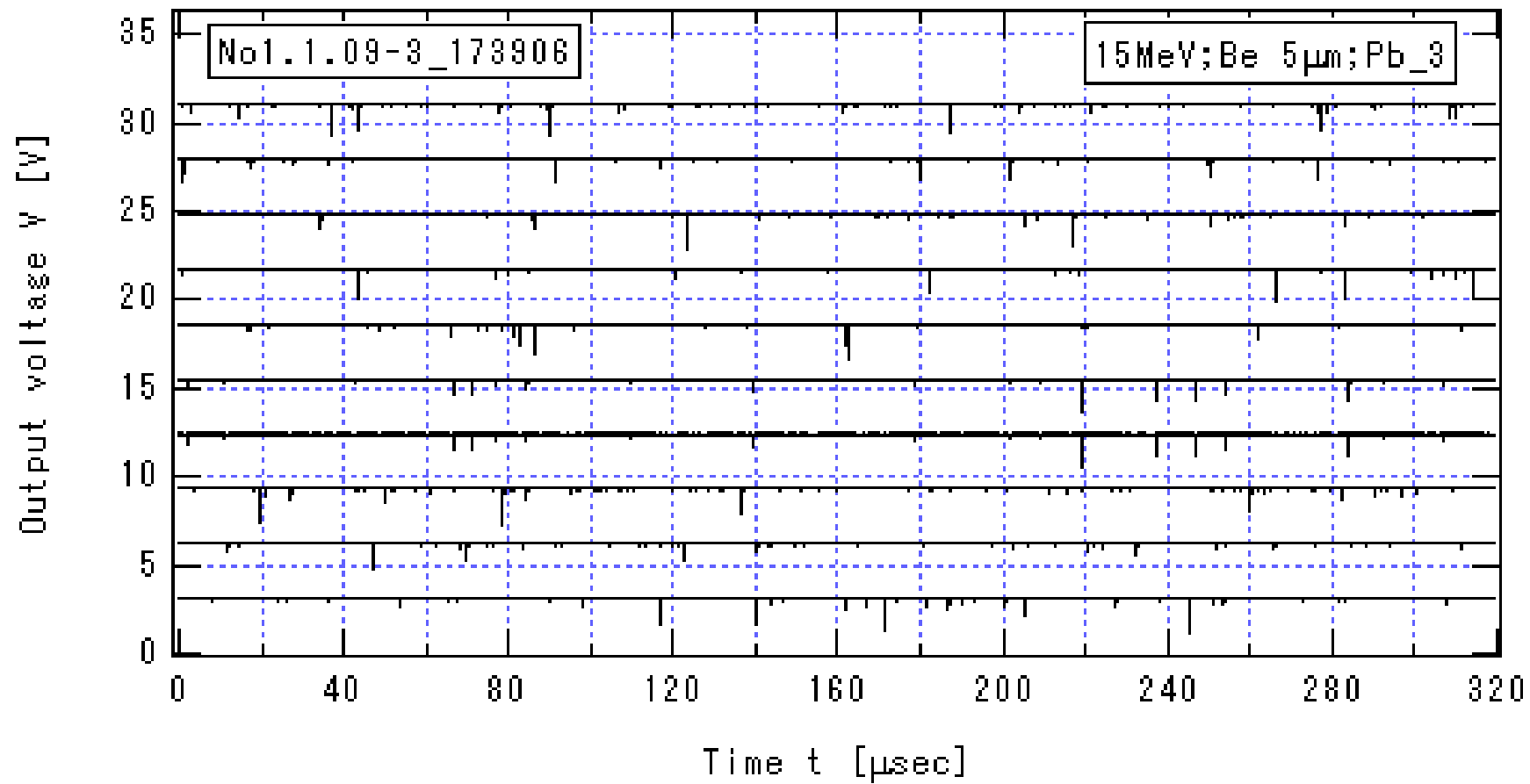


図 3.2.1-14\_3  $I_{\text{He}}=3.33\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $15\text{cm}$ ,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

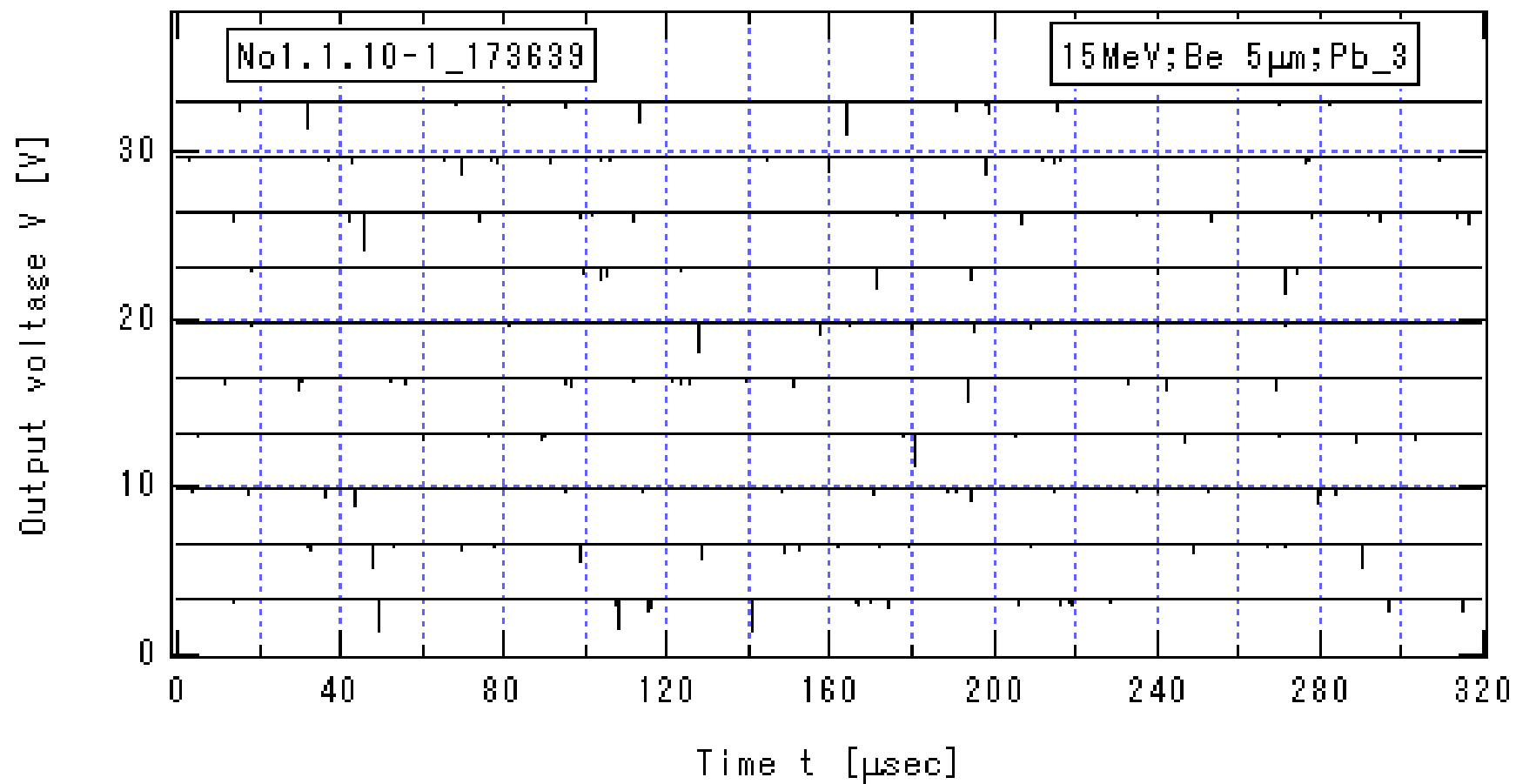


図 3.2.1-15\_1  $I_{\text{He}}=1.96\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $15\text{cm}$ ,  $HV=-1.3\text{kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

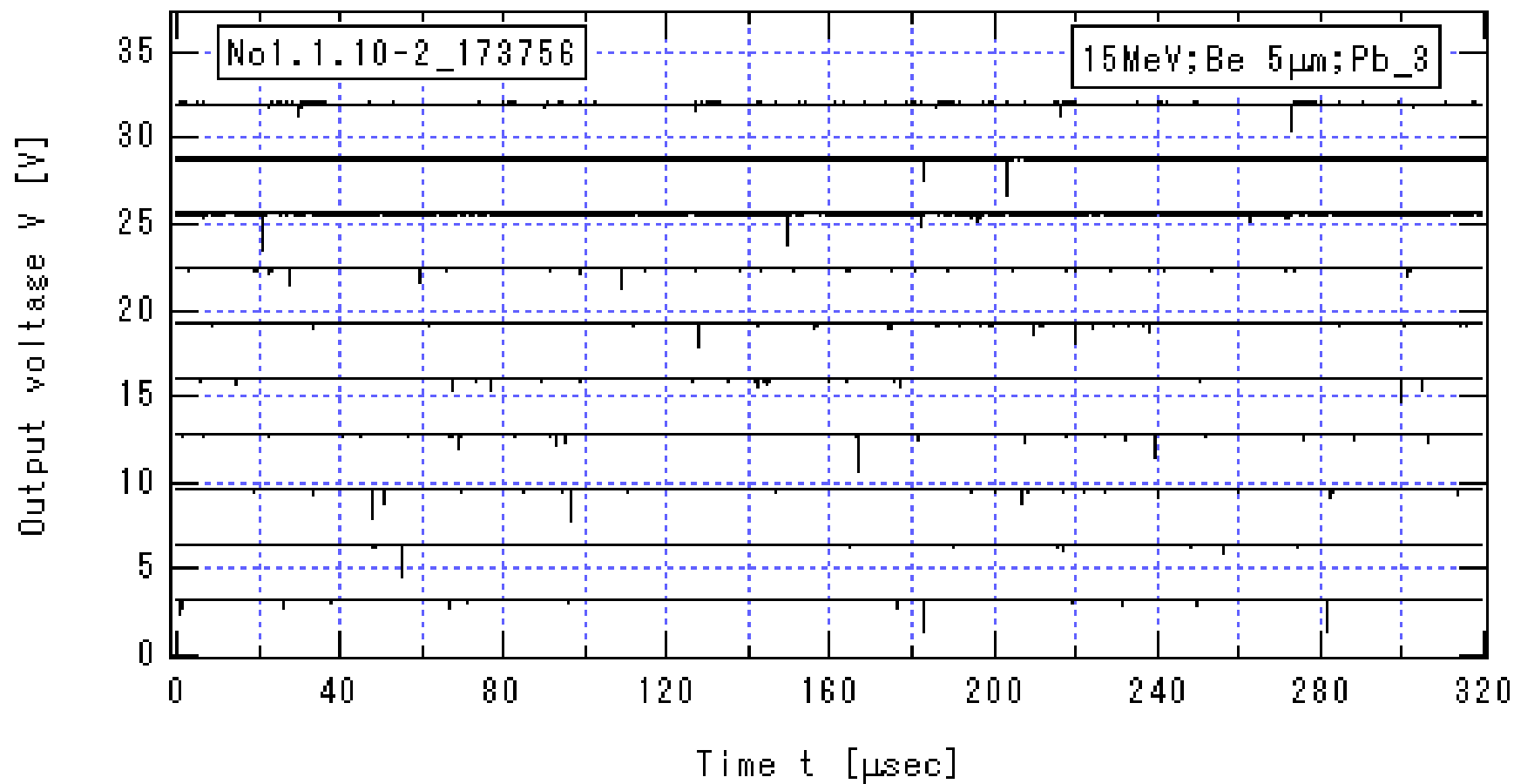


図 3.2.1-15\_2  $I_{\text{He}}=1.96\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $15\text{cm}$ ,  $HV=-1.3\text{kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

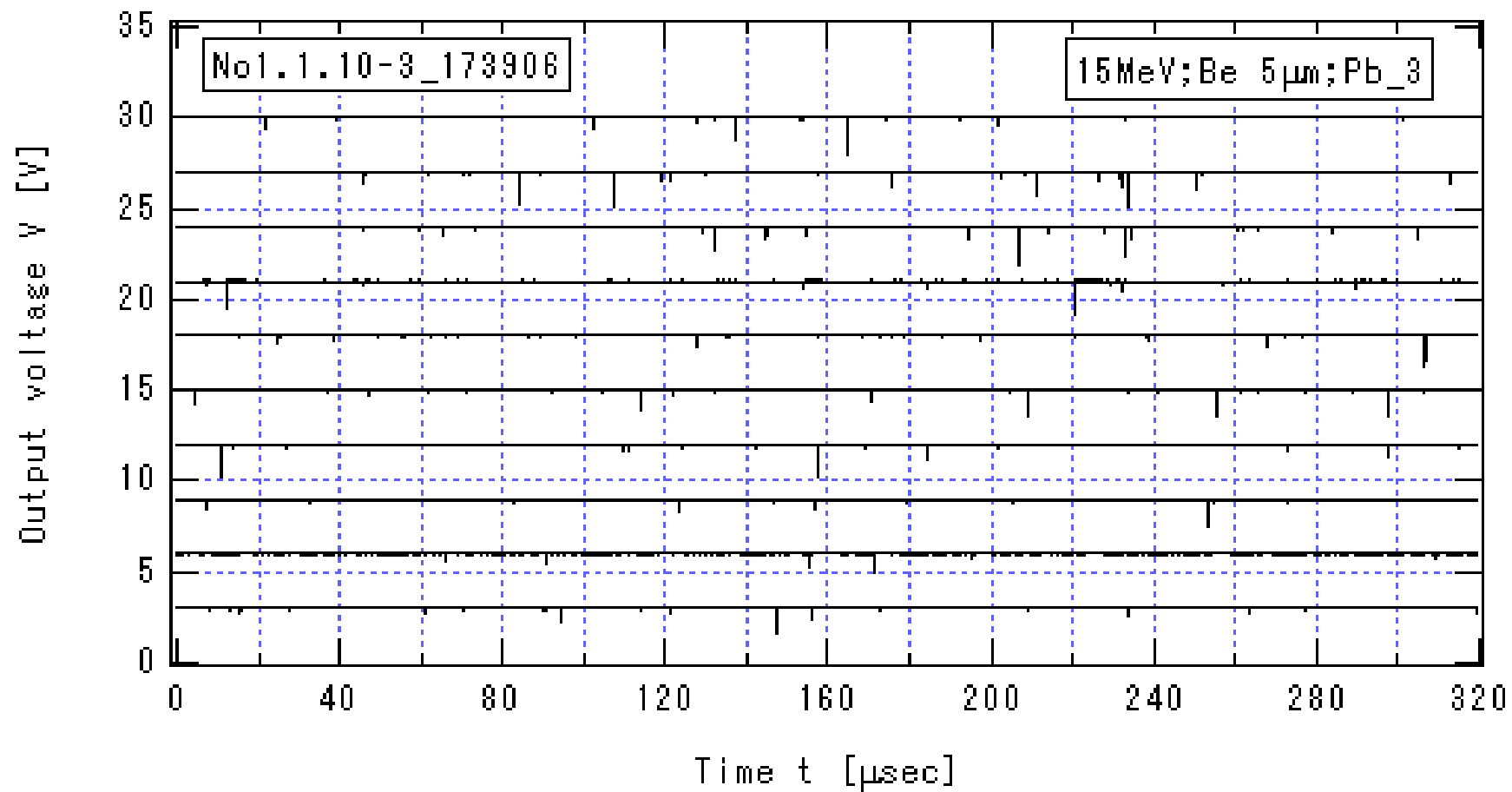


図 3.2.1-15\_3  $I_{\text{He}}=1.96\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $15\text{cm}$ ,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

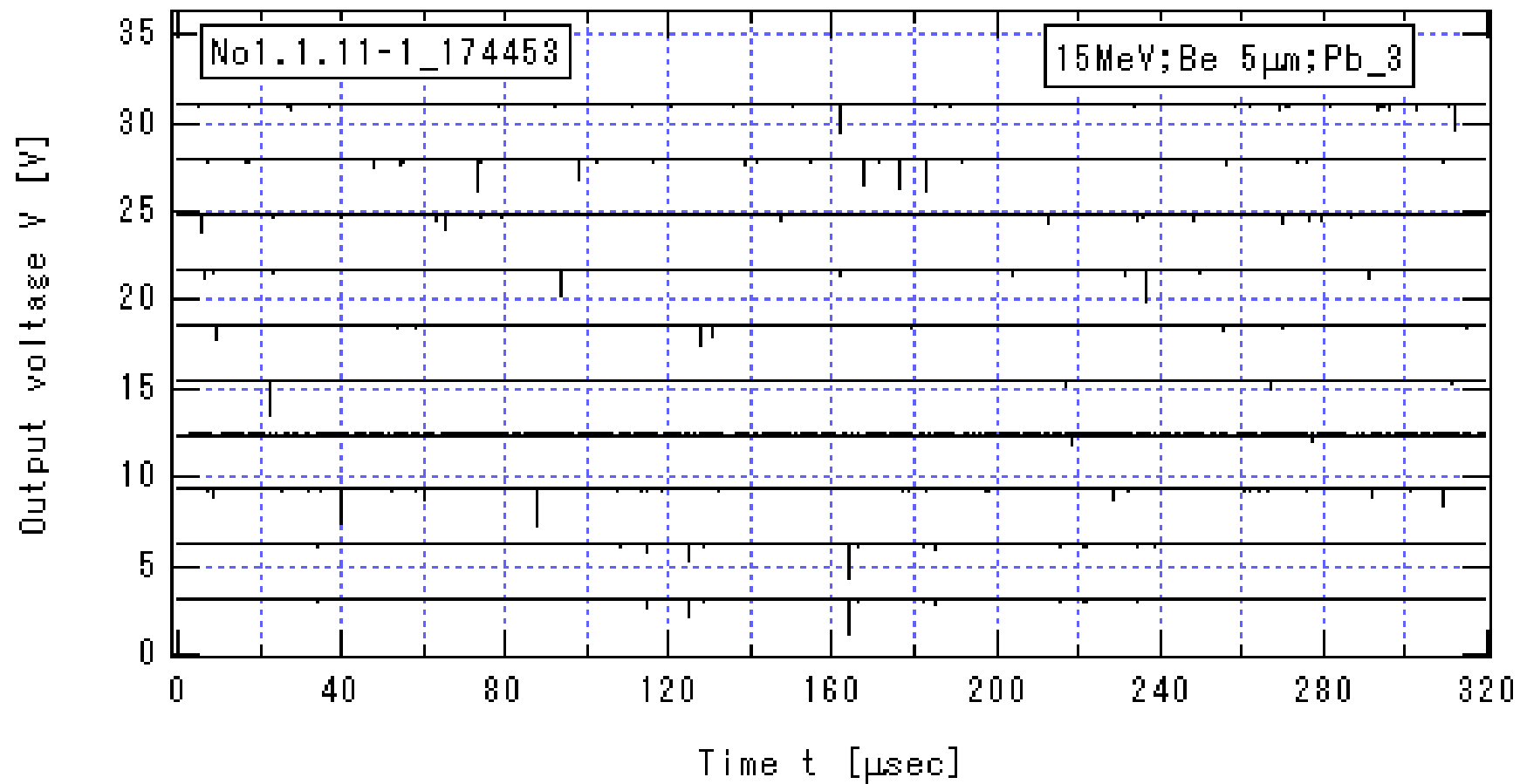


図 3.2.1-16\_1  $I_{\text{He}}=1.07\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $15\text{cm}$ ,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$



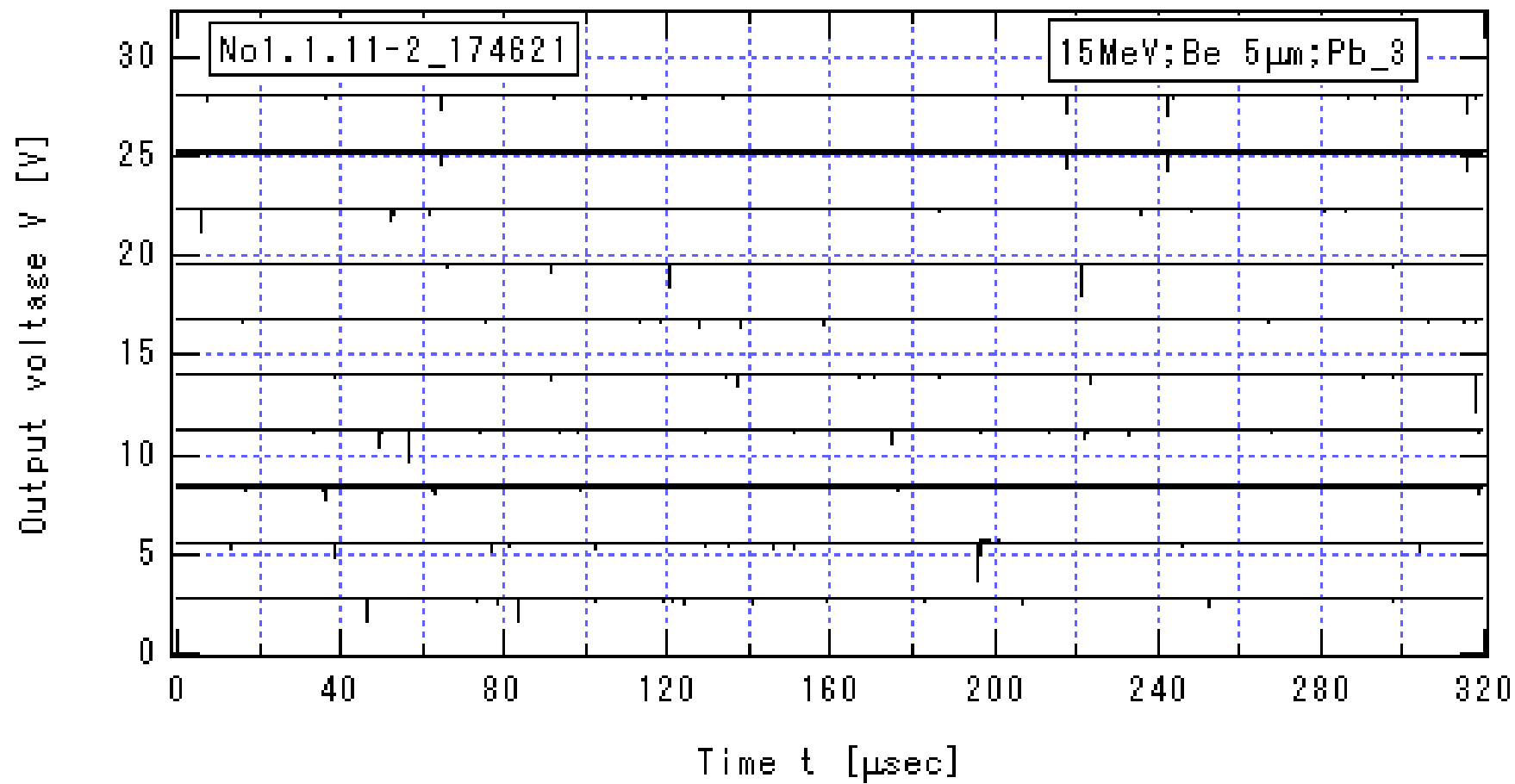


図 3.2.1-16\_2  $I_{\text{He}}=1.07\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $15\text{cm}$ ,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

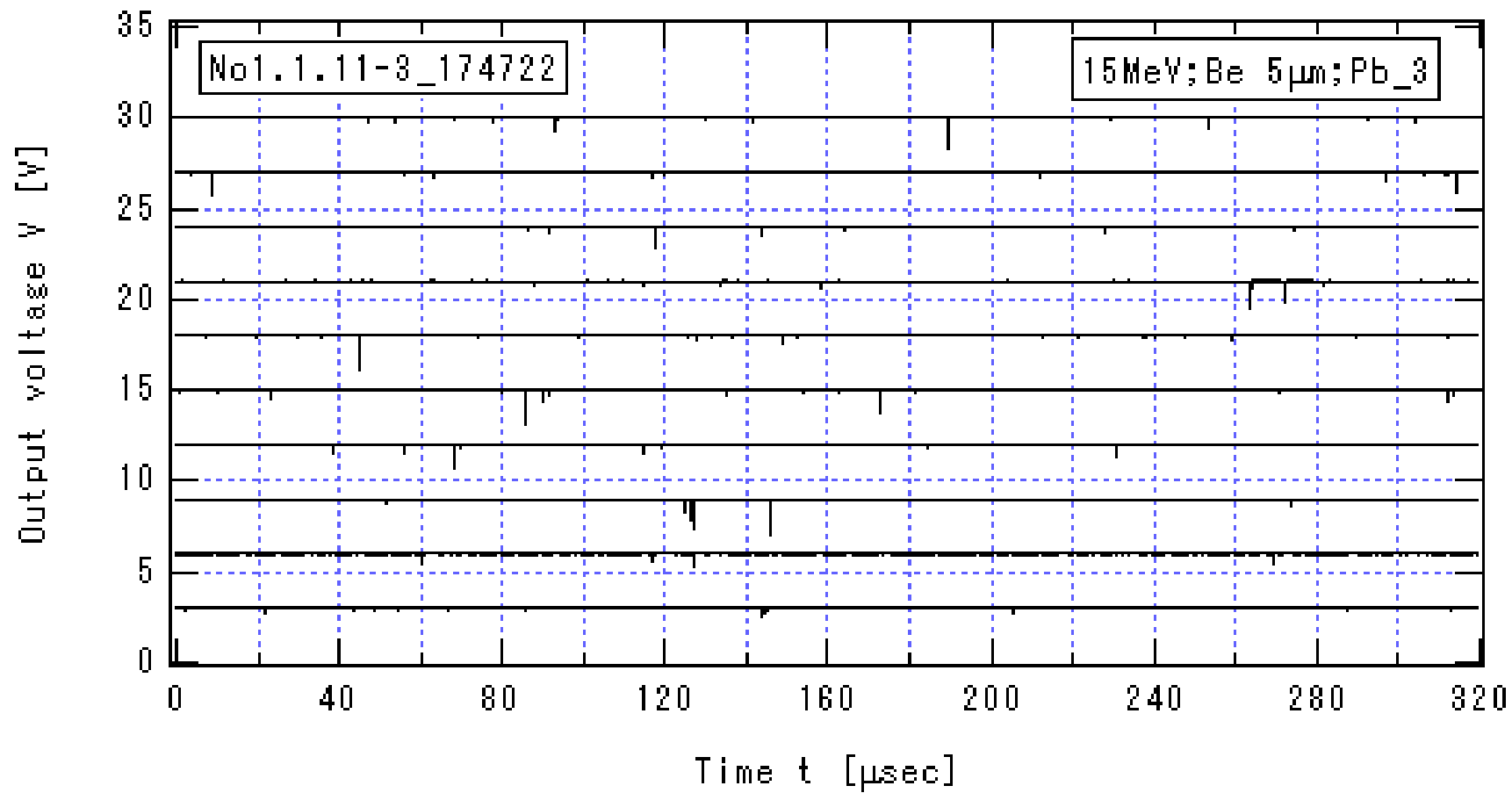


図 3.2.1-16\_3  $I_{\text{He}}=1.07\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $15\text{cm}$ ,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

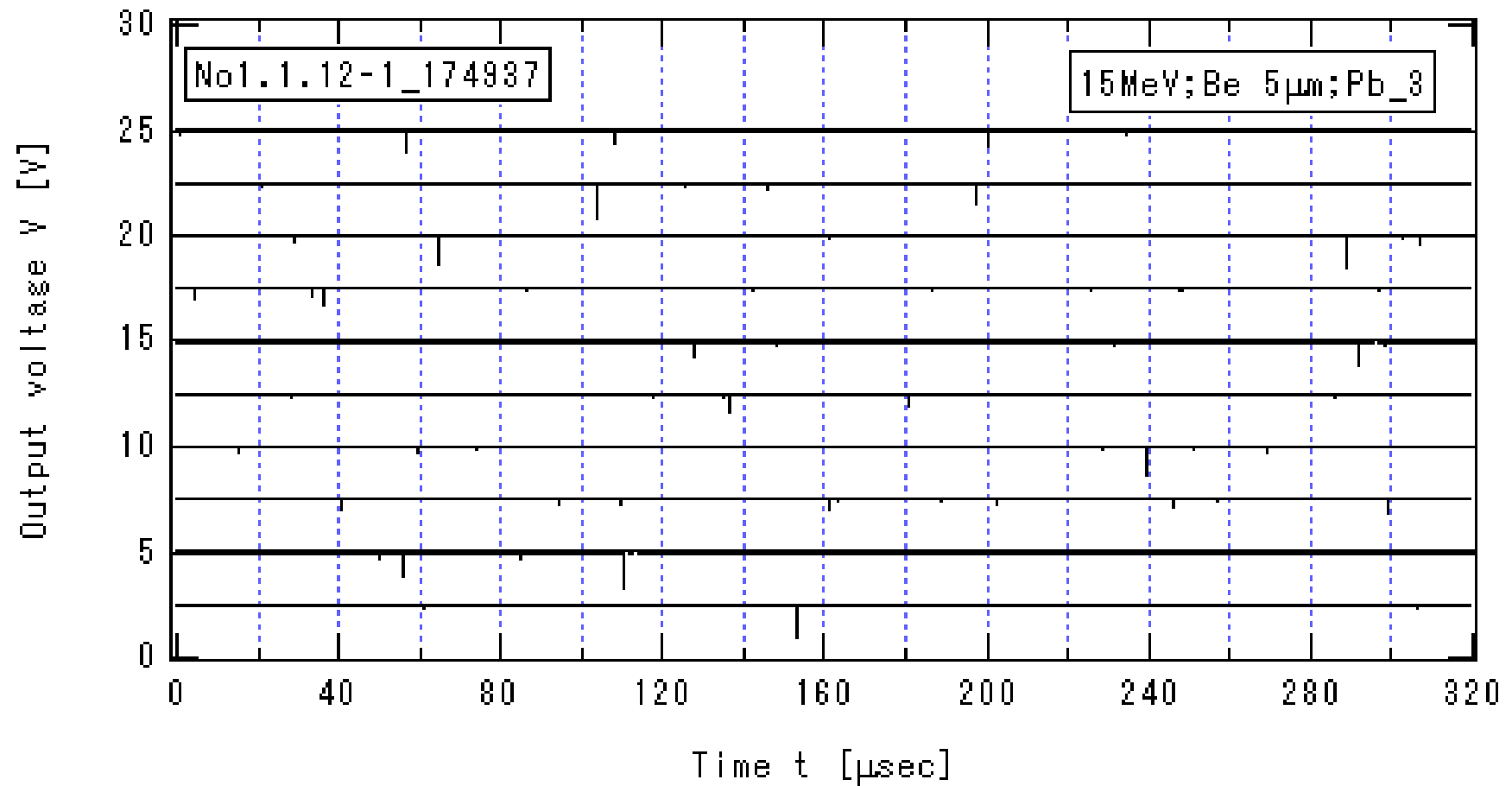


図 3.2.1-17\_1  $I_{\text{He}}=0.68\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $15\text{cm}$ ,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

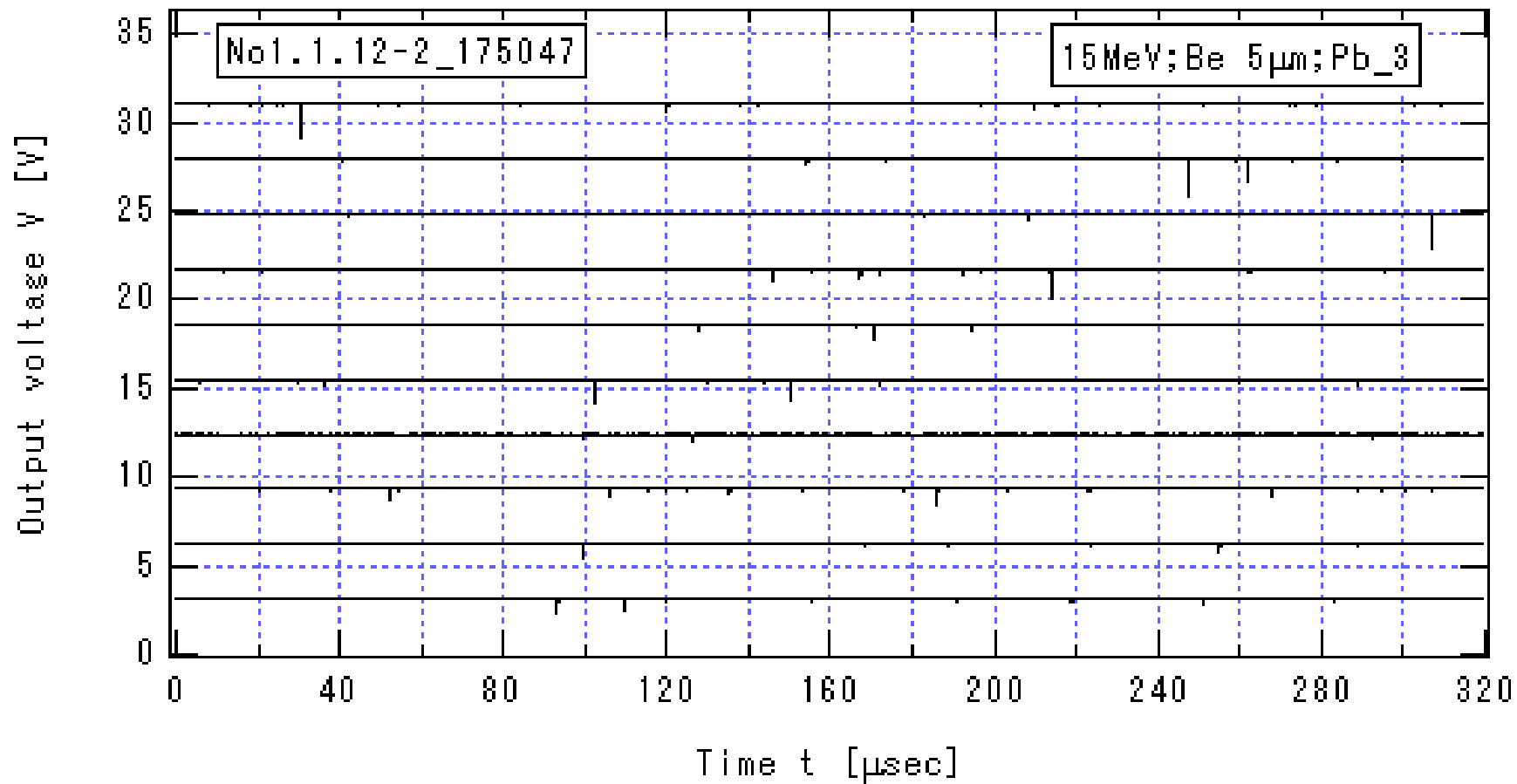


図 3.2.1-17\_2  $I_{\text{He}}=0.68\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2)  
 $E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $15\text{cm}$ ,  $HV=-1.3\text{ k V}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

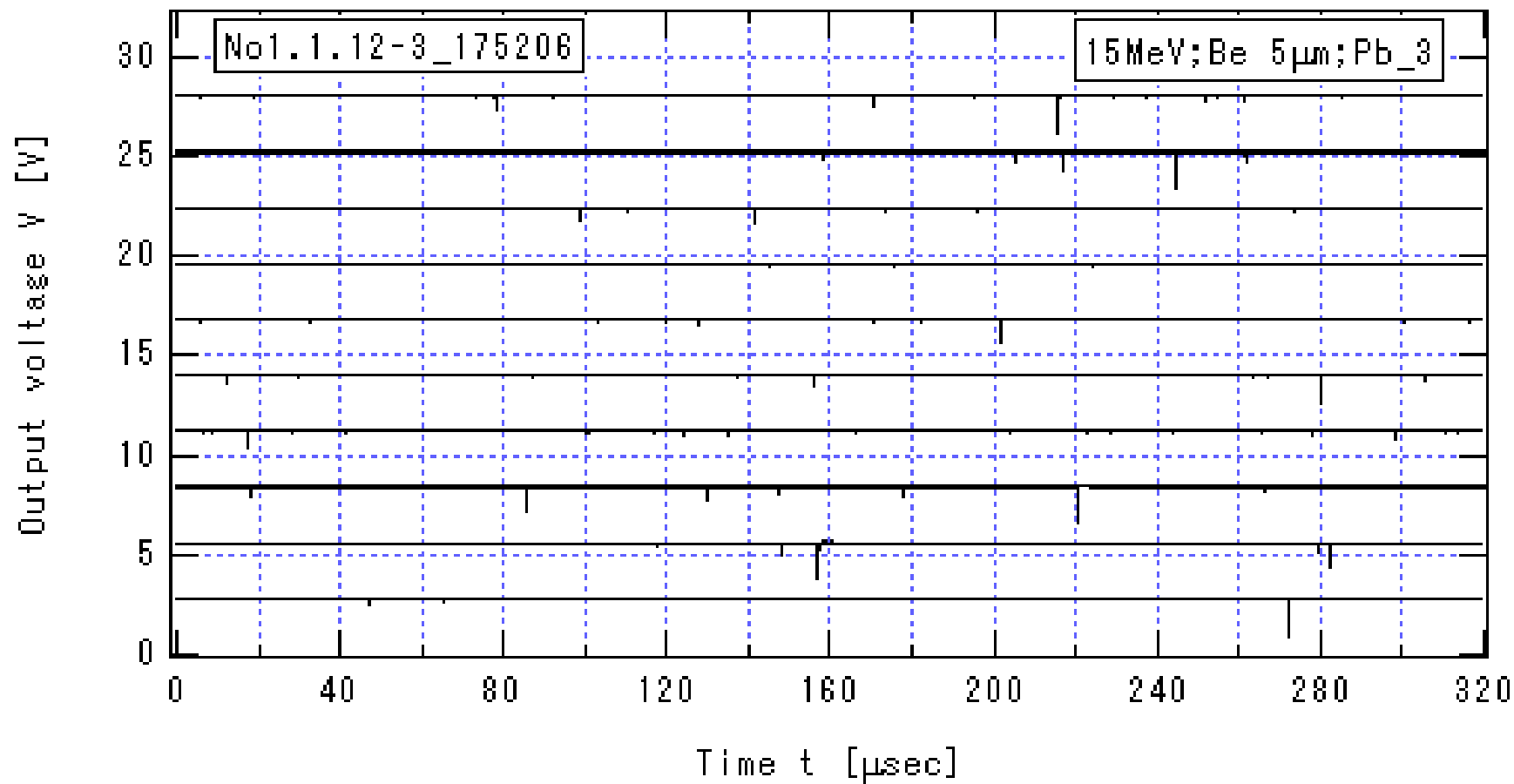


図 3.2.1-17\_3  $I_{\text{He}}=0.68\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $15\text{cm}$ ,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

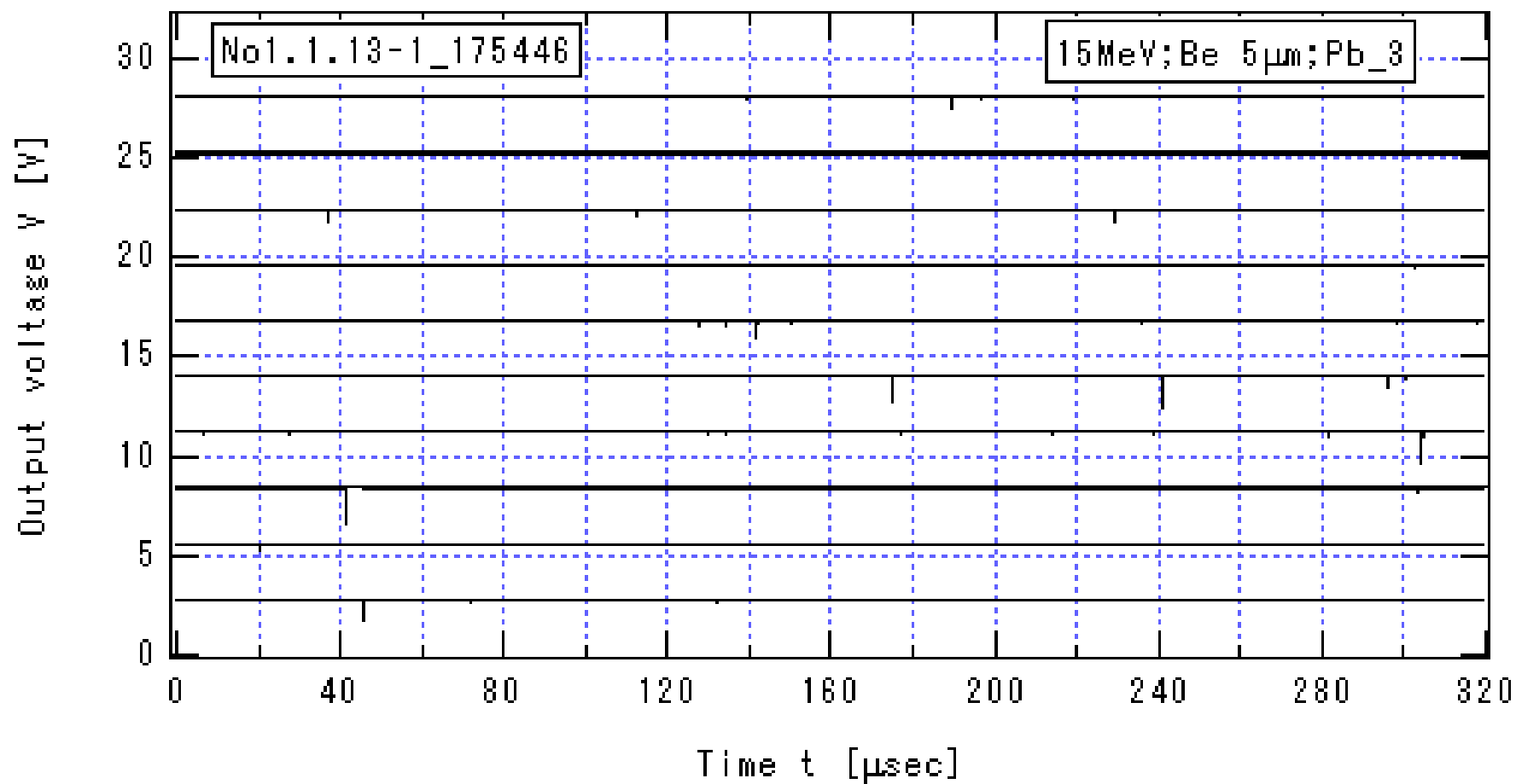


図 3.2-18\_1  $I_{\text{He}}=390\text{nA}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $15\text{cm}$ ,  $HV=-1.3\text{kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

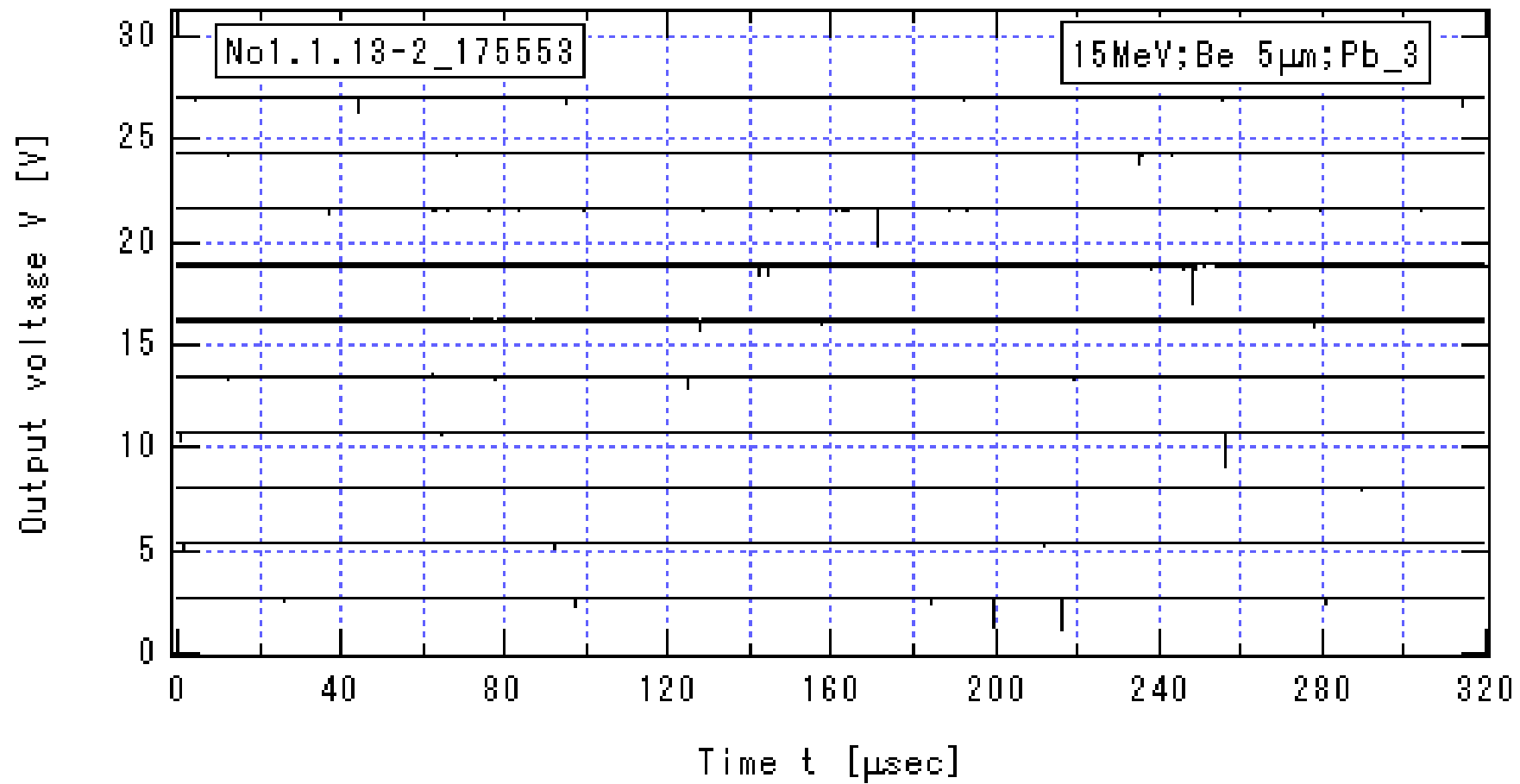


図 3.2.1-18\_2  $I_{He}=390nA$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2)

$E_{He} = 15MeV$ , Be 厚  $5\mu m$ , Pb の厚さ  $15cm$ ,  $HV=-1.3 kV$ ,  $V_{Amp}=13V$

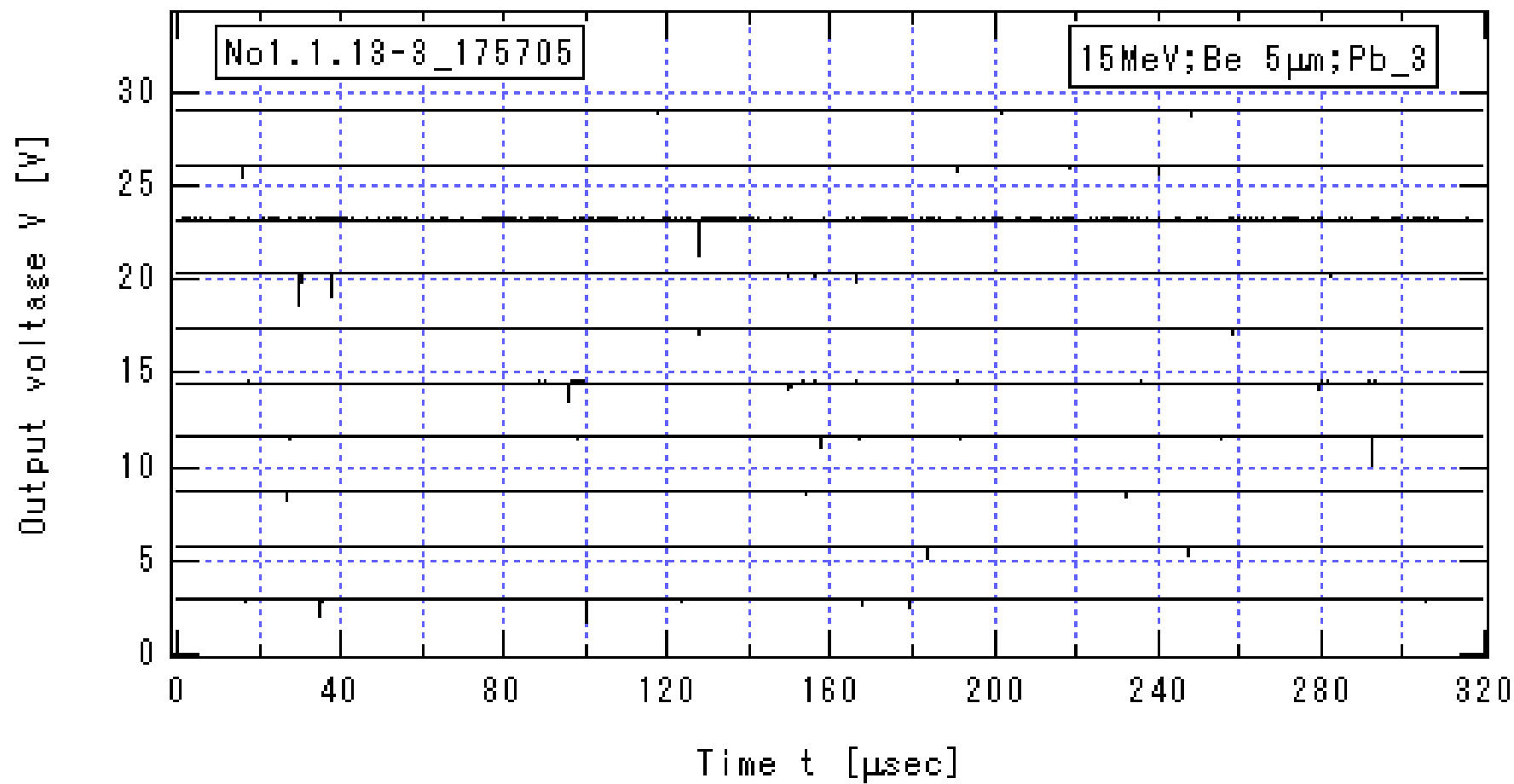


図 3.2.1-18\_3  $I_{\text{He}}=390\text{nA}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $15\text{cm}$ ,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$



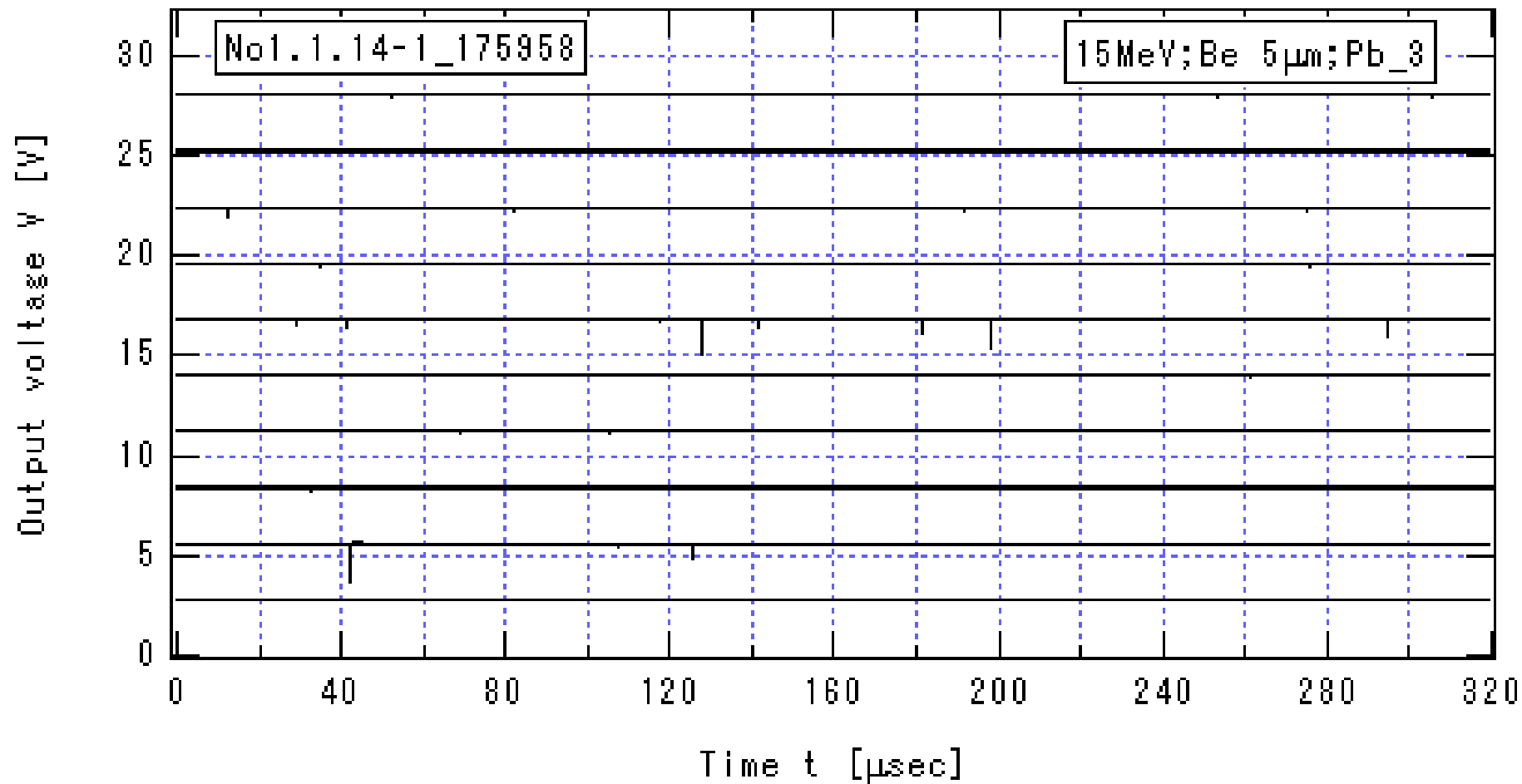


図 3.2.1-19\_1  $I_{\text{He}}=210\text{nA}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $15\text{cm}$ ,  $HV=-1.3\text{kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

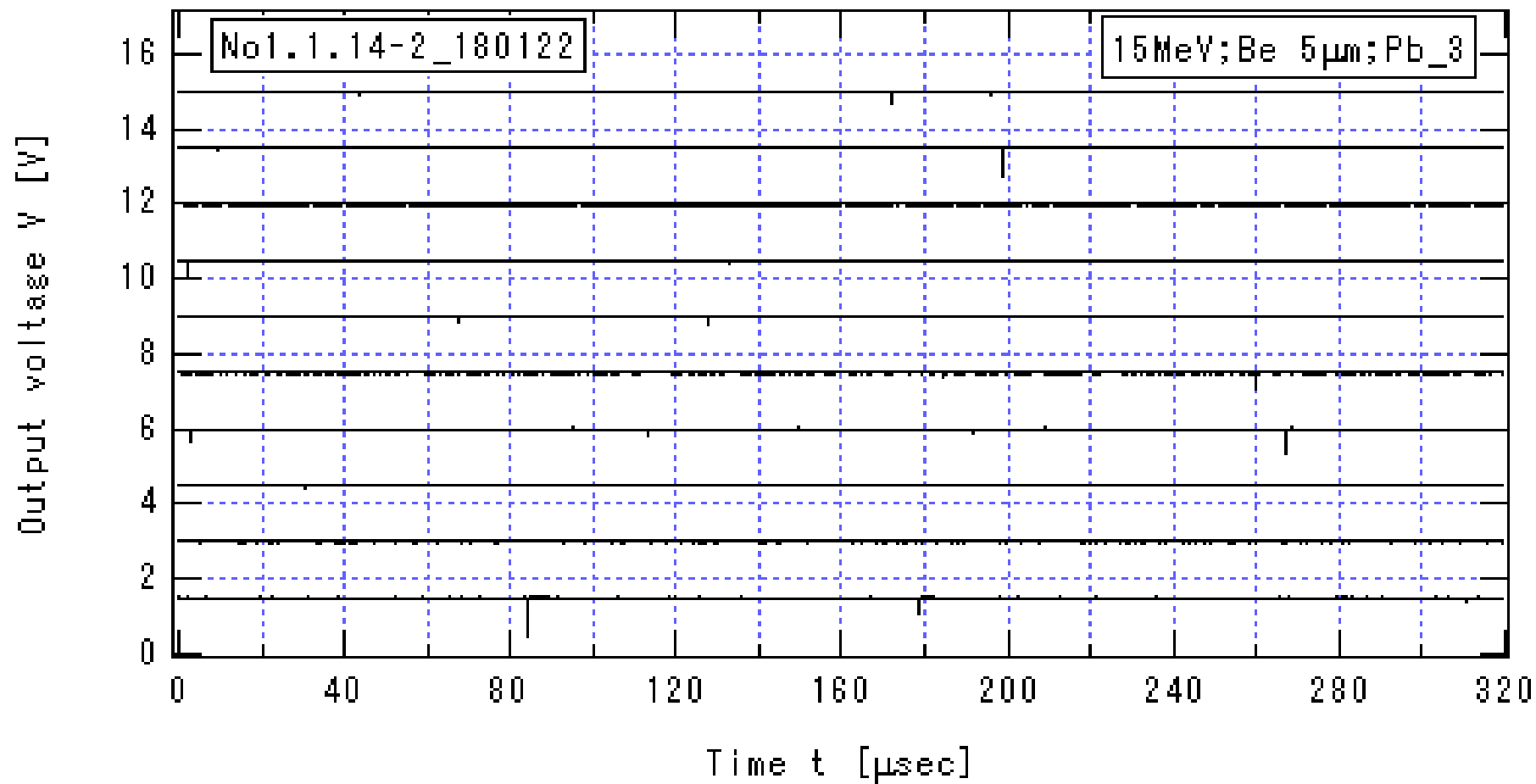


図 3.2.1-19\_2  $I_{\text{He}}=210\text{nA}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $15\text{cm}$ ,  $HV=-1.3\text{kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

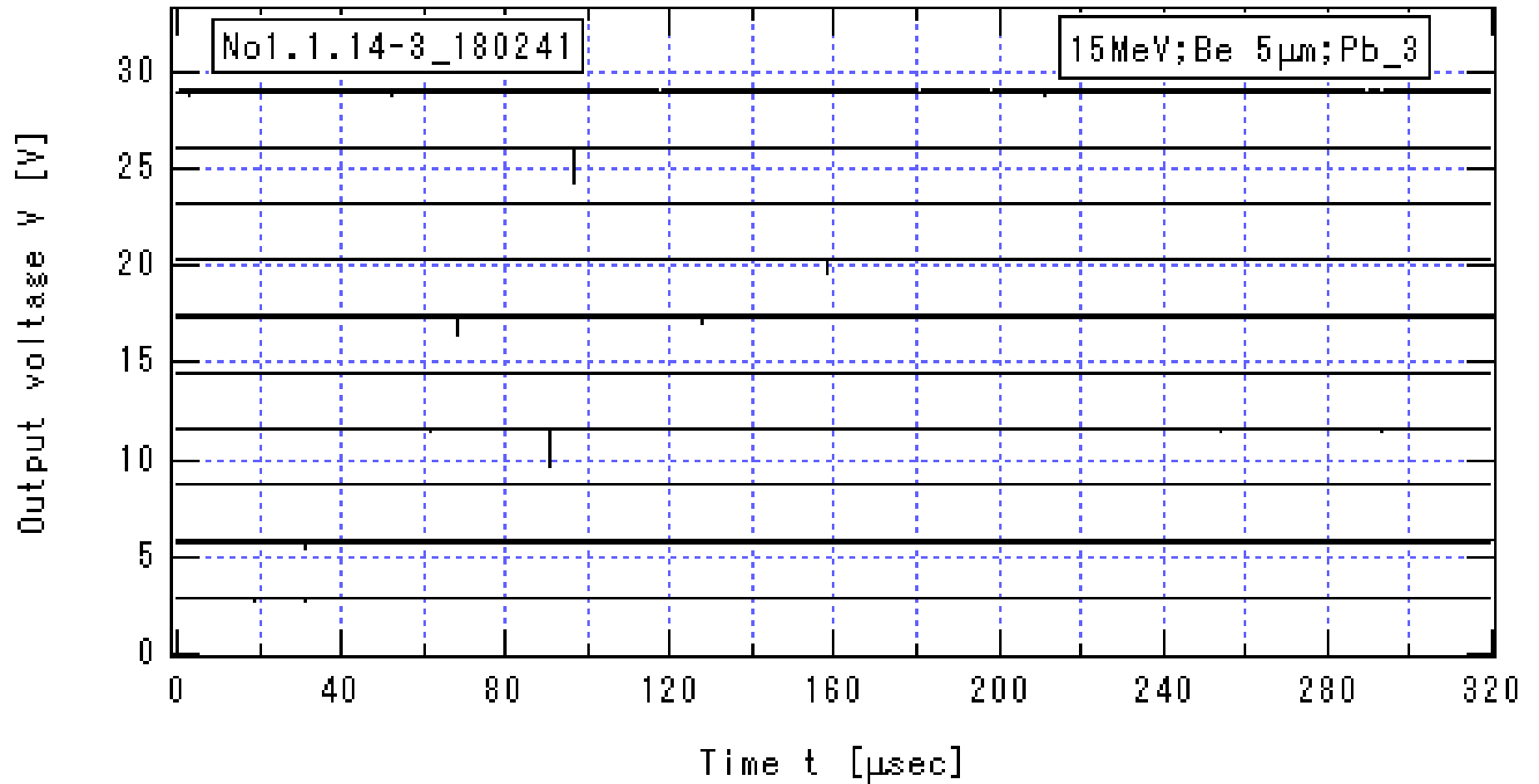


図 3.2.1-19\_3  $I_{He}=210\text{nA}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3)

$E_{He} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $15\text{cm}$ ,  $HV=-1.3\text{kV}$ ,  $V_{Amp}=13\text{V}$

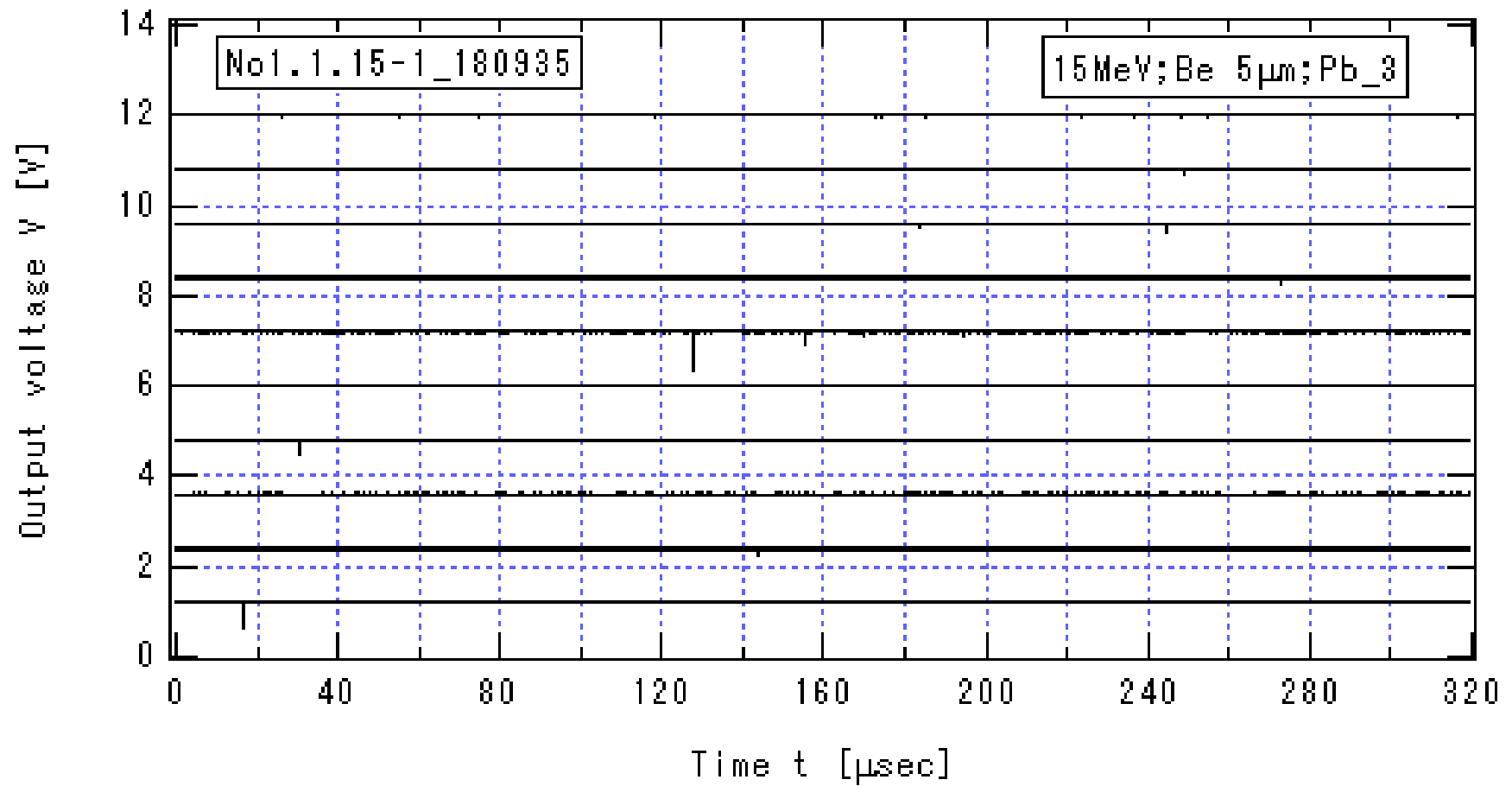


図 3.2.1-20\_1  $I_{\text{He}}=95.4\text{nA}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $15\text{cm}$ ,  $HV=-1.3\text{kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

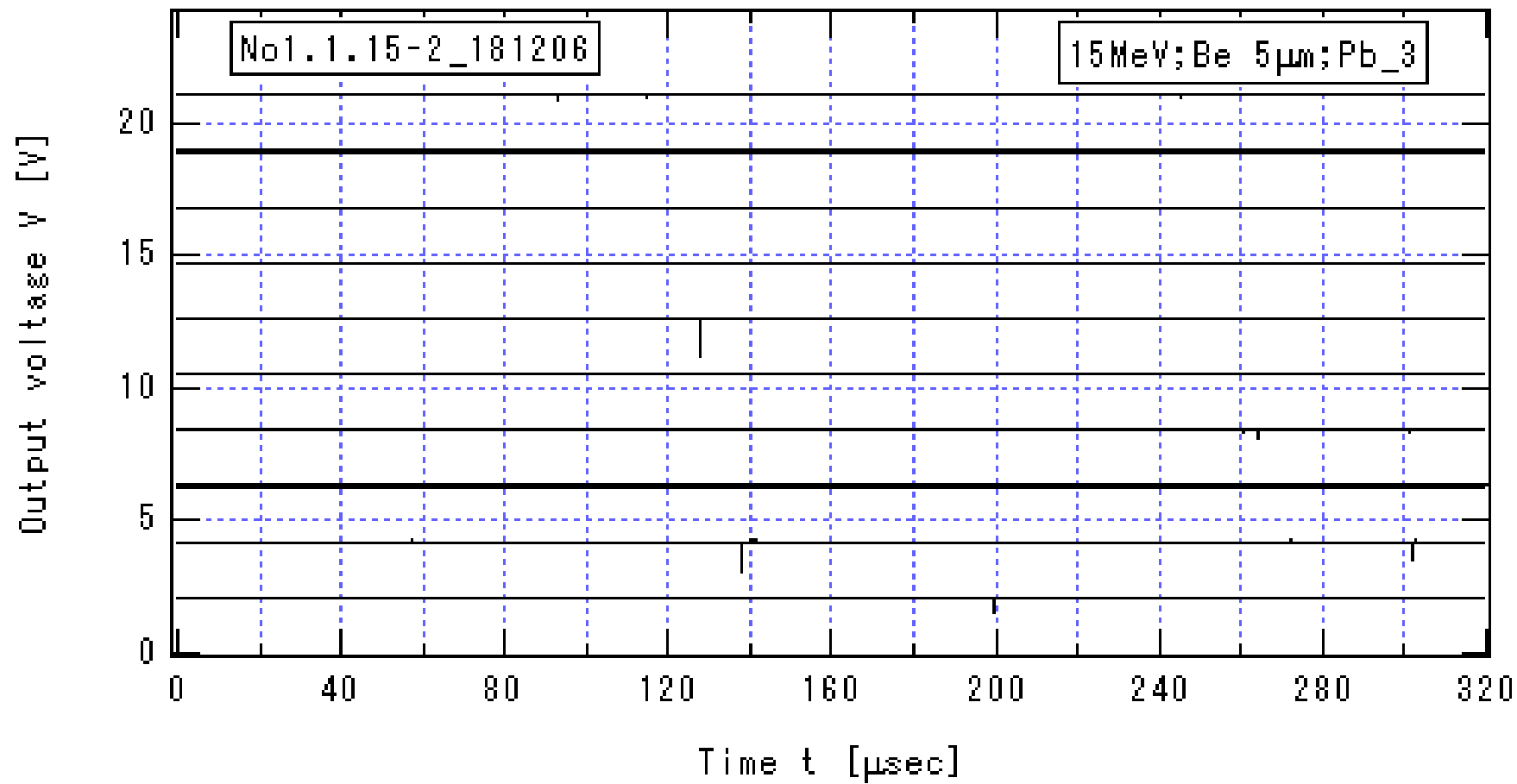


図 3.2.1-20\_2  $I_{\text{He}}=95.4\text{nA}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $15\text{cm}$ ,  $HV=-1.3\text{kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

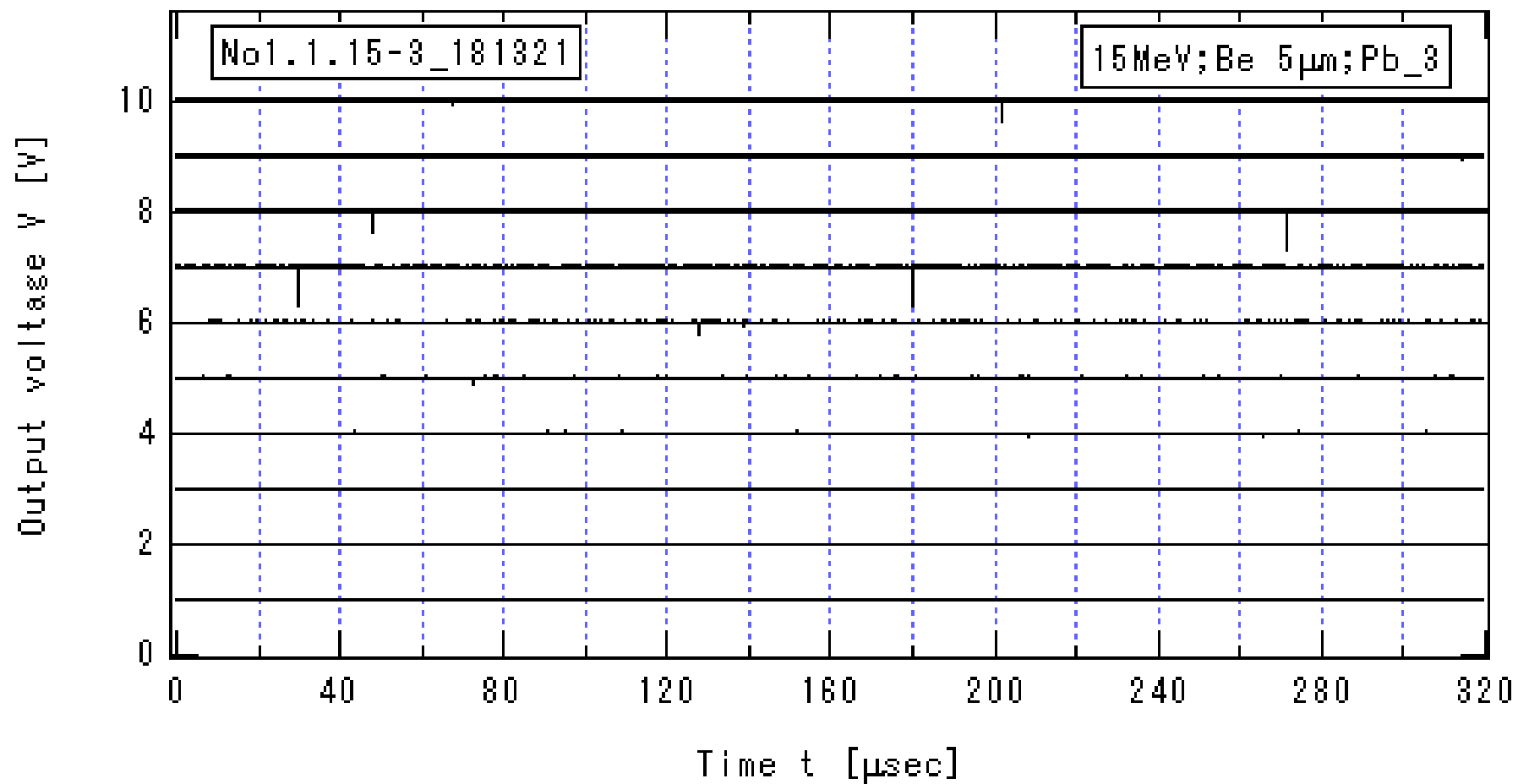


図 3.2.1-20\_3  $I_{\text{He}}=95.4\text{nA}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $15\text{cm}$ ,  $HV=-1.3\text{kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

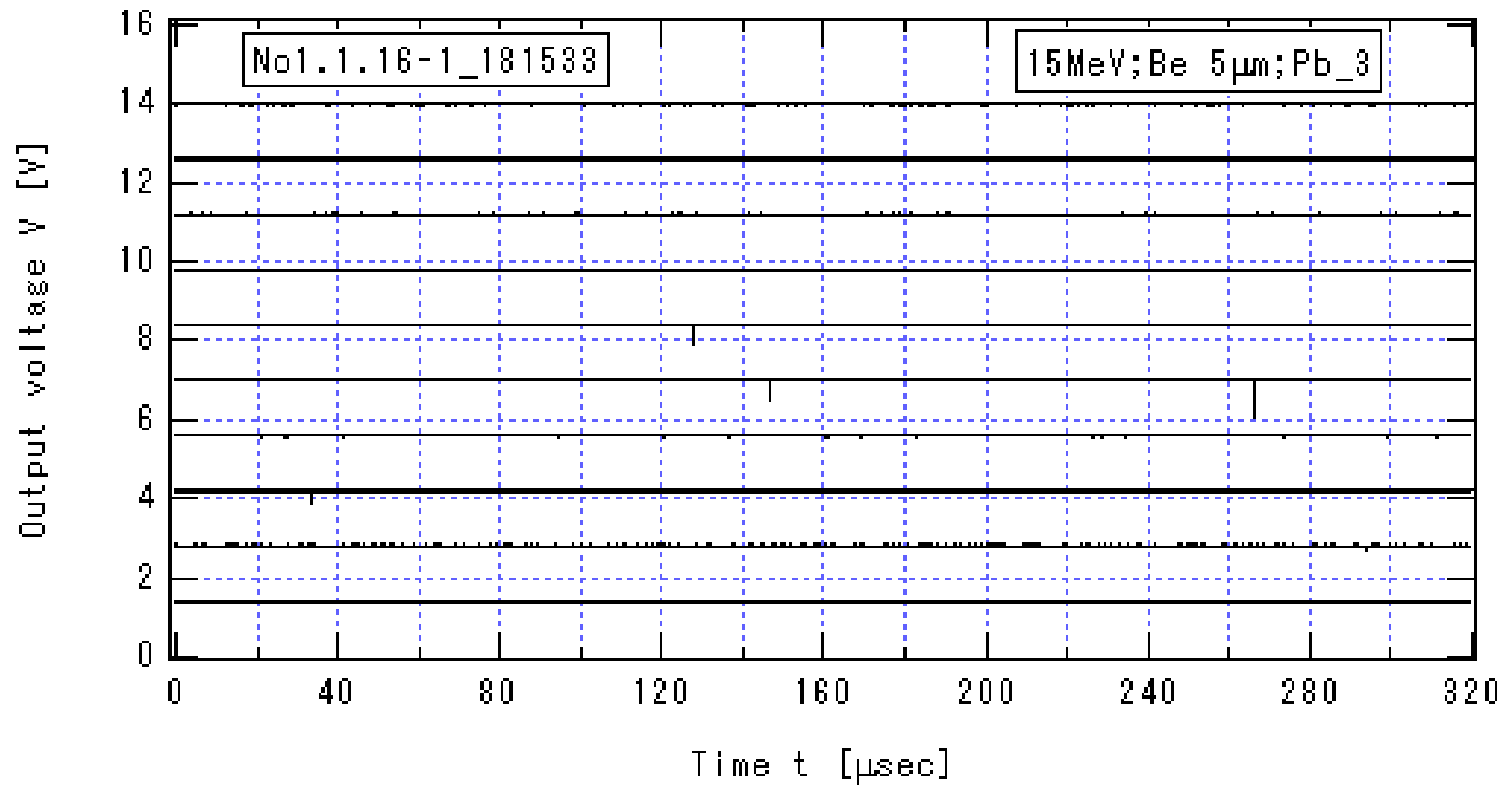


図 3.2.1-21\_1  $I_{\text{He}}=43.8\text{nA}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $15\text{cm}$ ,  $HV=-1.3\text{kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

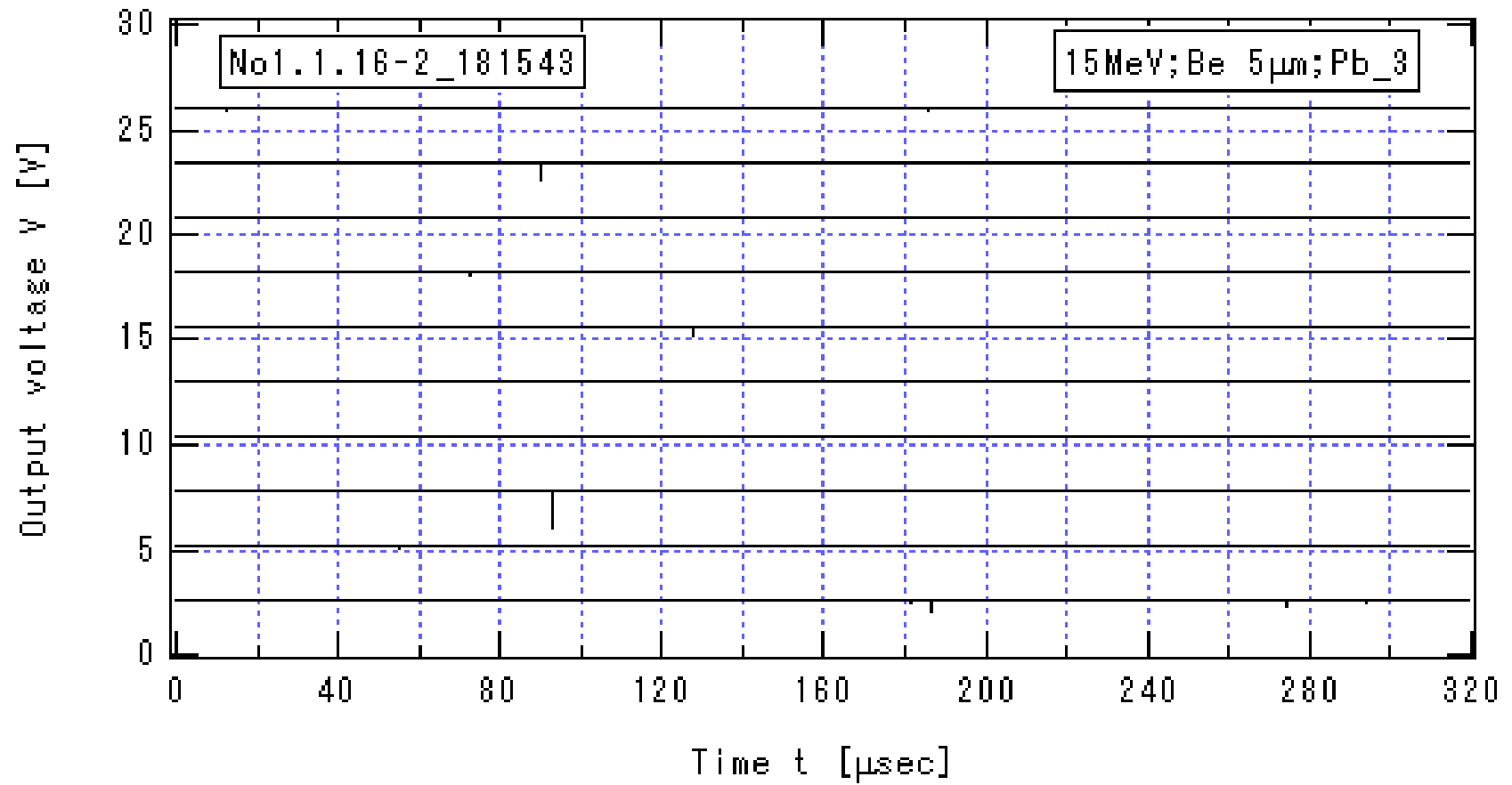


図 3.2.1-21\_2  $I_{\text{He}}=43.8\text{nA}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2)  
 $E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $15\text{cm}$ ,  $HV=-1.3\text{kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$



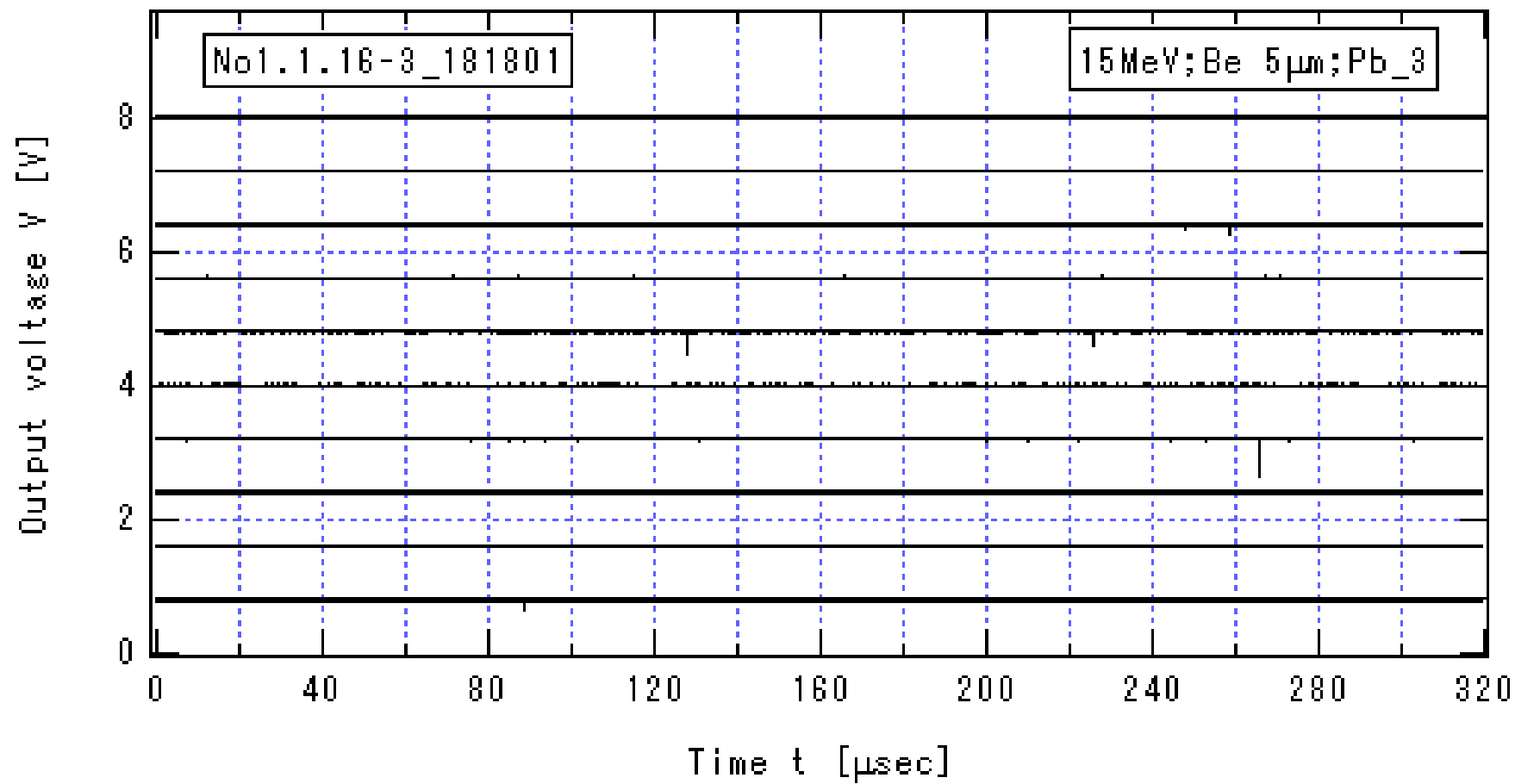


図 3.2.1-21\_3  $I_{\text{He}}=43.8\text{nA}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $15\text{cm}$ ,  $HV=-1.3\text{kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

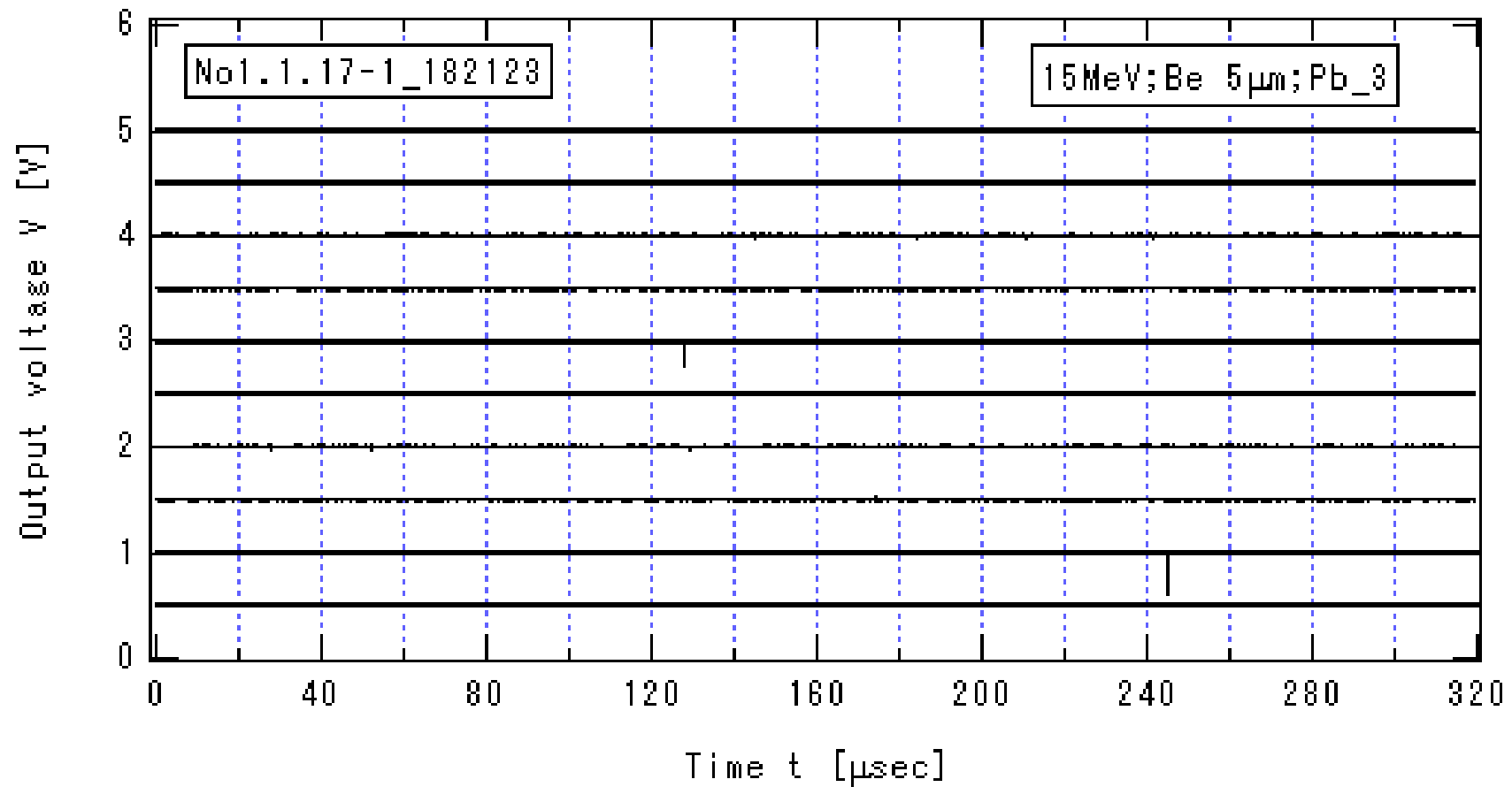


図 3.2.1-22\_1  $I_{\text{He}}=22.1\text{nA}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $15\text{cm}$ ,  $HV=-1.3\text{kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

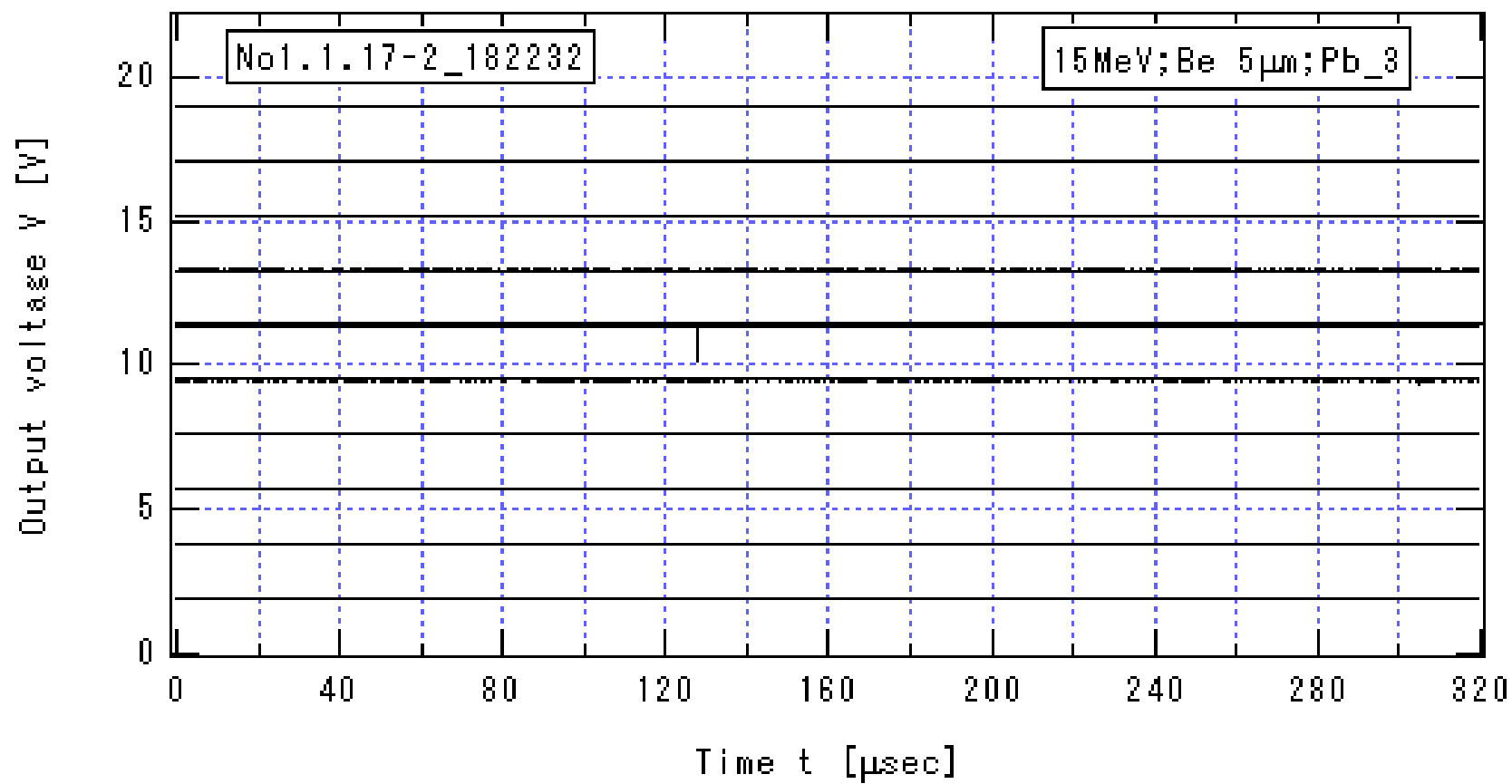


図 3.2.1-22\_2  $I_{\text{He}}=22.1\text{nA}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $15\text{cm}$ ,  $HV=-1.3\text{kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

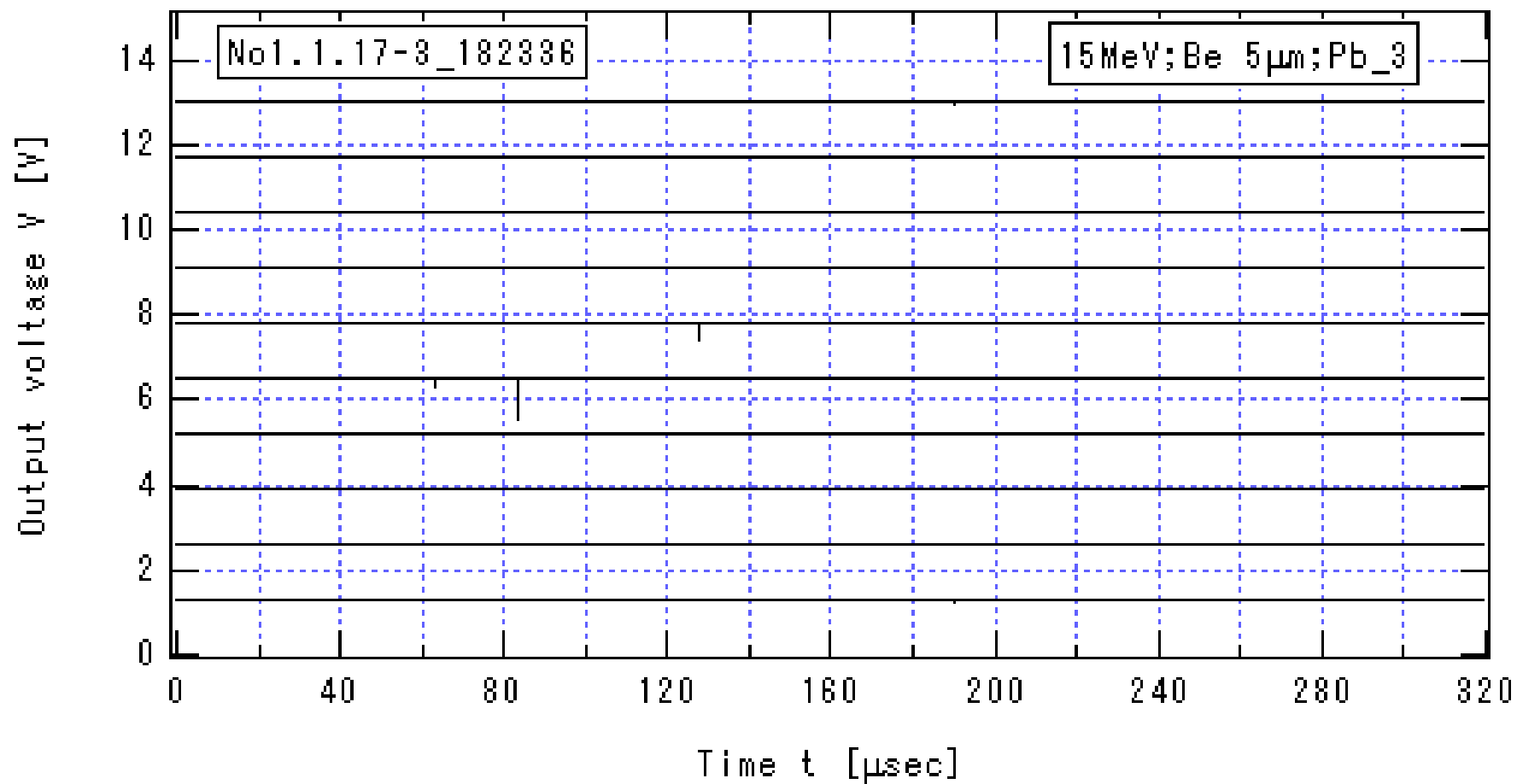


図 3.2.1-22\_3  $I_{\text{He}}=22.1\text{ nA}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3)

$E_{\text{He}} = 15\text{ MeV}$ , Be 厚  $5\text{ }\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $15\text{ cm}$ ,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{ V}$

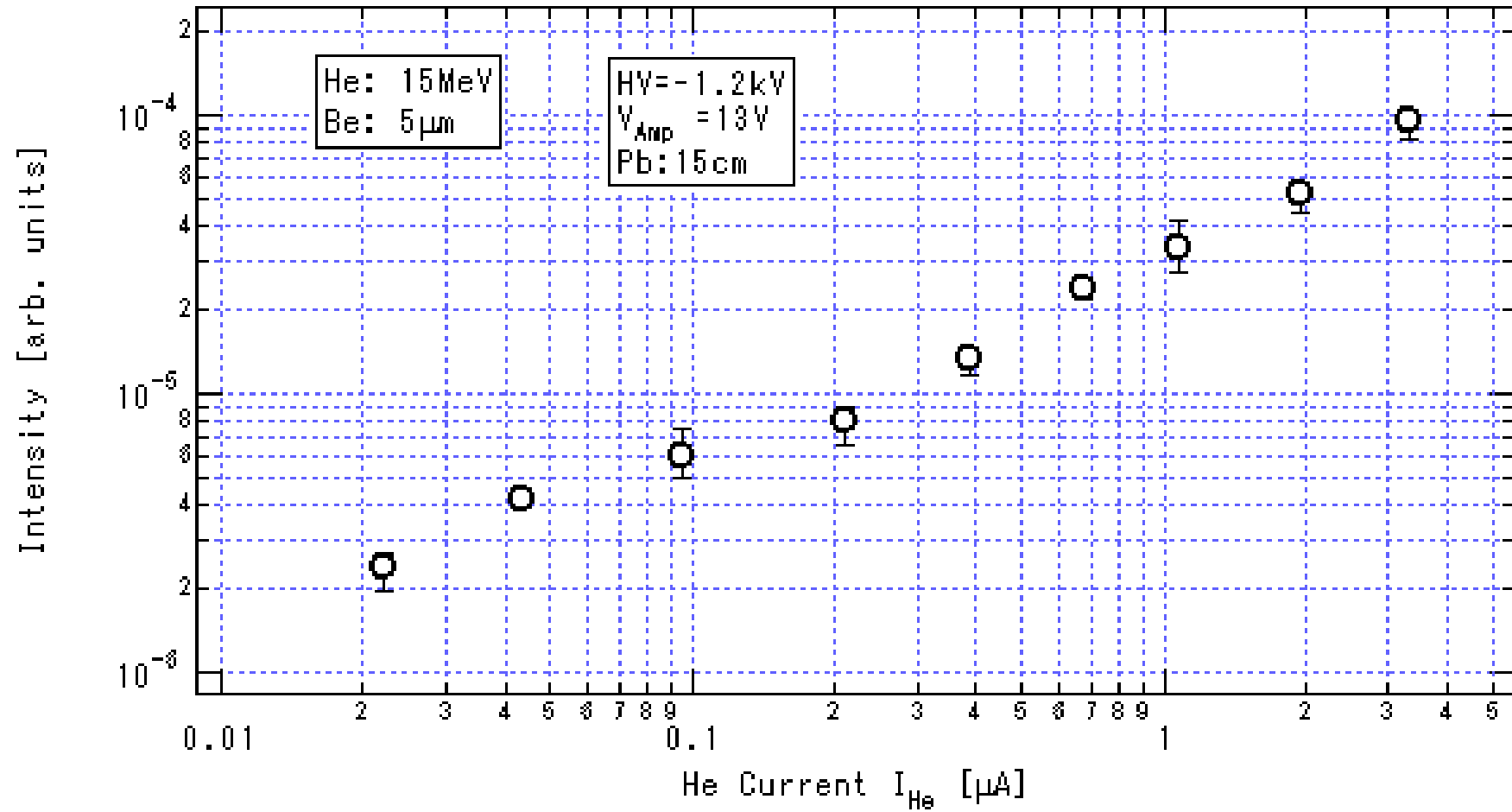


図 3.2.1-23 放射線強度の He 電流依存性

$E_{He} = 15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ , Pb の厚さ  $15\text{cm}$ , HV=-1.3 kV,  $V_{Amp}=13\text{V}$

### 3.2.2 9MeV He 照射 5 $\mu$ m Be 放出放射線の電流モード計測

エネルギー $E_{\text{He}}$ が9MeVのヘリウムビームを厚さ5 $\mu$ mのベリリウムに入射したときに放出される中性子を用いて、エネルギー $E_{\text{He}}=15\text{MeV}$ の場合と同様な放射線検出器の応答特性の評価実験を実施した。 $E_{\text{He}}=9\text{MeV}$ のヘリウムビームは5 $\mu$ mの厚のベリリウム通過後、0.5MVだけエネルギーが減少してターゲット下流のFaraday Cupに入射する。 $E_{\text{He}}=9\text{MeV}$ のヘリウムビームを用いた場合も、Beを照射するHe電流値は下流のFaraday Cupで計測した。液体シンチレータNE231の前面の鉛ブロックの厚さを15cm、光電子増倍管の印加電圧HVを-1.3kV、プリアンプへの印加電圧 $V_{\text{Amp}}$ を13Vとした。5 $\mu$ m厚のベリリウムに入射するHeイオン電流を2.39 $\mu$ Aから39nAまで8段階で徐々に減少させ、プリアンプ出力電圧を高速オシロスコープで記録した。5 $\mu$ m厚のベリリウムへの9MeVヘリウム照射による検出器応答評価のための実験条件を、Data number毎に表3.2.2にまとめる。

出力信号電圧波形の3.2ms間の時間変化を図3.2.2-1(2.39 $\mu$ A)、図3.2.2-2(1.57 $\mu$ A)、図3.2.2-3(920nA)、図3.2.2-4(500nA)、図3.2.2-5(300nA)、図3.2.2-6(140nA)、図3.2.2-7(72nA)、図3.2.2-8(39nA)に示す。信号波形の電流値の対する傾向は、ヘリウムエネルギー $E_{\text{He}}=15\text{MeV}$ の場合と同様である。このデータを用いて求めた放射線強度のHeイオン電流値 $I_{\text{He}}$ に対する依存性を図3.2.2-9に示す。イオン電流が大きい $I_{\text{He}}\geq 5\mu\text{A}$ の領域では電流に対する出力の直進性は良好であるが、広い範囲にわたっての直線性は得られていない。全体の傾向は図3.2.1-23と同様であるが、単位時間内に入射する放射線の個数が15MeVに比べて少なくなるため、直線性が得られるHe電流量域が、図3.2.1-23に比べて電流値の高い領域にシフトしている。 $I_{\text{He}}\leq 5\mu\text{A}$ の領域での計測回数を増やすことにより、広い領域での直線性を示すデータを取得することが可能と考えられる。

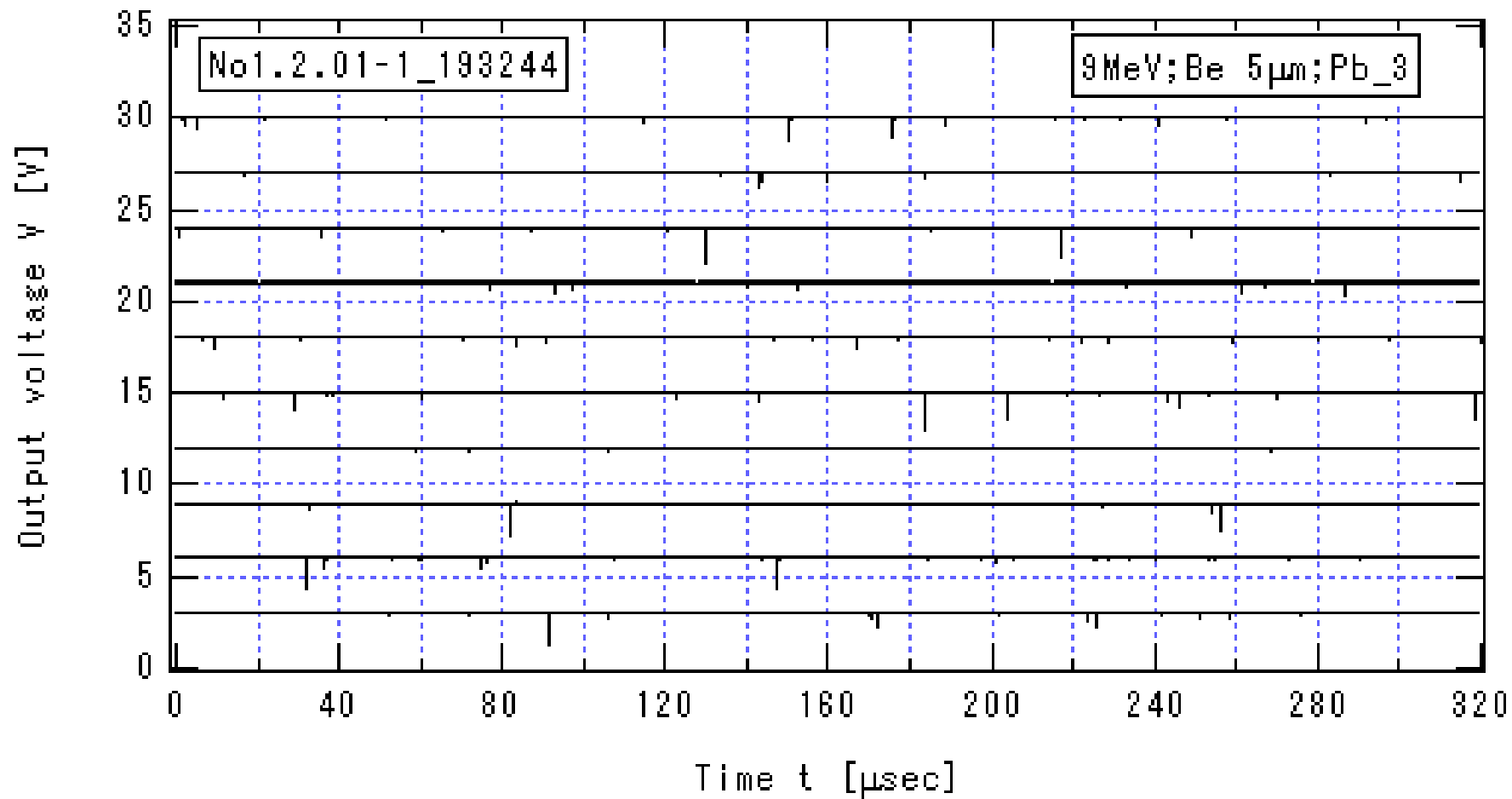


図 3.2.2-1\_1  $E_{\text{He}} = 9\text{MeV}$ ,  $I_{\text{He}} = 2.39\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1)  
 $\text{Be}$  厚 5mm,  $\text{Pb}$  の厚さ 15cm,  $\text{HV} = -1.3\text{kV}$ ,  $V_{\text{Amp}} = 13\text{V}$

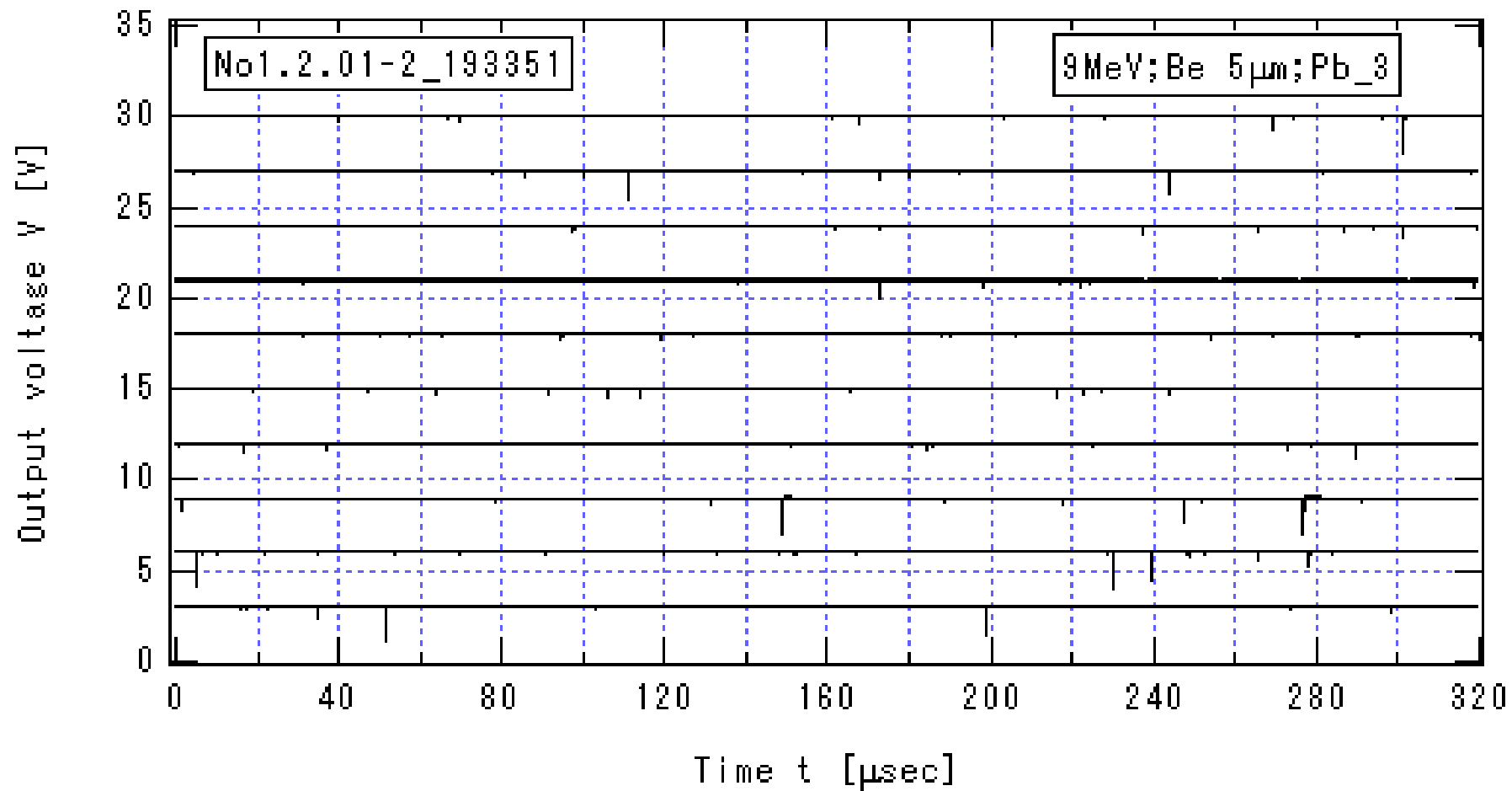


図 3.2.2-1\_2  $E_{\text{He}} = 9\text{MeV}$ ,  $I_{\text{He}} = 2.39\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2)

Be 厚 5mm, Pb の厚さ 15cm,  $HV = -1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}} = 13\text{V}$



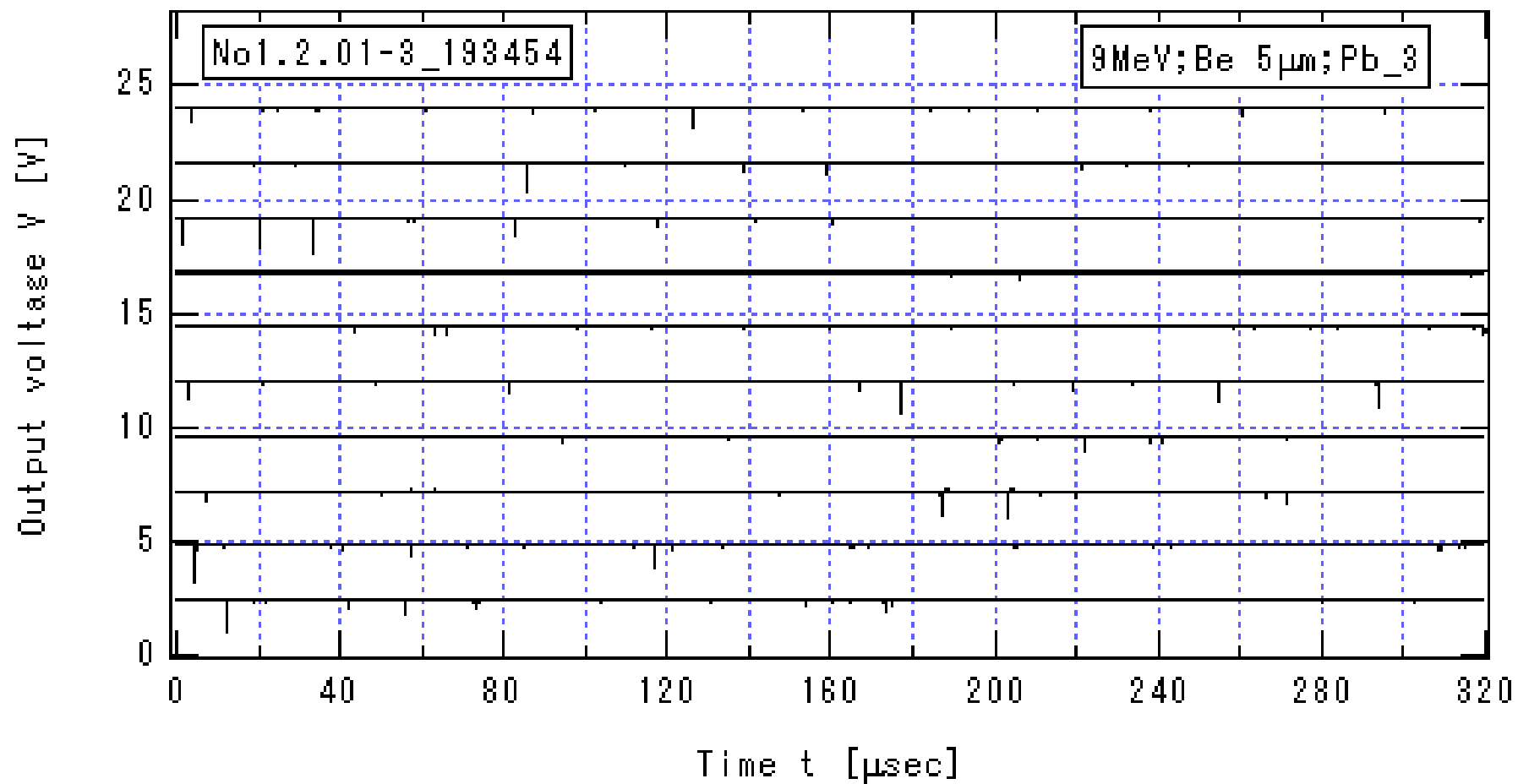


図 3.2.2-14\_3  $E_{\text{He}} = 9\text{MeV}$ ,  $I_{\text{He}} = 2.39\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3)  
 $\text{Be}$  厚 5mm,  $\text{Pb}$  の厚さ 15cm,  $\text{HV} = -1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}} = 13\text{V}$

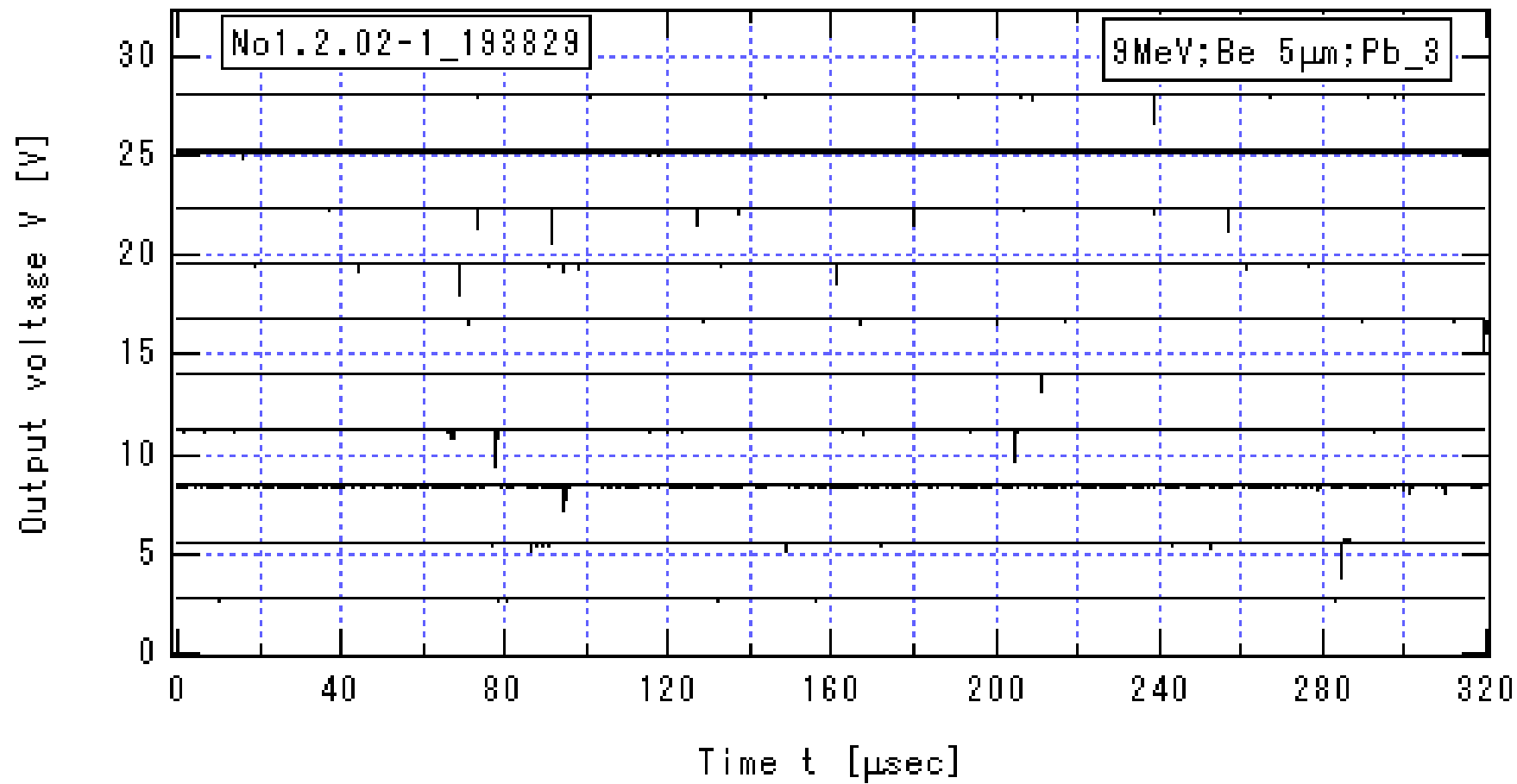


図 3.2.2-2\_1  $E_{\text{He}} = 9\text{MeV}$ ,  $I_{\text{He}} = 1.57\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1)  
 Be 厚 5mm, Pb の厚さ 15cm,  $HV = -1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}} = 13\text{V}$

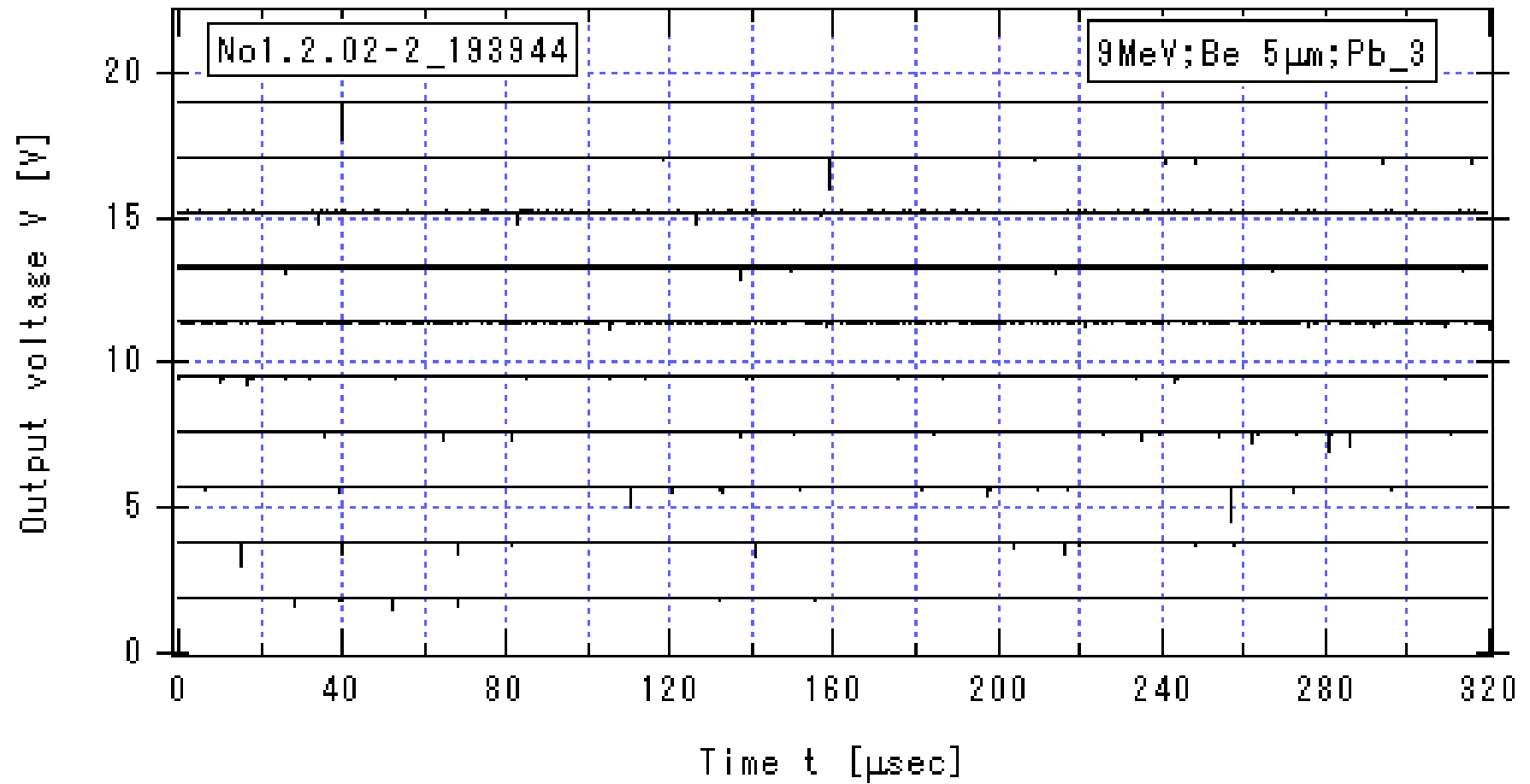


図 3.2.2-2\_2  $E_{\text{He}} = 9\text{MeV}$ ,  $I_{\text{He}} = 1.57\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2)  
 $\text{Be}$  厚 5mm,  $\text{Pb}$  の厚さ 15cm,  $\text{HV} = -1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}} = 13\text{V}$

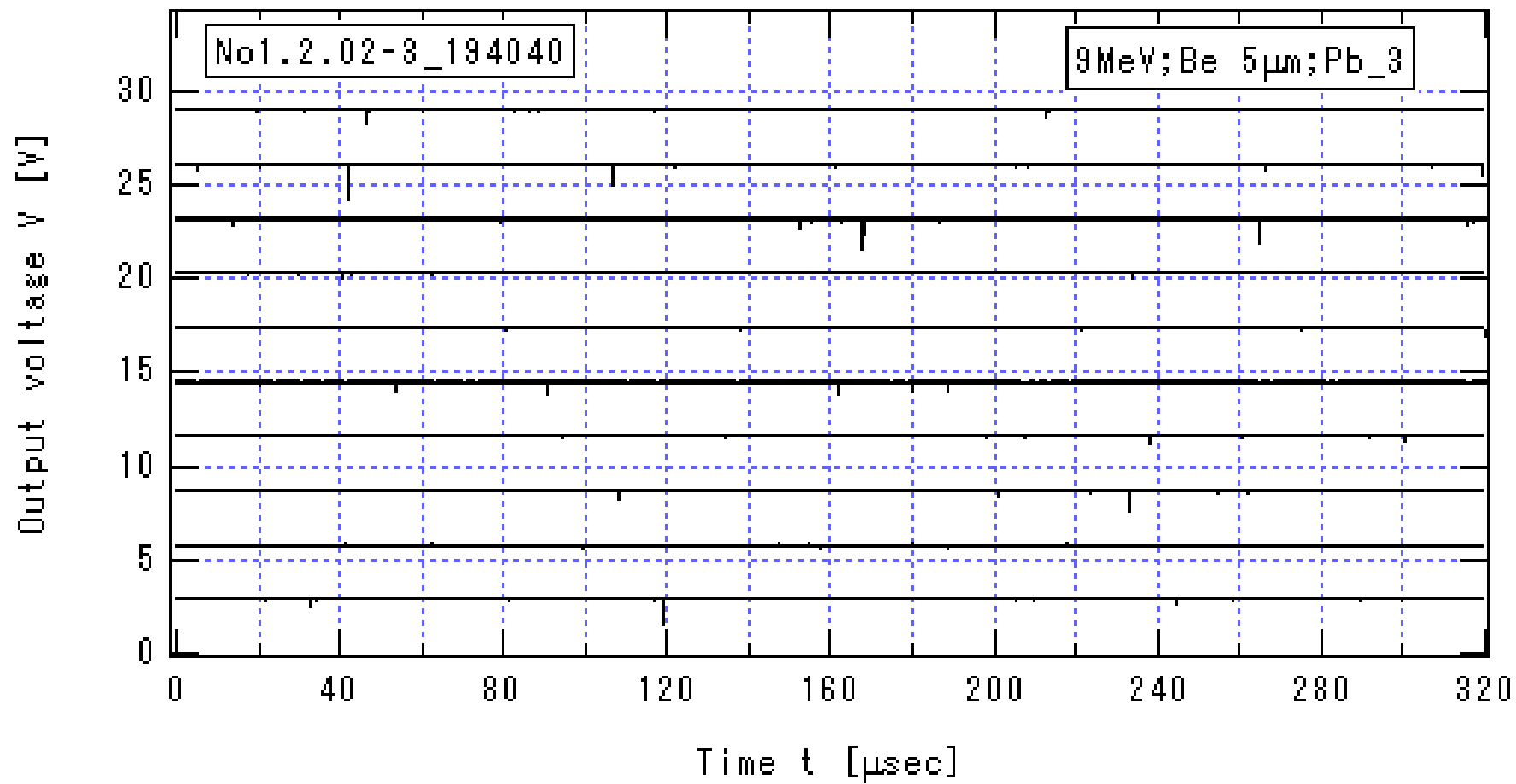


図 3.2.2-2\_3  $E_{\text{He}} = 9\text{MeV}$ ,  $I_{\text{He}} = 1.57\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3)  
 $\text{Be}$  厚 5mm,  $\text{Pb}$  の厚さ 15cm,  $\text{HV} = -1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}} = 13\text{V}$

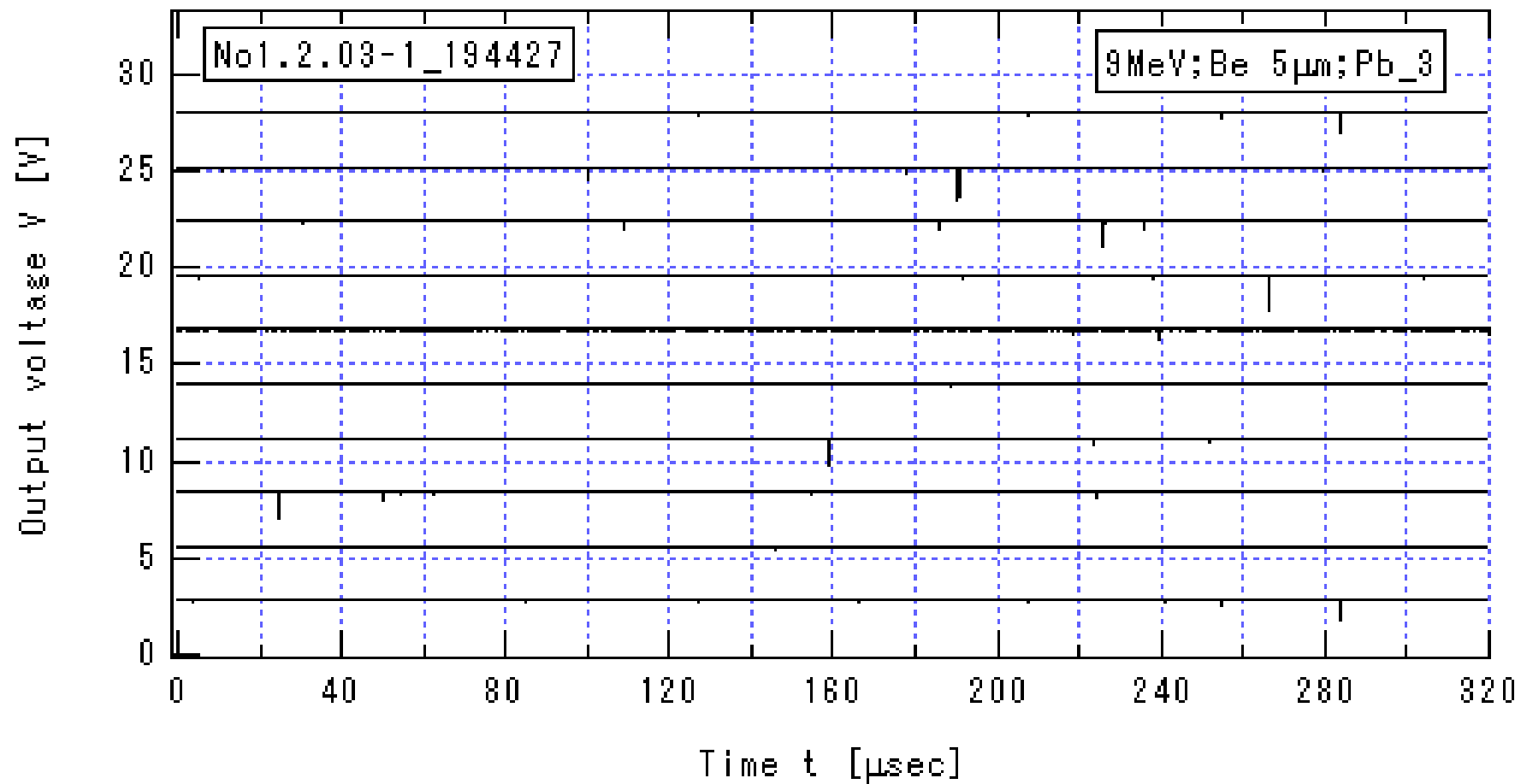


図 3.2.2-3\_1  $E_{\text{He}} = 9\text{MeV}$ ,  $I_{\text{He}} = 920\text{nA}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1)  
 $\text{Be}$  厚  $5\text{mm}$ ,  $\text{Pb}$  の厚さ  $15\text{cm}$ ,  $\text{HV} = -1.3\text{kV}$ ,  $V_{\text{Amp}} = 13\text{V}$

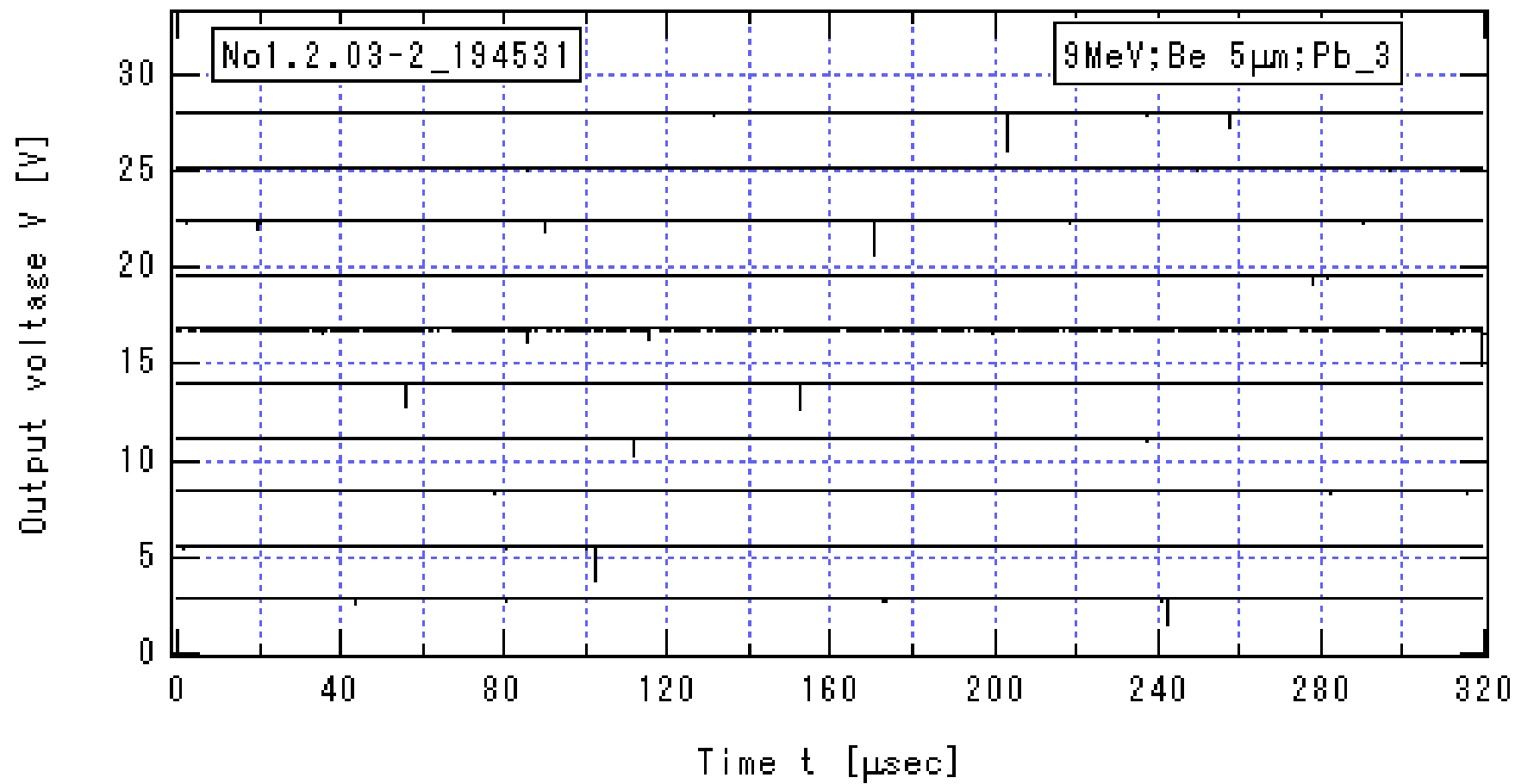


図 3.2.2-3\_2  $E_{\text{He}} = 9\text{MeV}$ ,  $I_{\text{He}} = 920\text{nA}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2)  
 Be 厚 5mm, Pb の厚さ 15cm,  $HV = -1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}} = 13\text{V}$

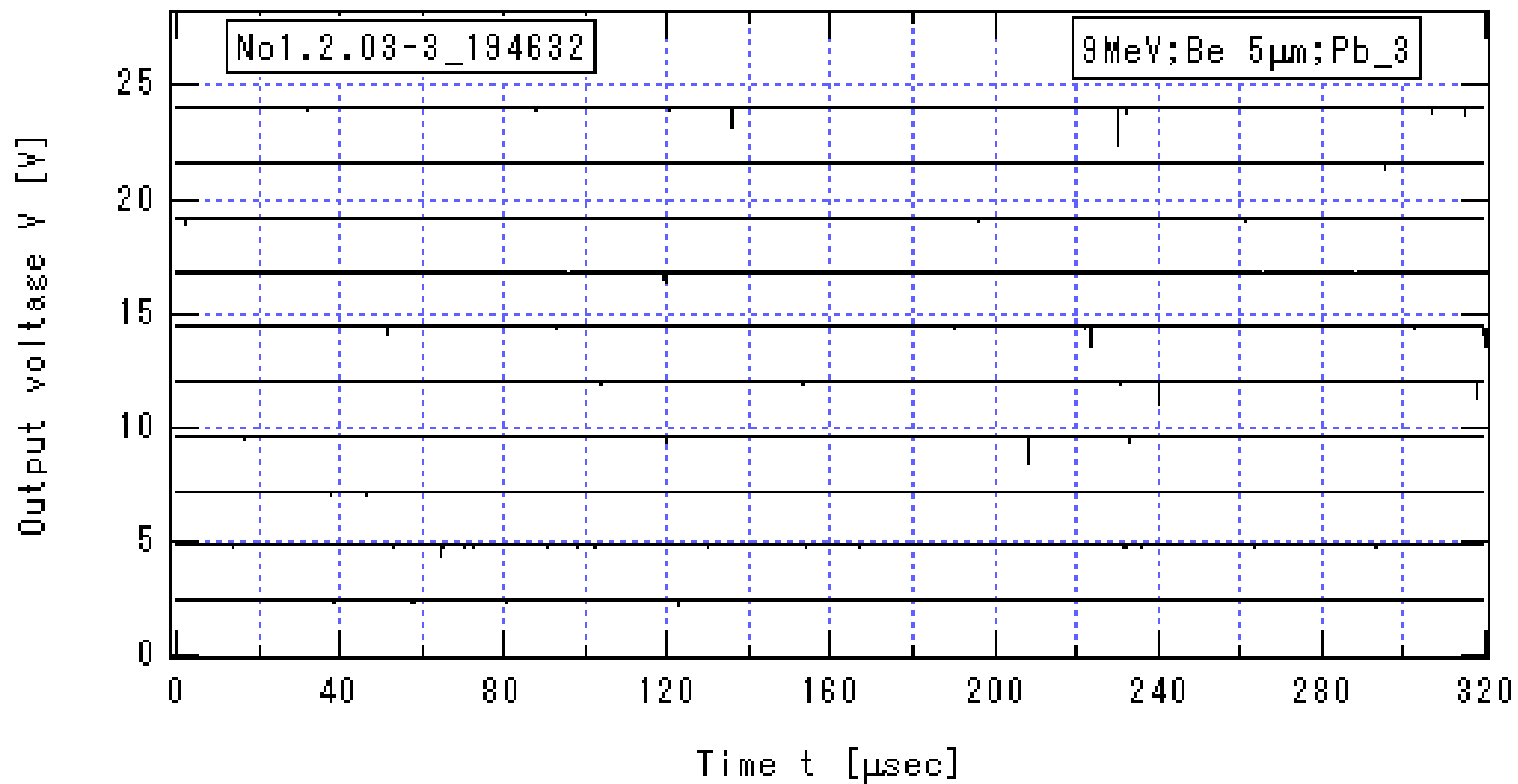


図 3.1.2-26\_3  $E_{\text{He}} = 9\text{MeV}$ ,  $I_{\text{He}} = 920\text{nA}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3)

Be 厚 5mm, Pb の厚さ 15cm,  $HV = -1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}} = 13\text{V}$

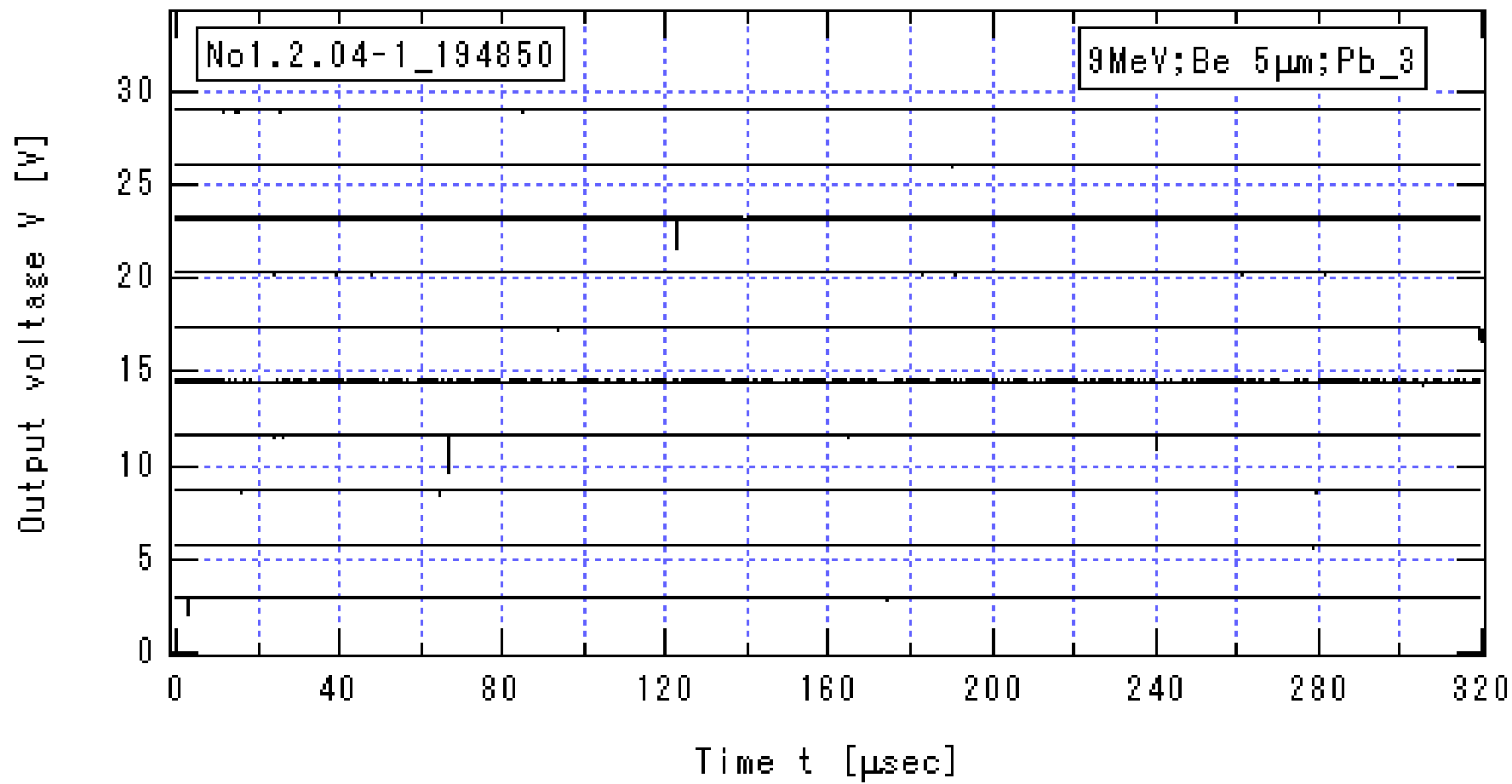


図 3.2.2-4\_1  $E_{\text{He}} = 9\text{MeV}$ ,  $I_{\text{He}} = 500\text{nA}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1)  
 Be 厚 5mm, Pb の厚さ 15cm,  $HV = -1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}} = 13\text{V}$



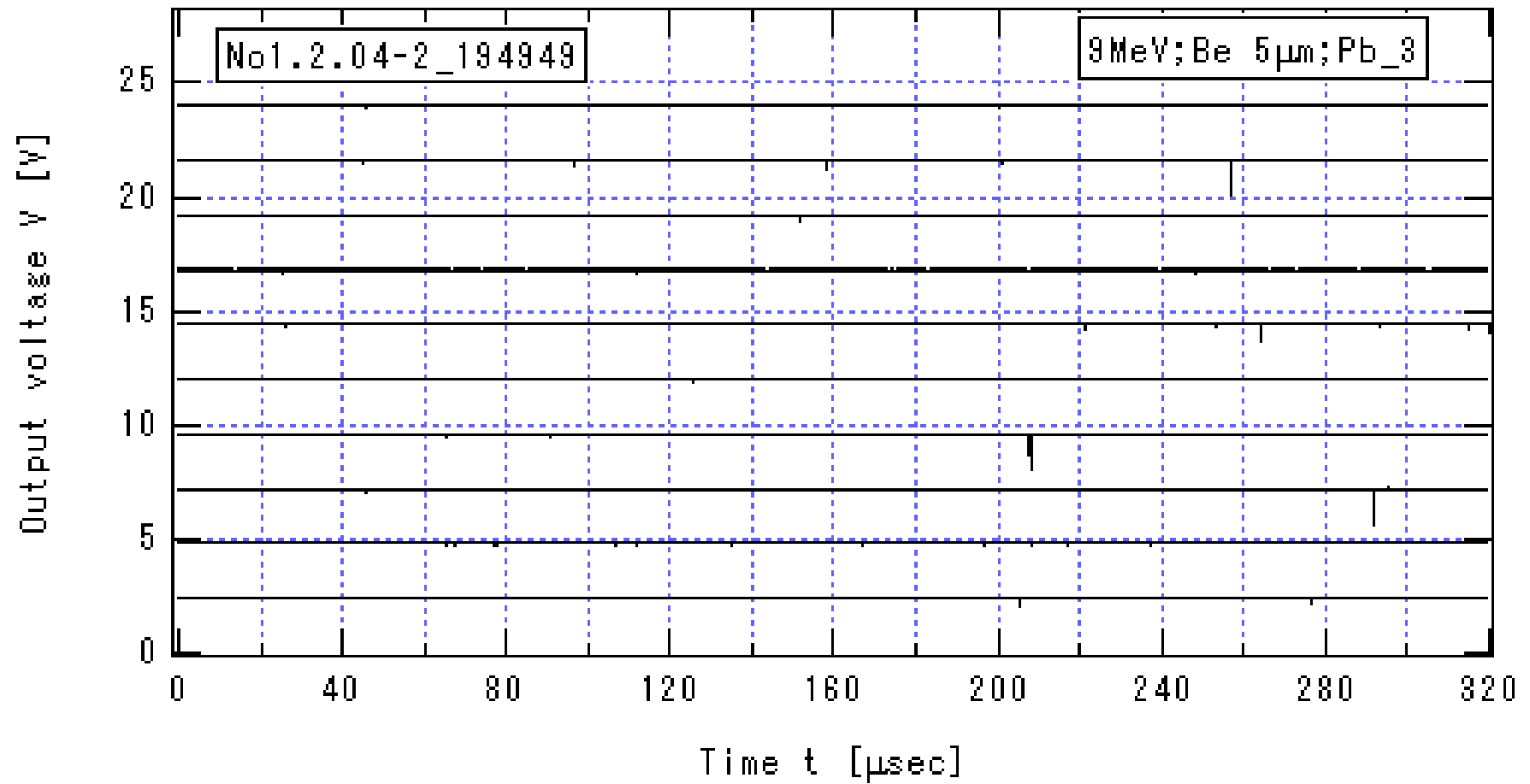


図 3.2.2-4\_2  $E_{\text{He}} = 9\text{MeV}$ ,  $I_{\text{He}} = 500\text{nA}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2)  
 Be 厚 5mm, Pb の厚さ 15cm,  $HV = -1.3\text{kV}$ ,  $V_{\text{Amp}} = 13\text{V}$

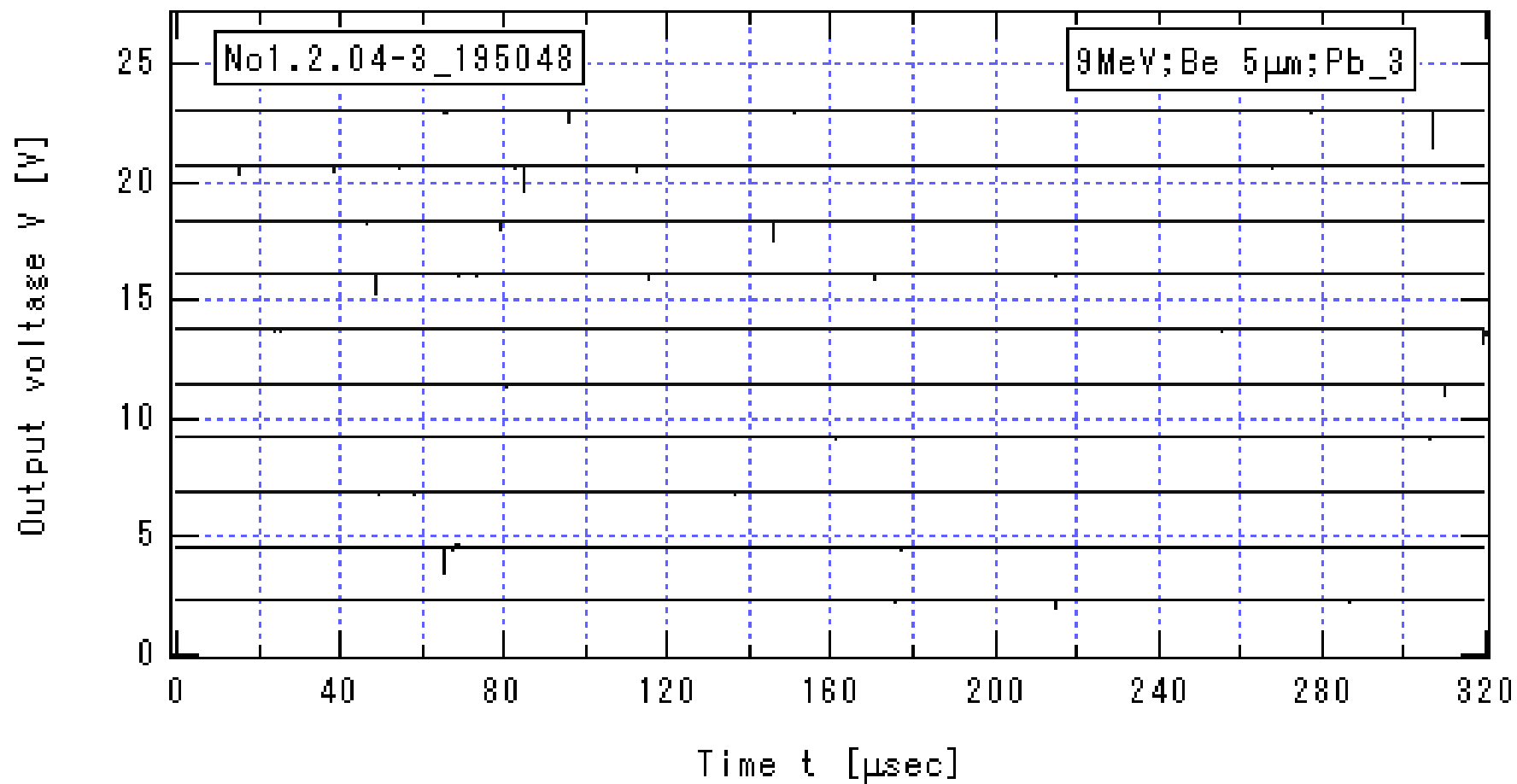


図 3.2.2-4\_3  $E_{\text{He}} = 9\text{MeV}$ ,  $I_{\text{He}} = 500\text{nA}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3)  
 Be 厚 5mm, Pb の厚さ 15cm,  $HV = -1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}} = 13\text{V}$

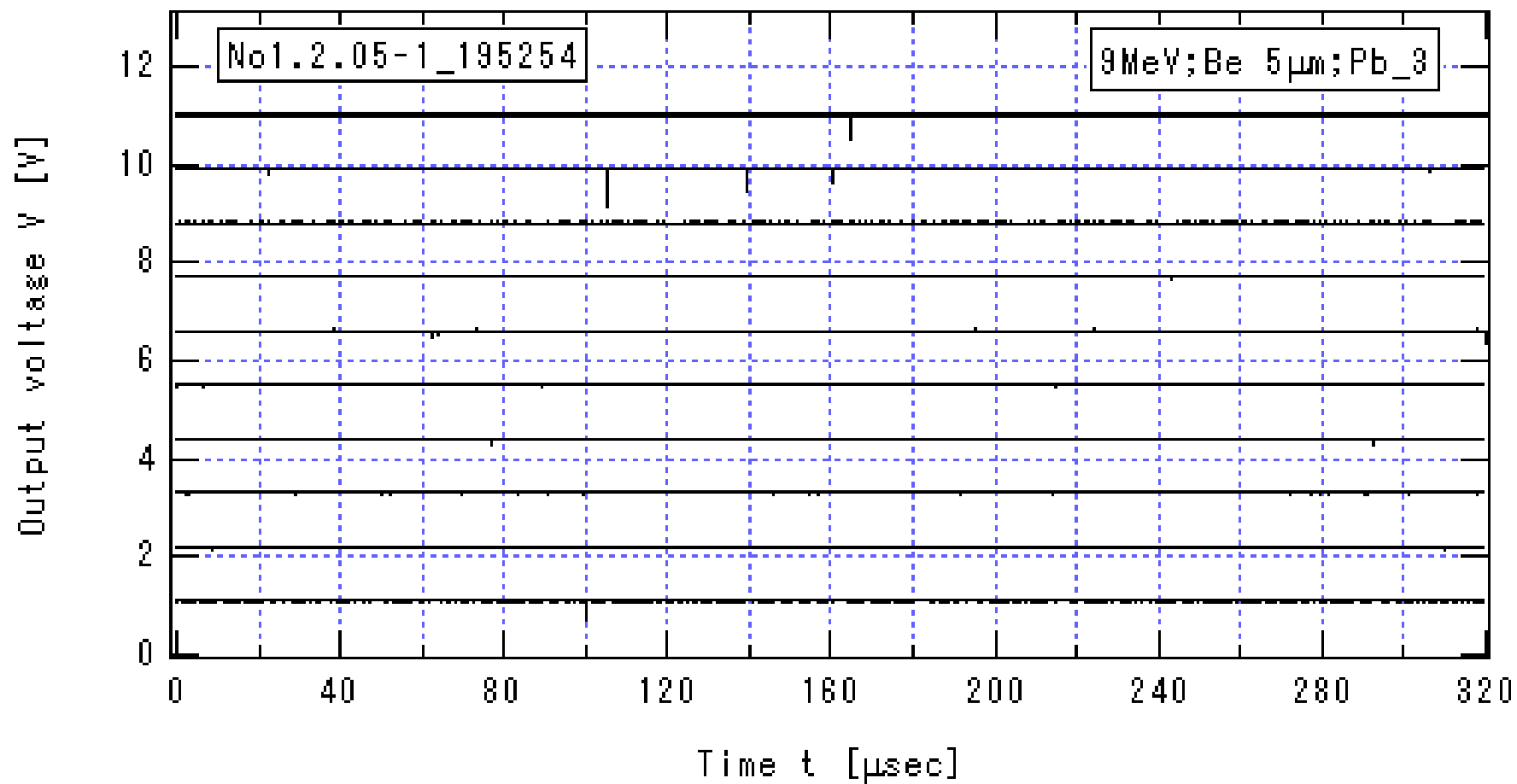


図 3.2.2-5\_1  $E_{\text{He}} = 9\text{MeV}$ ,  $I_{\text{He}} = 300\text{nA}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1)  
 Be 厚 5mm, Pb の厚さ 15cm,  $HV = -1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}} = 13\text{V}$

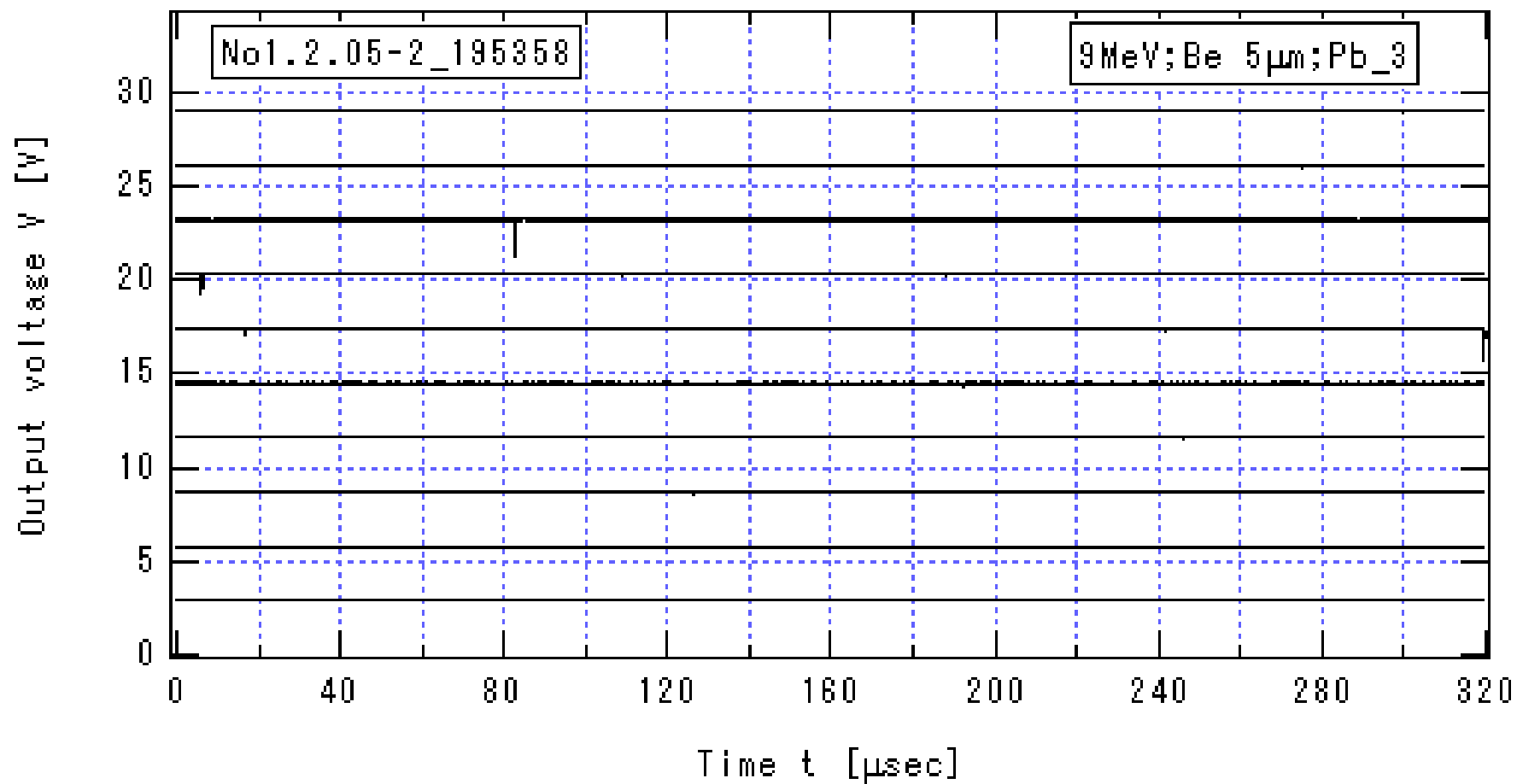


図 3.2.2-5\_2  $E_{\text{He}} = 9\text{MeV}$ ,  $I_{\text{He}} = 300\text{nA}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2)

Be 厚 5mm, Pb の厚さ 15cm,  $HV = -1.3\text{kV}$ ,  $V_{\text{Amp}} = 13\text{V}$

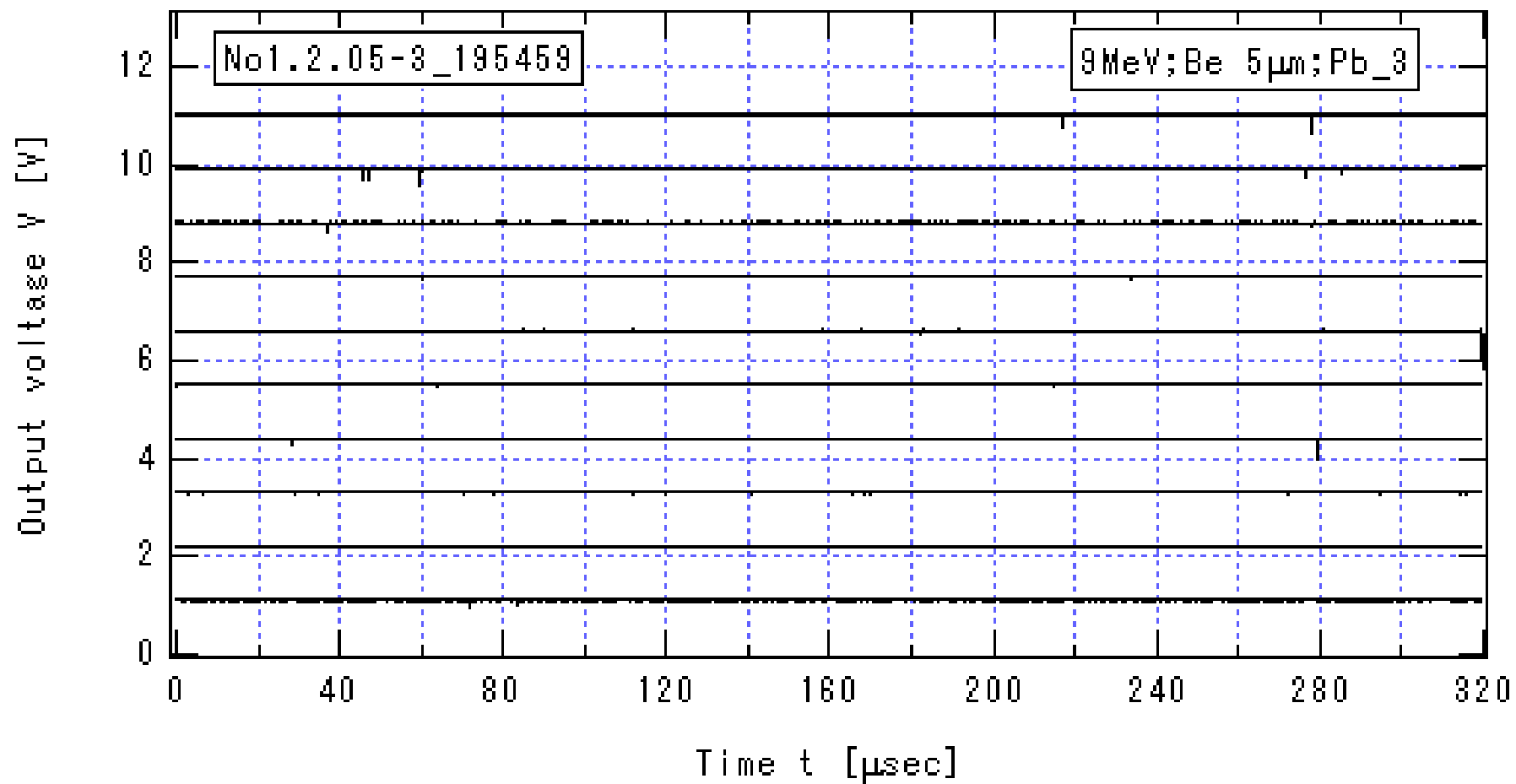


図 3.2.2-5\_3  $E_{\text{He}} = 9\text{MeV}$ ,  $I_{\text{He}} = 300\text{nA}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3)  
 Be 厚 5mm, Pb の厚さ 15cm,  $HV = -1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}} = 13\text{V}$

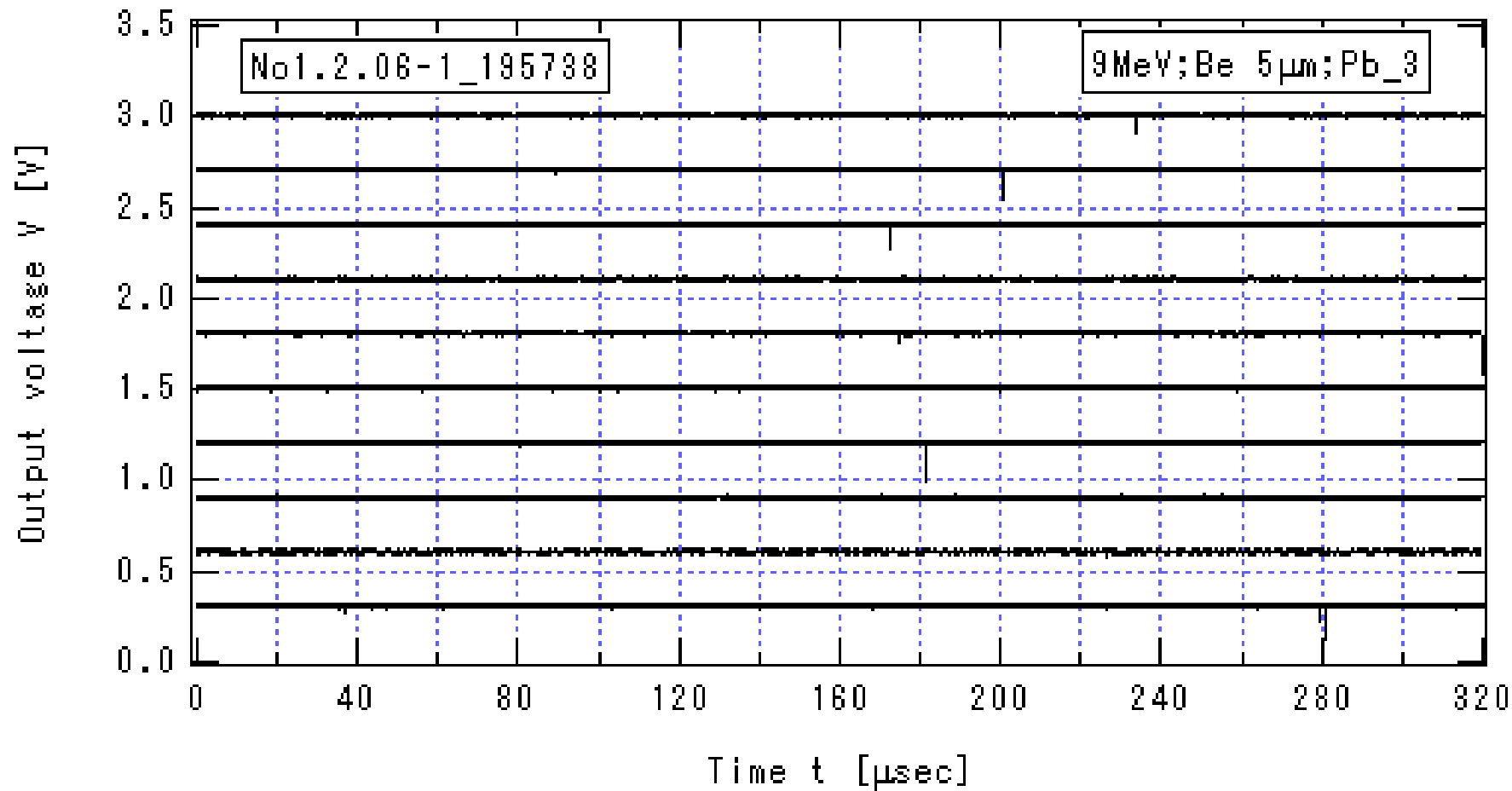


図 3.2.2-6\_1  $E_{\text{He}} = 9\text{MeV}$ ,  $I_{\text{He}} = 140\text{nA}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1)  
 Be 厚 5mm, Pb の厚さ 15cm,  $HV = -1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}} = 13\text{V}$

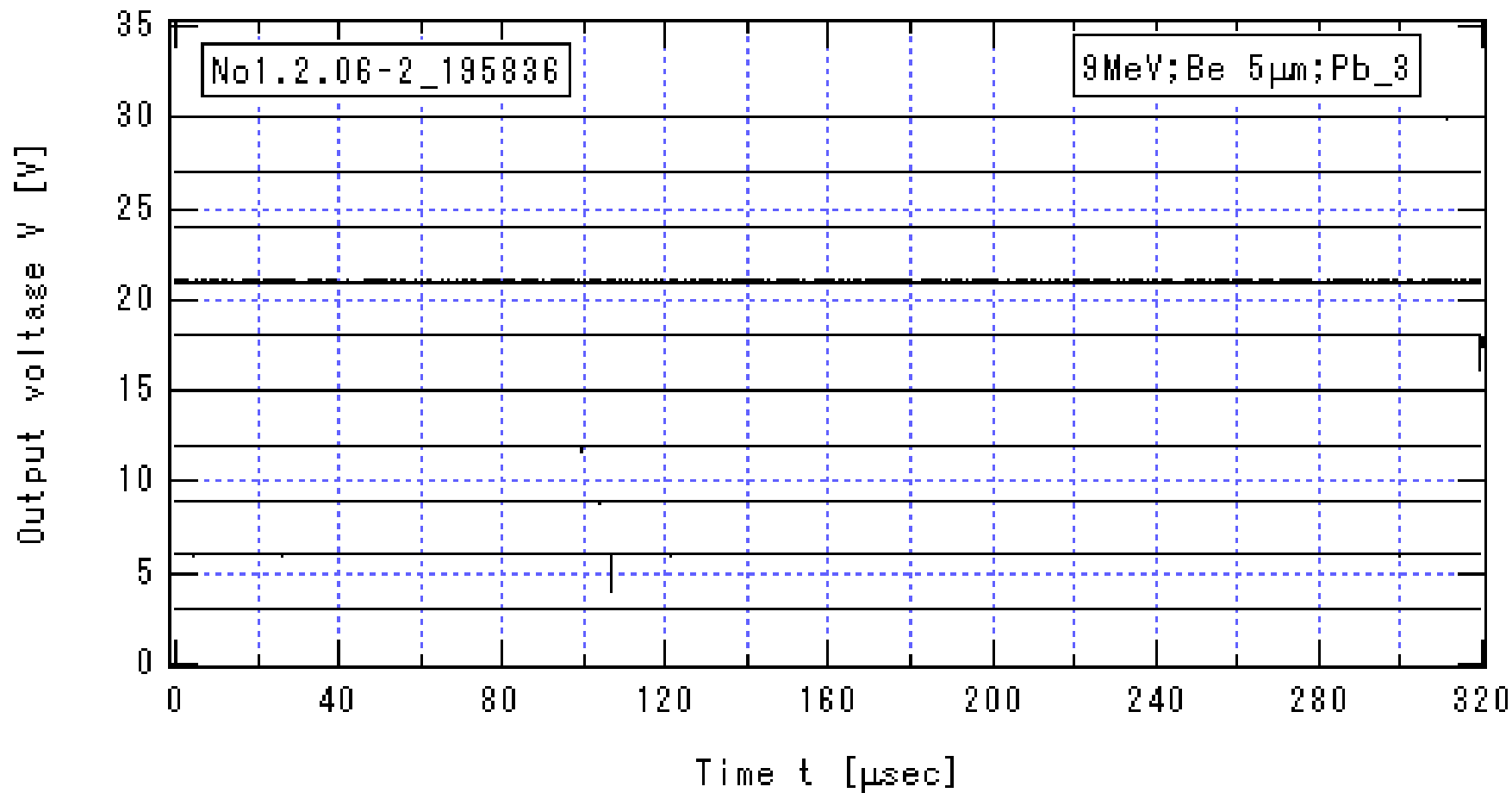


図 3.2.2-6\_2  $E_{\text{He}} = 9\text{MeV}$ ,  $I_{\text{He}} = 140\text{nA}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2)

Be 厚 5mm, Pb の厚さ 15cm,  $HV = -1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}} = 13\text{V}$

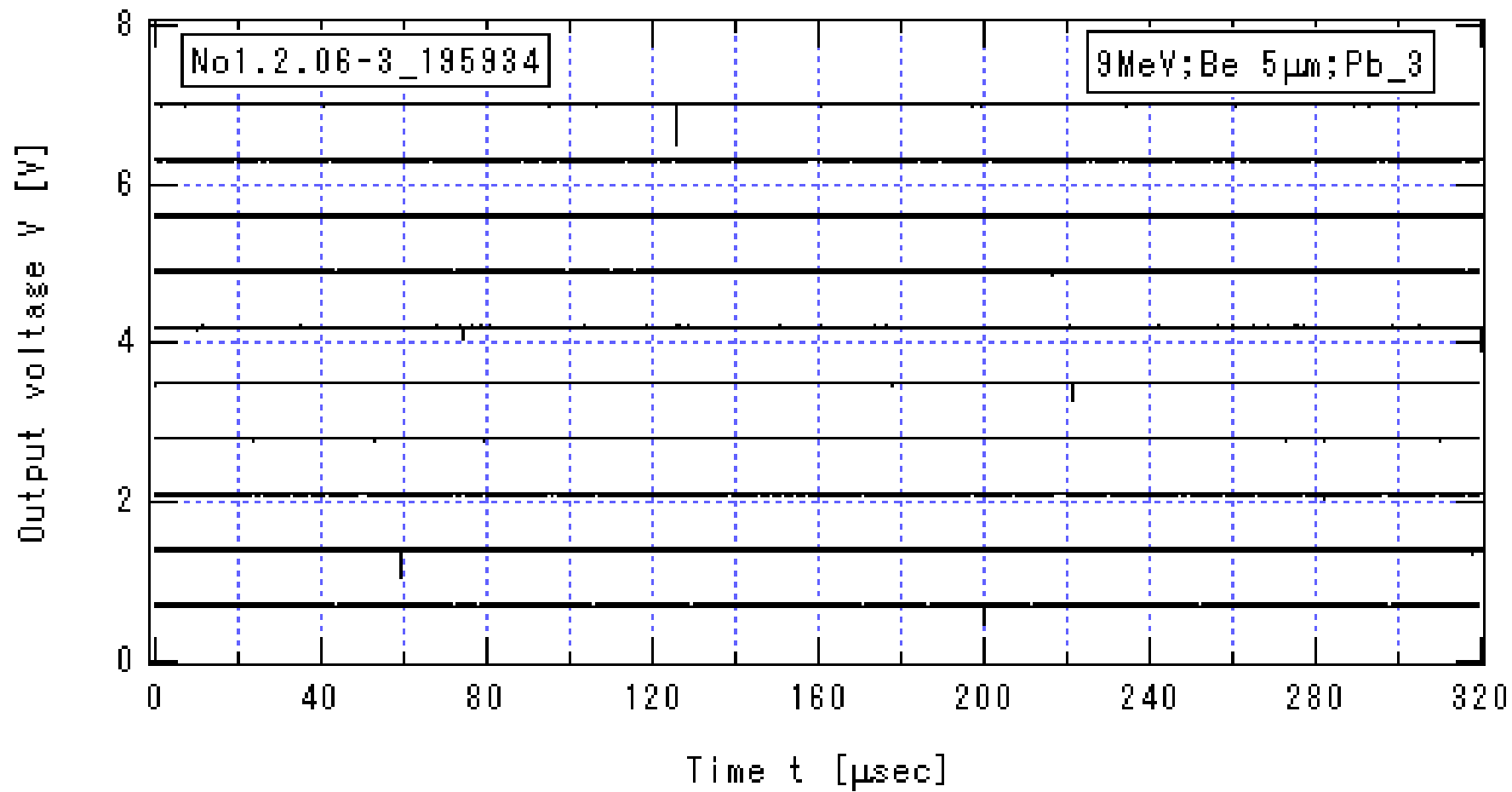


図 3.2.2-6\_3  $E_{\text{He}} = 9\text{MeV}$ ,  $I_{\text{He}} = 140\text{nA}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3)  
 Be 厚 5mm, Pb の厚さ 15cm,  $HV = -1.3\text{kV}$ ,  $V_{\text{Amp}} = 13\text{V}$



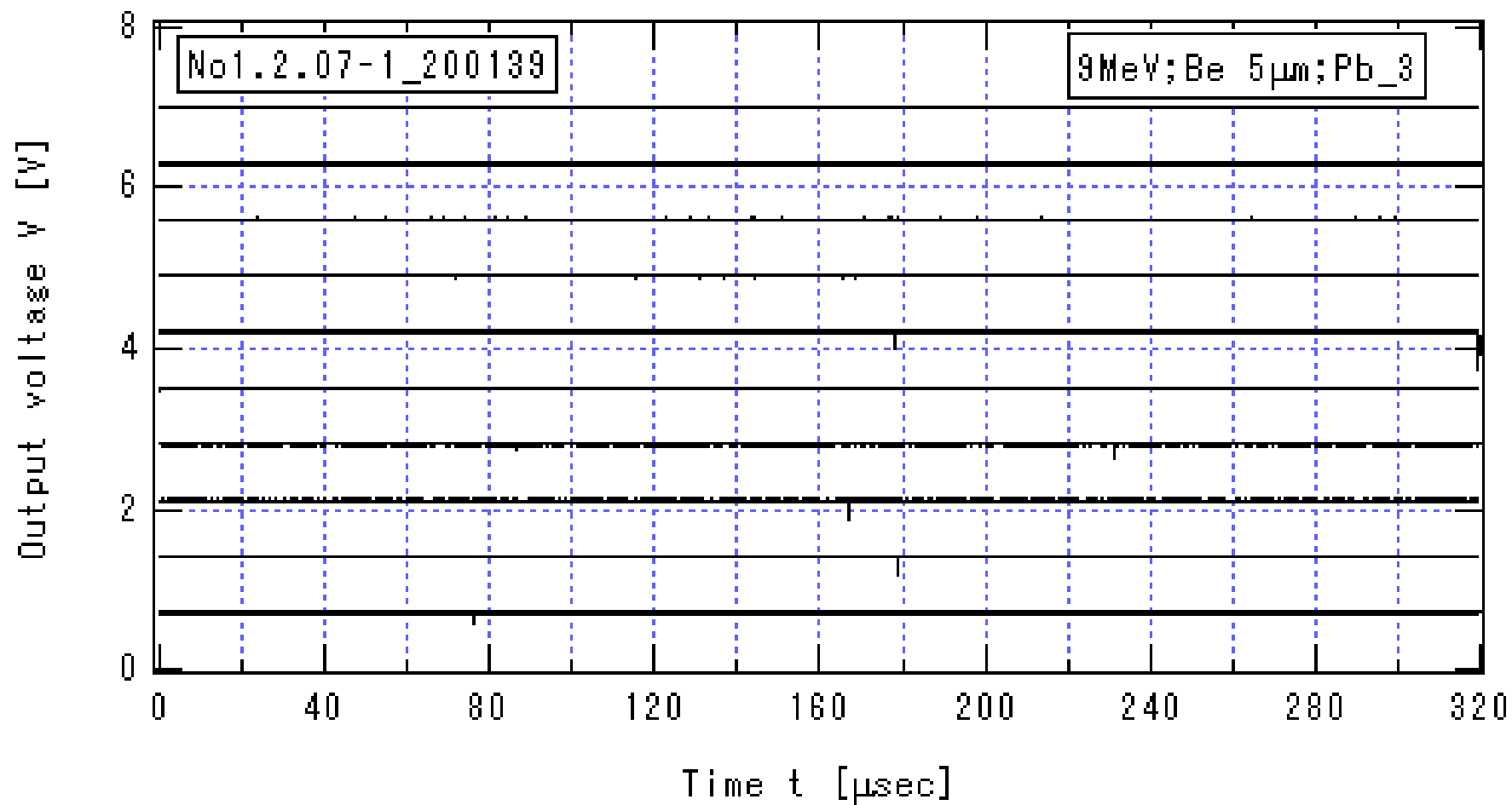


図 3.2.2-7\_1  $E_{\text{He}} = 9\text{MeV}$ ,  $I_{\text{He}} = 72\text{nA}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1)  
 Be 厚 5mm, Pb の厚さ 15cm,  $HV = -1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}} = 13\text{V}$

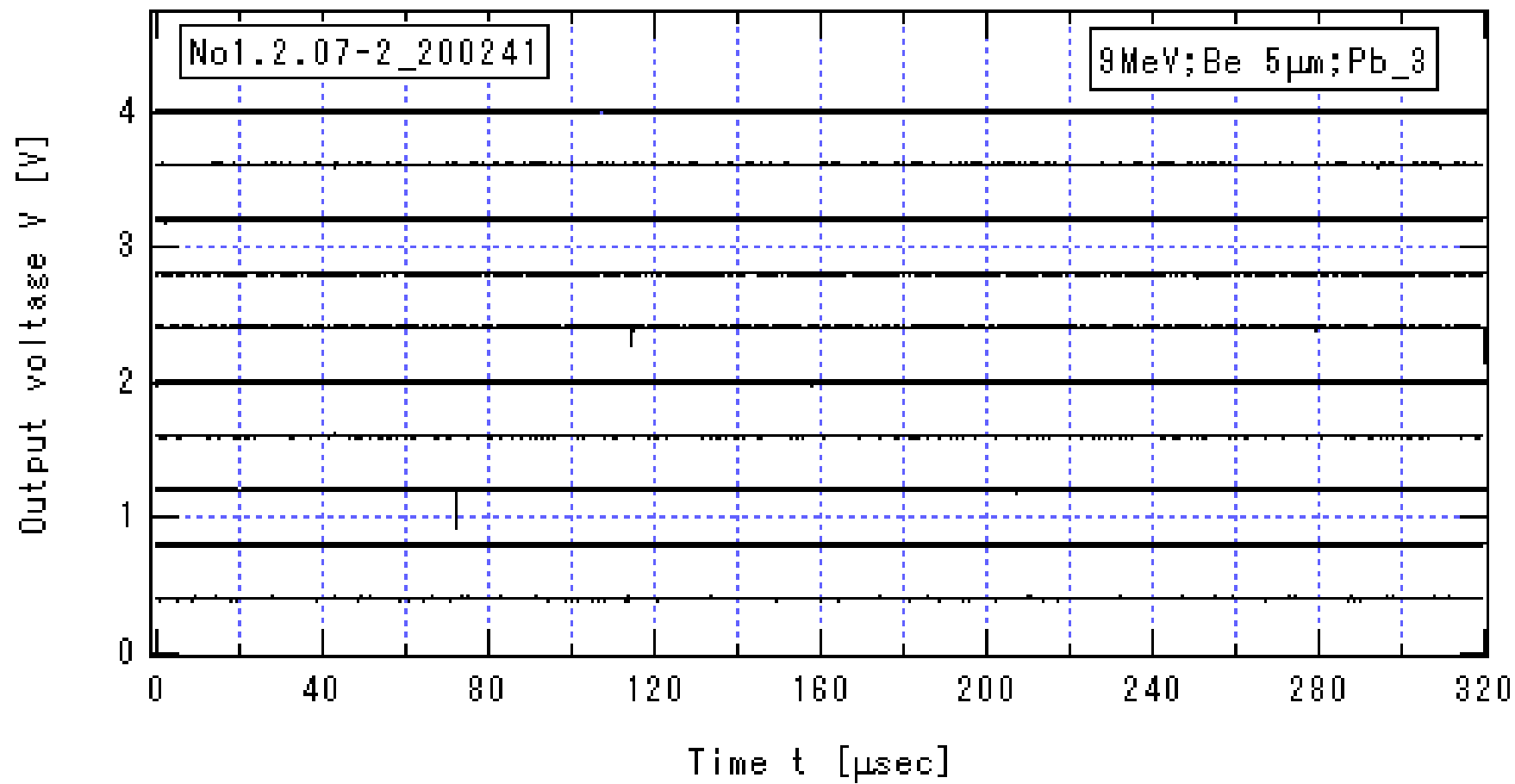


図 3.2.2-7\_2  $E_{\text{He}} = 9\text{MeV}$ ,  $I_{\text{He}} = 72\text{nA}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2)  
 Be 厚 5mm, Pb の厚さ 15cm,  $HV = -1.3\text{kV}$ ,  $V_{\text{Amp}} = 13\text{V}$

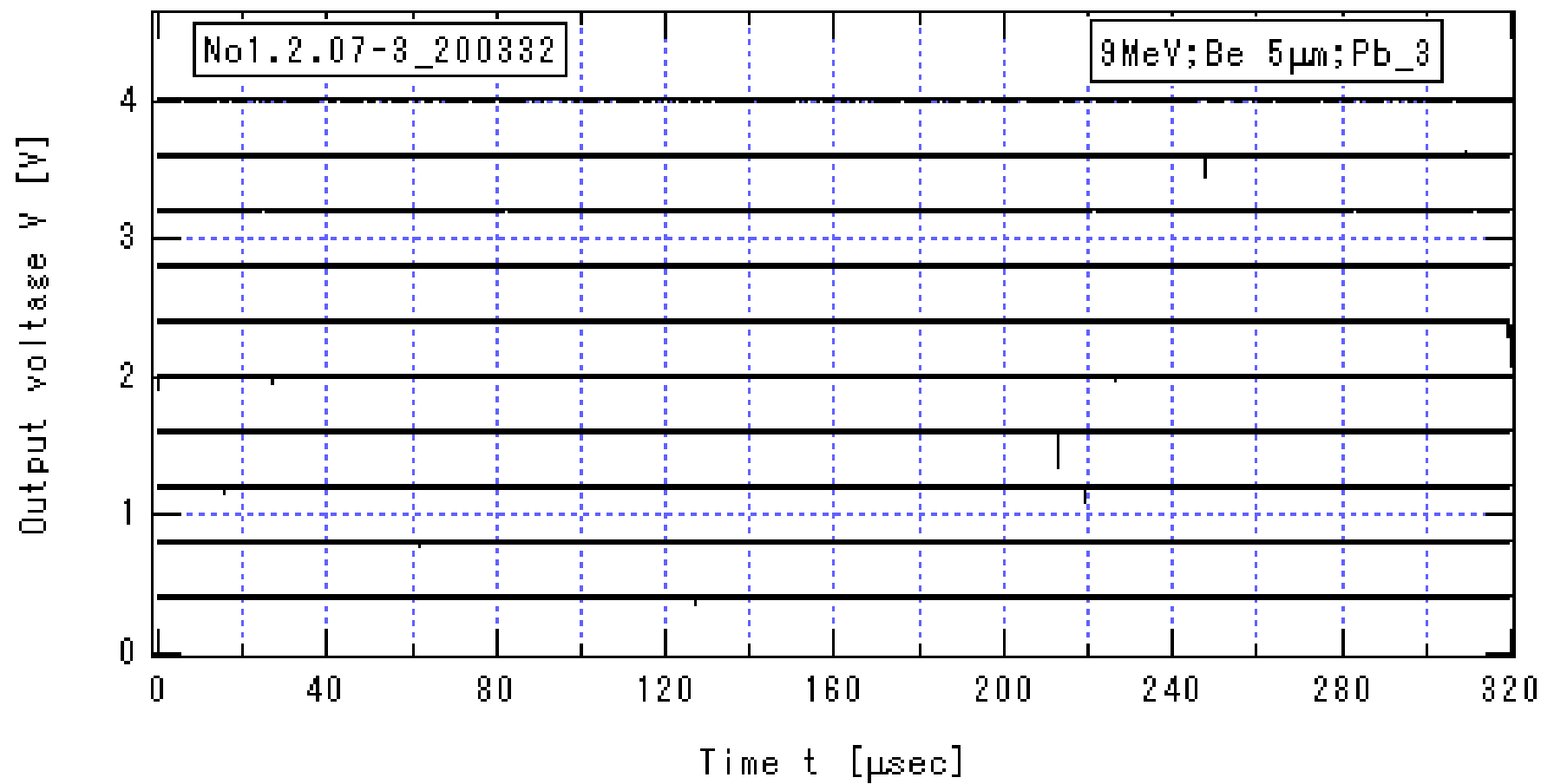


図 3.2.2-7\_3  $E_{\text{He}} = 9\text{MeV}$ ,  $I_{\text{He}} = 72\text{nA}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3)  
 Be 厚 5mm, Pb の厚さ 15cm,  $HV = -1.3\text{kV}$ ,  $V_{\text{Amp}} = 13\text{V}$

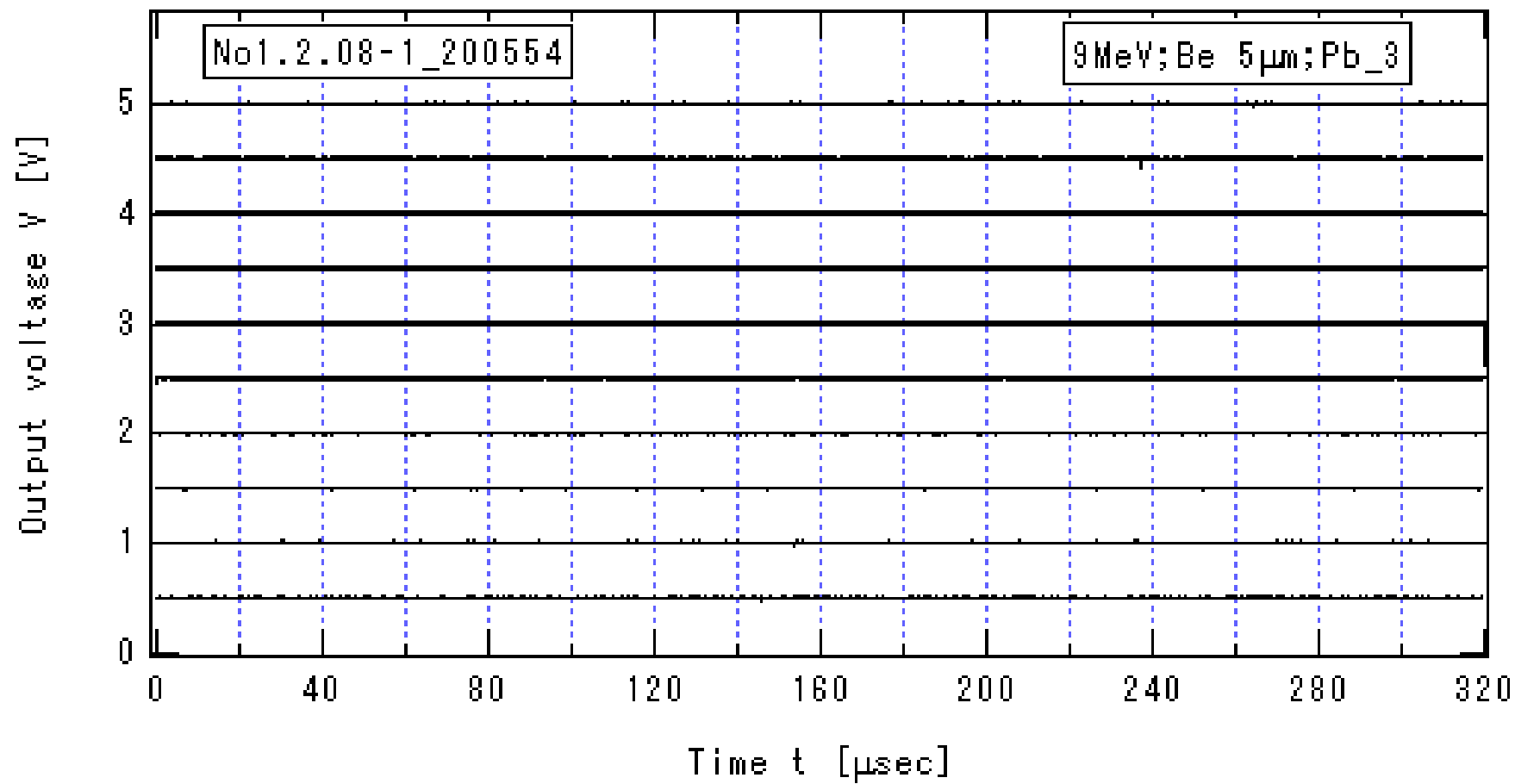


図 3.2.2-8\_1  $E_{\text{He}} = 9\text{MeV}$ ,  $I_{\text{He}} = 39\text{nA}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1)  
 $\text{Be}$  厚 5mm,  $\text{Pb}$  の厚さ 15cm,  $\text{HV} = -1.3\text{kV}$ ,  $V_{\text{Amp}} = 13\text{V}$

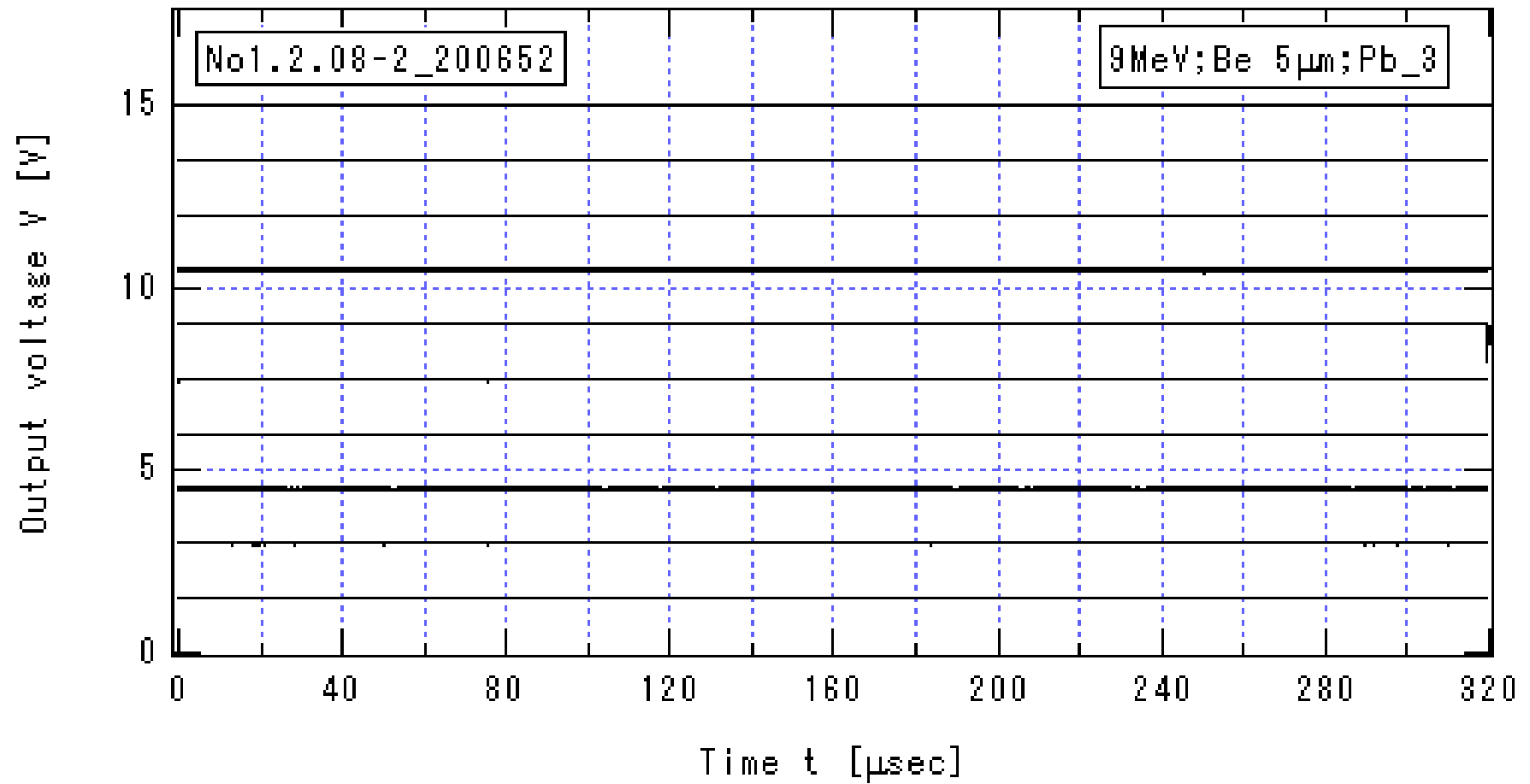


図 3.2.2-8\_2  $E_{\text{He}} = 9\text{MeV}$ ,  $I_{\text{He}} = 39\text{nA}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2)  
 Be 厚 5mm, Pb の厚さ 15cm,  $HV = -1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}} = 13\text{V}$

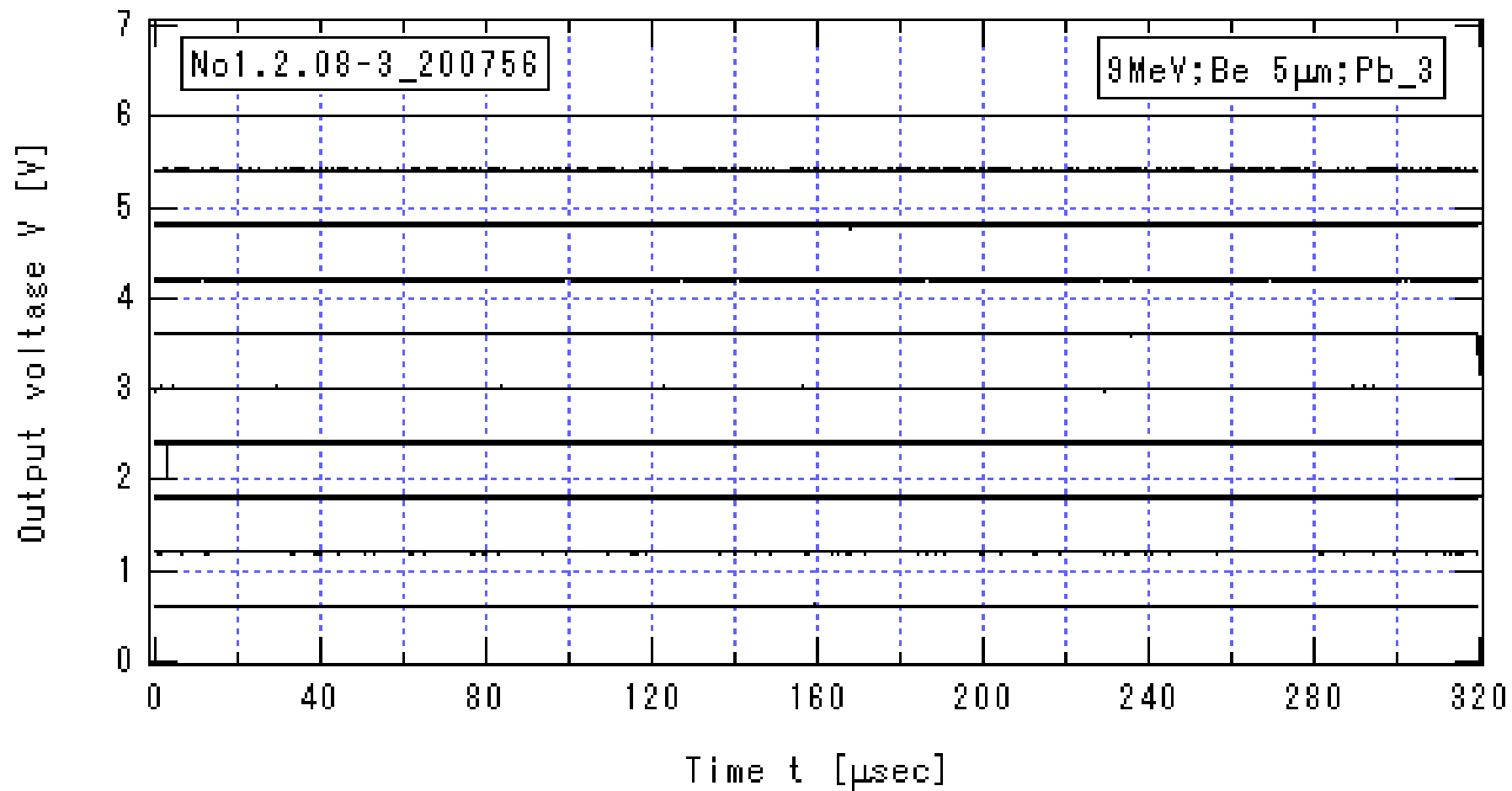


図 3.2.2-8\_3  $E_{\text{He}} = 9\text{MeV}$ ,  $I_{\text{He}} = 39\text{nA}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3)  
 Be 厚 5mm, Pb の厚さ 15cm, HV=-1.3 kV,  $V_{\text{Amp}} = 13\text{V}$

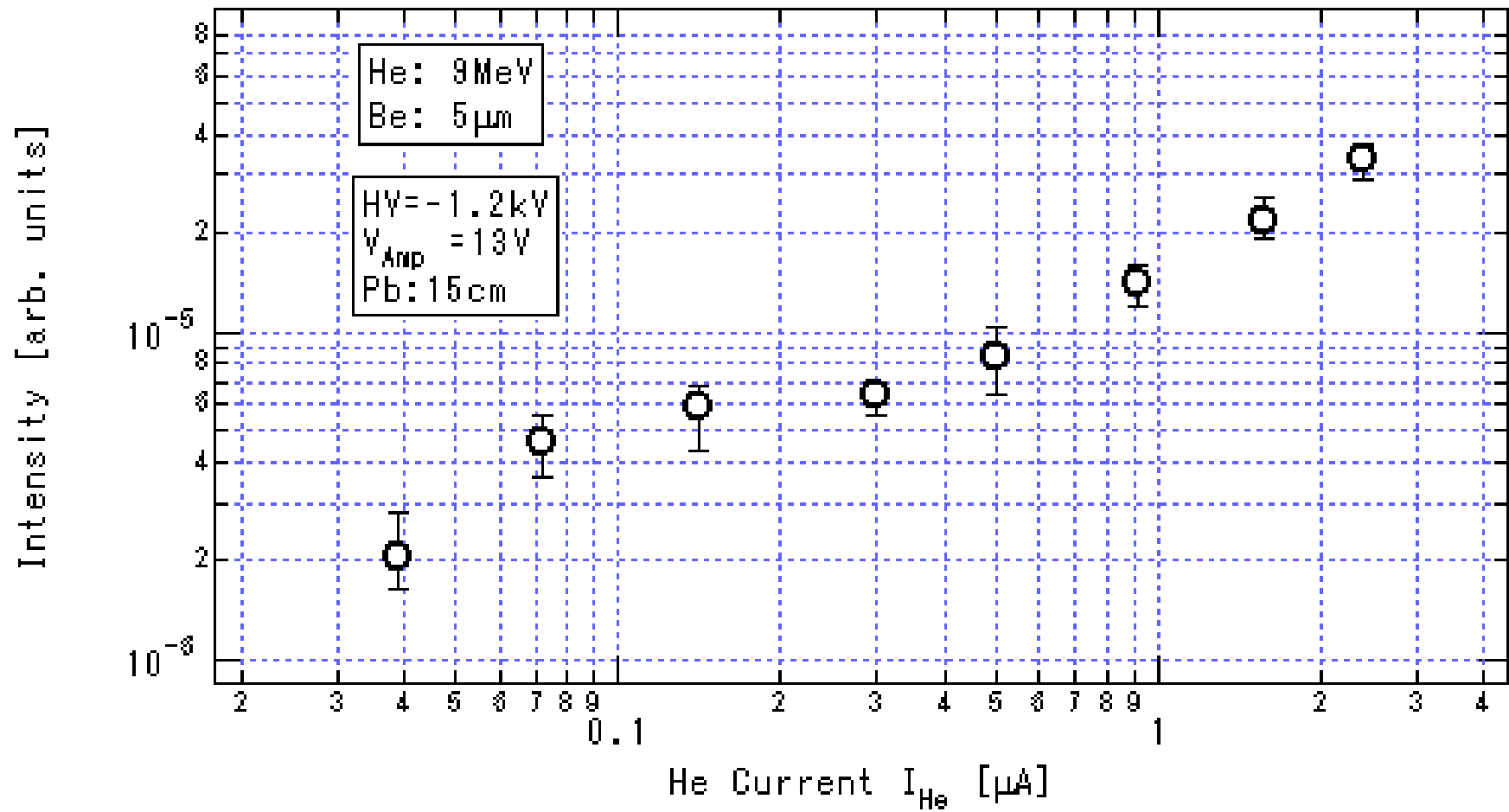


図 3.2.2-9 放射線強度の He イオン電流値  $I_{\text{He}}$  依存性

$E_{\text{He}} = 9\text{ MeV}$ , Be 厚 5mm, Pb の厚さ 15cm, HV=-1.3 kV,  $V_{\text{Amp}}=13\text{ V}$

### 3.2.3 n- $\gamma$ 分別法 (パルスモード計測) による波高分析実験

高エネルギーHe イオンが Be ターゲットを衝撃するとき、中性子と共に放出されるガンマ線も同時に放出される。検出器に入射するガンマ線の影響を調査するために、パルスモード計測による n- $\gamma$  分別実験を実施した。液体シンチレータ NE213 に入射したガンマ線による発光はコンプトン散乱でより生成される電子に、又中性子による発光は反跳プロトンによるため、発光の立上り時間に差を生じる。本研究で用いた方法は、この差を利用した中性子及びガンマ線の弁別法である。十分な信号処理時間を保証するために、検出器へ入射する放射線のカウンtrate を数 kcps とする実験条件を採用した。電流モードによる高線量中性子測定と同時におこなうため、図 3.1-6 に示すように、Be ターゲットより~4m 離れた位置に検出器を設置し、n- $\gamma$  分別法によるパルスモード計測を行った。Be ターゲットからのガンマ線のみを観測する為に、ターゲットを見込む検出部前面以外は 10~15cm の鉛ブロックで覆った。

エネルギー  $E_{\text{He}}=15\text{MeV}$  のヘリウムビームが  $5\mu\text{m}$  厚のベリリウムを衝撃した時に放射される放射線を、シンチレータ前面に何も設置しない実験配置(Pb\_0cm)及び厚さ 10cm の鉛ブロックを設置した実験配置(Pb\_10cm) で計測した。各々の実験配置で測定したシンチレータ発光の立上り時間に対するカウント数を図 3.2.3-1 (Pb\_0cm) 図 3.2.3-2 (Pb\_10cm) にプロットする。横軸は立上り時間に対応する設定チャンネル番号であり、番号が高いほど立上り時間の値が大きいことを示す。チャンネル番号 214~225 の信号がガンマ線が入射したことによる液体シンチレータの発光信号に、225~250 の信号が中性子入射による信号である。縦軸は、液体シンチレータへのガンマ線の入射 ( $\gamma$ -event) 又は中性子の入射(n-event)が起こった回数である。従って、全体の面積に対する各々の部分の比は、検出器に入射するガンマ線及び中性子の個数比を与える。シンチレータ前面に何も設置しない実験配置でのガンマ線と中性子の個数比は 0.37 : 0.63、厚さ 10cm の鉛ブロックを設置した実験配置では 0.23 : 0.77 であった。4 割弱であったガンマ線の割合が、10 厚の鉛ブロックを設置することにより 2 割強に減衰した。

エネルギー  $E_{\text{He}}=9\text{MeV}$  のヘリウムビームが  $5\mu\text{m}$  厚のベリリウムを衝撃した時の放射線に対し、 $E_{\text{He}}=15\text{MeV}$  と同様な実験を行った。Pb\_0cm 及び Pb\_10cm)各々の実験配置で測定したシンチレータ発光の立上り時間に対するカウント数を図



3.2.3-3 ( Pb\_0cm ) 図 3.2.3-4 ( Pb\_10cm ) に示す。シンチレータ前面に何も設置しない実験配置でのガンマ線と中性子の個数比は 0.42 : 0.58、厚さ 10cm の鉛ブロックを設置した実験配置では 0.29 : 0.71 であった。鉛ブロックを設置することにより、液体シンチレータに入射するガンマ線の個数割合が減少することが分かる。

中性子及びガンマ線の個数割合の結果を表 3.2.3 にまとめて示す。

シンチレータ前面に何も設置しない実験配置(Pb\_0cm)で、15MeV ヘリウムビームが 5 $\mu$ m 厚のベリリウムを衝撃した時に放射される放射線の波高分布を、total event, neutron event,  $\gamma$ -ray event に対し図 3.2.3-5\_1, 図 3.2.3-5\_2, 図 3.2.3-5\_3 にプロットする。カウント数はターゲットに入射したヘリウムイオンの個数で規格している。従って、縦軸はヘリウムイオン 1 個に対するチャンネルに入射した光子数である。実験データの取込みは、total event と neutron event について実施した。 $\gamma$ -ray event に対する図 3.2.3-5\_3 は、各チャンネル毎に total event の値から neutron event の値を差し引いて得られた波高分布である。 $\gamma$ -ray event は~60 チャンネル以下に現れ、~60 チャンネル以上のチャンネルの大部分は neutron event による発光である。本実験配置では、NE213 の発光強度の少ない部分（低チャンネル部）を除けば、殆どが He が Be を衝撃した際に放出された中性子による発光強度の波高分布を観測していると考えられる。

シンチレータ前面に 10cm 厚の鉛ブロックを設置した実験配置(Pb\_10cm)で観察された放射線の波高分布を、total event, neutron event,  $\gamma$ -ray event に対し図 3.2.3-6\_1, 図 3.2.3-6\_2, 図 3.2.3-6\_3 にプロットする。鉛ブロックの設置により、検出器に入射するガンマ線及び中性子の個数が減少する以外は、波高分布の全体の傾向は Pb\_0cm と同様である。鉛ブロックの有無による、発光高分布を比較するために、図 3.2.3-7 及び 図 3.2.3-8 に neutron event 及び  $\gamma$ -ray event に対する波高分布を再記述する。鉛ブロックの存在の為に、ベリリウムから飛来する中性子及びガンマ線による発光強度が減衰していることを示す。

エネルギー  $E_{He}$  9MeV のヘリウムビームが 5 $\mu$ m 厚のベリリウムを衝撃した時の鉛ブロックをない設置しない場合の放射線による波高分布を、total event, neutron event,  $\gamma$ -ray event に対し図 3.2.3-9\_1, 図 3.2.3-9\_2, 図 3.2.3-9\_3 に、10cm 厚の鉛ブロックを設置した場合の放射線による波高分布を、図 3.2.3-10\_1, 図 3.2.3-10\_2, 図 3.2.3-10\_3 にプロットする。鉛ブロックの有無による、neutron event 及び  $\gamma$ -ray event

に対する発光高分布の比較を図 3.2.3-11 及び 図 3.2.3-12 に示す。

エネルギー $E_{\text{He}}$  15MeV のヘリウムビーム照射の場合と比較して、ヘリウム 1 個あたりの NE213 発光数が減少していること、neutron event に対する波高分布が 800 チャンネル以上で急速に減衰していること、等を除けば、全体の振舞いは  $E_{\text{He}}=15\text{MeV}$  He ビーム照射の場合と同様である。

n- $\gamma$  分別法による実験より、以下のことが明らかにされた。エネルギーが 9MeV 及び 15MeV のヘリウムビームが厚さ 5 $\mu\text{m}$  のベリリウムを衝撃する時、ビーム進行方向に対し $\sim 78^\circ$ に放射される中性子及びガンマ線の個数割合は、中性子が 0.58-0.63、ガンマ線が 0.37-0.42 であり、前面に厚さ 10cm の鉛ブロックを設置することにより個数割合は中性子が 0.71-0.77、ガンマ線が 0.23-0.29 となる。鉛ブロックの設置により、液体シンチレータに入射する中性子も減少するが、ガンマ線がより強く減衰されるためである。ガンマ線によるシンチレータの発光は高分布はチャンネル数の少ない部分に集中しており、これらを除いた波高分布は中性子がシンチレータに入射して生成された反跳プロトンの発光による。

電流モード計測に於いては、3.2ms 間に得られたのプリアンプ出力電圧信号に含まれるパルス波形のピーク値と半値全幅を乗じた値の和で、放射線の大きさを考える。半値全幅はほぼ同一であると考えられるので、ピーク値の和と同一である。この方法は、検出されたガンマ線が波高値の小さい場所に分布する本実験状況下では、電流モードで用いている積分値は中性子の寄与を主に扱う方法と考えられる。

表 3.2.3 5 $\mu\text{m}$  厚の Be をエネルギー  $E_{\text{He}}$  のヘリウムビームが衝撃した時、NE312 で検出されたガンマ線( $\gamma$ )と中性子(n)の個数割合。Pb width は検出器前面に設置した鉛の厚さ。

$E_{\text{He}}$	Pb width	$\gamma / (\gamma+n)$	$n / (\gamma+n)$
15MeV	0cm	37.05%	62.95%
15MeV	10cm	23.17%	76.83%
9MeV	0cm	41.98%	58.02%
9MeV	10cm	29.20%	70.80%

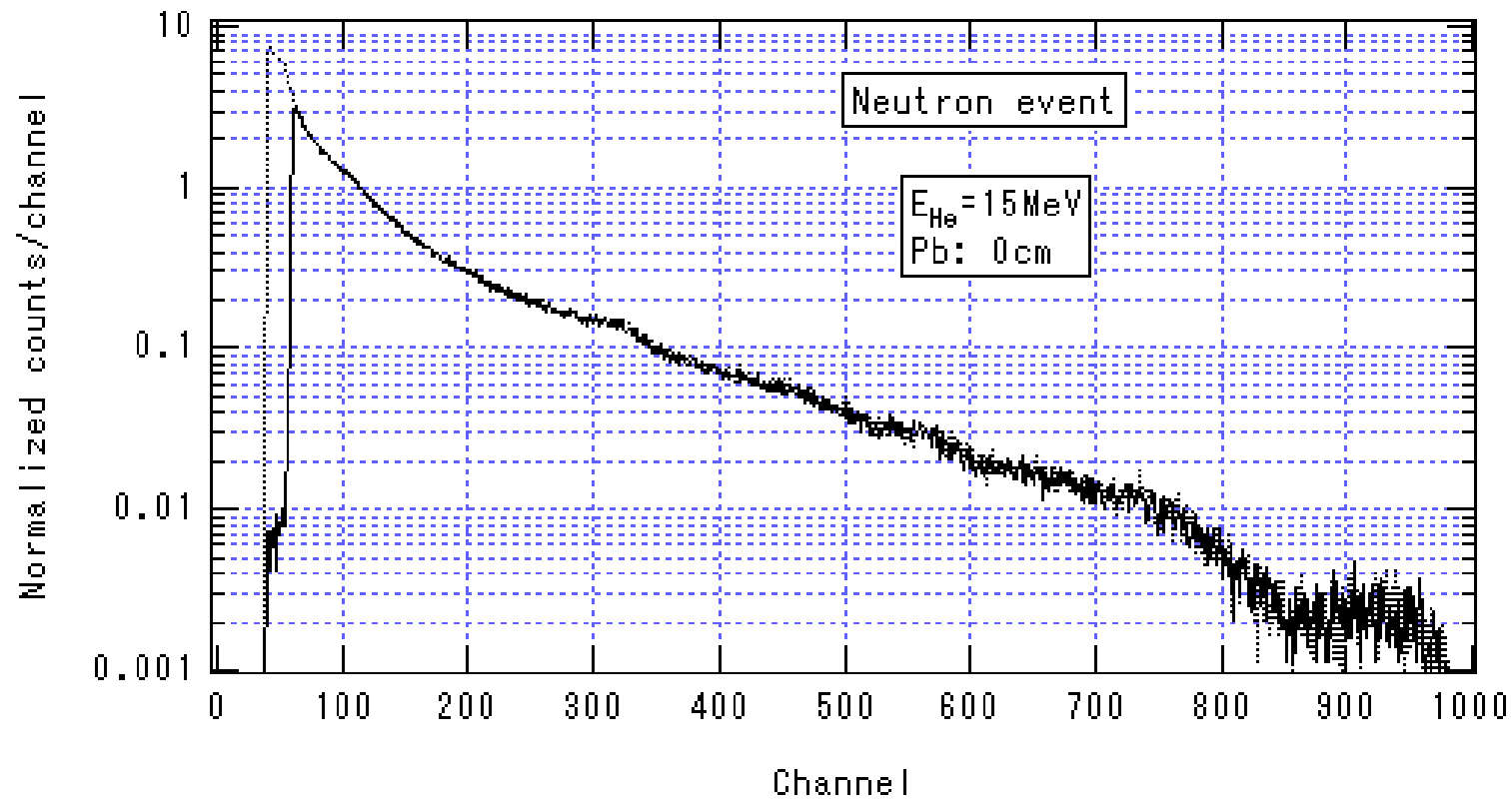


図 3.2.3-5\_2 15MeV He 照射 5 $\mu$ m 厚 Be からの neutron event による NE213 発光の波高分布 (Pb\_0cm)

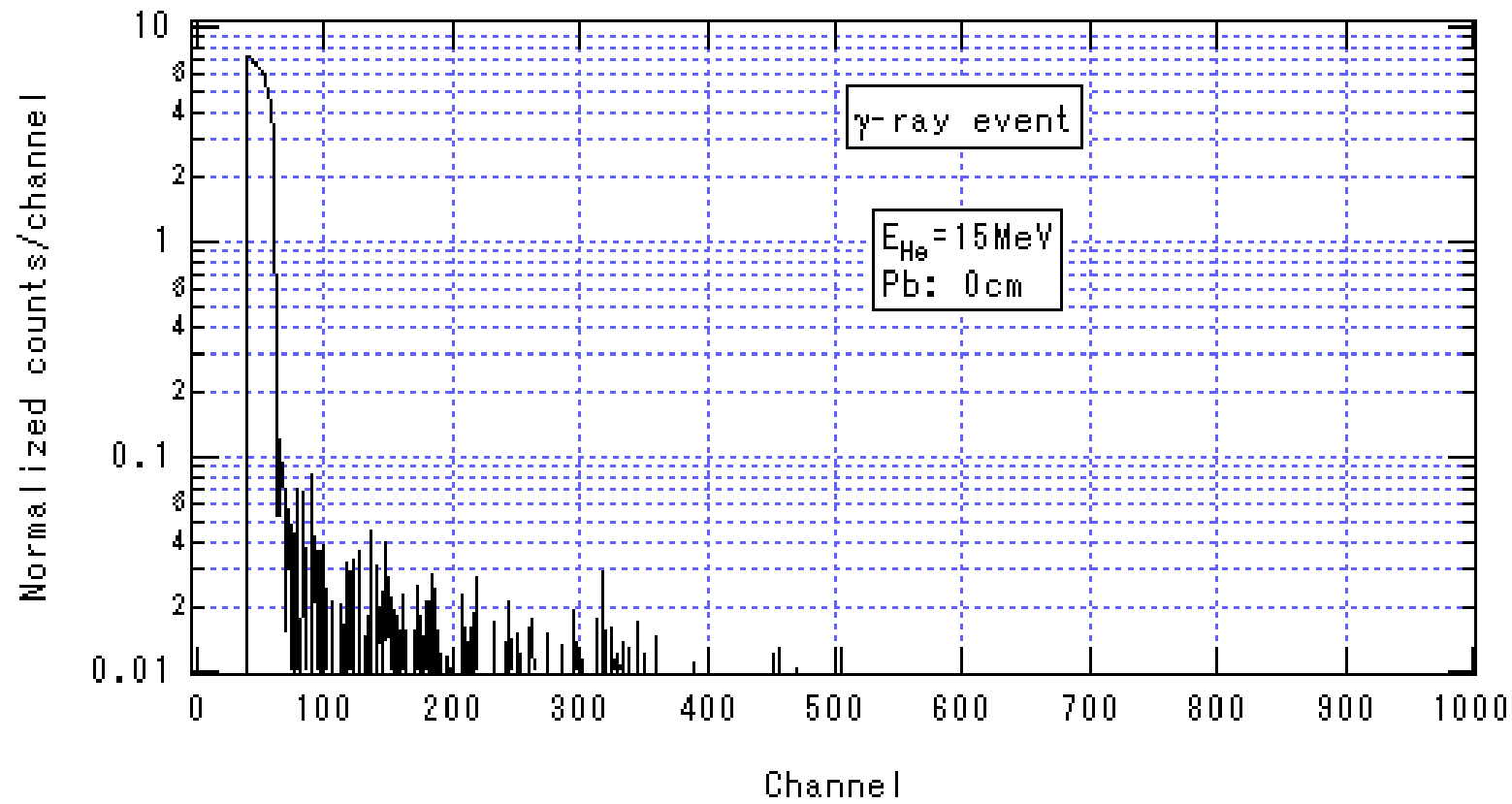


図 3.2.3-5\_3 15MeV He 照射 5 $\mu$ m 厚 Be からの  $\gamma$ -ray event による NE213 発光の波高分布 (Pb\_0cm)

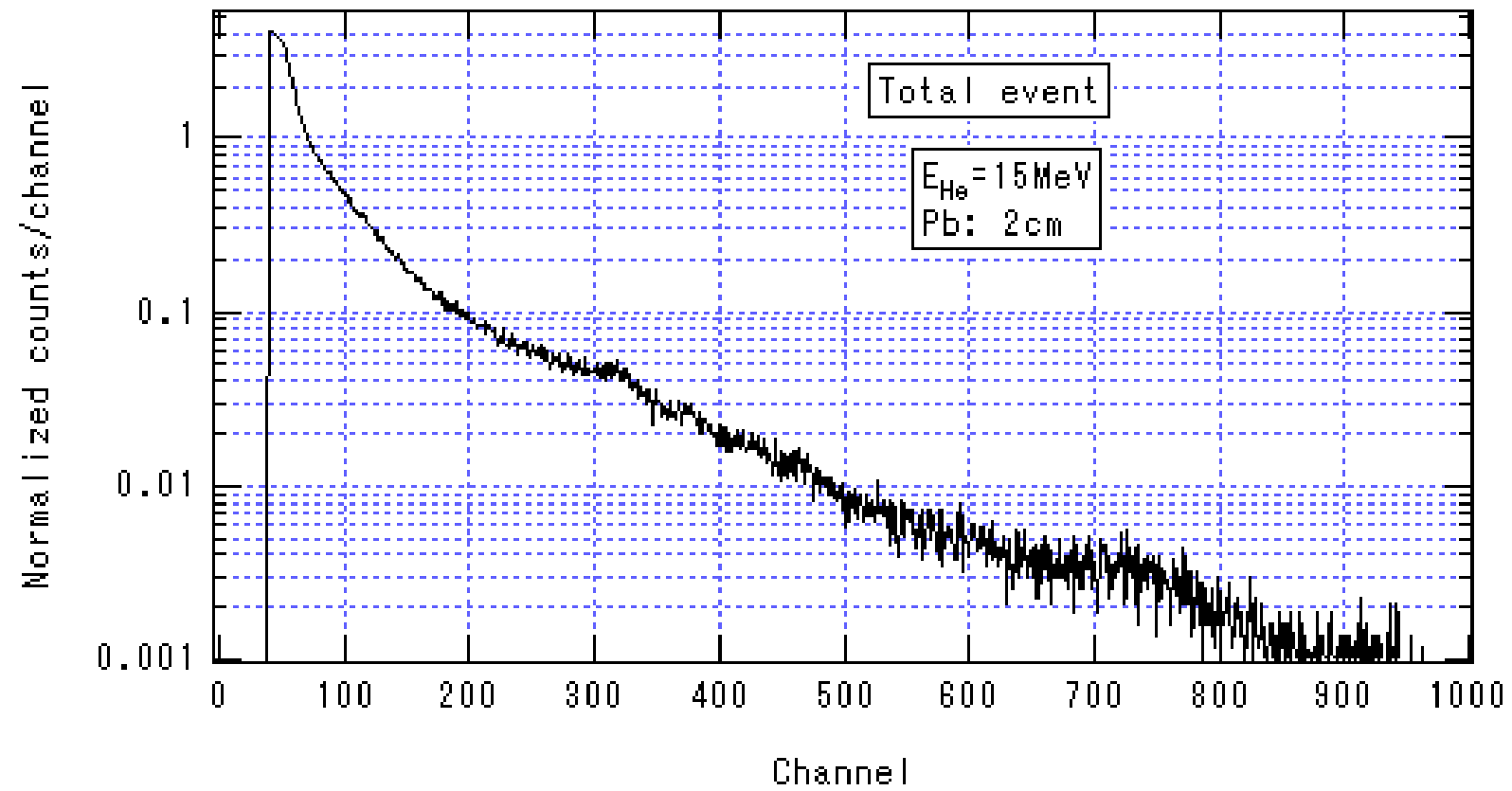


図 3.2.3-6\_1 15MeV He 照射 5 $\mu\text{m}$  厚 Be からの total event による NE213 発光の波高分布 (Pb\_10cm)

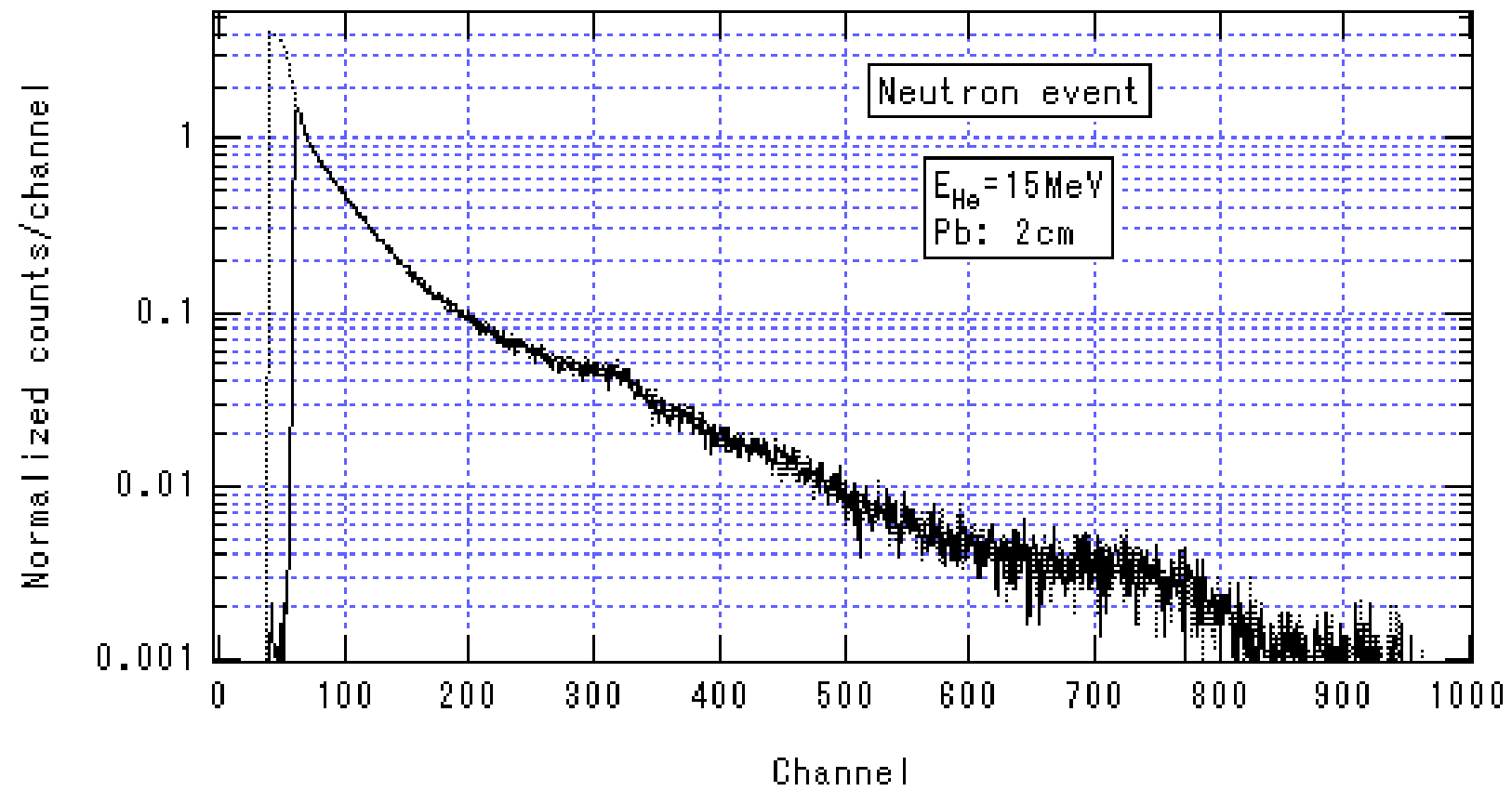


図 3.2.3-6\_2 15MeV He 照射 5 $\mu\text{m}$  厚 Be からの neutron event による NE213 発光の波高分布 (Pb\_10cm)

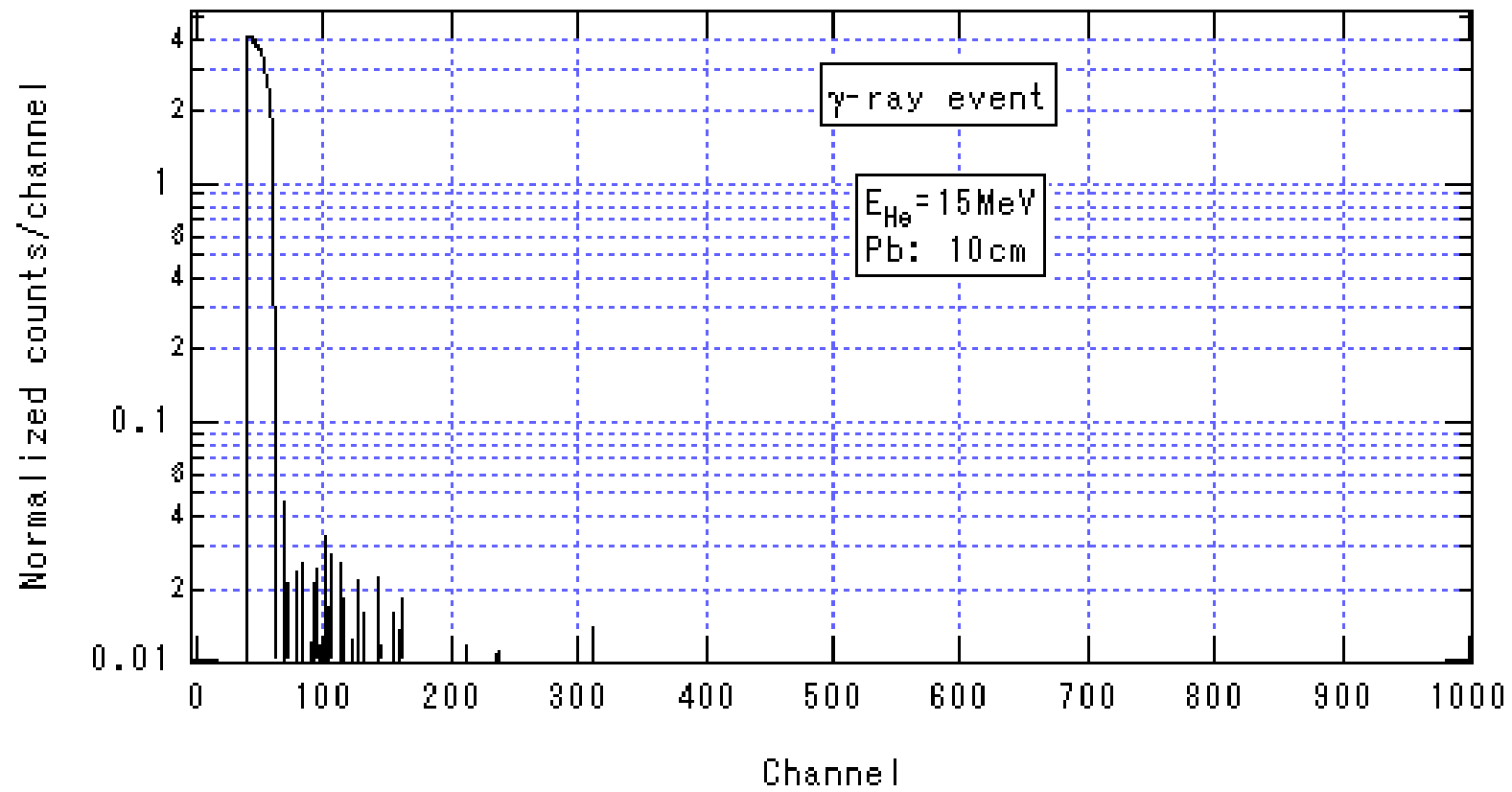


図 3.2.3-6\_3 15MeV He 照射 5 $\mu\text{m}$  厚 Be からの  $\gamma$ -ray event による NE213 発光の波高分布 (Pb\_10cm)



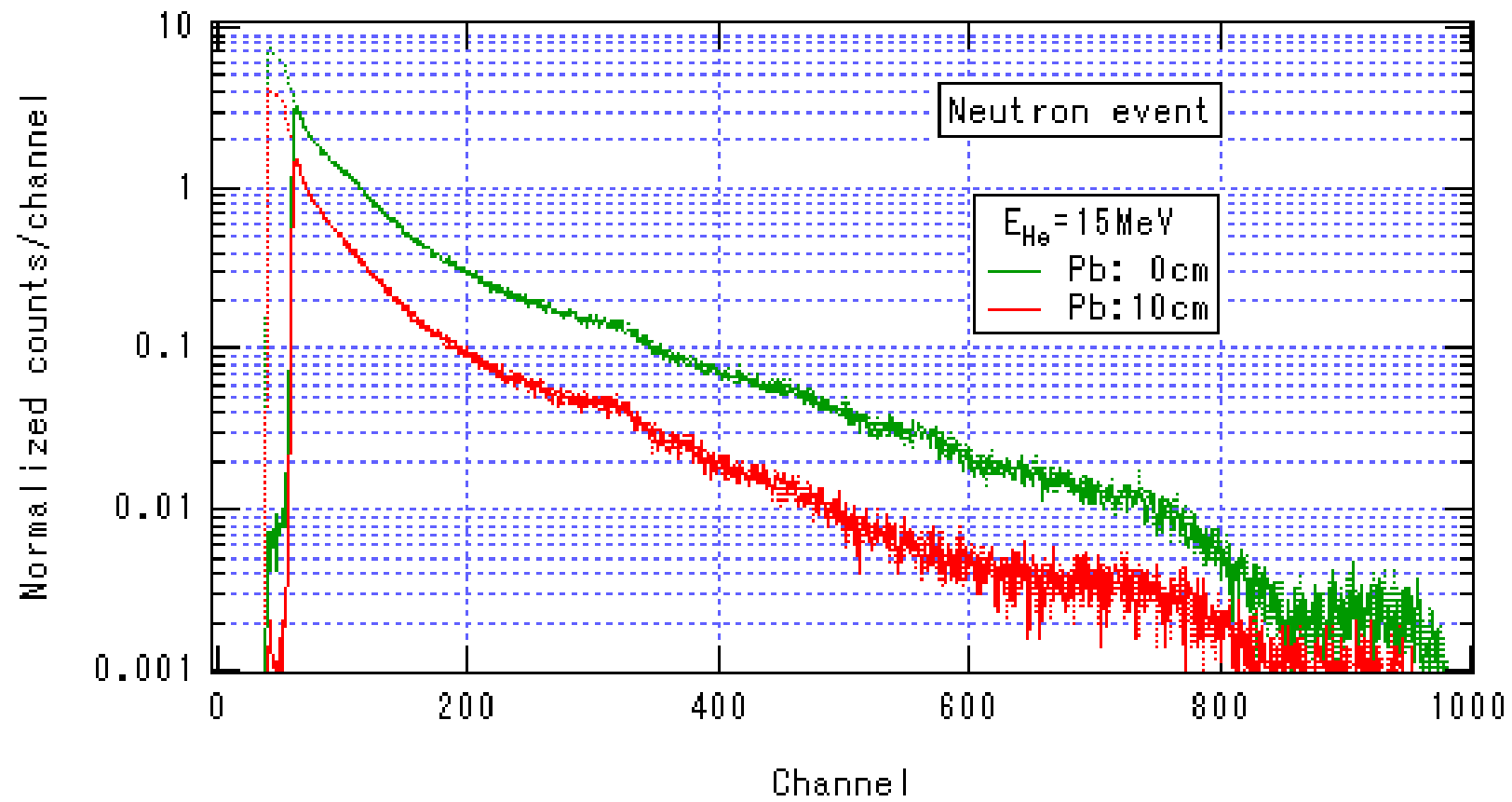


図 3.2.3-7 鉛ブロックの有無による neutron event 発光強度は高分布の比較 ( $E_{\text{He}}=15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ )

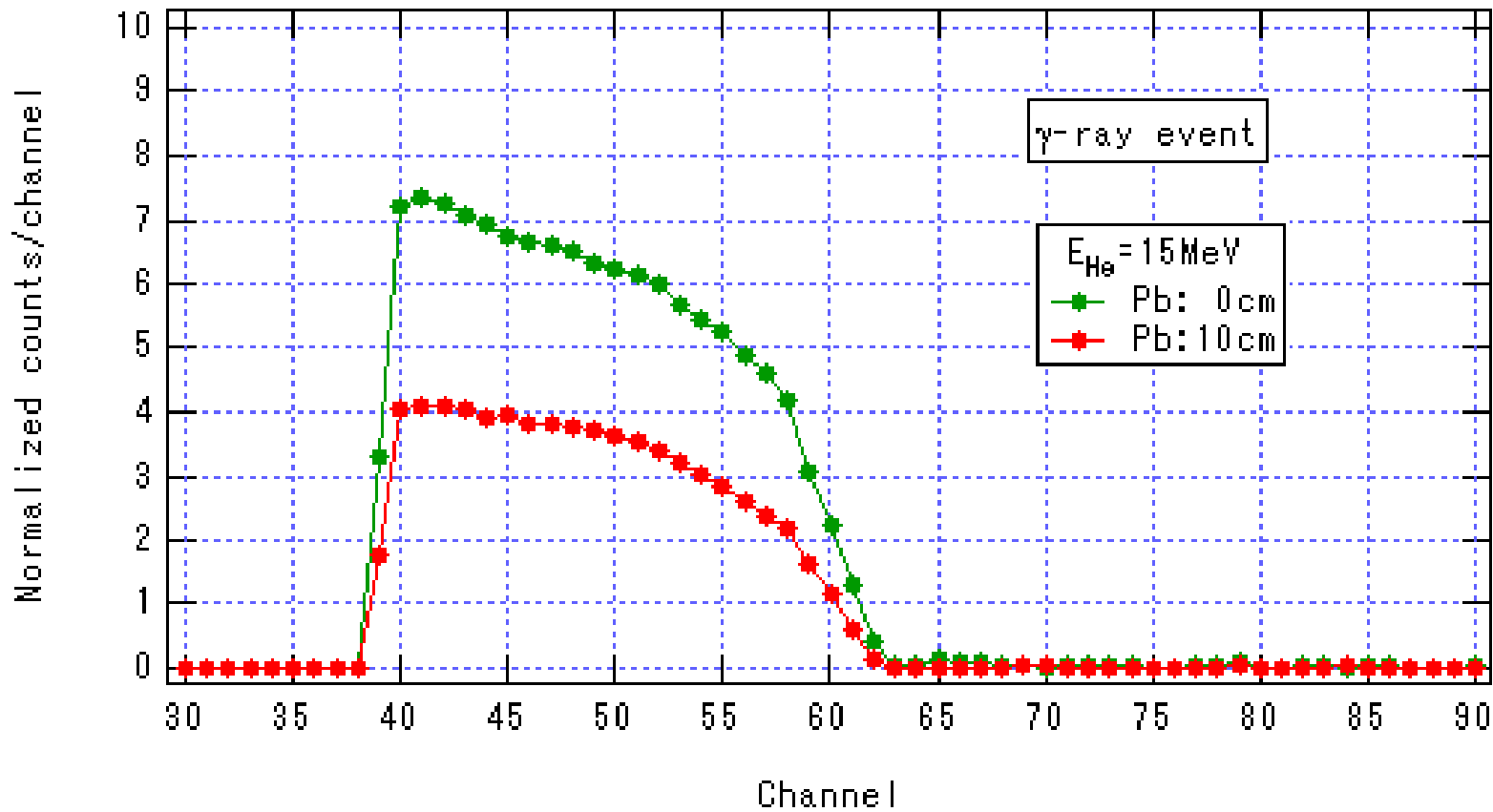


図 3.2.3-8 鉛ブロックの有無による  $\gamma$ -ray event 発光強度は高分布の比較 ( $E_{\text{He}}=15\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ )

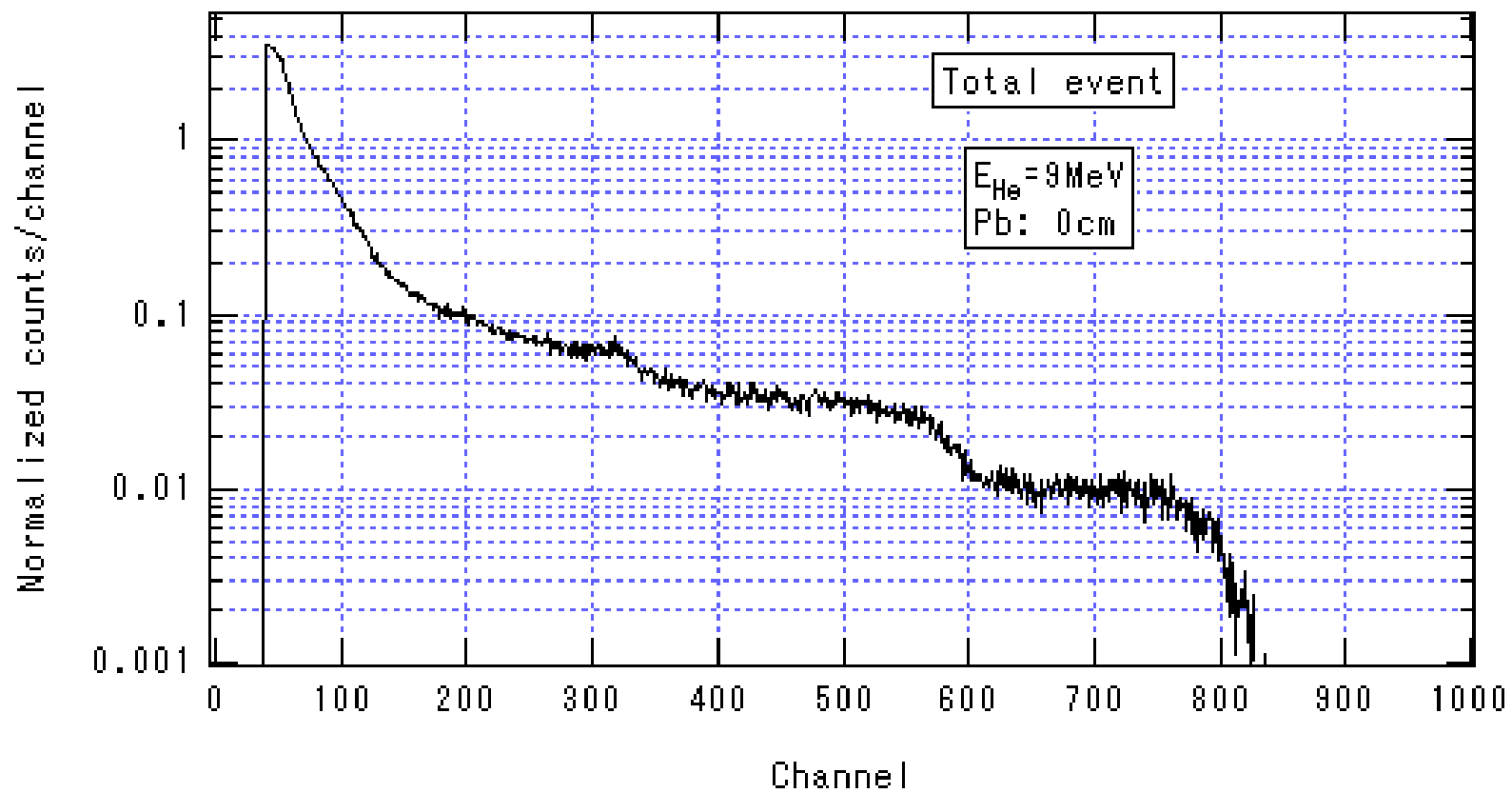


図 3.2.3-9\_1 9MeV He 照射 5 $\mu\text{m}$  厚 Be からの total event による NE213 発光の波高分布 (Pb\_0cm)

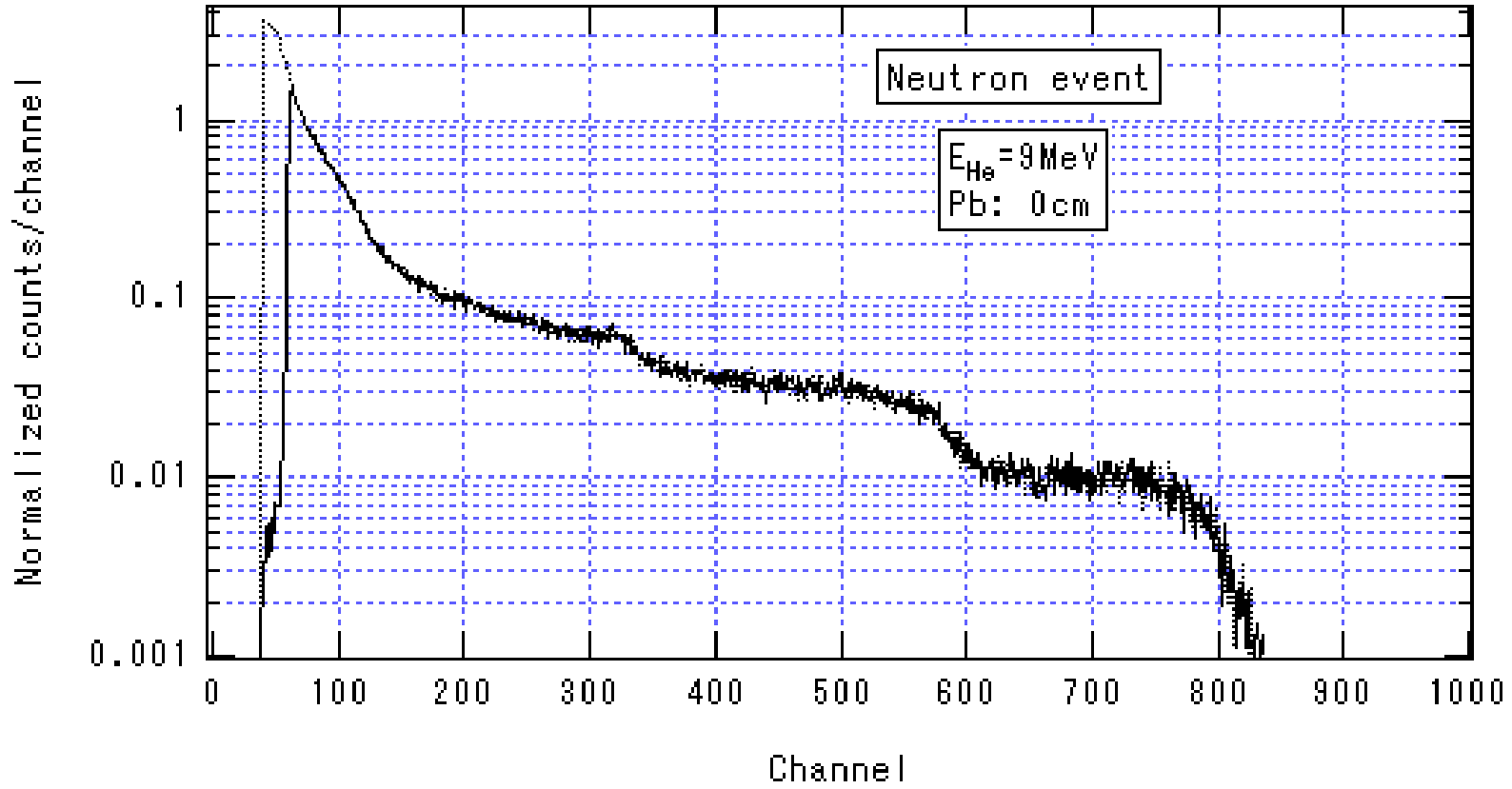


図 3.2.3-9\_2 9MeV He 照射 5 $\mu$ m 厚 Be からの neutron event による NE213 発光の波高分布 (Pb\_0cm)

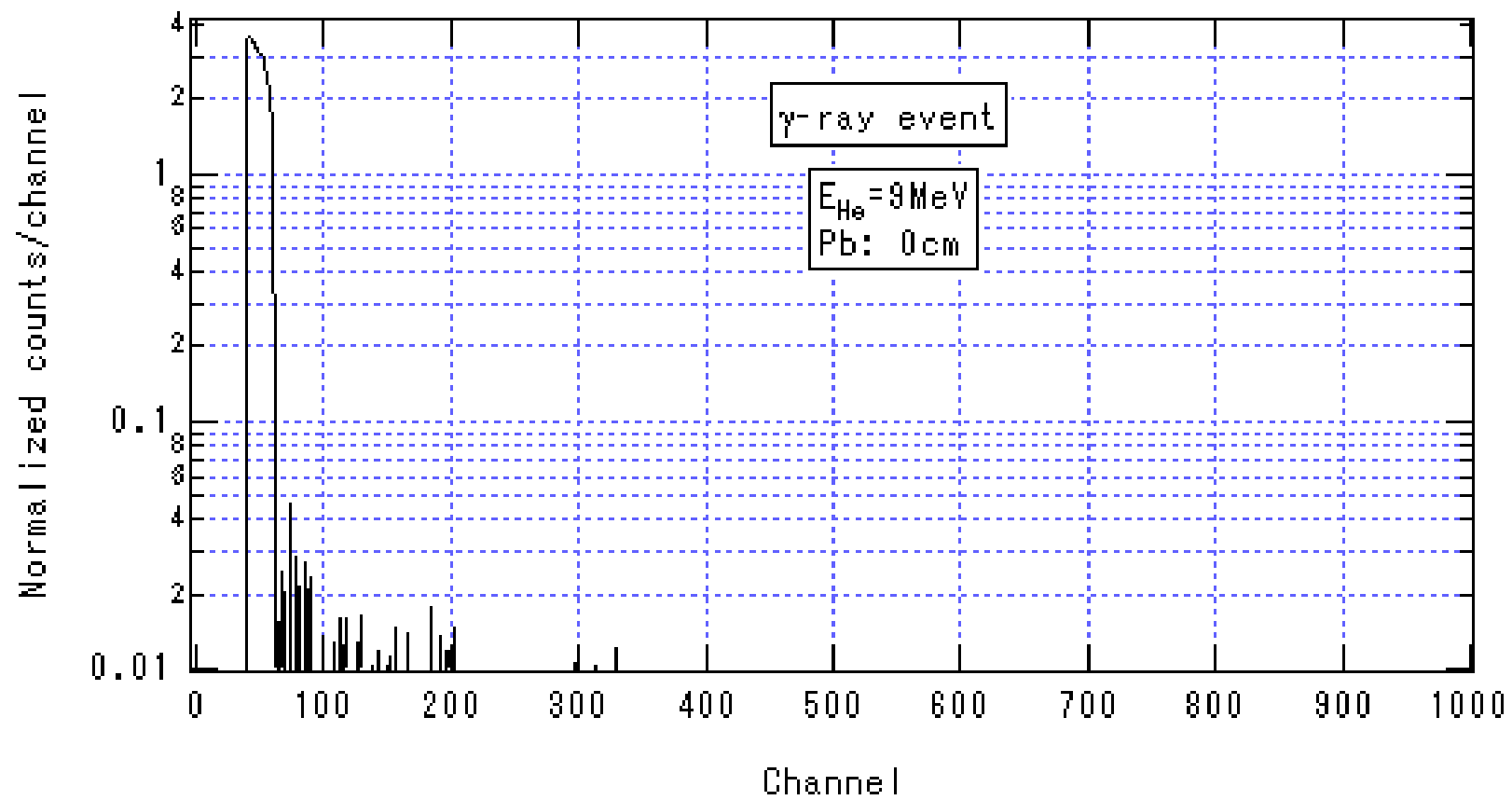


図 3.2.3-9\_3 9MeV He 照射 5 $\mu$ m 厚 Be からの  $\gamma$ -ray event による NE213 発光の波高分布 (Pb\_0cm)

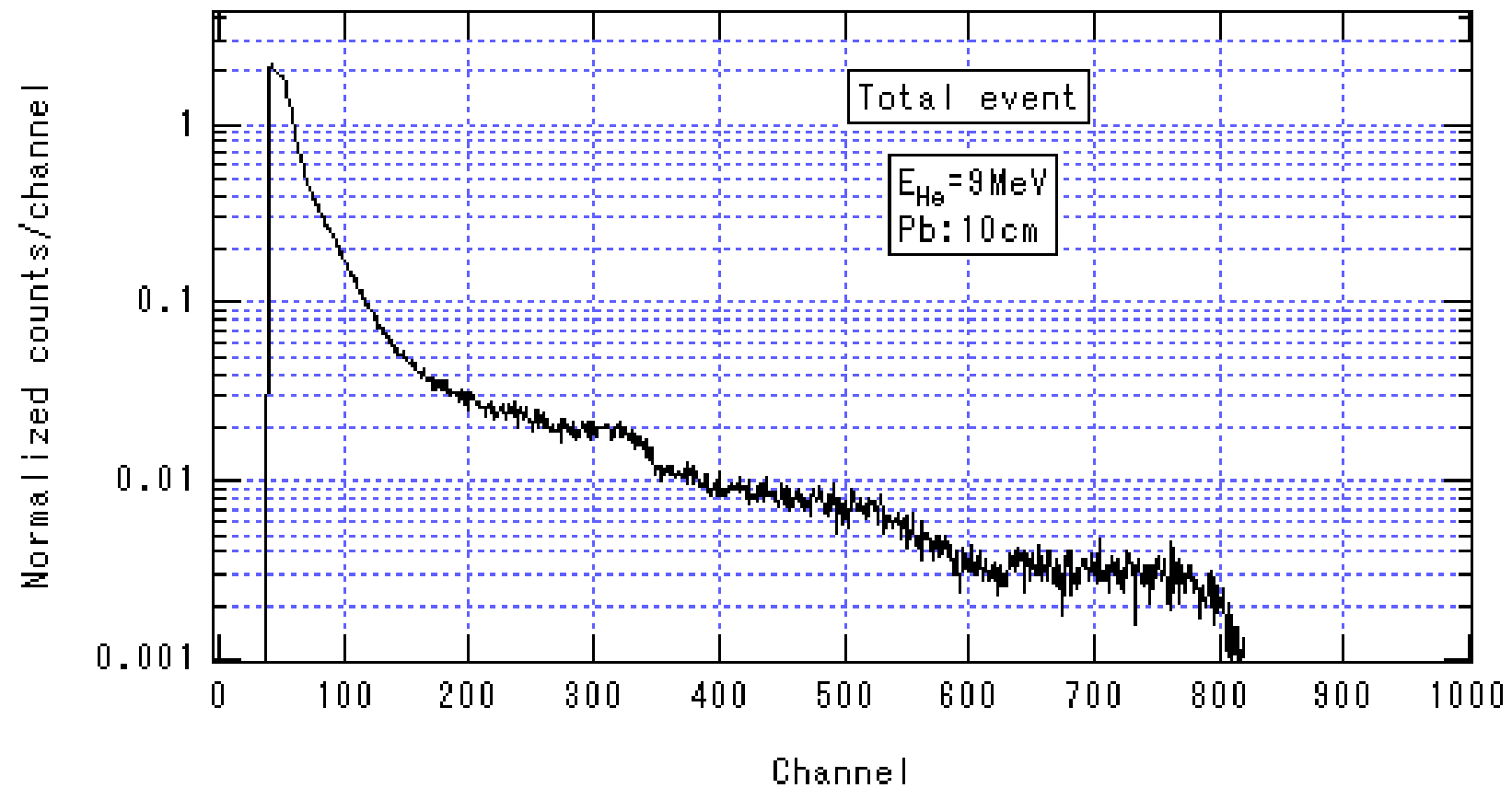


図 3.2.3-10\_1 9MeV He 照射 5 $\mu$ m 厚 Be からの total event による NE213 発光の波高分布 (Pb\_10cm)

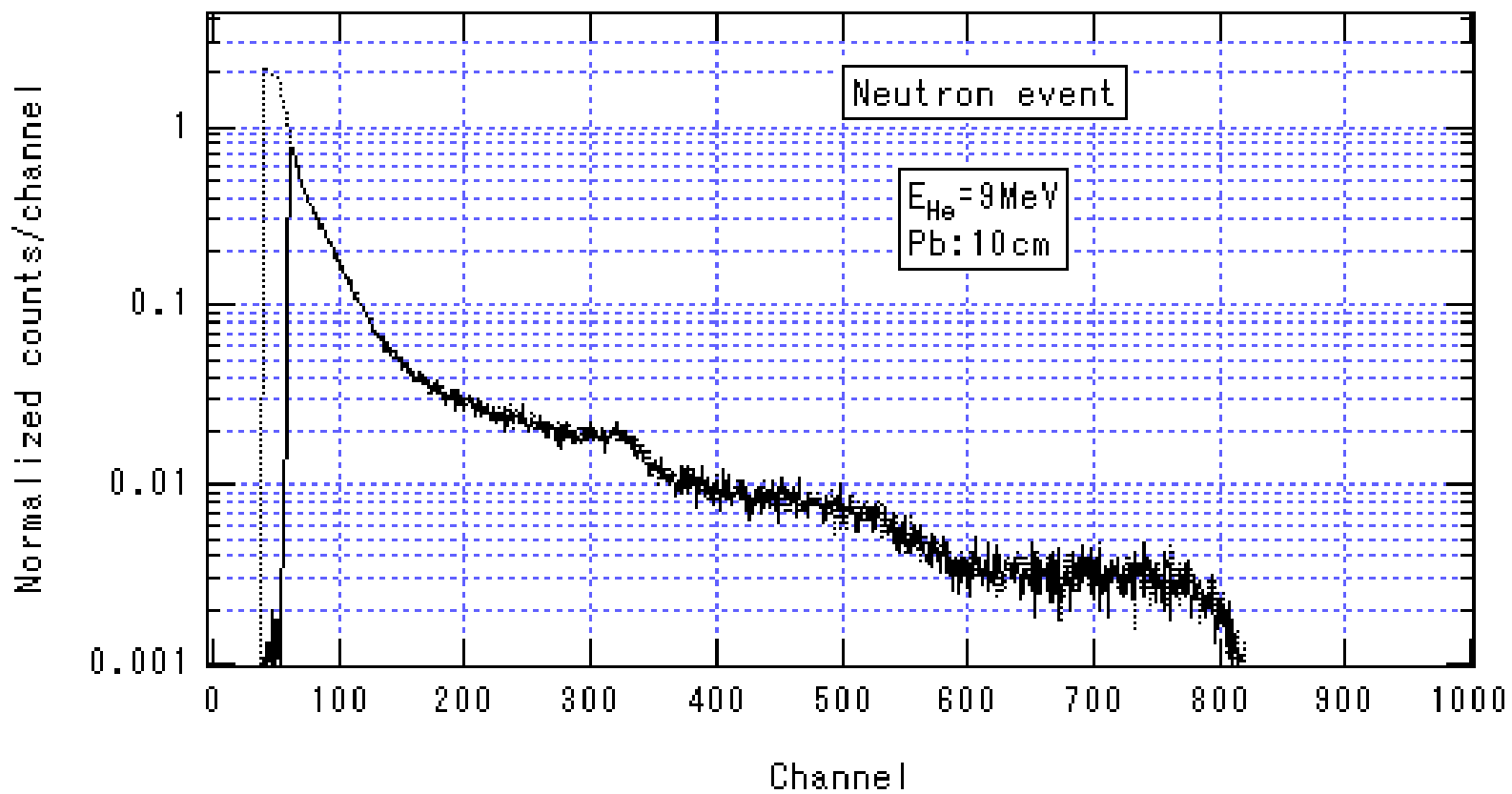


図 3.2.3-10\_2 9MeV He 照射 5 $\mu$ m 厚 Be からの neutron event による NE213 発光の波高分布 (Pb\_10cm)

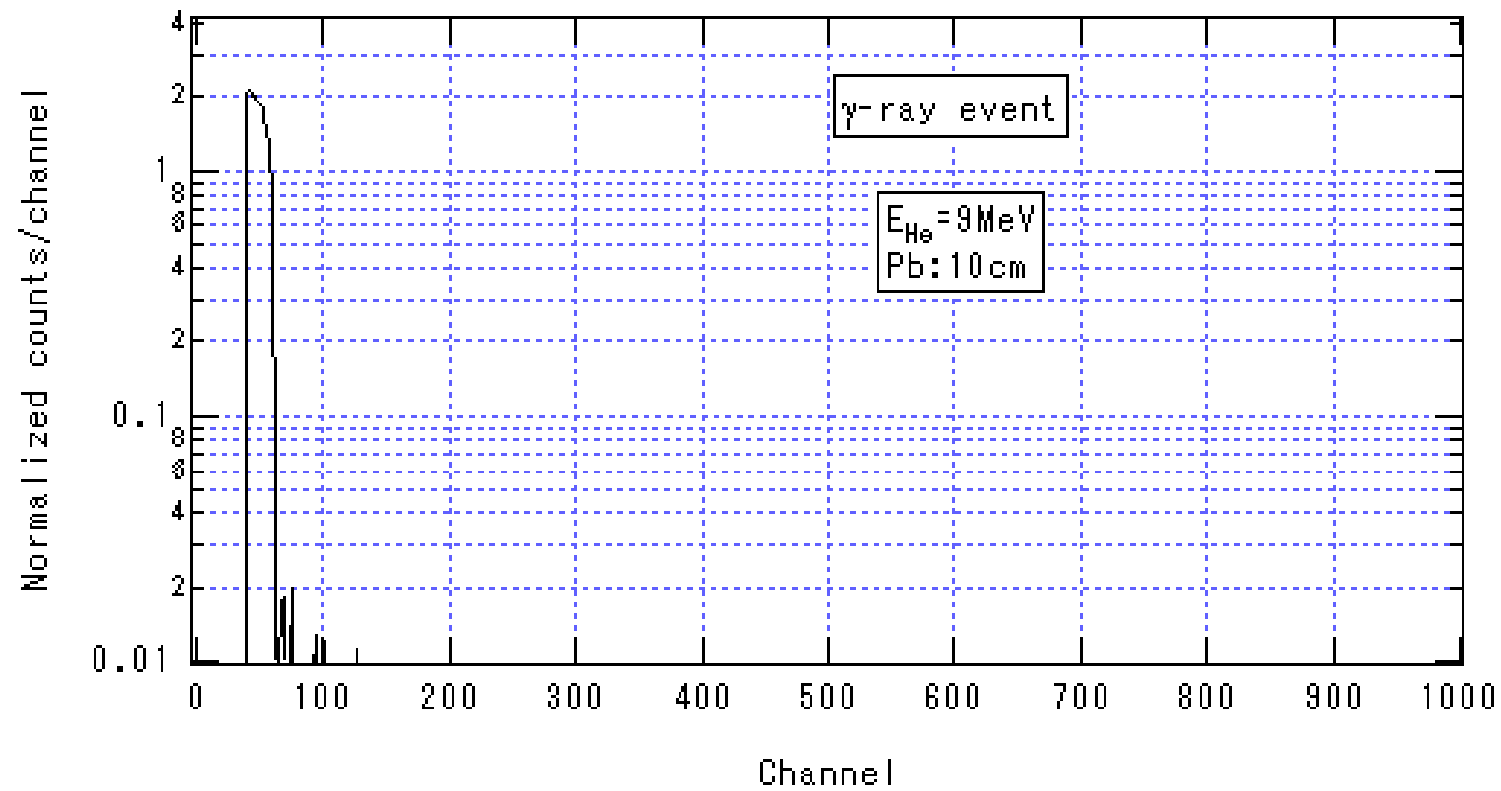


図 3.2.3-10\_3 9MeV He 照射 5 $\mu\text{m}$  厚 Be からの  $\gamma$ -ray event による NE213 発光の波高分布 (Pb\_10cm)



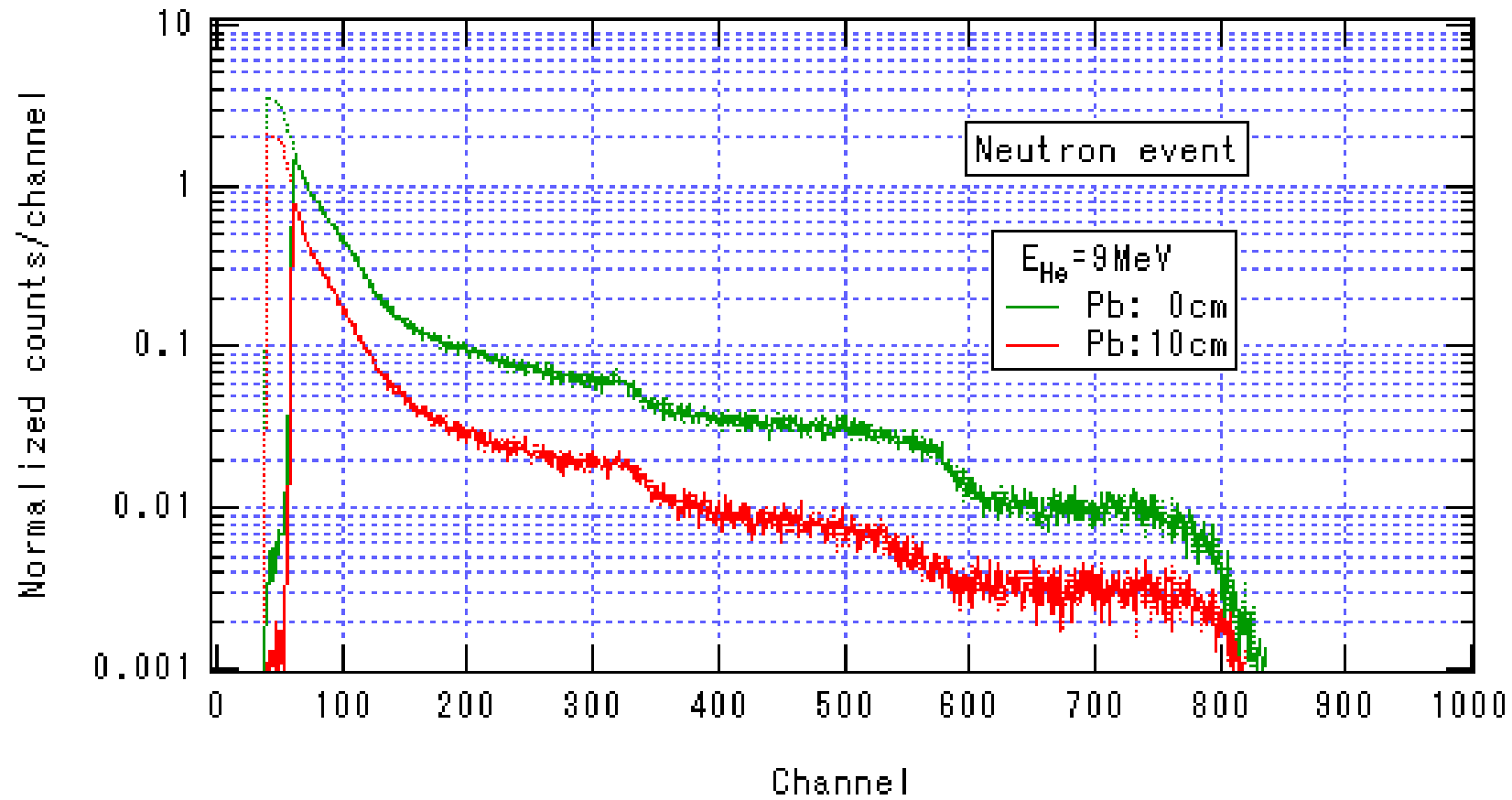


図 3.2.3-11 鉛ブロックの有無による neutron event 発光強度は高分布の比較 ( $E_{\text{He}}=9\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ )

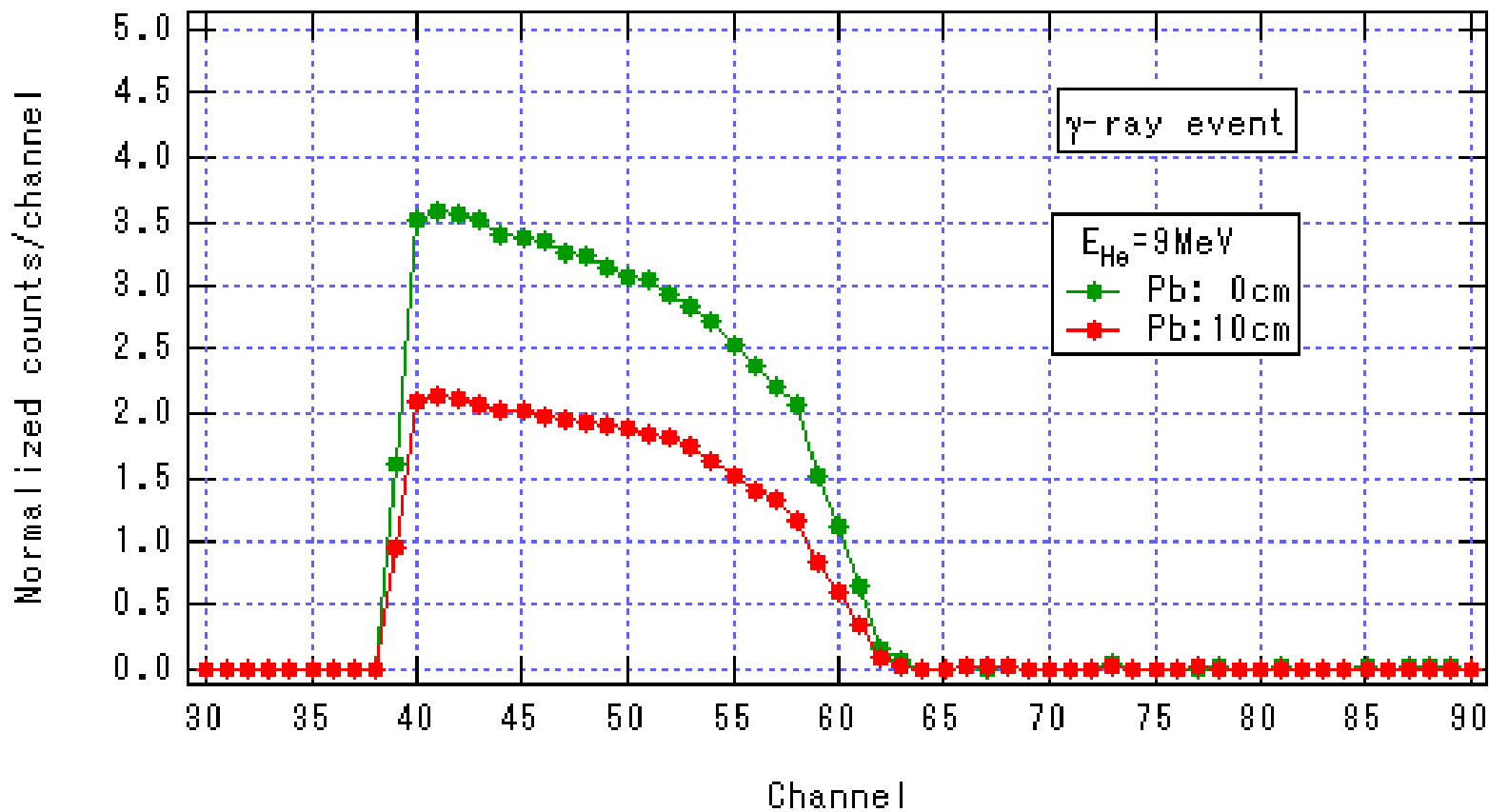


図 3.2.3-12 鉛ブロックの有無による  $\gamma$ -ray event 発光強度は高分布の比較 ( $E_{\text{He}}=9\text{MeV}$ , Be 厚  $5\mu\text{m}$ )

### 3.3 厚い Be ターゲットを用いた計測器応答特性の評価実験

15MeV のヘリウムビームが厚さ  $5\mu\text{m}$  のベリリウムターゲットを衝撃したときに、ビーム進行方向  $45^\circ$  ターゲットより 80cm 離れた位置で測定された中性子のカウントレートは 500kcps 以下であった。パルスモードによる放射線計測で使用される値 (1~3kcps) に比べると 100 倍以上の値であるが、臨界事故等を対象とする計測では、もっと大きいカウントレートでの計測が必要である状況も予想される。

検出器に入射する放射線の単位時間あたりの個数を増加するには、

- 1) ビーム強度の増加
- 2) ターゲット厚の増加
- 3) ターゲット・検出器間の距離の減少

との対策が考えられる。1) は、ヘリウムビーム電流の増加により、ターゲットの温度が上昇し Be が蒸発する可能性があるため、特別な照射系の設計・製作が必要とされる。3) は、本研究で採用した実験配置が、照射容器外に検出系を設置した場合のターゲットとの距離が最も短く出来る設置であるため、現有のイオン注入コースを用いる限りはターゲット・検出器間の距離の減少は不可能である。本実験では、ターゲット厚を増加する 2) の方法を採用した。

Be ターゲットに入射した 15MeV のヘリウムの飛程を、Bethe の与えた非弾性散乱による高エネルギー粒子の材料内での阻止能で評価すると、 $\sim 0.14\text{mm}$  である。入射した 15MeV He が Be ターゲット内で静止するまで中性子が放出されると単純の考えると、放出される中性子個数は、 $5\mu\text{m}$  厚の Be ターゲットを用いた場合に比べて約 30 倍の増加が期待される。本実験では、Be ターゲットの厚さを 0.2mm とした。

### 3.3.1 15MeV He 照射 0.2mm Be 放出放射線を用いた予備的実験

Be ターゲットの厚さを 0.2mm とした場合、15MeV He ビームはターゲット内で完全に生成するため、照射時の電流はターゲット下流の Faraday Cup では測定できない。本節の放出放射線強度の増加を確認するための予備的実験では、ターゲットに流れ込む電流  $I_{\text{target}}$  を計測し、照射時の電流とした。

液体シンチレータの前面には、厚さ 10cm の鉛ブロックを設置し、ターゲットに流れ込む電流  $I_{\text{target}}$  を  $0.5\mu\text{A}$  から  $4.6\mu\text{A}$  まで 5 段階で徐々に増加させ電流モードによる放射線を測定した。光電子増倍管の印加電圧 HV は  $-1.3\text{kV}$ 、プリアンプの印加電圧  $V_{\text{Amp}}$  は  $13\text{V}$  とした。0.2mm 厚のベリリウムへの 15MeV ヘリウム照射による検出器応答評価のための実験条件を、Data number 毎に表 3.3.1 にまとめる。

プリアンプ出力信号の 3.2ms 間の時間変化を図 3.3.1-1 ( $0.5\mu\text{A}$ )、図 3.3.1-2 ( $1.00\mu\text{A}$ )、図 3.3.1-3 ( $1.95\mu\text{A}$ )、図 3.3.1-4 ( $3.95\mu\text{A}$ )、図 3.3.1-5 ( $4.63\mu\text{A}$ ) に示す。Be 厚を 0.2mm とすることにより、観測されるパルス数が増加したことが分かる。 $I_{\text{target}}$  を  $4.63\mu\text{A}$  の場合、単位時間あたりのパルス数 (カウントレート) は  $\sim 5\text{Mcps}$  程度も含まれている。図 3.3.1-1 から図 3.3.1-5 のデータを用いて求めた。放射線強度の He イオン電流値  $I_{\text{target}}$  に対する依存性を図 3.3.1-6 に示す。 $0.5\mu\text{A} \leq I_{\text{target}} \leq 4.63\mu\text{A}$  の領域で、積分値とイオン電流との直線性は極めて良好であることが分かる。この実験では He 照射時にターゲットから放出される 2 次電子の影響を無視している。このため、これ以上の議論は行わない。

表 3.3.1 0.2mm 厚のベリリウムへ 15MeV ヘリウム照射による  
検出器応答評価実験条件 (予備的実験)

Data number	E_He [MeV]	I <sub>target</sub> [μA]	Pb width [cm]	HV [kV]	V <sub>Amp</sub> [V]
No2.1.01-1_210306	15	0.5	10	-1.3	13
No2.1.01-2_210407	15	0.5	10	-1.3	13
No2.1.01-3_210624	15	0.5	10	-1.3	13
No2.1.02-1_210858	15	1	10	-1.3	13
No2.1.02-2_211022	15	1	10	-1.3	13
No2.1.02-3_211125	15	1	10	-1.3	13
No2.1.03-1_211356	15	1.95	10	-1.3	13
No2.1.03-2_211503	15	1.95	10	-1.3	13
No2.1.03-3_211559	15	1.95	10	-1.3	13
No2.1.04-1_211831	15	3.95	10	-1.3	13
No2.1.04-2_211936	15	3.95	10	-1.3	13
No2.1.04-3_212039	15	3.95	10	-1.3	13
No2.1.05-1_212215	15	4.63	10	-1.3	13
No2.1.05-2_212336	15	4.63	10	-1.3	13
No2.1.05-3_212437	15	4.63	10	-1.3	13

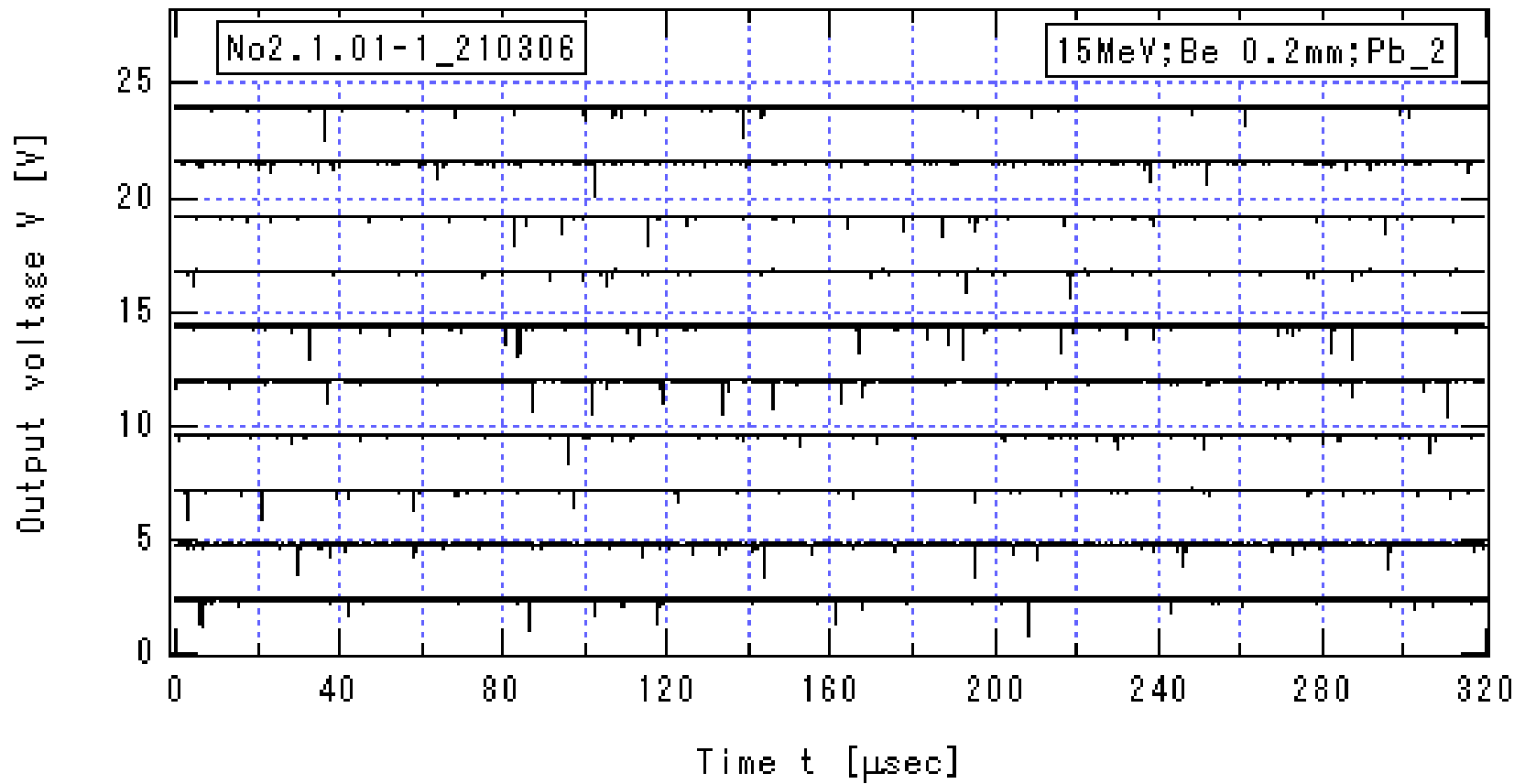


図 3.3.1-1\_1  $I_{\text{target}}=0.5\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 15cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

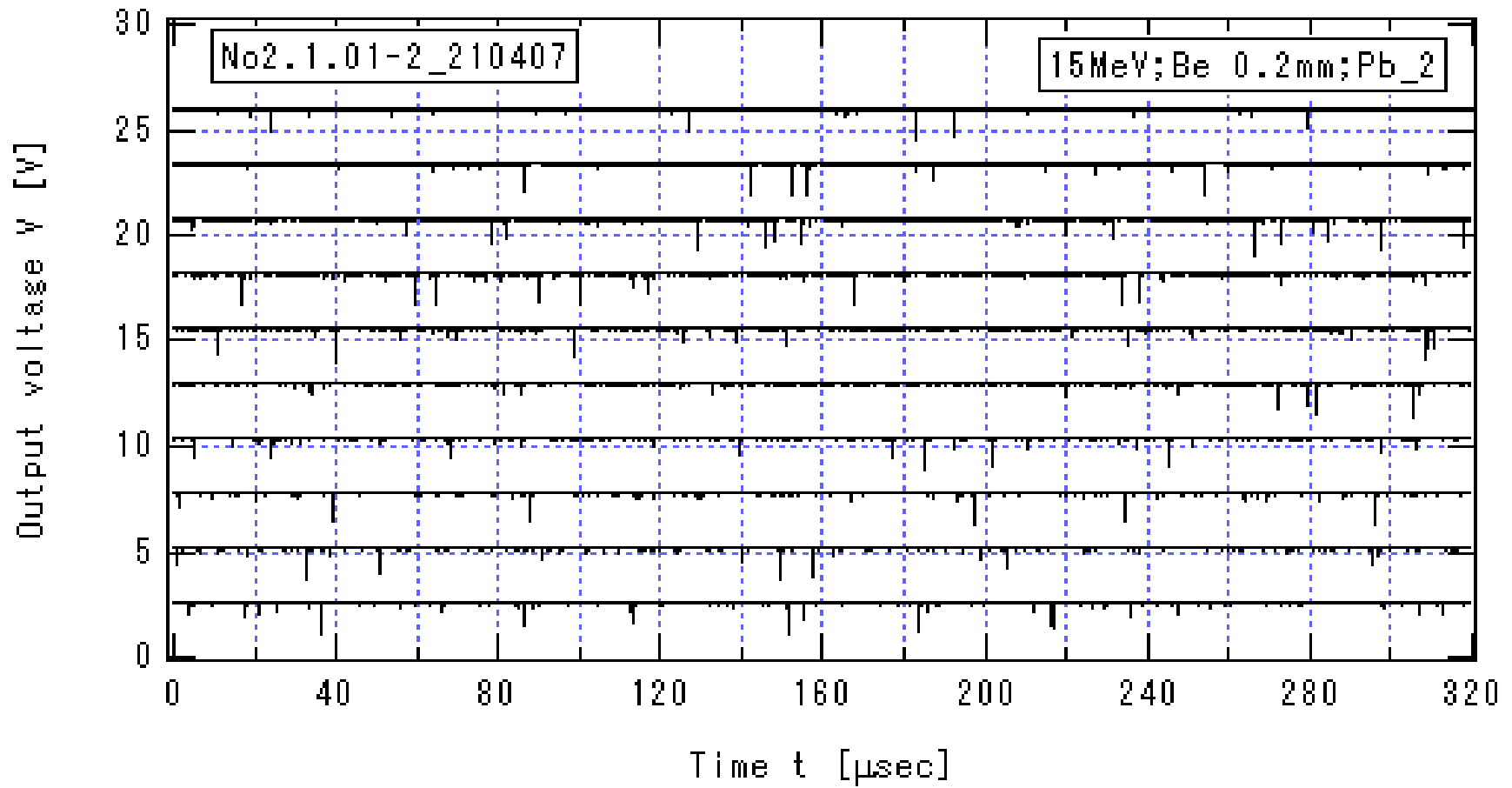


図 3.3.1-1\_2  $I_{\text{target}}=0.5\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2)  
 $E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 15cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

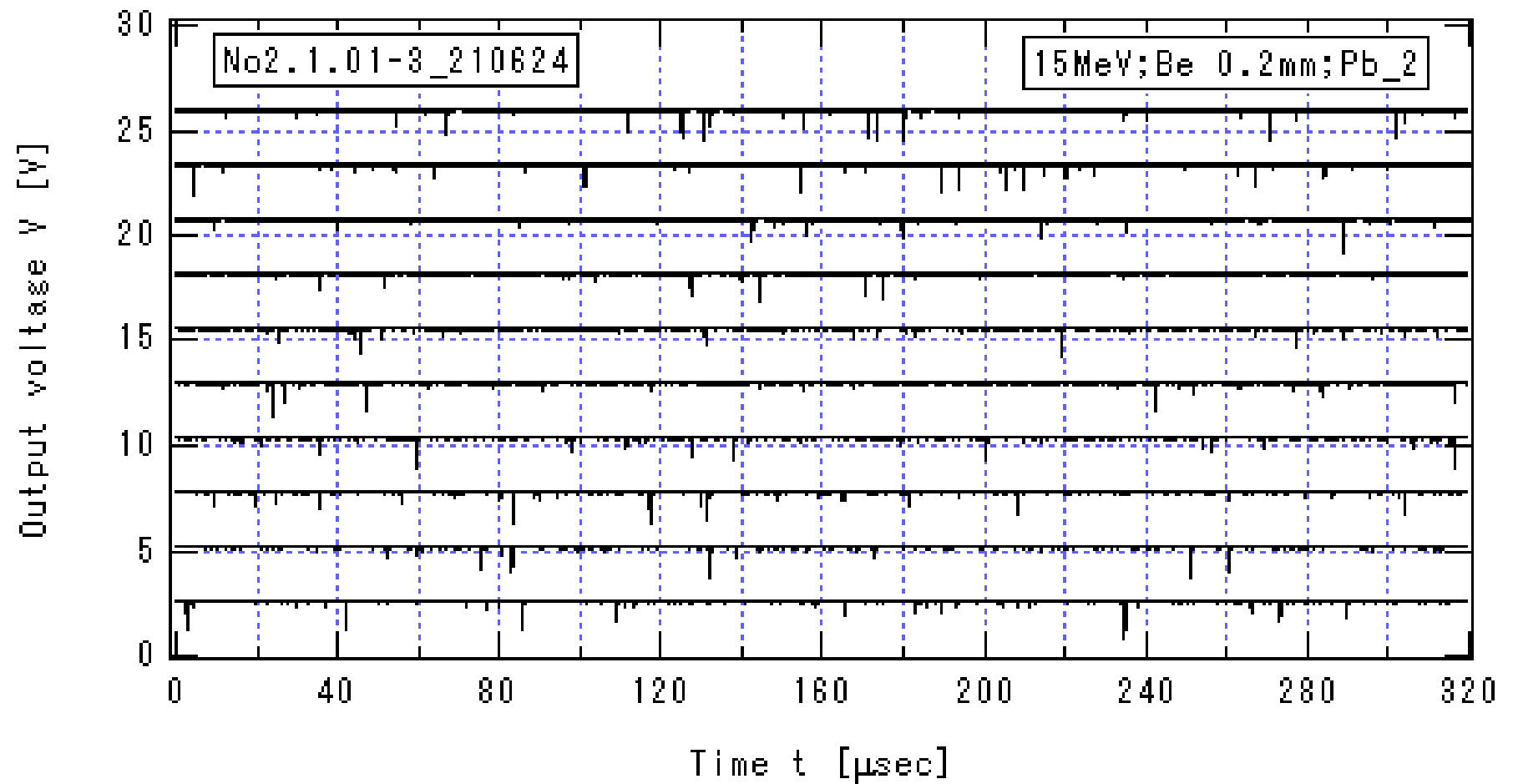


図 3.3.1-1\_3  $I_{\text{target}}=0.5\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 15cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$



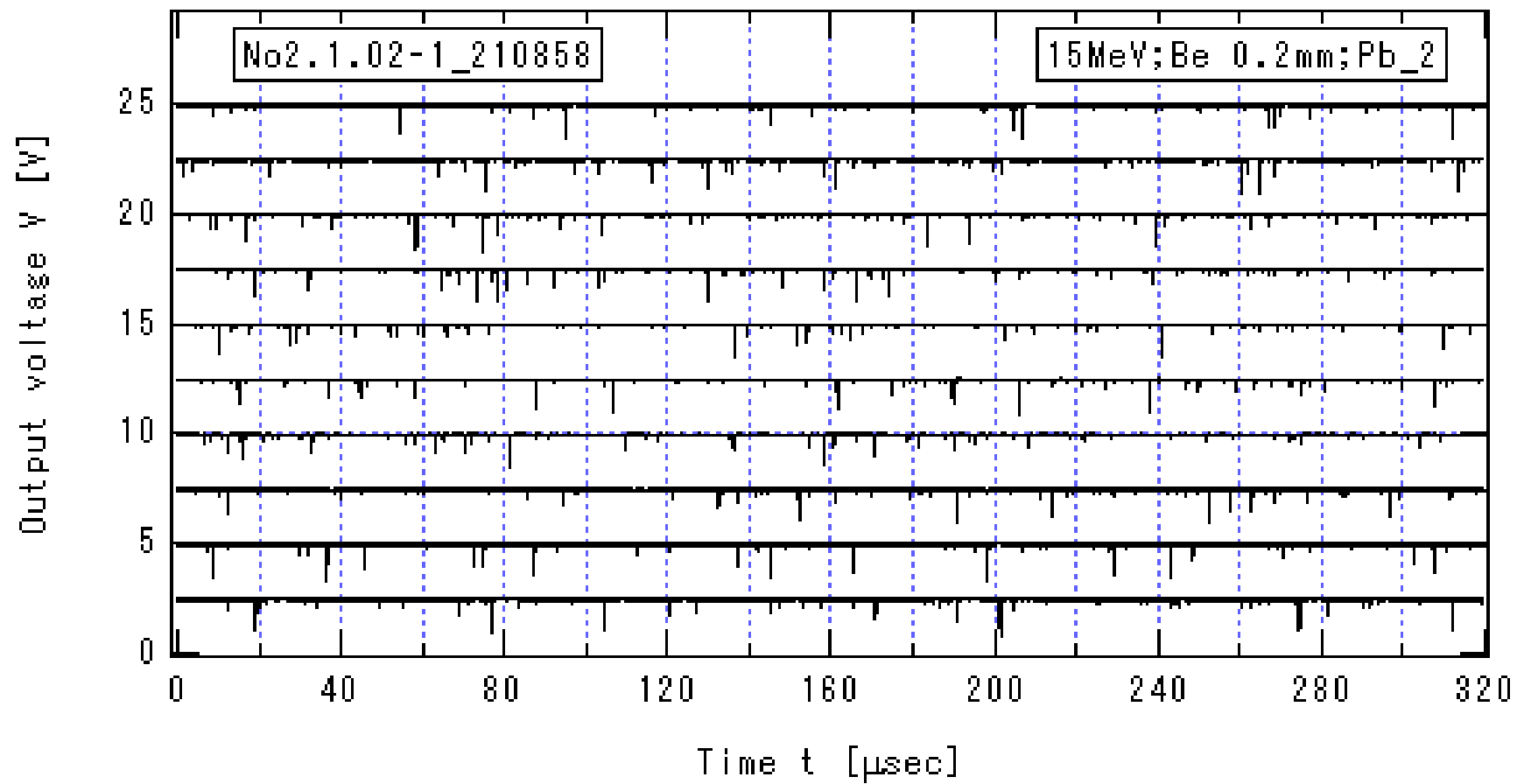


図 3.3.1-2\_1  $I_{\text{target}}=1.00\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 15cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

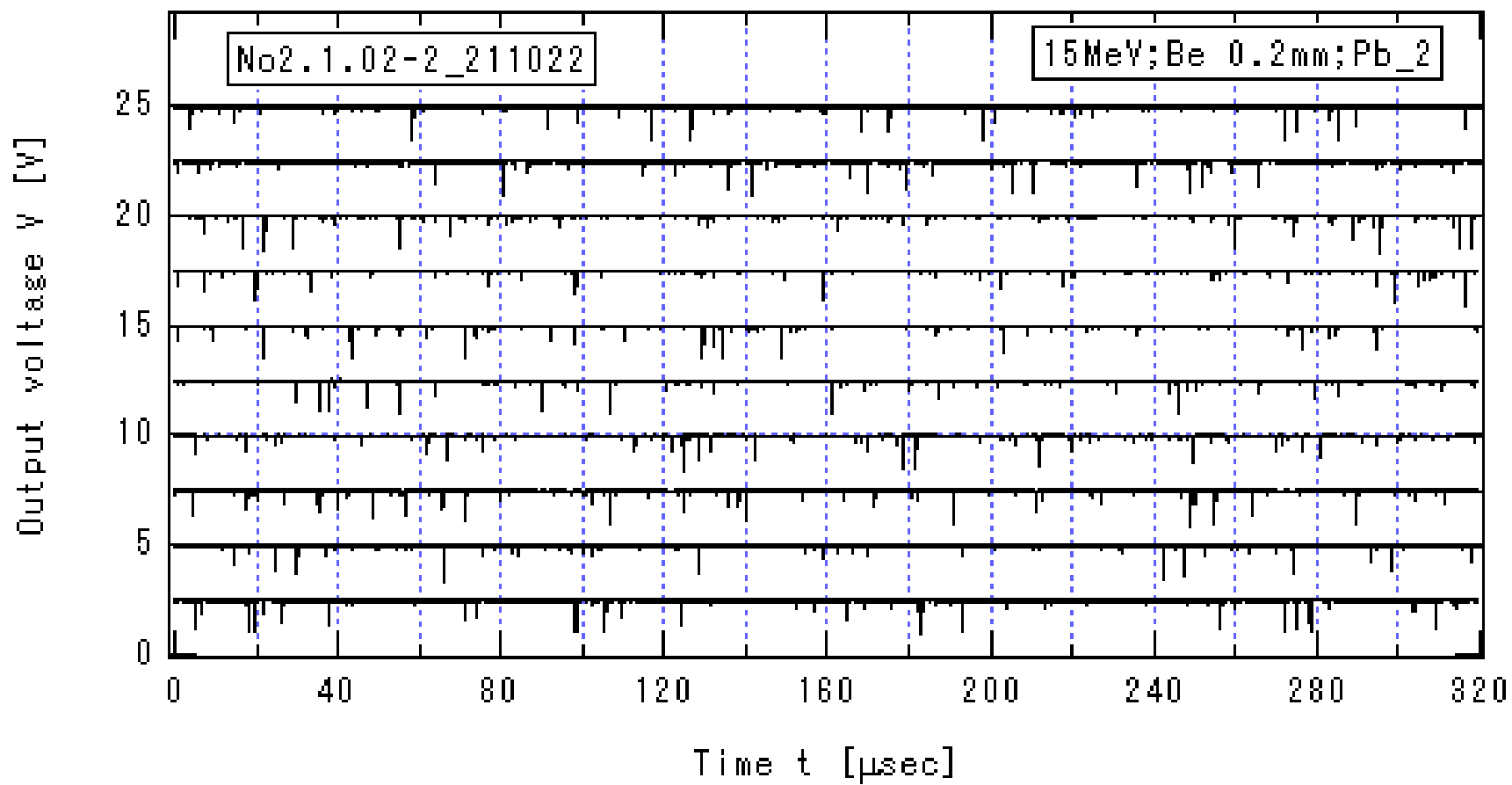


図 3.3.1-2\_2  $I_{\text{target}}=1.00\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 15cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

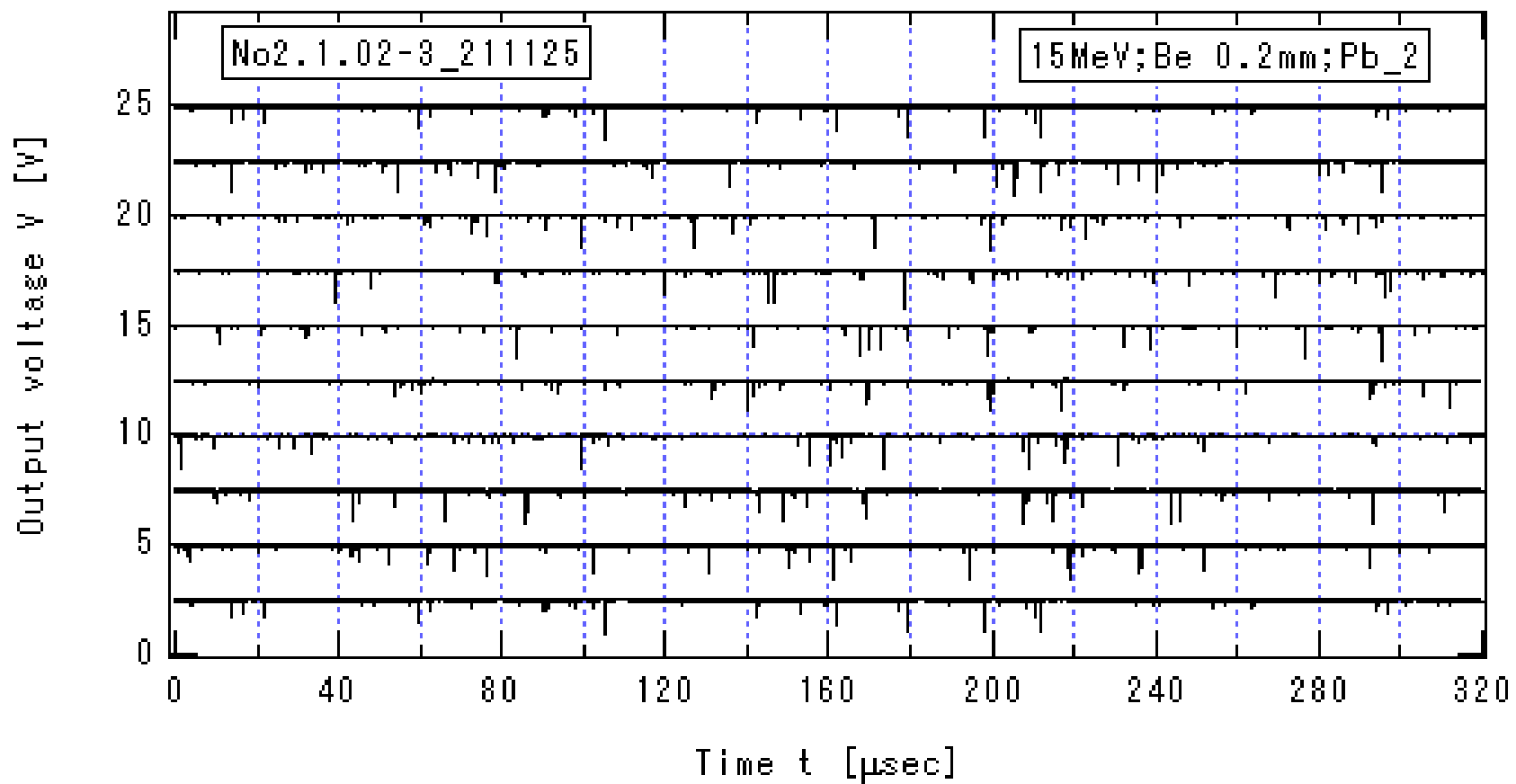


図 3.3.1-2\_3  $I_{\text{target}}=1.00\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 15cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

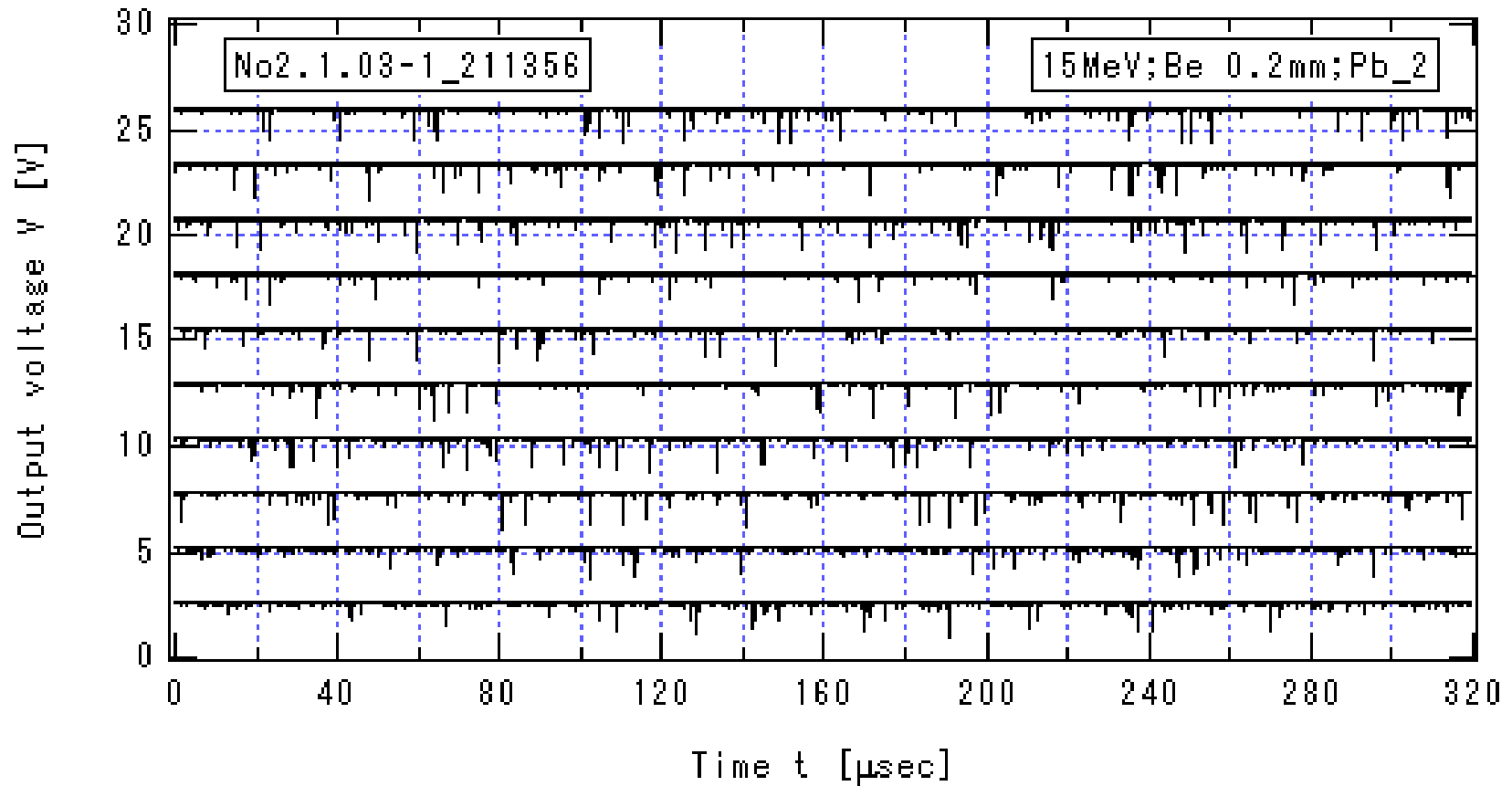


図 3.3.13.3-3\_1  $I_{\text{target}}=1.95\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 15cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

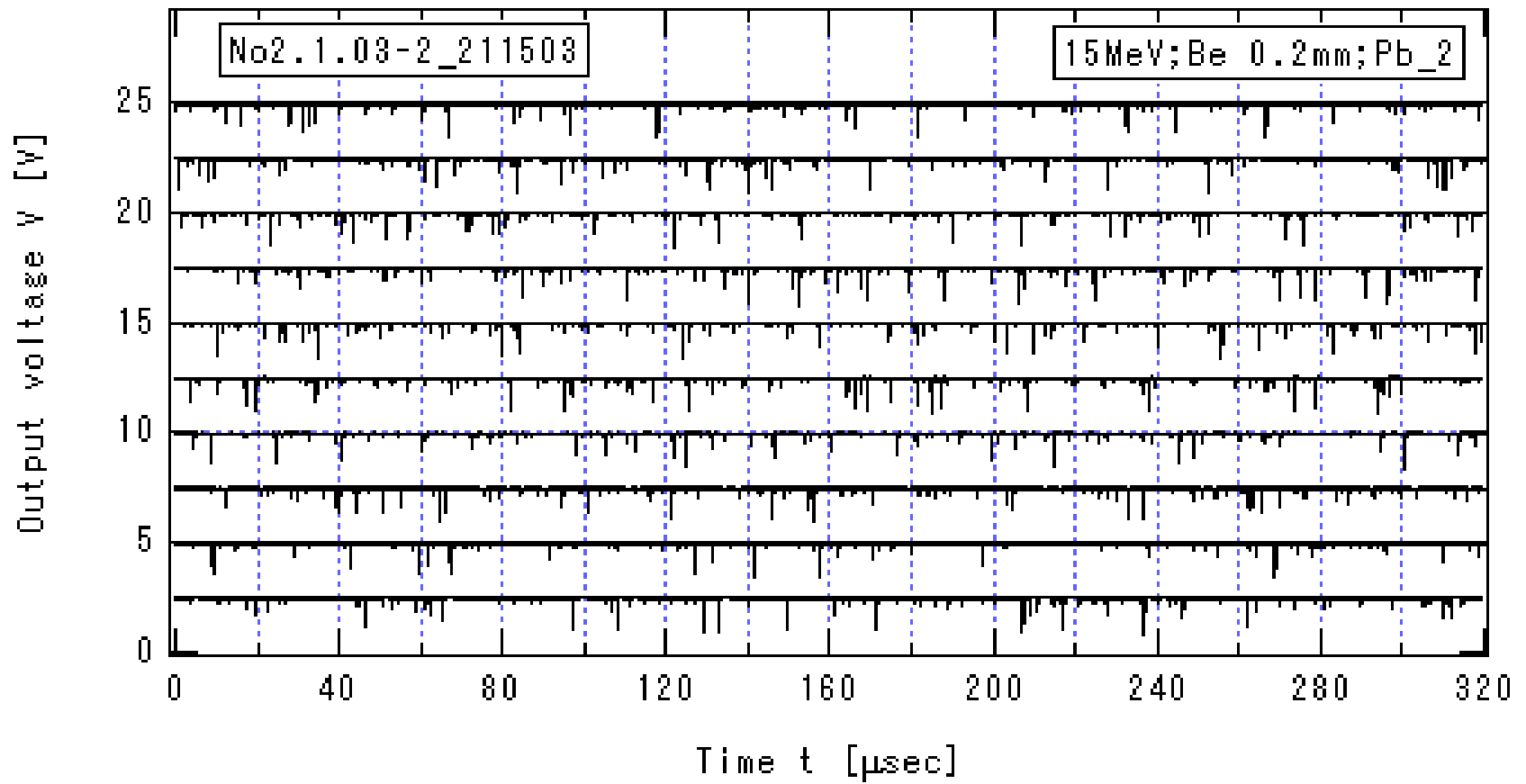


図 3.3.1-3\_2  $I_{\text{target}}=1.95\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 15cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

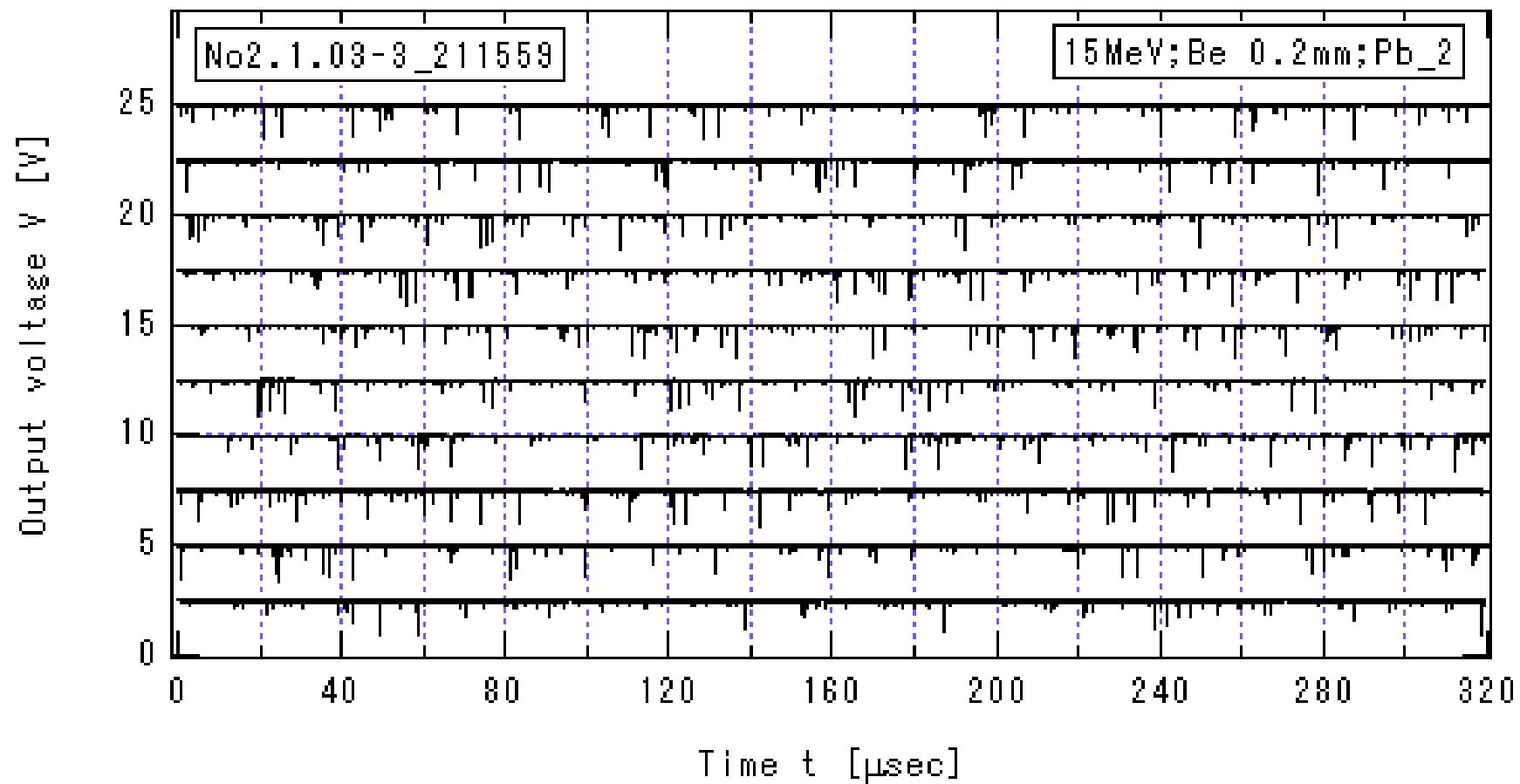


図 3.3.1-3\_3  $I_{\text{target}}=1.95\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 15cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

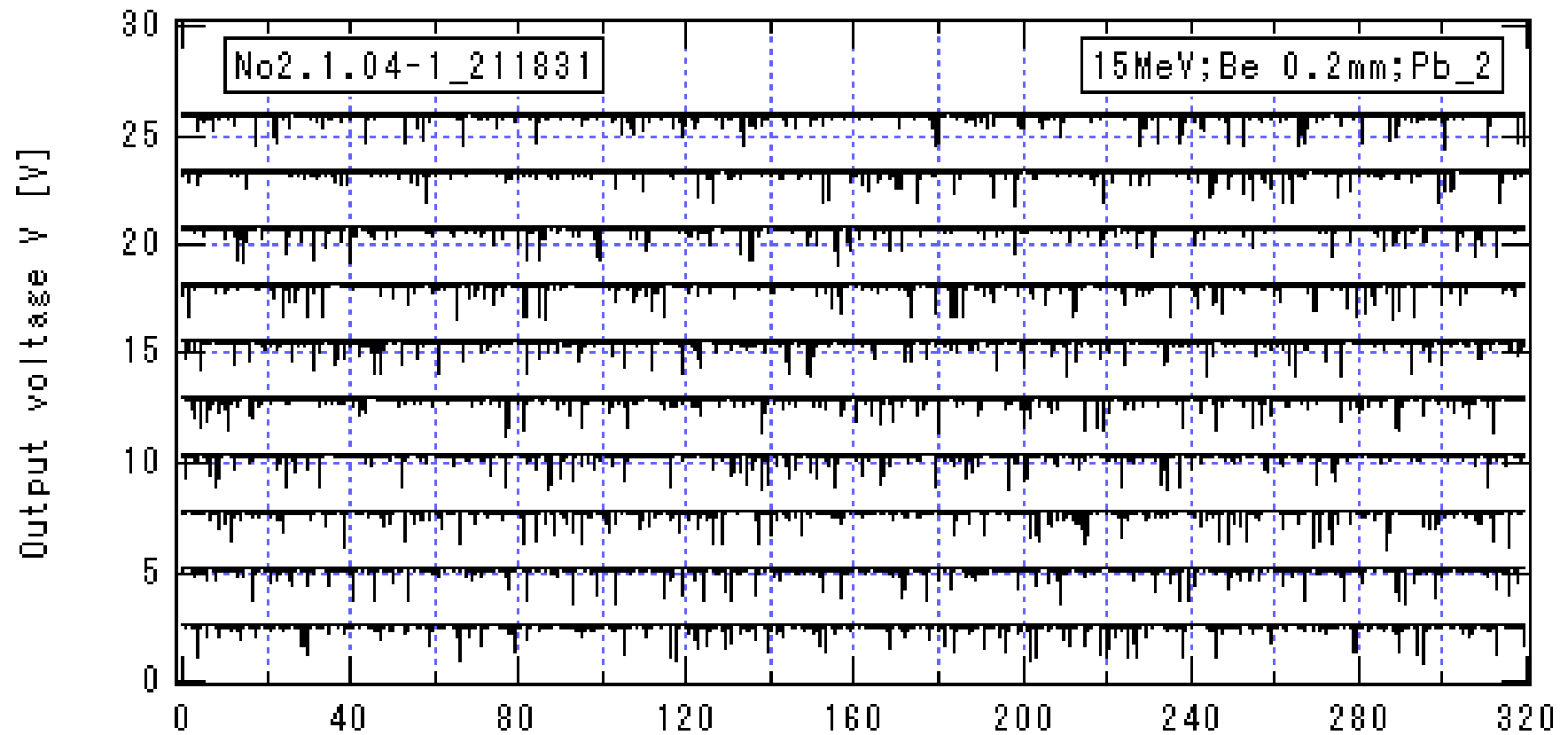


図 3.3.1-4\_1  $I_{\text{target}}=3.95\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 15cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

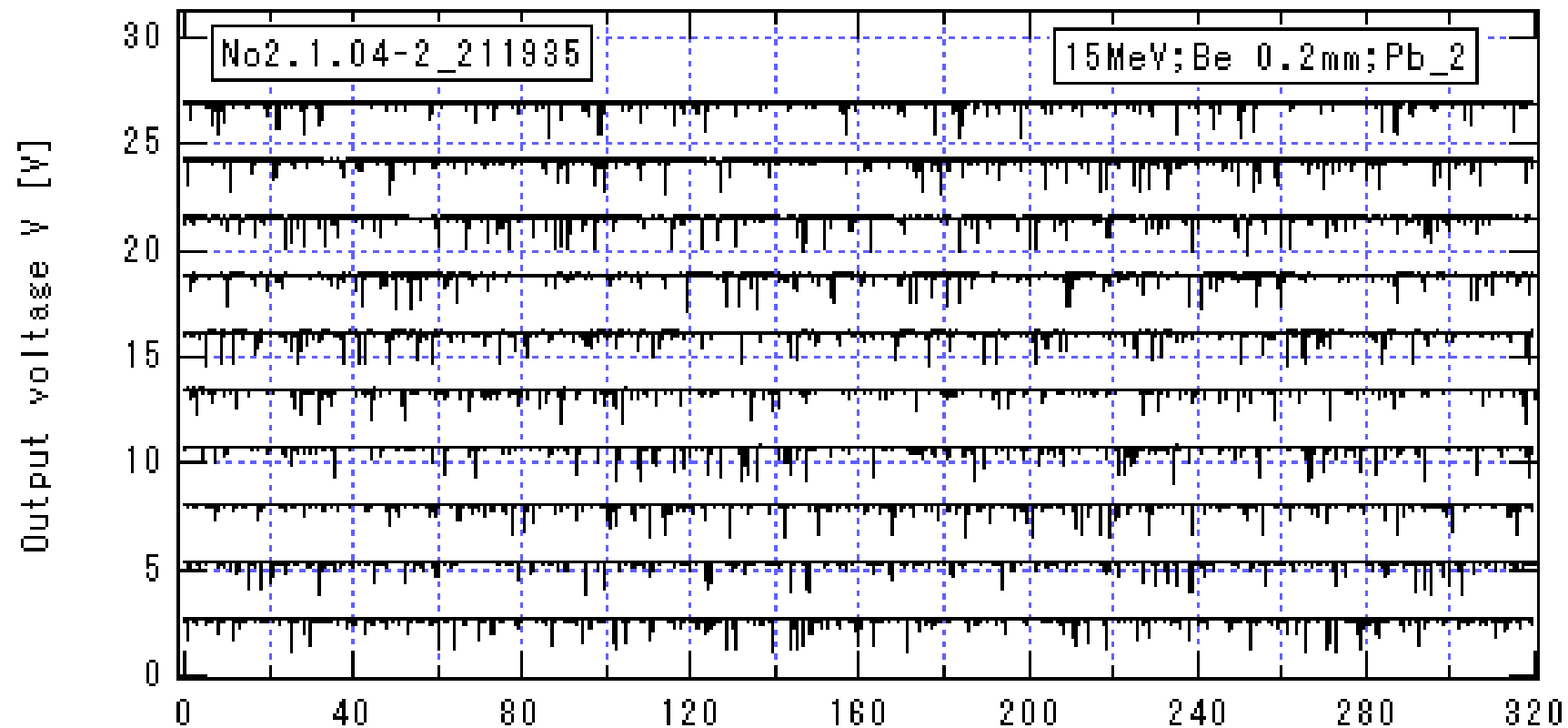


図 3.3.1-4\_2  $I_{\text{target}}=3.95\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 15cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$



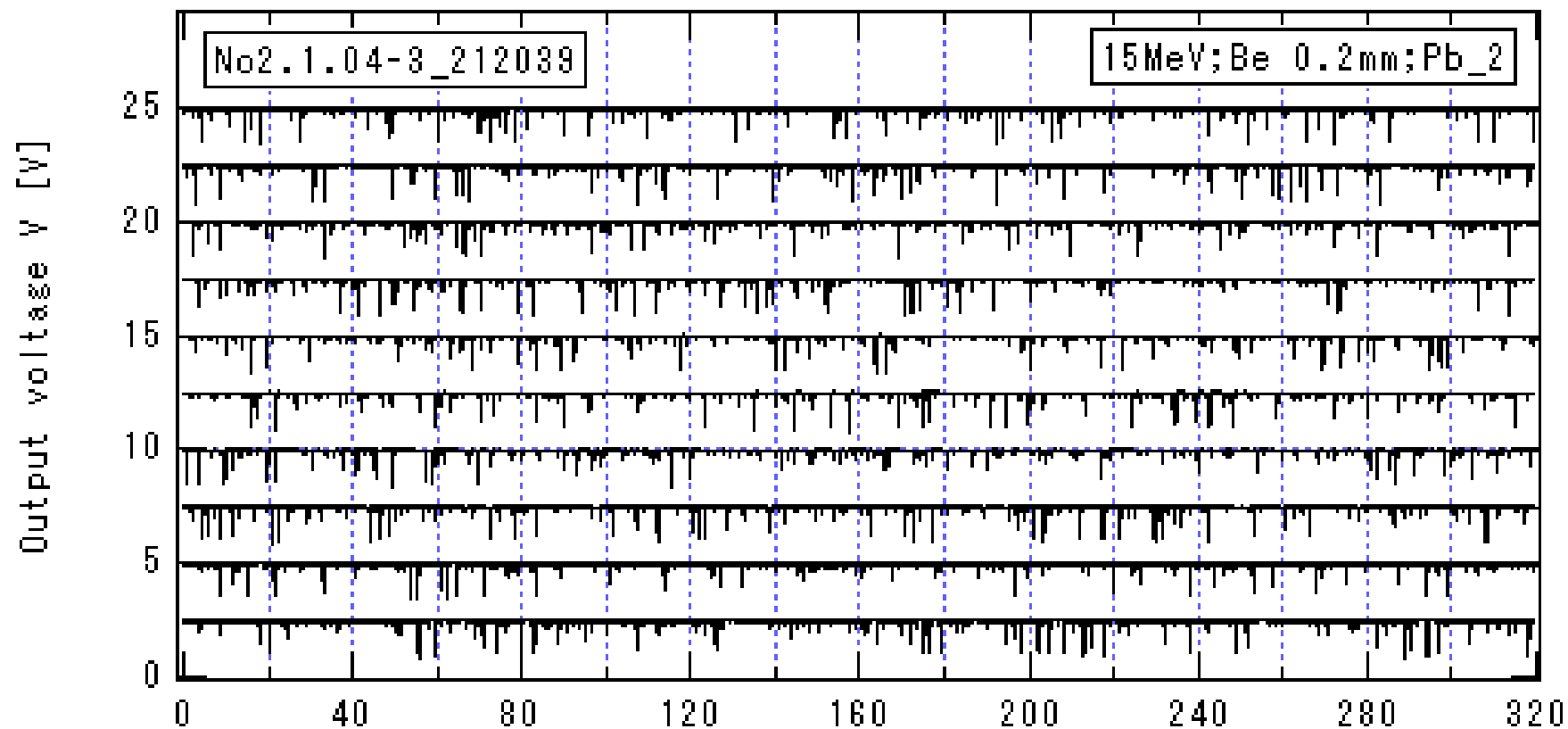


図 3.3.1-4\_3  $I_{\text{target}}=3.95\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 15cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

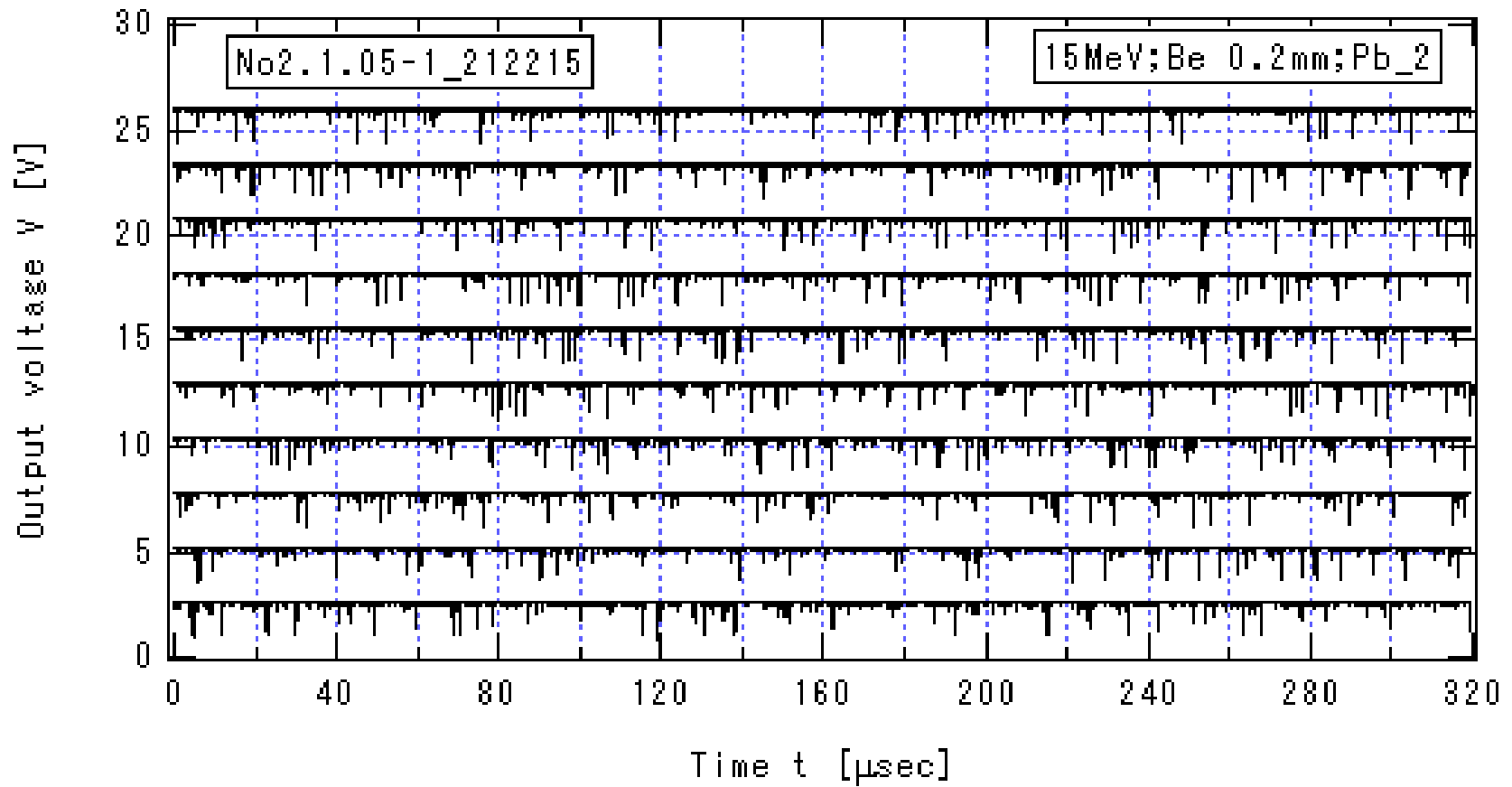


図 3.3.1-5\_1  $I_{\text{target}}=4.63\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1)  
 $E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 15cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

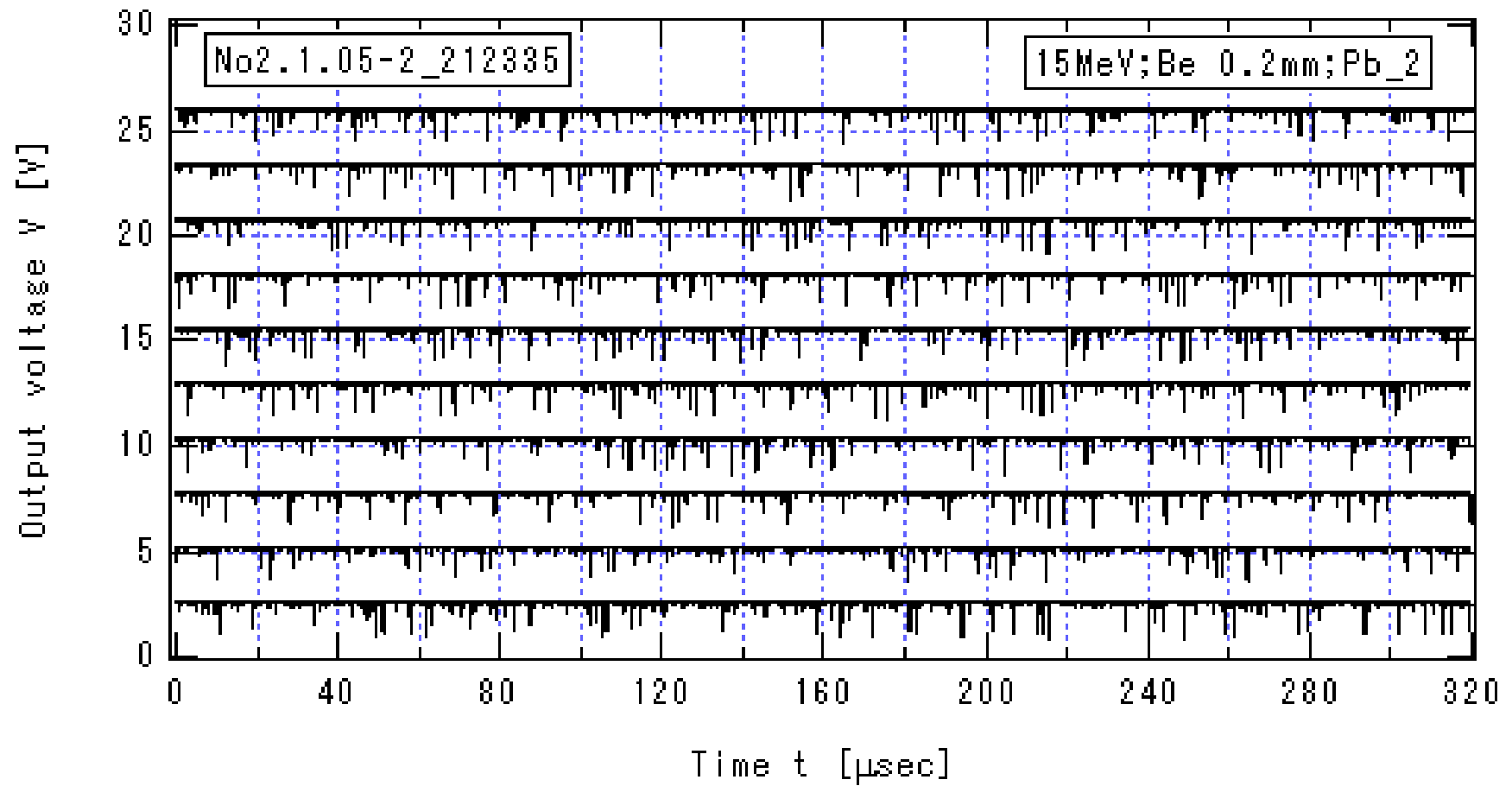


図 3.3.1-5\_2  $I_{\text{target}}=4.63\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 15cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

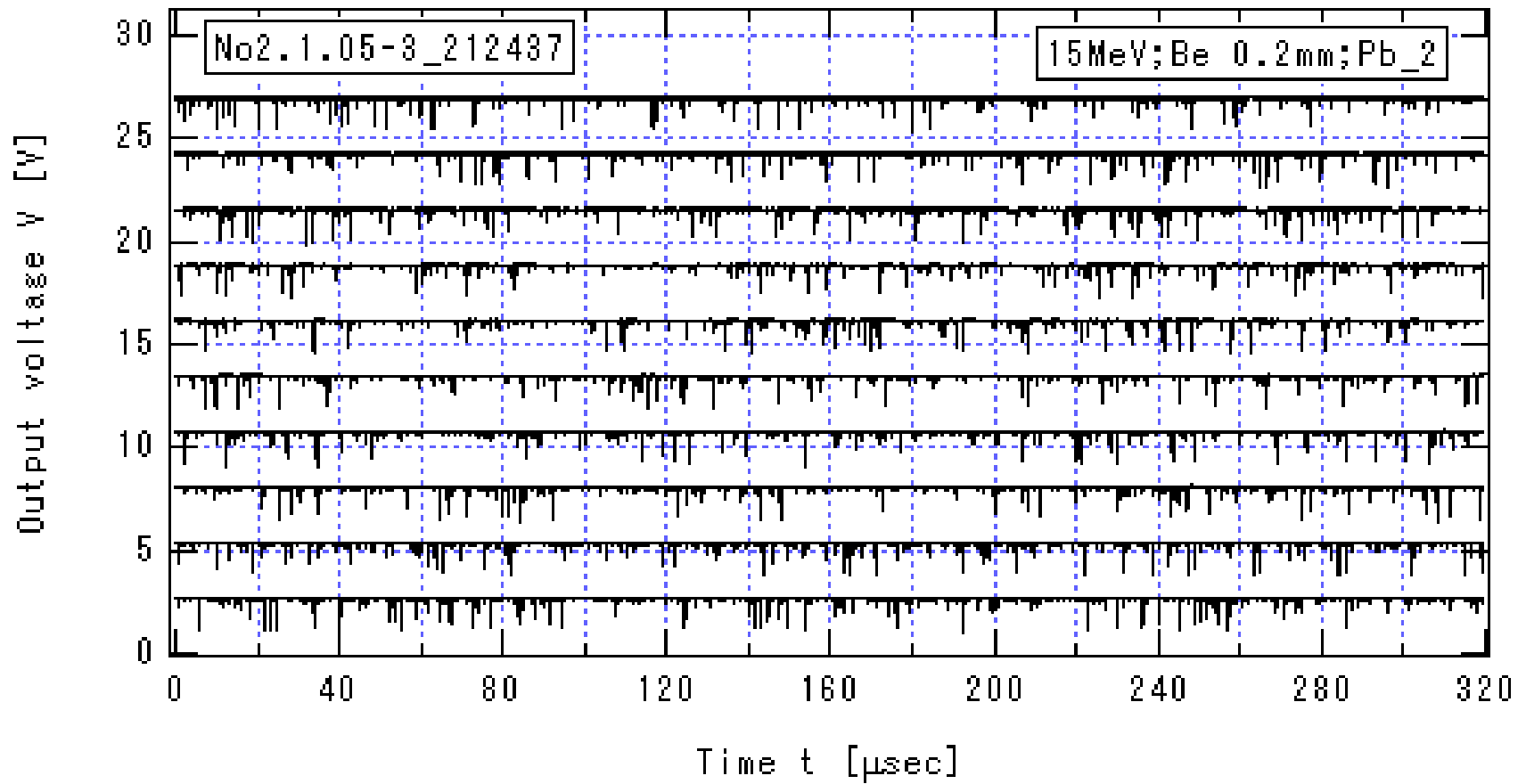


図 3.3.1-5\_2  $I_{\text{target}}=4.63\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2)  
 $E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 15cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

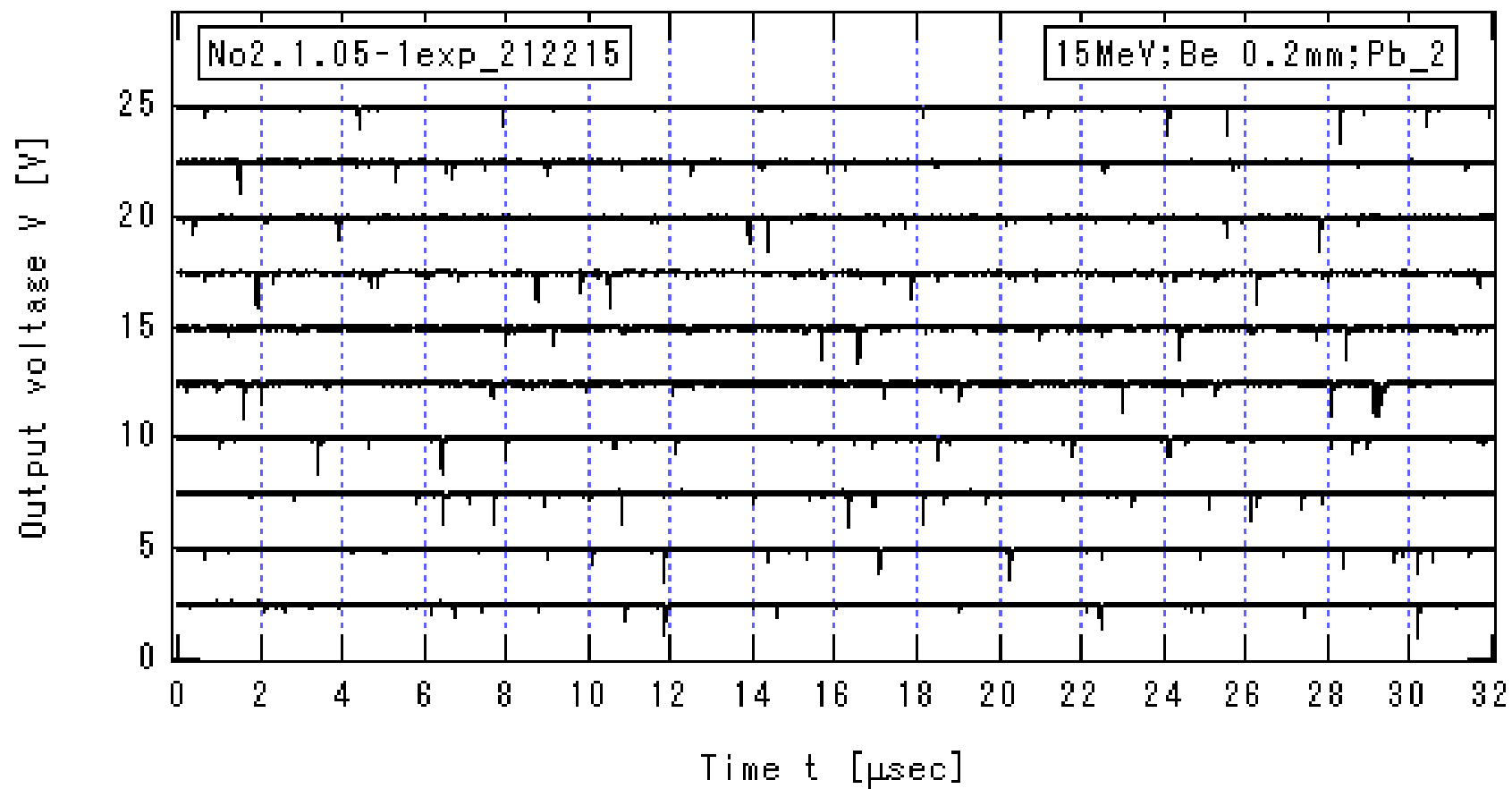


図 3.3.1-5\_3  $I_{\text{target}}=4.63\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 15cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

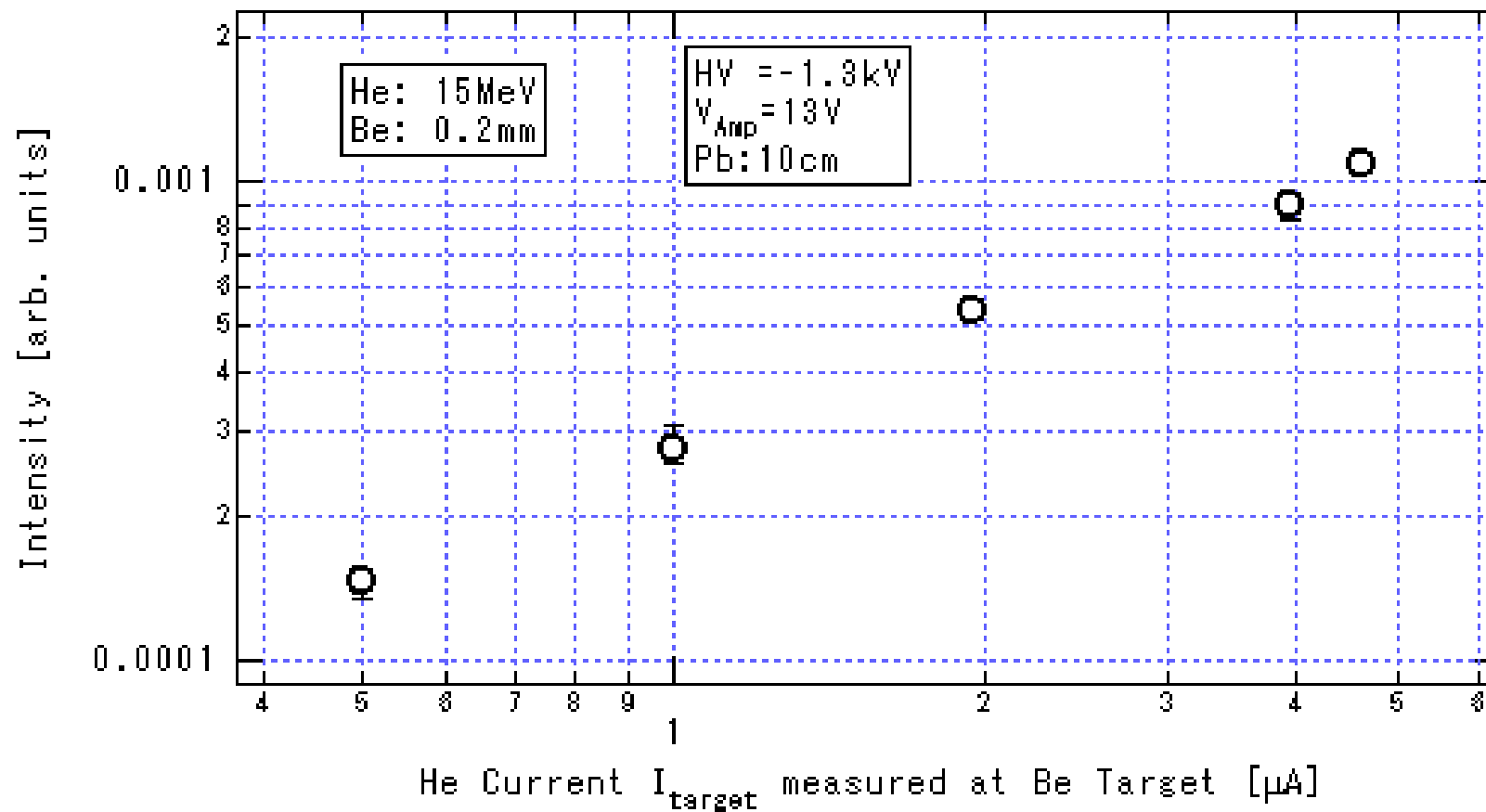


図 3.3.1-6 放射線強度の He イオン電流値  $I_{\text{target}}$  依存性

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 15cm, HV=-1.3 kV,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

### 3.3.2 15MeV He 照射 0.2mm Be 放出放射線の電流モード計測

0.2mm 厚 Be ターゲット照射時の He イオン電流を評価するために、ターゲット上流の Faraday Cup (FC232)の電流値とターゲット下流ビームライン終端の Faraday Cup (FC233)の電流値の関係を求めた。図 3.3.2-1 に得られてデータ及び最小 2 乗法により求めた fitting curve をプロットする。両者の関係は  $0.5\mu\text{A} \leq I_{\text{FC232}} \leq 6\mu\text{A}$  の領域では、2 次関数

$$y = -0.0422 \cdot x^2 + 0.936 \cdot x - 0.048 \quad (1)$$

で、近似的に表現された。本実験では、タンデム加速器上流に設置されているアイリスの幅を変え、ビーム断面積を増減して照射イオンビームの電流量を増加又減少している。本実験配置でのイオン注入コースのイオンビームは、135cm 離れた直径 3mm の 2 つのアーチャーを通過するビームを照射用を使用しており、Faraday Cup (FC232) は、第 1、第 2 アーチャー間に設置されている。このような状況で FC232 による電流値とターゲット下流の Faraday Cup (FC233) 電流値の関係が(1)式で表現される理由については、現在不明である。0.2mm 厚 Be ターゲットへの 15MeV He 照射による、高線量放射線に対する検出系の応答特性評価実験では、照射直前にターゲット上流の Faraday Cup (FC232)で He イオン電流を計測し、(1)式の関係を用いて Be ターゲットへの入射 He ビーム電流  $I_{\text{He}}$  を評価した。

ヘリウム入射エネルギーを 15MeV、ベリリウム厚を 0.2mm とし、液体シンチレータの前面に設置する鉛ブロックの厚さを 10cm (Pb\_10cm), 5cm (Pb\_5cm), 0cm (Pb\_0cm) と変え、各々に対し入射ヘリウムビーム電流  $I_{\text{He}}$  に対するプルアップ出力信号  $V_{\text{out}}$  の 3.2ms 間の時間変化をオシロスコープで記録した。ここで、光電子増倍管の印加電圧 HV は-1.3kV、プリアンプの印加電圧  $V_{\text{Amp}}$  は 13V とした。

#### a) 鉛 Pb の厚さ 10cm の場合

入射ヘリウムビーム電流  $I_{\text{He}}$  を  $0.338\mu\text{A}$  から  $3.653\mu\text{A}$  まで増加させ、シンチレータの前面に 10cm の鉛ブロックを設置した配置で、出力信号の時間変化を記録した。実験条件を Data number 毎に表 3.3.2-1 にまとめる。出力信号の時間変化を図 3.3.2-2 ( $0.338\mu\text{A}$ )、図 3.3.2-3 ( $0.700\mu\text{A}$ )、図 3.3.2-4 ( $1.114\mu\text{A}$ )、図 3.3.2-5 ( $1.693\mu\text{A}$ )、図 3.3.2-6 ( $2.850\mu\text{A}$ )、図 3.3.2-7 ( $3.653\mu\text{A}$ )に示す。図 3.3.2-2 から図 3.3.2-7 のデータを用いて求めた放射線強度の He イオン電流値  $I_{\text{He}}$  に対する依存

性を図 3.3.2-8 に示す。

b) 鉛 Pb の厚さ 5cm の場合

入射ヘリウムビーム電流  $I_{\text{He}}$  を  $3.612\mu\text{A}$  から  $0.220\mu\text{A}$  まで減少させ、シンチレータの前面に 5cm の鉛ブロックを設置した配置で、出力信号の時間変化を記録した。実験条件を Data number 毎に表 3.3.2-2 にまとめる。出力信号の時間変化を図 3.3.2-9 ( $3.612\mu\text{A}$ )、図 3.3.2-10 ( $2.774\mu\text{A}$ )、図 3.3.2-11 ( $1.547\mu\text{A}$ )、図 3.3.2-12 ( $1.014\mu\text{A}$ )、図 3.3.2-13 ( $0.516\mu\text{A}$ )、図 3.3.2-14 ( $0.220\mu\text{A}$ ) に示す。図 3.3.2-9 から図 3.3.2-14 のデータを用いて求めた放射線強度の He イオン電流値  $I_{\text{He}}$  に対する依存性を図 3.3.2-15 に示す。

c) 鉛 Pb の厚さ 0cm の場合

入射ヘリウムビーム電流  $I_{\text{He}}$  を  $0.220\mu\text{A}$  から  $3.607\mu\text{A}$  まで減少させ、シンチレータの前面がターゲットを見込む配置で、出力信号の時間変化を記録した。実験条件を Data number 毎に表 3.3.2-3 にまとめる。出力信号の時間変化を図 3.3.2-16 ( $0.220\mu\text{A}$ )、図 3.3.2-17 ( $0.436\mu\text{A}$ )、図 3.3.2-18 ( $0.913\mu\text{A}$ )、図 3.3.2-19 ( $1.500\mu\text{A}$ )、図 3.3.2-20 ( $2.743\mu\text{A}$ )、図 3.3.2-21 ( $3.607\mu\text{A}$ ) に示す。図 3.3.2-16 から図 3.3.2-21 のデータを用いて求めた放射線強度の He イオン電流値  $I_{\text{He}}$  に対する依存性を図 3.3.2-22 に示す。

0.2mm 厚のベリリウムに入射する 15MeV ヘリウムの電流の増加に伴い、液体シンチレータに入射してくる単位時間当たりの個数が増加する。3.2ms の時間幅を 10 分割した  $320\mu\text{sec}$  幅でも観測されるパルスが煩雑になるため、各々のデータに於いて  $320\mu\text{sec}$  幅に 10 分割した中で最も多くパルスが含まれているデータをさらに 10 分割して  $32\mu\text{sec}$  幅でも示した。図 3.3.2-21 では、 $2\mu\text{s}$  間に 10 個以上のパルス ( $\geq 5\text{Mkcps}$ ) も含まれている事が分かる。

図 3.3.2-8、図 3.3.2-15、図 3.3.2-22 に示すように、Pb\_10cm、Pb\_5cm、Pb\_0cm の各々の場合、電流値に対する放射線強度の線形性は極めて良好である。図 3.3.2-23 に、ヘリウム 1 個が入射したことによる放射線強度を、検出器の前面の鉛厚に対してプロットする。10cm 厚の鉛ブロックを設置すると、放射線強度はほぼ半分に減少する。



これまで述べてきた実験では、ターゲット上流の第1及び第2アパーチャスリットは直径3mmであった。より多くの電流をBeターゲットに照射するために、第1アパーチャスリットを開放とし、第2アパーチャスリットのみを直径3mmとした実験を実施した。(1)式を用いて見積もった電流値  $I_{He}$  は  $5.069\mu A$  であった。3.2ms間の出力信号の時間変化を10分割して図3.3.2-24\_(a)に、10分割中最もパルス数の多かった区間を10分割して図3.3.2-24\_(b)に示す。32 $\mu s$ でも煩雑である為、さらに10分割して図3.3.2-24\_(c1) ~ 図3.3.2-24\_(c10)に示す。半値全幅が $\sim 16ns$ のパルス信号が数多く観測される。半値全幅程度の時間差の重なりは区別可能とすれば、観察可能は単位時間当たりの個数の最大は60Mcpsであり、計測可能な最大のカウントレートは60Mcpsである。

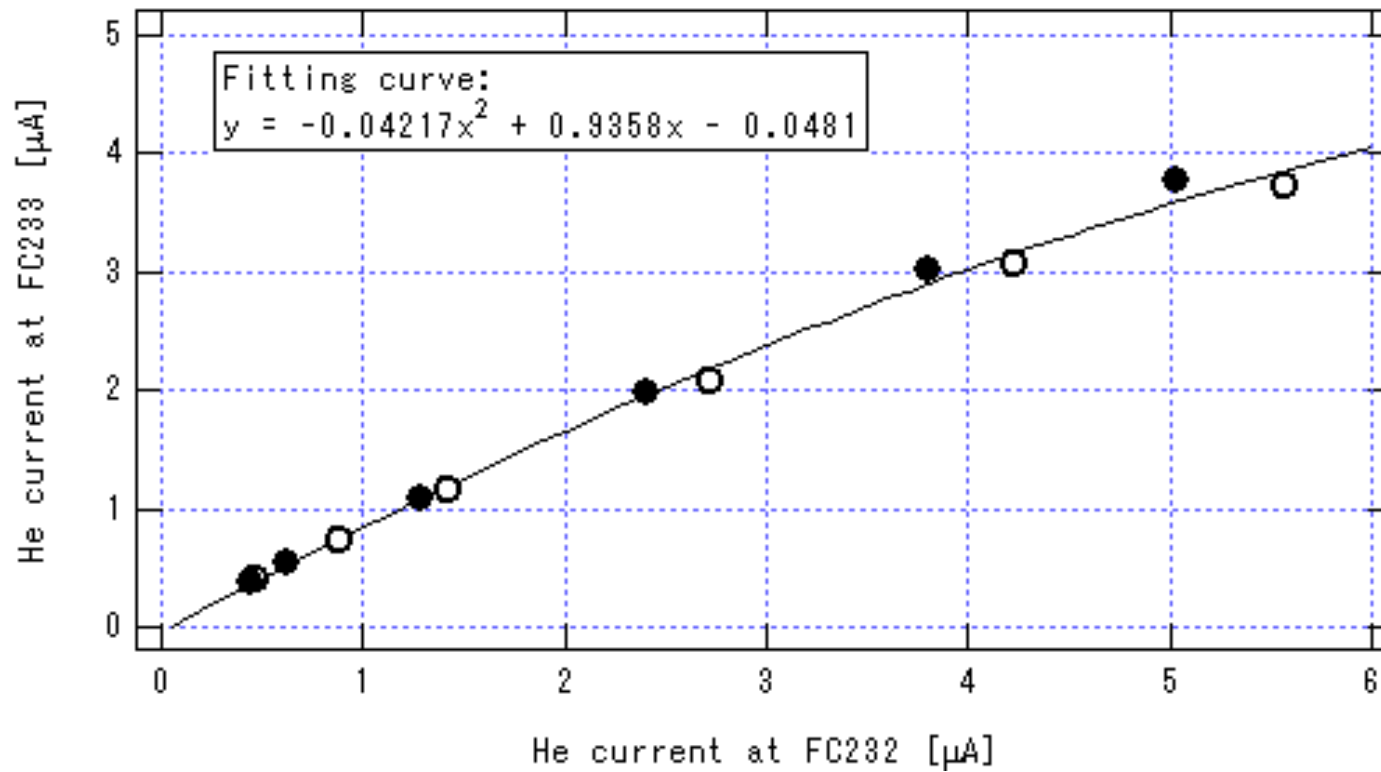


図 3.3-7 ターゲット上流の Faraday Cup(FC232)とターゲット下流の Faraday Cup(FC233)の電流値の関係

表 3.3.2-1 0.2mm 厚のベリリウムへ 15MeV ヘリウム照射による  
検出器応答評価実験条件 (Pb\_10cm)

Data number	$E_{\text{He}}$ [MeV]	$I_{\text{He}}$ [ $\mu\text{A}$ ]	Pb width [cm]	HV [kV]	$V_{\text{Amp}}$ [V]
No2.2.01-1_142005	15	0.338	10	-1.3	13
No2.2.01-2_142128	15	0.338	10	-1.3	13
No2.2.02-1_142447	15	0.700	10	-1.3	13
No2.2.02-2_142602	15	0.700	10	-1.3	13
No2.2.02-3_142704	15	0.700	10	-1.3	13
No2.2.03-1_142911	15	1.114	10	-1.3	13
No2.2.03-2_143012	15	1.114	10	-1.3	13
No2.2.03-3_143114	15	1.114	10	-1.3	13
No2.2.04-1_143338	15	1.693	10	-1.3	13
No2.2.04-2_143442	15	1.693	10	-1.3	13
No2.2.04-3_143535	15	1.693	10	-1.3	13
No2.2.05-1_143744	15	2.850	10	-1.3	13
No2.2.05-2_143840	15	2.850	10	-1.3	13
No2.2.05-3_143943	15	2.850	10	-1.3	13
No2.2.06-1_144129	15	3.653	10	-1.3	13
No2.2.06-2_144220	15	3.653	10	-1.3	13
No2.2.06-3_144310	15	3.653	10	-1.3	13

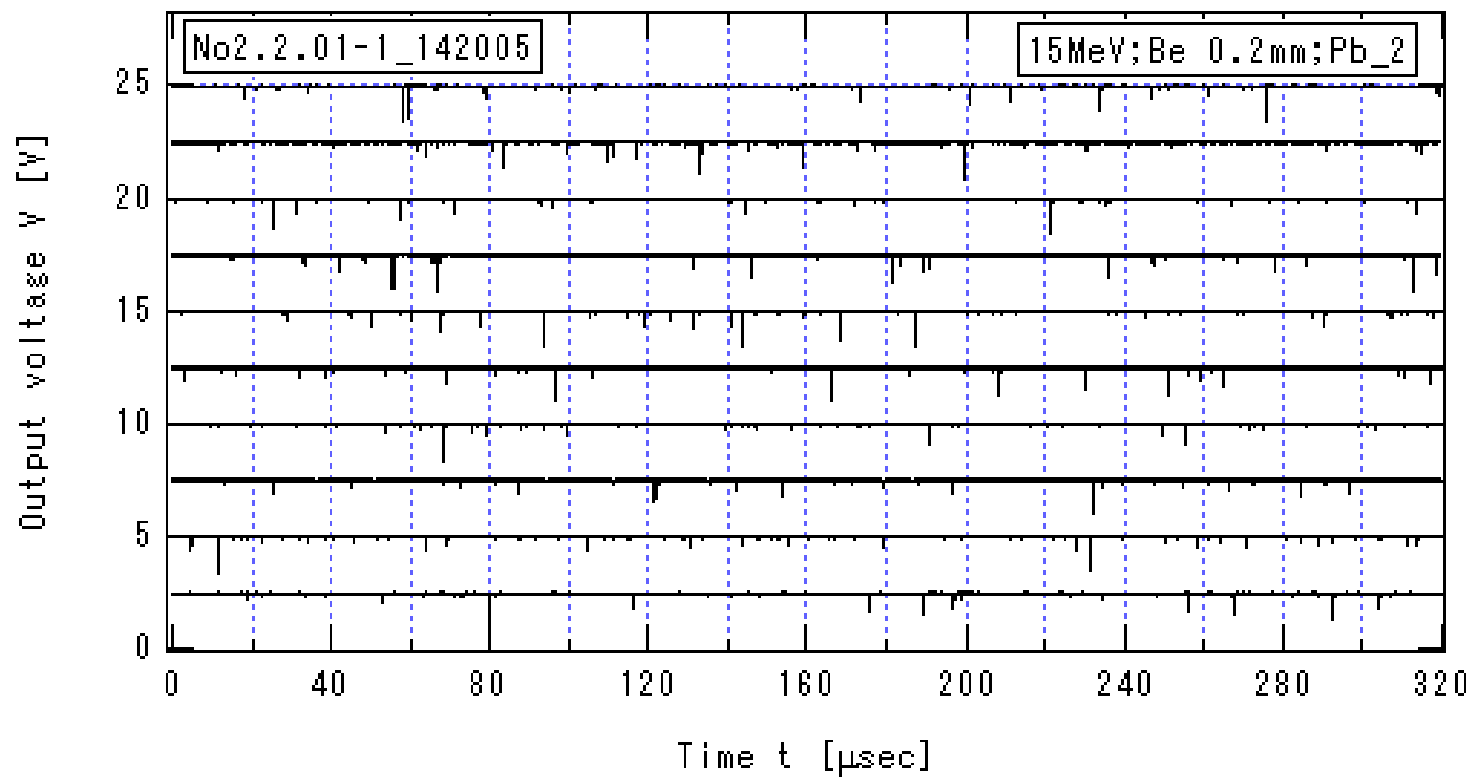


図 3.3.2-2\_1a  $I_{\text{He}}=0.338\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1a)  
 $E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 10cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

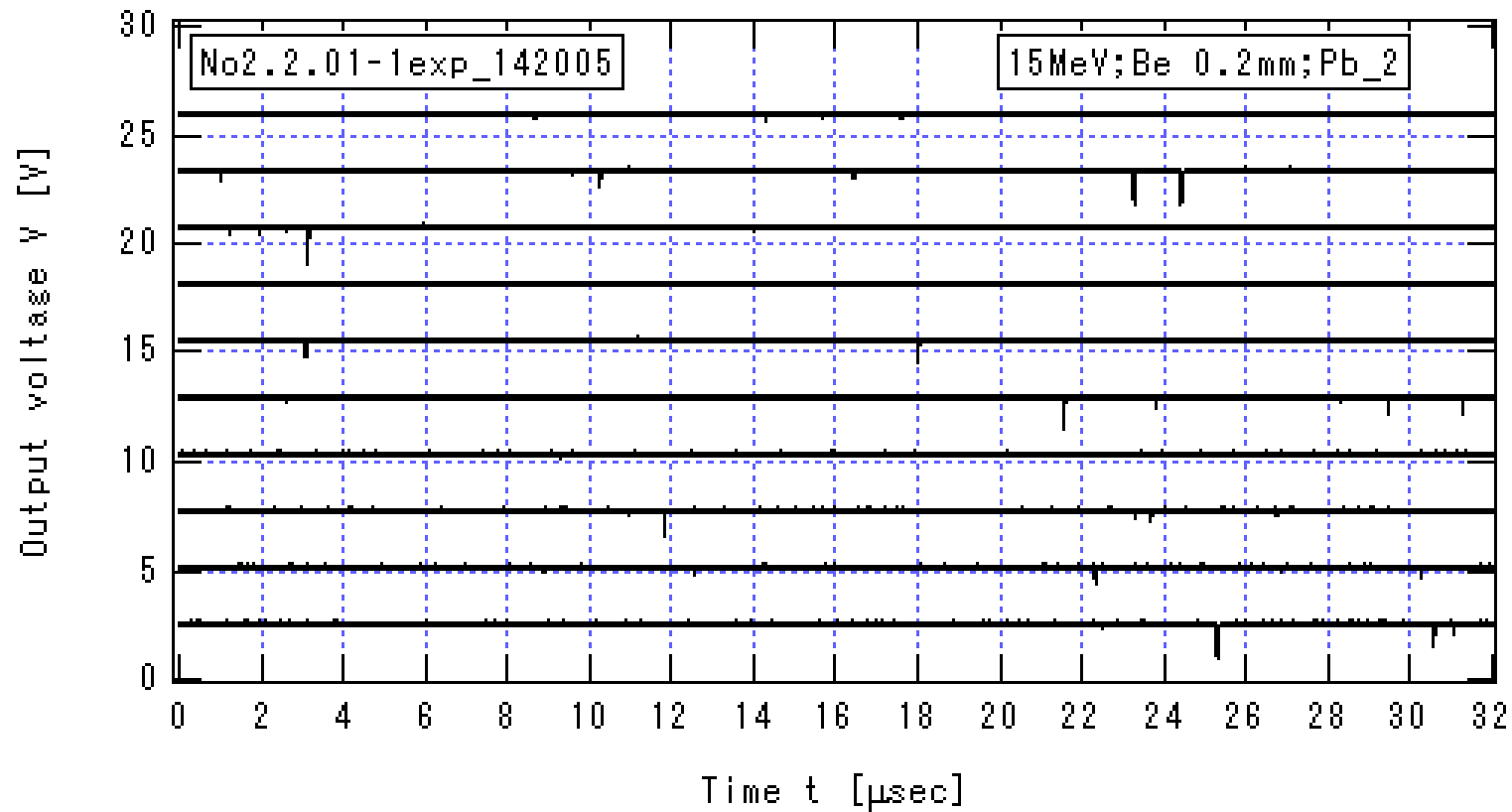


図 3.3.2-2\_1b  $I_{\text{He}}=0.338\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1b)

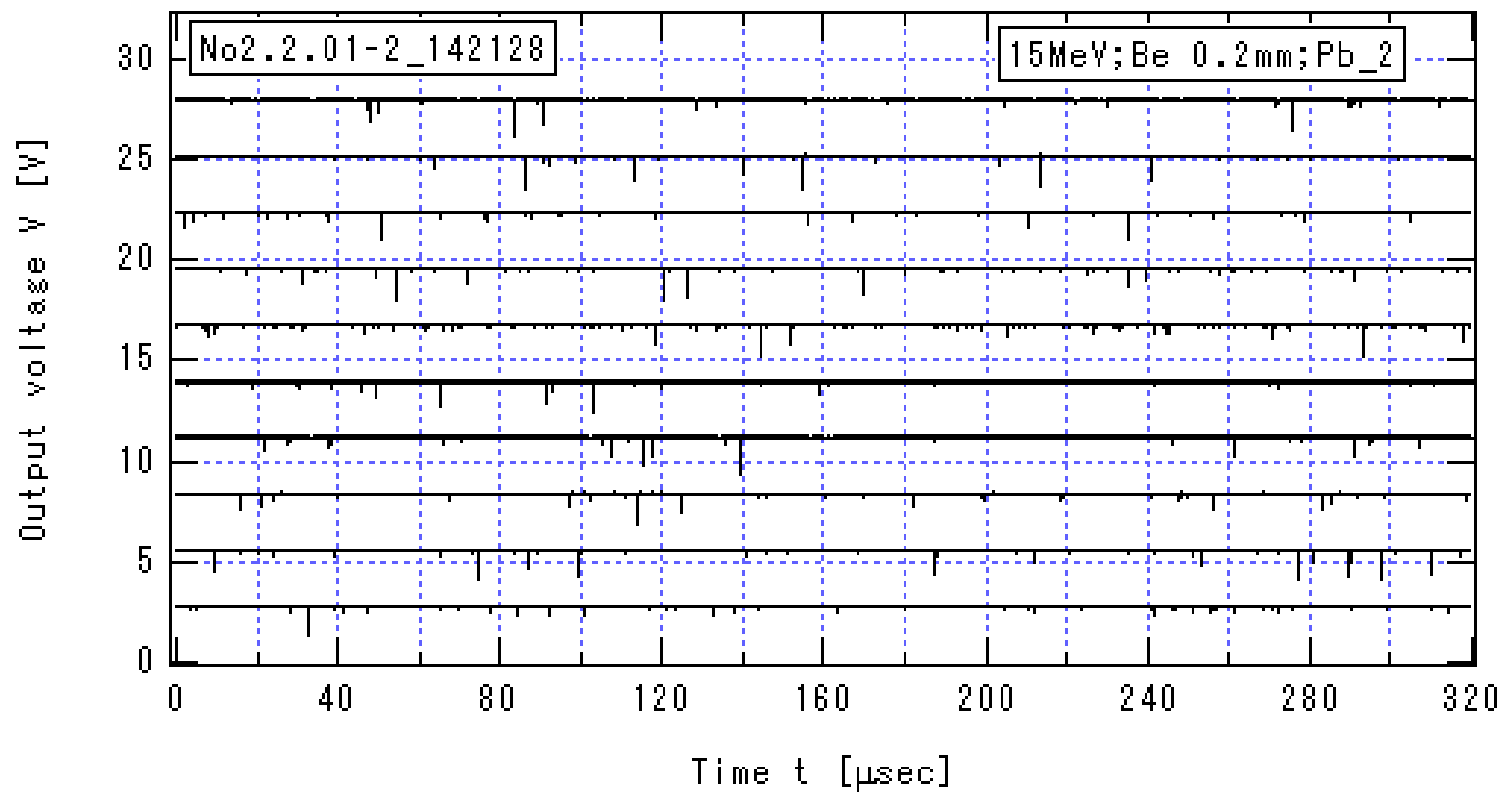


図 3.3.2-2\_2a  $I_{\text{He}}=0.338\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 10cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

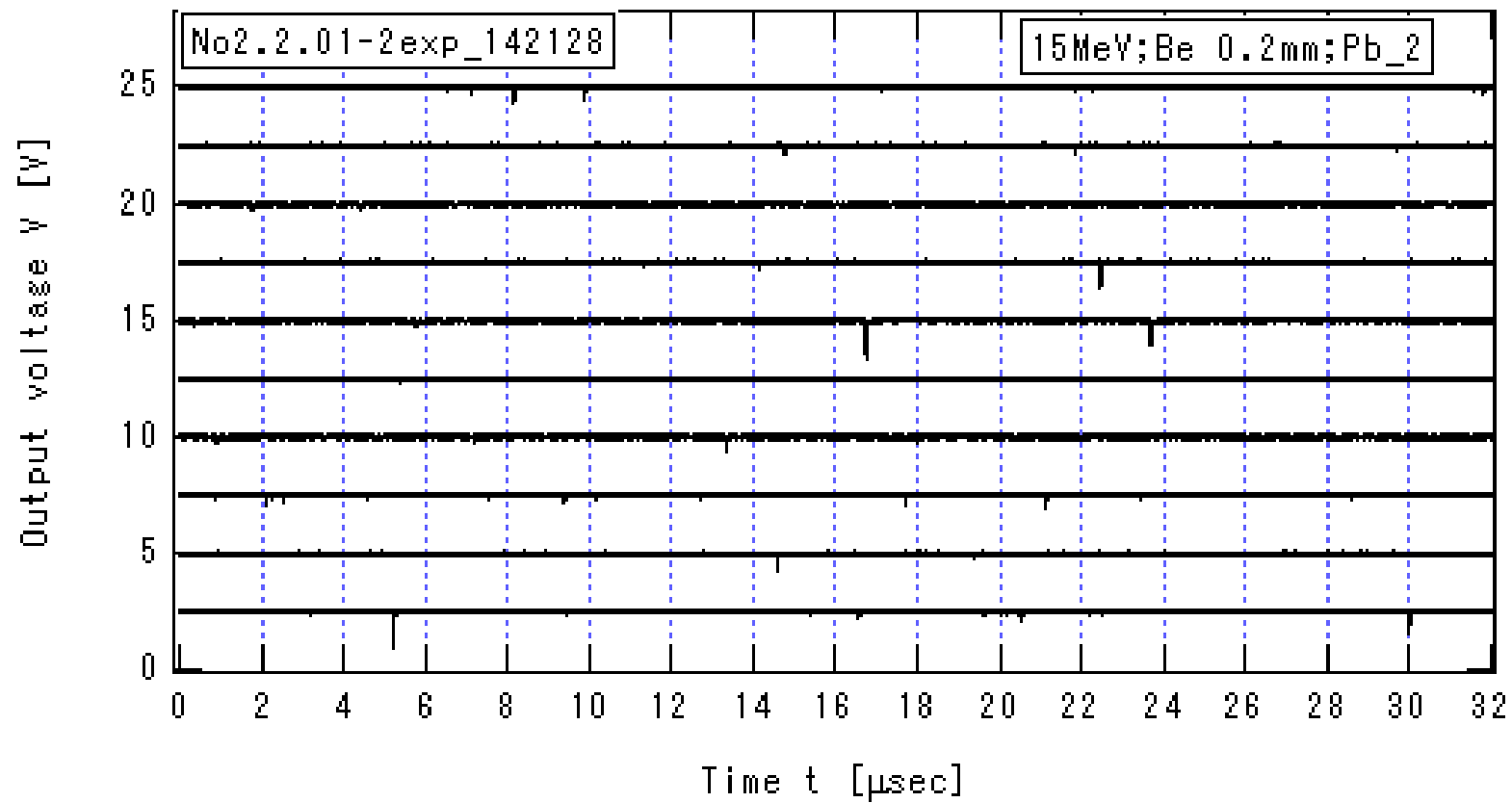


図 3.3.2-2\_2b  $I_{\text{He}}=0.338\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2b)

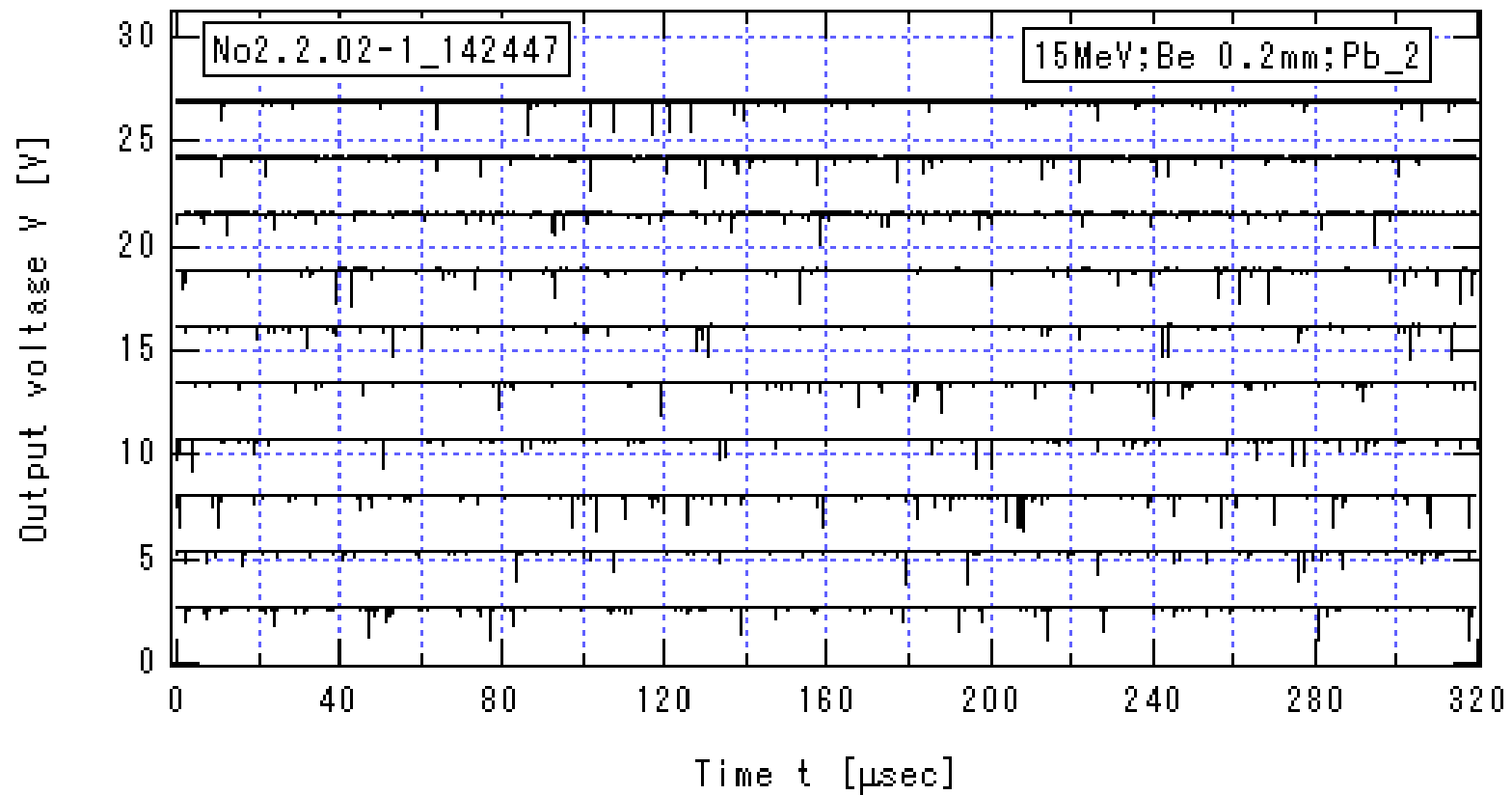


図 3.3.2-3\_1a  $I_{\text{He}}=0.0700\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 10cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$



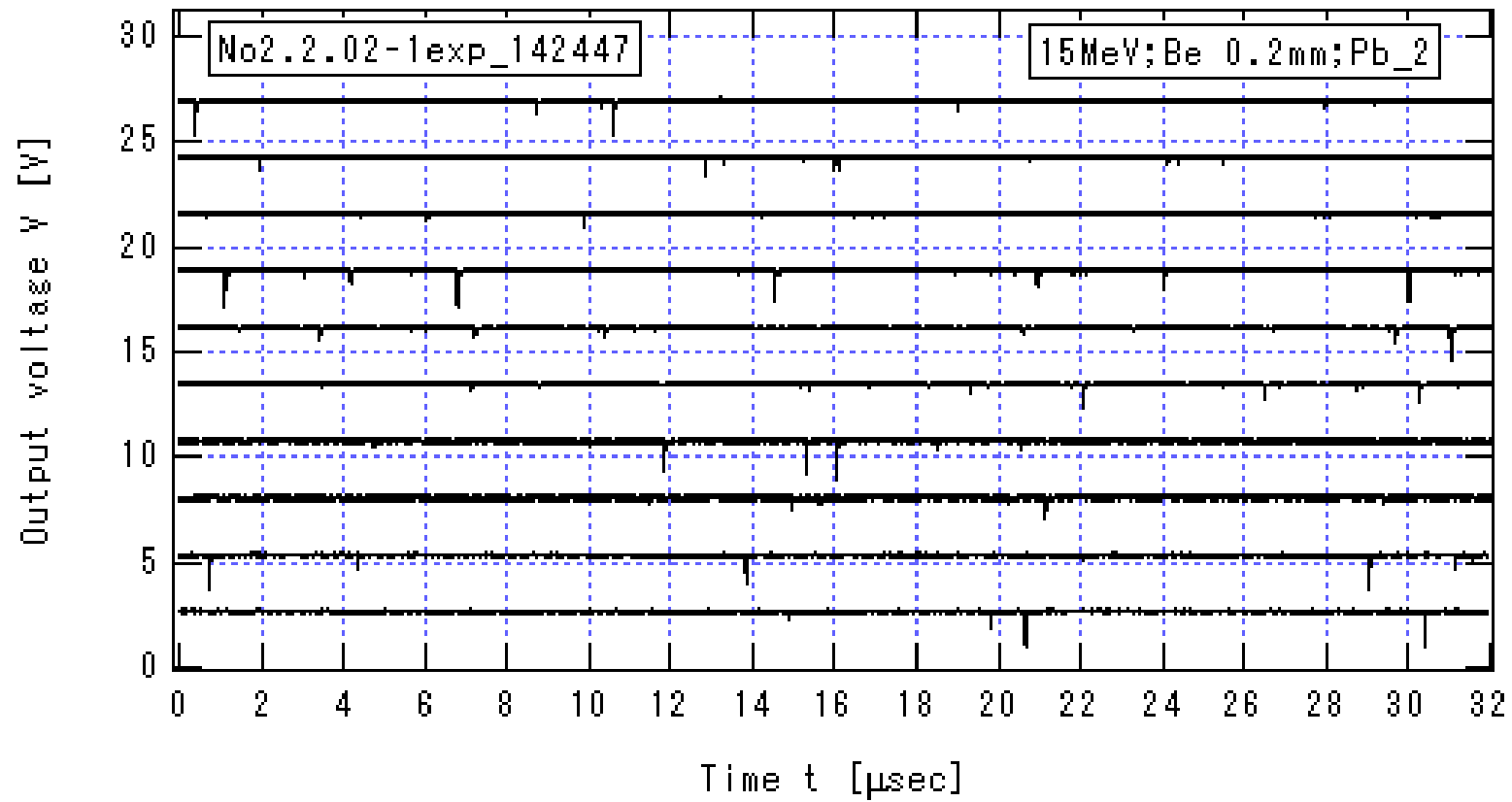


図 3.3.2-3\_1b  $I_{\text{He}}=0.0700\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1b)

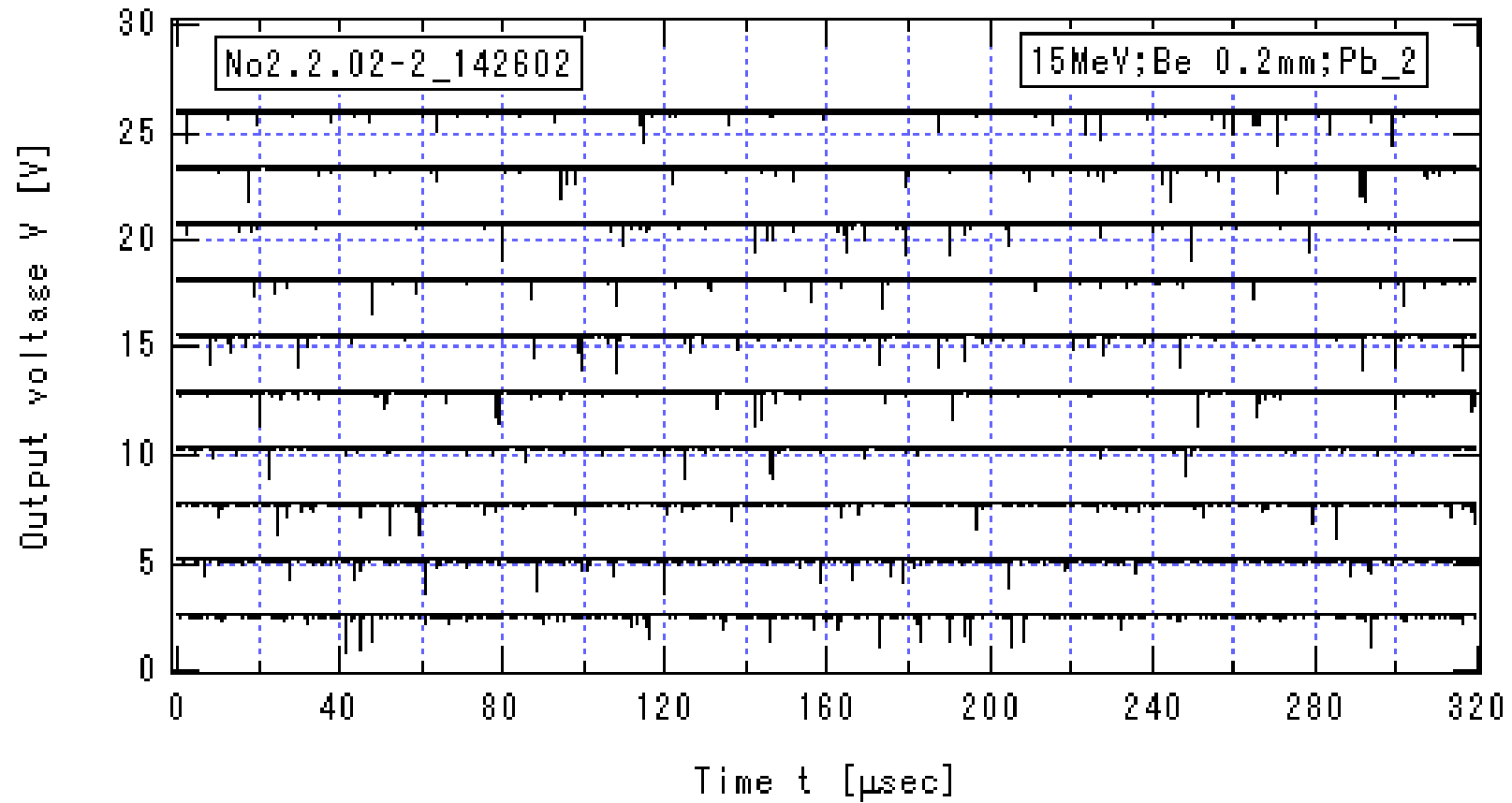


図 3.3.2-3\_2a  $I_{\text{He}} = 0.700 \mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2a)

$E_{\text{He}} = 15 \text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 10cm,  $HV = -1.3 \text{kV}$ ,  $V_{\text{Amp}} = 13 \text{V}$

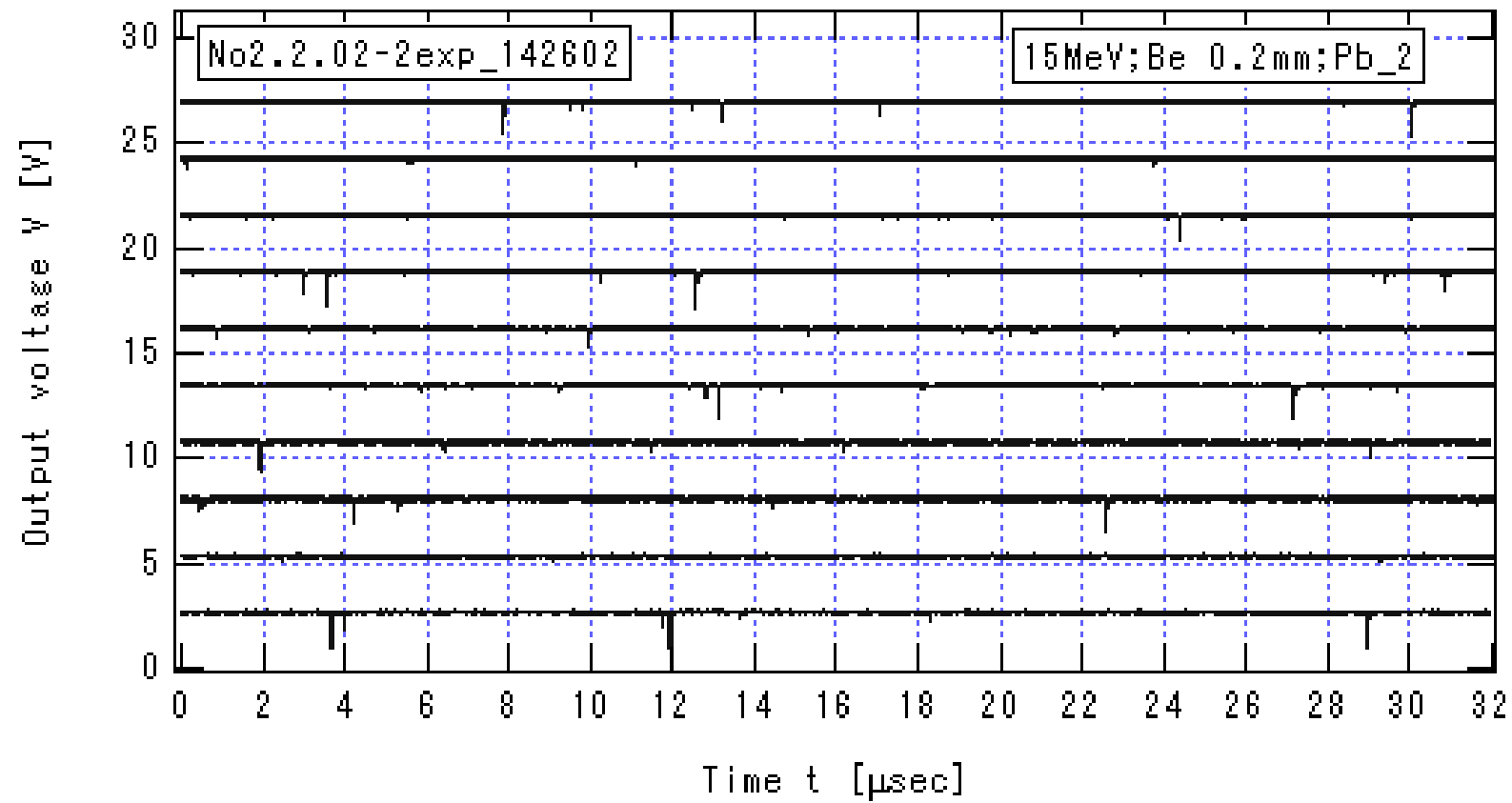


図 3.3.2-3\_2b  $I_{He} = 0.700 \mu A$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2b)

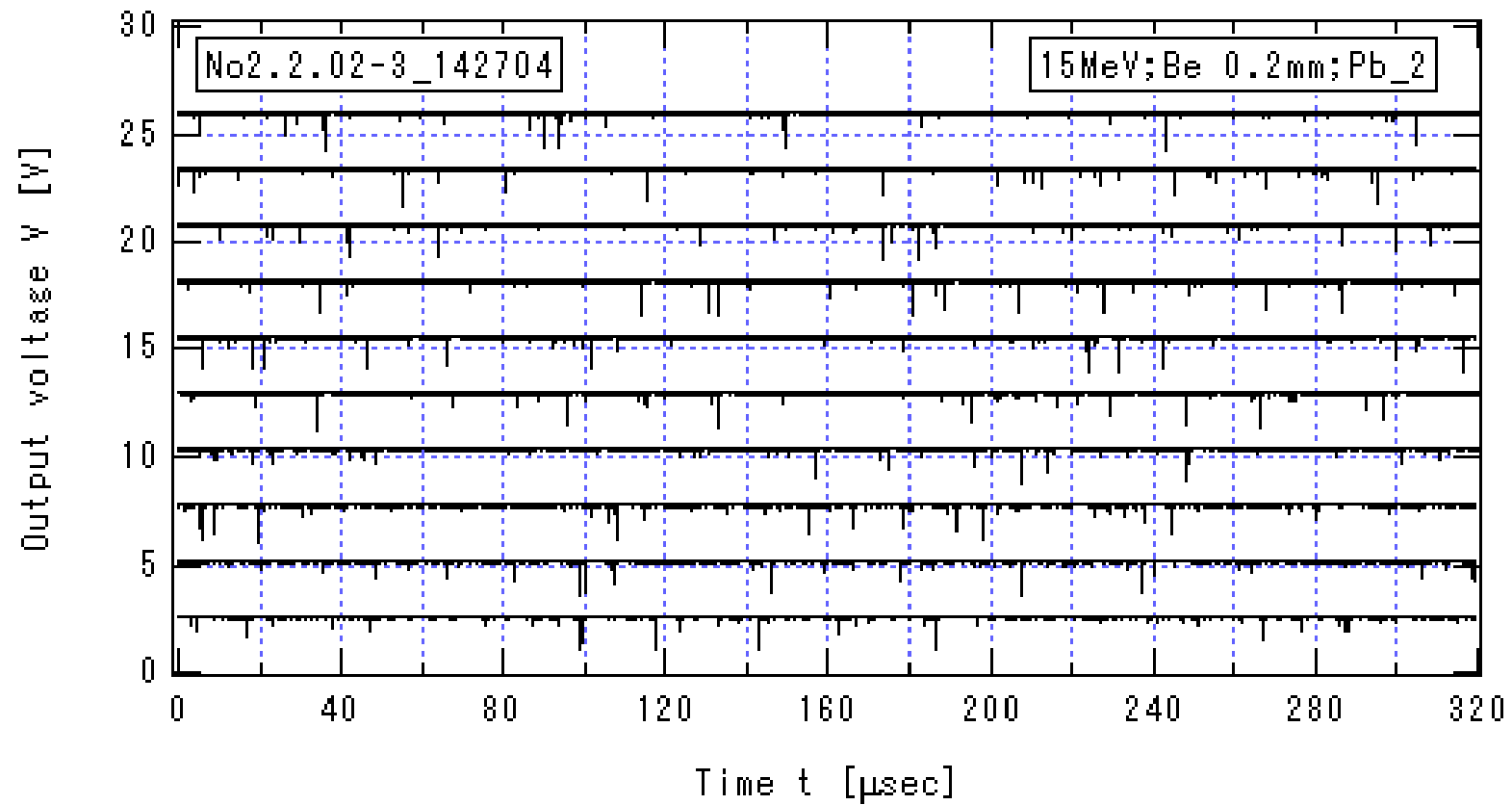


図 3.3.2-3\_3a  $I_{\text{He}}=0.700\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 10cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

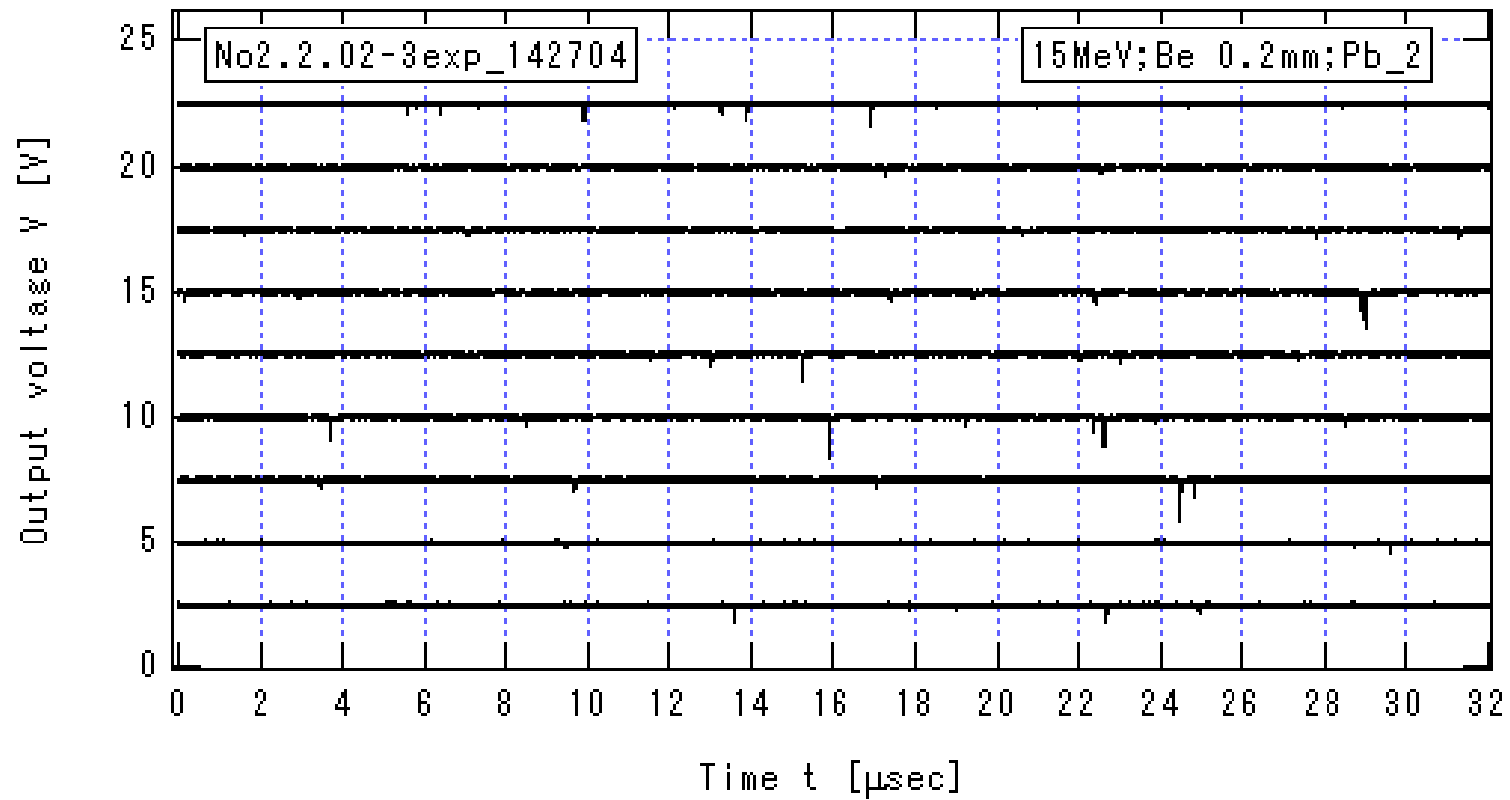


図 3.3.2-3\_3b  $I_{He}=0.700\mu A$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3b)

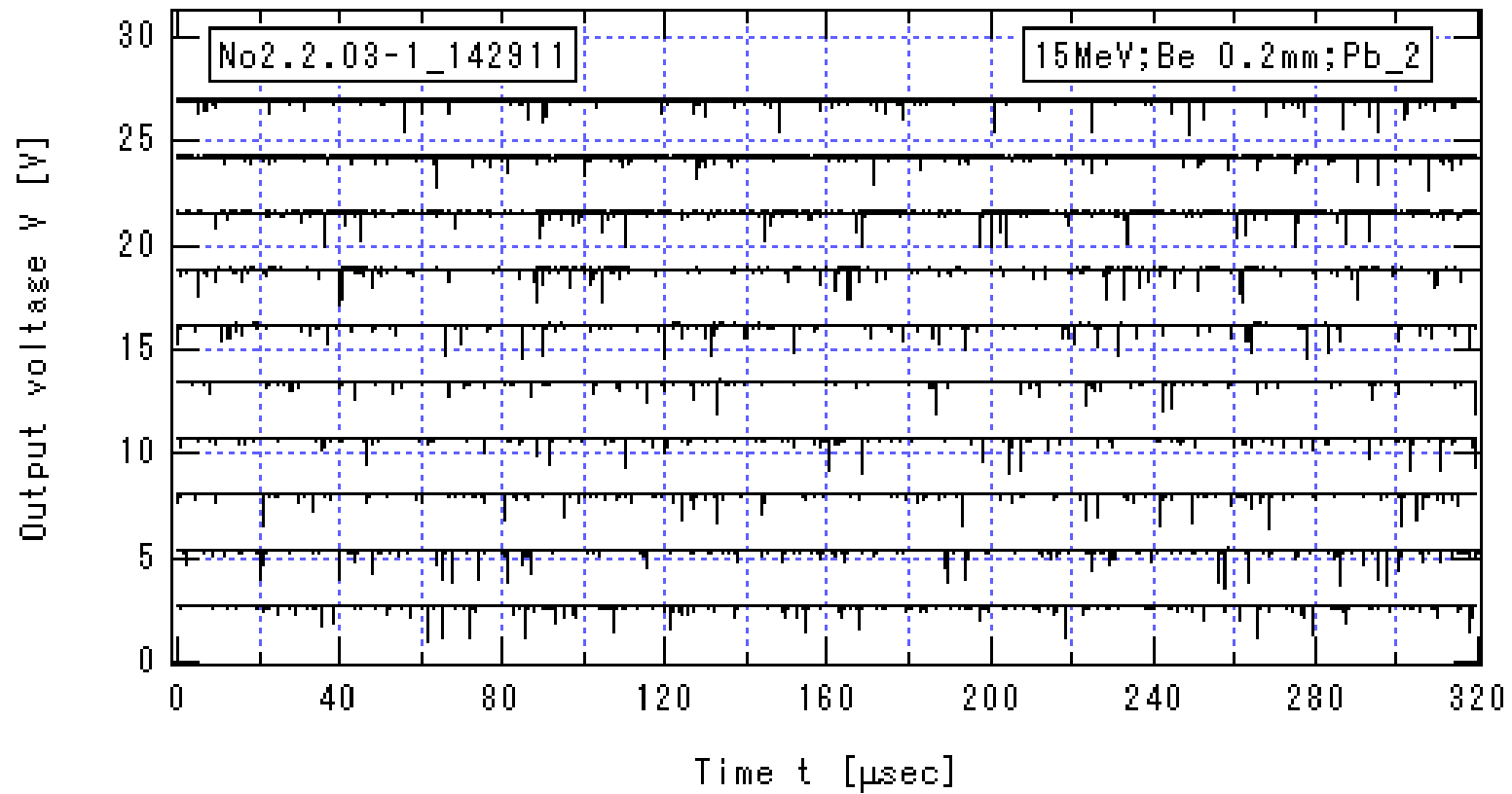


図 3.3.2-4\_1a  $I_{\text{He}}=1.114\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 10cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

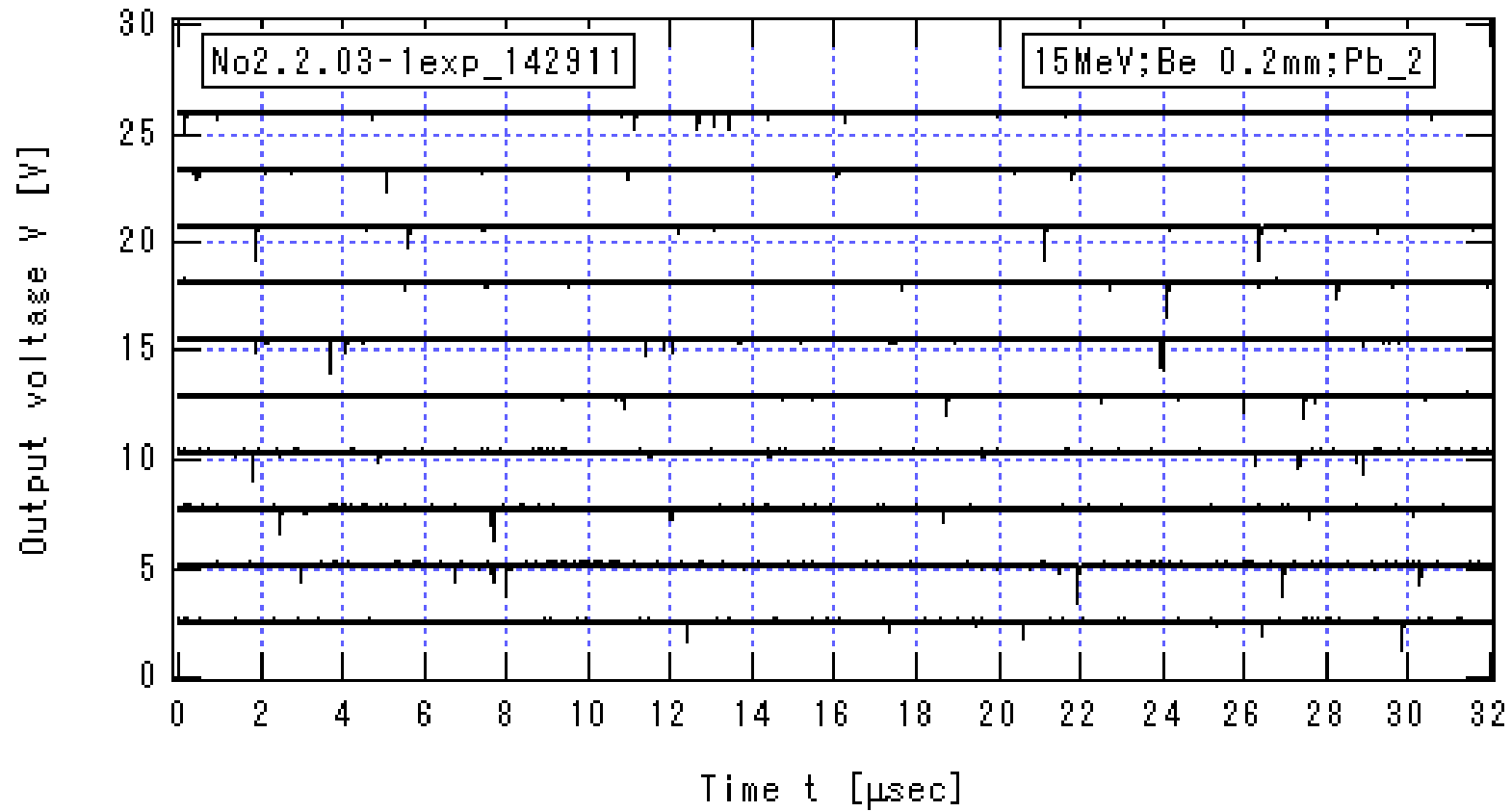


図 3.3.2-4\_1b  $I_{\text{He}}=1.114\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1b)

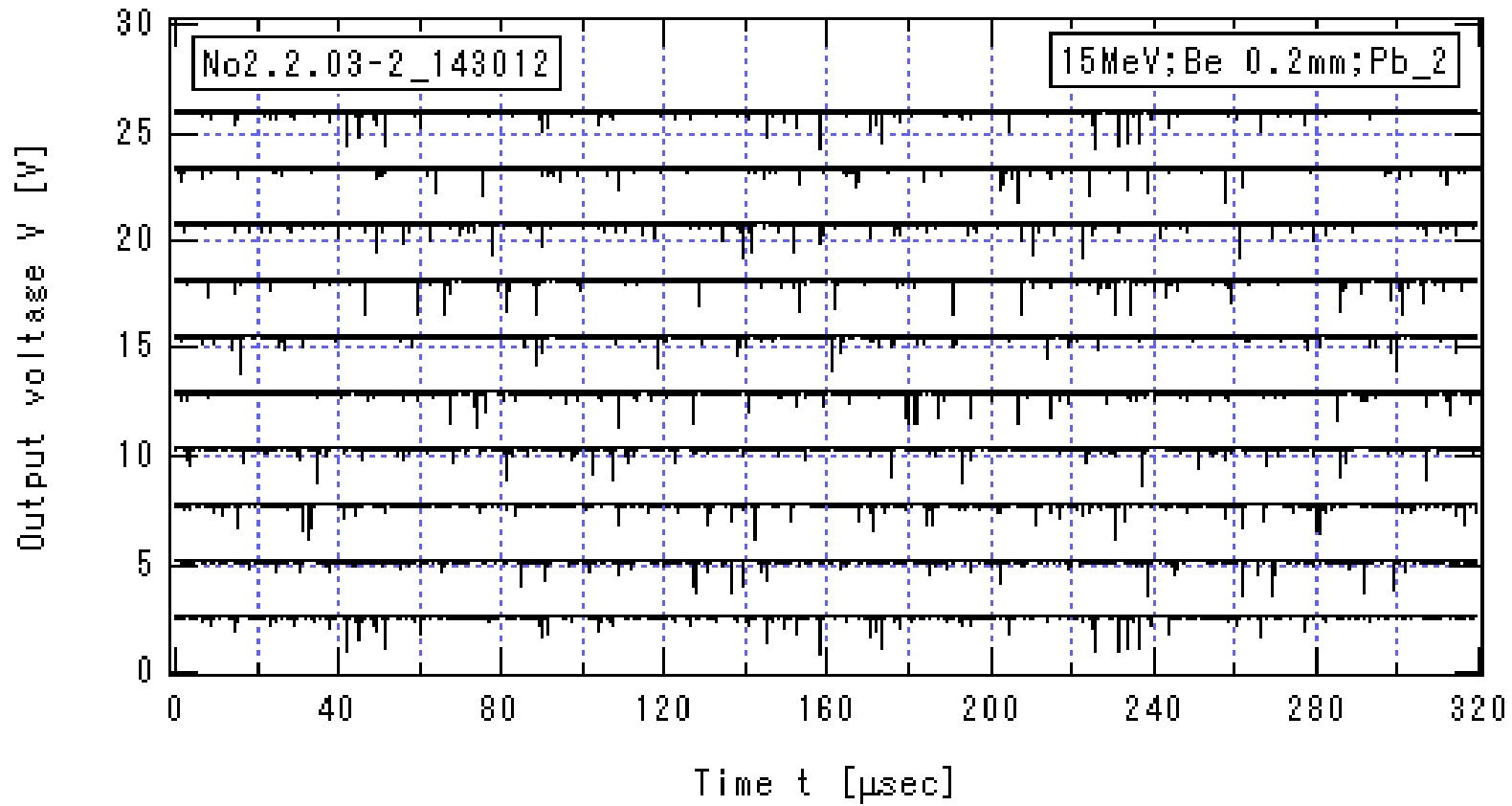


図 3.3.2-4\_2a  $I_{\text{He}}=1.114\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 10cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$



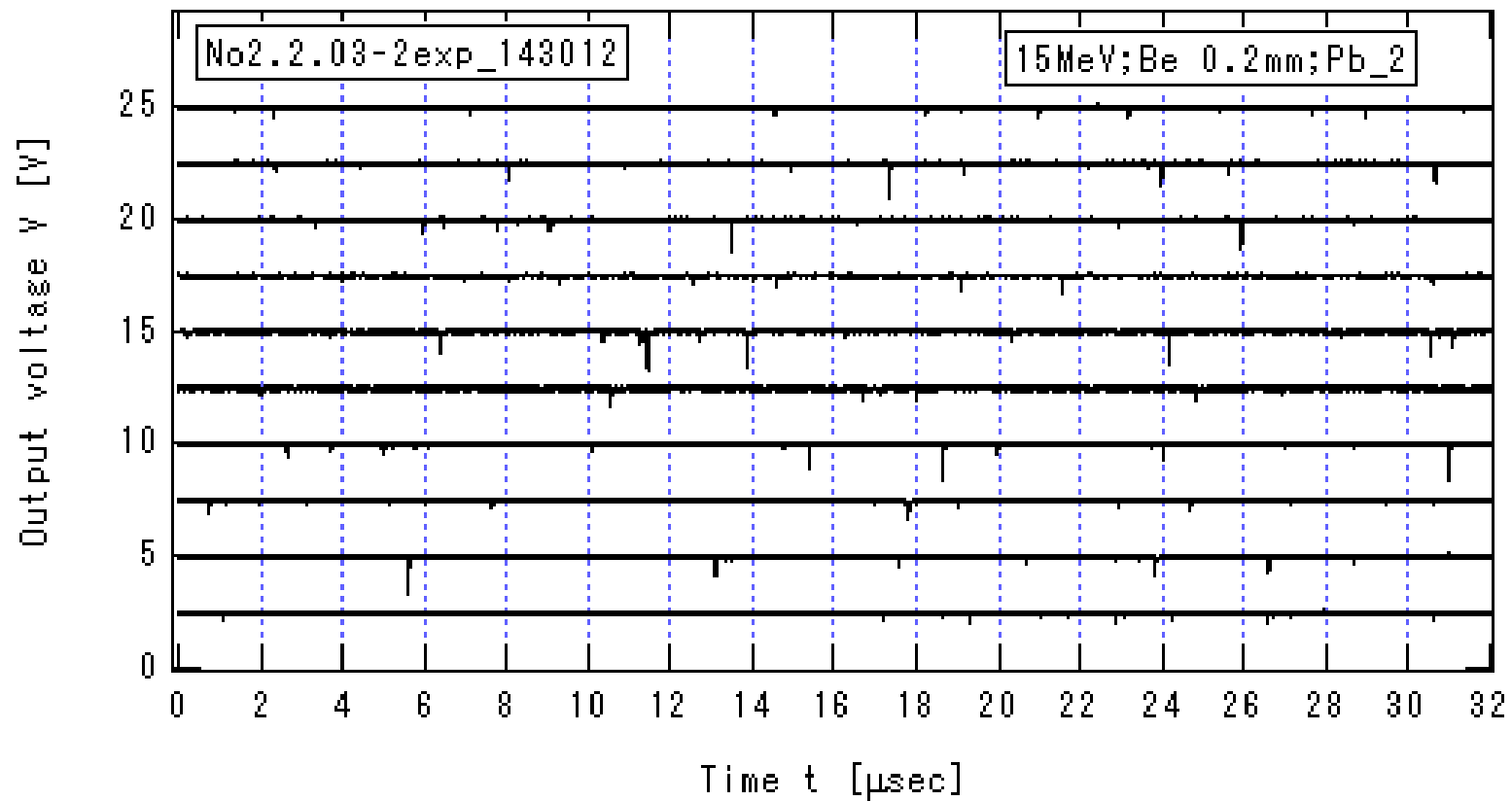


図 3.3.2-4\_2b  $I_{He}=1.114\mu A$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2b)

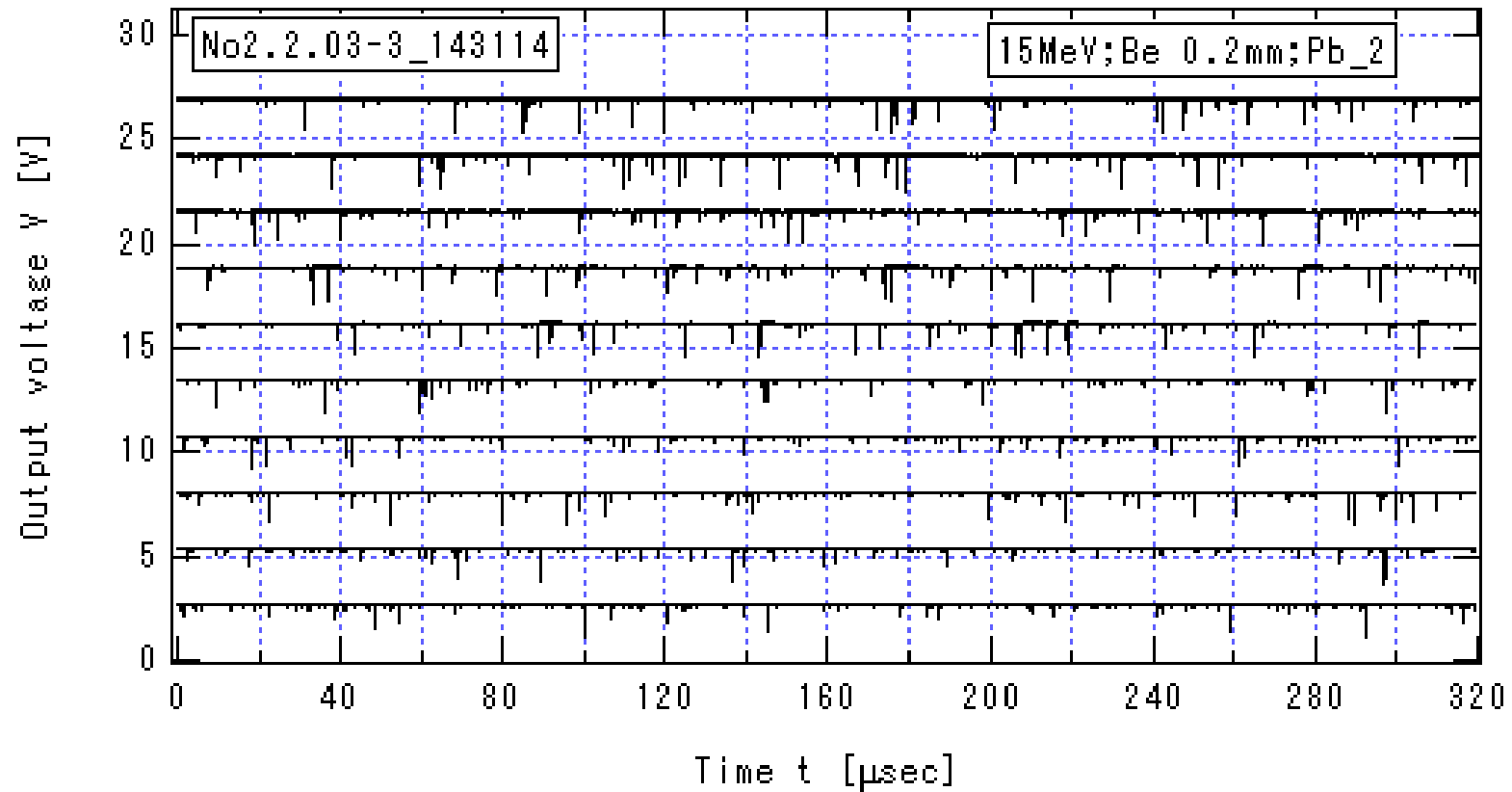


図 3.3.2-4\_3a  $I_{\text{He}}=1.114\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 10cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

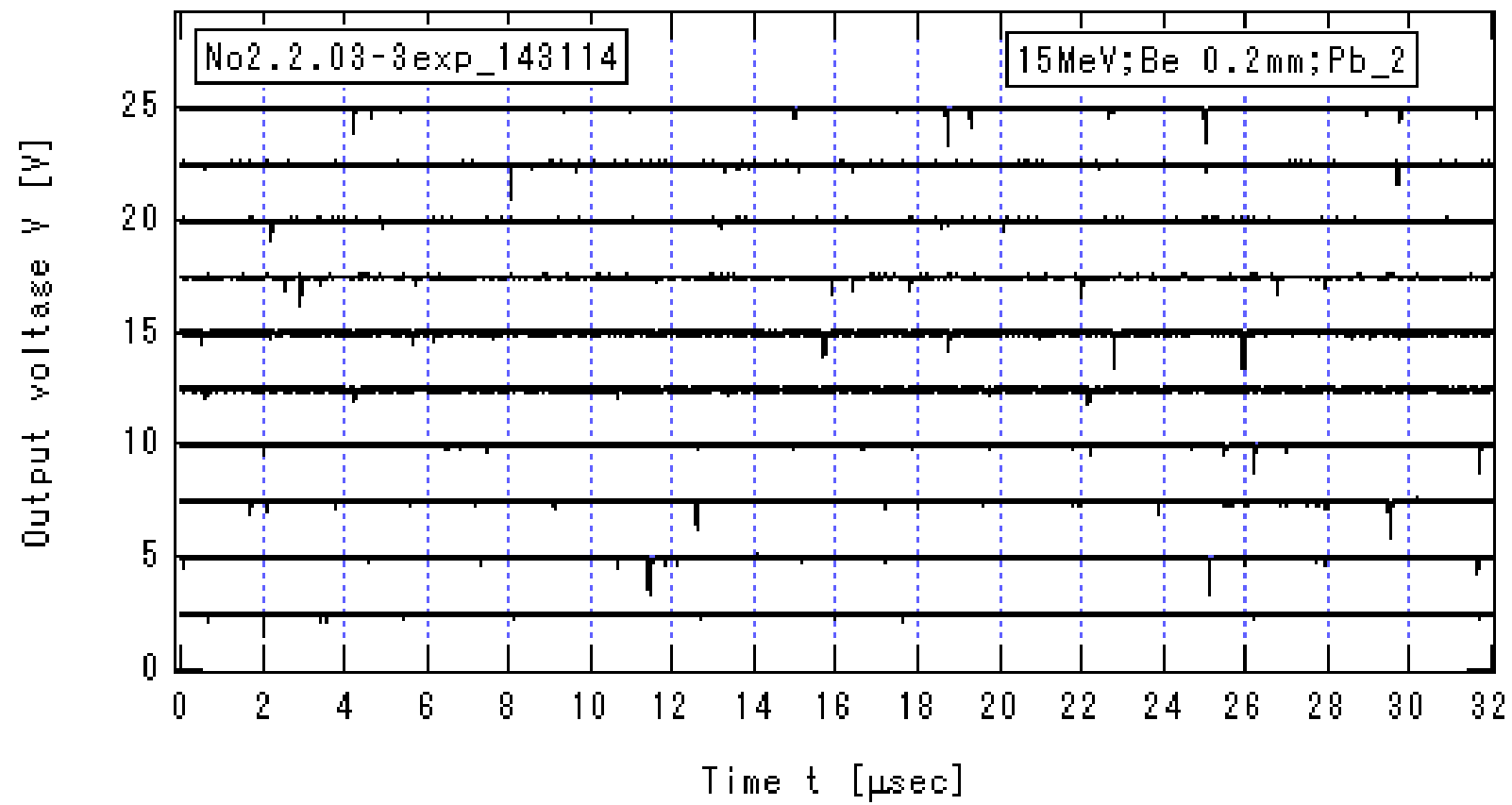


図 3.3.2-4\_3b  $I_{He}=1.114\mu A$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3b)

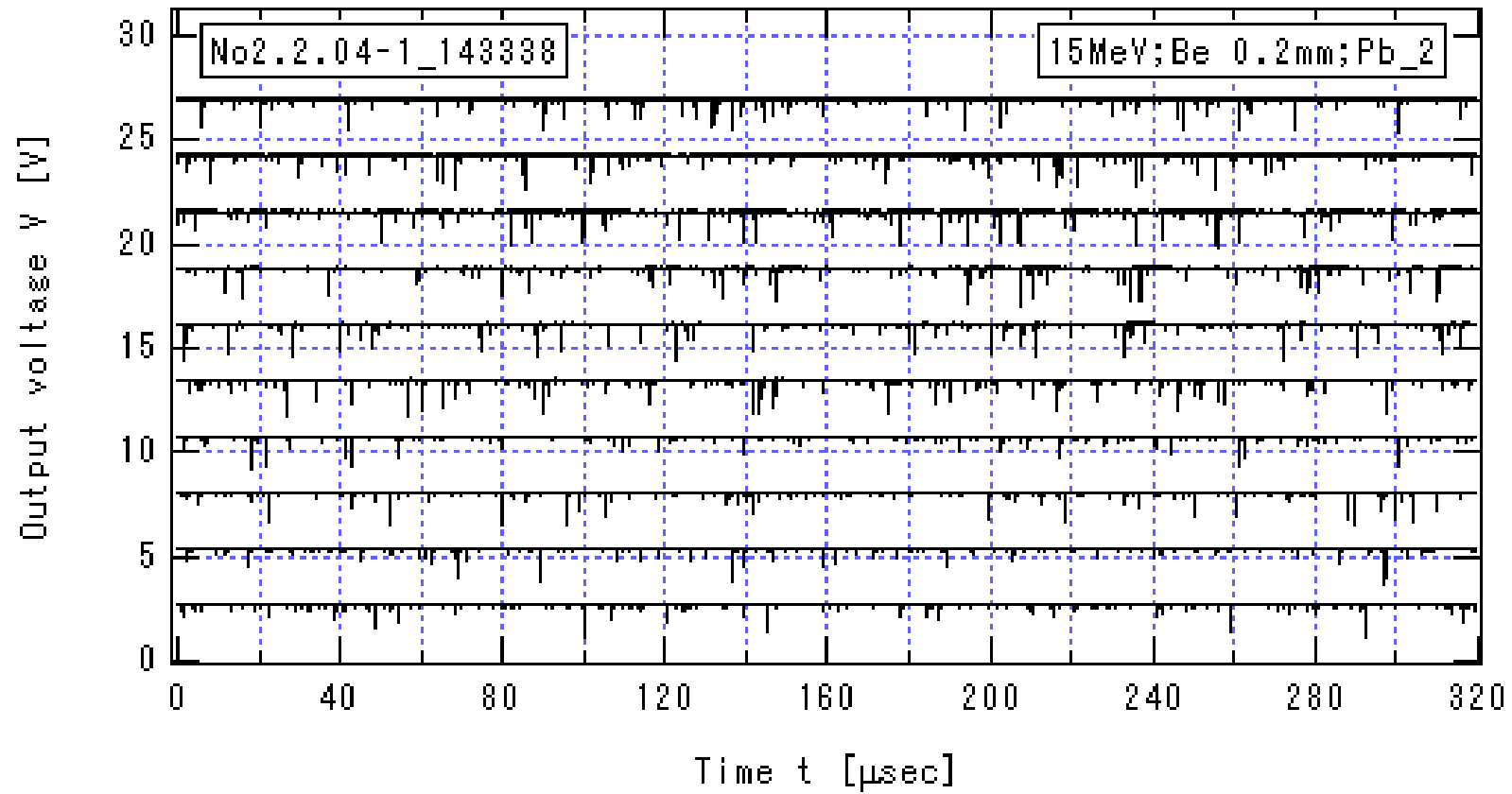


図 3.3.2-5\_1a  $I_{\text{He}}=1.693\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 10cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

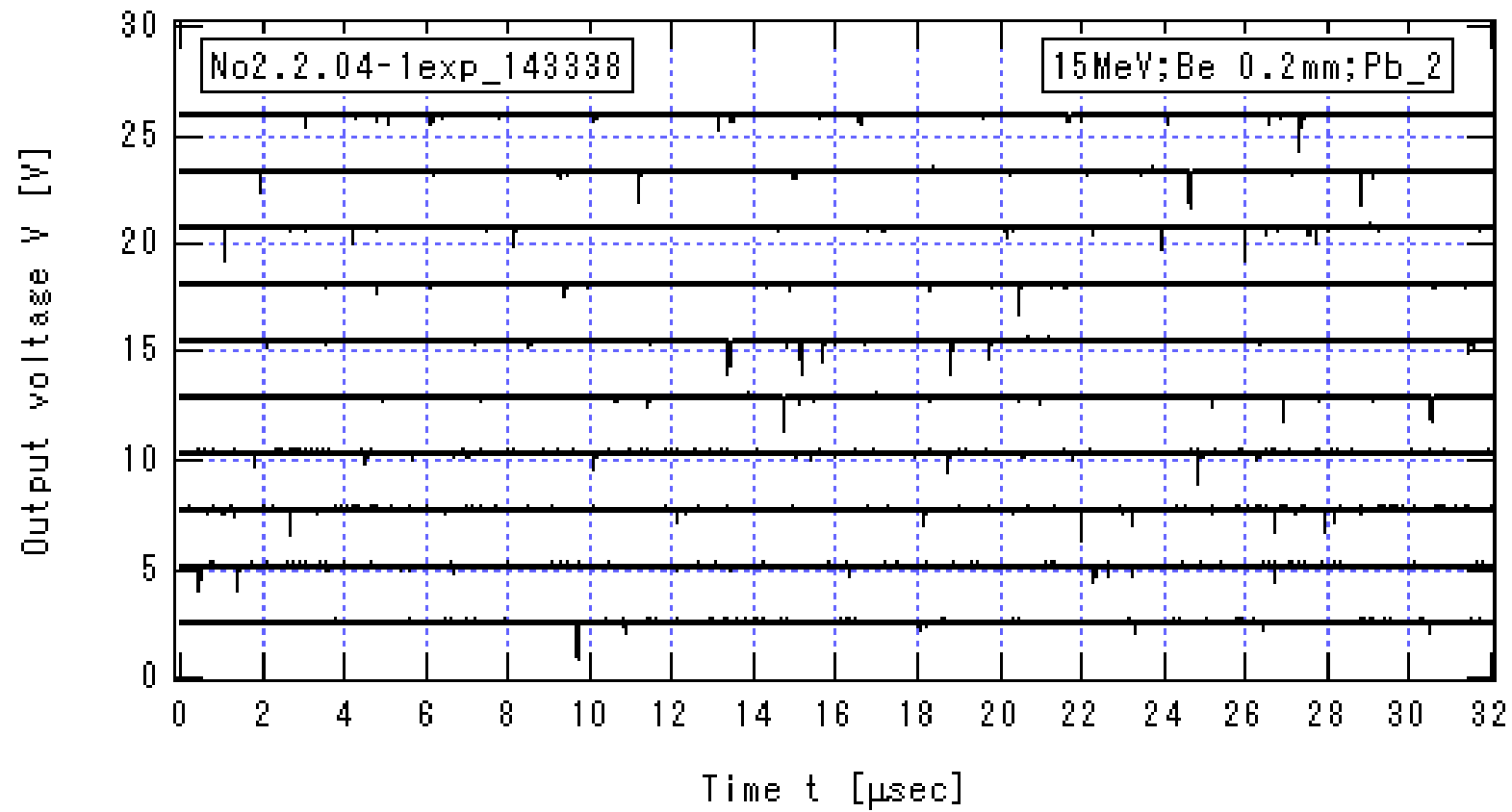


図 3.3.2-5\_1b  $I_{\text{He}}=1.693\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1b)

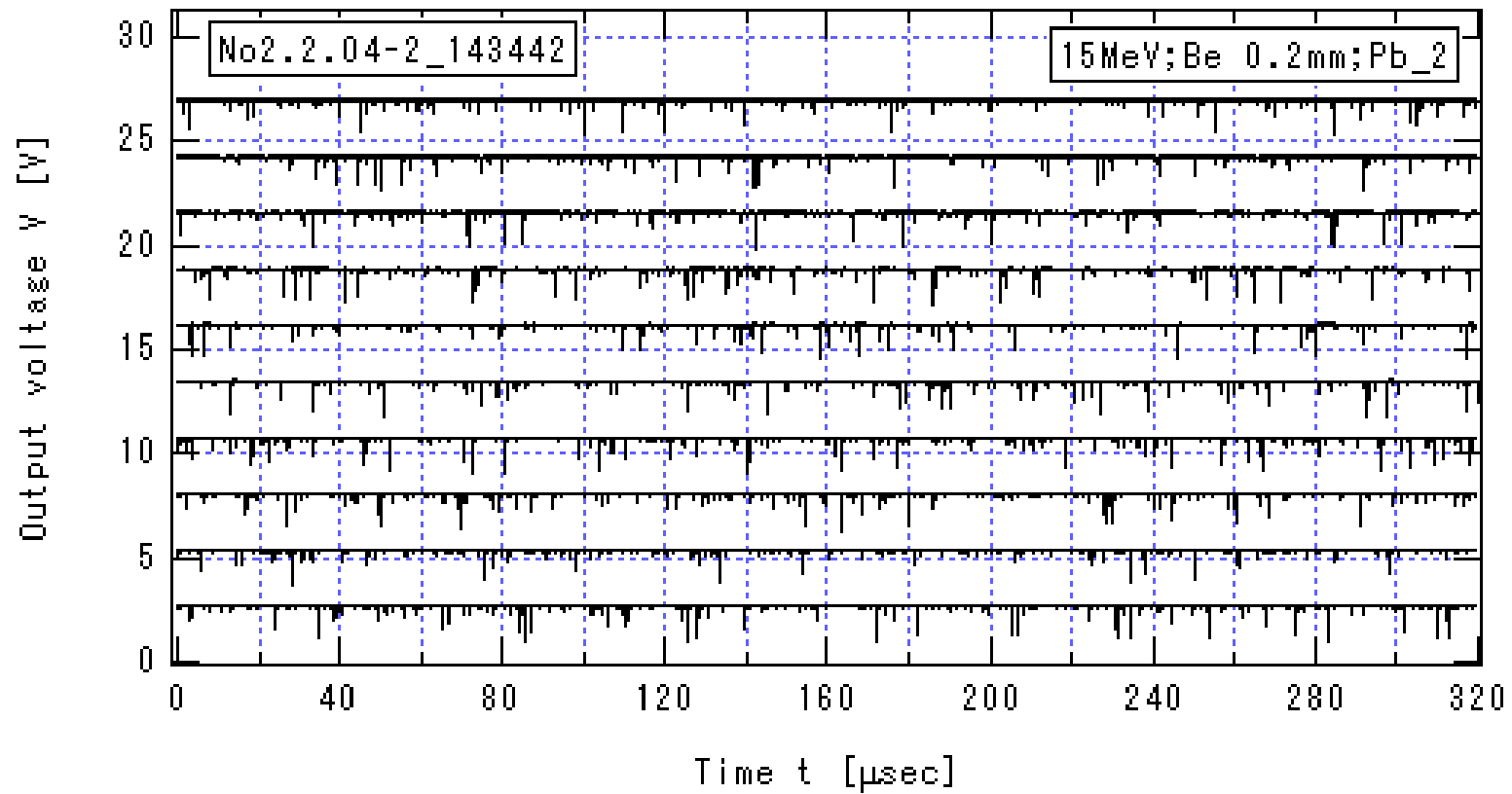


図 3.3.2-5\_2a  $I_{\text{He}}=1.693\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 10cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

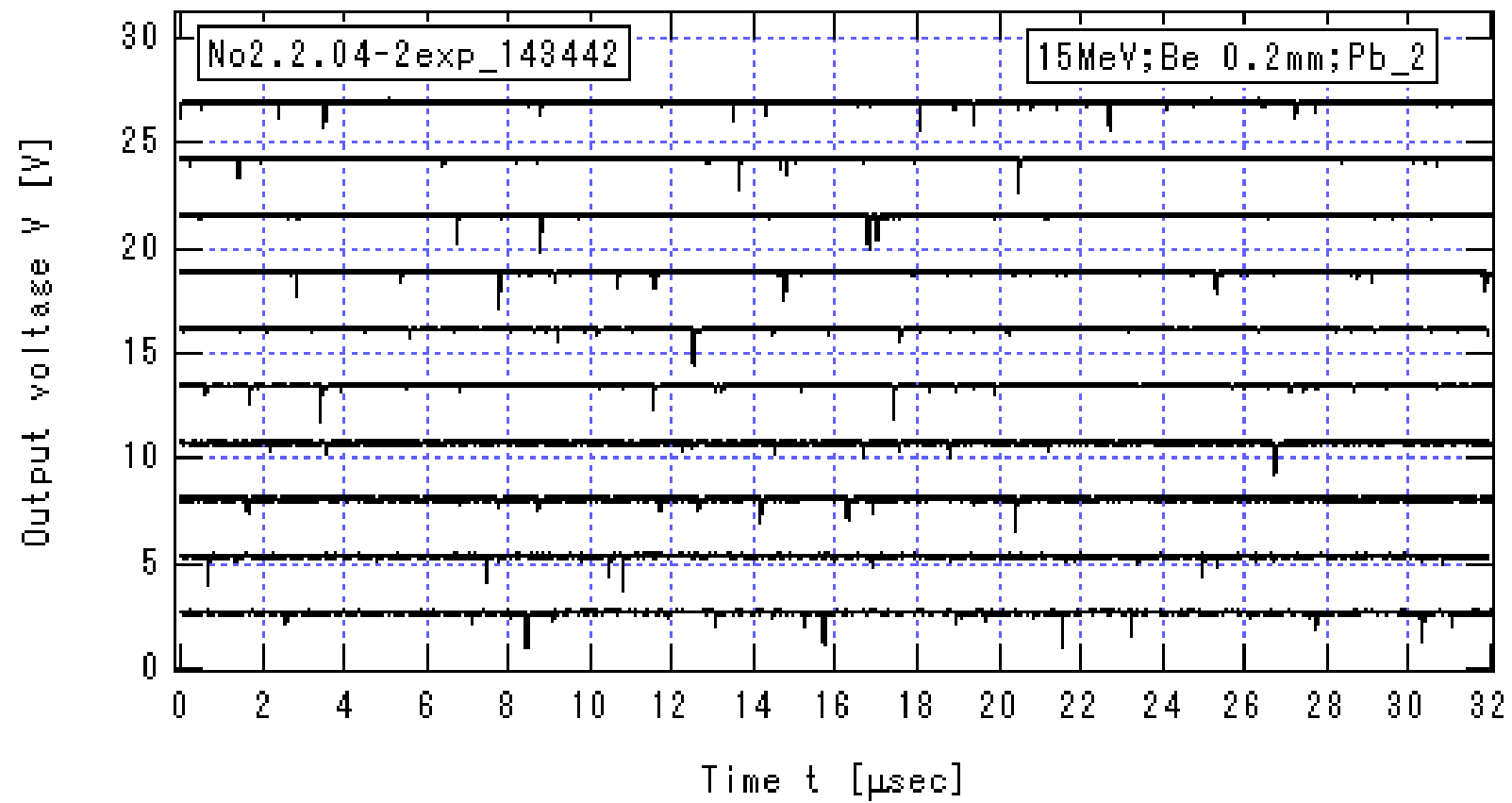


図 3.3.2-5\_2b  $I_{He}=1.693\mu A$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2b)

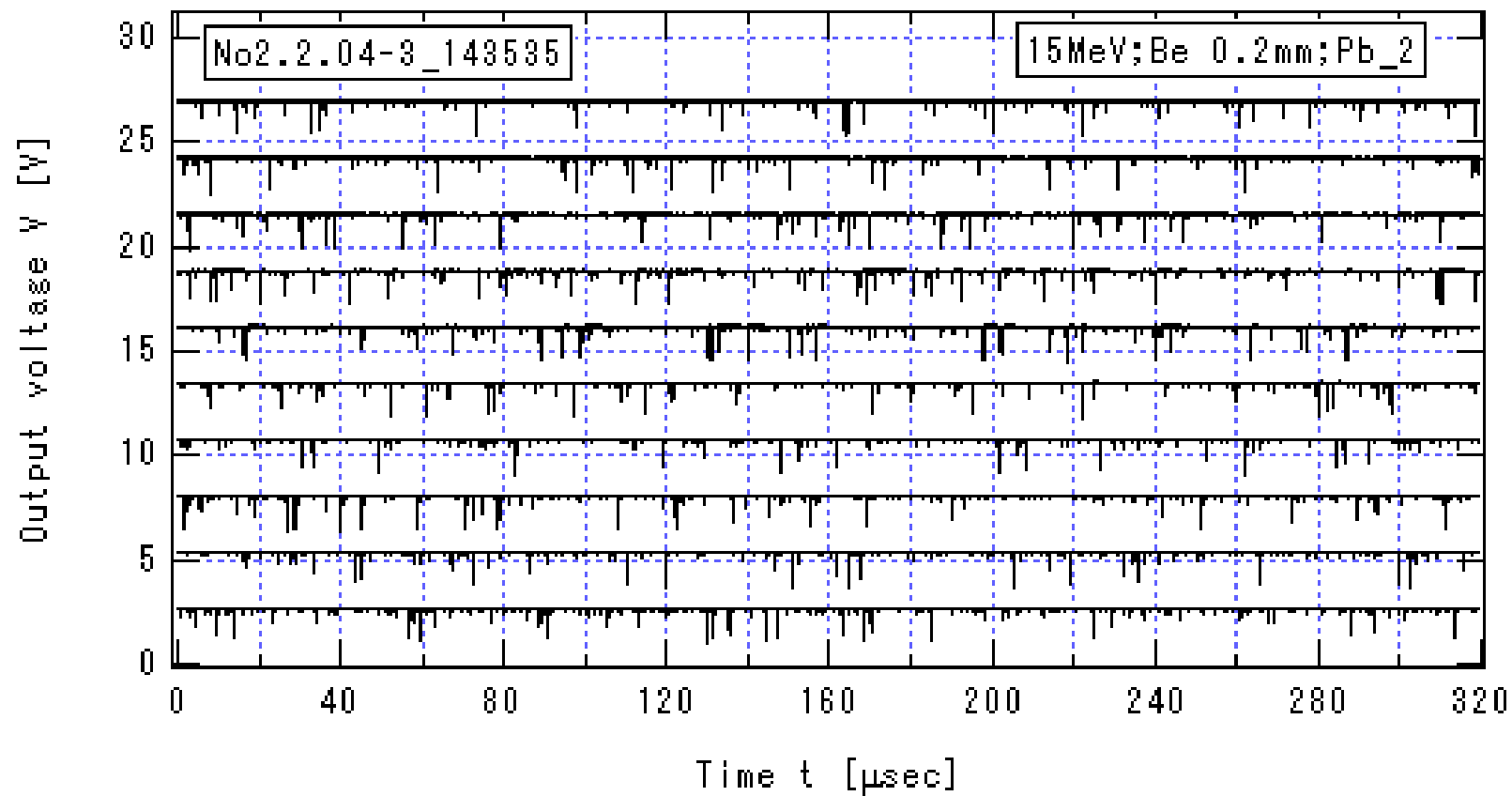


図 3.3.2-5\_3a  $I_{\text{He}}=1.693\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 10cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$



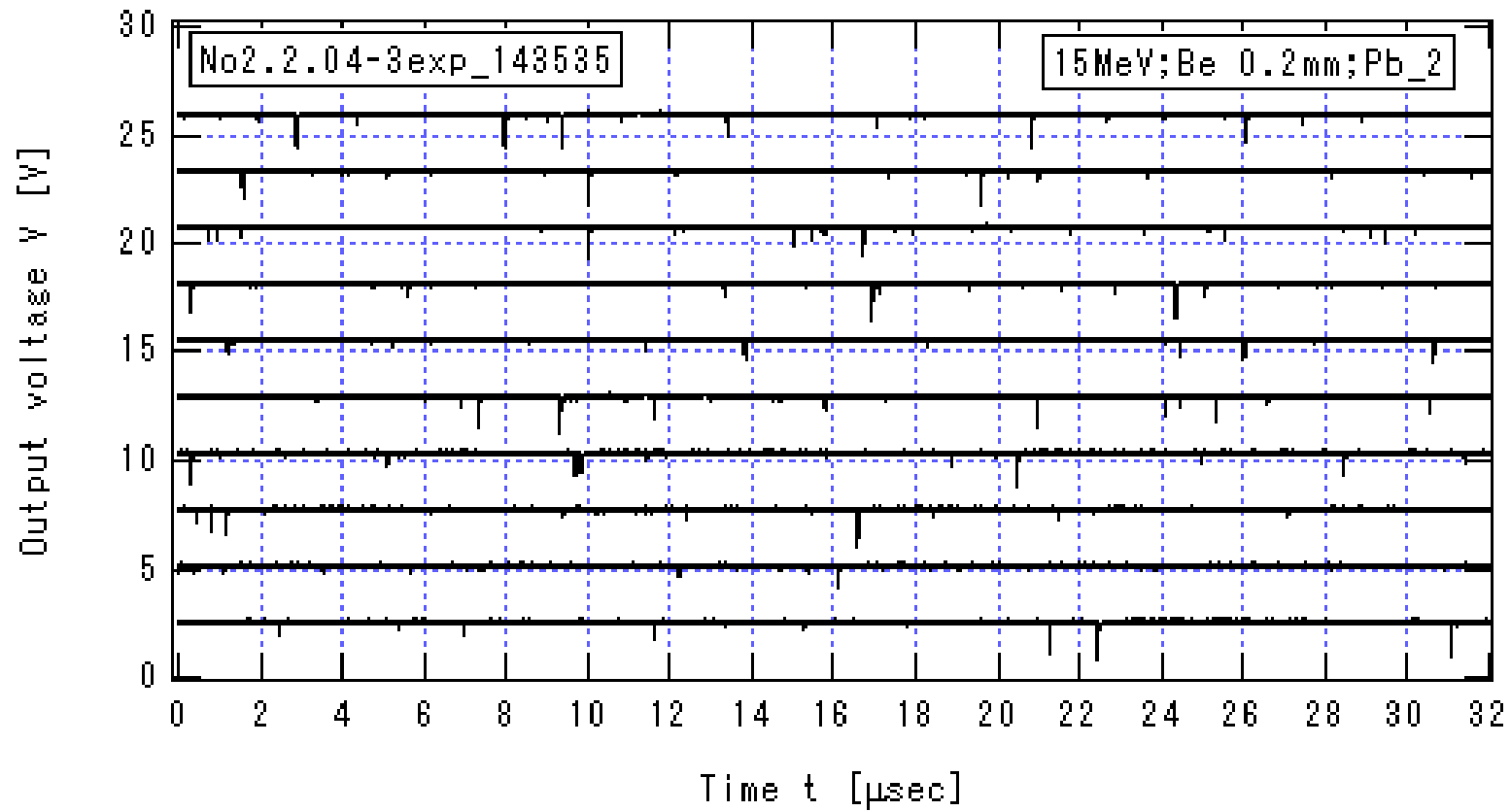


図 3.3.2-5\_3b  $I_{\text{He}}=1.693\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3b)

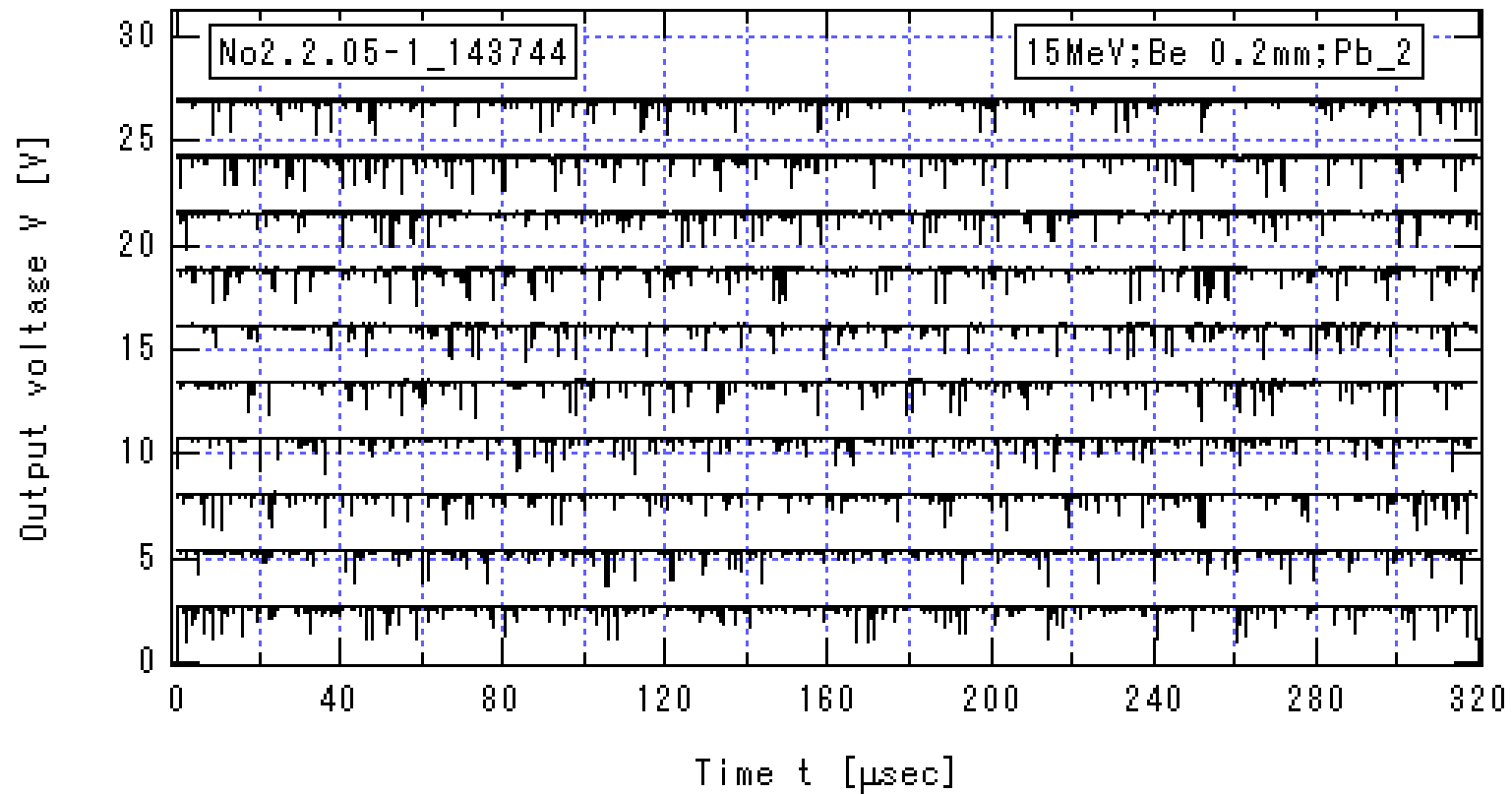


図 3.3.2-6\_1a  $I_{\text{He}}=2.850\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 10cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

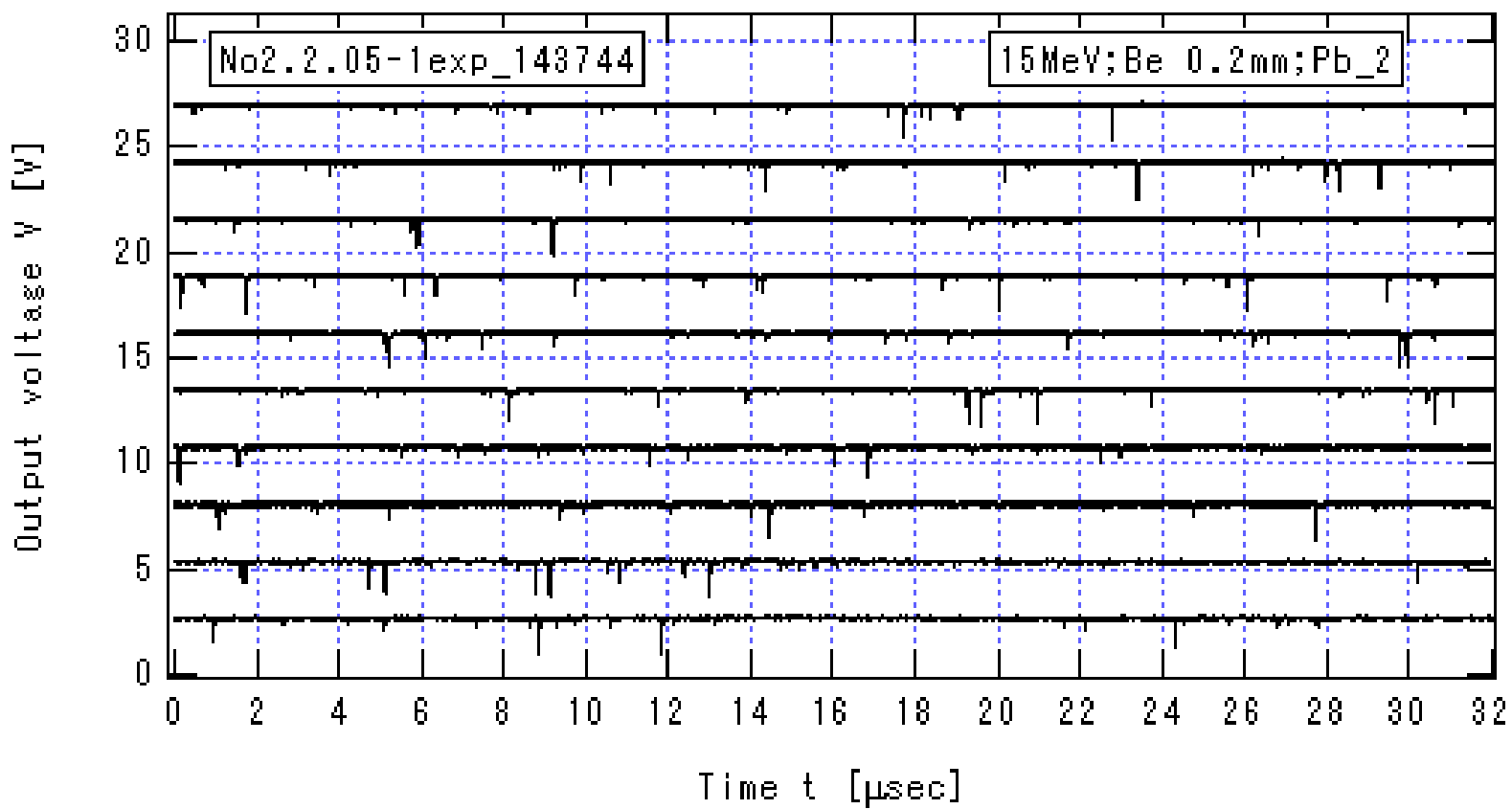


図 3.3.2-6\_1b  $I_{\text{He}}=2.850\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1b)

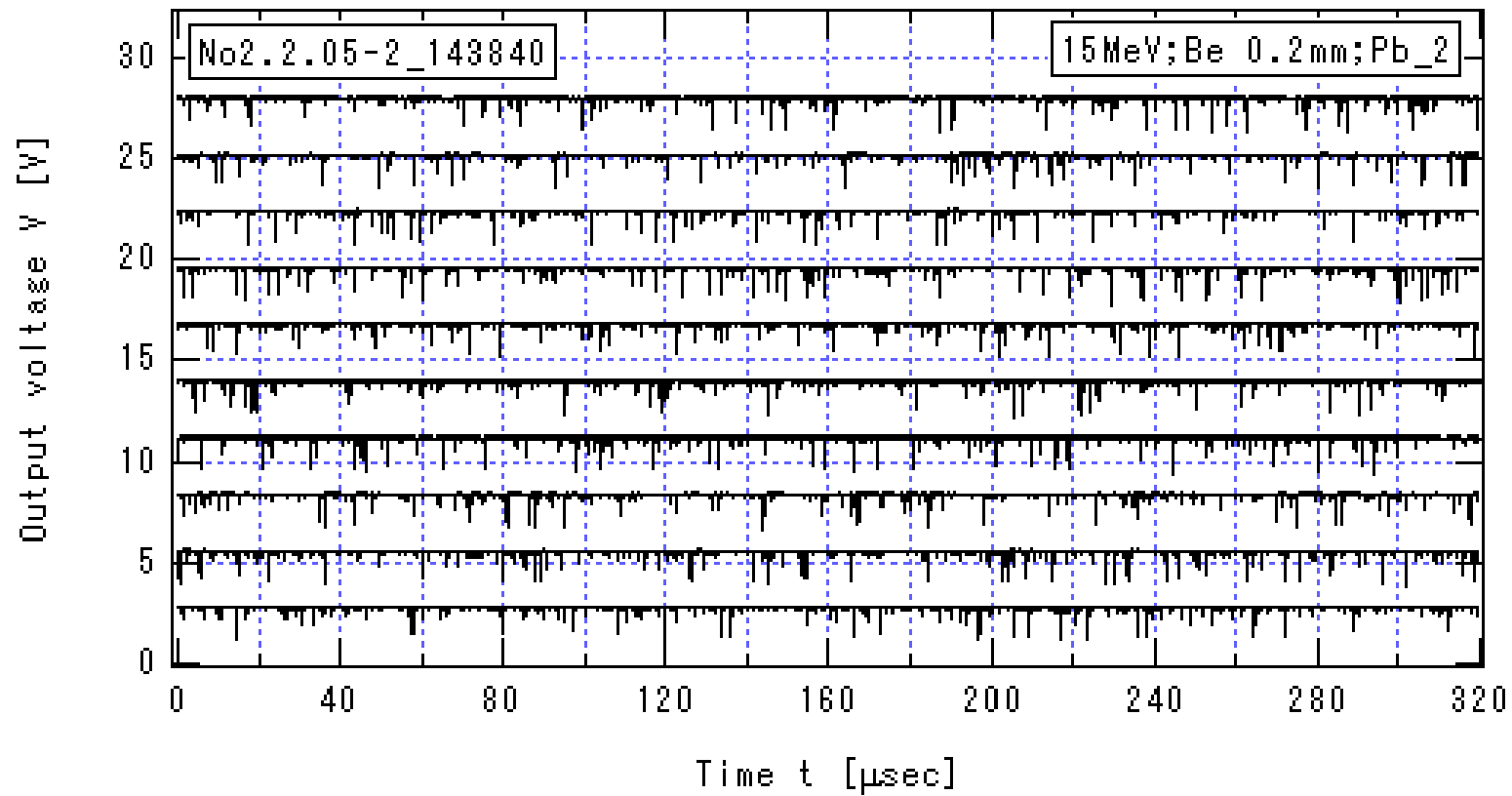


図 3.3.2-6\_2a  $I_{\text{He}}=2.850\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 10cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

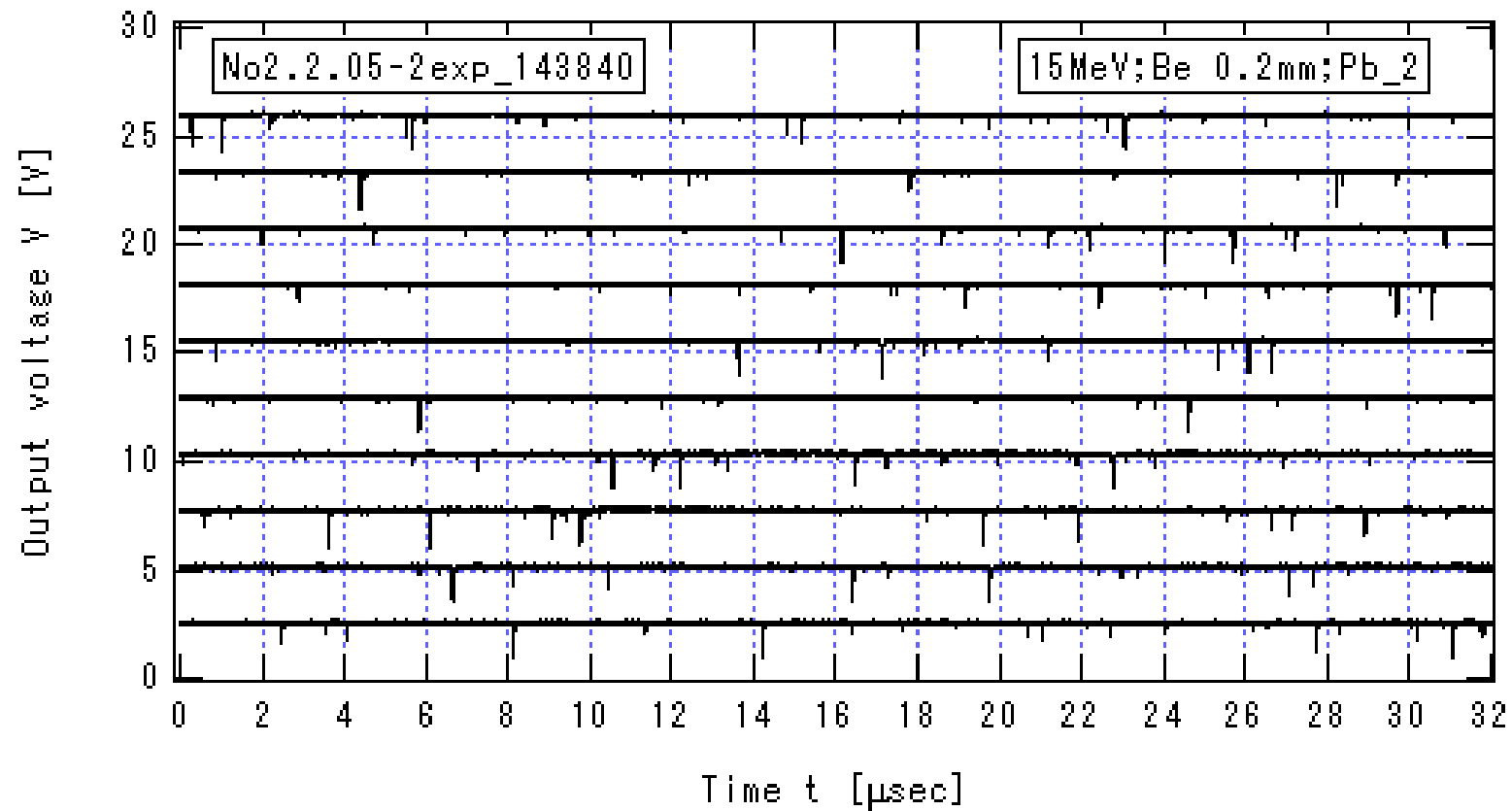


図 3.3.2-6\_2b  $I_{\text{He}}=2.850\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2b)

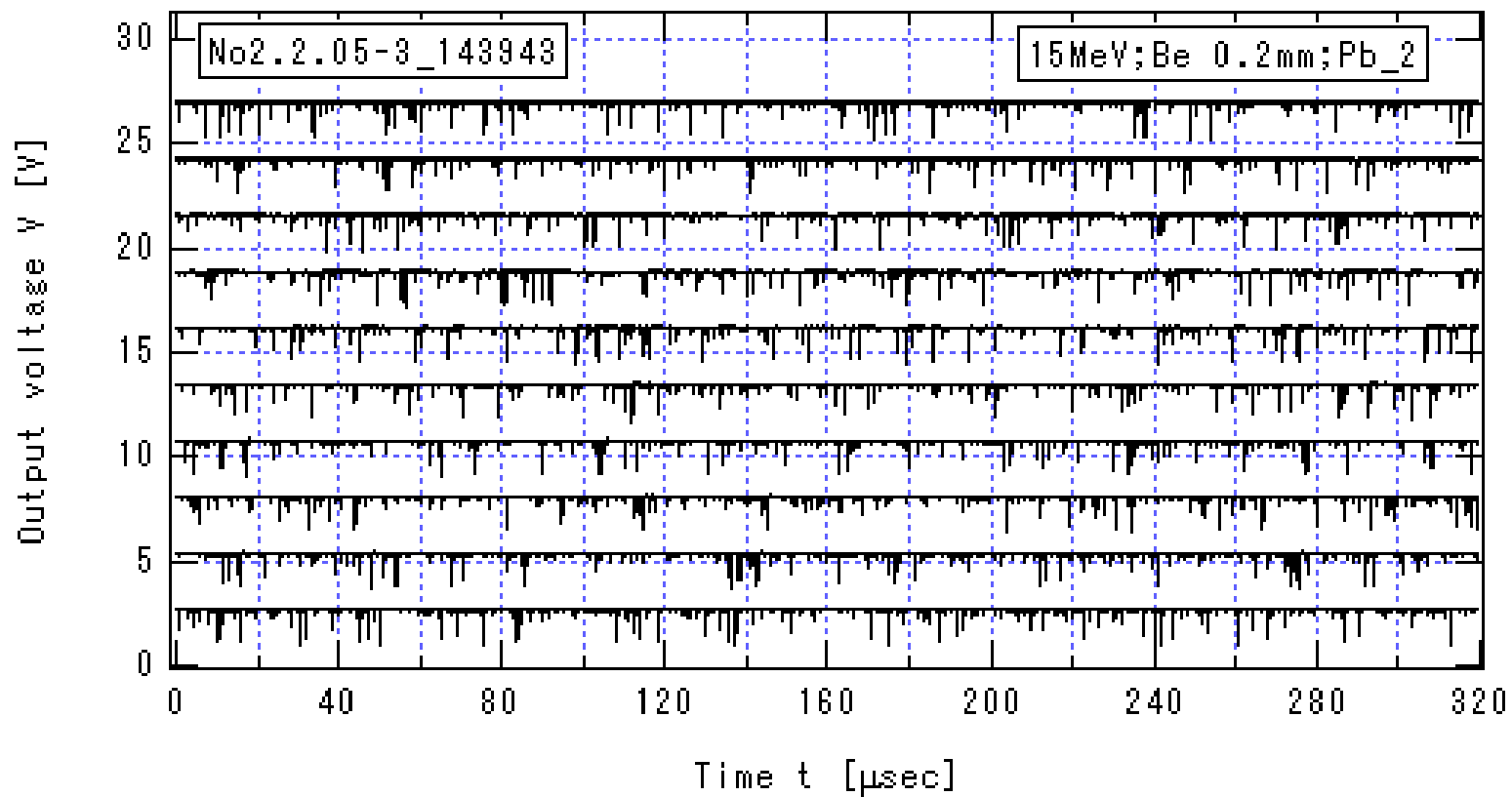


図 3.3.2-6\_3a  $I_{\text{He}}=2.850\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 10cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

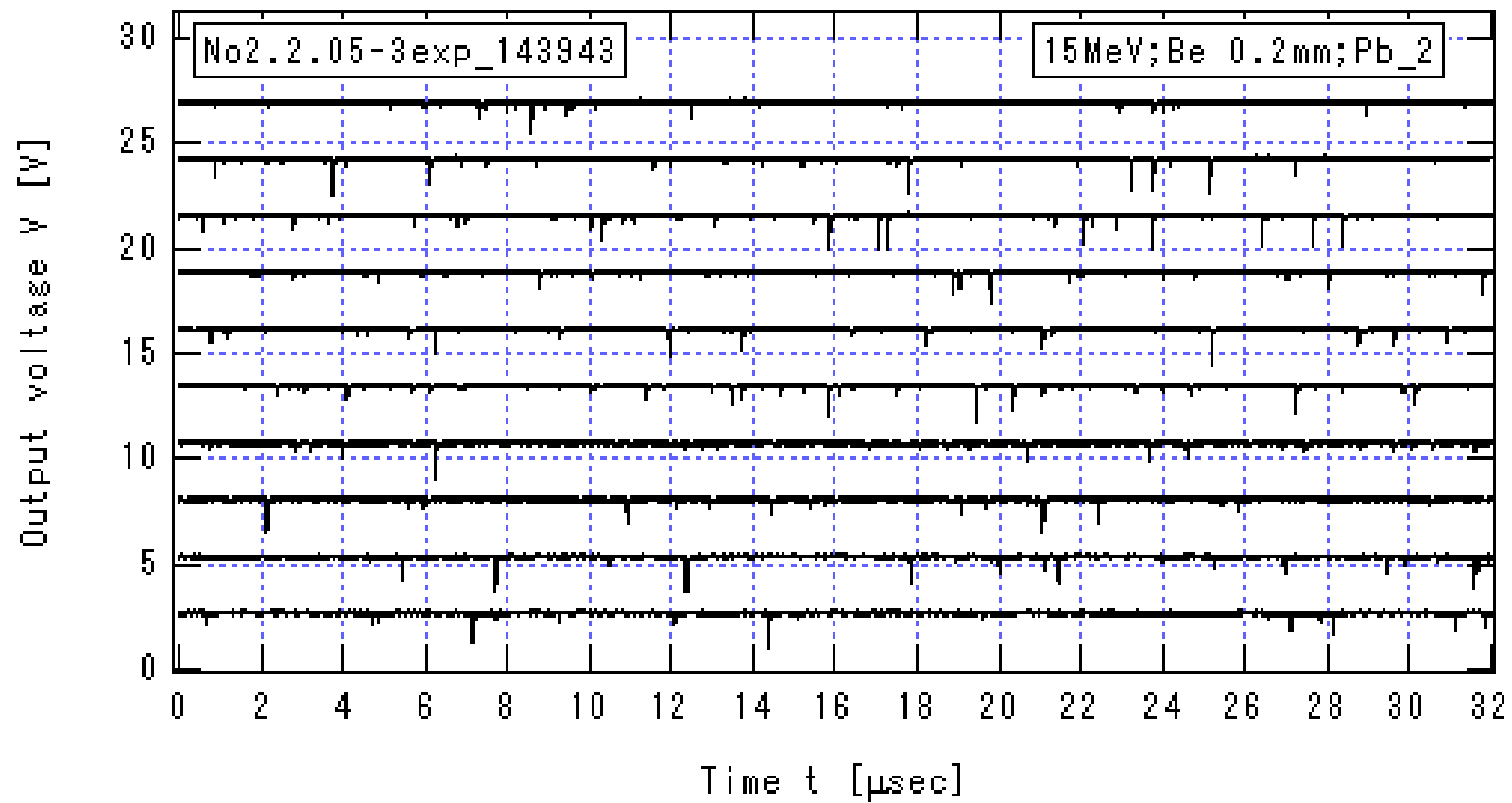


図 3.3.2-6\_3b  $I_{He}=2.850\mu A$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3b)

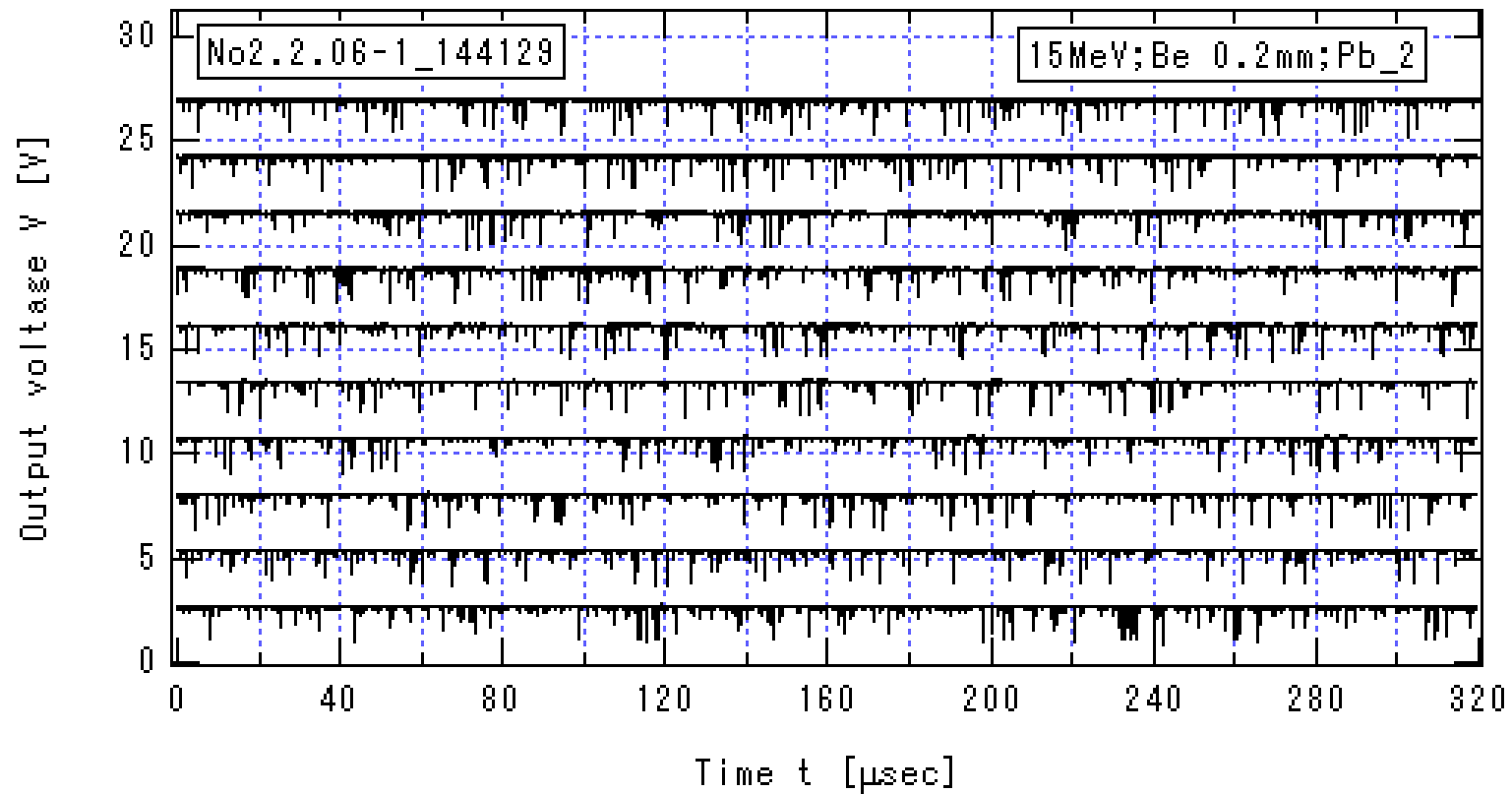


図 3.3.2-7\_1a  $I_{\text{He}}=3.653\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 10cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$



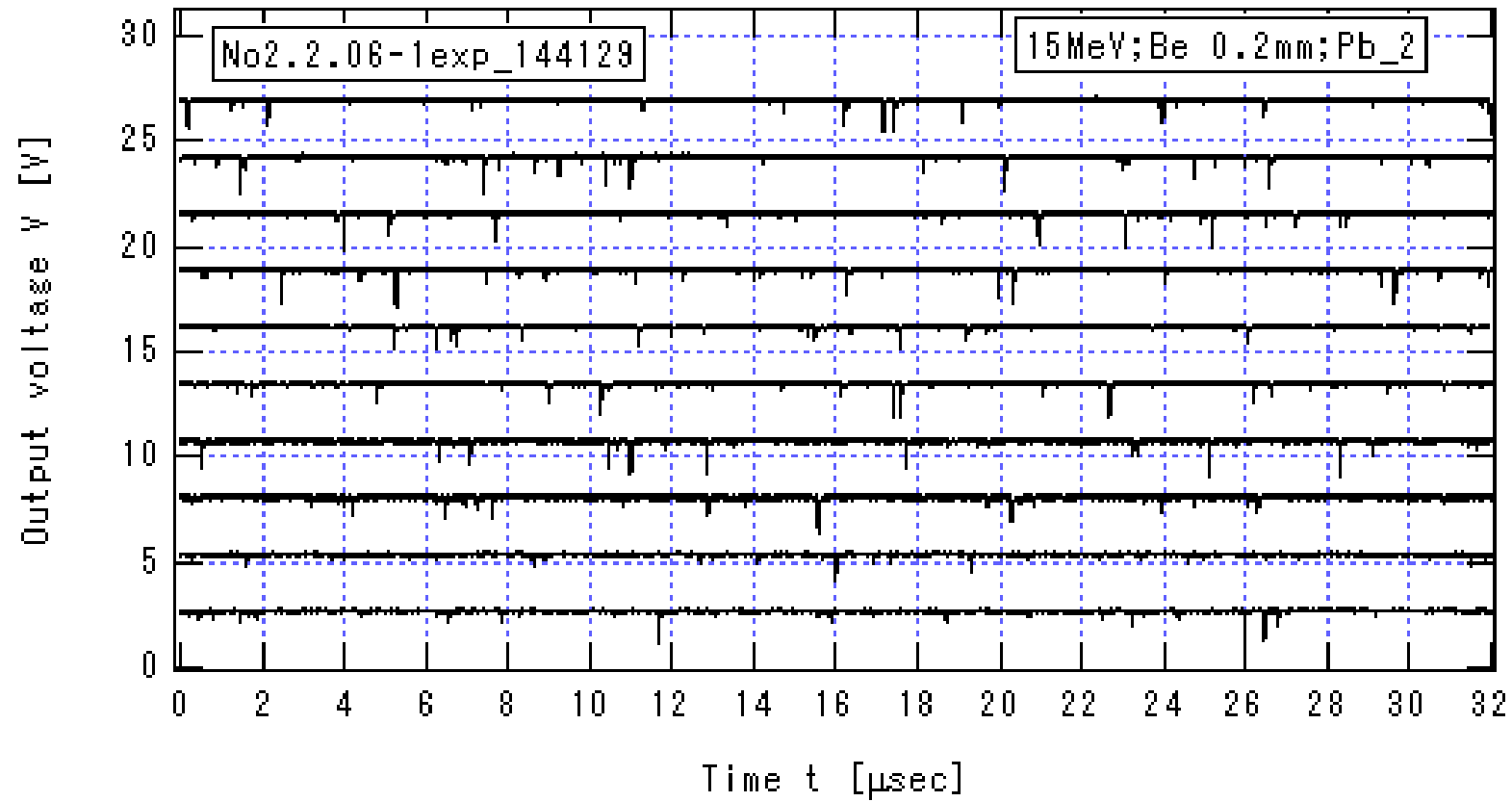


図 3.3.2-7\_1b  $I_{He}=3.653\mu A$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1b)

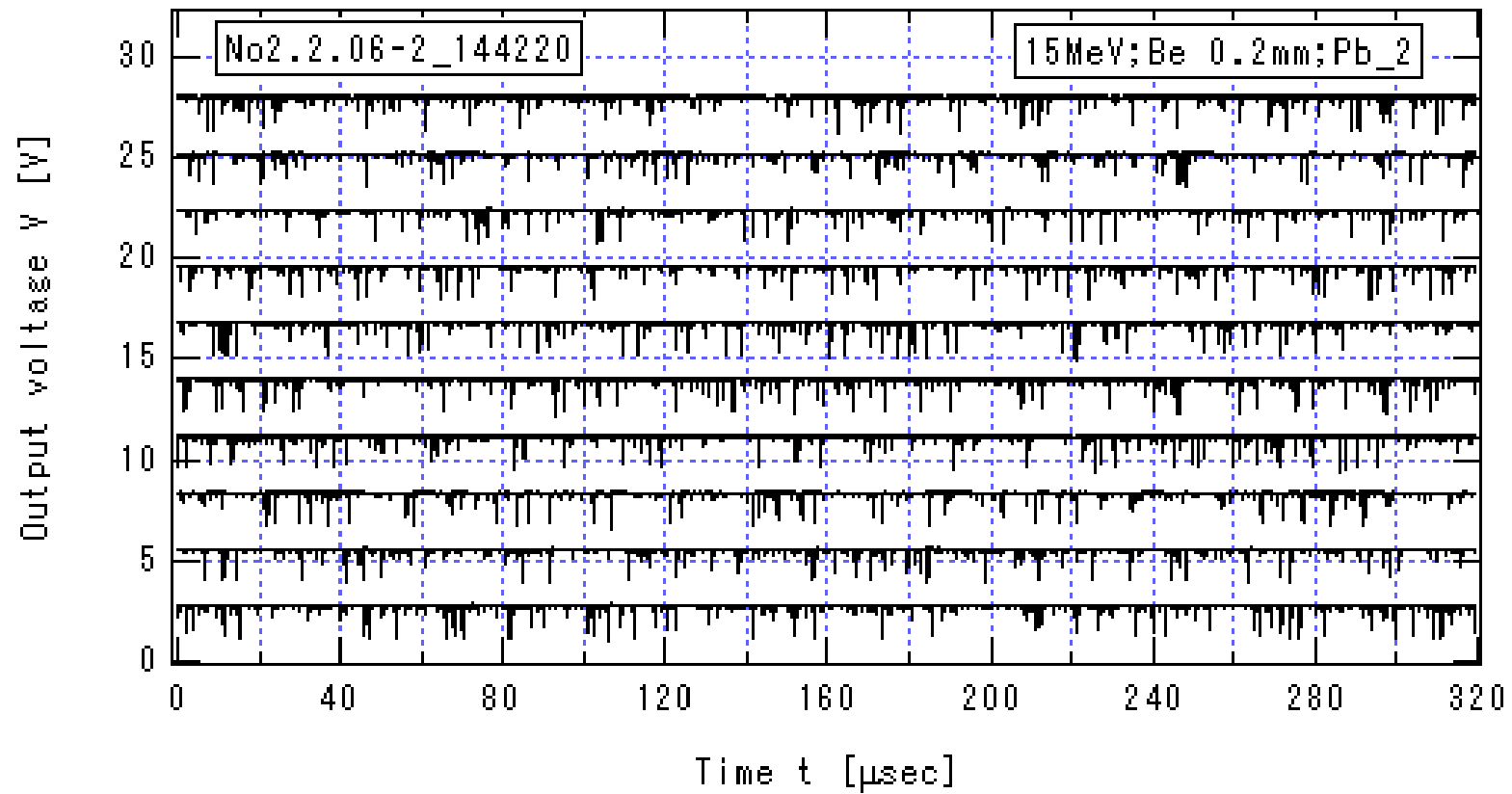


図 3.3.2-7\_2a  $I_{\text{He}}=3.653\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 10cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

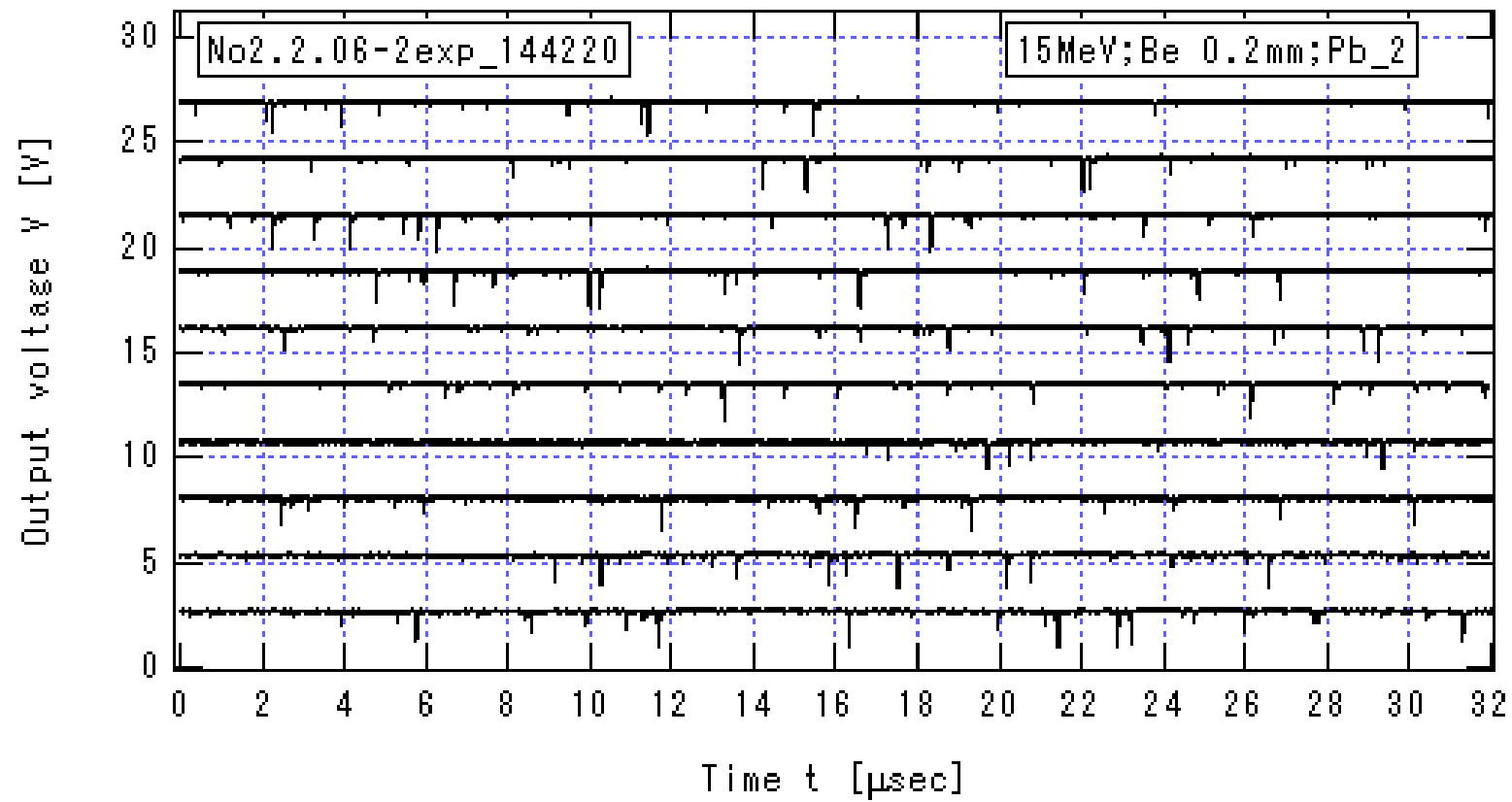


図 3.3.2-7\_2b  $I_{\text{He}}=3.653\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2b)

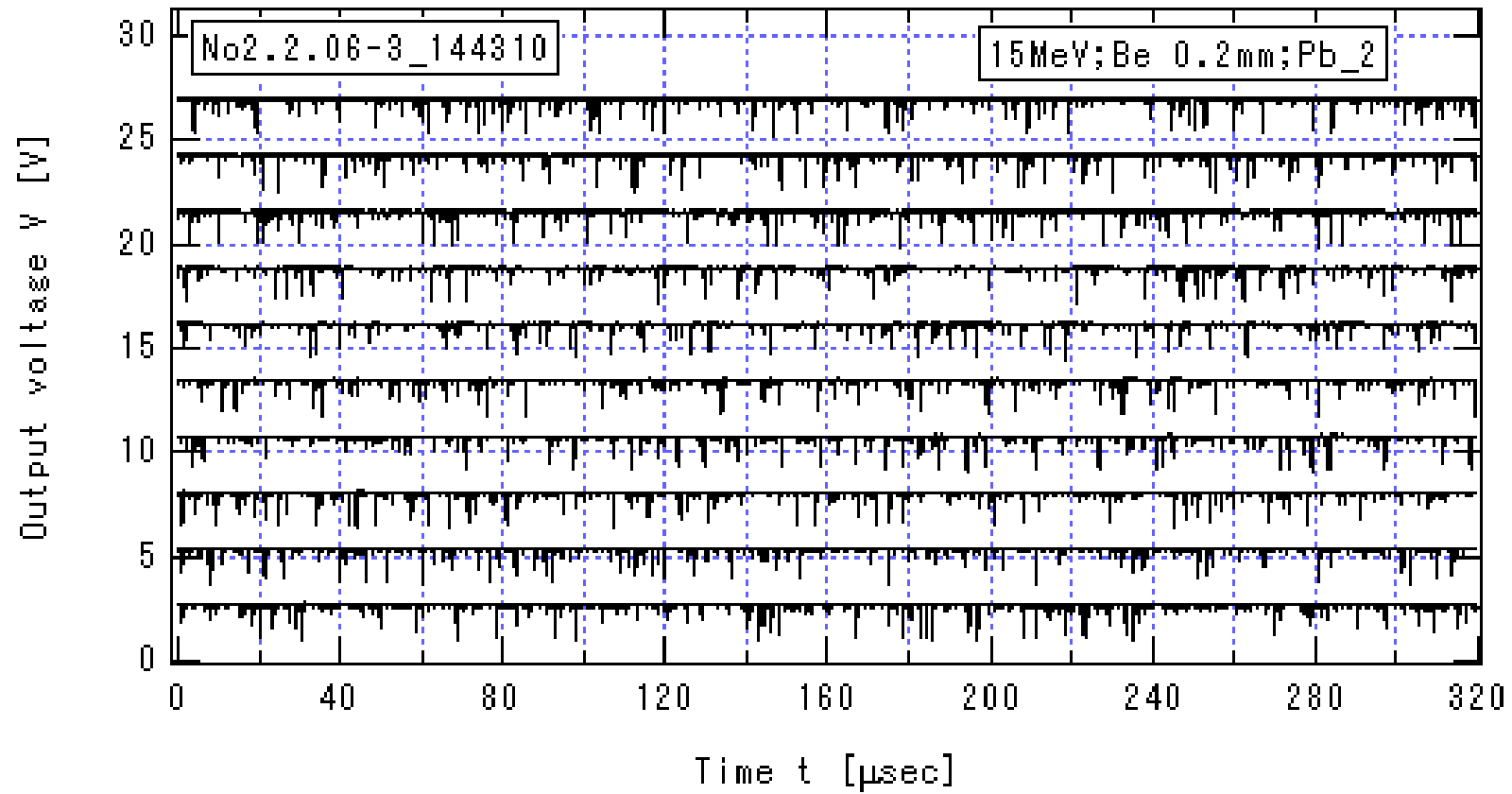


図 3.3.2-7\_3a  $I_{\text{He}}=3.653\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 10cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

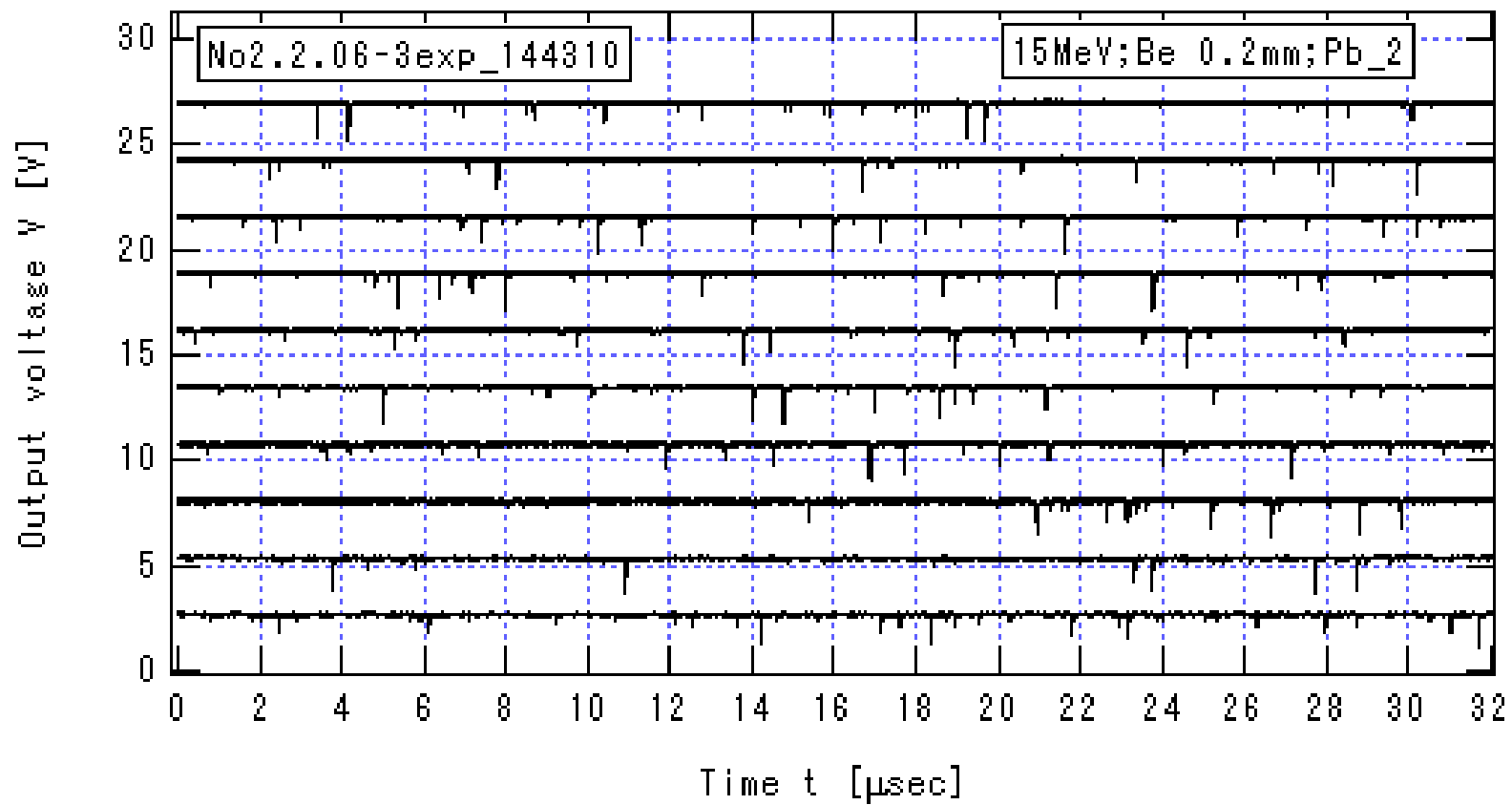


図 3.3.2-7\_3b  $I_{\text{He}}=3.653\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3b)

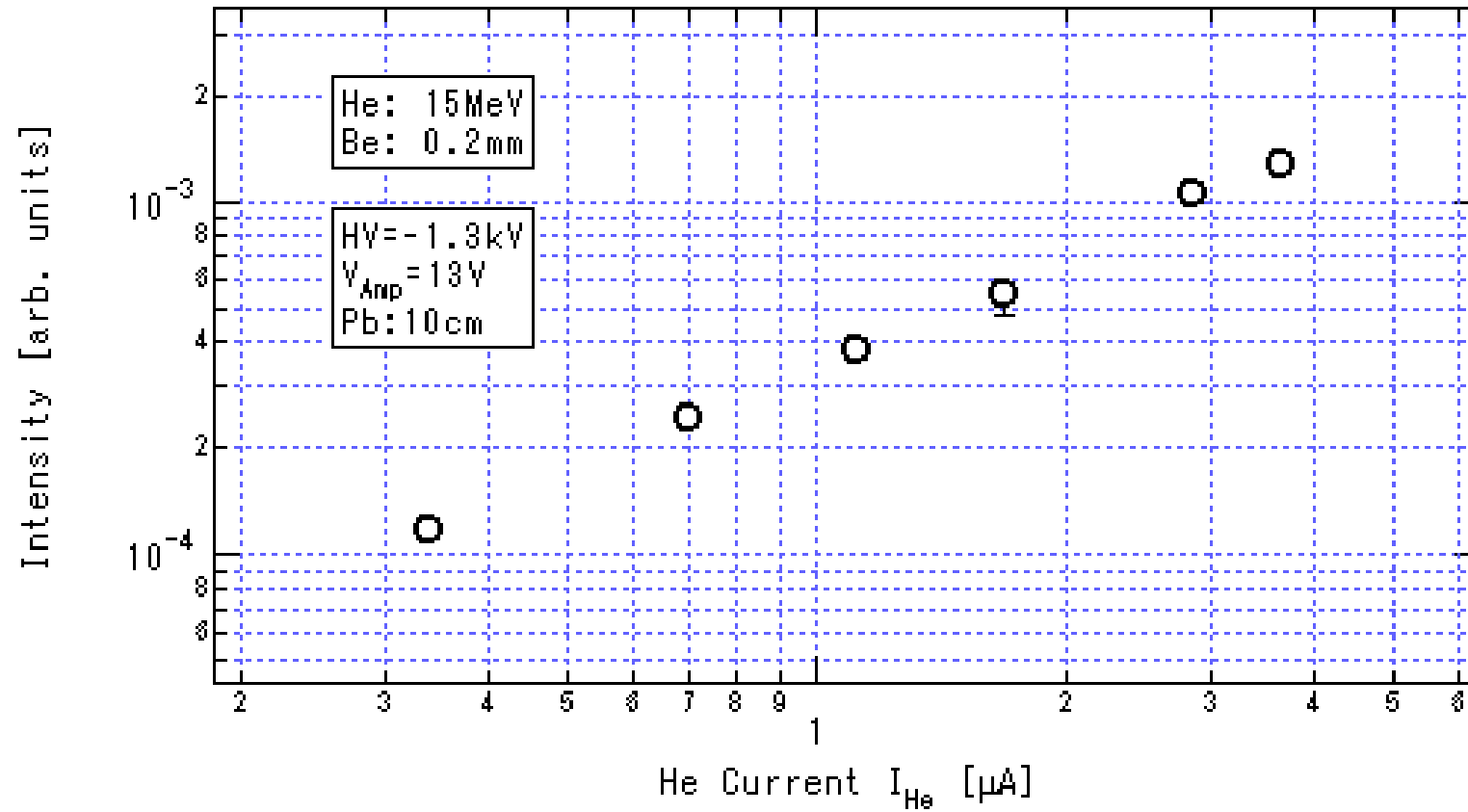


図 3.3.2-8 放射線強度の He イオン電流値  $I_{\text{He}}$  依存性

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 10cm, HV=-1.3 kV,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

表 3.3.2-2 0.2mm 厚のベリリウムへ 15MeV ヘリウム照射による

検出器応答評価実験条件 ( Pb\_5cm )

Data number	$E_{\text{He}}$ [MeV]	$I_{\text{He}}$ [ $\mu\text{A}$ ]	Pb width [cm]	HV [kV]	$V_{\text{Amp}}$ [V]
No2.2.07-1_145249	15	3.612	5	-1.3	13
No2.2.07-2_145348	15	3.612	5	-1.3	13
No2.2.07-3_145442	15	3.612	5	-1.3	13
No2.2.08-1_145626	15	2.774	5	-1.3	13
No2.2.08-2_145718	15	2.774	5	-1.3	13
No2.2.08-3_145835	15	2.774	5	-1.3	13
No2.2.09-1_150028	15	1.547	5	-1.3	13
No2.2.09-2_150125	15	1.547	5	-1.3	13
No2.2.09-3_150254	15	1.547	5	-1.3	13
No2.2.10-1_150423	15	1.014	5	-1.3	13
No2.2.10-2_150521	15	1.014	5	-1.3	13
No2.2.10-3_150615	15	1.014	5	-1.3	13
No2.2.11-1_150801	15	0.516	5	-1.3	13
No2.2.11-2_150914	15	0.516	5	-1.3	13
No2.2.11-3_151010	15	0.516	5	-1.3	13
No2.2.12-1_151136	15	0.220	5	-1.3	13
No2.2.12-2_151236	15	0.220	5	-1.3	13
No2.2.12-3_151336	15	0.220	5	-1.3	13

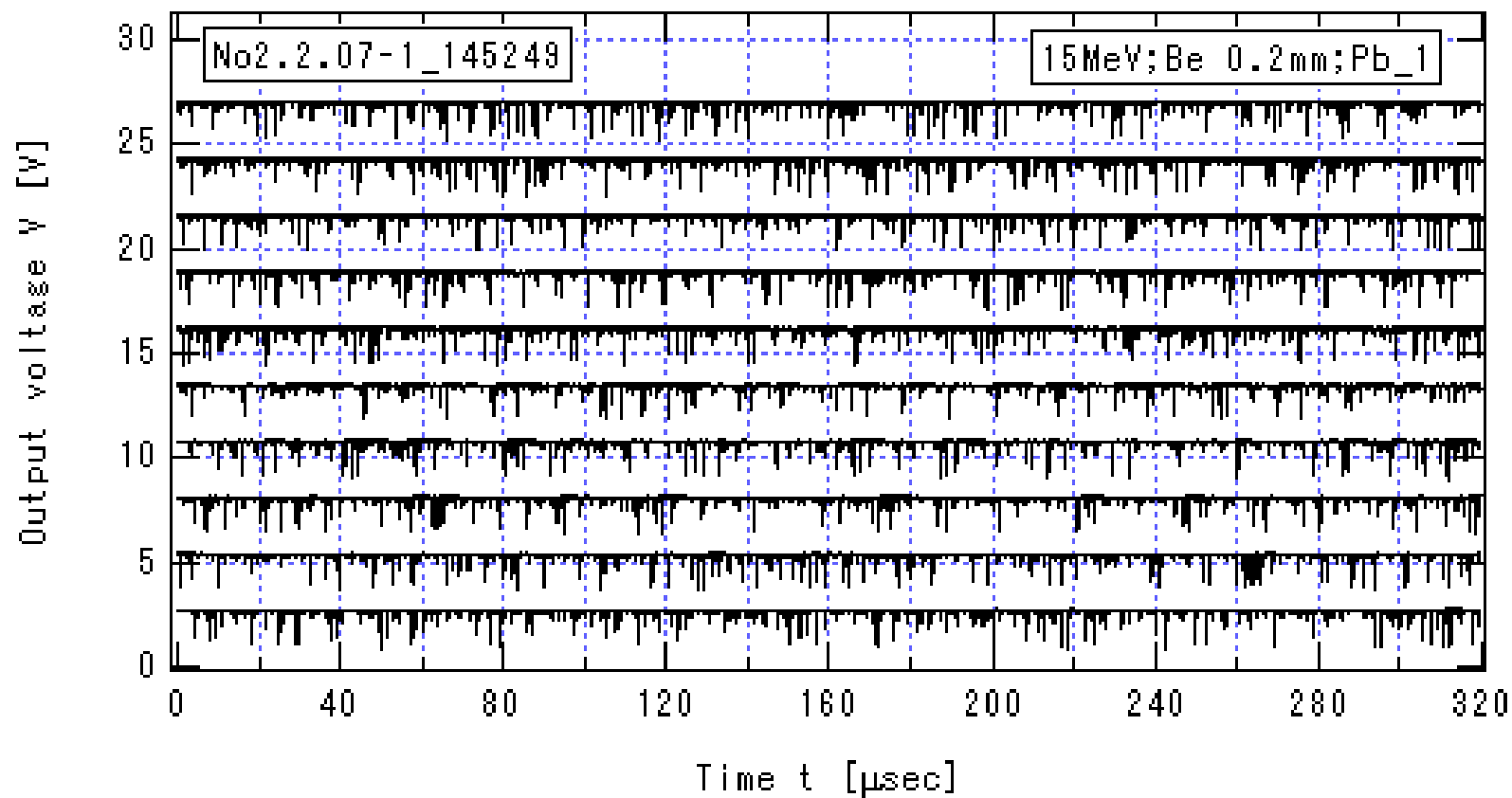


図 3.3.2-9\_1a  $I_{\text{He}}=3.612\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 5cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$



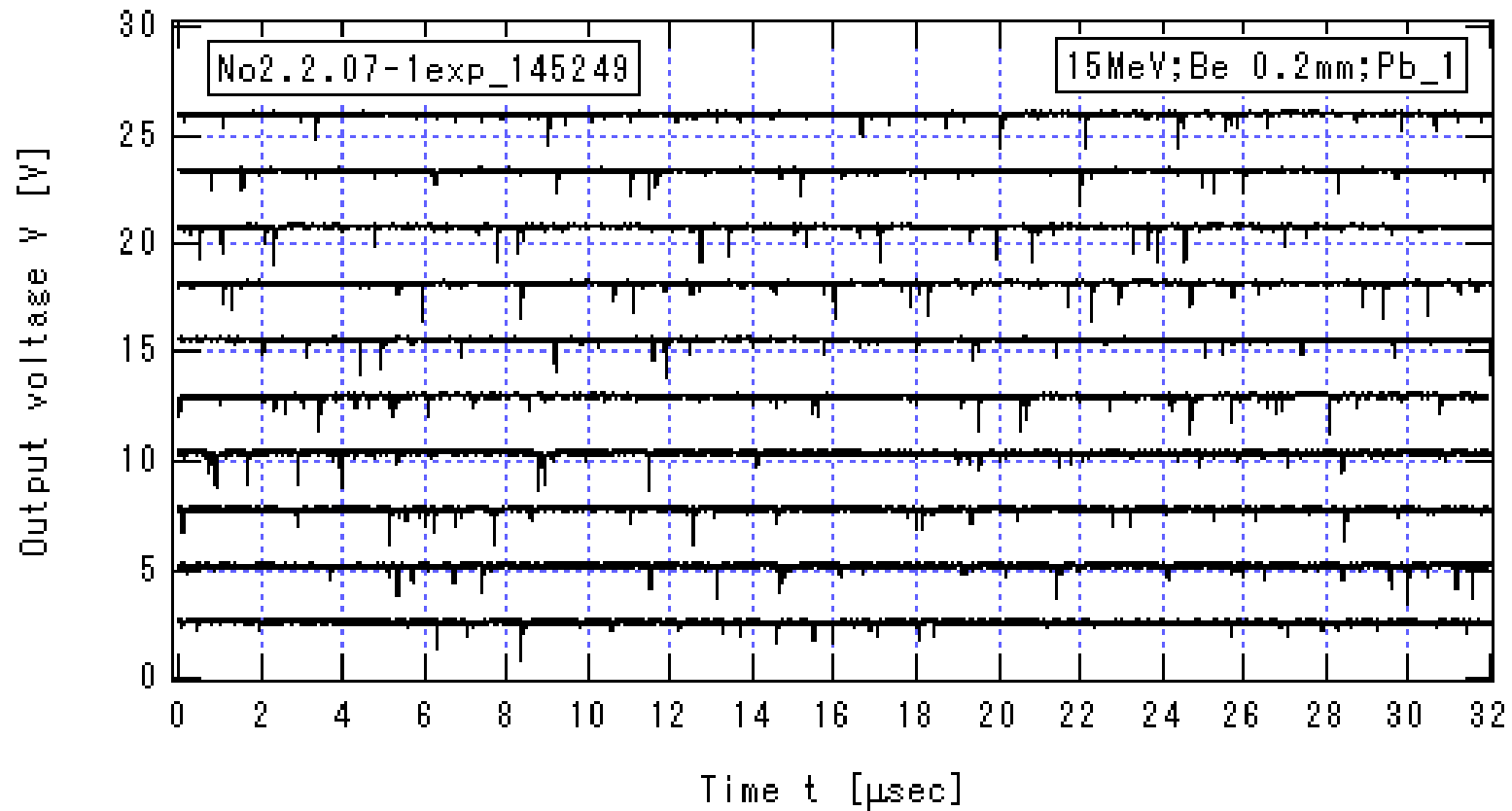


図 3.3.2-9\_1b  $I_{He}=3.612\mu A$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1b)

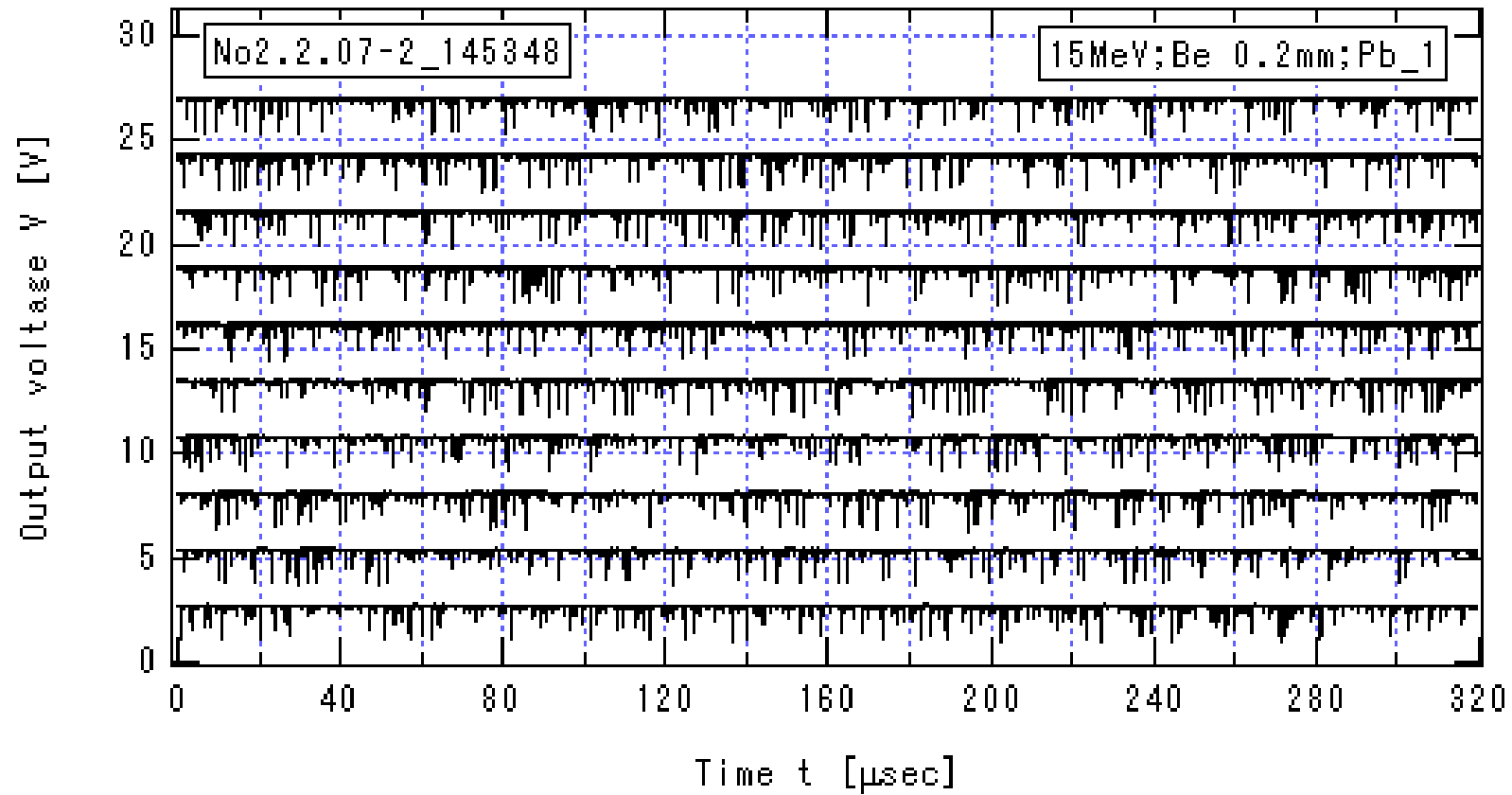


図 3.3.2-9\_2a  $I_{\text{He}}=3.612\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 5cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

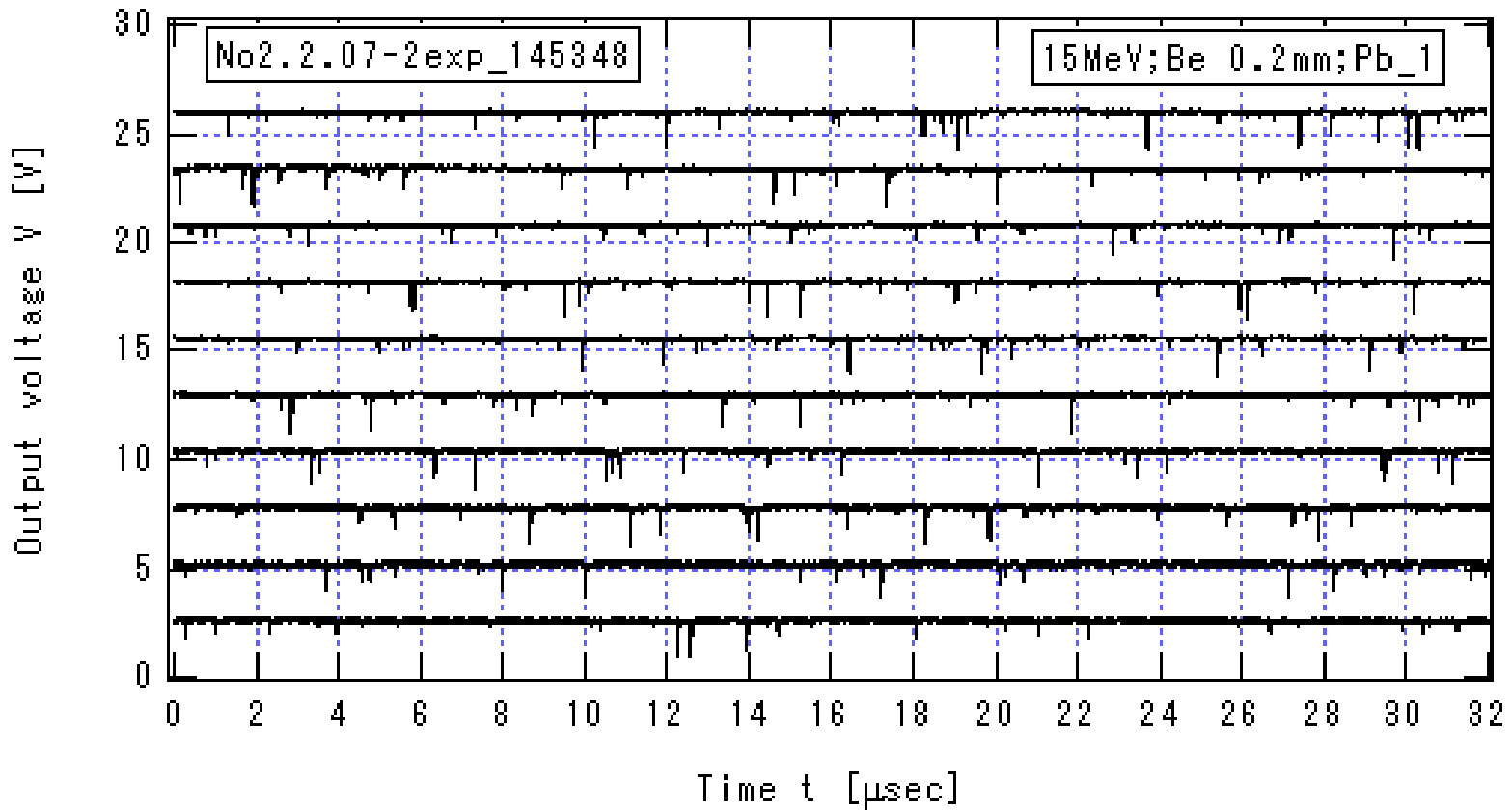


図 3.3.2-9\_2b  $I_{\text{He}}=3.612\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2b)

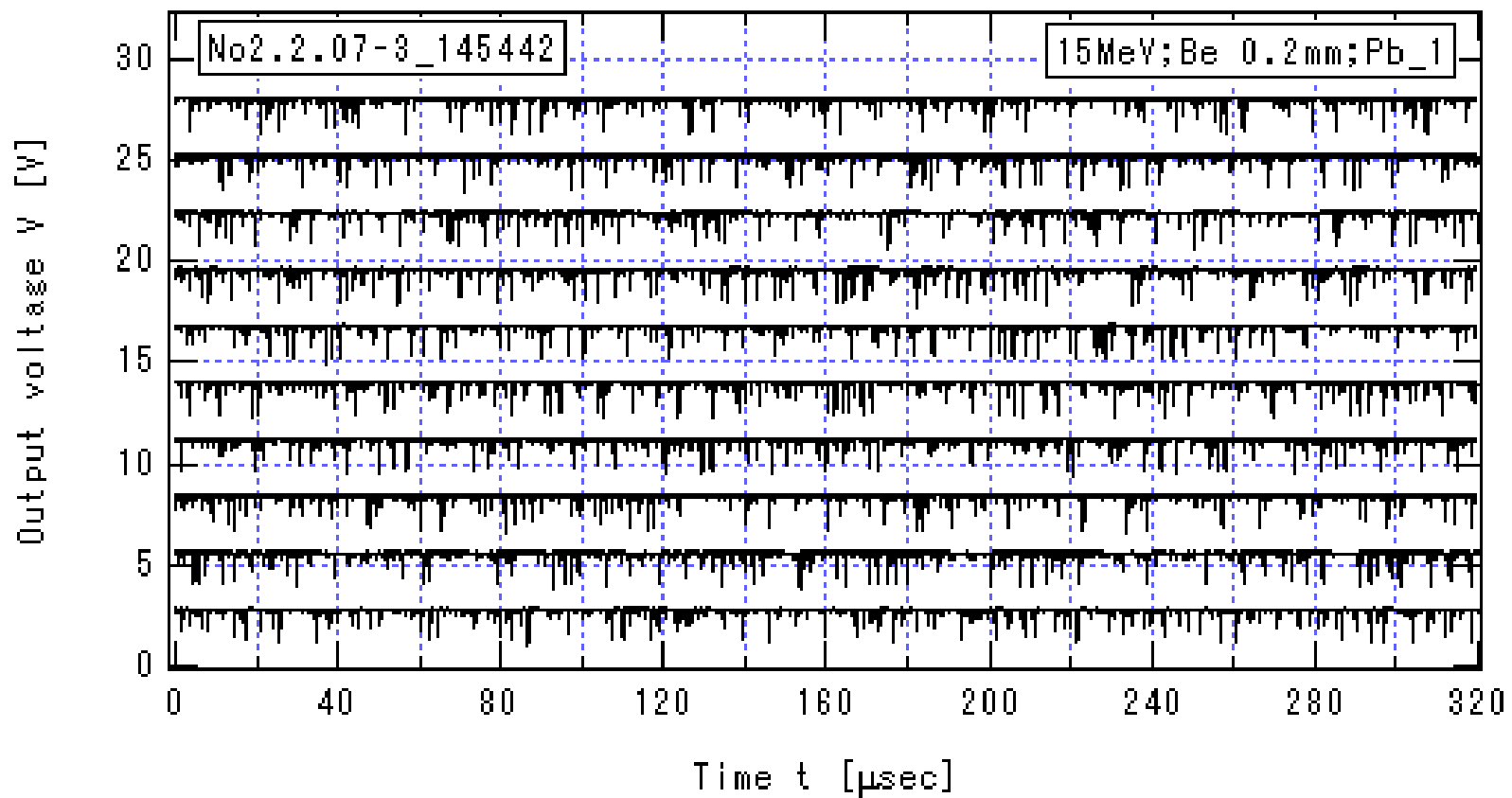


図 3.3.2-9\_3a  $I_{\text{He}}=3.612\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 5cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

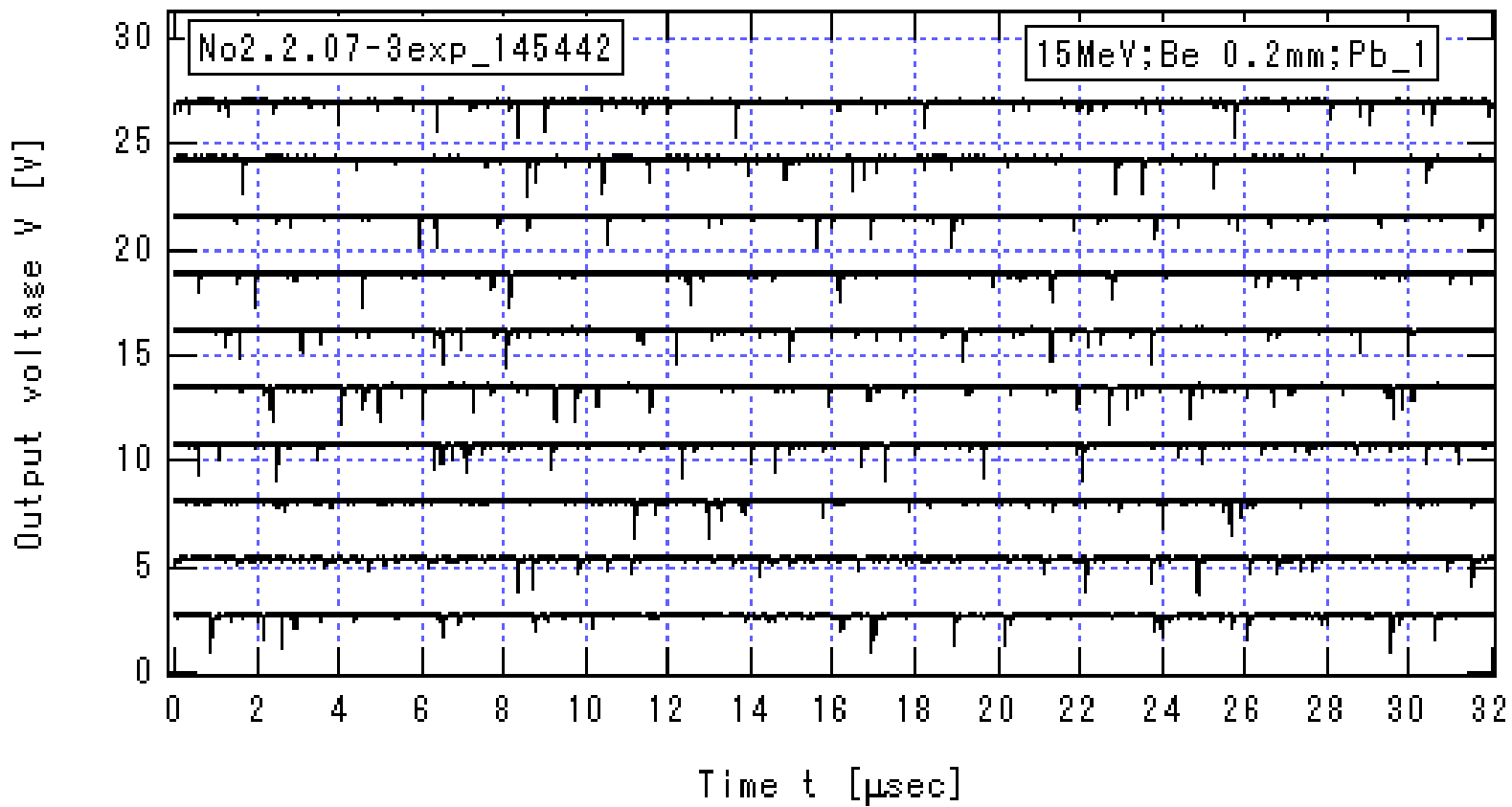


図 3.3.2-9\_3b  $I_{He}=3.612\mu A$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3b)

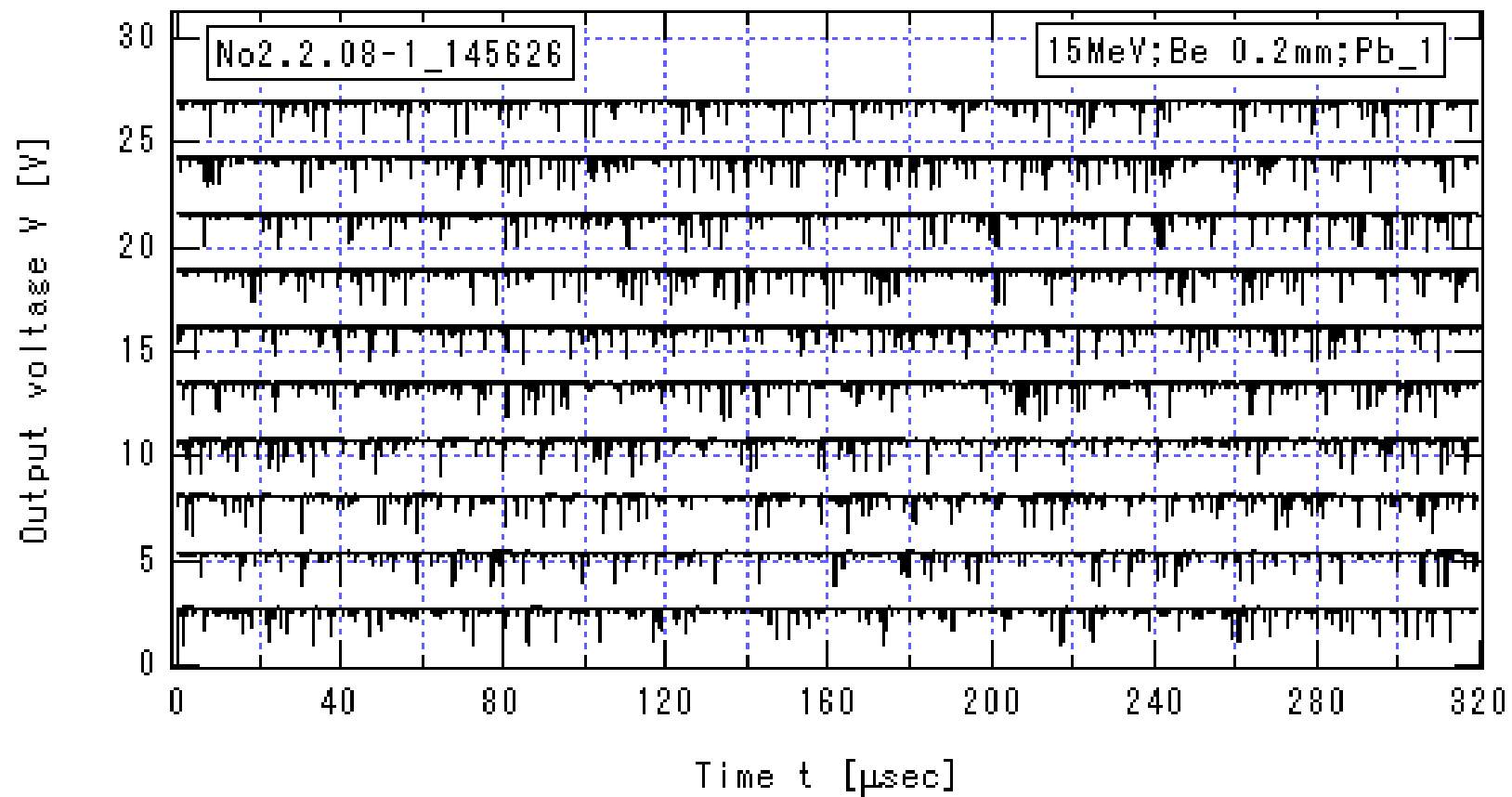


図 3.3.2-10\_1a  $I_{\text{He}}=2.774\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 5cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

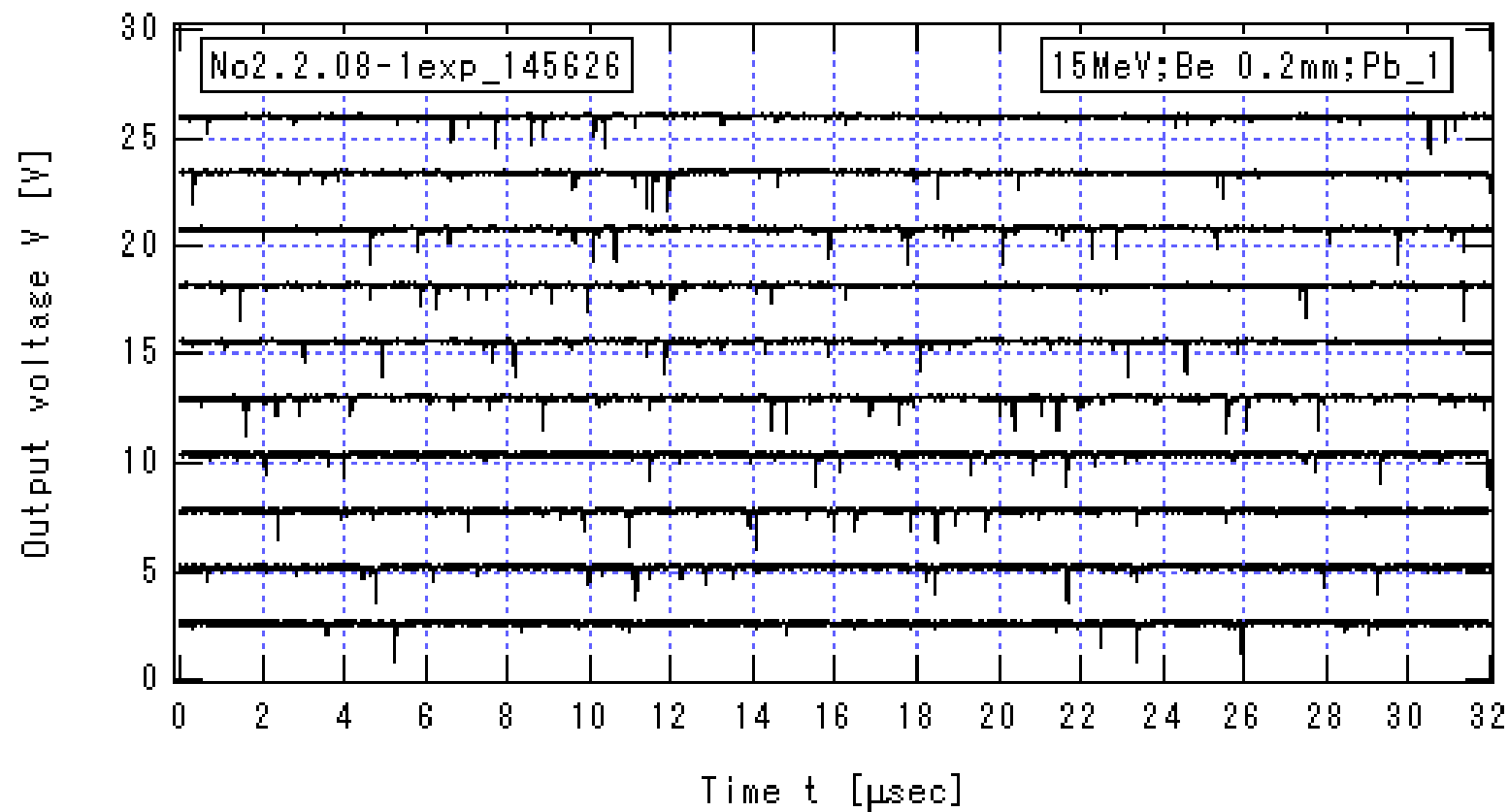


図 3.3.2-10\_1b  $I_{He}=2.774\mu A$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1b)

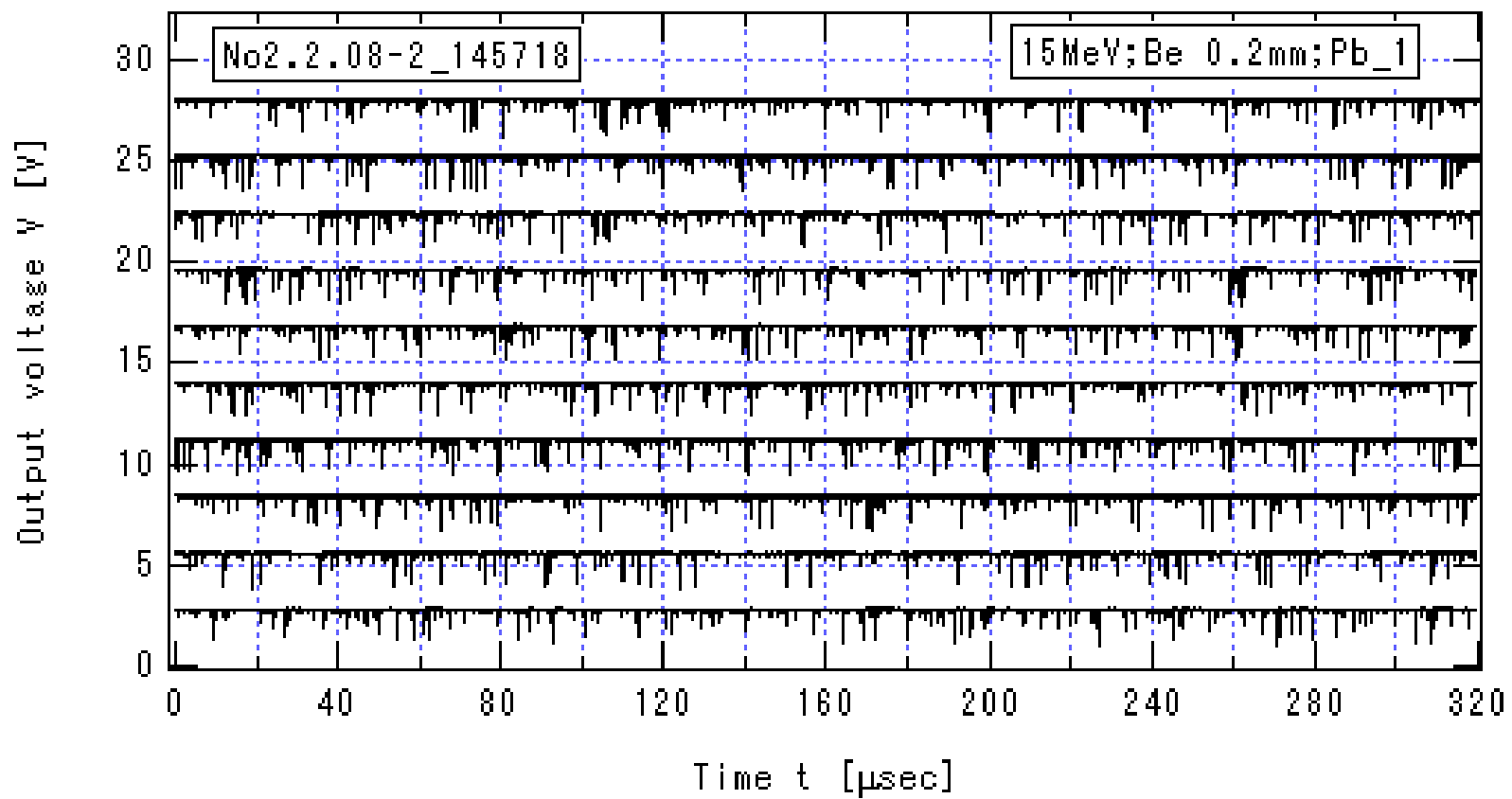


図 3.3.2-10\_2a  $I_{\text{He}}=2.774\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 5cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$



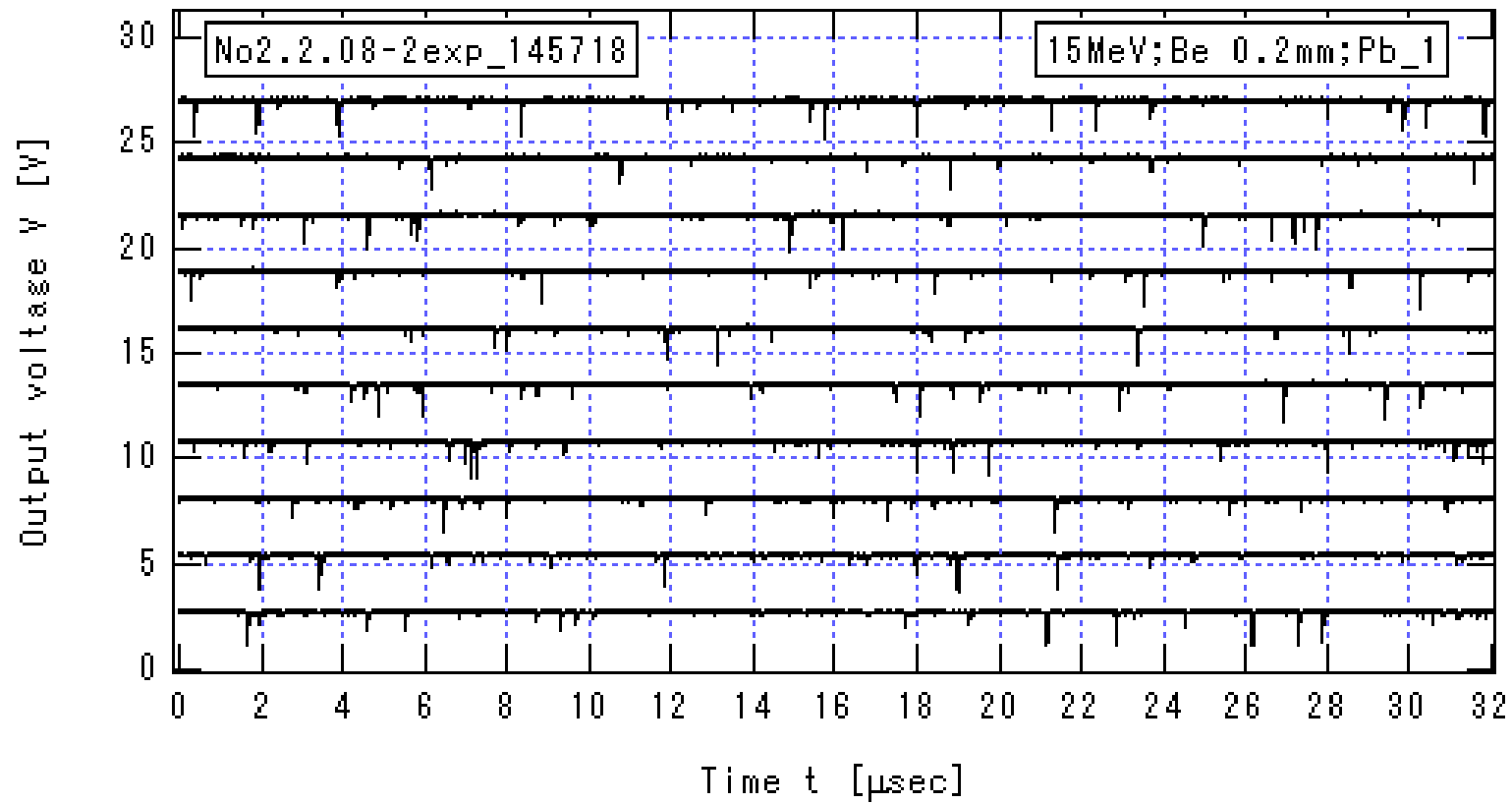


図 3.3.2-10\_2b  $I_{\text{He}}=2.774\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2b)

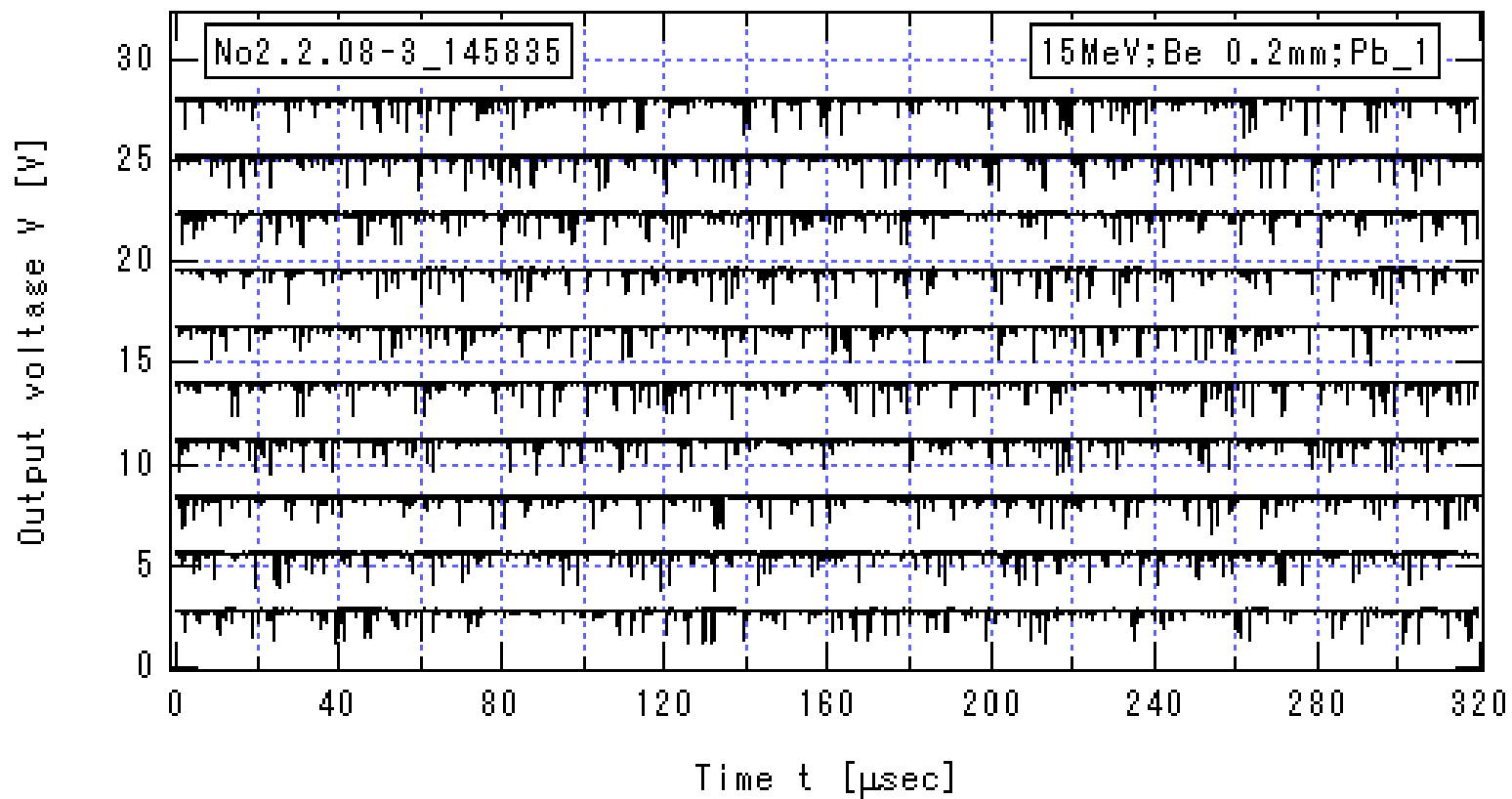


図 3.3.2-10\_3a  $I_{\text{He}}=2.774\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 5cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

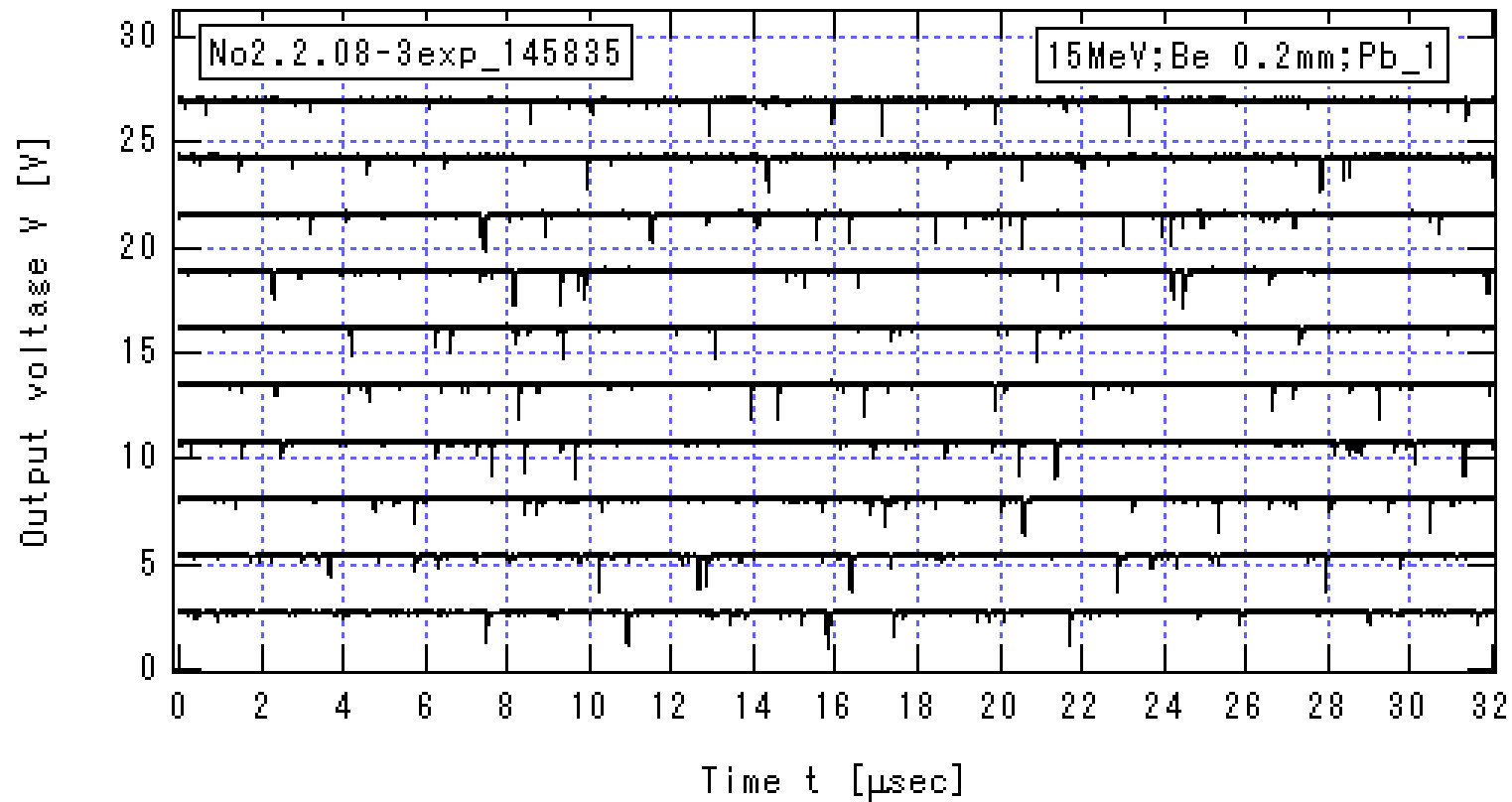


図 3.3.2-10\_3b  $I_{\text{He}}=2.774\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3b)

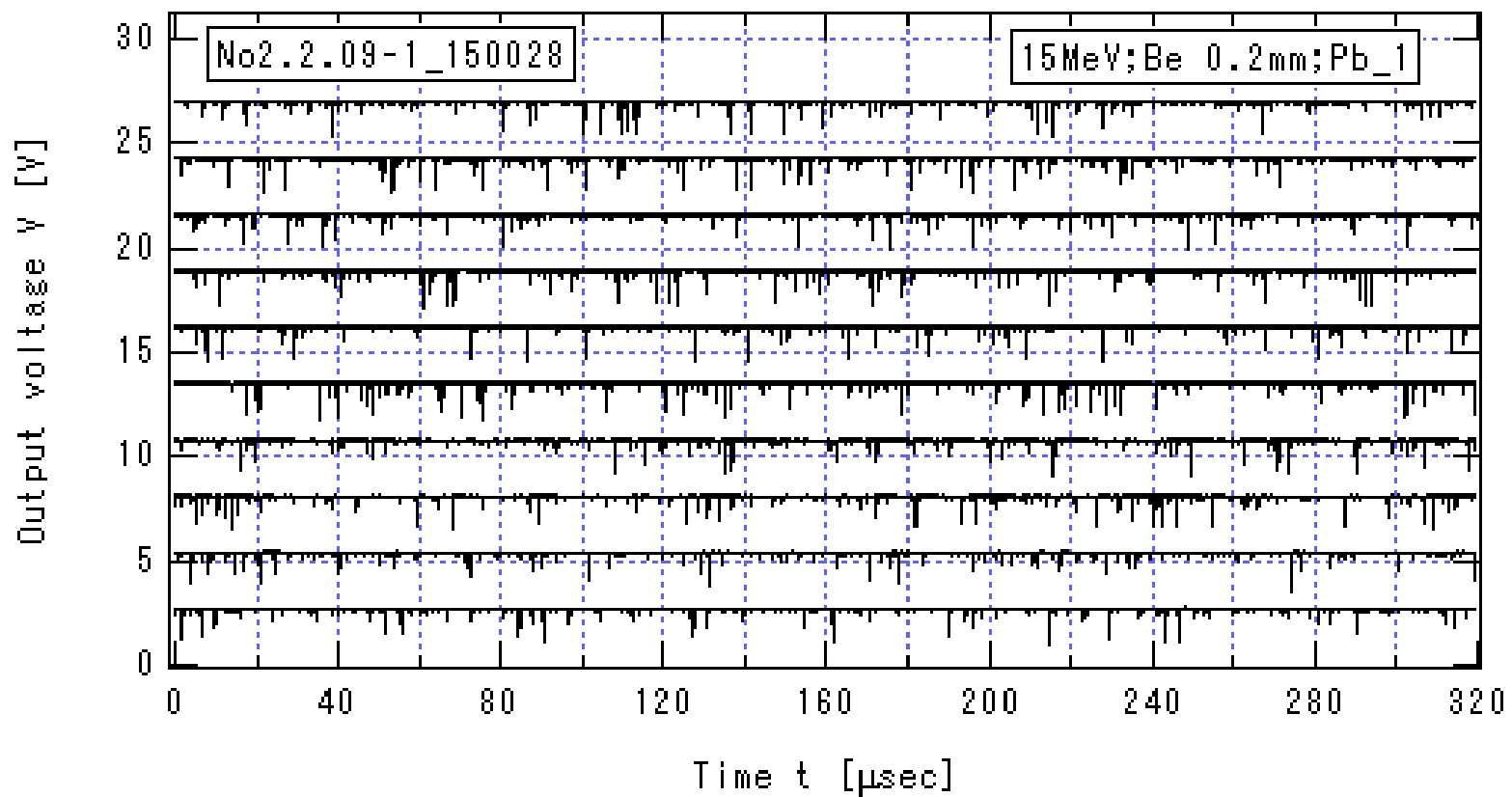


図 3.3.2-11\_1a  $I_{\text{He}}=1.547\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 5cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

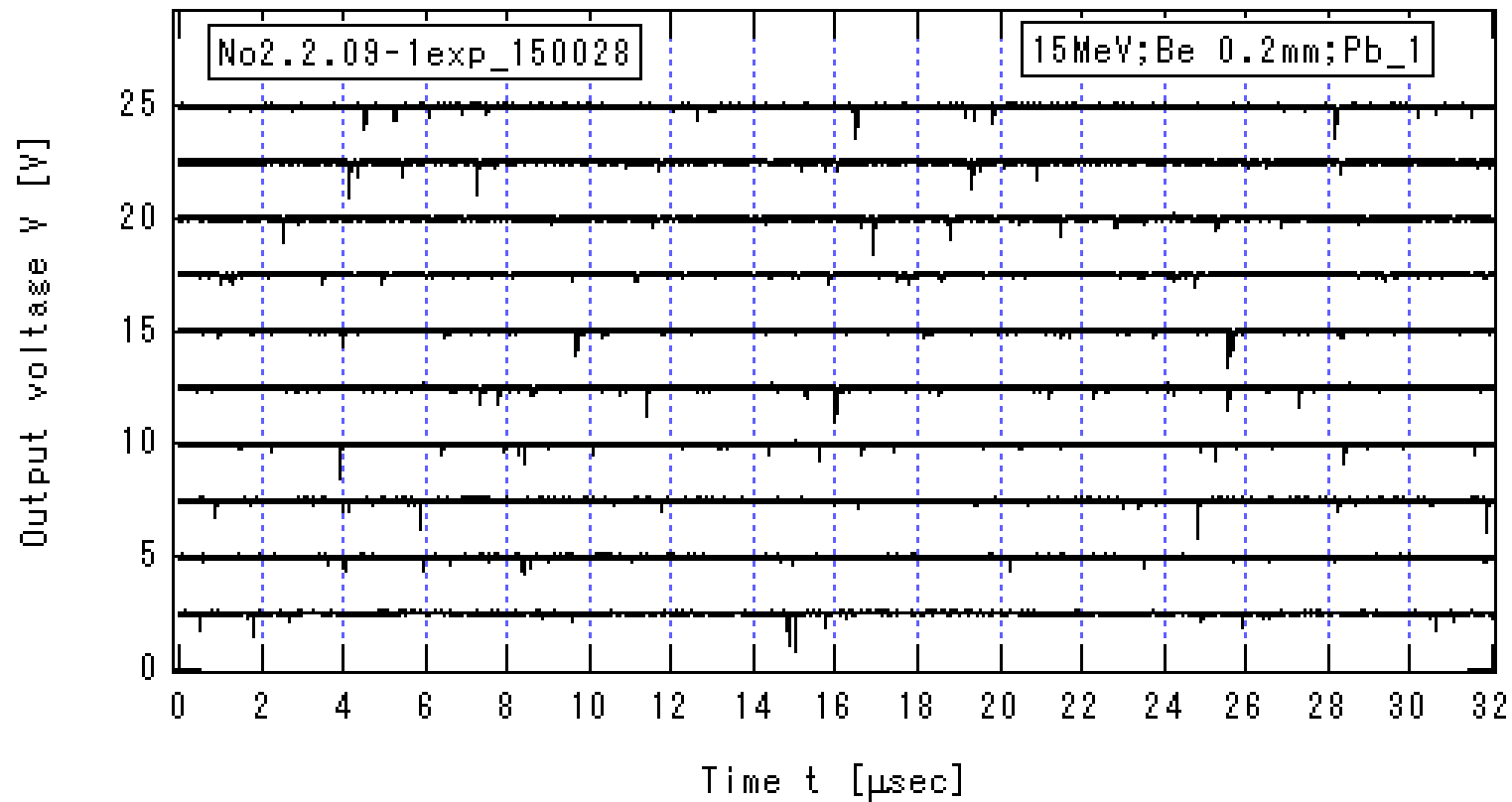


図 3.3.2-11\_1b  $I_{He}=1.547\mu A$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1b)

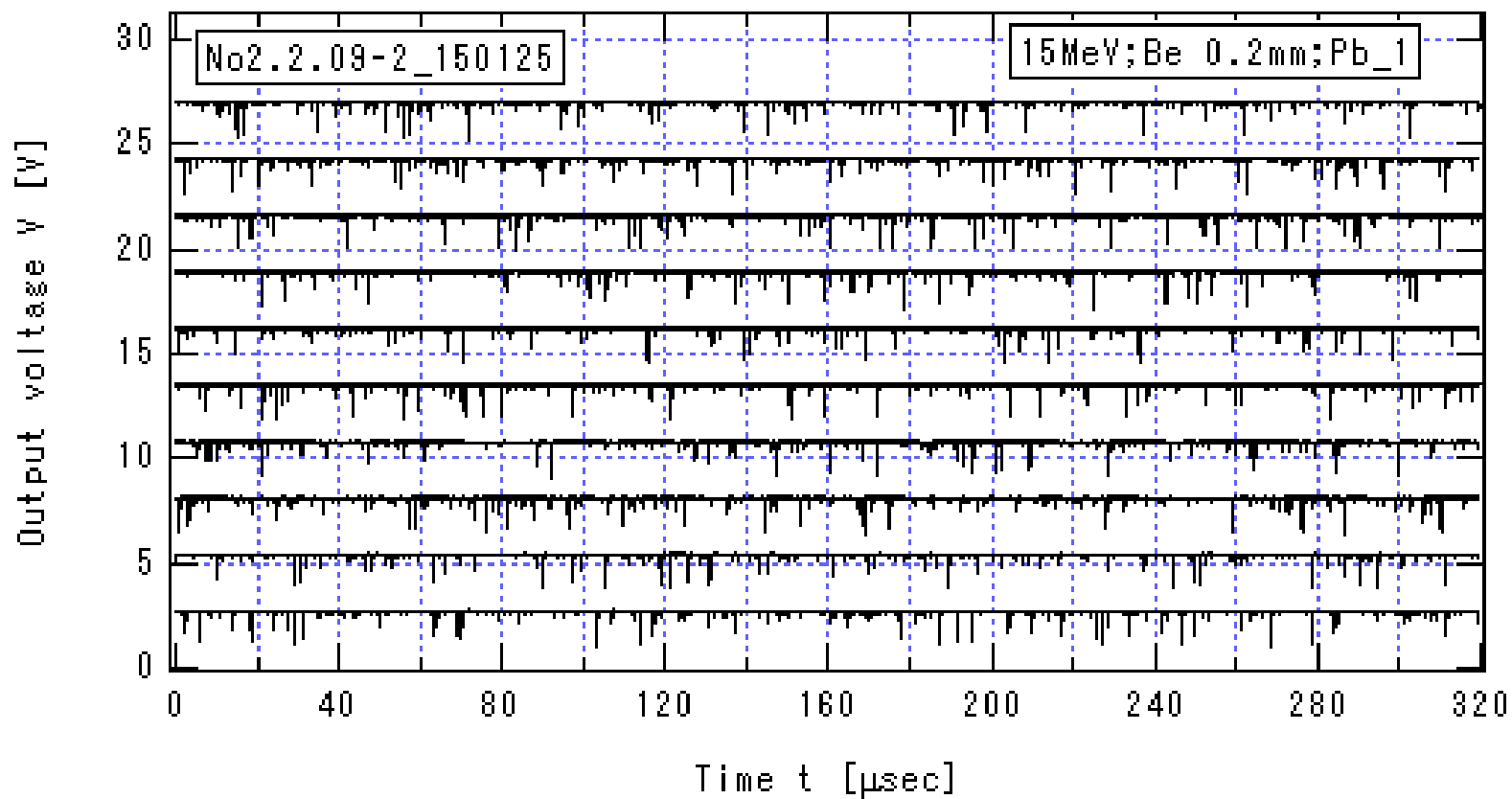


図 3.3.2-11\_2a  $I_{\text{He}}=1.547\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 5cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

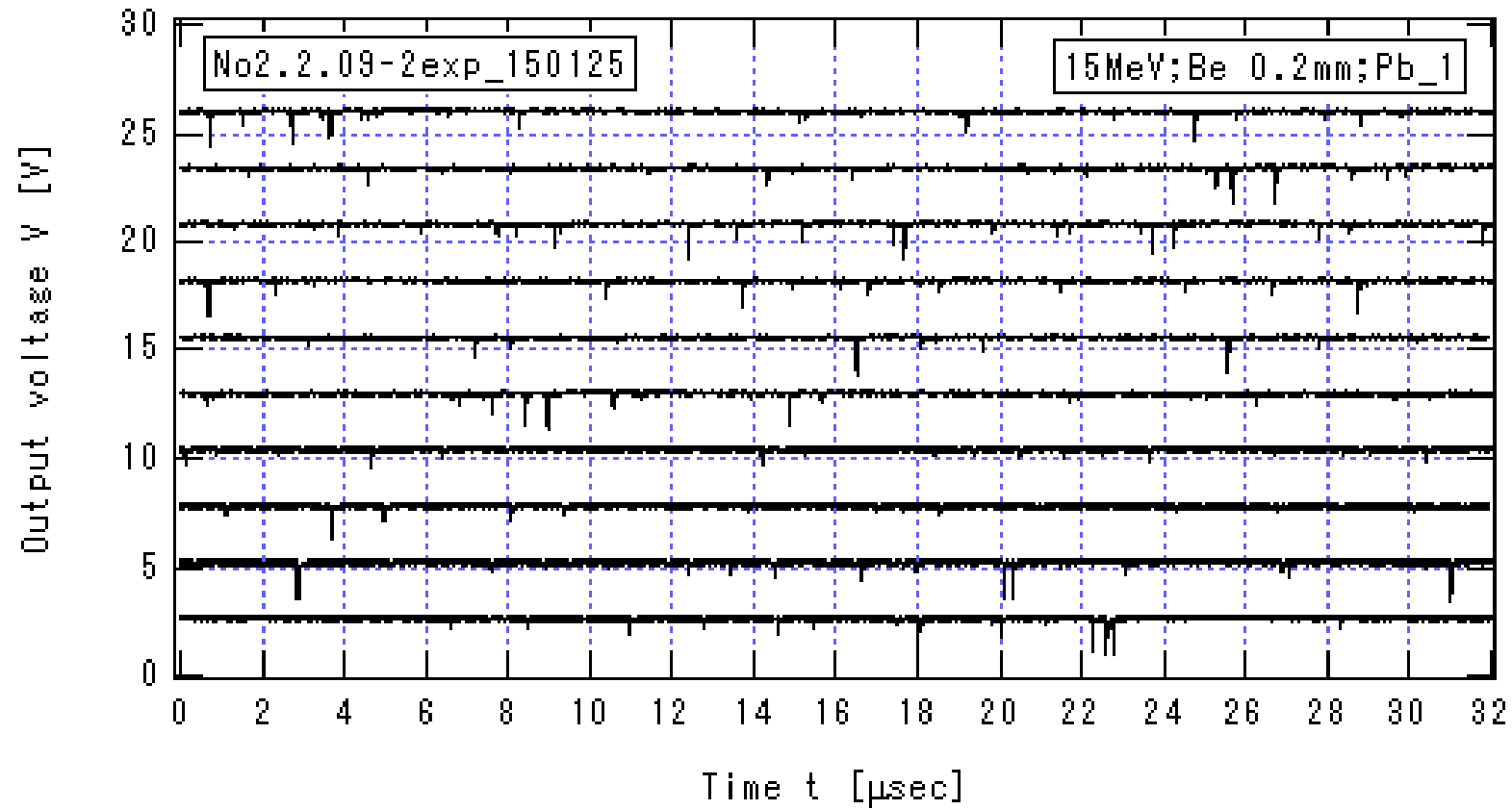


図 3.3.2-11\_2b  $I_{He}=1.547\mu A$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2b)

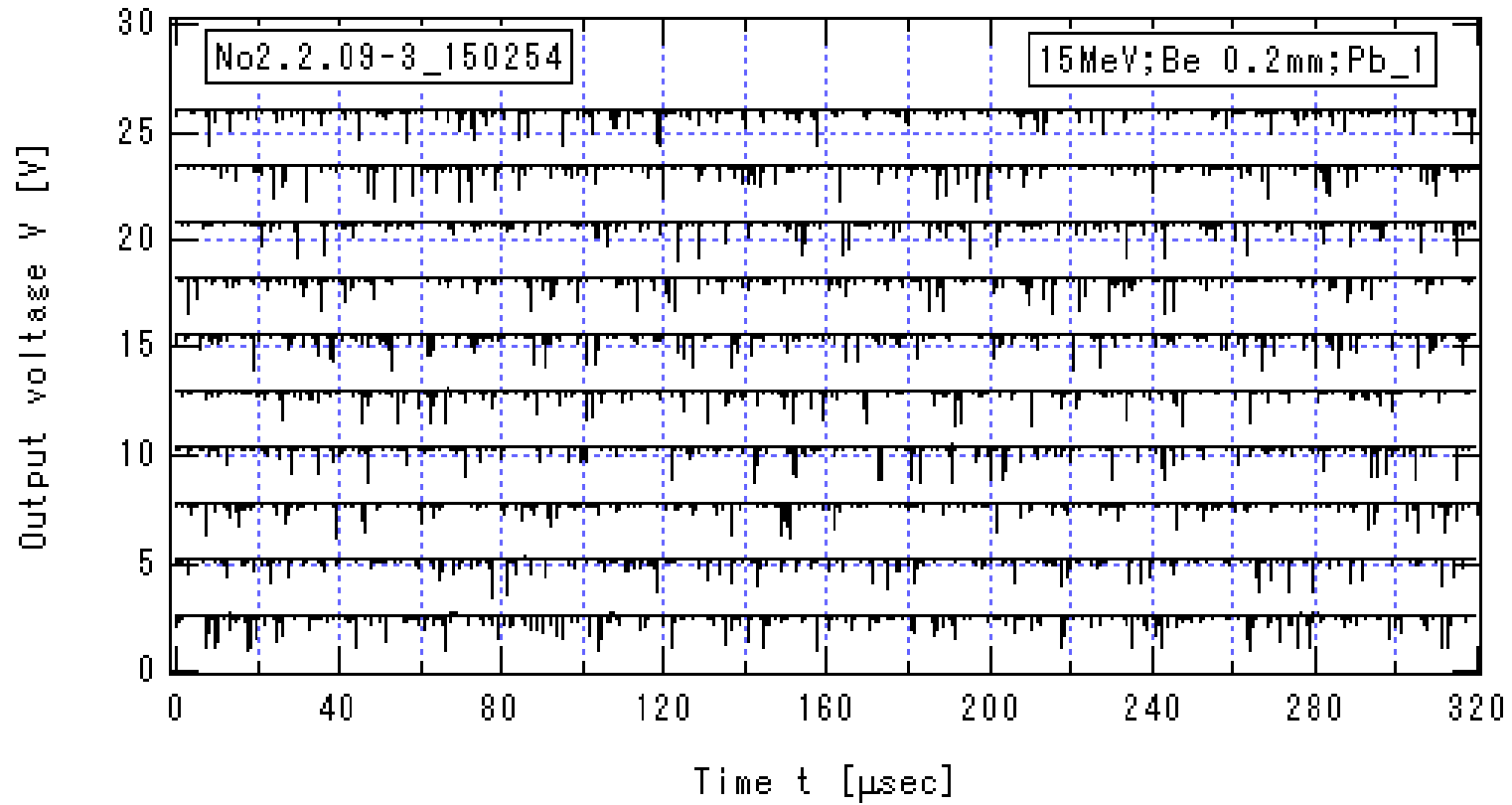


図 3.3.2-11\_3a  $I_{\text{He}}=1.547\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 5cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$



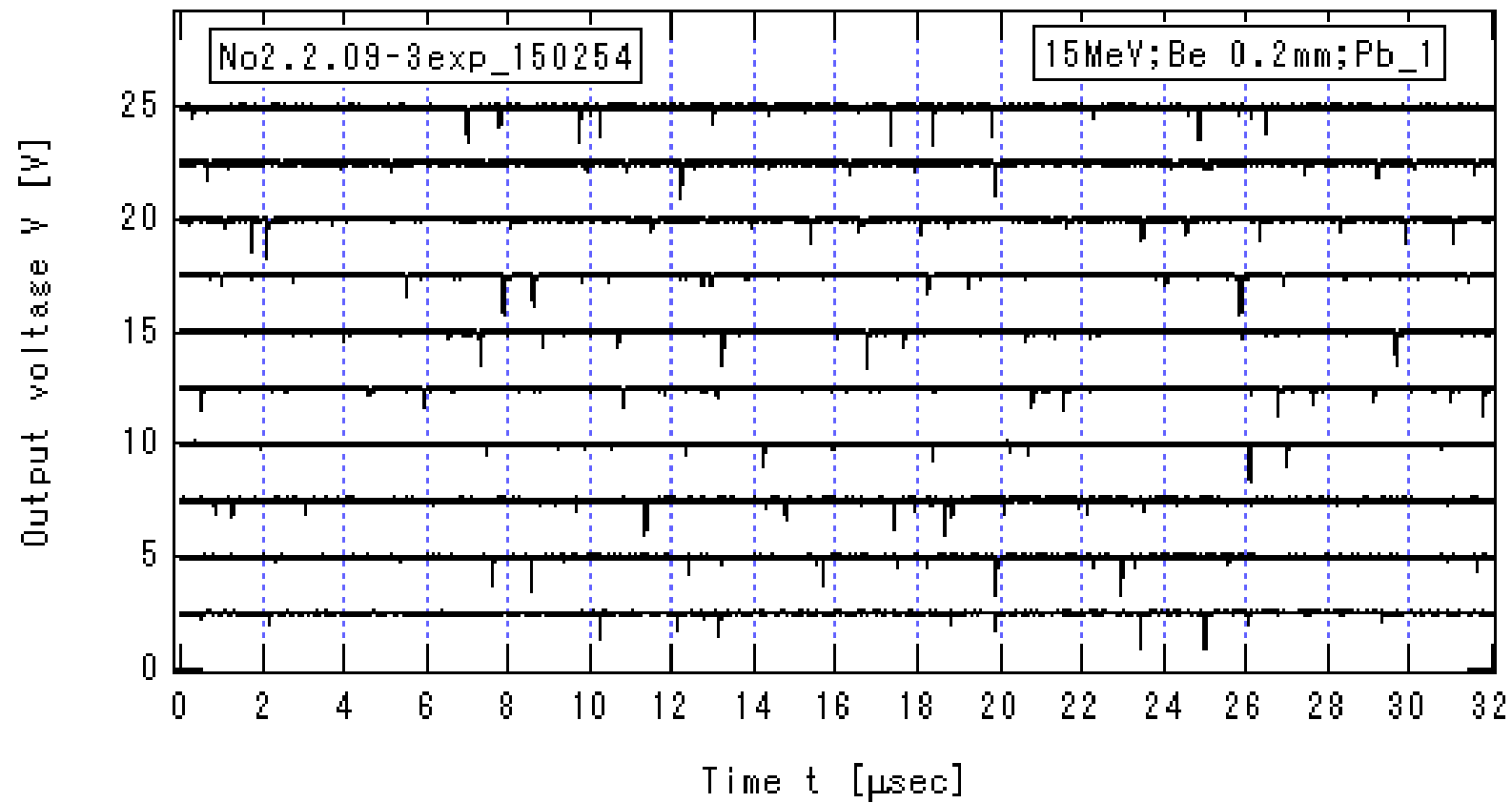


図 3.3.2-11\_3b  $I_{\text{He}}=1.547\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3b)

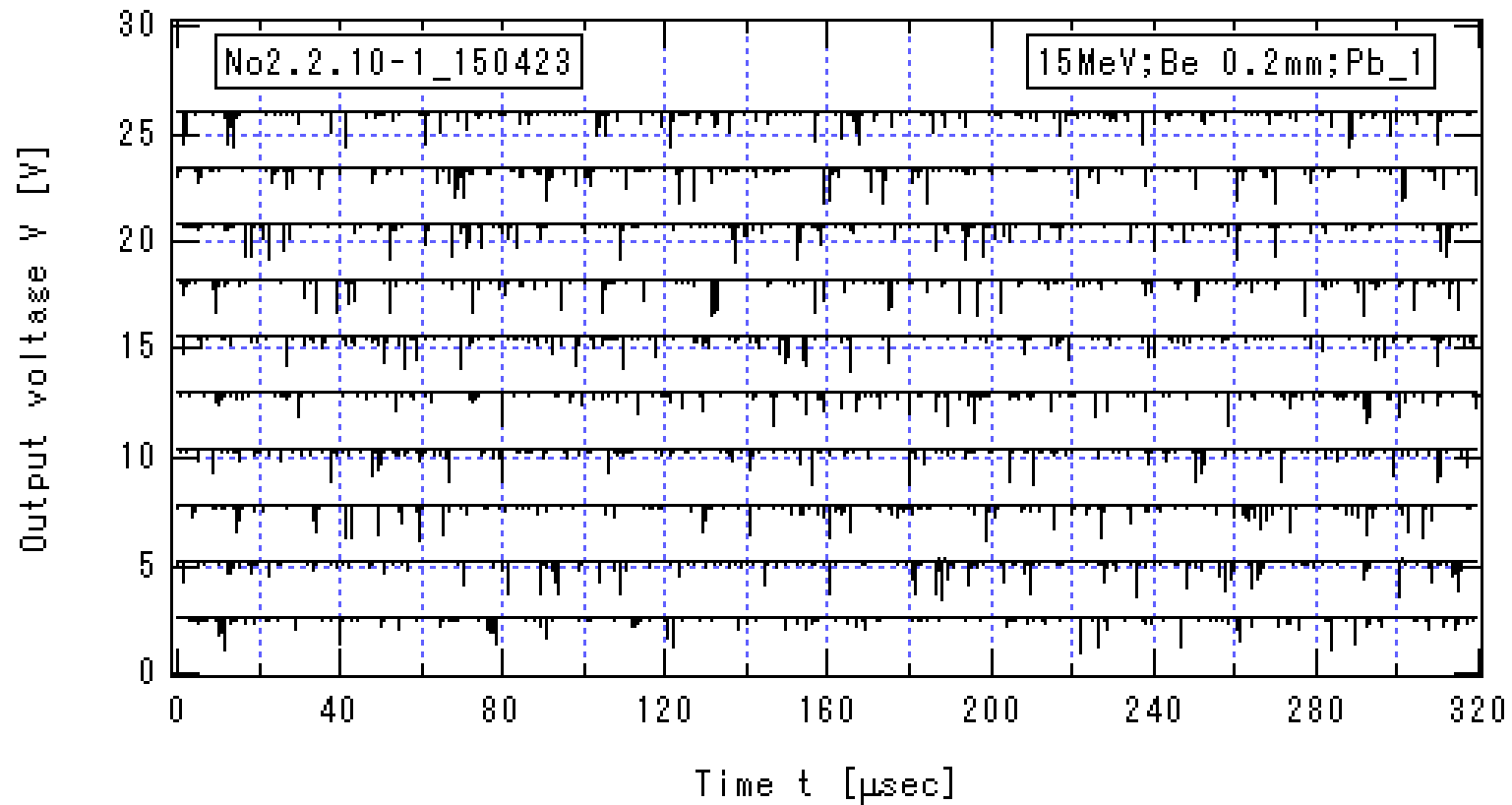


図 3.3.2-12\_1a  $I_{\text{He}}=1.014\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 5cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

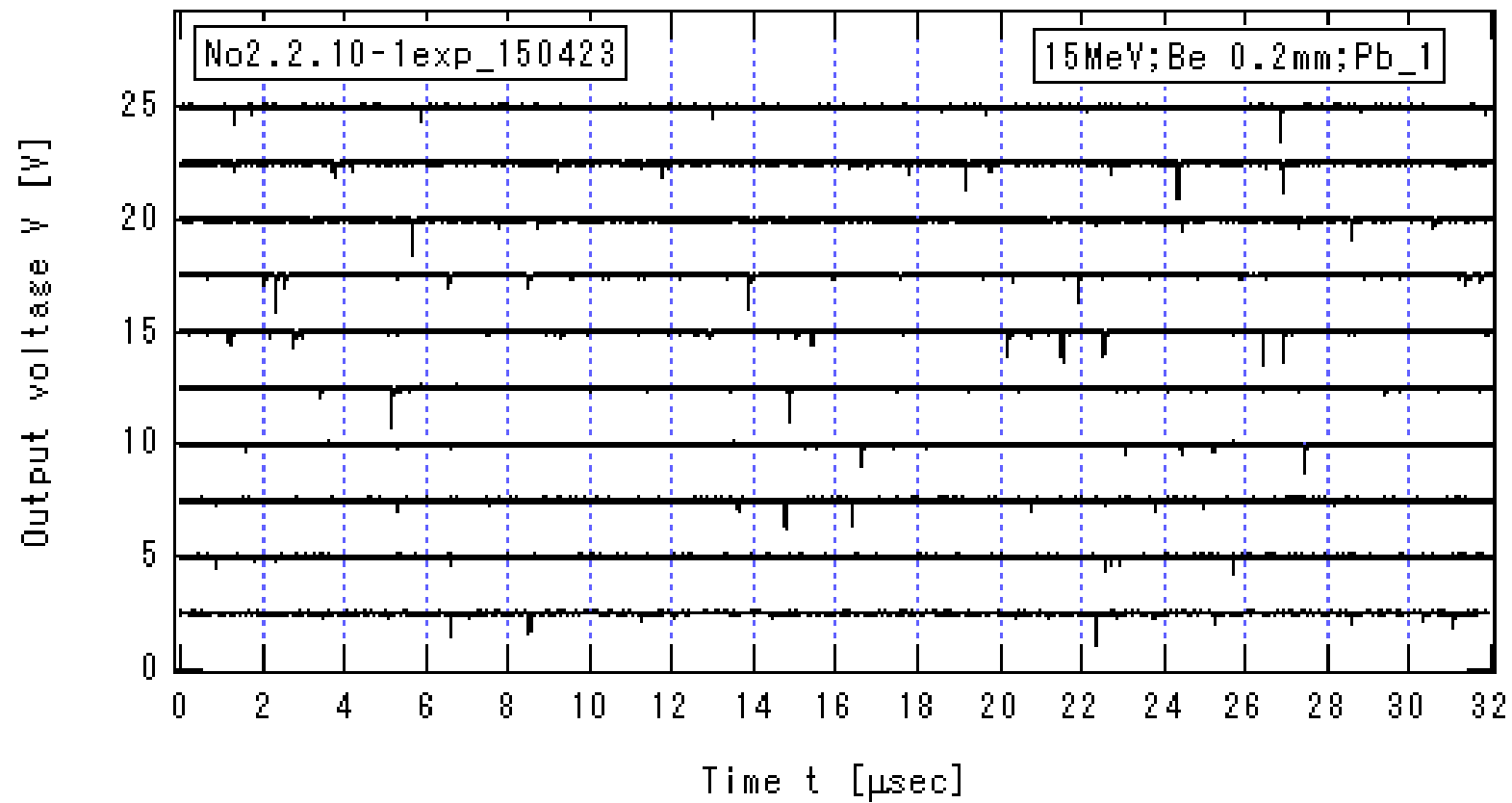


図 3.3.2-12\_1b  $I_{\text{He}}=1.014\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1b)

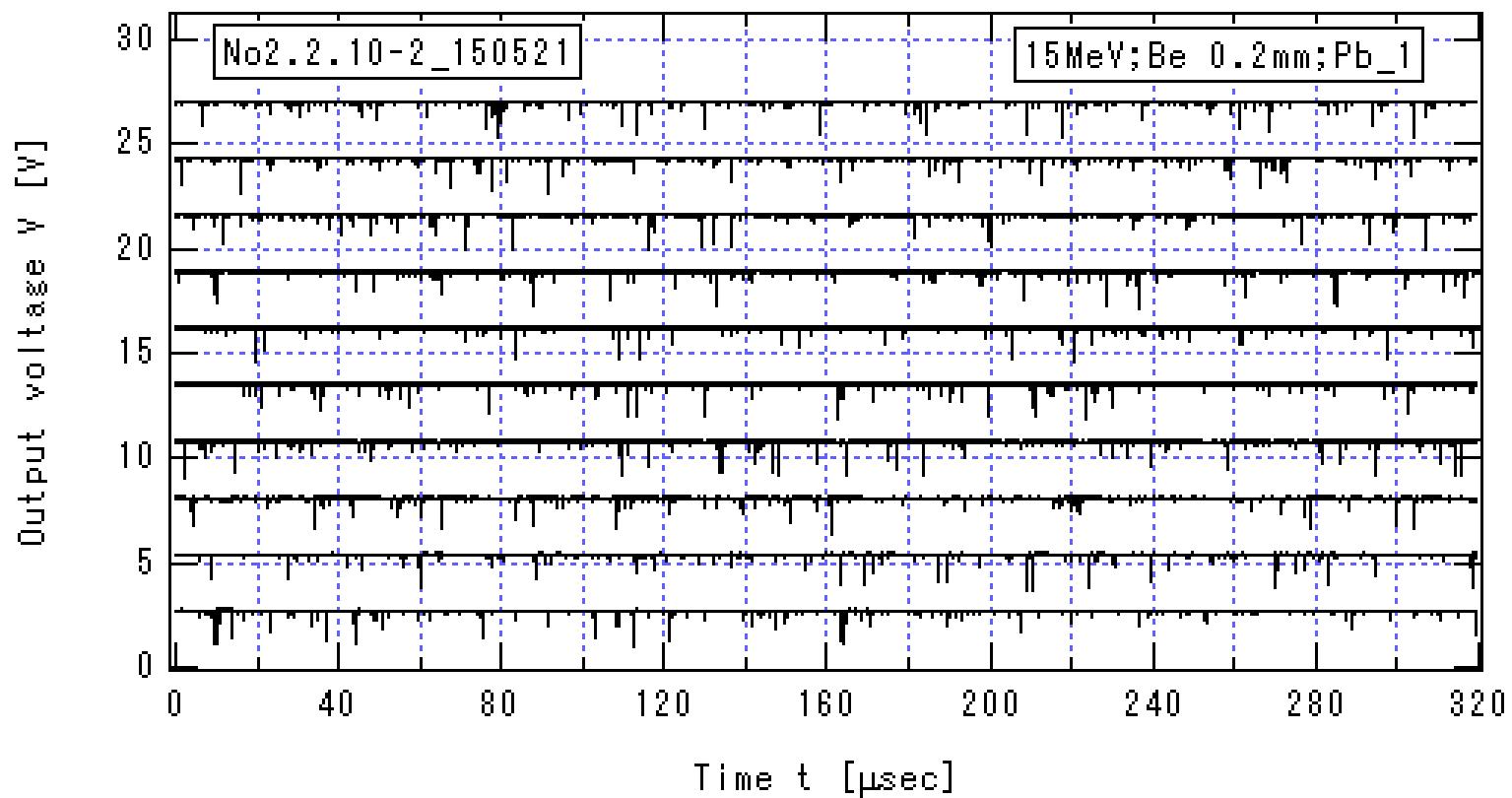


図 3.3.2-12\_2a  $I_{\text{He}}=1.014\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 5cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

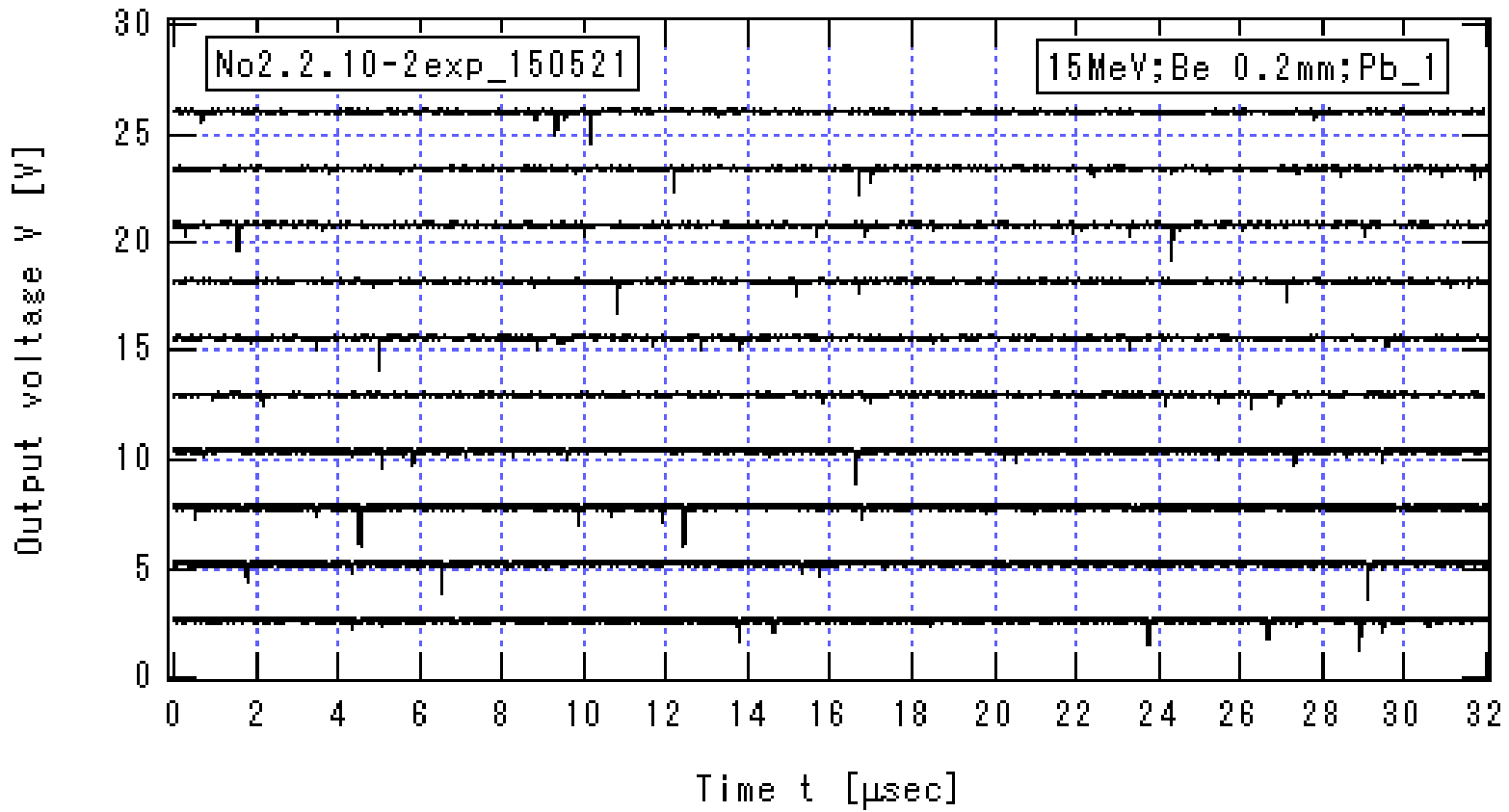


図 3.3.2-12\_2b  $I_{\text{He}}=1.014\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2b)

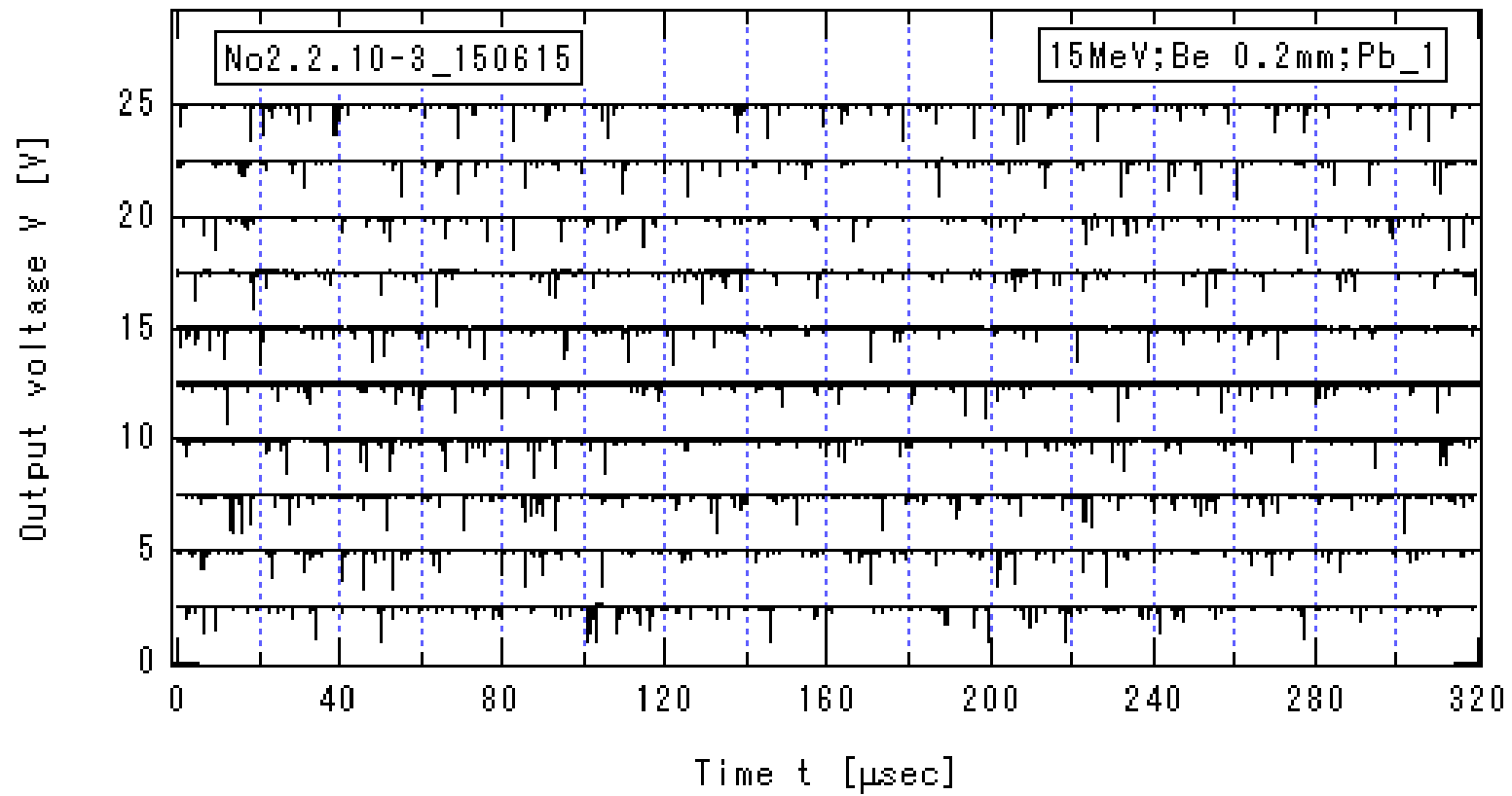


図 3.3.2-12\_3a  $I_{\text{He}}=1.014\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 5cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

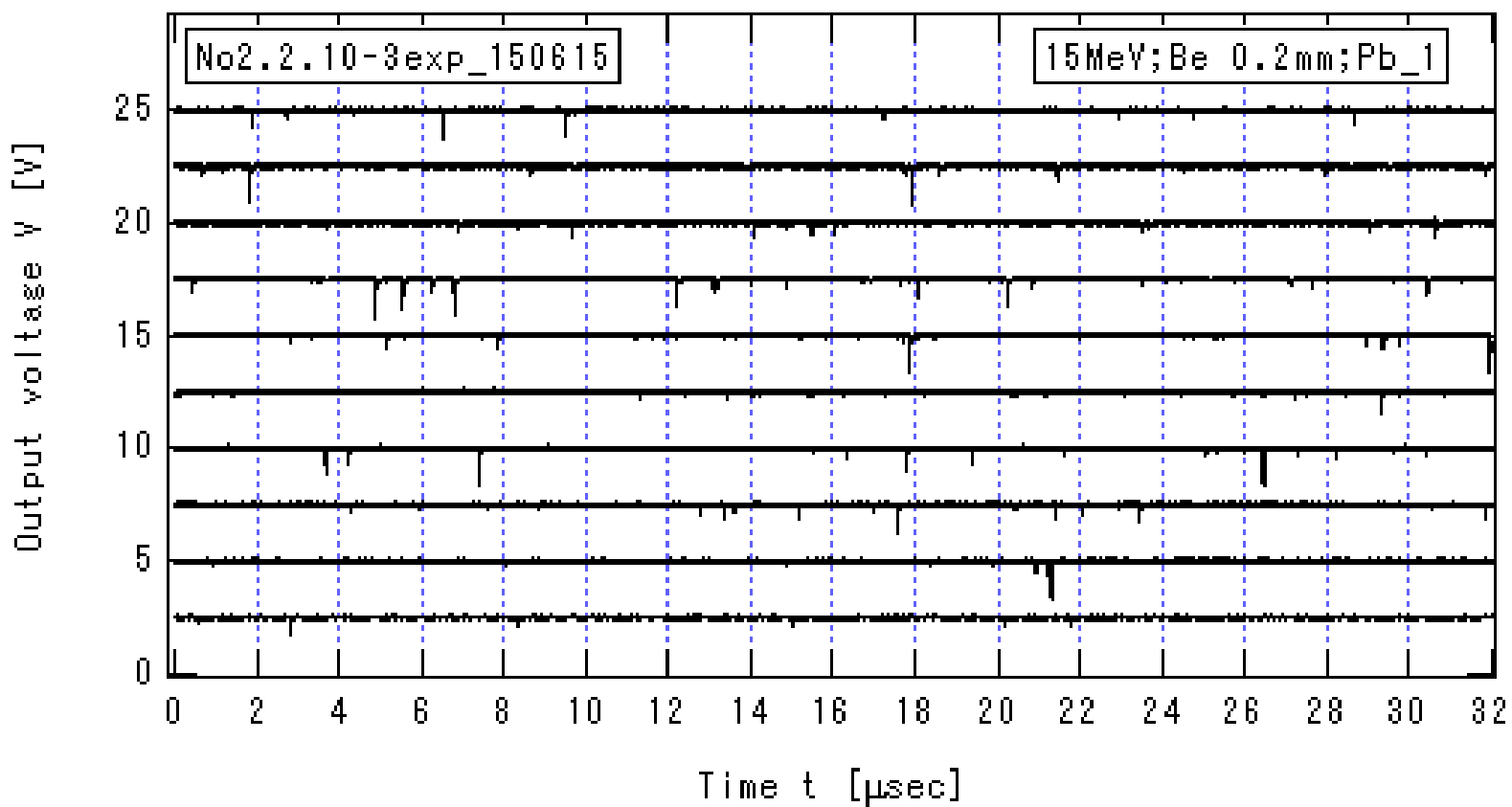


図 3.3.2-12\_3b  $I_{He}=1.014\mu A$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3b)

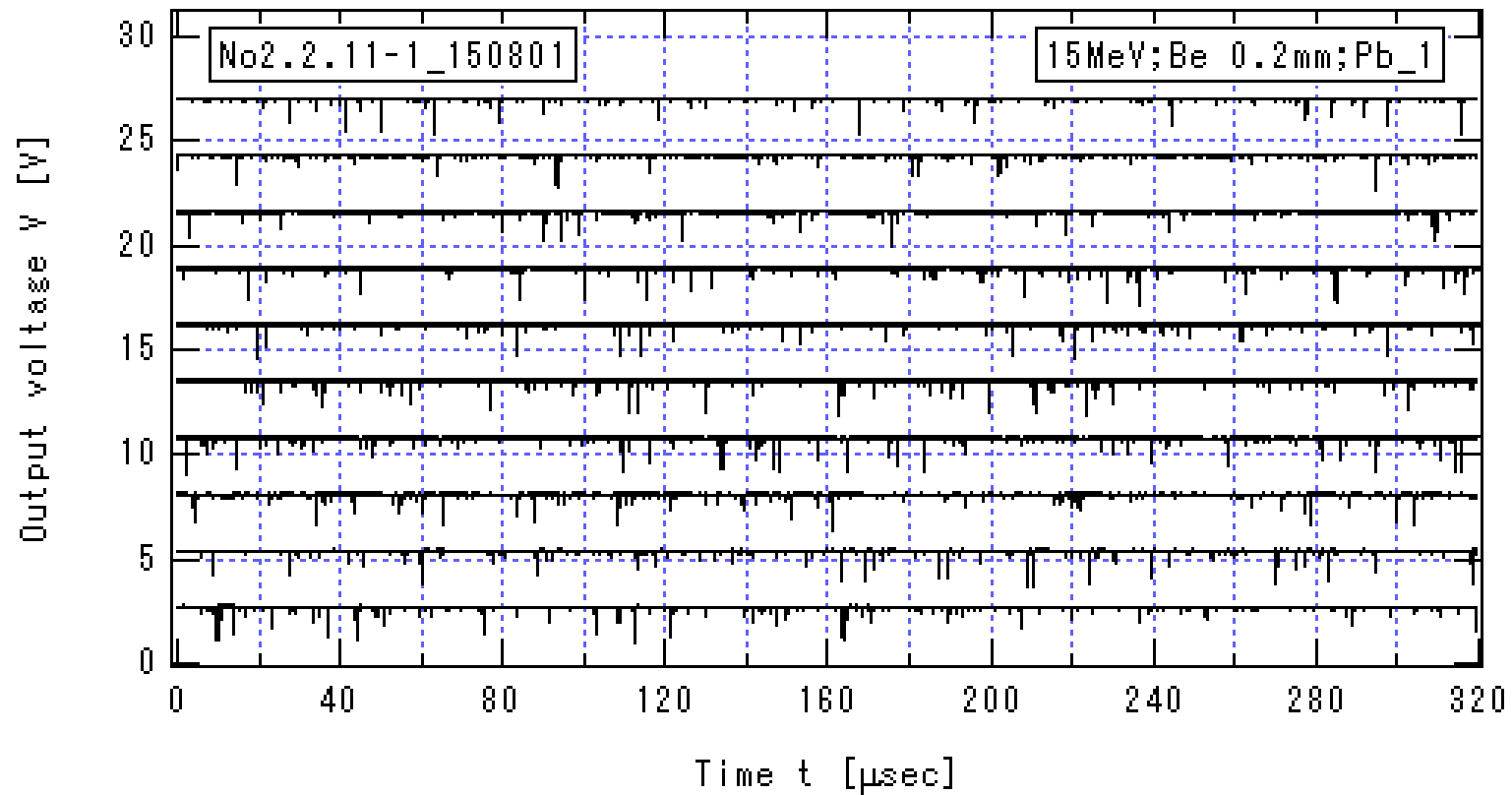


図 3.3.2-13\_1a  $I_{\text{He}}=0.516\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 5cm, HV=-1.3 kV,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$



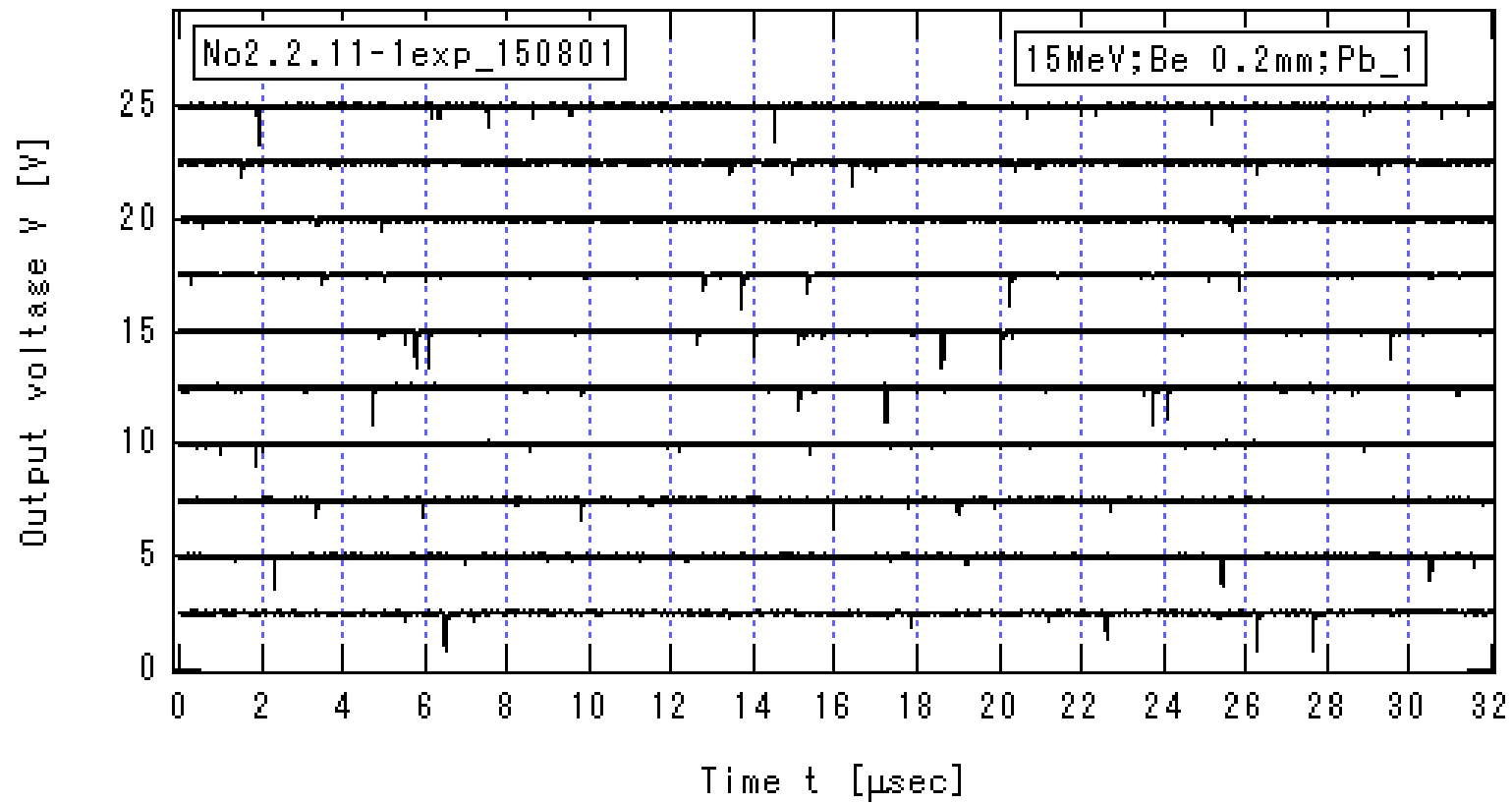


図 3.3.2-13\_1b  $I_{\text{He}}=0.516\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1b)

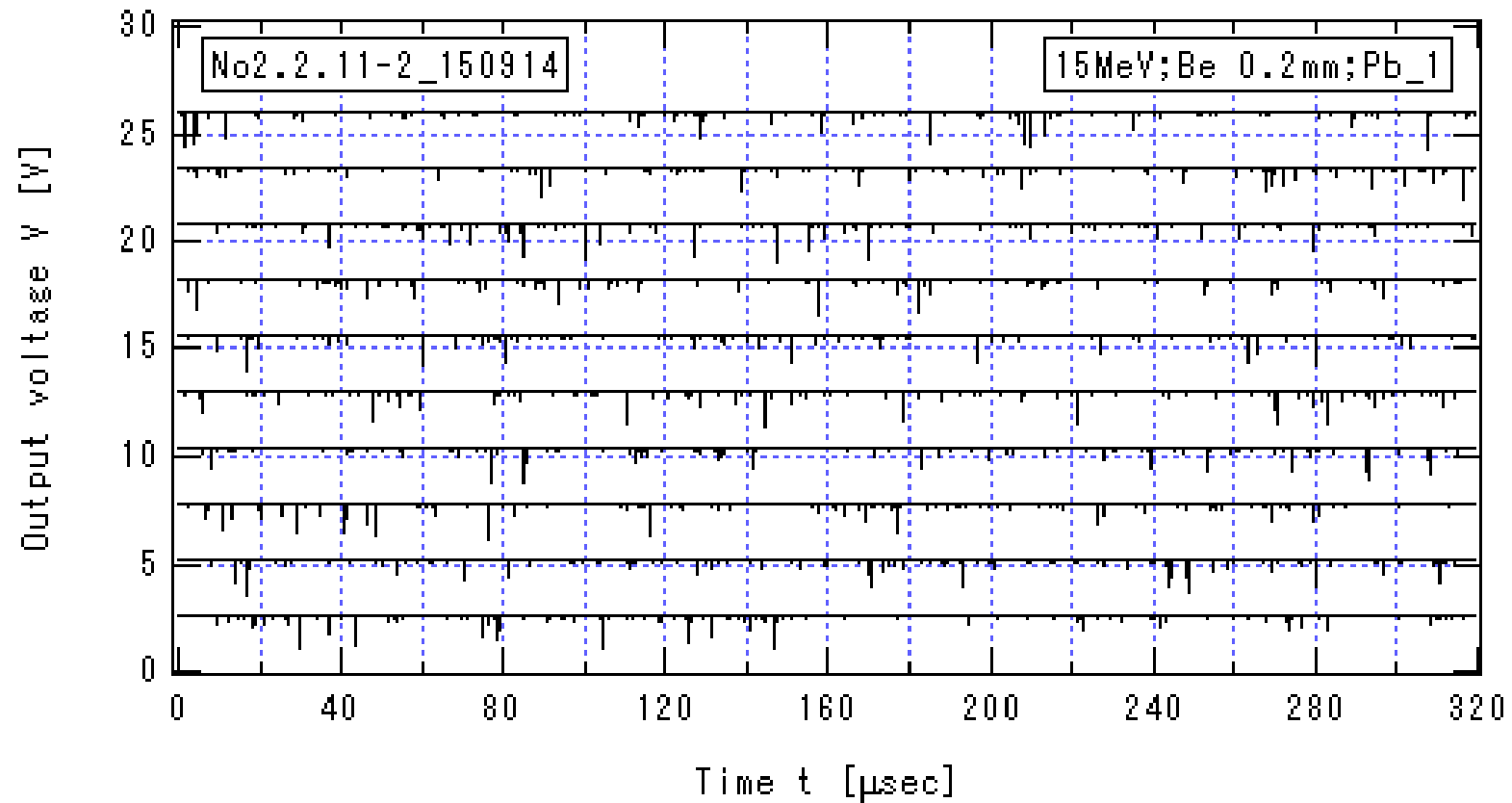


図 3.3.2-13\_2a  $I_{\text{He}}=0.516\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 5cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

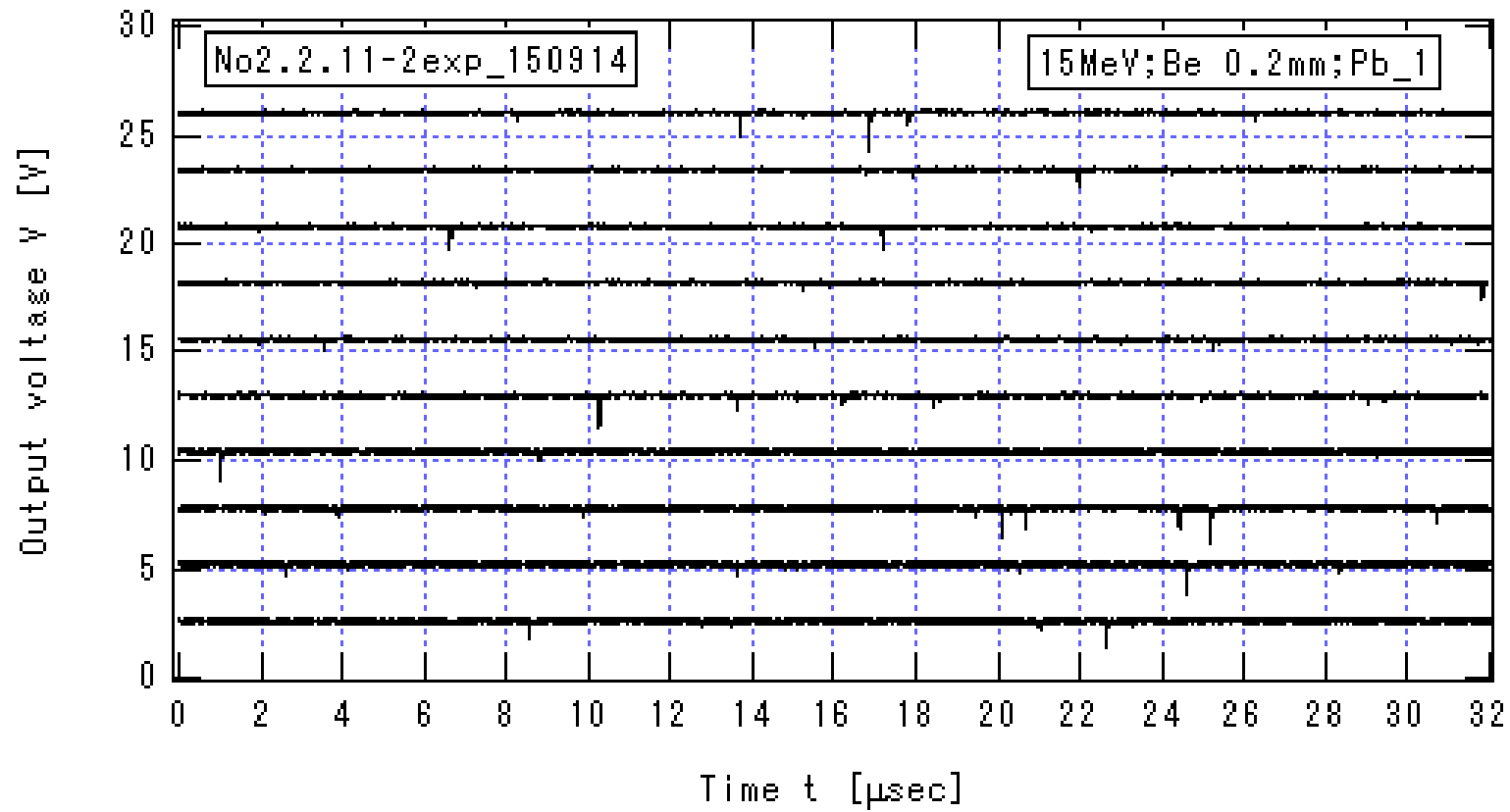


図 3.3.2-13\_2b  $I_{He}=0.516\mu A$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2b)

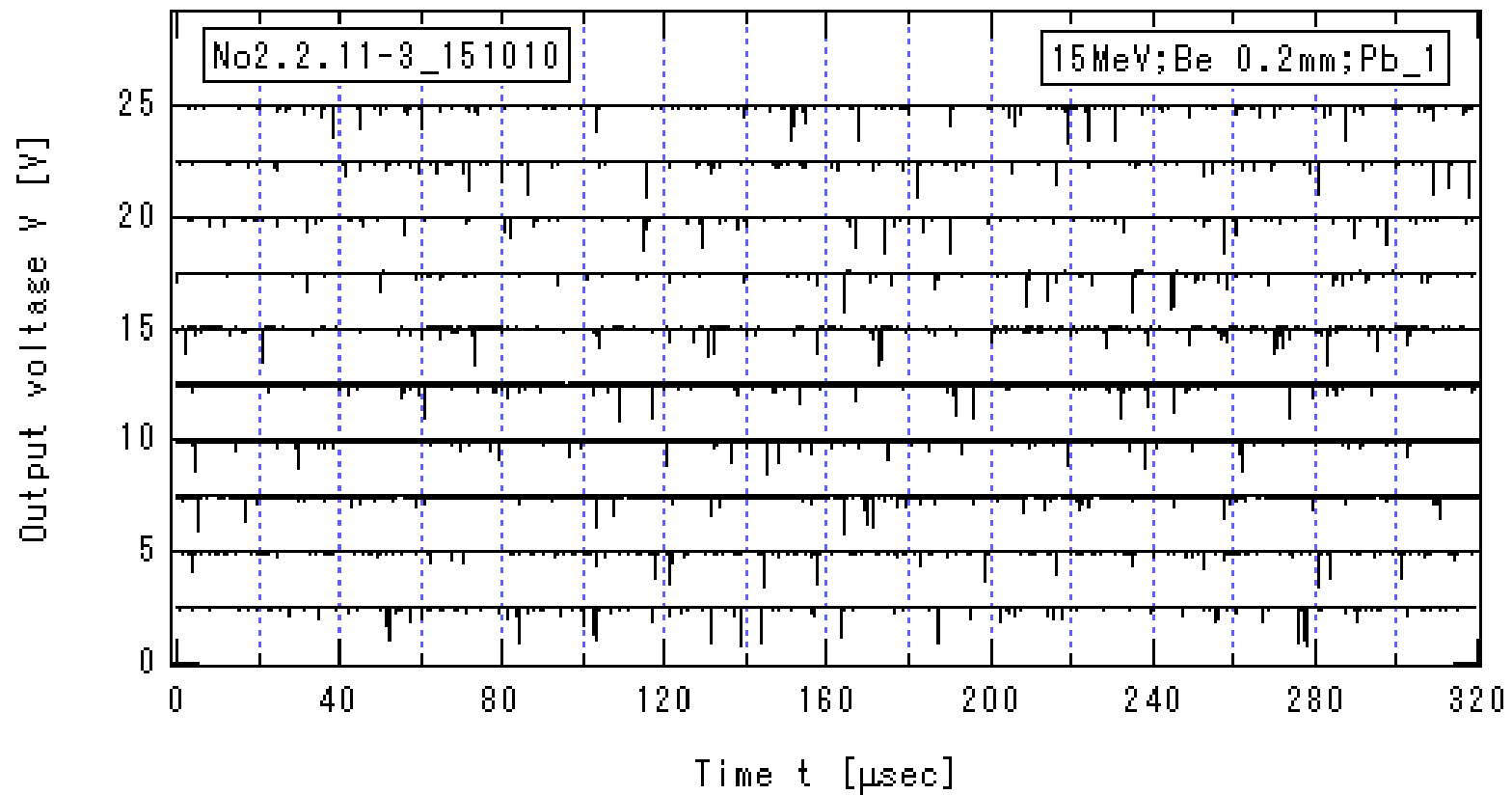


図 3.3.2-13\_3a  $I_{\text{He}}=0.516\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 5cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

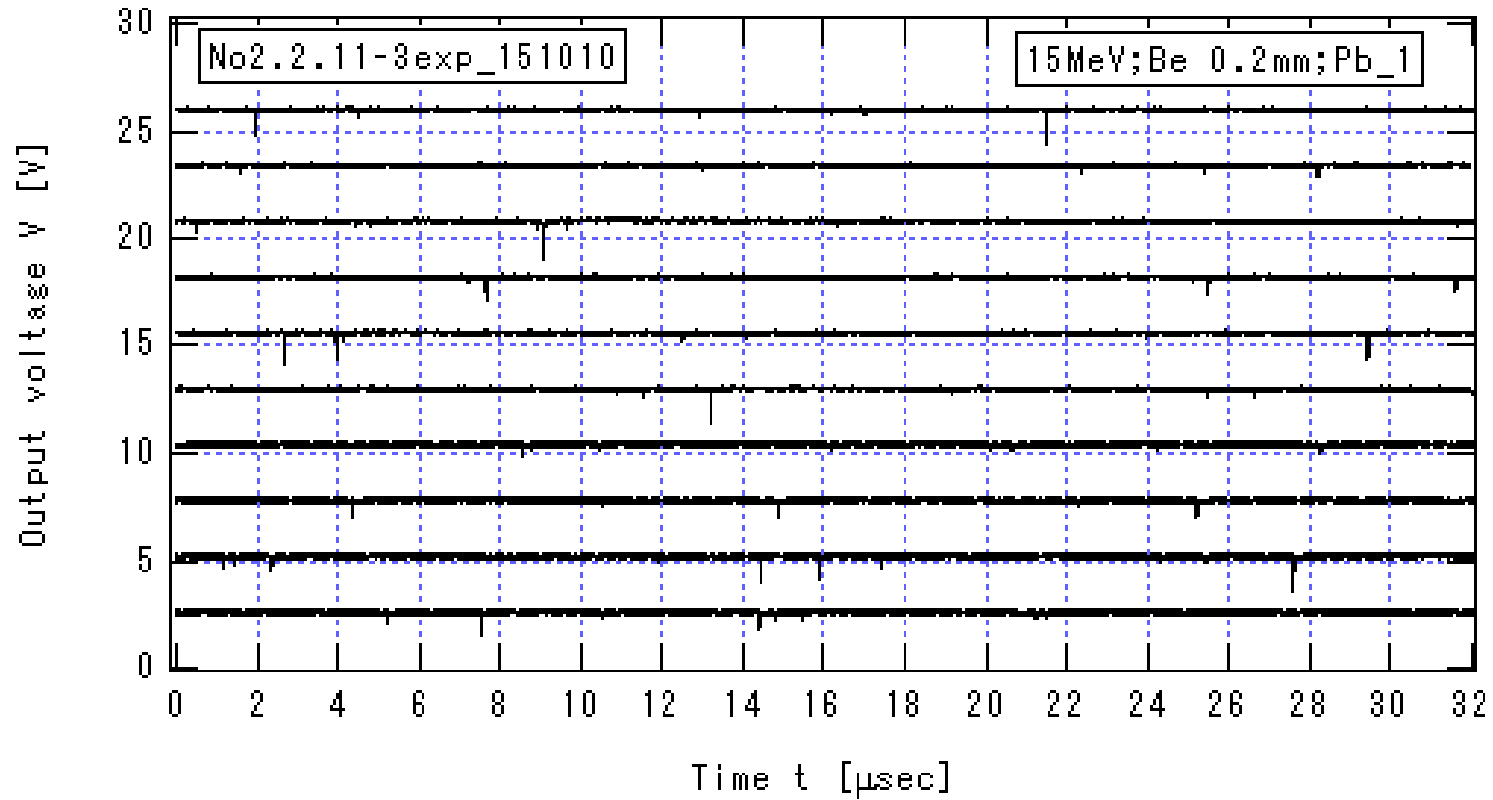


図 3.3.2-13\_3b  $I_{\text{He}}=0.516\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3b)

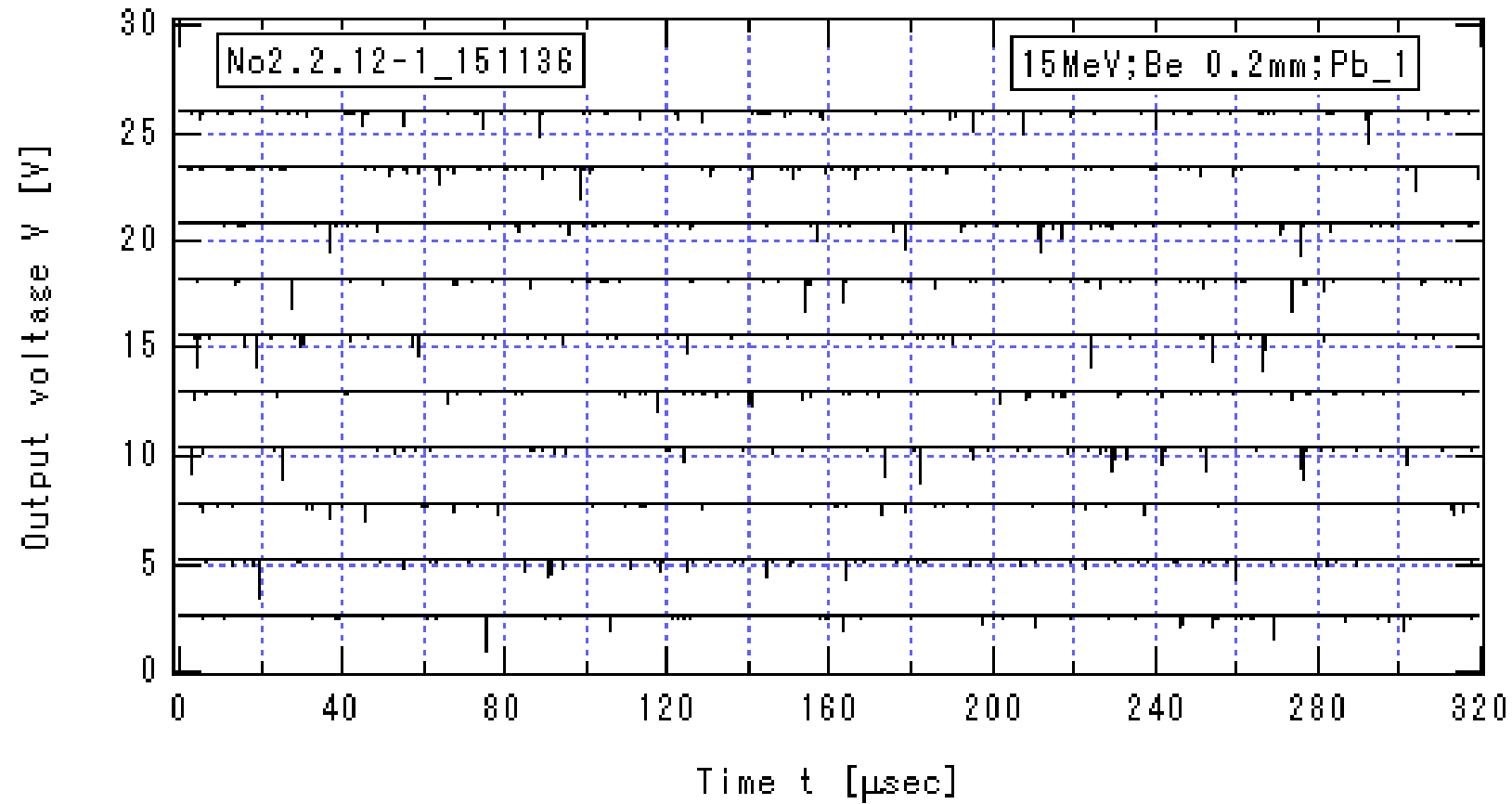


図 3.3.2-14\_1a  $I_{\text{He}}=0.220\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 5cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

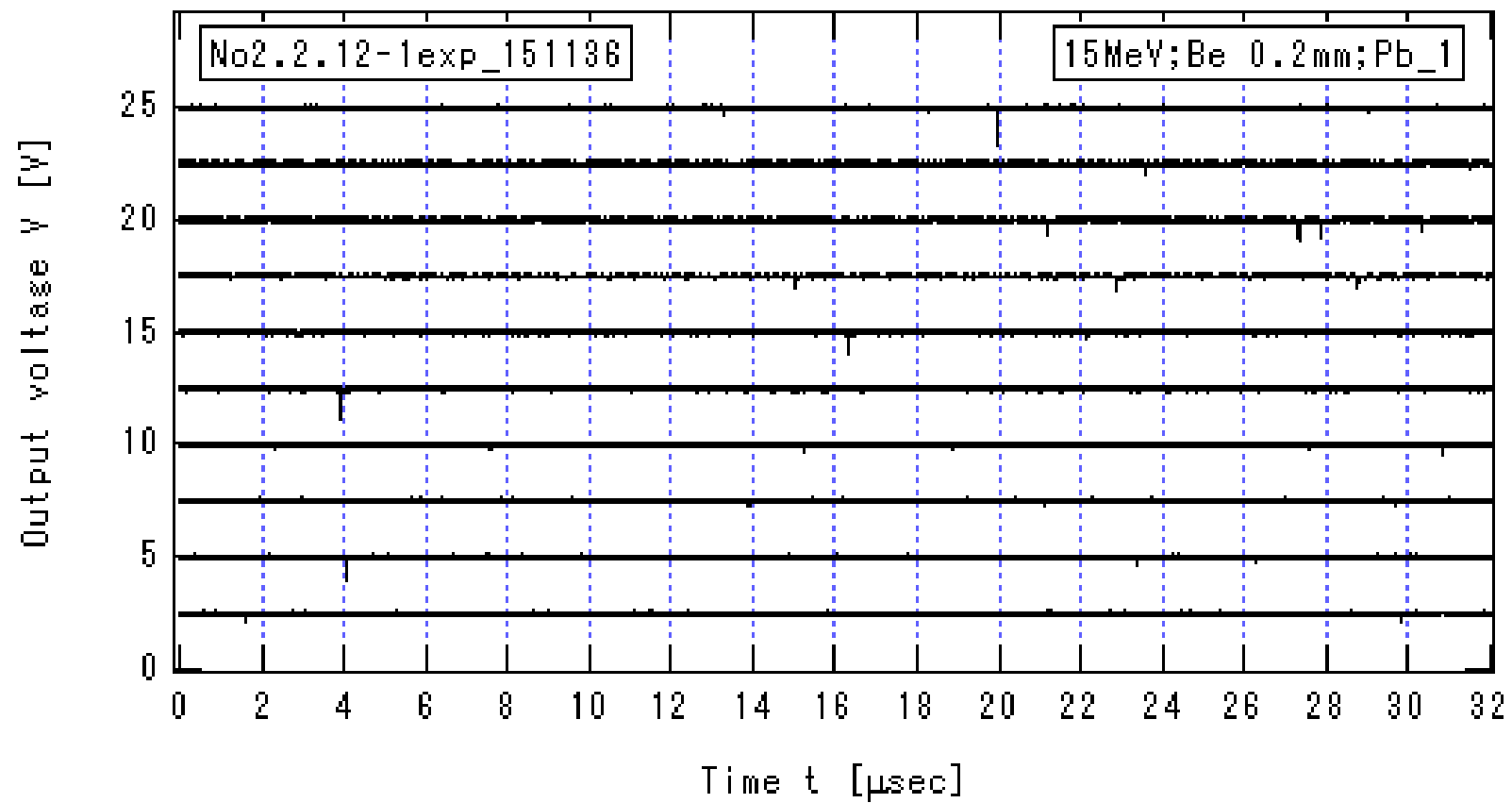


図 3.3.2-14\_1b  $I_{He}=0.220\mu A$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1b)

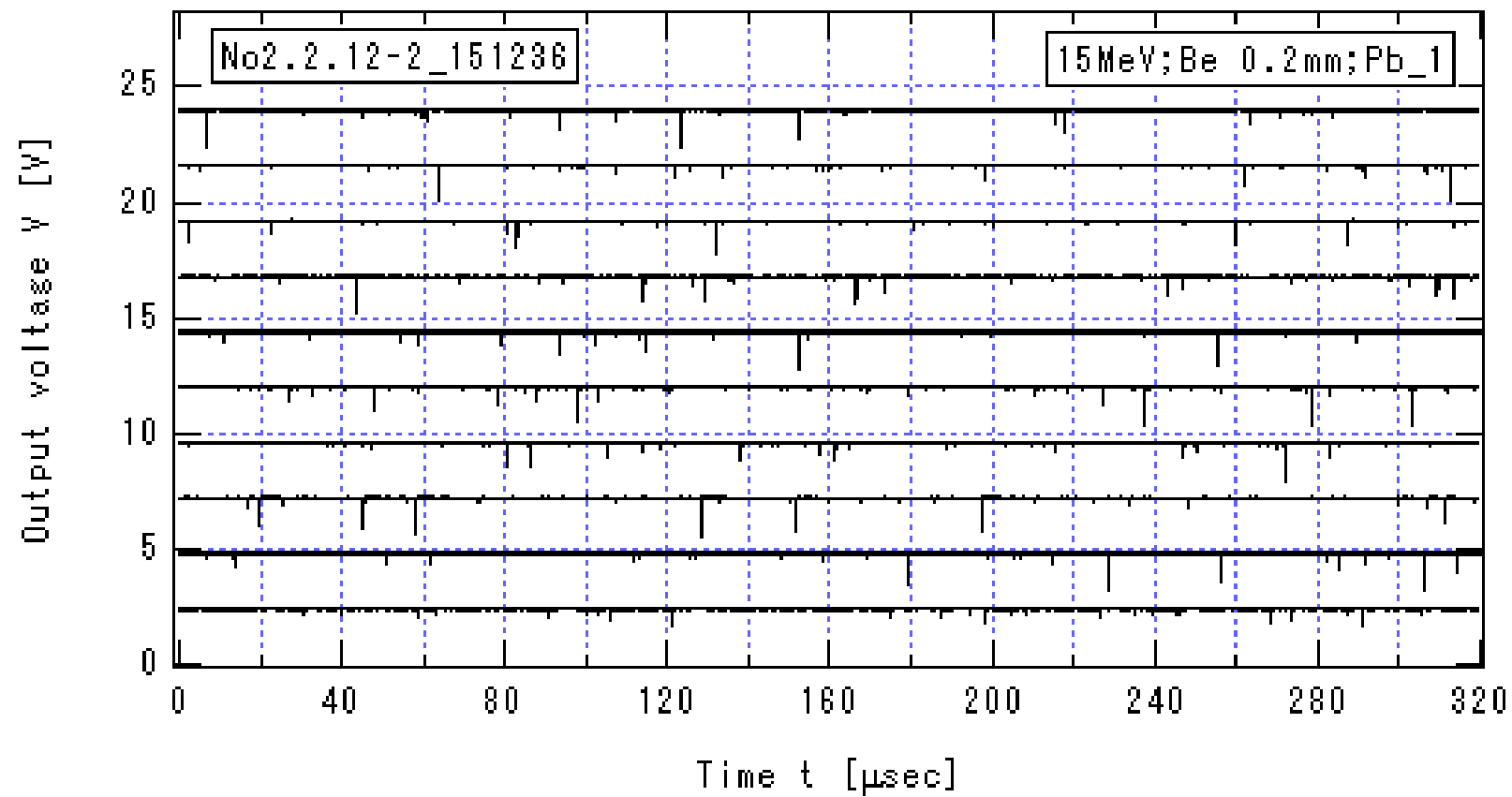


図 3.3.2-14\_2a  $I_{\text{He}}=0.220\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 5cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$



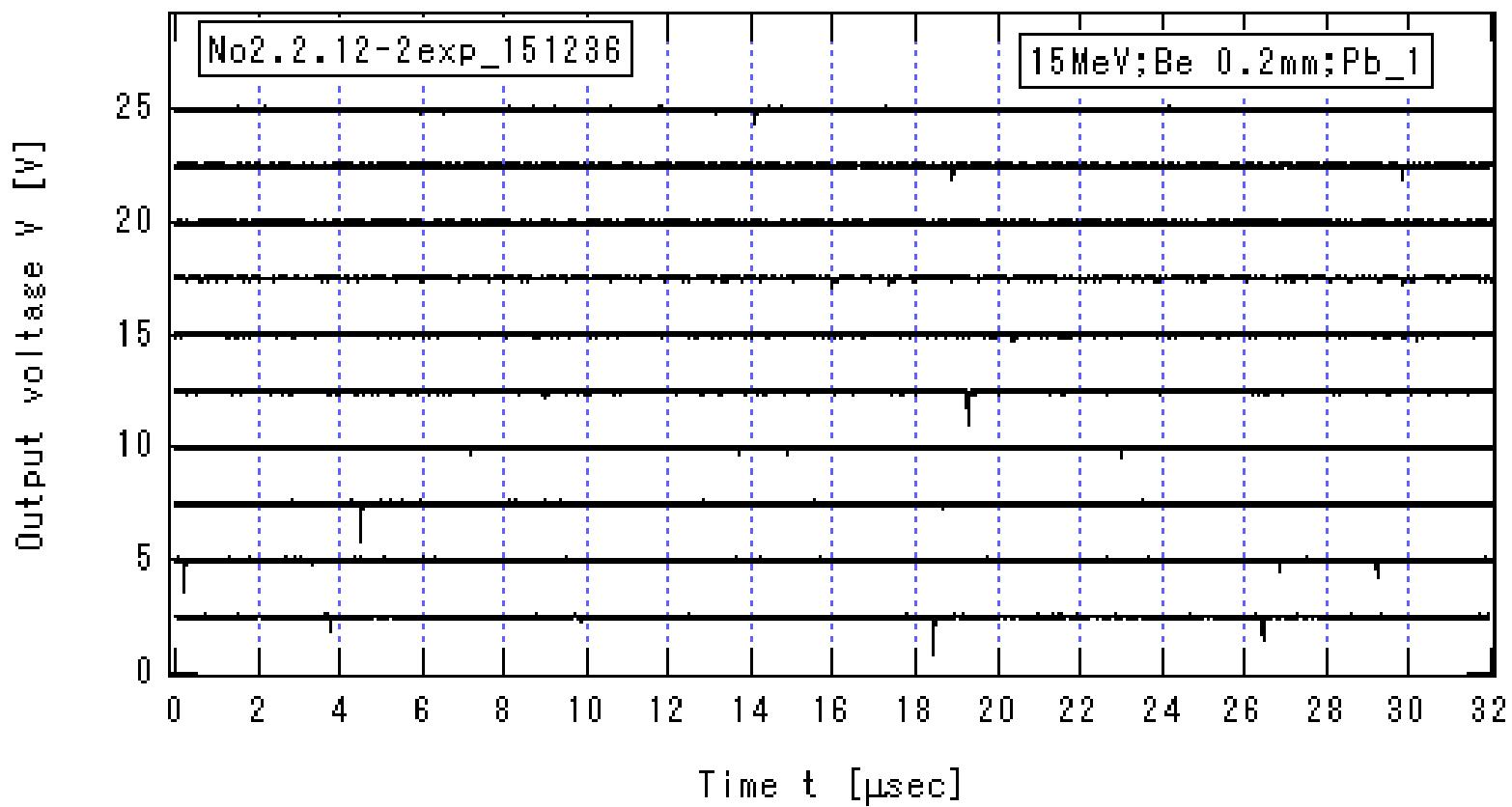


図 3.3.2-14\_2b  $I_{\text{He}}=0.220\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2b)

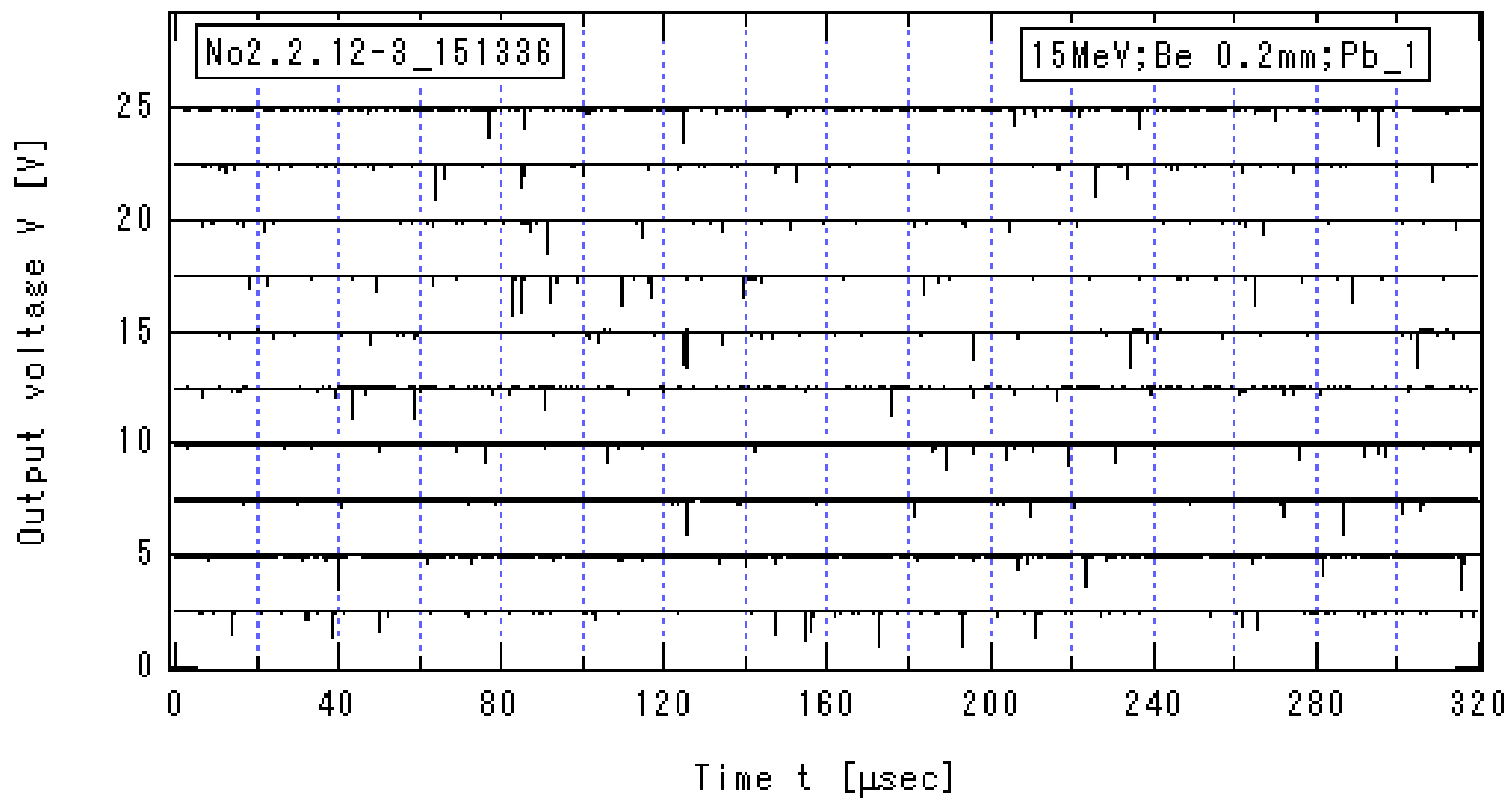


図 3.3.2-14\_3a  $I_{\text{He}}=0.220\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 5cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

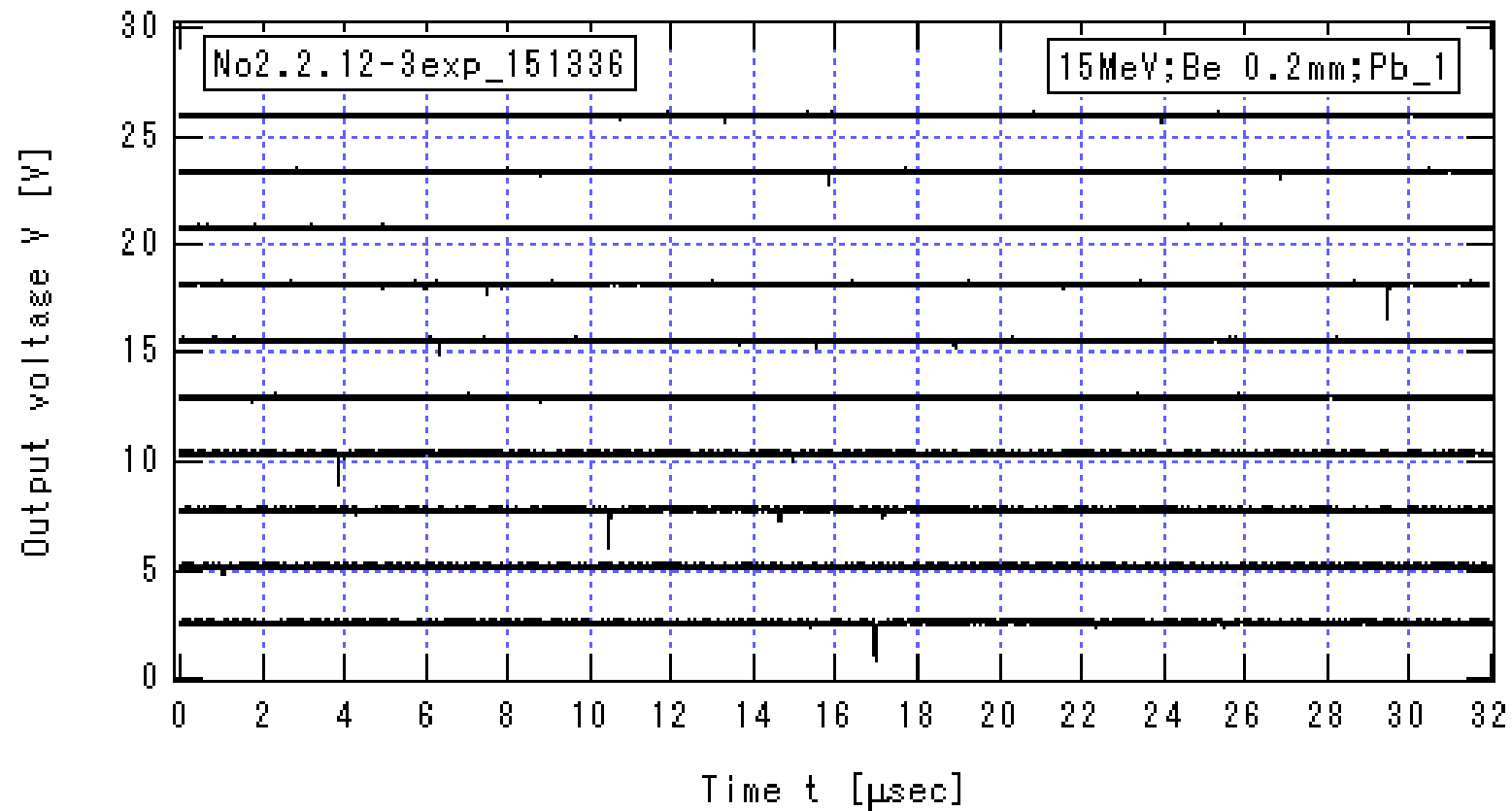


図 3.3.2-14\_3b  $I_{He}=0.220\mu A$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3b)

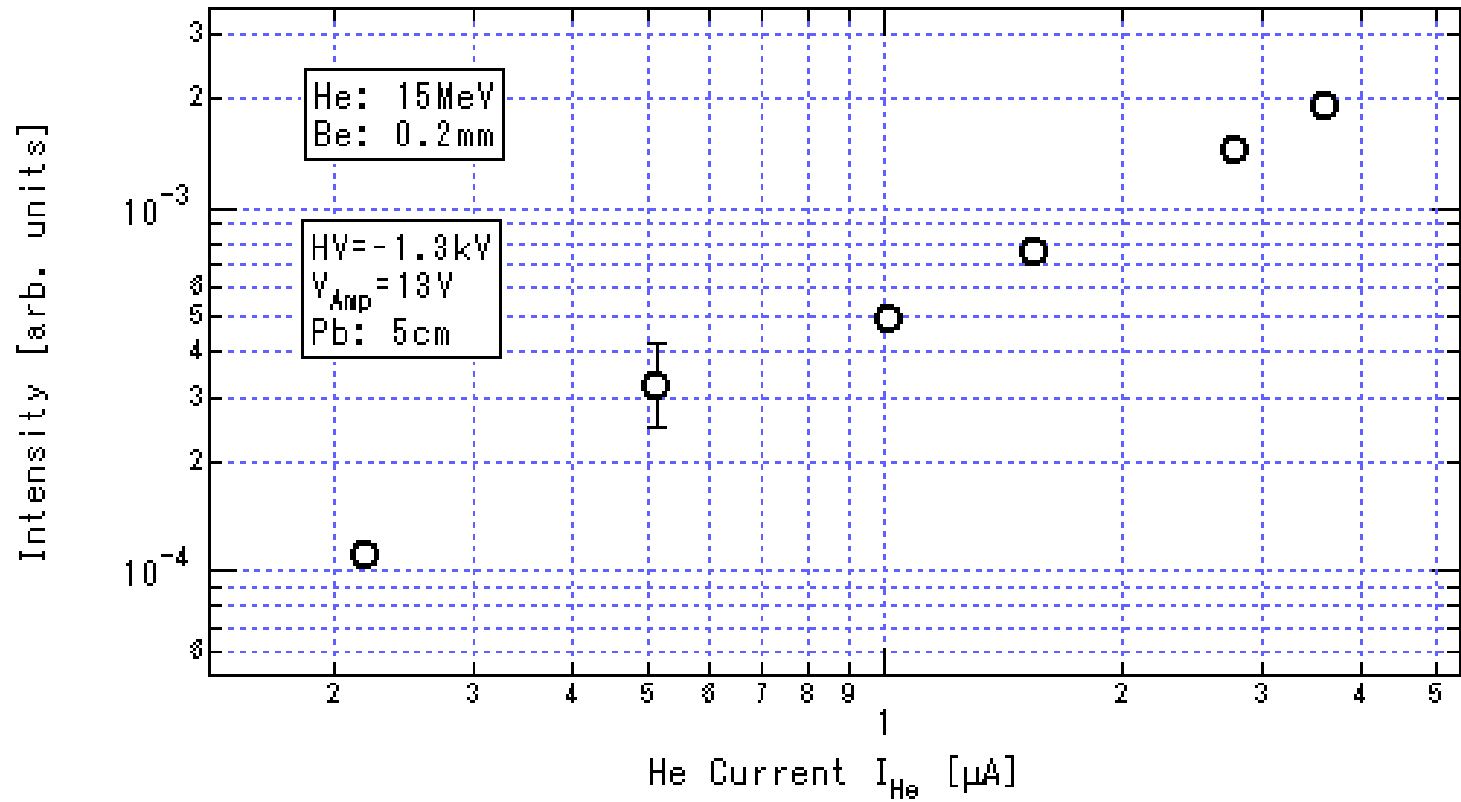


図 3.3.2-15 放射線強度の He イオン電流値  $I_{He}$  依存性

$E_{He} = 15 \text{ MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 5cm,  $HV = -1.3 \text{ kV}$ ,  $V_{Amp} = 13 \text{ V}$

表 3.3.2-3 0.2mm 厚のベリリウムへ 15MeV ヘリウム照射による  
検出器応答評価実験条件 ( Pb\_0cm )

Data number	$E_{\text{He}}$ [MeV]	$I_{\text{He}}$ [ $\mu\text{A}$ ]	Pb width [cm]	HV [kV]	$V_{\text{Amp}}$ [V]
No2.2.13-1_152810	15	0.220	0	-1.3	13
No2.2.13-2_152910	15	0.220	0	-1.3	13
No2.2.13-3_153003	15	0.220	0	-1.3	13
No2.2.14-1_153128	15	0.436	0	-1.3	13
No2.2.14-2_153227	15	0.436	0	-1.3	13
No2.2.14-3_153326	15	0.436	0	-1.3	13
No2.2.15-1_153454	15	0.913	0	-1.3	13
No2.2.15-2_153545	15	0.913	0	-1.3	13
No2.2.15-3_153650	15	0.913	0	-1.3	13
No2.2.16-1_153832	15	1.500	0	-1.3	13
No2.2.16-2_153939	15	1.500	0	-1.3	13
No2.2.16-3_154042	15	1.500	0	-1.3	13
No2.2.17-1_154217	15	2.743	0	-1.3	13
No2.2.17-2_154316	15	2.743	0	-1.3	13
No2.2.17-3_154409	15	2.743	0	-1.3	13
No2.2.18-1_154619	15	3.607	0	-1.3	13
No2.2.18-2_154717	15	3.607	0	-1.3	13
No2.2.18-3_154810	15	3.607	0	-1.3	13

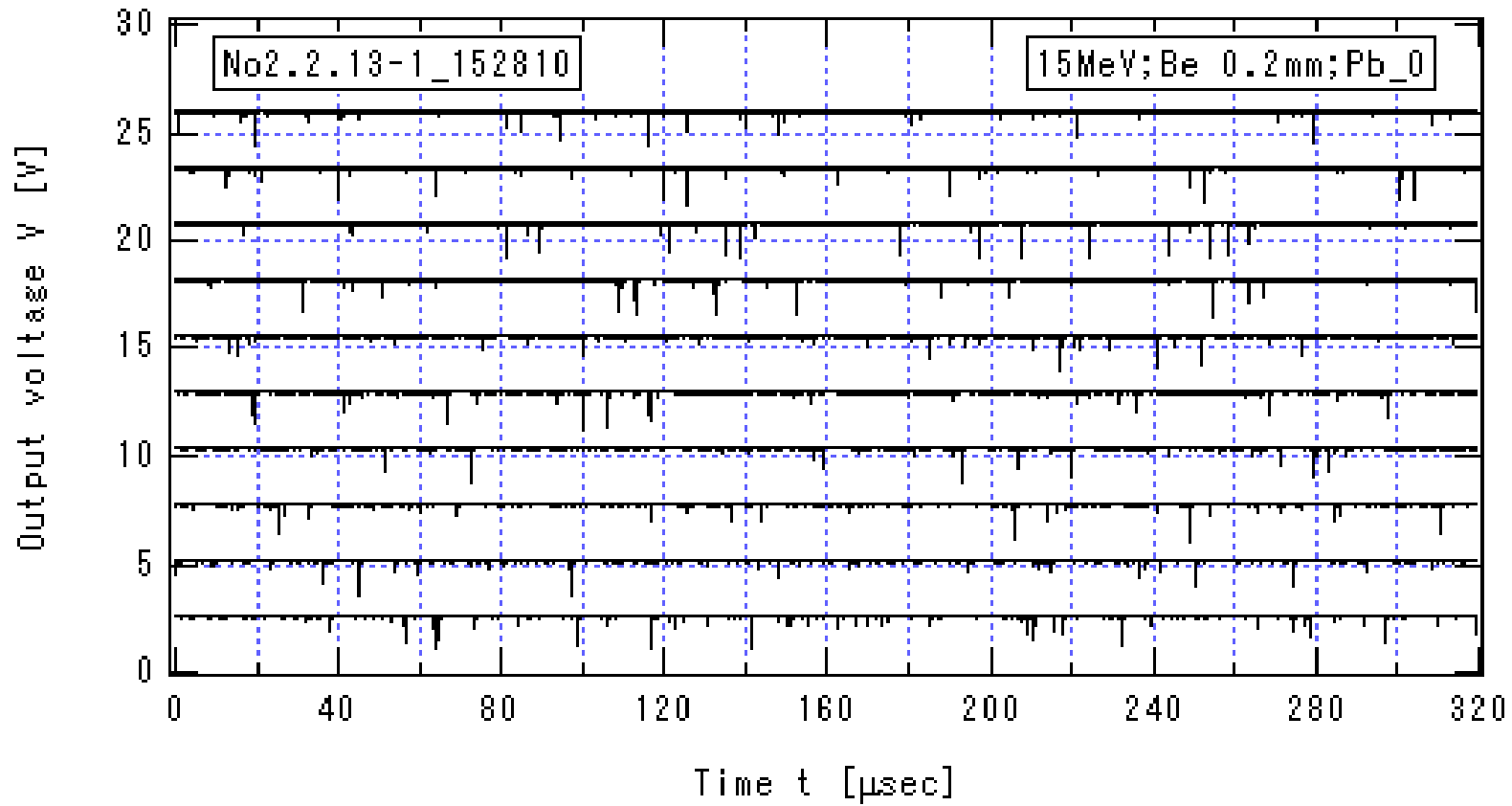


図 3.3.2-16\_1a  $I_{\text{He}}=0.220\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 0cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

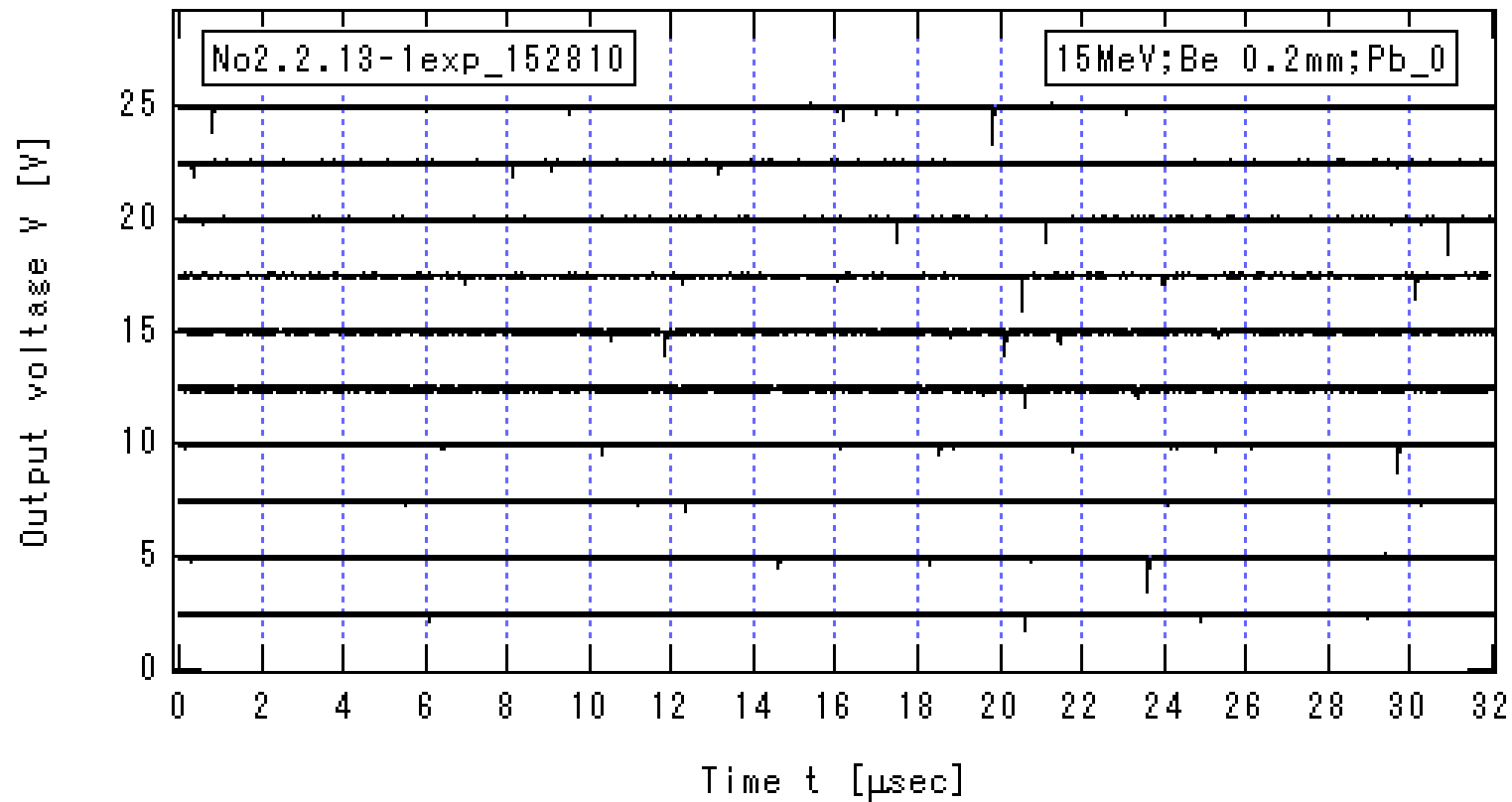


図 3.3.2-16\_1b  $I_{He}=0.220\mu A$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1b)

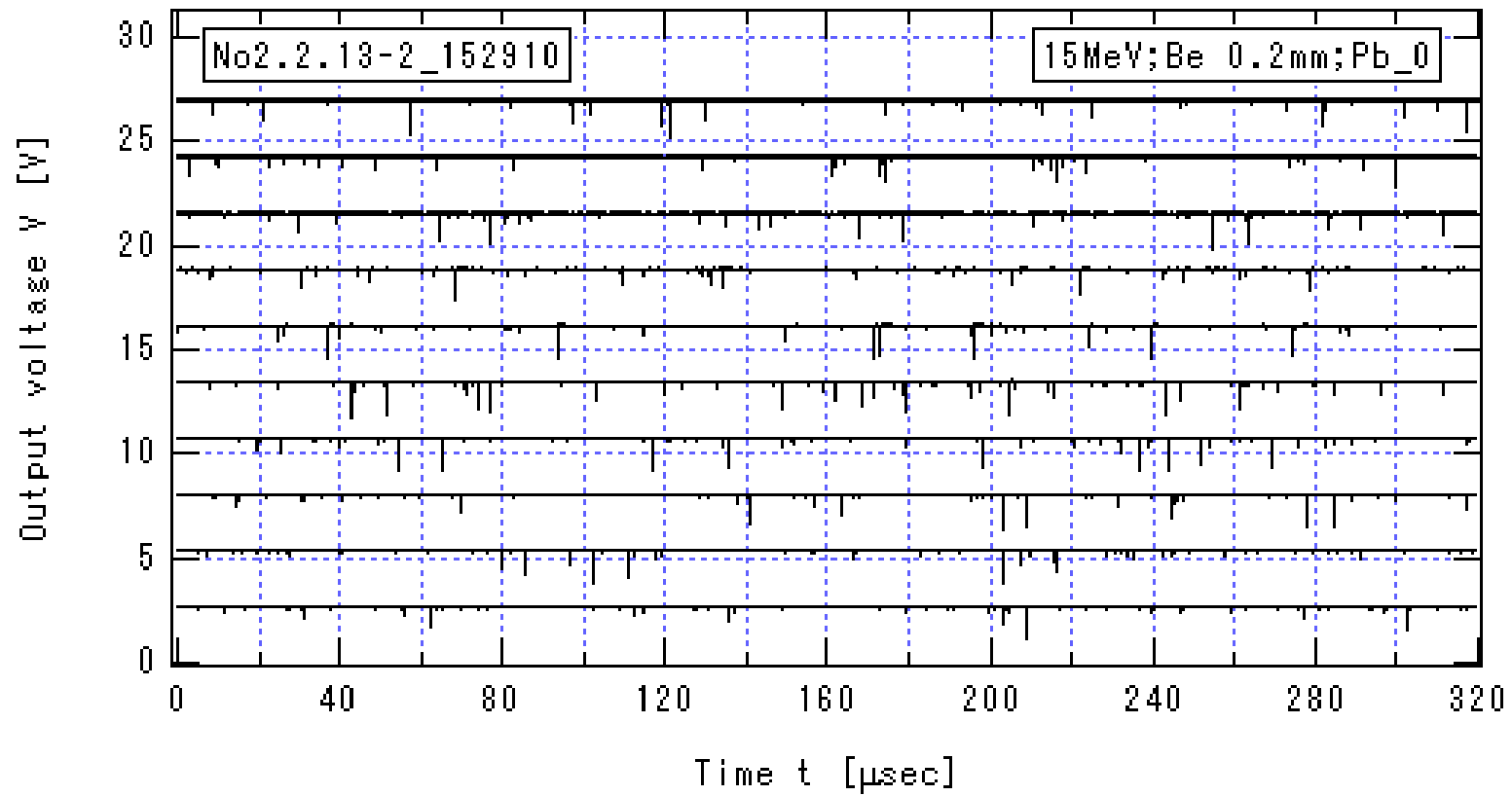


図 3.3.2-16\_2a  $I_{\text{He}}=0.220\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 0cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$



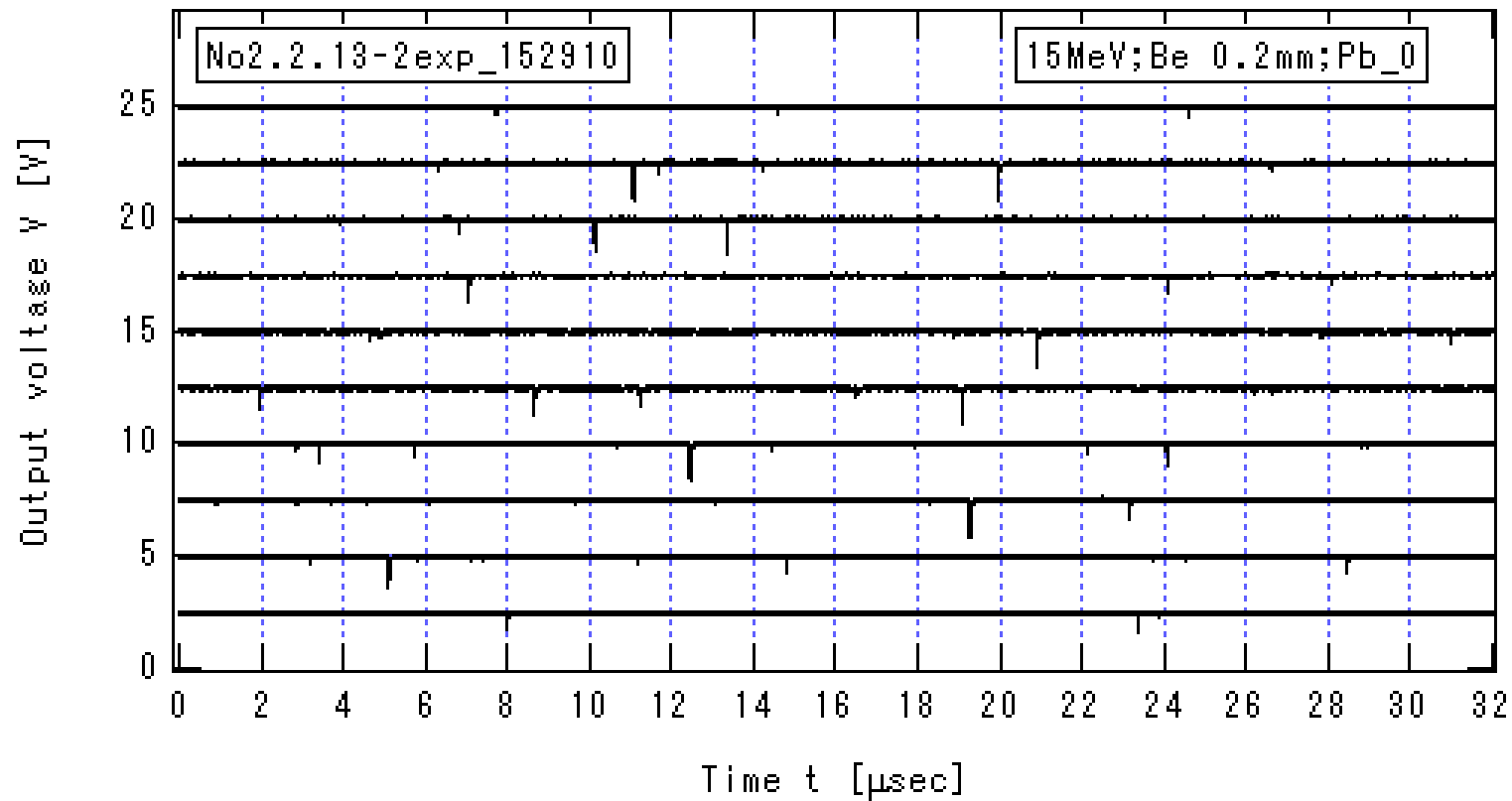


図 3.3.2-16\_2b  $I_{\text{He}}=0.220\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2b)

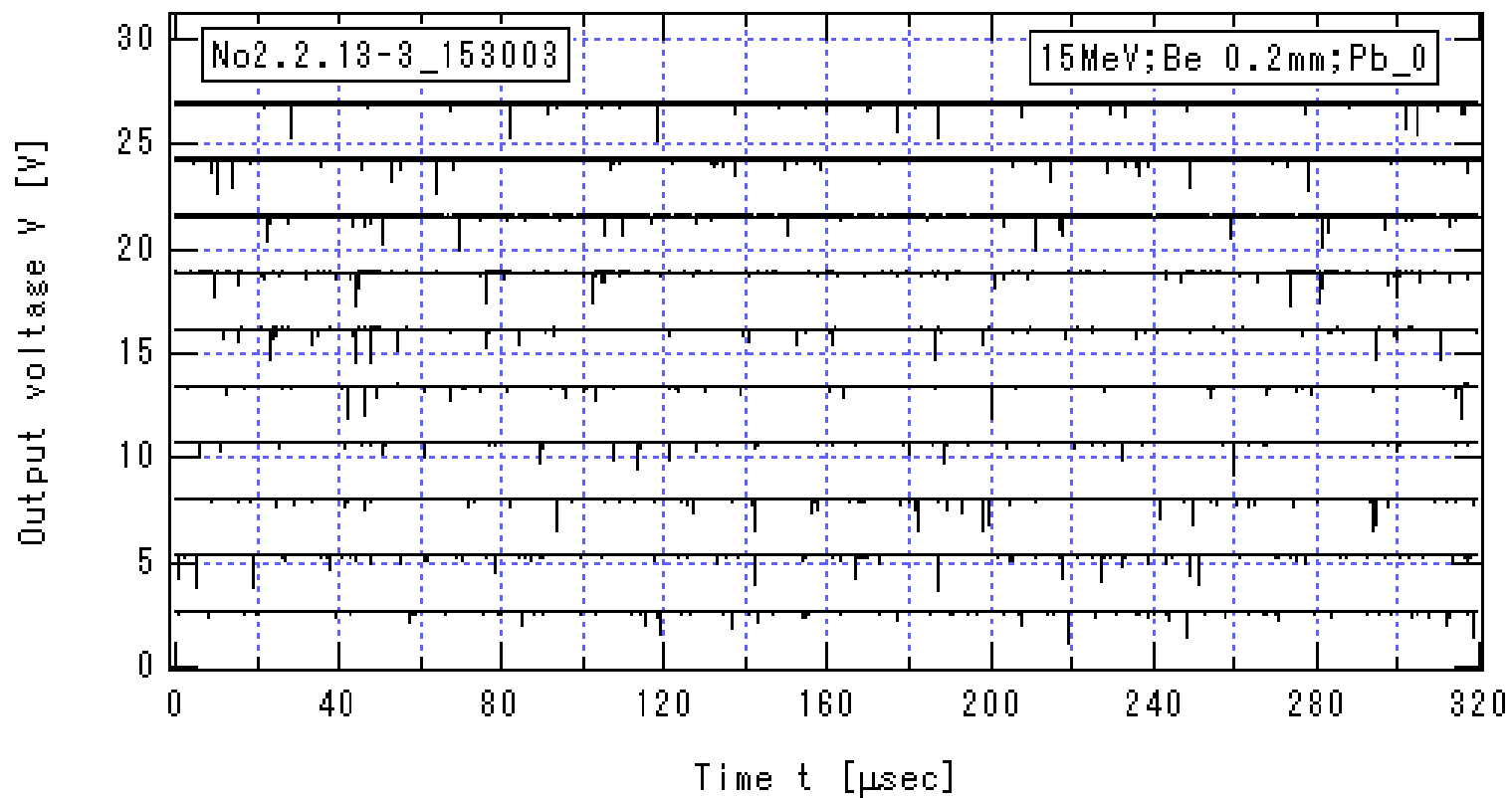


図 3.3.2-16\_3a  $I_{\text{He}}=0.220\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 0cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

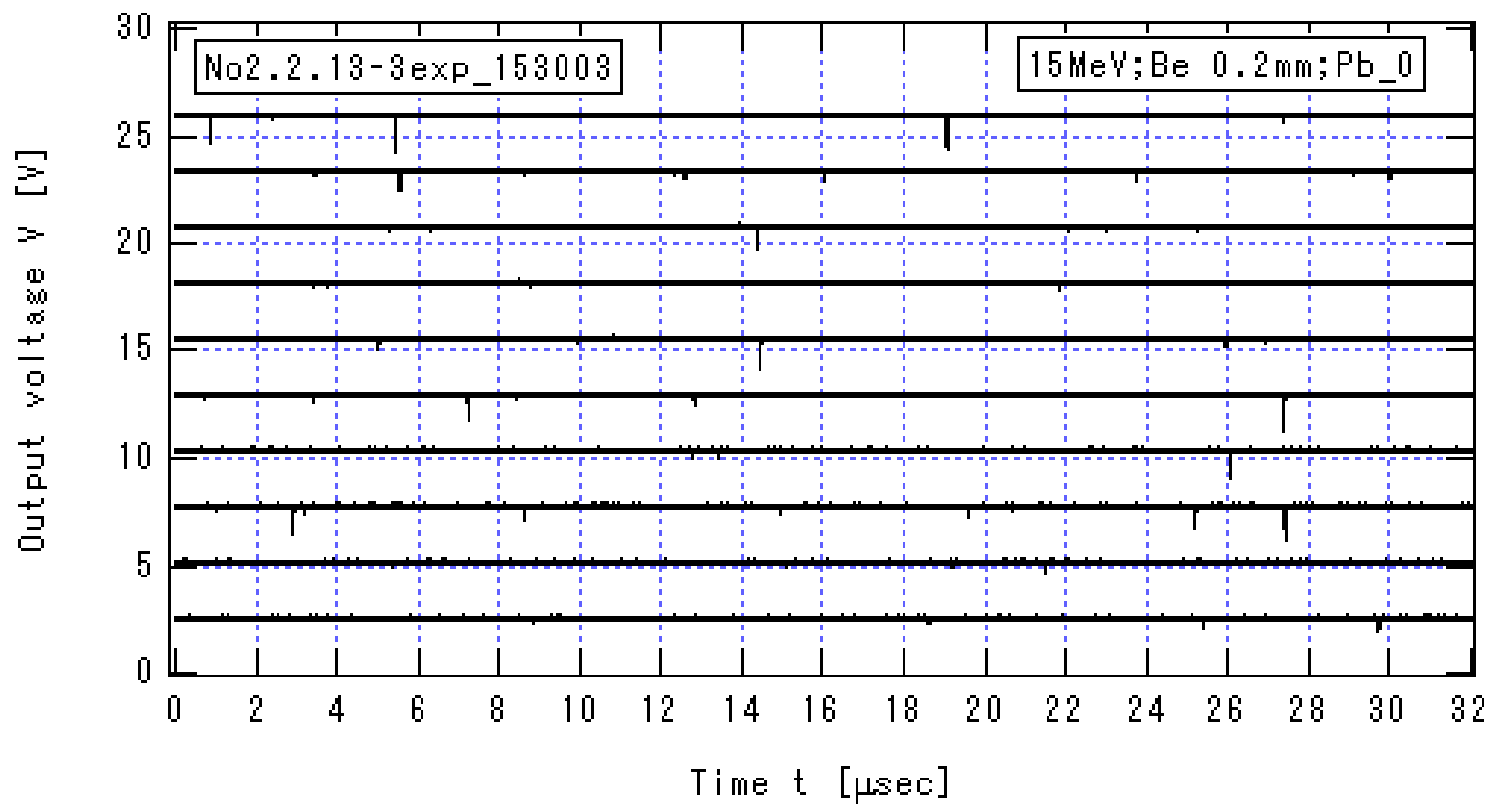


図 3.3.2-16\_3b  $I_{He}=0.220\mu A$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3b)

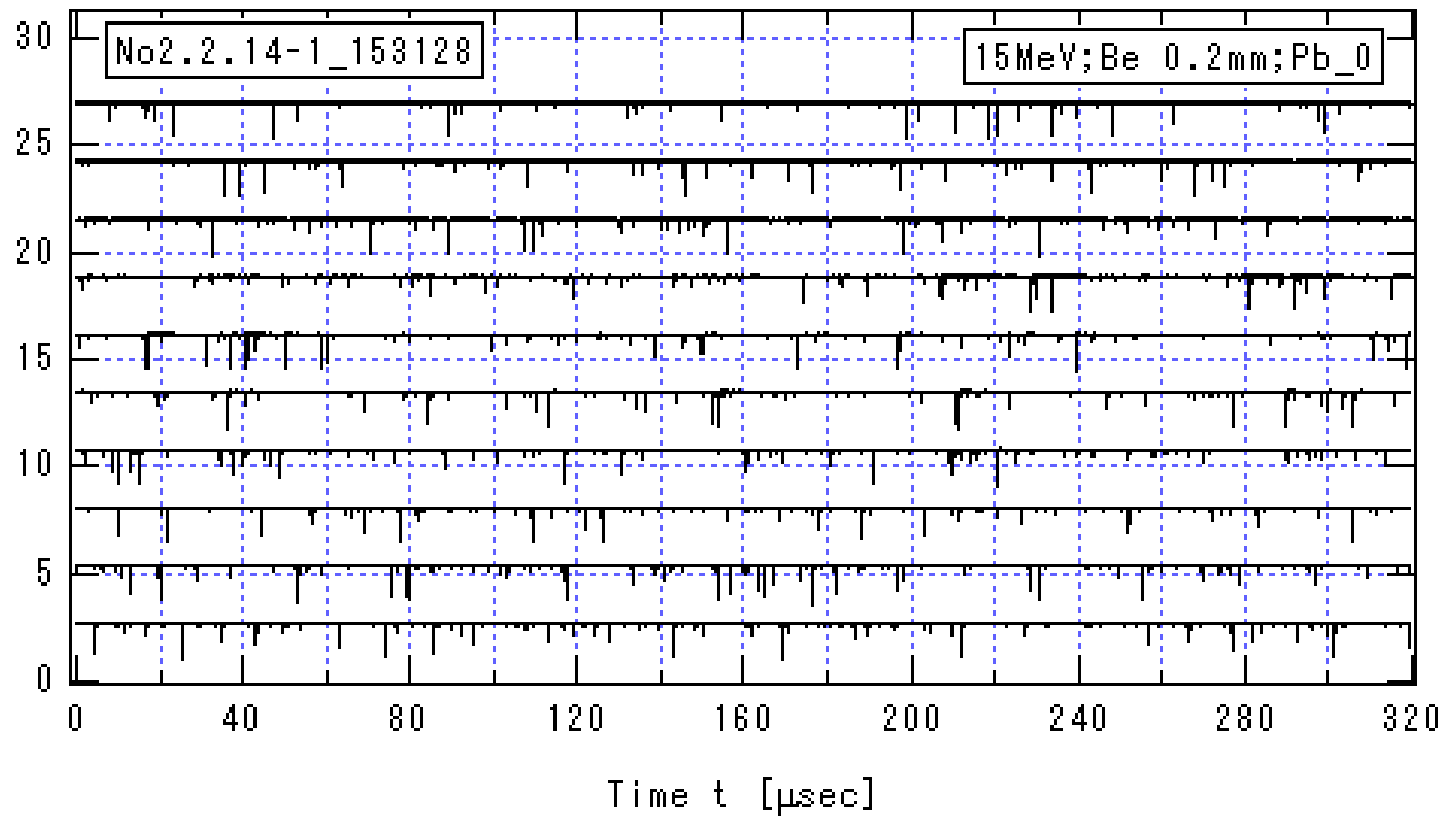


図 3.3.2-17\_1a  $I_{\text{He}}=0.436\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 0cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

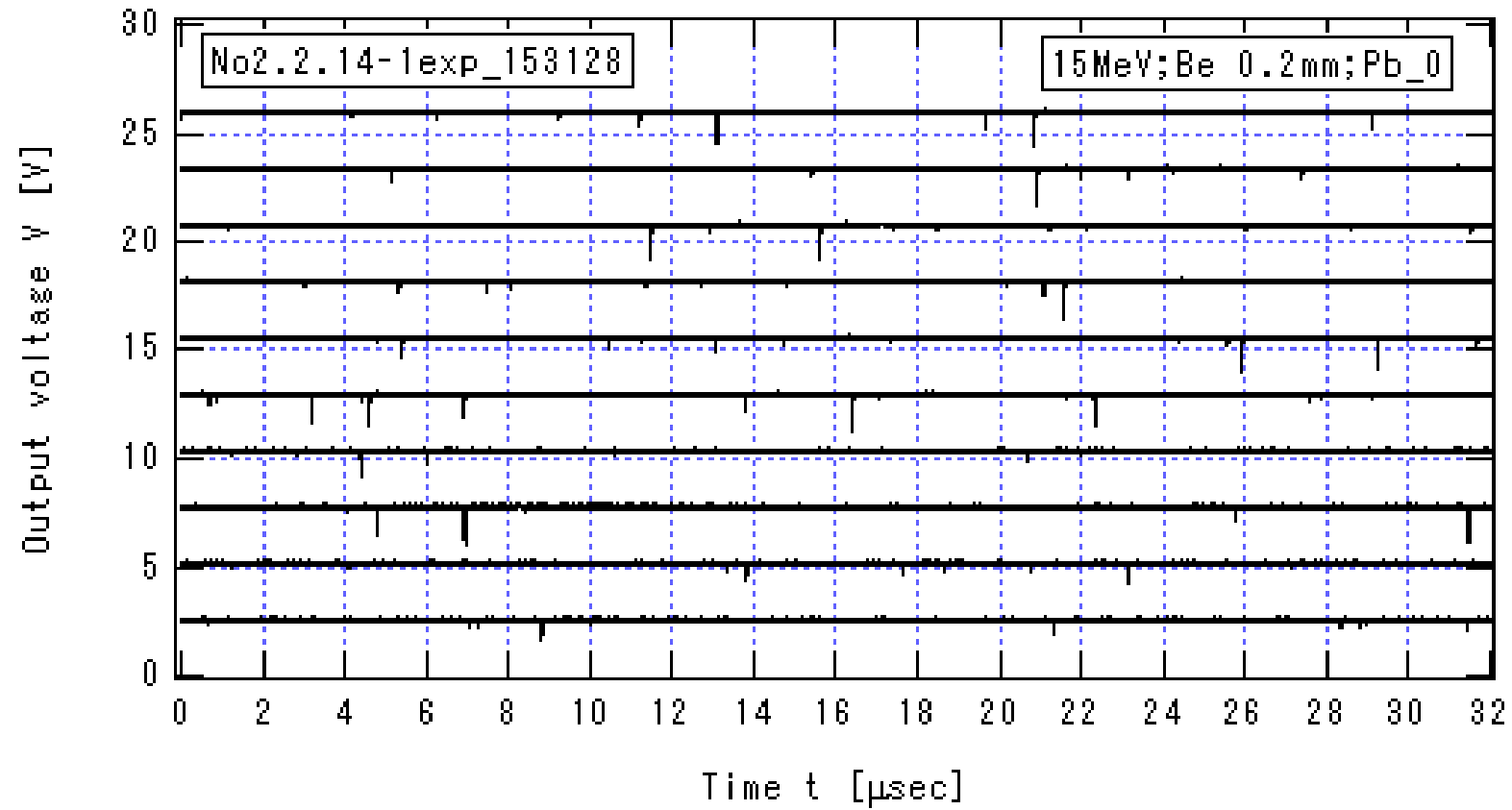


図 3.3.2-17\_1b  $I_{He}=0.436\mu A$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1b)

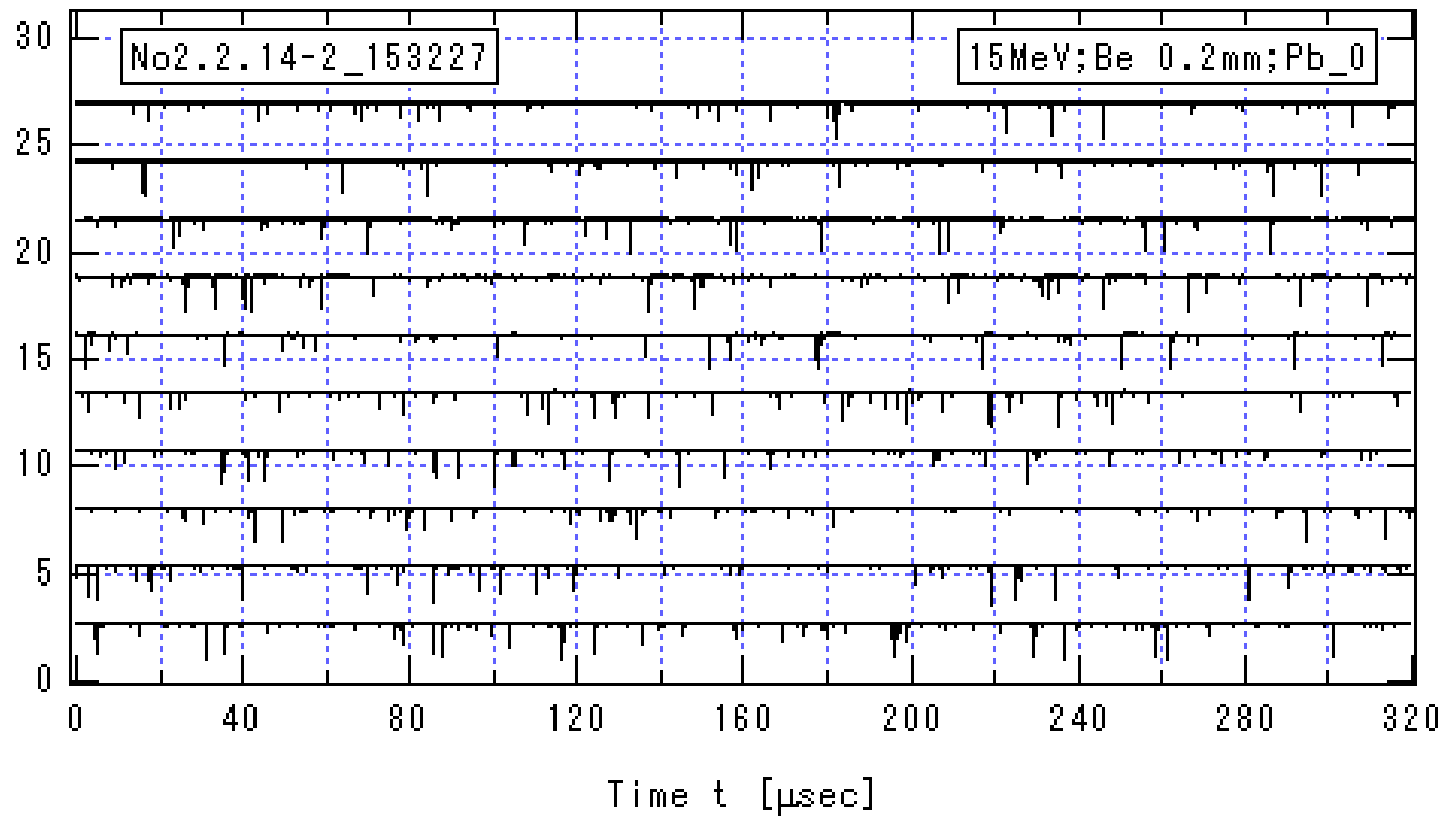


図 3.3.2-17\_2a  $I_{\text{He}}=0.436\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 0cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

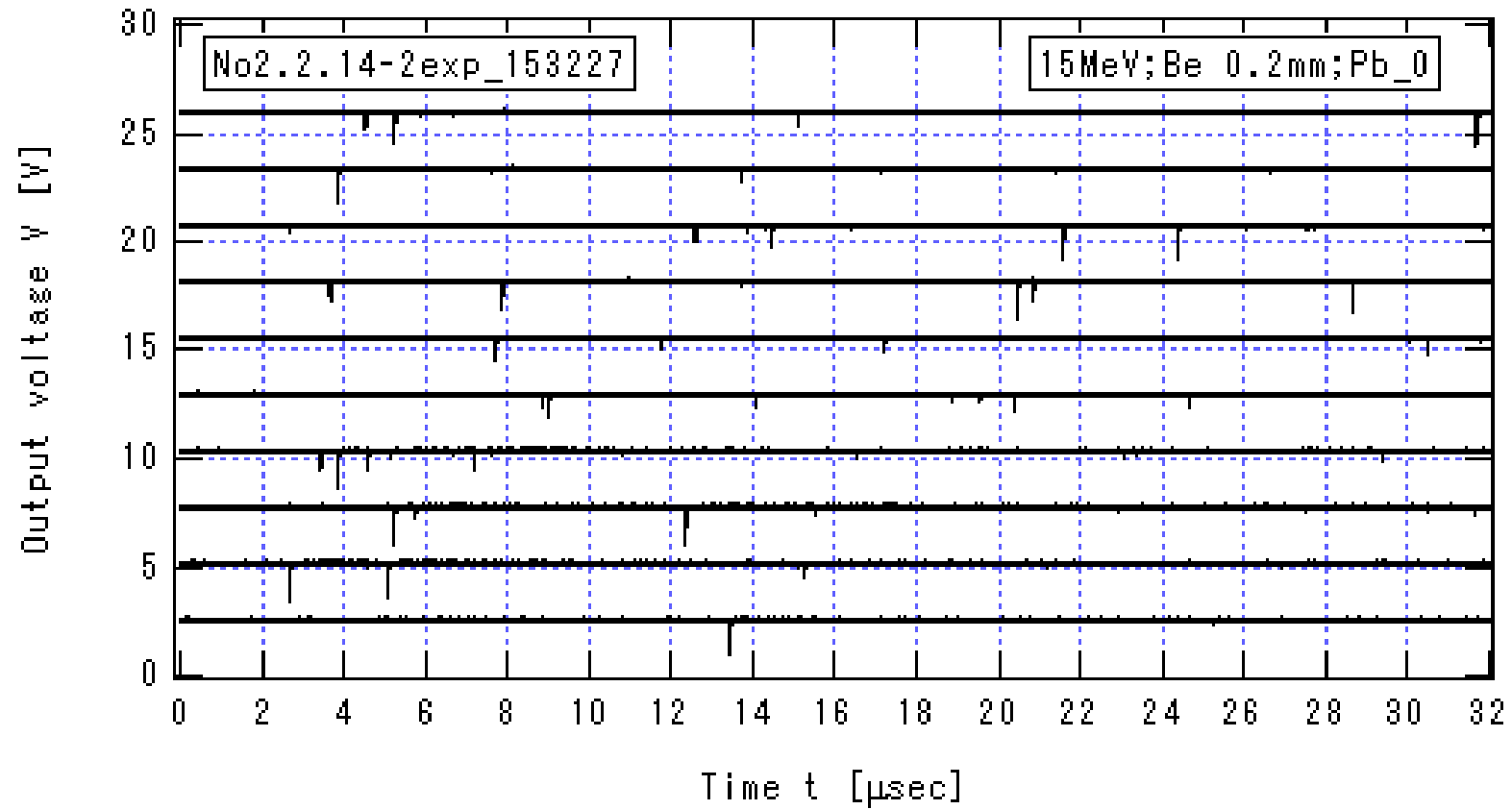


図 3.3.2-17\_2b  $I_{He}=0.436\mu A$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2b)

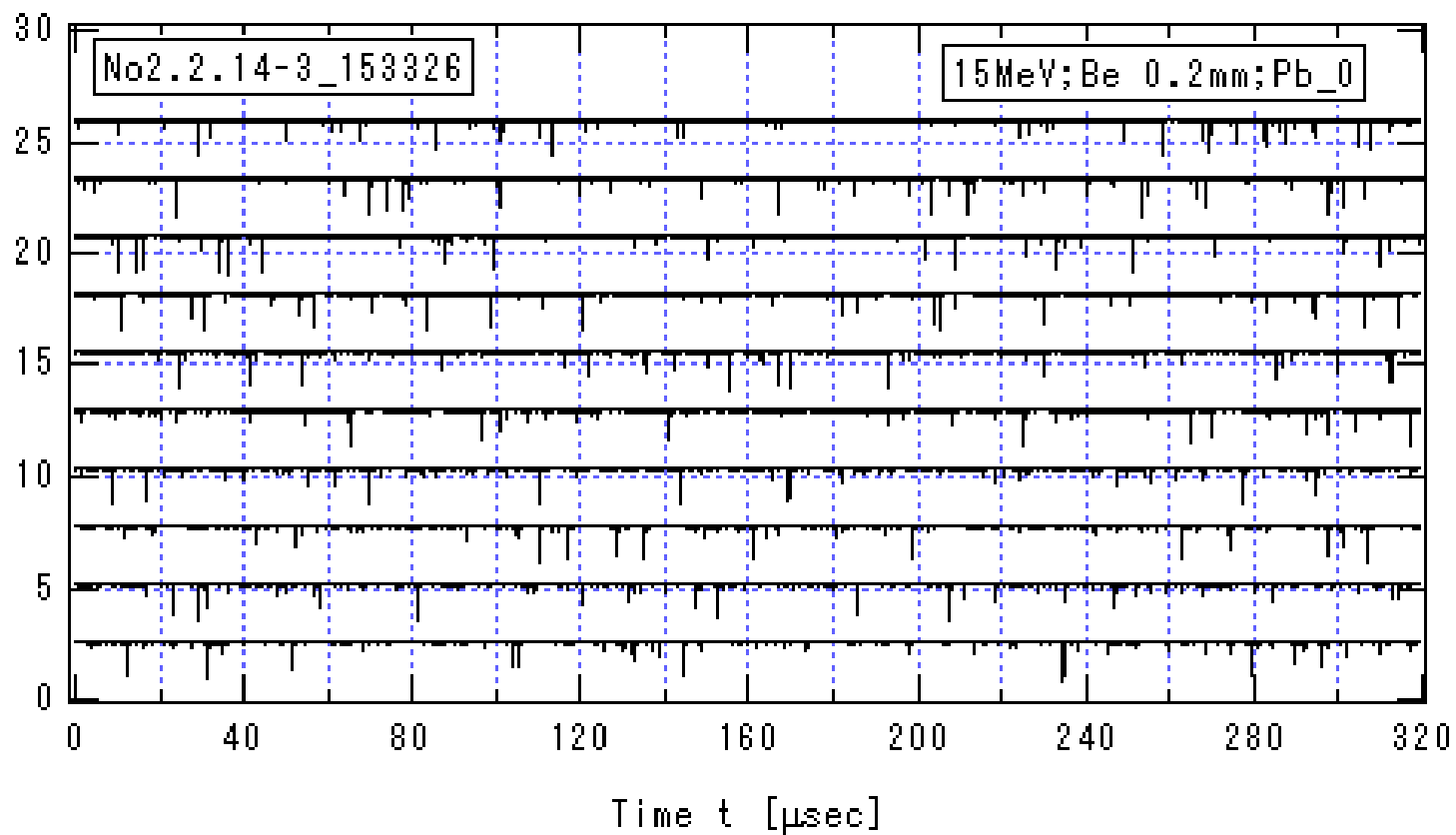


図 3.3.2-17\_3a  $I_{\text{He}}=0.436\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 0cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$



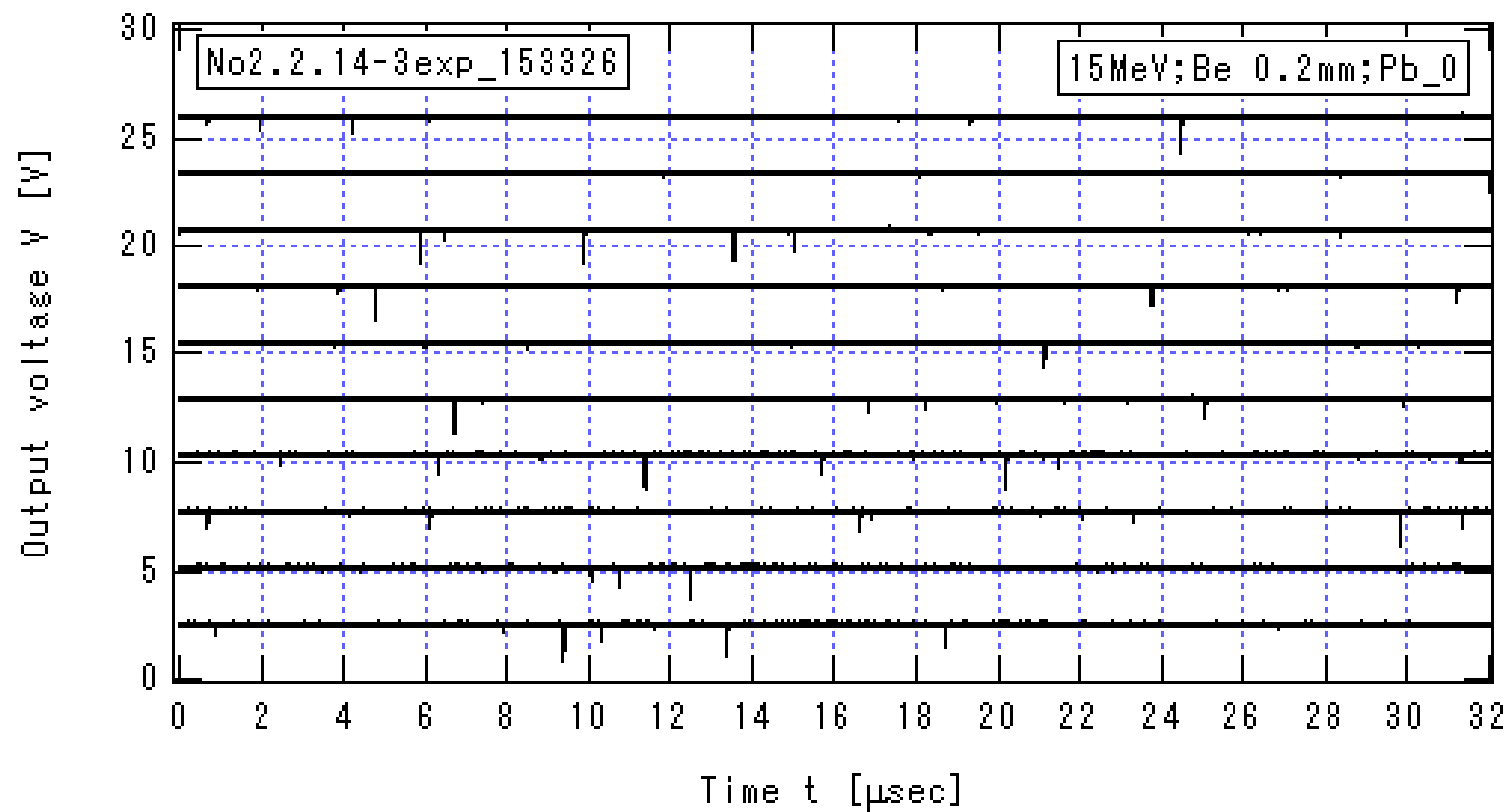


図 3.3.2-17\_3b  $I_{He}=0.436\mu A$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3b)

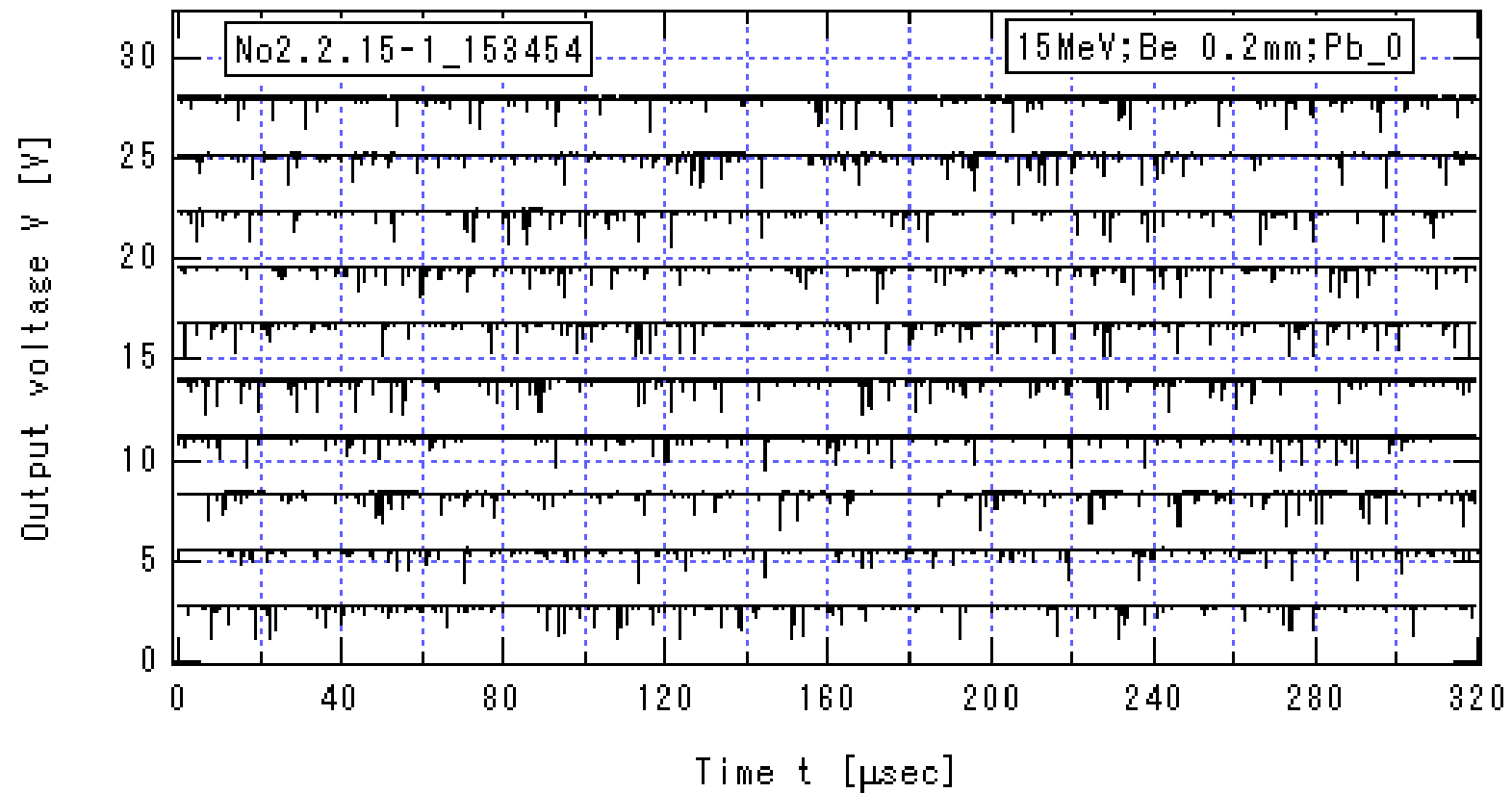


図 3.3.2-18\_1a  $I_{\text{He}}=0.913\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 0cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

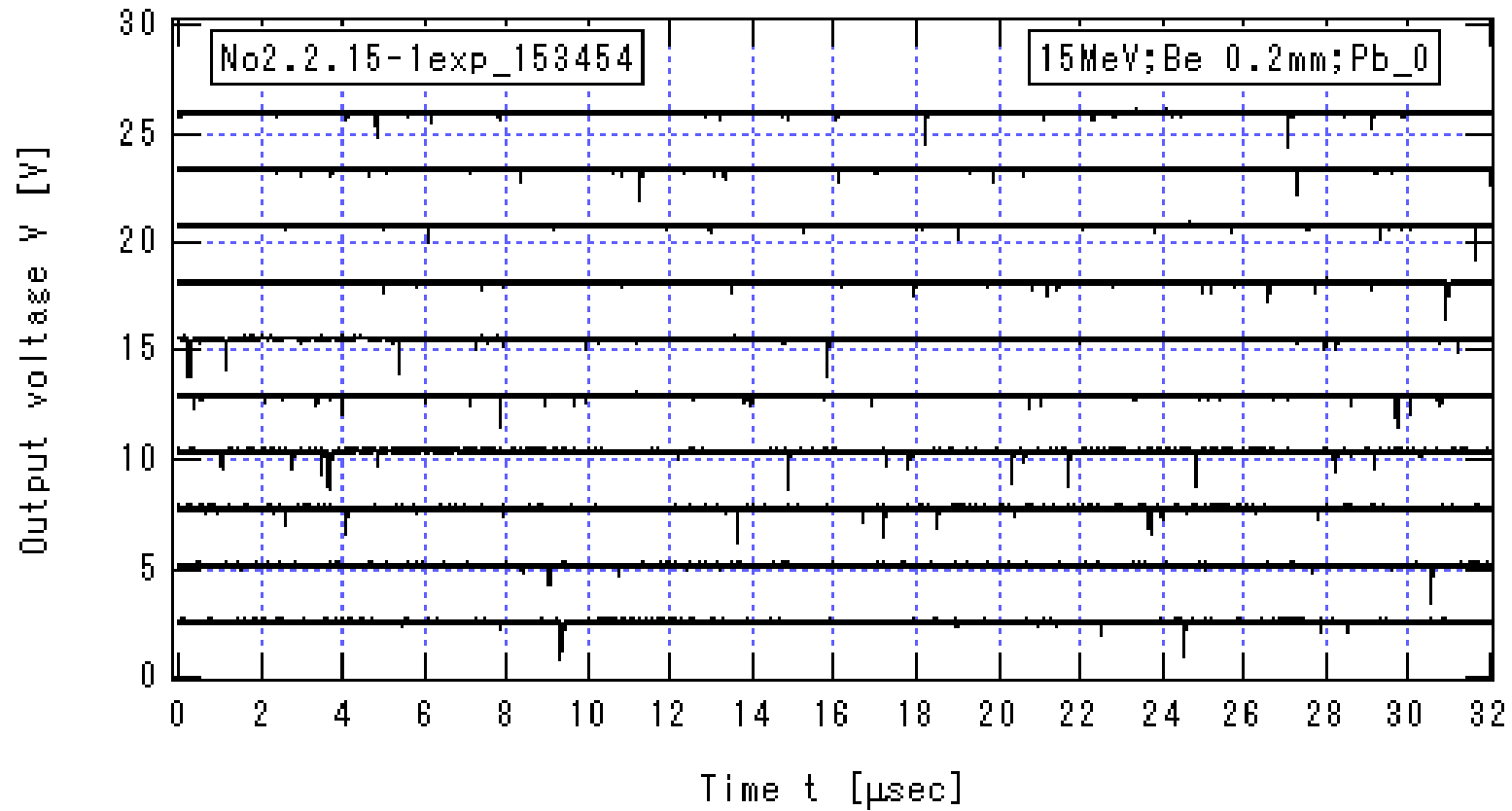


図 3.3.2-18\_1b  $I_{He}=0.913\mu A$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1b)

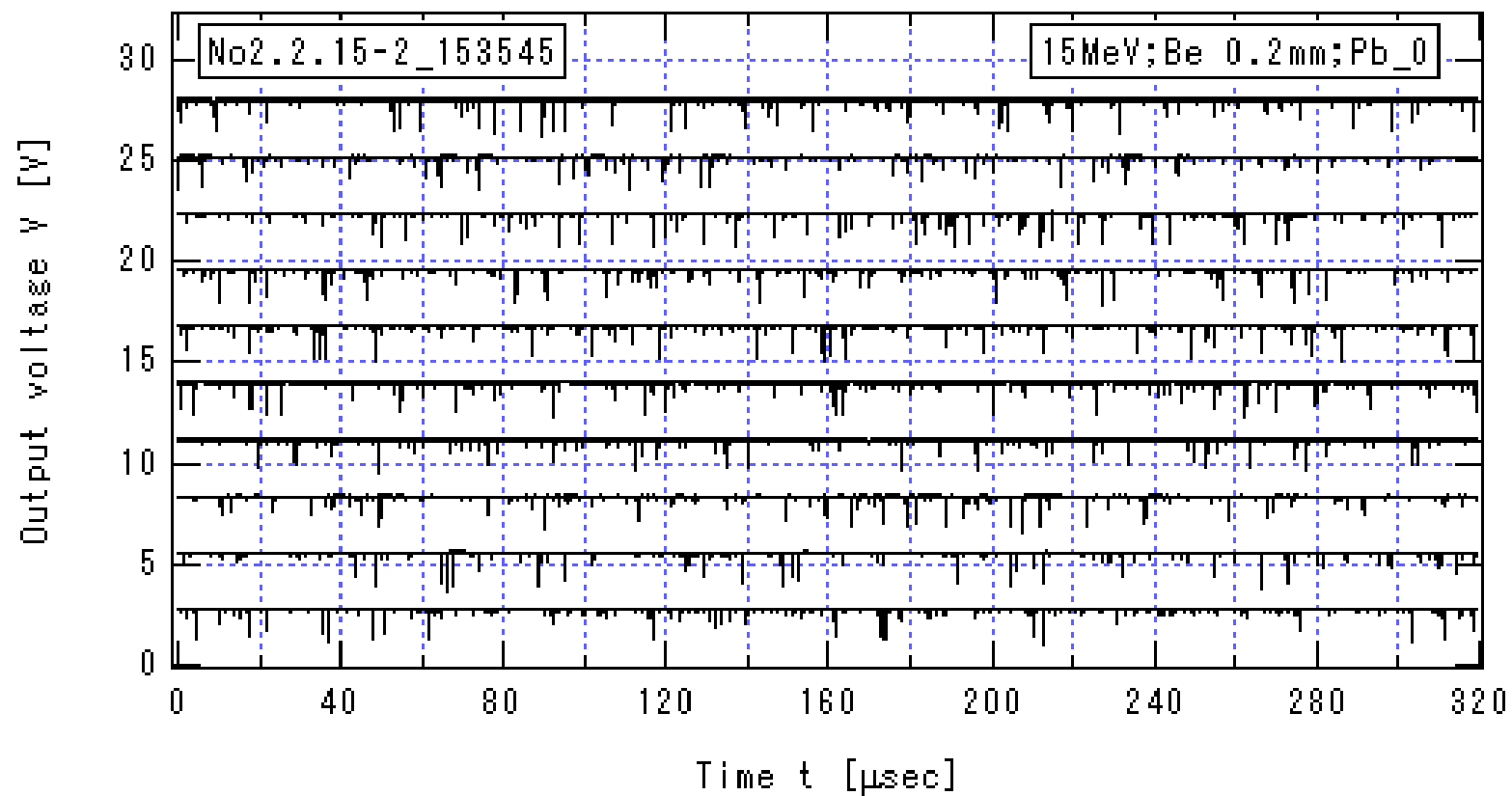


図 3.3.2-18\_2a  $I_{\text{He}}=0.913\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 0cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

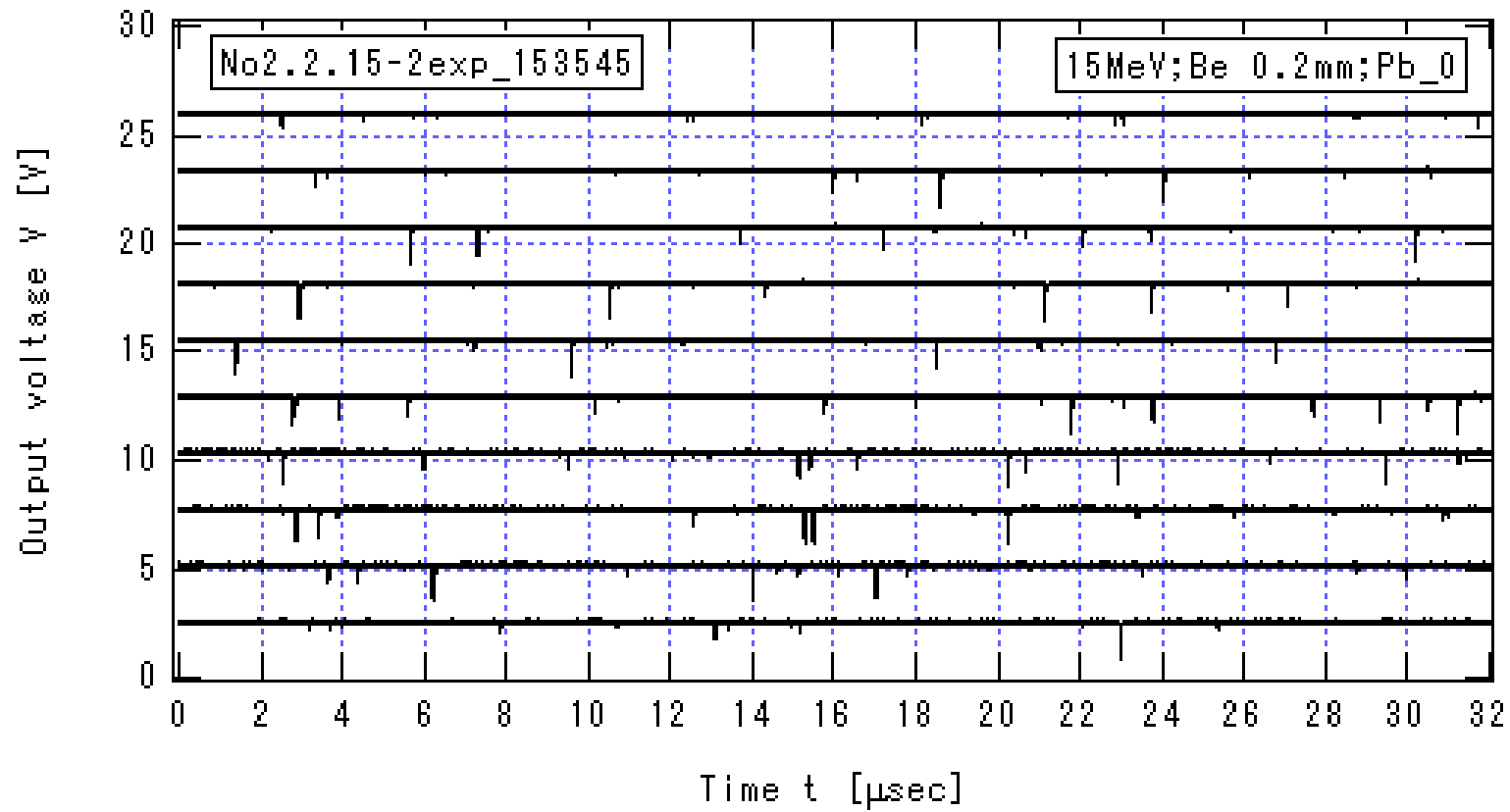


図 3.3.2-18\_2b  $I_{He}=0.913\mu A$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2b)

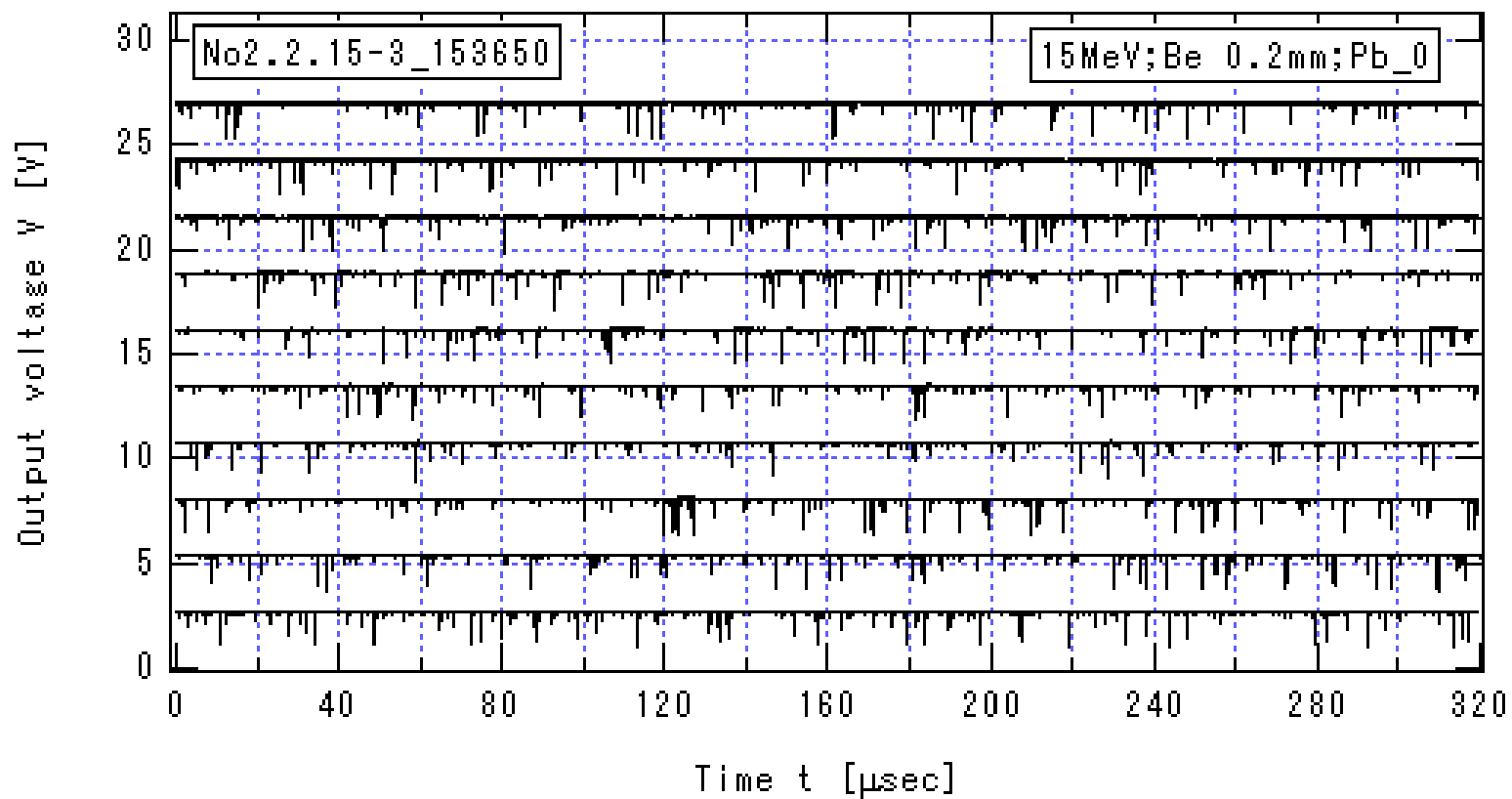


図 3.3.2-18\_3a  $I_{\text{He}}=0.913\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 0cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

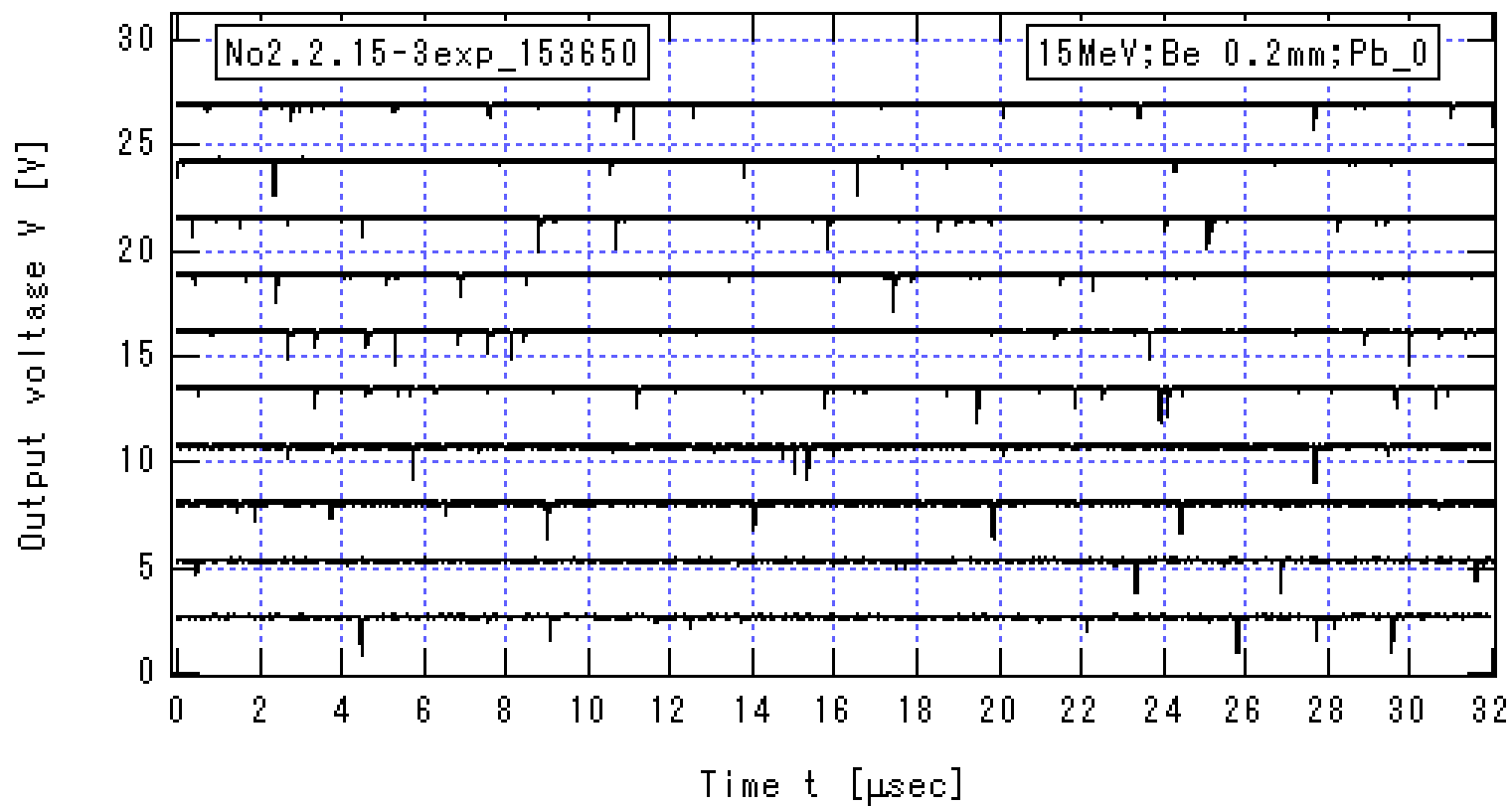


図 3.3.2-18\_3b  $I_{\text{He}}=0.913\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3b)

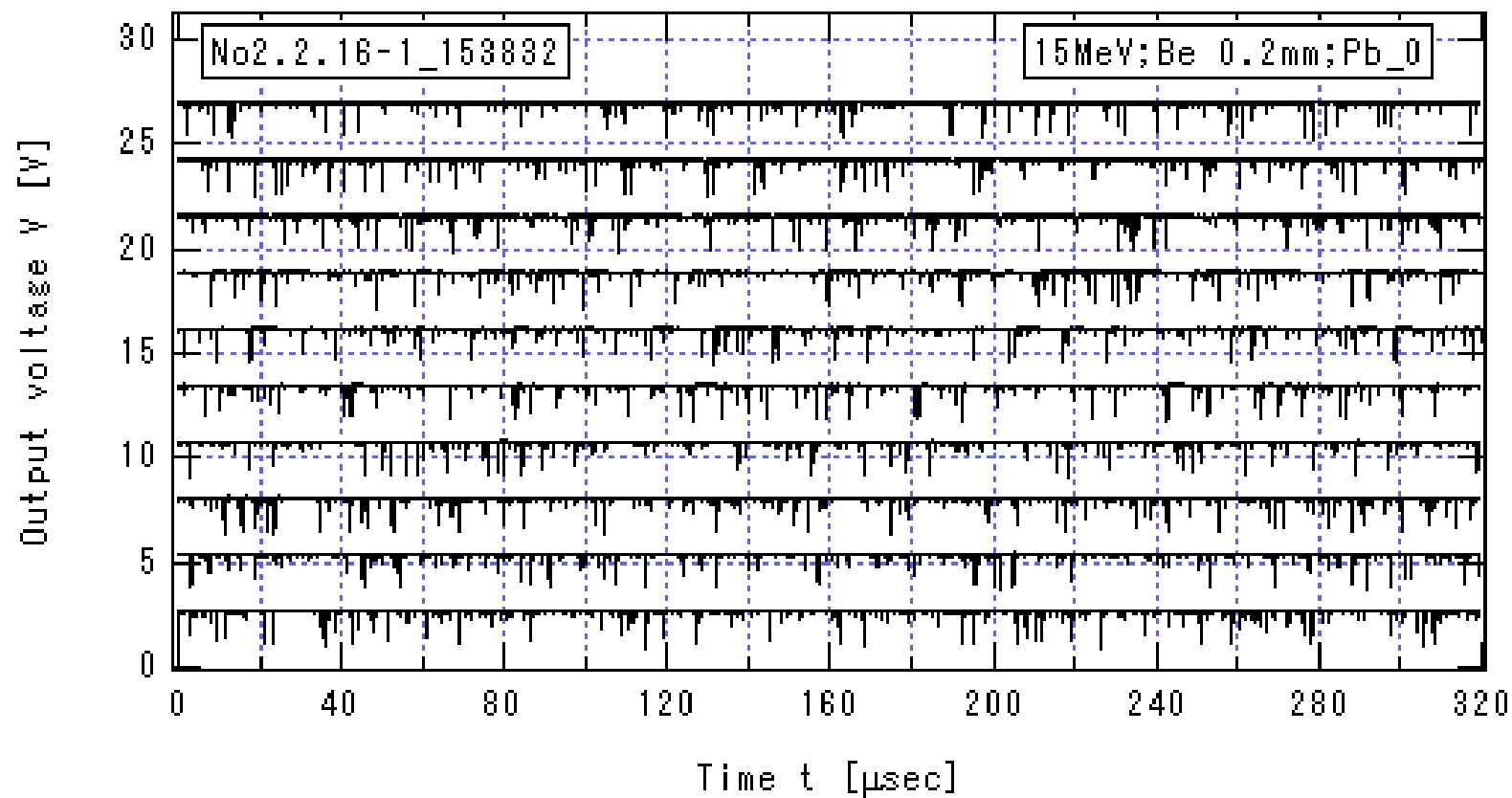


図 3.3.2-19\_1a  $I_{\text{He}}=1.500\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 0cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$



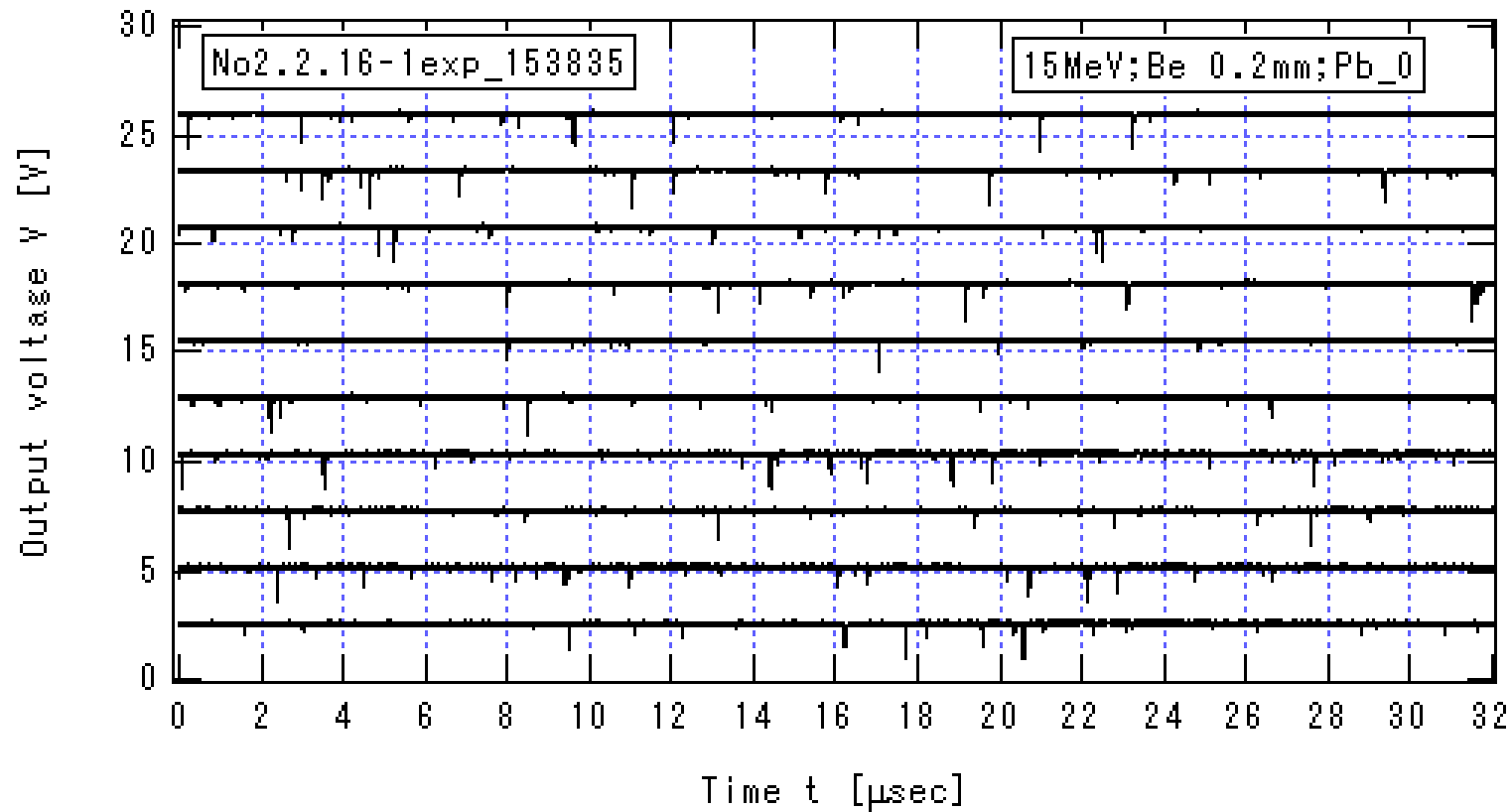


図 3.3.2-19\_1b  $I_{He}=1.500\mu A$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1b)

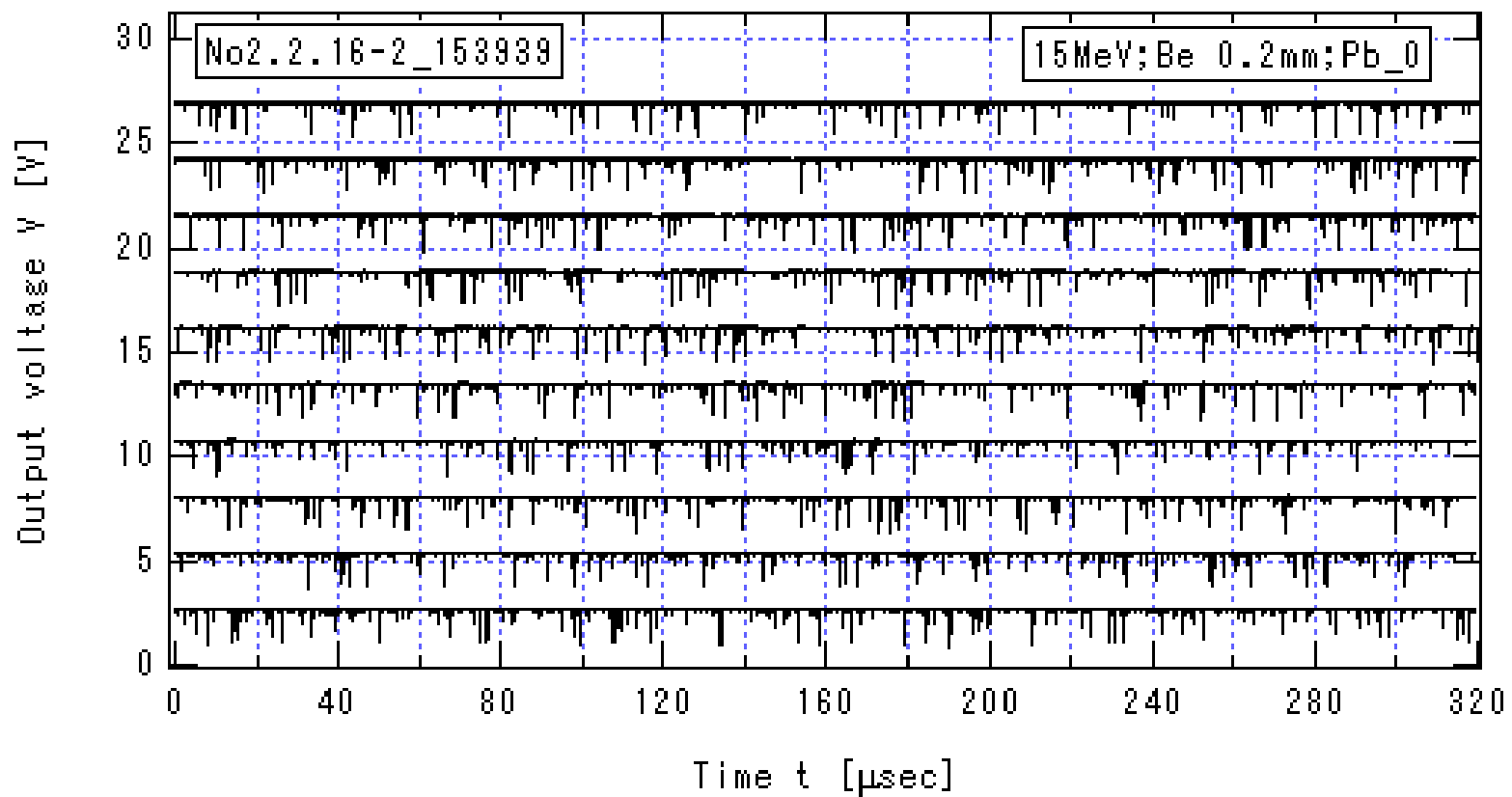


図 3.3.2-19\_2a  $I_{\text{He}}=1.500\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 0cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

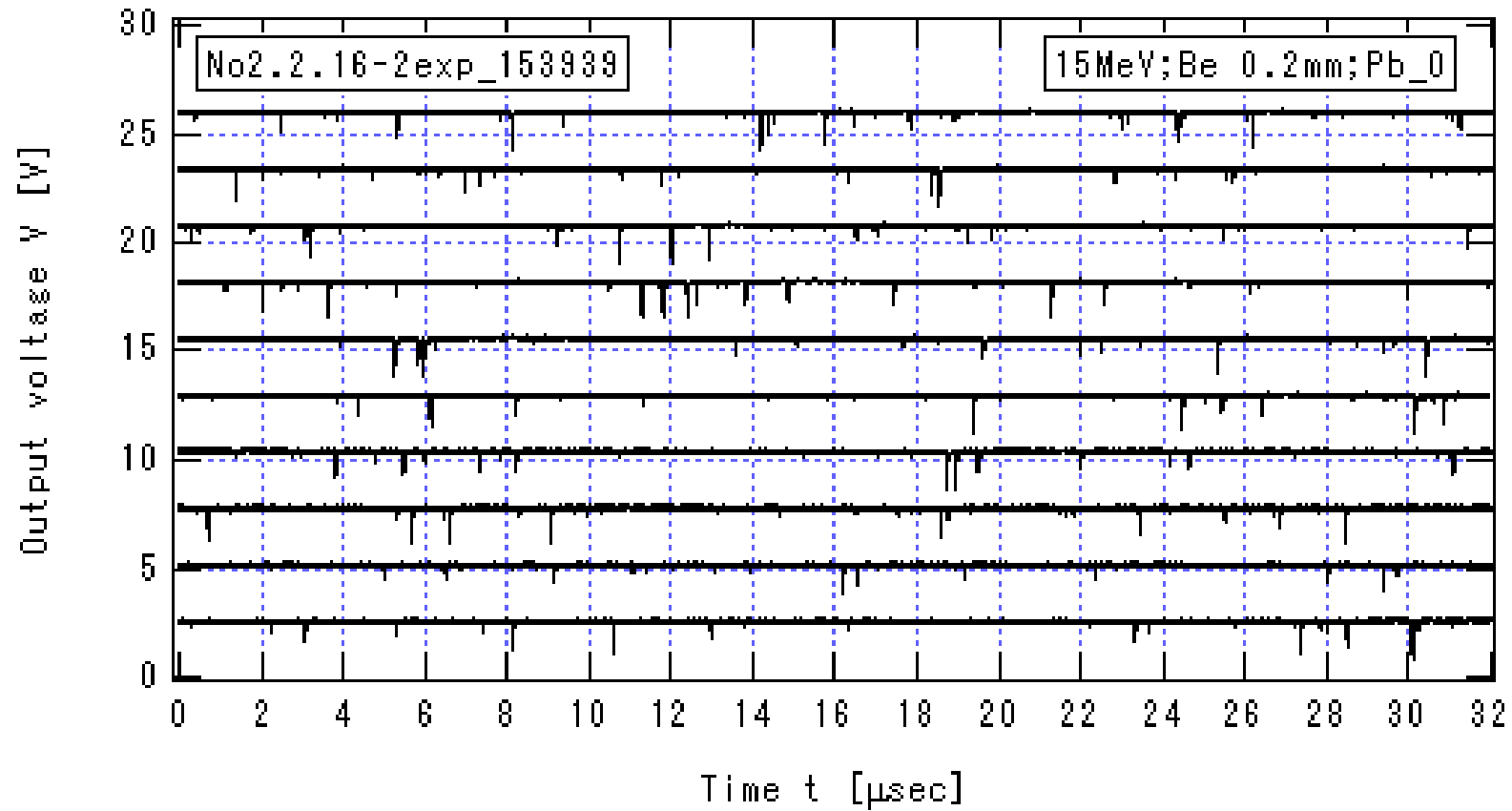


図 3.3.2-19\_2b  $I_{He}=1.500\mu A$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2b)

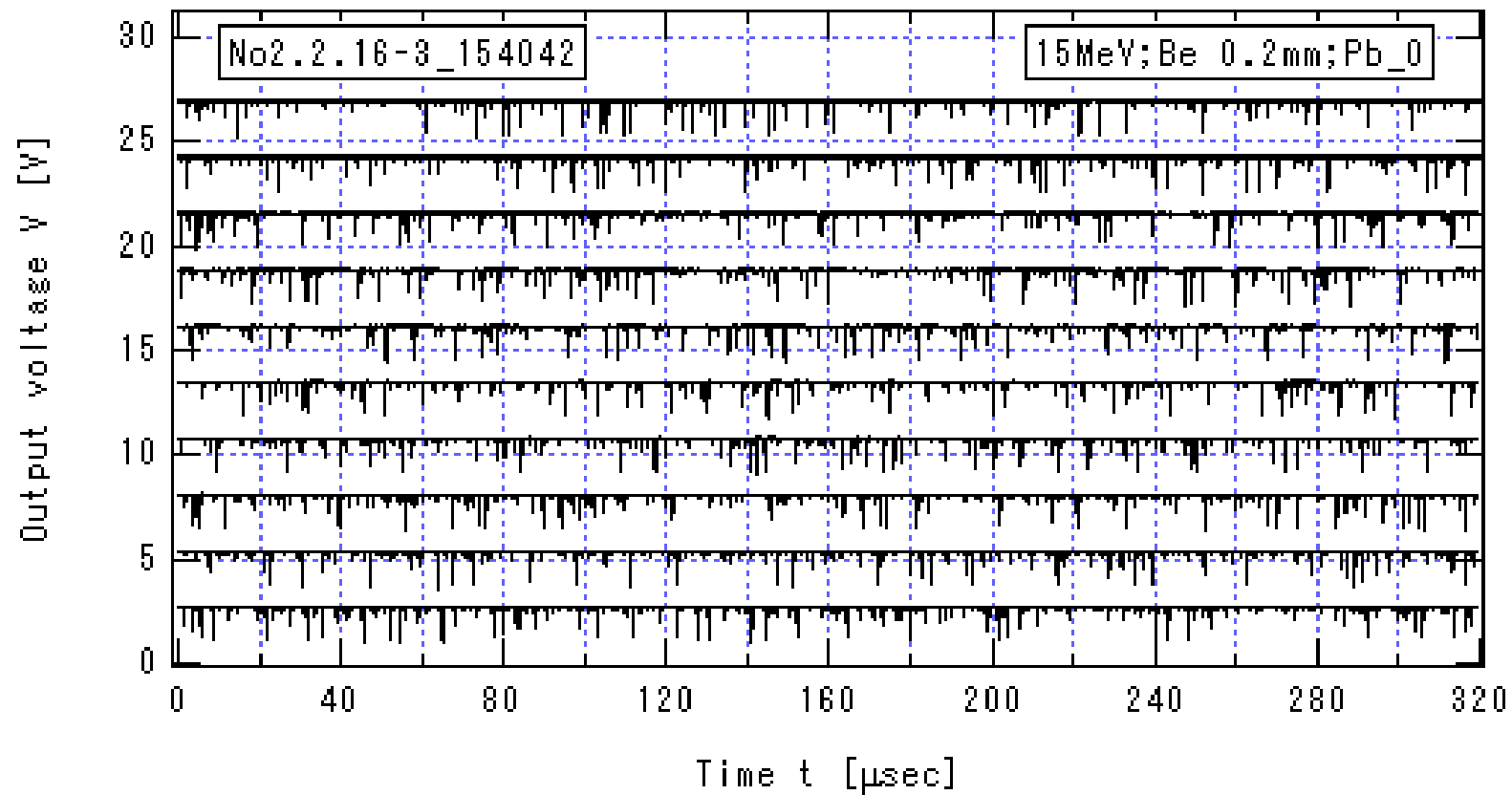


図 3.3.2-19\_3a  $I_{\text{He}}=1.500\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 0cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

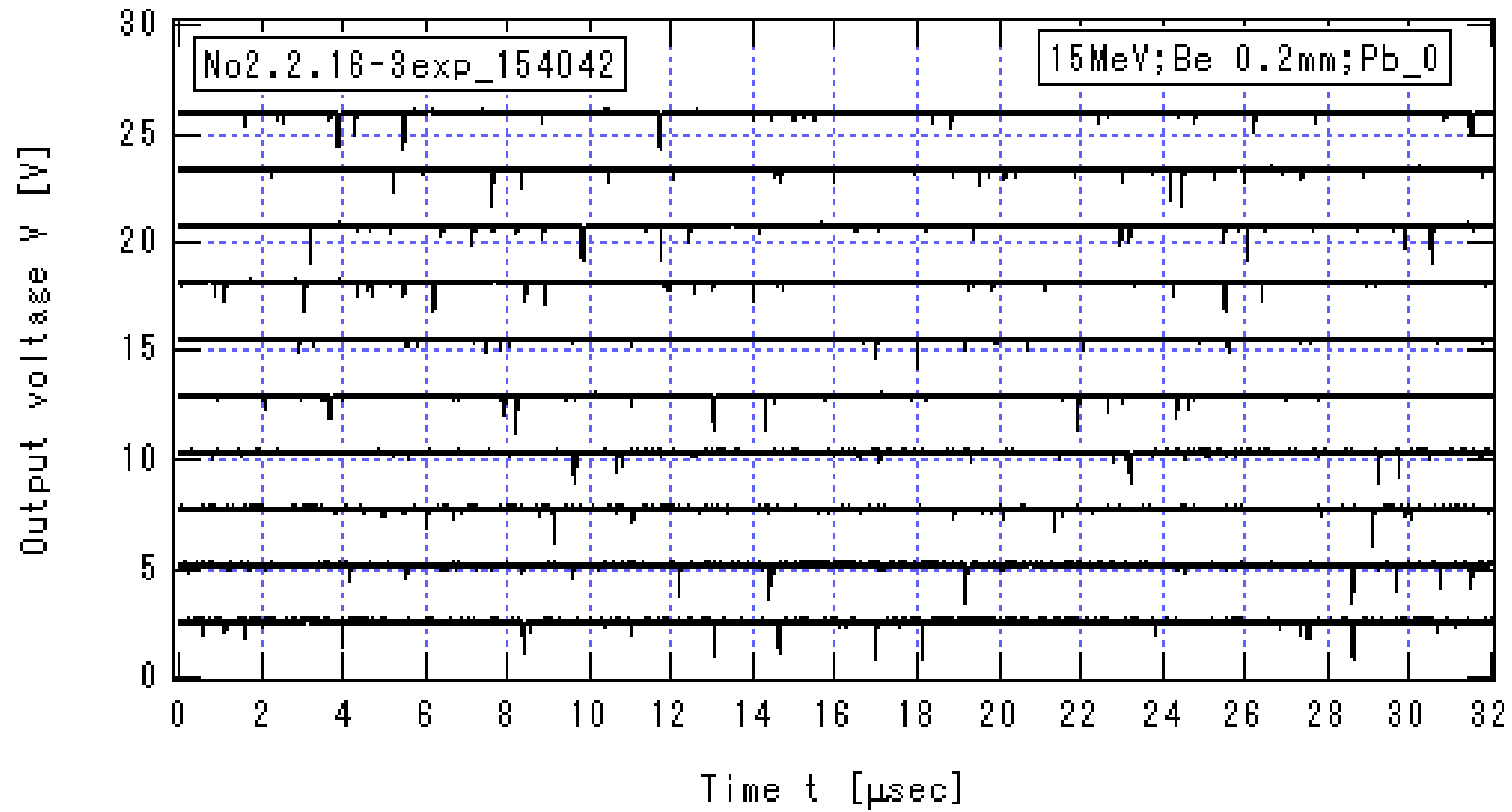


図 3.3.2-19\_3b  $I_{\text{He}}=1.500\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3b)

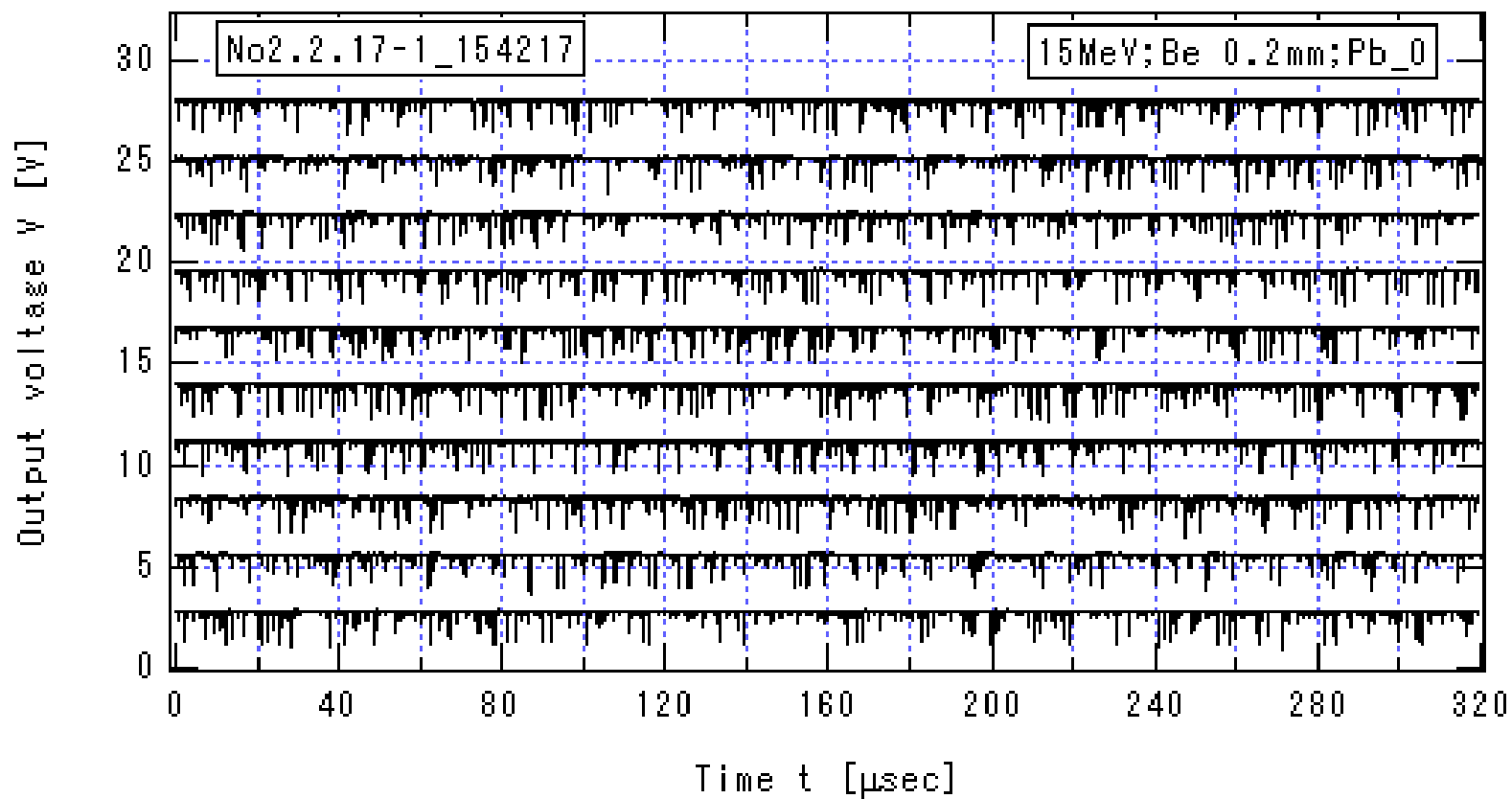


図 3.3.2-20\_1a  $I_{\text{He}}=2.743\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 0cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

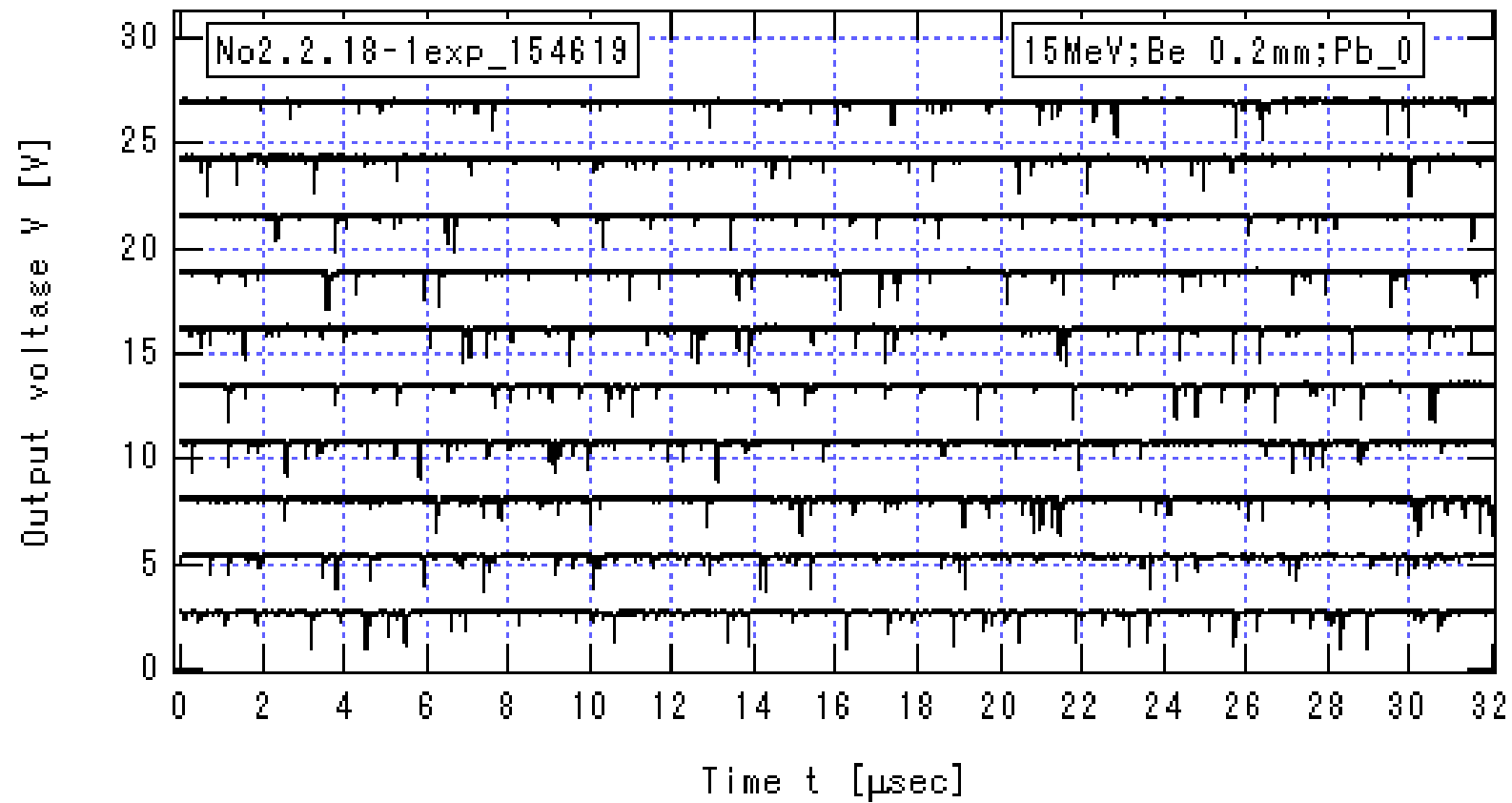


図 3.3.2-20\_1b  $I_{\text{He}}=2.743\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1b)

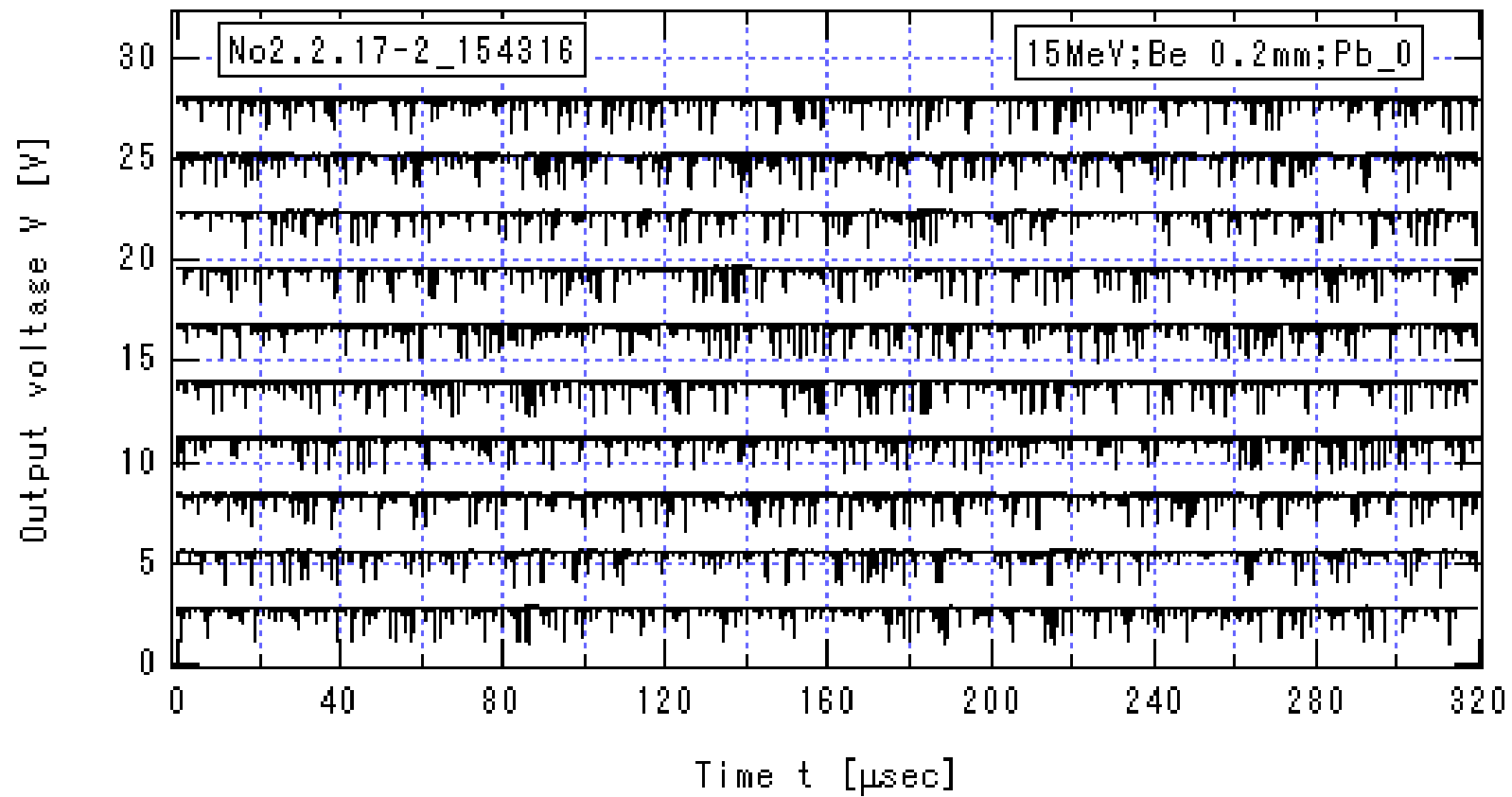


図 3.3.2-20\_2a  $I_{\text{He}}=2.743\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 0cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$



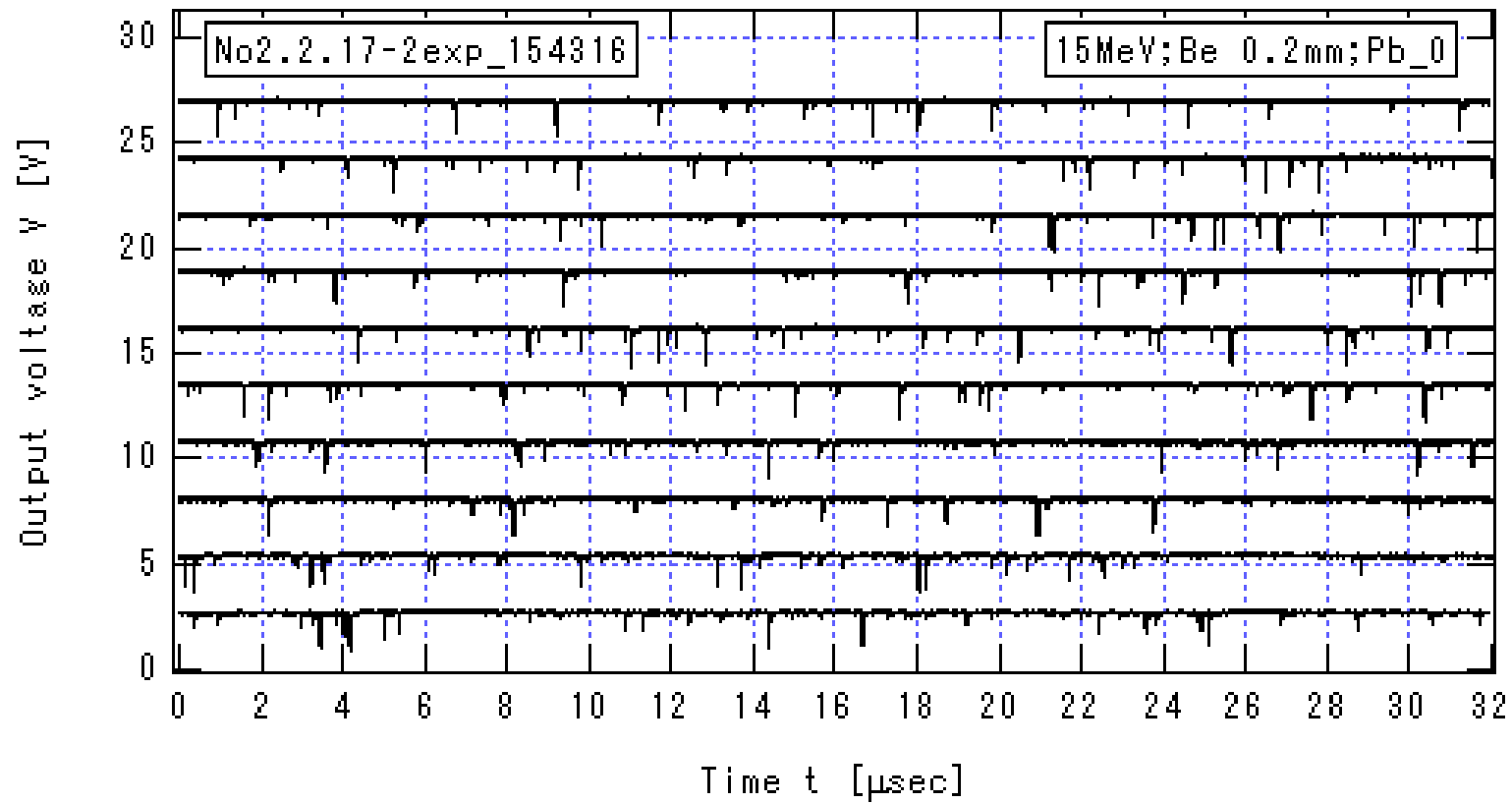


図 3.3.2-20\_2b  $I_{\text{He}}=2.743\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2b)

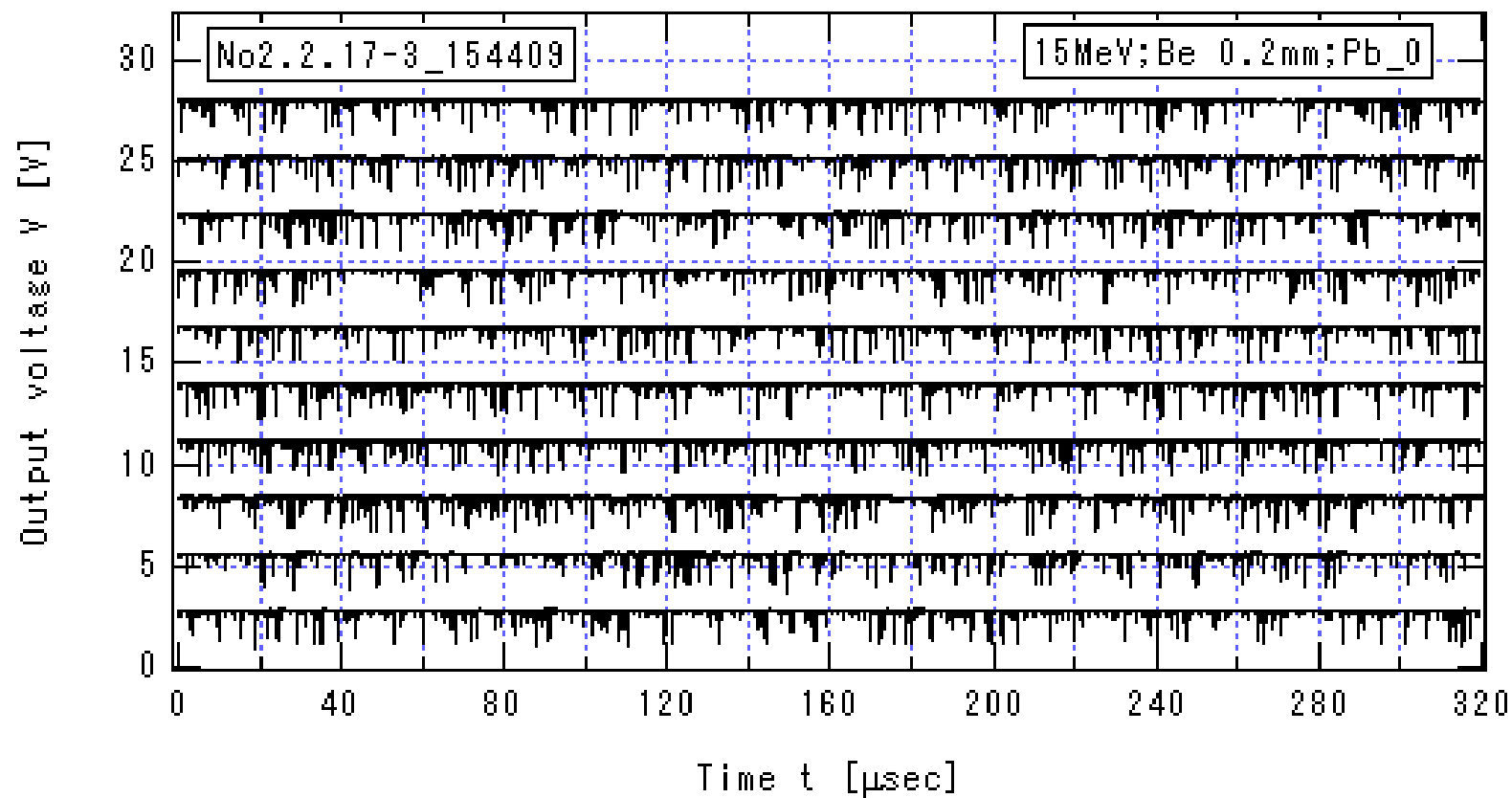


図 3.3.2-20\_3a  $I_{\text{He}}=2.743\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 0cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

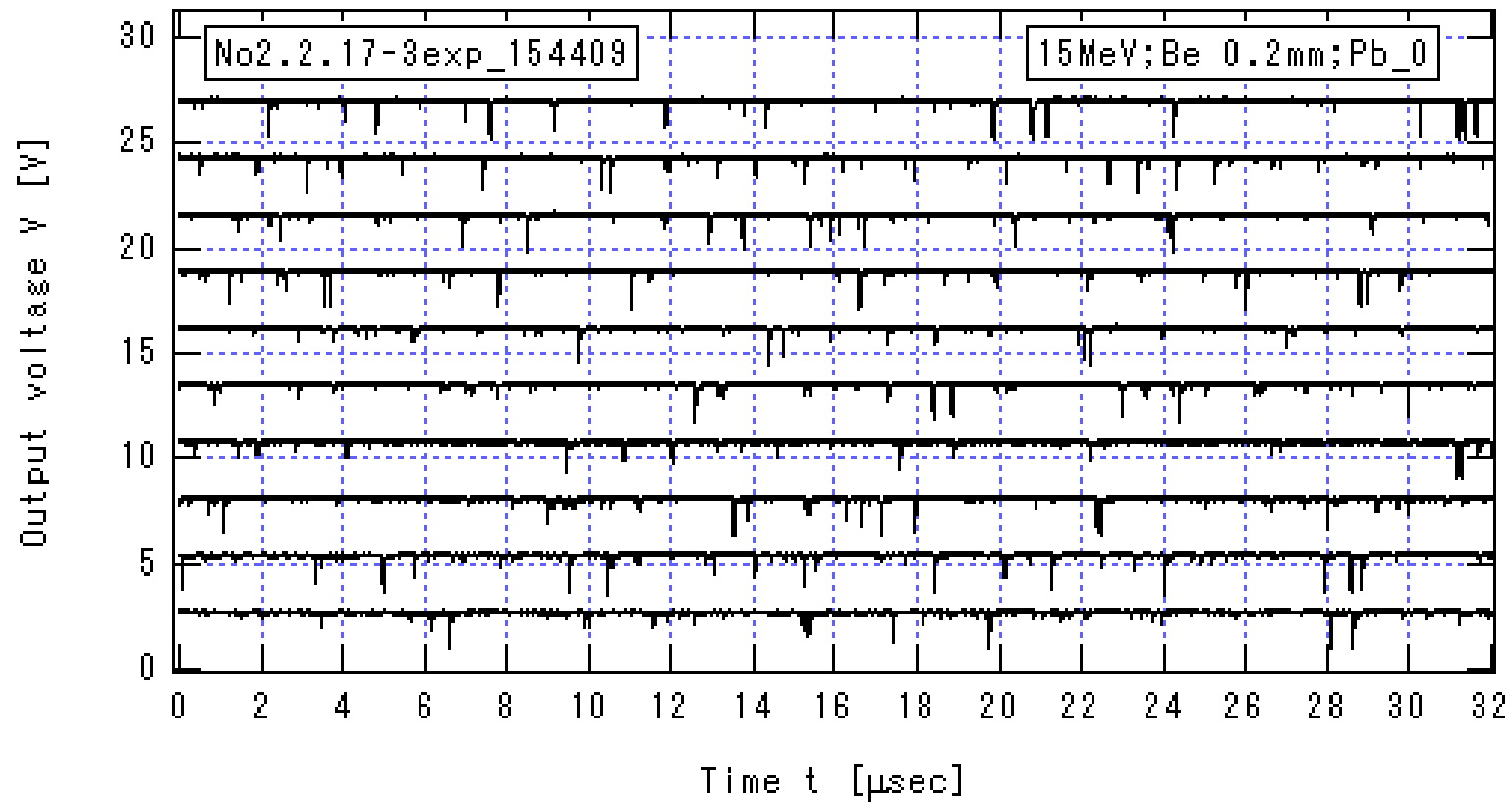


図 3.3.2-20\_3b  $I_{He}=2.743\mu A$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3b)

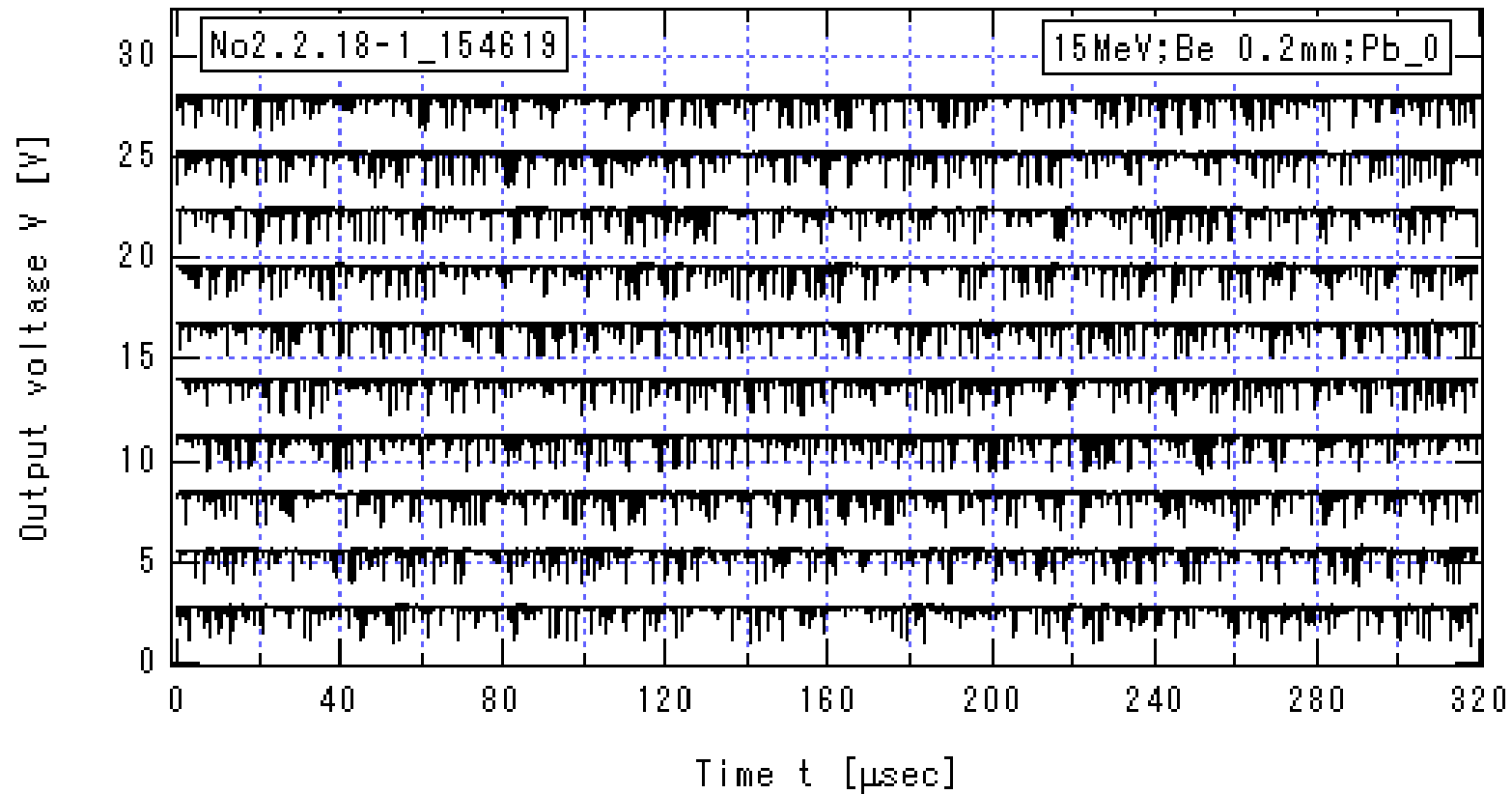


図 3.3.2-21\_1a  $I_{\text{He}}=3.607\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 0cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

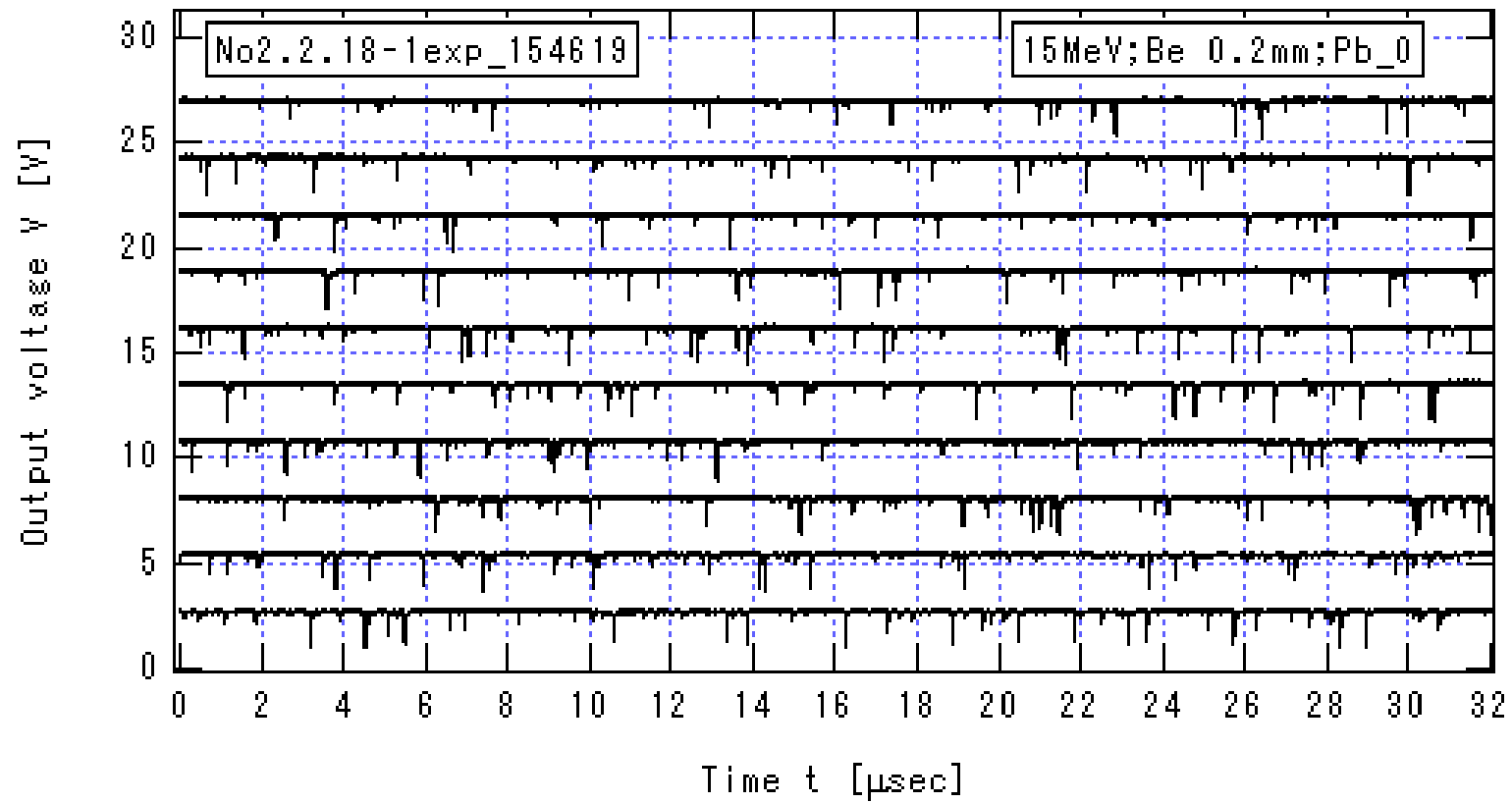


図 3.3.2-21\_1b  $I_{\text{He}}=3.607\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(1b)

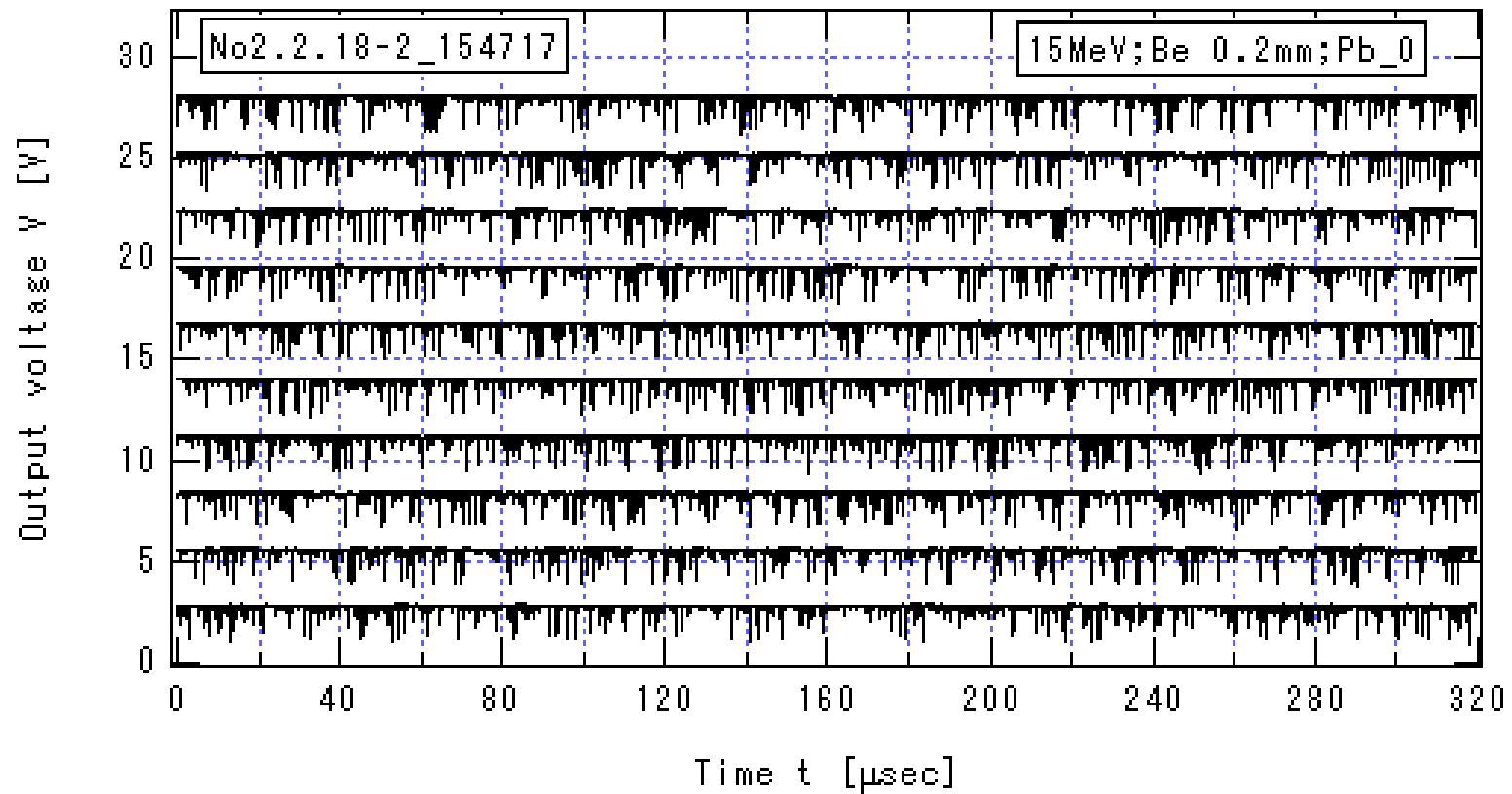


図 3.3.2-21\_2a  $I_{\text{He}}=3.607\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 0cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

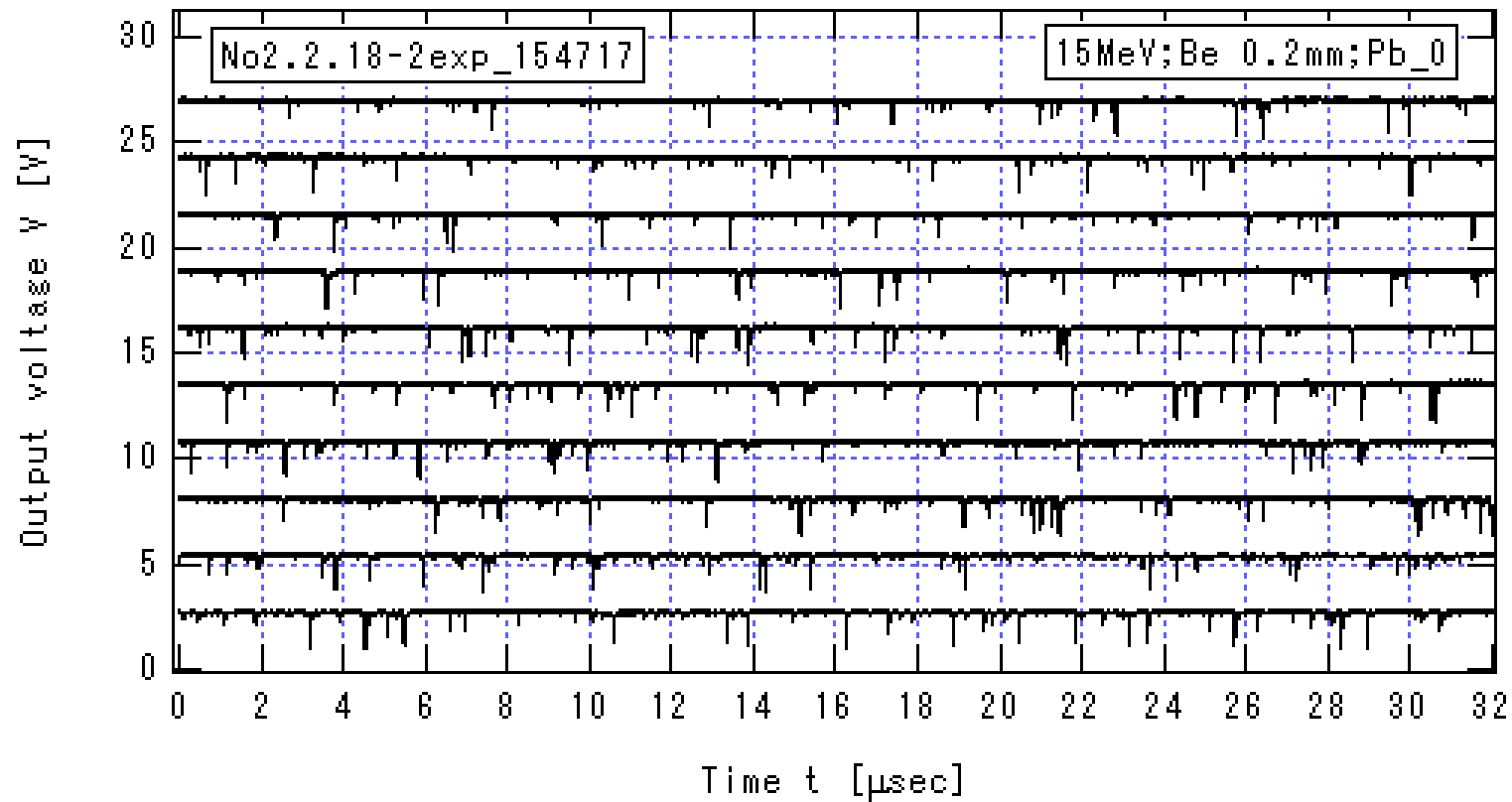


図 3.3.2-21\_2b  $I_{He}=3.607\mu A$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(2b)

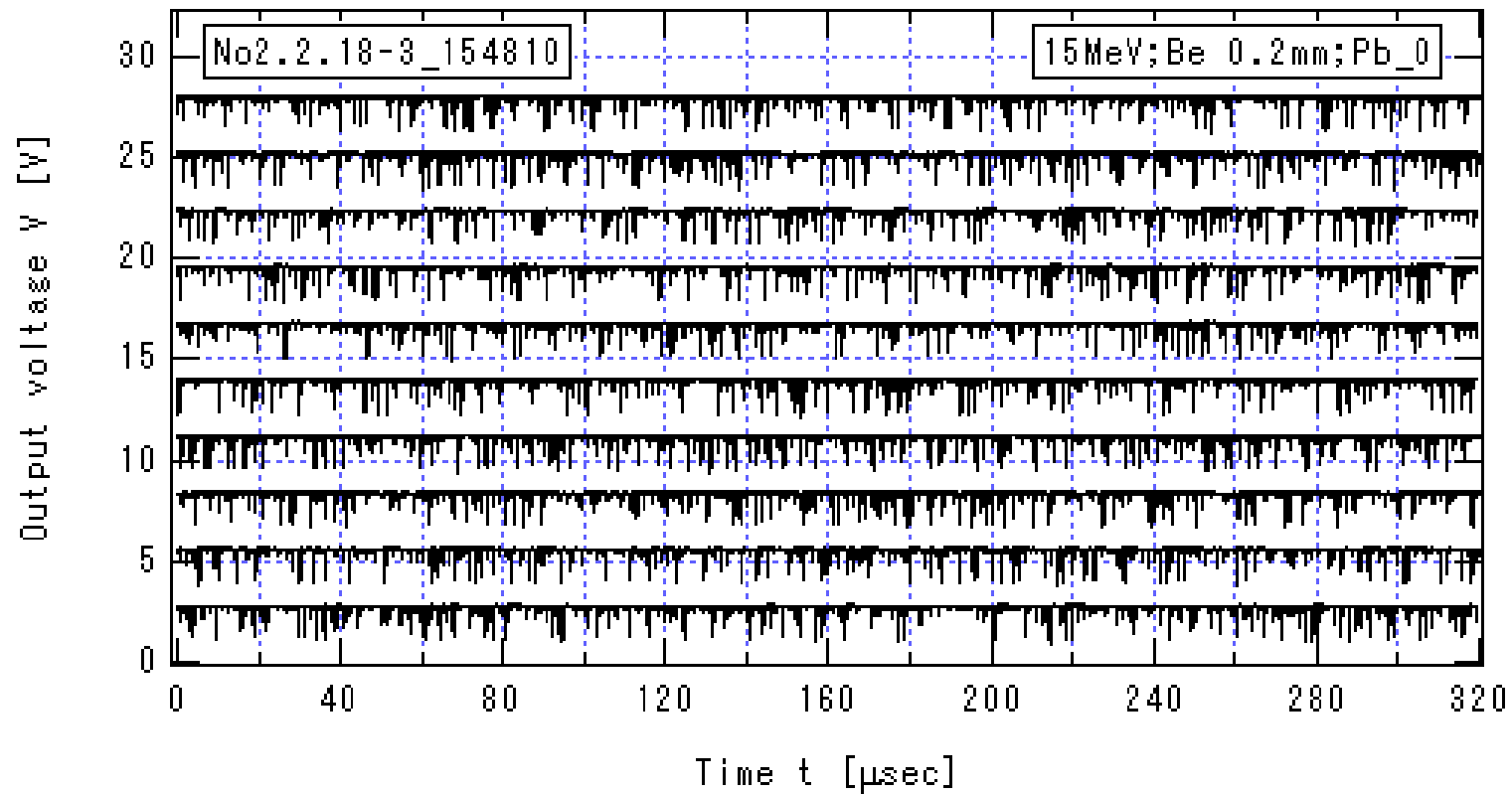


図 3.3.2-21\_3a  $I_{\text{He}}=3.607\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3a)

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 0cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$



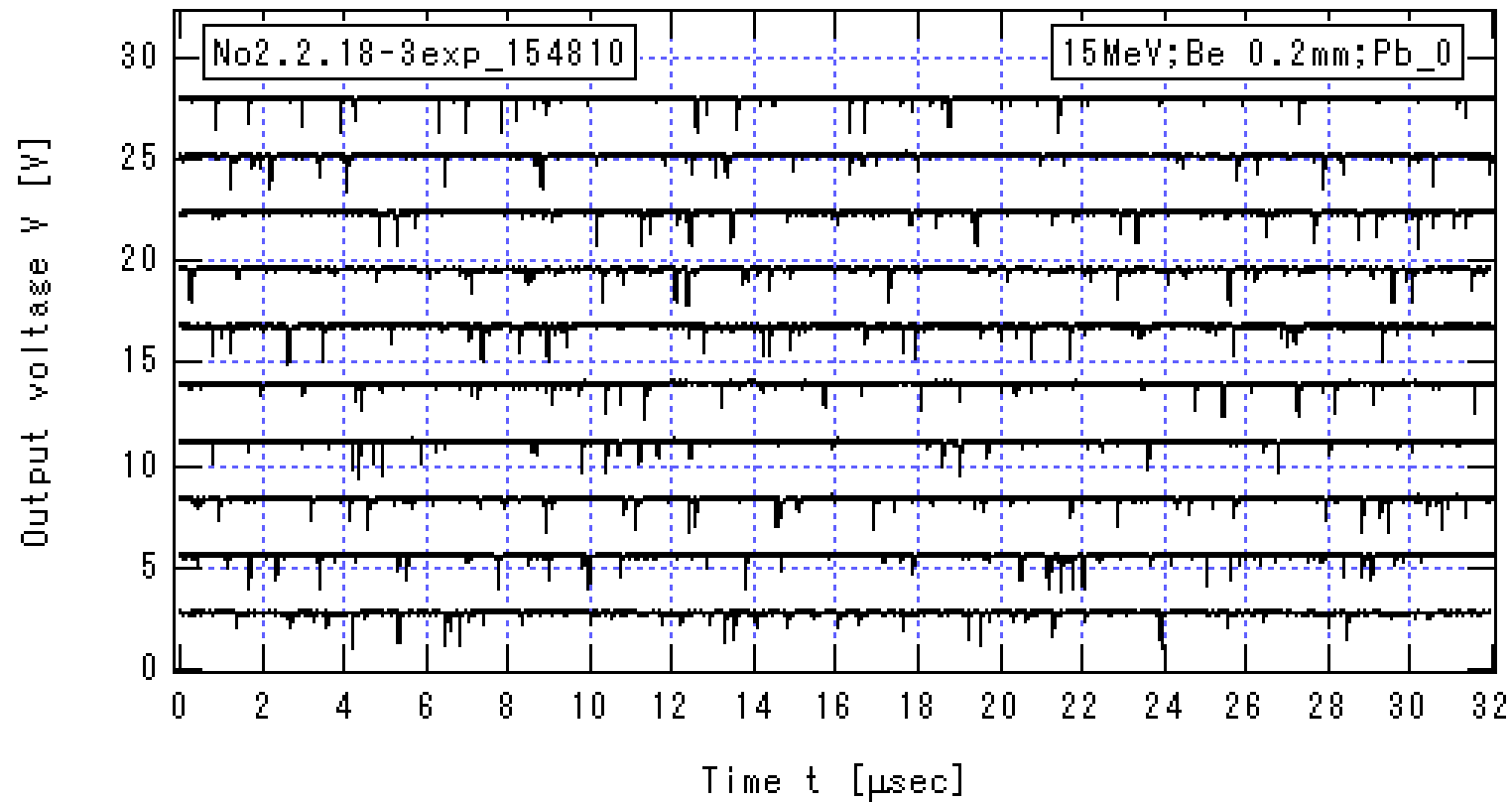


図 3.3.2-21\_3b  $I_{He}=3.607\mu A$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(3b)

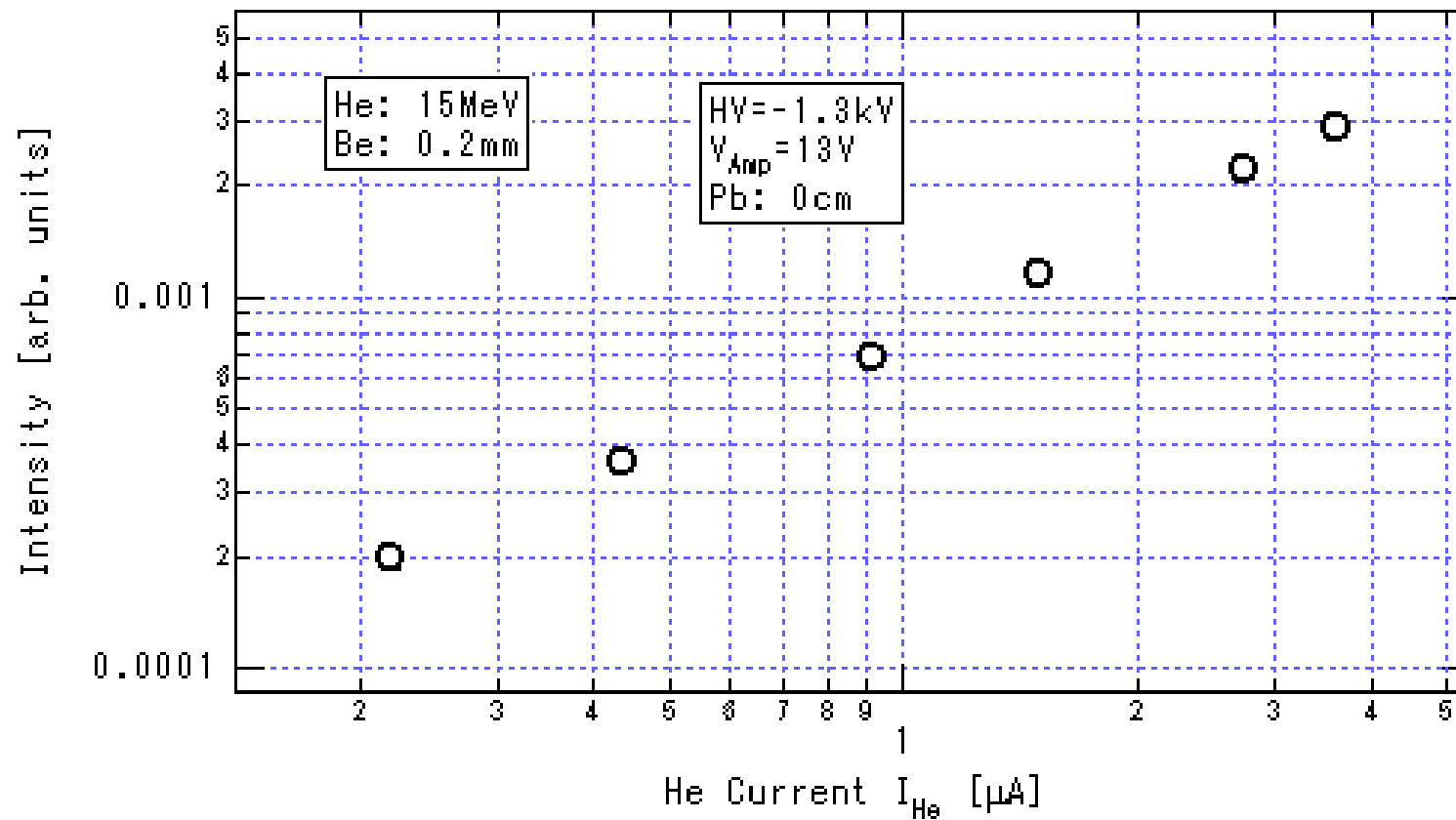


図 3.3.2-22 放射線強度の He イオン電流値  $I_{\text{He}}$  依存性

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 0cm, HV=-1.3 kV,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

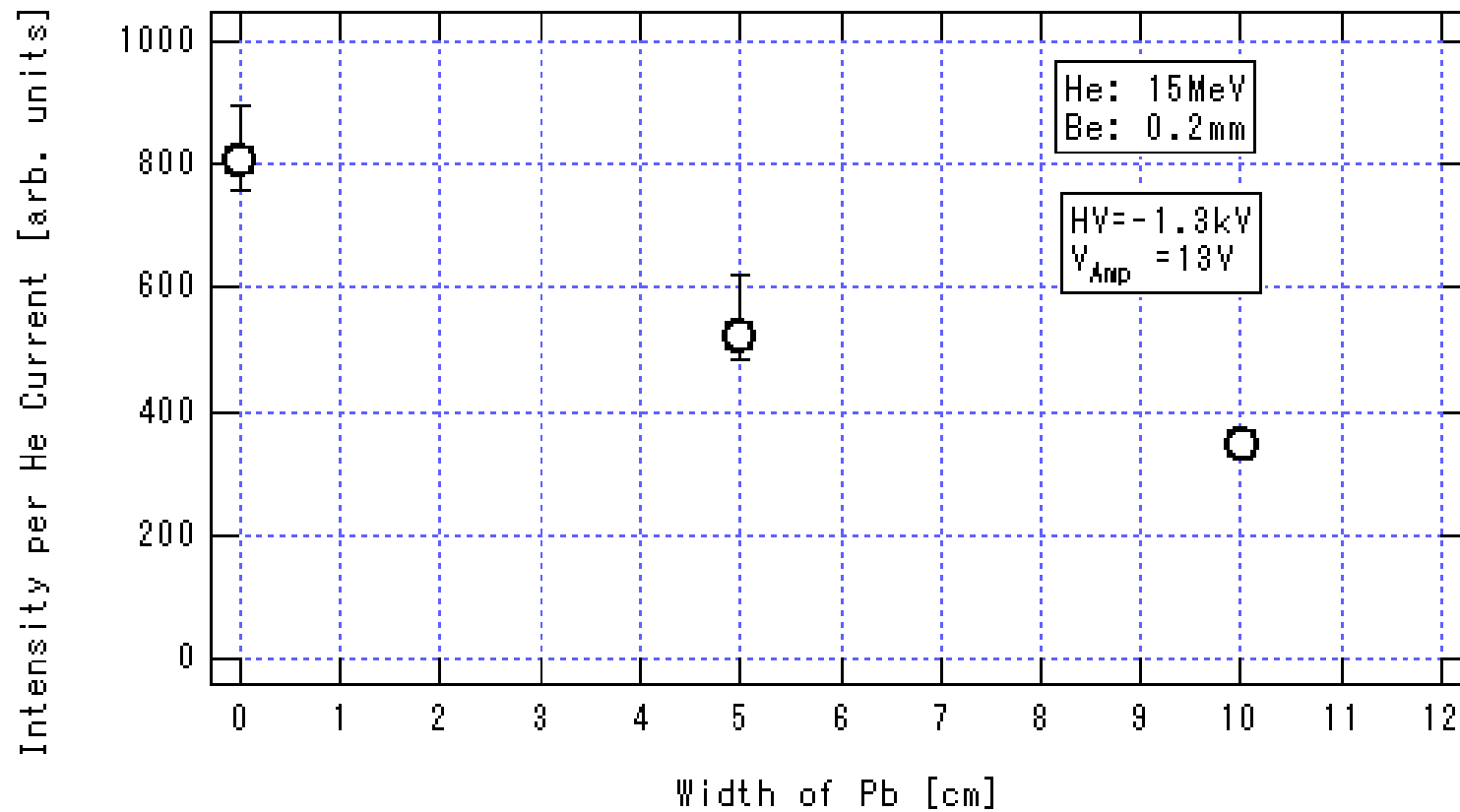


図 3.3.2-23 入射ヘリウム数で規格した放射線強度の鉛厚に対する依存性

$E_{\text{He}} = 15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, HV=-1.3 kV,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

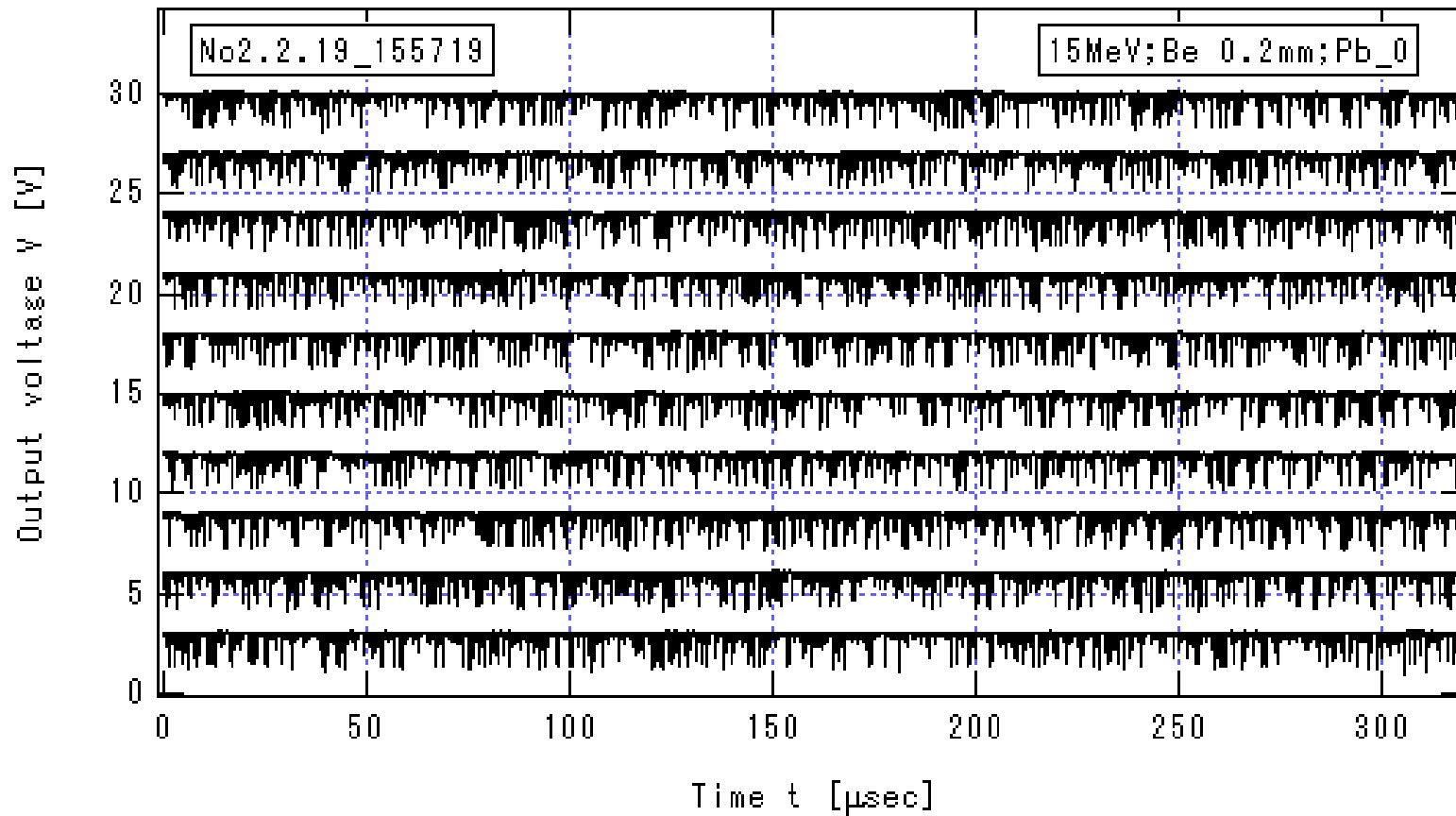


図 3.3.2-24\_a  $I_{\text{He}}=5.069\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化  
 $E_{\text{He}}=15\text{MeV}$ , Be 厚 0.2mm, Pb の厚さ 0cm,  $HV=-1.3\text{ kV}$ ,  $V_{\text{Amp}}=13\text{V}$

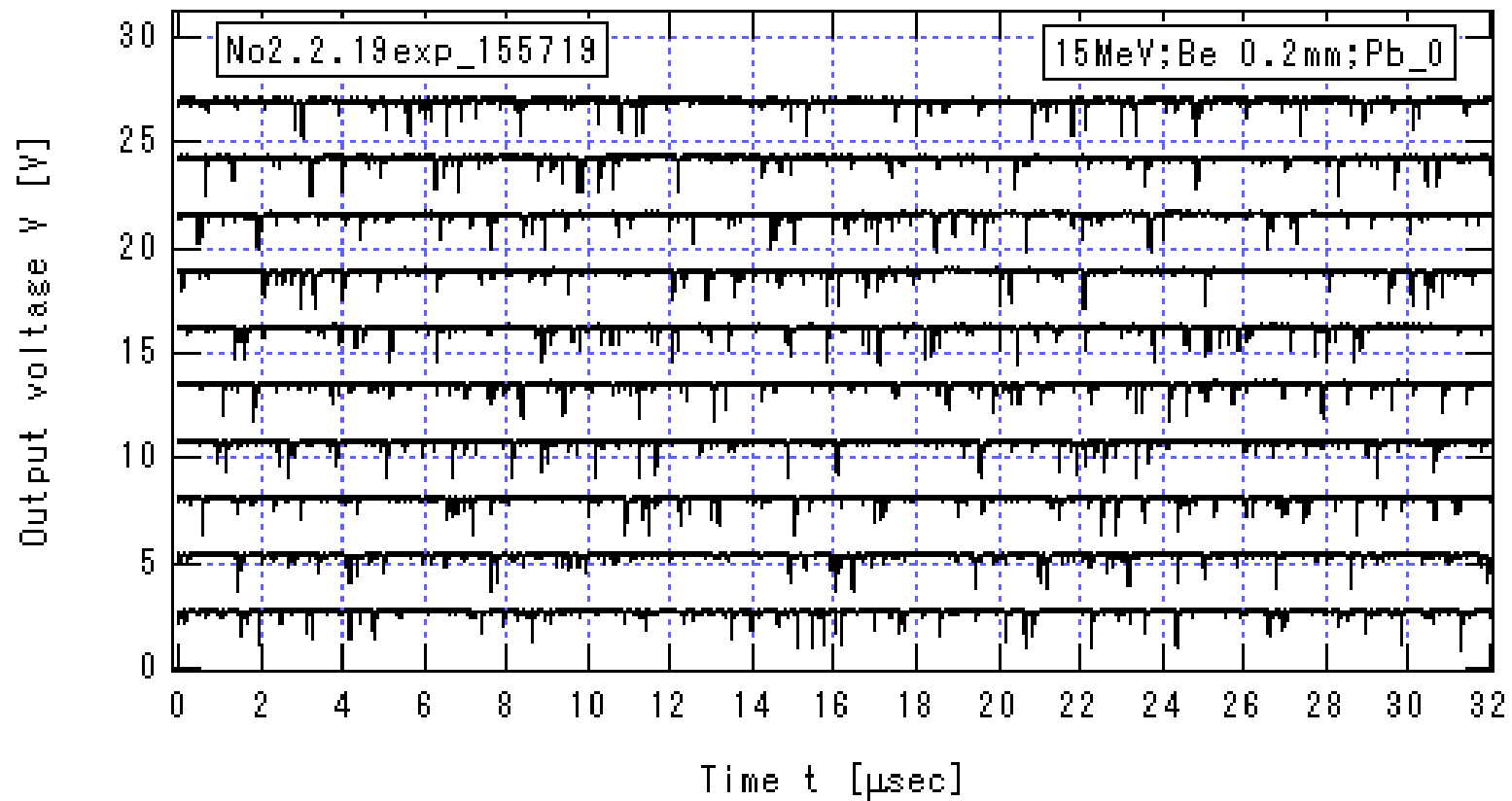


図 3.3.2-24\_b  $I_{\text{He}}=5.069\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化

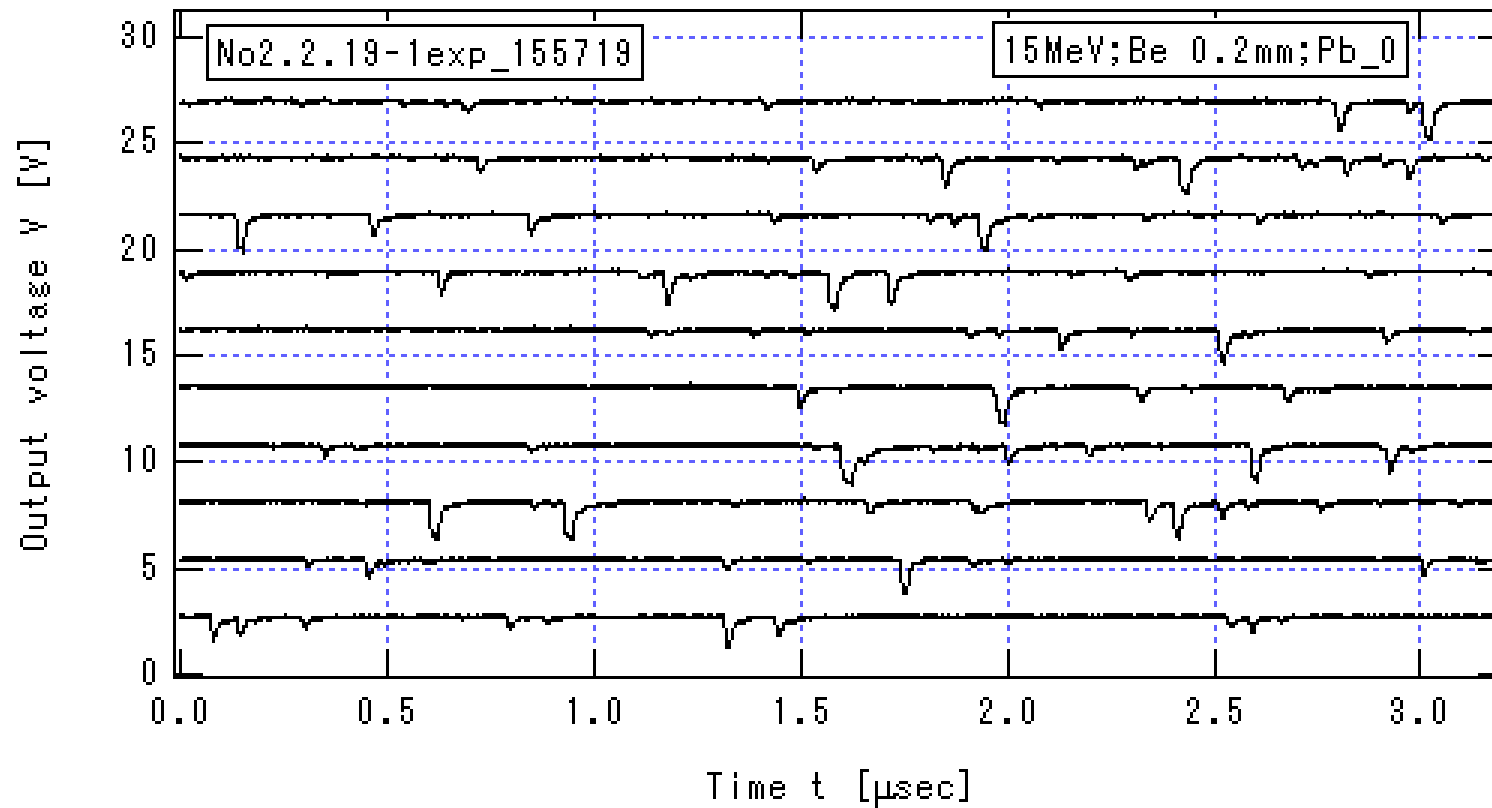


図 3.3.2-24\_c1  $I_{\text{He}}=5.069\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(c1)

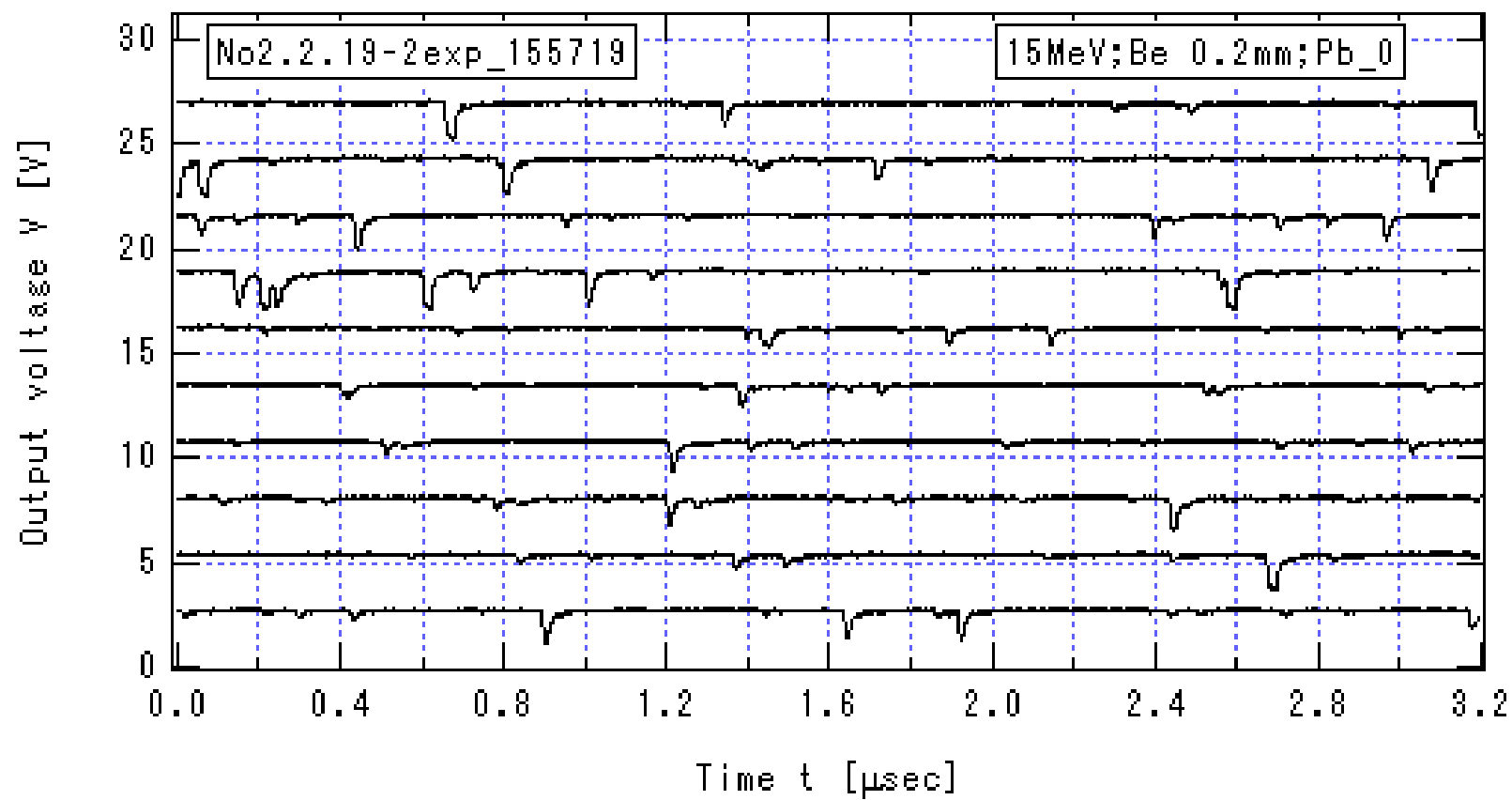


図 3.3.2-24\_c2  $I_{\text{He}}=5.069\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(c2)

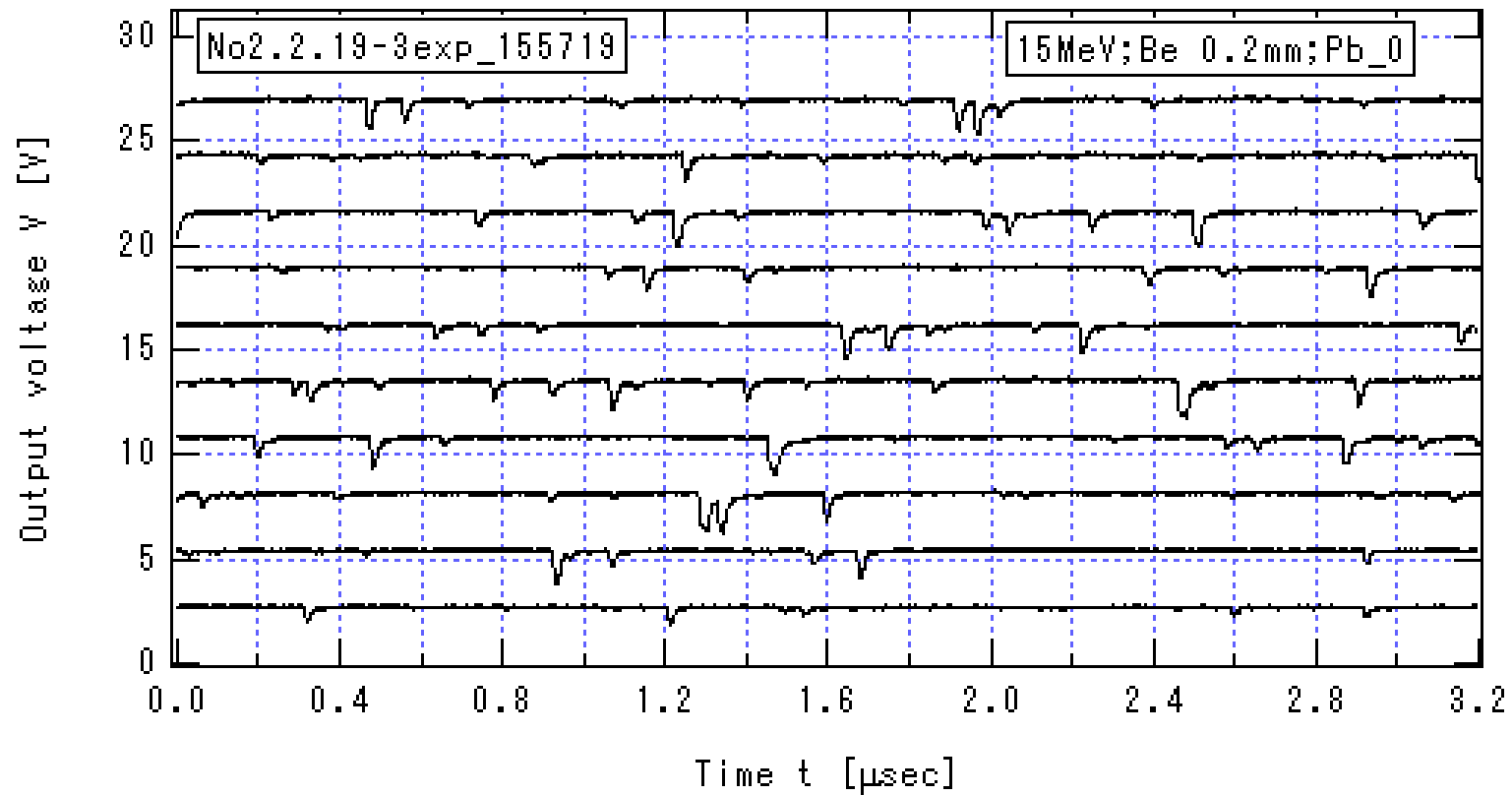


図 3.3.2-24\_c3  $I_{\text{He}}=5.069\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(c3)



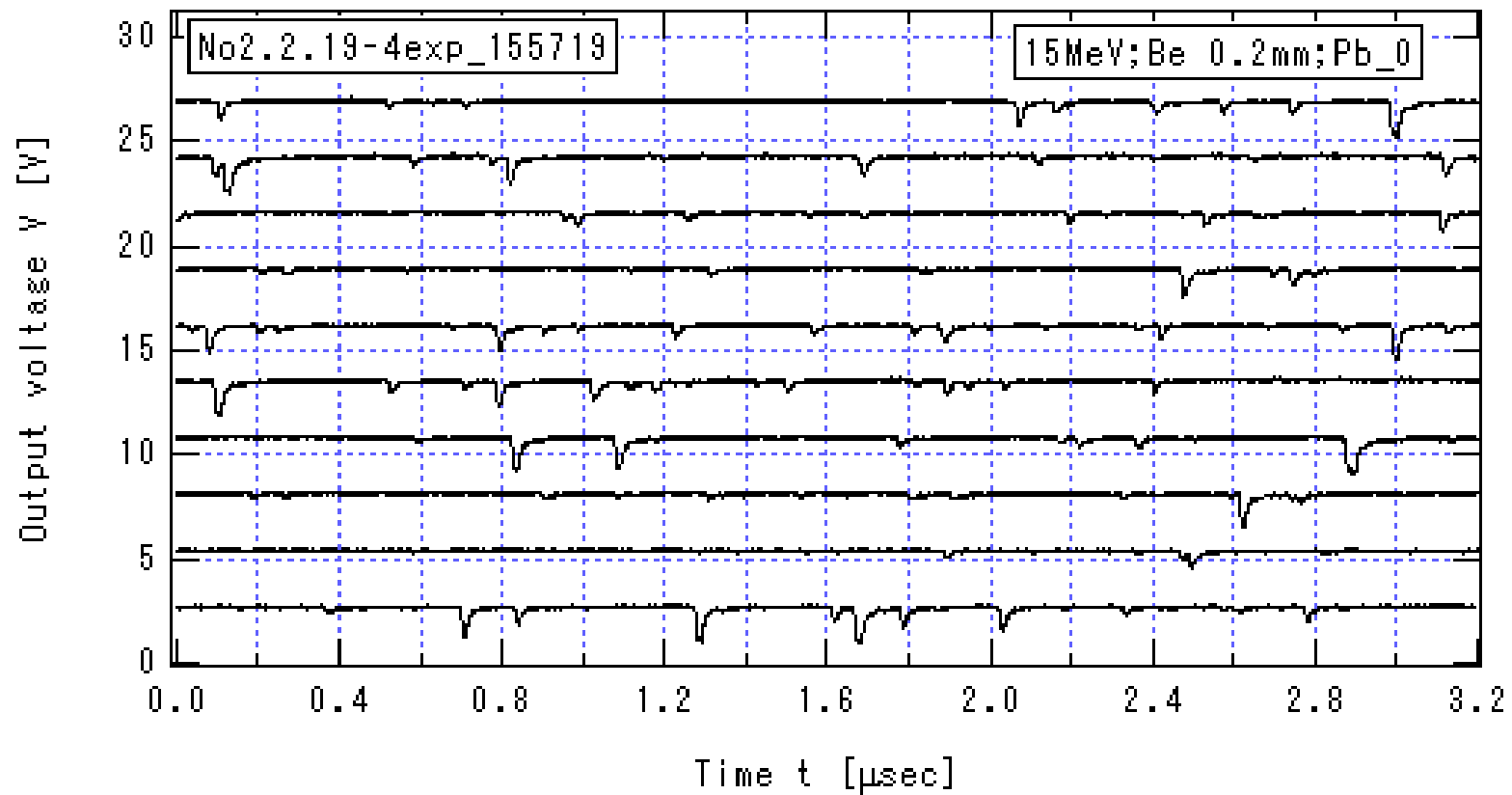


図 3.3.2-24\_c4  $I_{\text{He}}=5.069\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(c4)

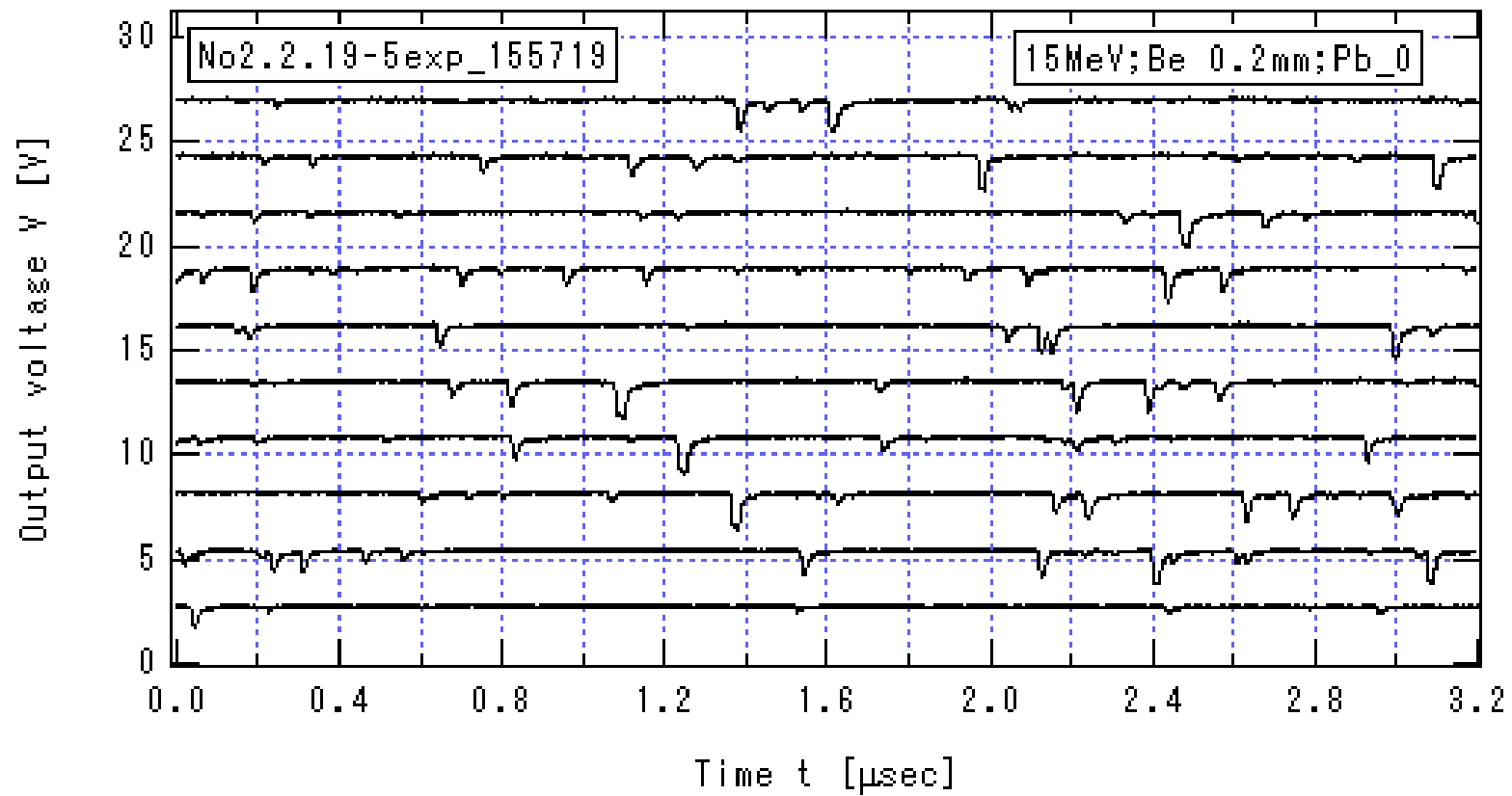


図 3.3.2-24\_c5  $I_{\text{He}}=5.069\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(c5)

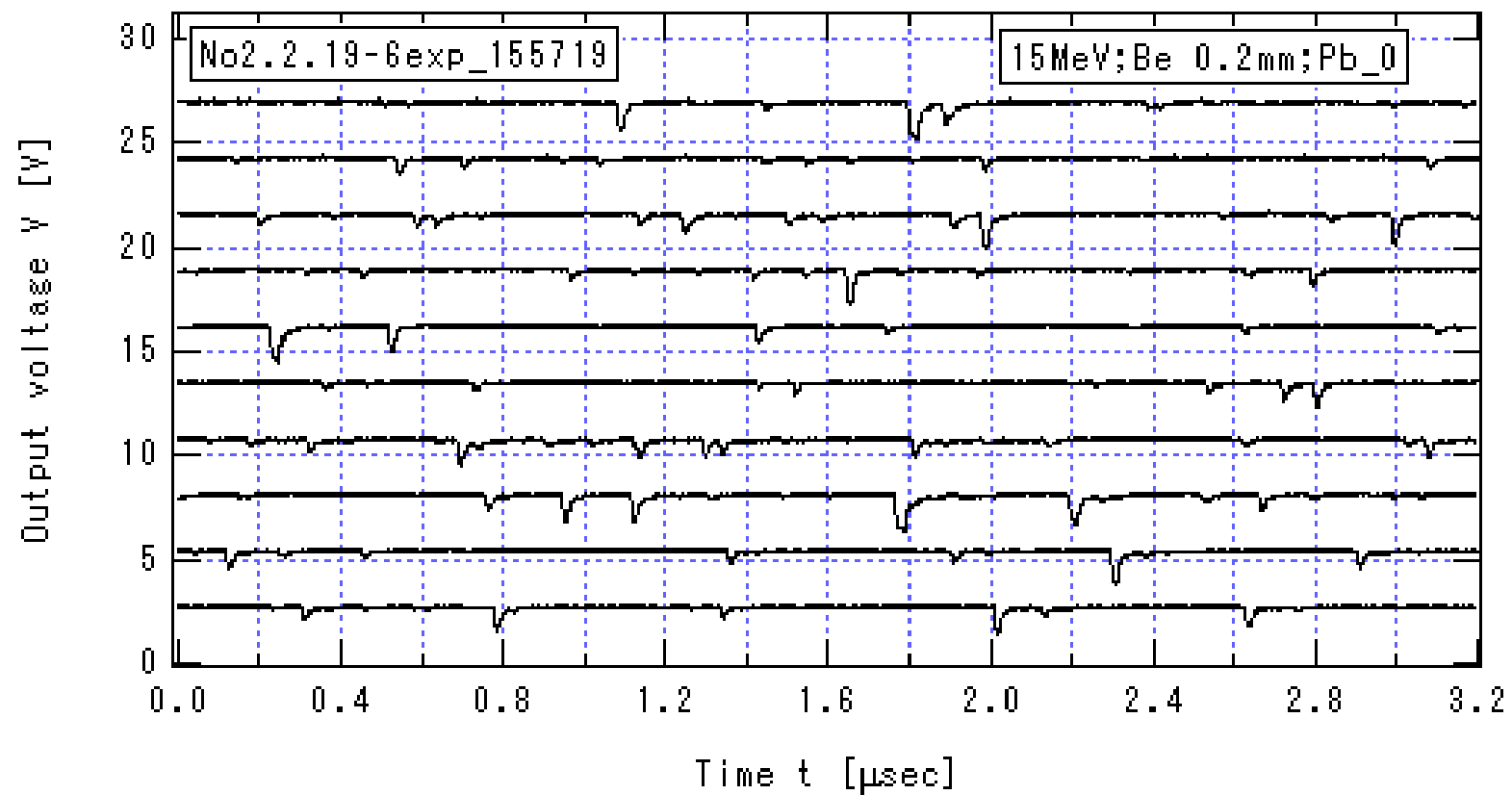


図 3.3.2-24\_c6  $I_{He}=5.069\mu A$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(c6)

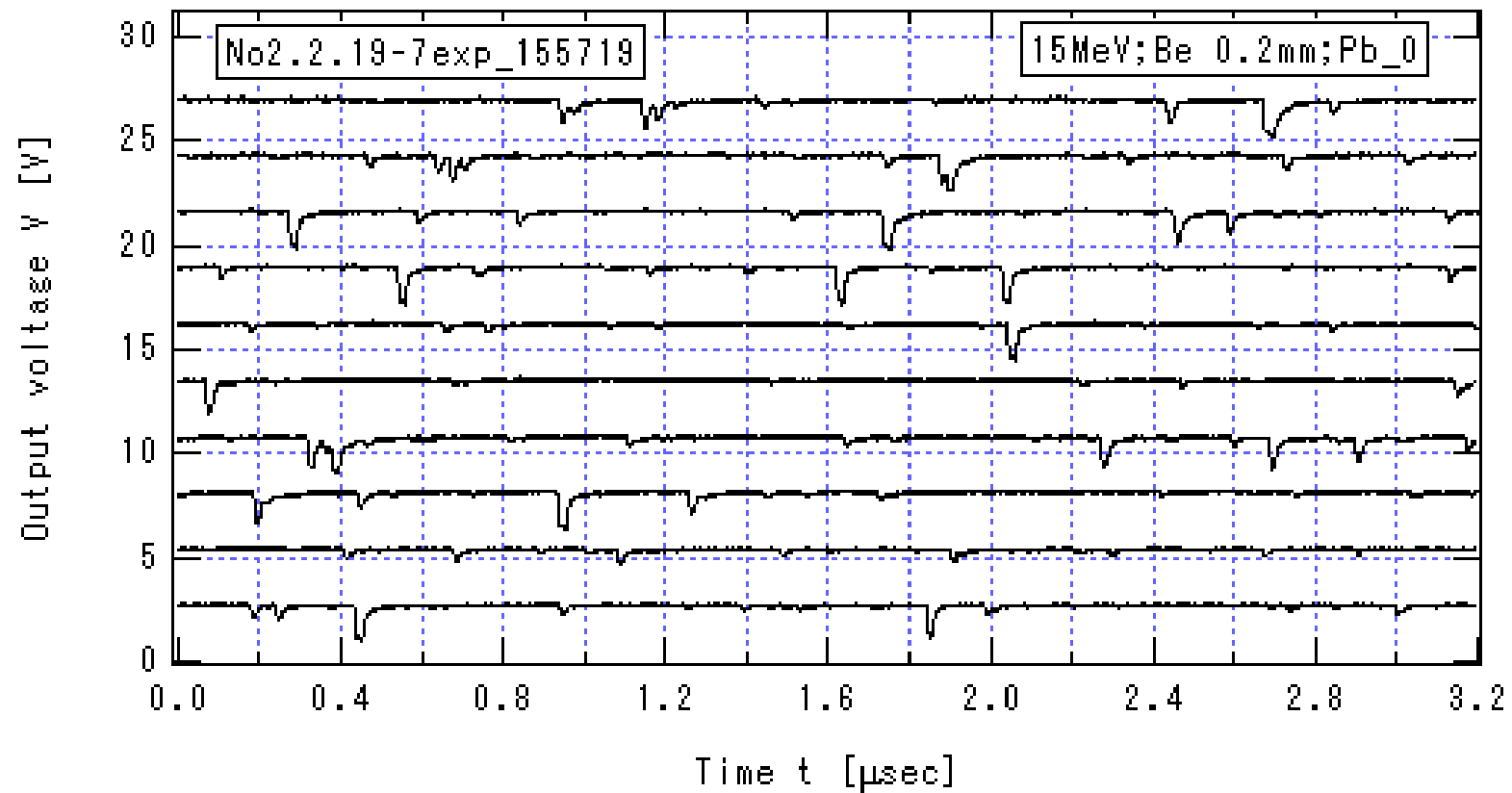


図 3.3.2-24\_c7  $I_{\text{He}}=5.069\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(c7)

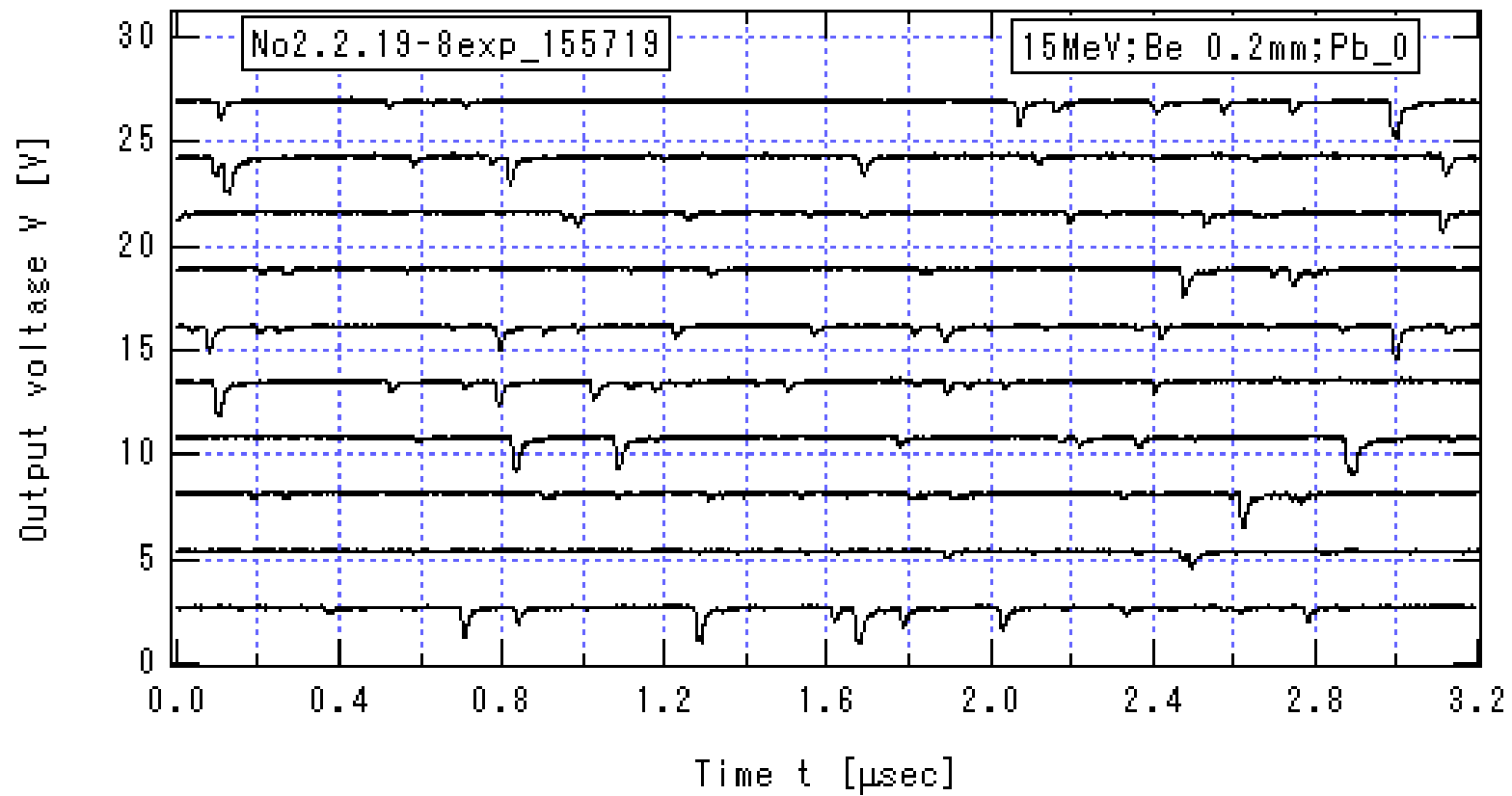


図 3.3.2-24\_c8  $I_{\text{He}}=5.069\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(c8)

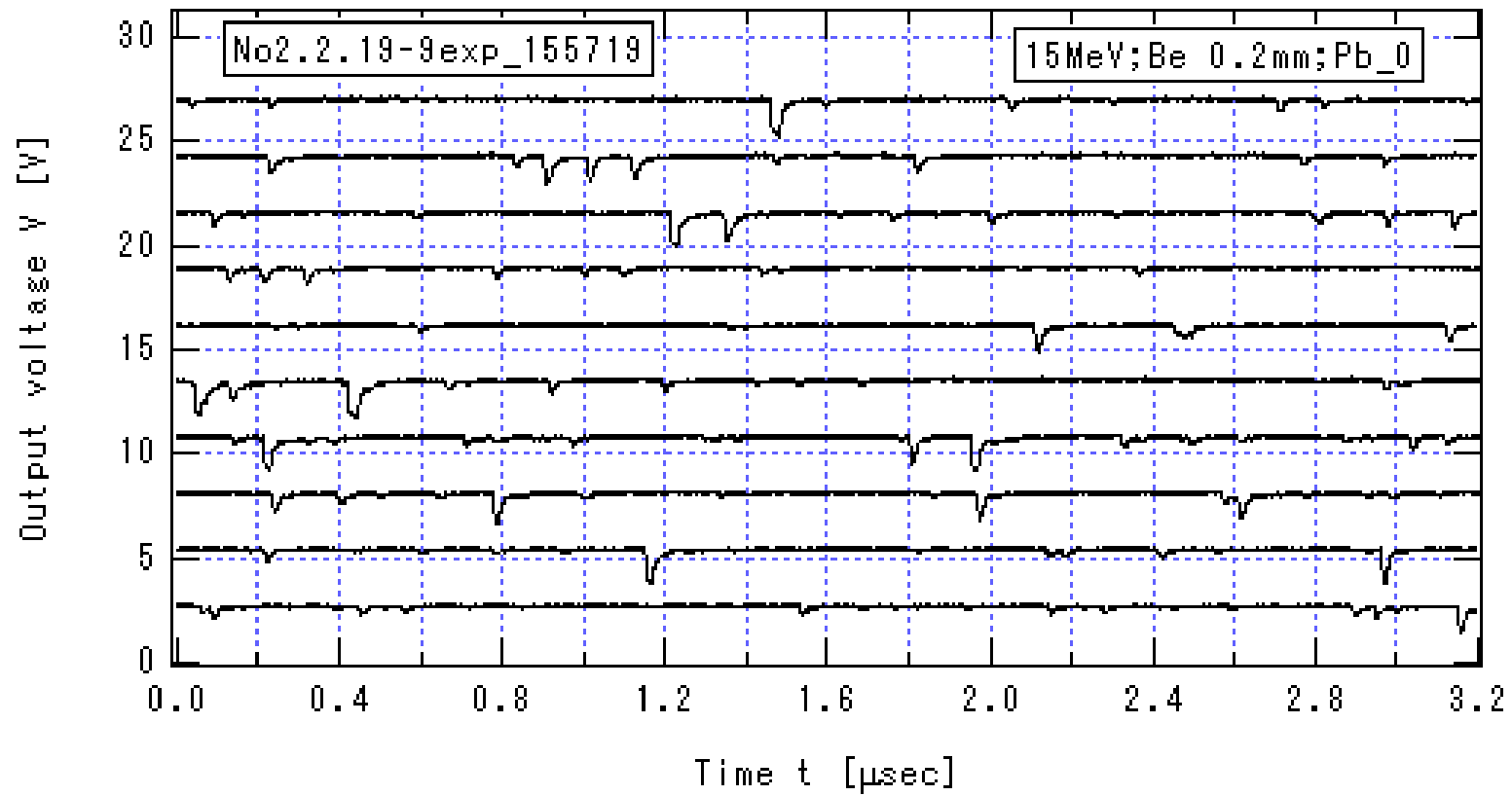


図 3.3.2-24\_c9  $I_{\text{He}}=5.069\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(c9)

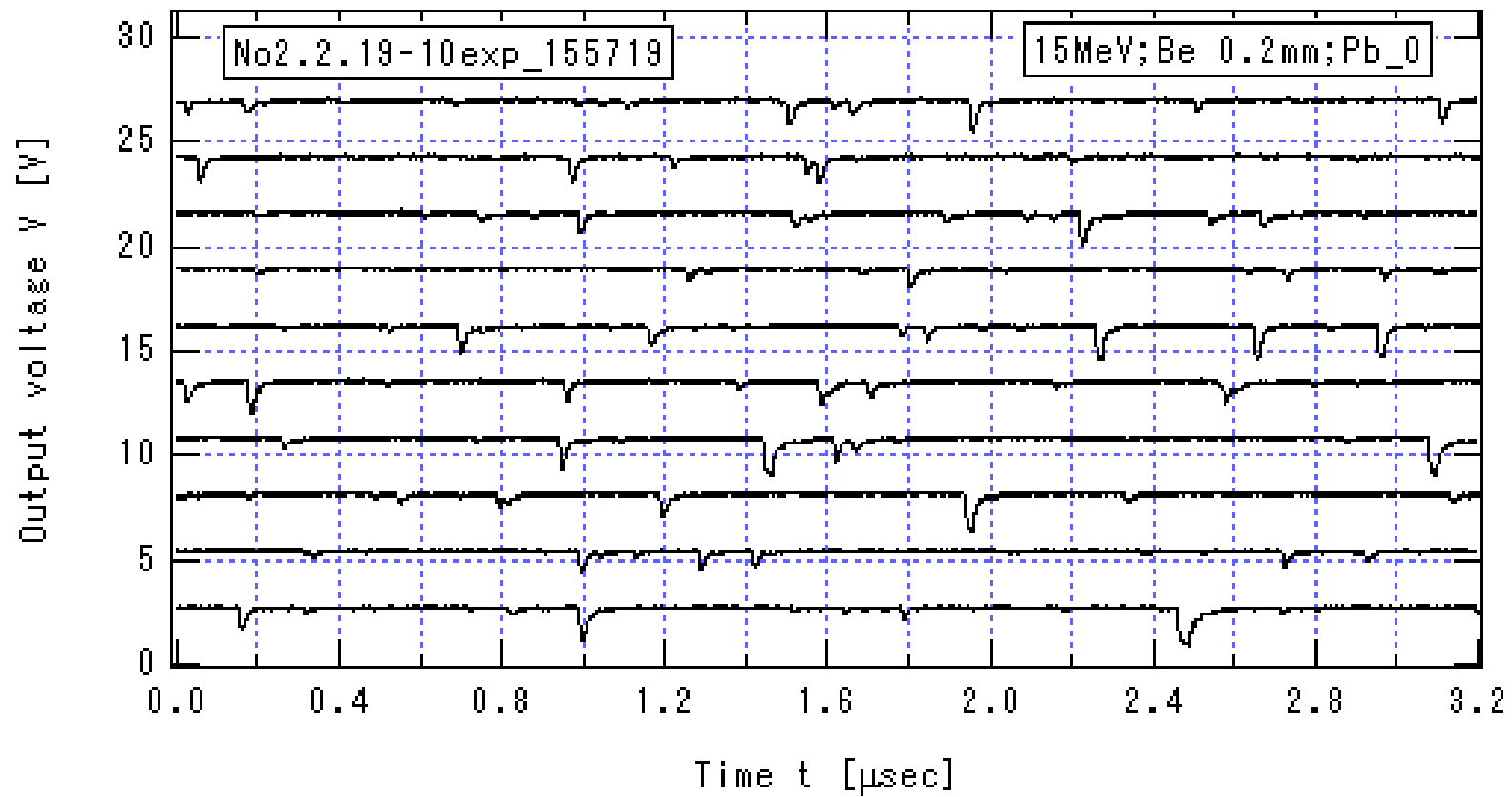


図 3.3.2-24\_c10  $I_{\text{He}}=5.069\mu\text{A}$  の場合のプリアンプ出力信号の時間変化(c10)

### 3.4 計算機シミュレーションによる中性子輸送解析

MeV He 衝撃による薄いベリリウム Be ターゲットで生成される中性子の生成反応微分断面積に関しては、多くの研究者による報告がある。然しながら、高エネルギー He ビームが Be ターゲット内で完全に静止する実験条件下では Be に入射した He エネルギーは徐々に減速され静止するので、直接これらの断面積データを解析等に使用することは出来ない。入射粒子の固体内での弾性・非弾性散乱による軌道計算 (TRIM コード) と中性子発生が計算可能な MCNP コードによる計算を結合させた計算機シミュレーションは、上記の実験状況における中性子輸送を扱う強力な tool であり、この計算では具体的な実験配置における検出系に入射する中性子フラックスが計算できる為、実験状況に応じた中性子についての明確な把握が可能となる。

#### 3.4.1 He 照射 Be ターゲットから放出される中性子数の角度依存性

Be の厚さ  $5\mu\text{m}$  及び  $0.2\text{mm}$  の Be ターゲットに、 $9\text{MeV}$  又は  $15\text{MeV}$  のヘリウムが入射した時の、ターゲットより  $100\text{cm}$  離れた位置での入射ヘリウム 1 個当たりの中性子フラックスを、入射ヘリウムの進行方向に対し  $5^\circ, 15^\circ, 25^\circ, 35^\circ, 45^\circ, 55^\circ, 65^\circ, 75^\circ, 85^\circ, 95^\circ, 115^\circ, 135^\circ, 155^\circ, 175^\circ$  計算した。Be の厚さが  $5\mu\text{m}$  の場合のフラックスの角度依存性を He エネルギー  $E_{\text{He}}=9\text{MeV}$  に対し図 3.4.1-1 に、 $E_{\text{He}}=15\text{MeV}$  に対し図 3.4.1-2 に示す。前方方向へのフラックスが大きく  $90^\circ$  方向のフラックスは  $5^\circ$  方向の  $\sim 1/10$  となる。Be の厚さが  $0.2\text{mm}$  の場合の同様な計算結果を  $E_{\text{He}}=9\text{MeV}$  に対し図 3.4.1-3 に、 $E_{\text{He}}=15\text{MeV}$  に対し図 3.4.1-4 に示す。角度依存性は Be の厚さが  $5\mu\text{m}$  の場合とほぼ同様である。ベリリウムの厚さ  $0.2\text{mm}$  に増加した場合、 $E_{\text{He}}=9\text{MeV}$  及び  $E_{\text{He}}=15\text{MeV}$  のヘリウムのエネルギーはベリリウム内で徐々に減少して行き最終的に完全に静止する。 $E_{\text{He}}=9\text{MeV}$  の飛程は  $\sim 60\mu\text{m}$ 、 $E_{\text{He}}=15\text{MeV}$  の飛程は  $\sim 140\mu\text{m}$  であり、 $5\mu\text{m}$  の場合に比べて単純な見積では中性子放出量は  $60\mu\text{m}/5\mu\text{m}=12$ 、 $140\mu\text{m}/5\mu\text{m}=28$  程度の増加が期待される。計算結果はこの効果が現れている。



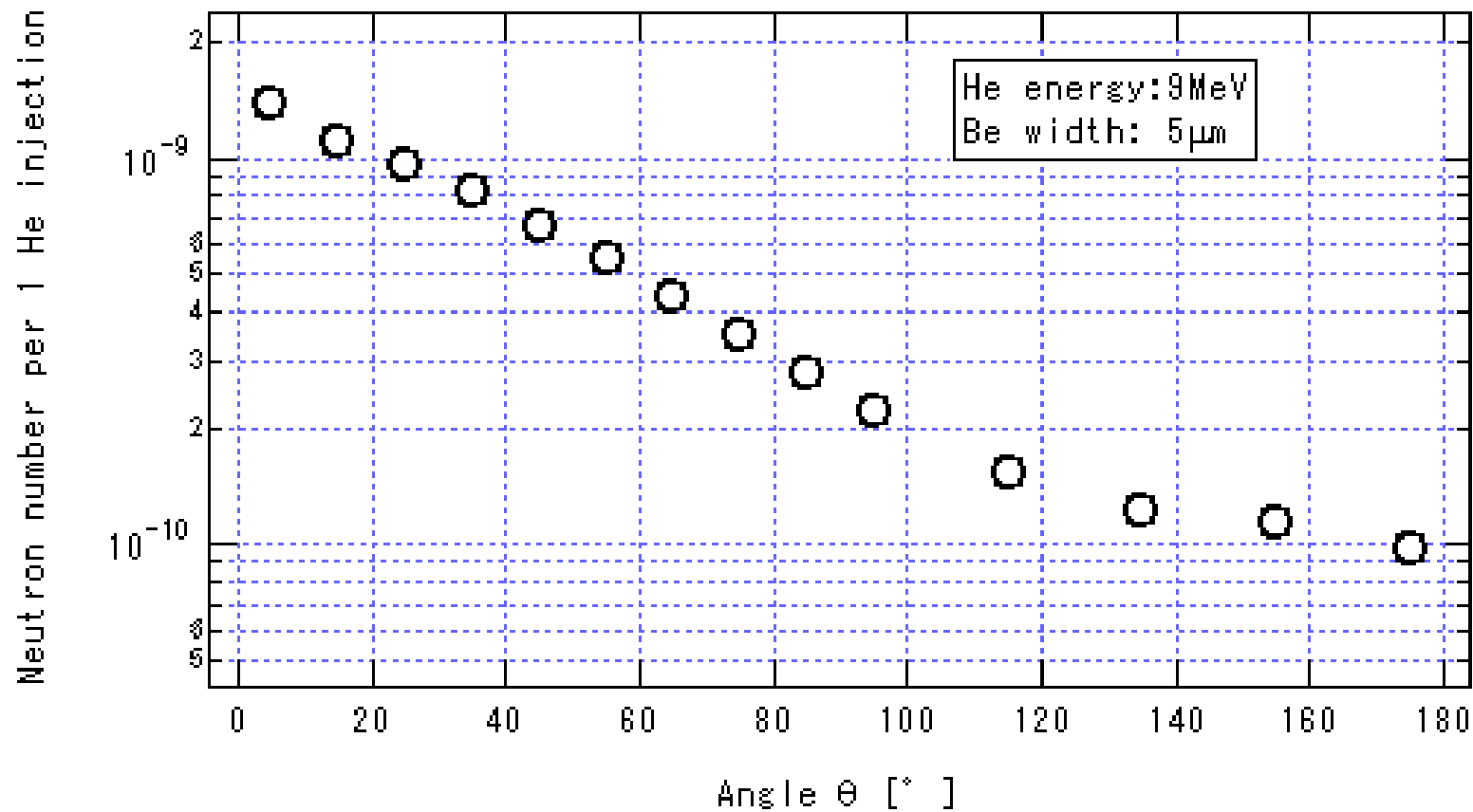


図 3.4.1-1 9MeV He 照射による 5 $\mu$ m 厚 Be から放射される He 1 個当たりの中性子個数の角度依存性

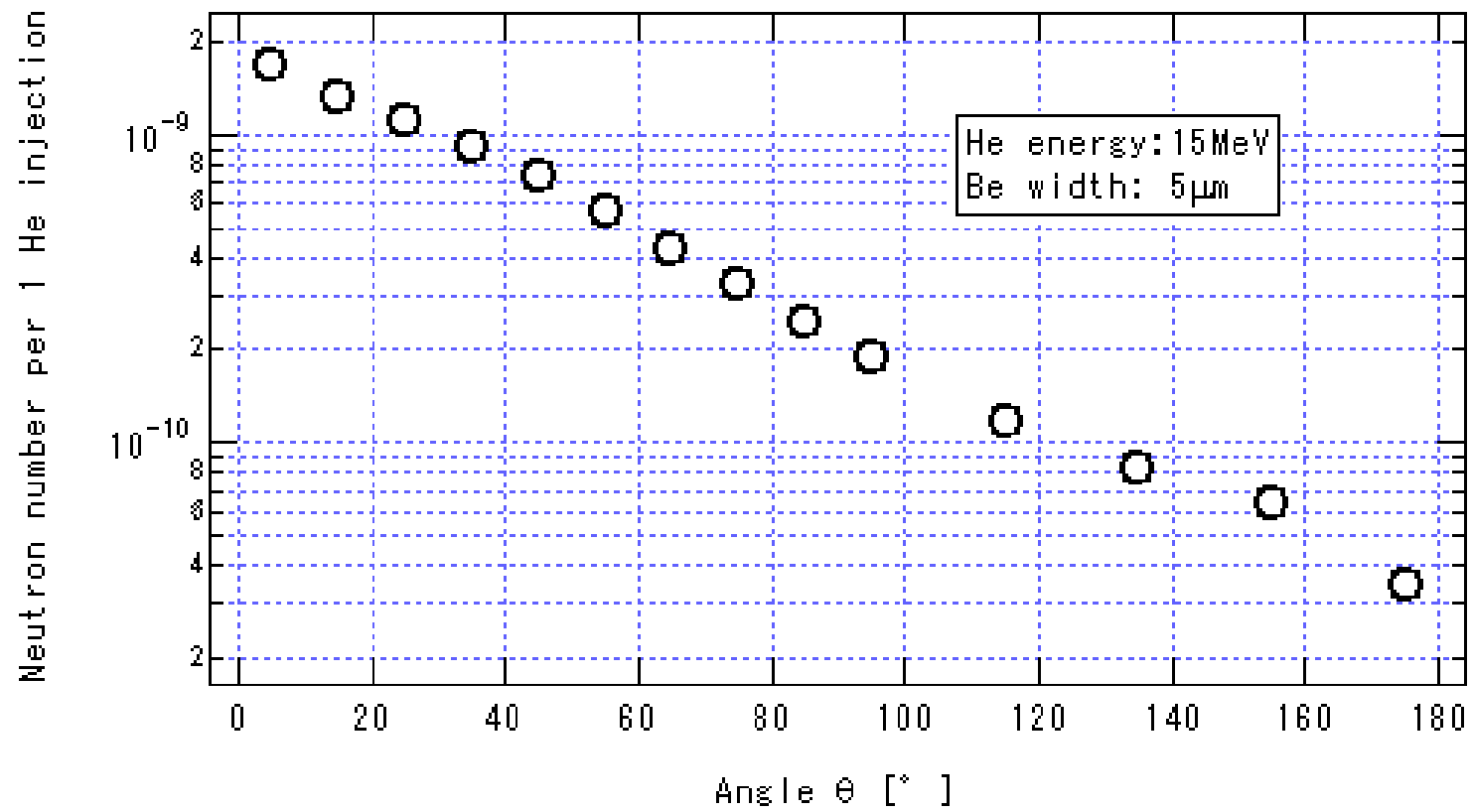


図 3.4.1-2 15MeV He 照射による 5 $\mu$ m 厚 Be から放射される He 1 個当たりの中性子個数の角度依存性

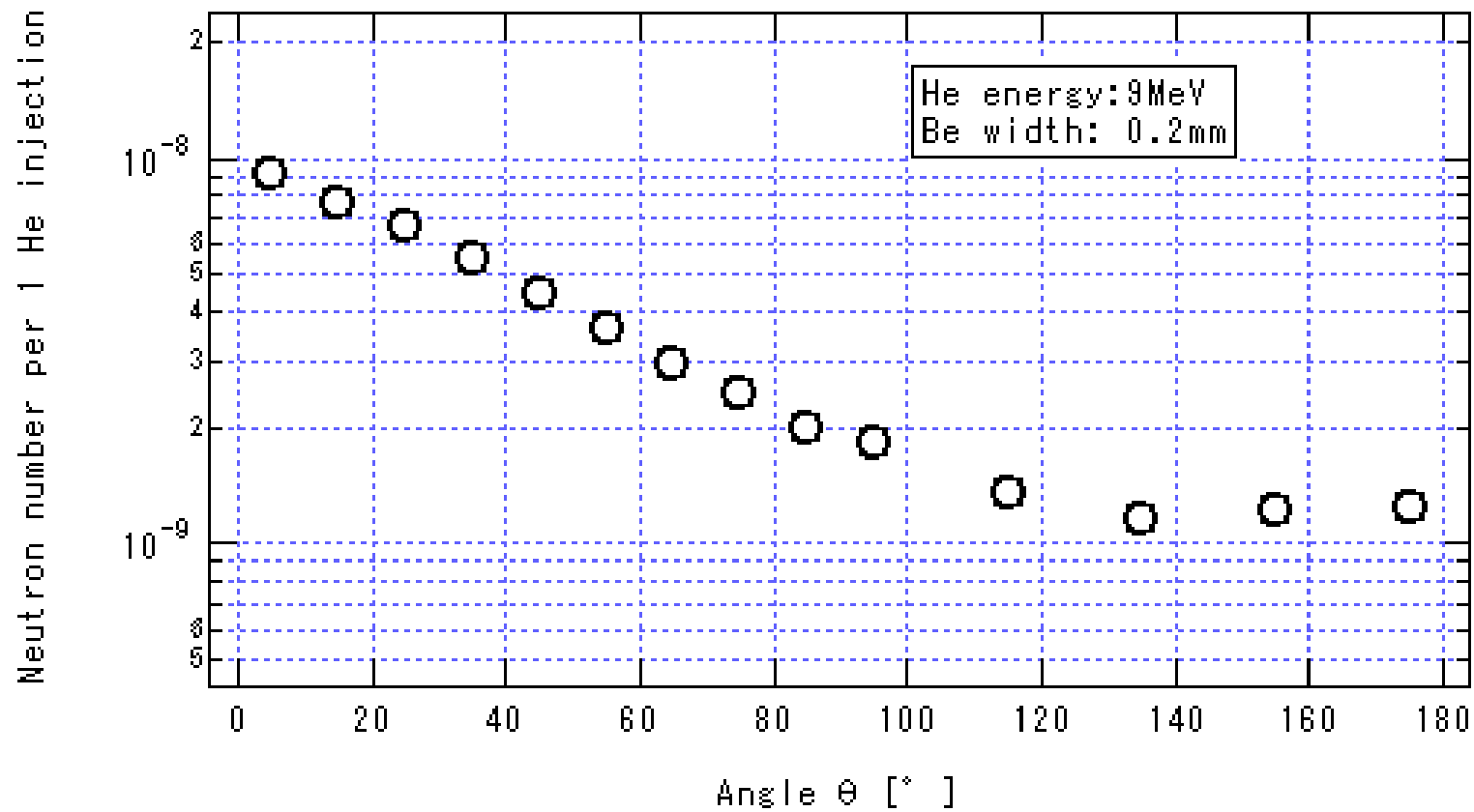


図 3.4.1-3 9MeV He 照射による 0.2mm 厚 Be から放射される He 1 個当たりの中性子個数の角度依存性

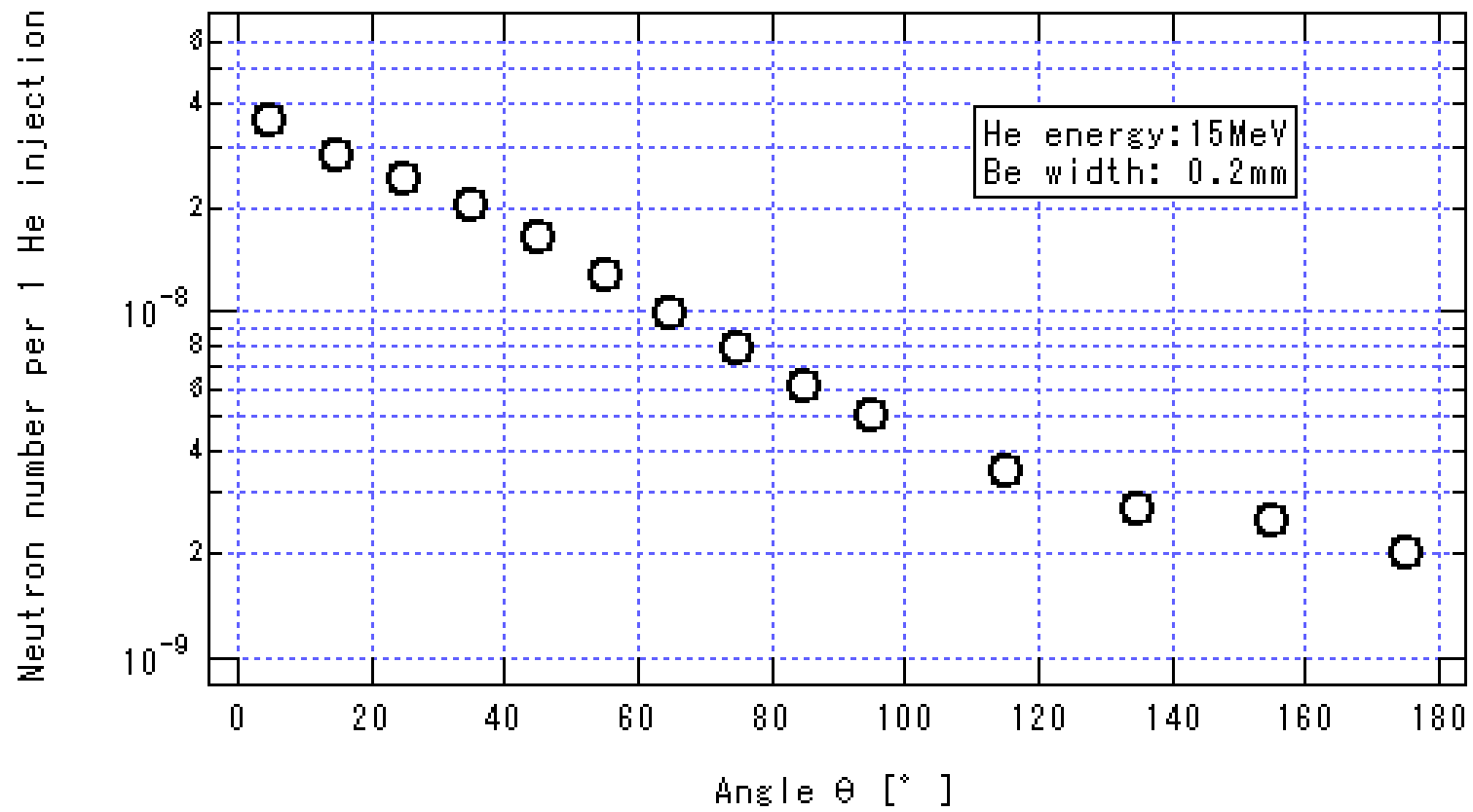


図 3.4.1-4 15MeV He 照射による 0.2mm 厚 Be から放射される He 1 個当たりの中性子個数の角度依存性

### 3.4.2 設置された検出部に入射する中性子のエネルギースペクトル

図 3.1-3、図 3.1-4 に示す実験配置と同様な空間配置で、ビーム進行方向に対し角度  $45^\circ$ 、ターゲットより 80cm 離れた位置の液体シンチレータに入射する中性子のエネルギースペクトルを計算機シミュレーションにより計算した。Be の厚さが  $5\mu\text{m}$  の場合、He エネルギー  $E_{\text{He}}=9\text{MeV}$  及び  $E_{\text{He}}=15\text{MeV}$  に対し、計算された液体シンチレータに入射する中性子のフラックスのエネルギー依存性を図 3.4.2-1 及び図 3.4.2-2 に示す。ここで、フラックスはベリリウムに入射するヘリウム個数で規格している。又、Be の厚さが  $0.2\text{mm}$  の場合、He エネルギー  $E_{\text{He}}=9\text{MeV}$  及び  $E_{\text{He}}=15\text{MeV}$  に対する結果を図 3.4.2-3 及び図 3.4.2-4 に示す。Be の厚さが  $5\mu\text{m}$  の場合のエネルギースペクトルにおいて、共鳴現象によるピークを持つプロファイルが、Be の厚さが  $0.2\text{mm}$  の場合では、顕著でなくなるのは、Be 内を進行中に He のエネルギーが減衰を受け、エネルギーの異なった He-Be 衝突により発生した中性子が重なった為である。 $E_{\text{He}}=15\text{MeV}$  の場合、液体シンチレータに入射する中性子のエネルギーは  $0.5\text{-}1\text{MeV}$  から  $7\text{-}8\text{MeV}$  の範囲が圧倒的に多いことが分かる。

表 3.4.2 に Be の厚さが  $5\mu\text{m}$  又は  $0.2\text{mm}$  の場合  $E_{\text{He}}=9\text{MeV}$  及び  $E_{\text{He}}=15\text{MeV}$  に対し、液体シンチレータに入射する全フラックスを示す。ベリリウム厚を  $5\mu\text{m}$  から  $0.2\text{mm}$  にすることにより、シンチレータに入射する中性子数が  $E_{\text{He}}=9\text{MeV}$  では 7 倍に、 $E_{\text{He}}=15\text{MeV}$  では 22 倍に増加する事が分かる。

#### 参考文献

- 1) Y. Ito, K. Kume, and N. Otani, JNC TJ4440 2003-002 (2003).

表 2.4.2 計算機シミュレーションにより求めた。Be を衝撃する He 1 個当たり放射線検出器に入射する中性子フラックス。検出器の位置は Be より 80cm 離れた、45 ° 方向。

He energy	Be width	neutron flux / one He at 80cm and at 45 °
9M	5 $\mu$ m	1.15E-09
9M	0.2mm	7.69E-09
15MeV	5 $\mu$ m	1.25E-09
15MeV	0.2mm	2.74E-08

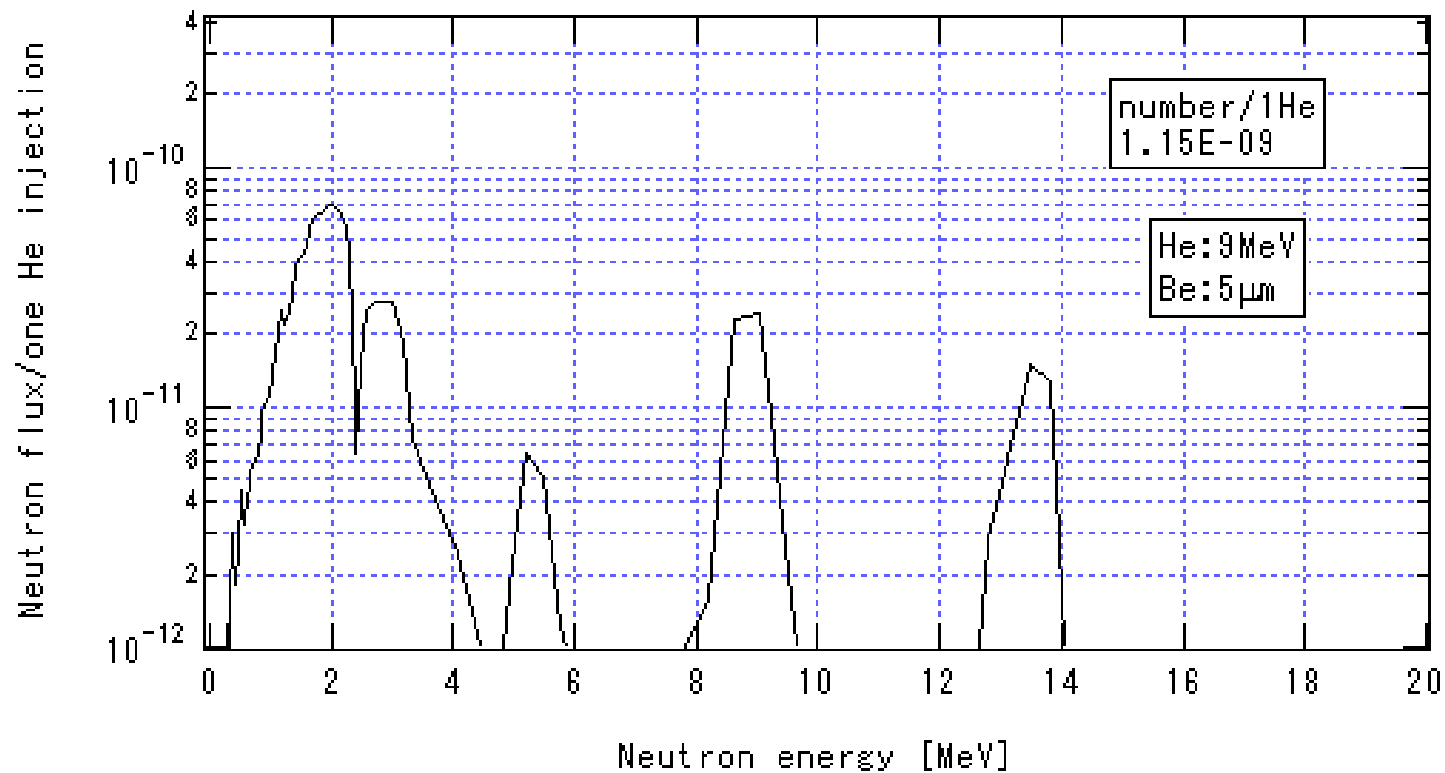


図 3.4.2-1 9MeV He 照射により、厚さ  $5\mu\text{m}$  の Be ターゲットから角度  $45^\circ$  方向に 80cm 離れた位置の検出器に入射する He 1 個当たりの中性子フラックスのエネルギー依存性

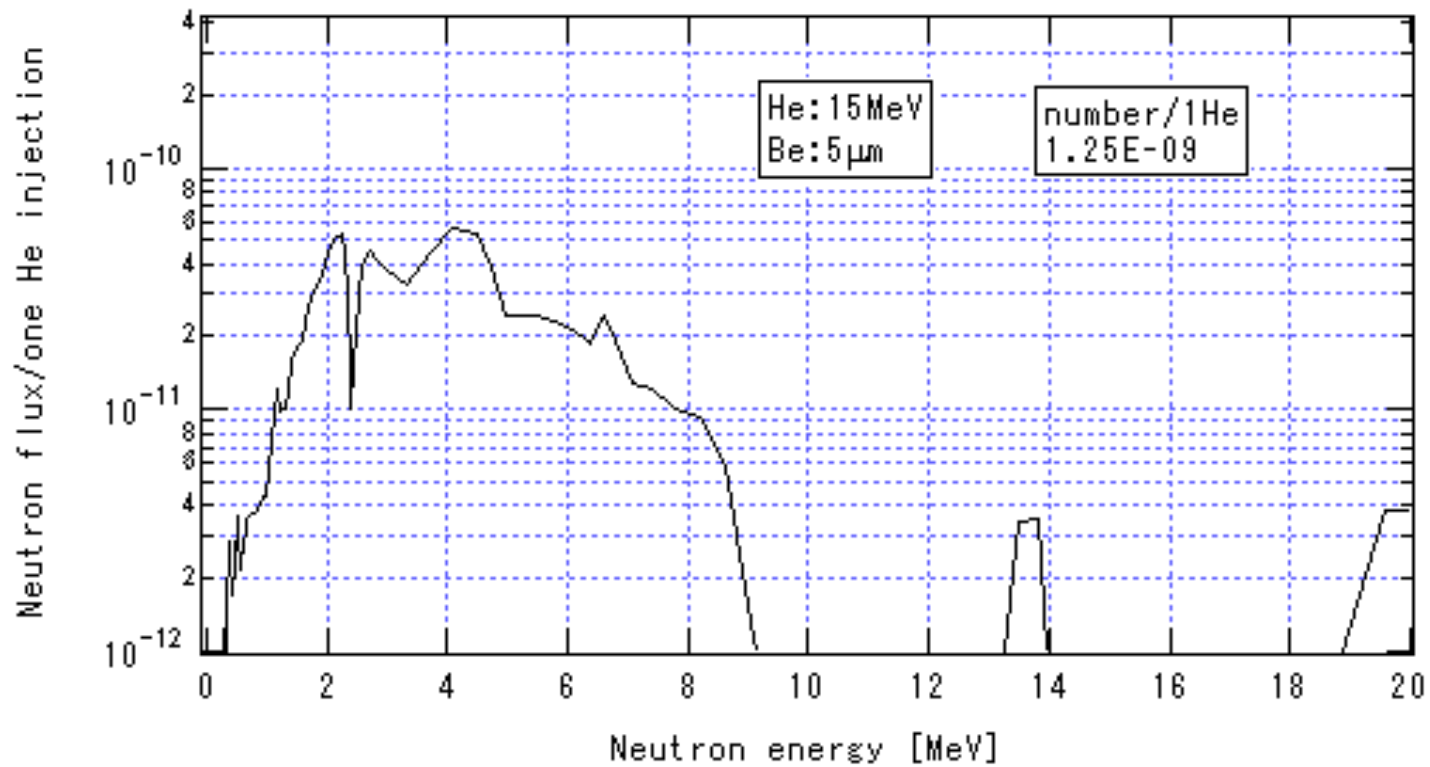


図 3.4.2-2 15MeV He 照射により、厚さ  $5\mu\text{m}$  の Be ターゲットから角度  $45^\circ$  方向に 80cm 離れた位置の検出器に入射する He 1 個当たりの中性子フラックスのエネルギー依存性



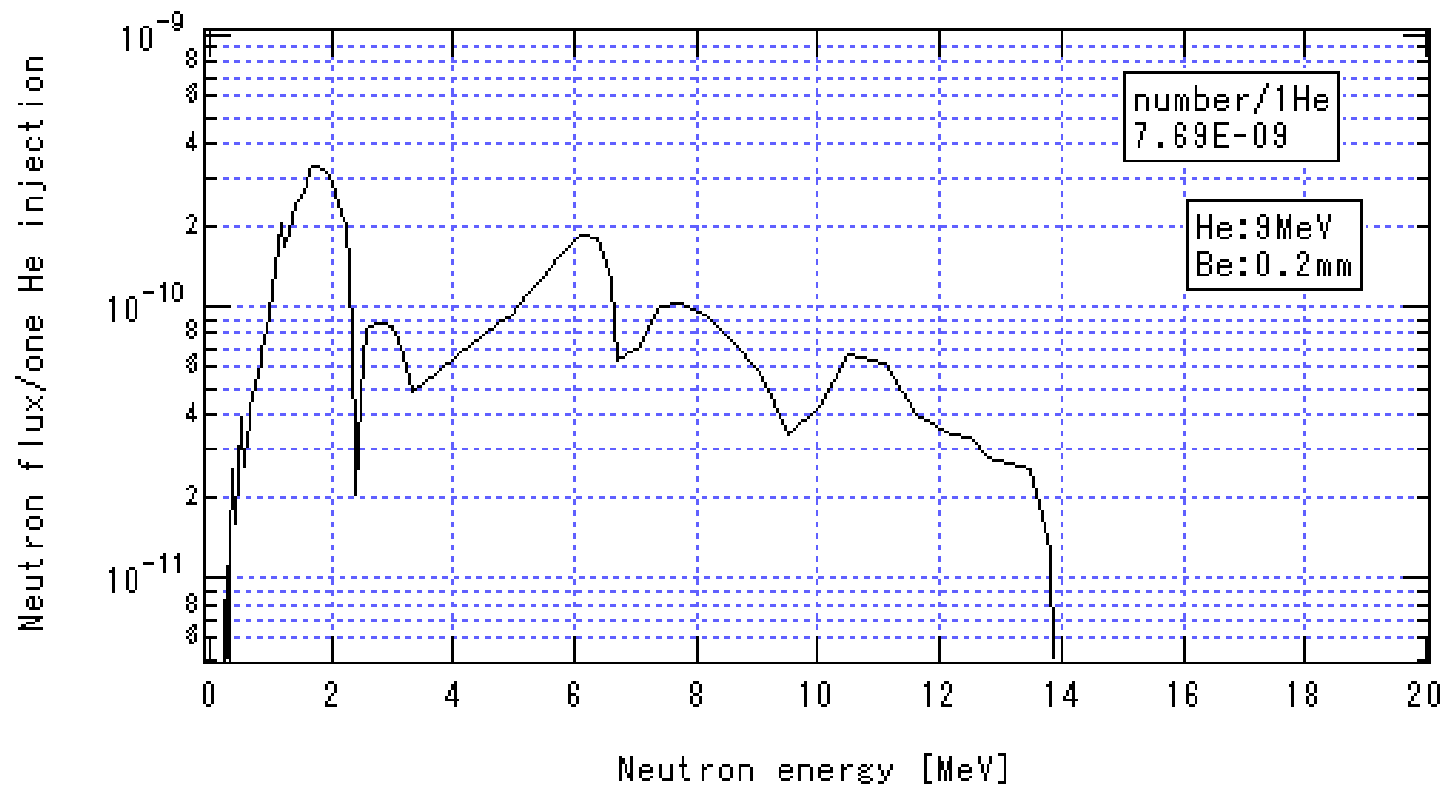


図 3.4.2-3 9MeV He 照射により、厚さ 0.2mm の Be ターゲットから角度 45°方向に 80cm 離れた位置の検出器に入射する He 1 個当たりの中性子フラックスのエネルギー依存性

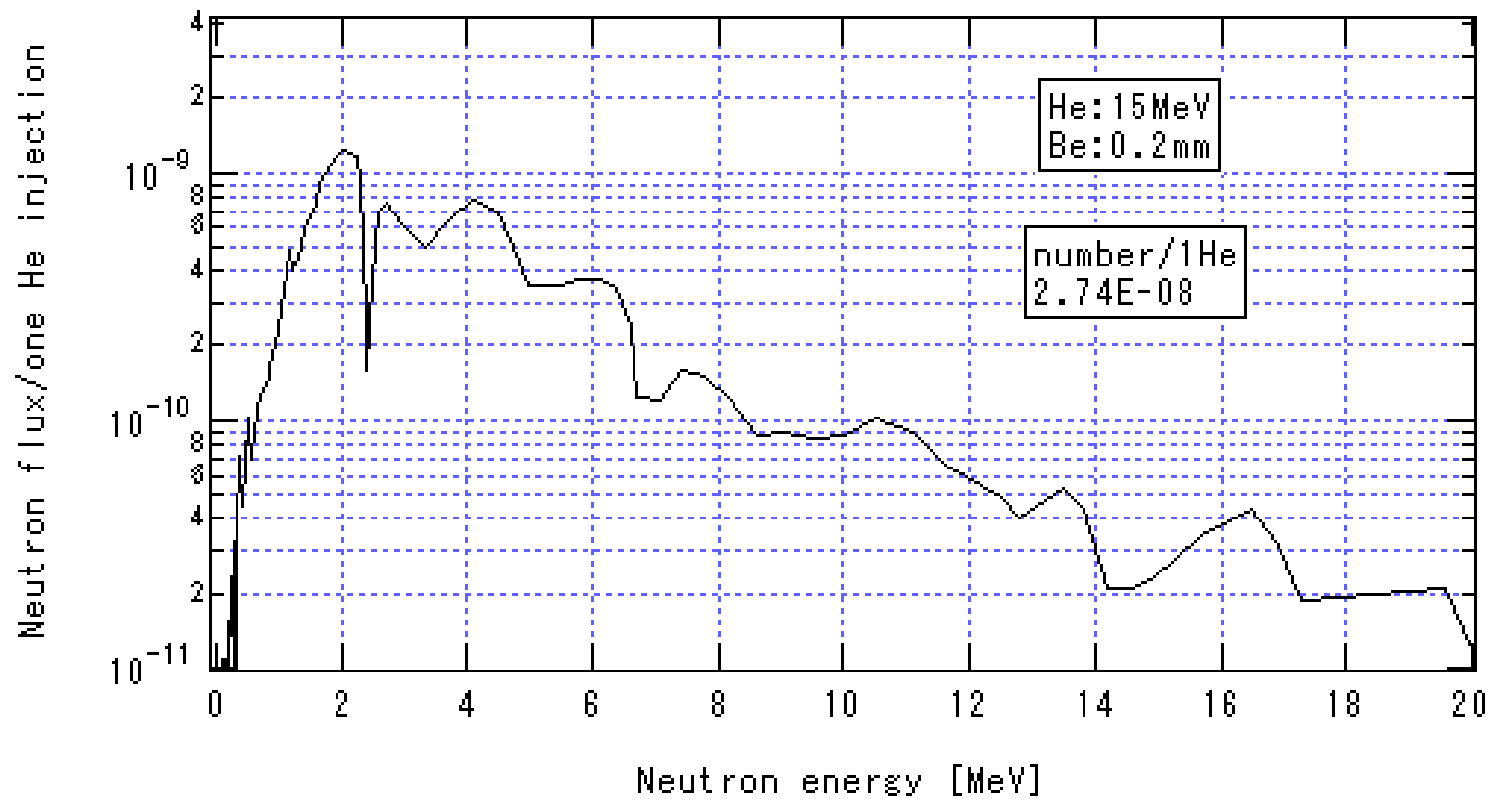


図 3.4.2-4 9MeV He 照射により、厚さ 0.2mm の Be ターゲットから角度 45°方向に 80cm 離れた位置の検出器に入射する He 1 個当たりの中性子フラックスのエネルギー依存性

## 第4章 大線量 線照射によって生じる安定ラジカルの計測と生体分子への影響調査実験

### 4.1 ガンマ線照射試料に生成するラジカル種の ESR 測定

#### 4.1.1 はじめに

放射線被曝線量の計測は、被曝時に線量計を着用している場合を除いて、計算など間接的な方法で推定されているのが現状である。特定の物質において、放射線照射によって生じたラジカルが安定に捕捉され、長寿命のラジカルを保持したままになることが知られている。このラジカルを電子スピン共鳴 (ESR) 装置で測定し、ラジカル量から線量測定を行う方法が ESR 線量計測法である。特にヒトの歯エナメル質は放射線によるラジカル生成効率が高く、生成したラジカル種も非常に長寿命で安定である。このラジカル生成は放射線被曝で特異的に起こり、半減期は数千年に達すると言われている。この特性を用いて ESR 測定によって個人の生涯放射線被ばく量を測定する方法が存在するが、現状の技術では、ESR 測定時の夾雑信号の妨害や、歯からのエナメル質分離時の技術の未発達が要因で誤差も大きく、かなりの大線量被ばくの場合でしか定量ができない。また、これらラジカル種の詳細については実際にはほとんどわかっていない。そこで、信号の解析精密解析や高磁場 ESR 測定によって定量精度の向上と、より低線量での被曝線量測定を目指した研究を行う。

前年度には、歯エナメル質類似物質であるカルシウム塩に着目し、種々のカルシウム塩粉末に X 線照射を照射し、生成する安定ラジカル信号の線量相関および減衰特性を評価した。本項ではカルシウム塩を中心に種々の粉末にガンマ線照射を実施し、ESR 法による測定を実施して信号が生成するかを調査し、線量計測に適した素材の検索を行う。

#### 4.1.2 実験方法

ESR 測定は、福井県若狭湾エネルギー研究センターに設置されている日本電子製 JES-TE300 型 X-band/Q-band 電子スピン共鳴装置を用いて X-band (約 9GHz) で室温下で測定を行った。スペクトルの取り込みと積分計算などの信号解析はラジカルリサーチ社製 ESR データアナライザ WIN-RAD および、WIN-EKS を使用した。

ガンマ線照射は社団法人日本アイソトープ協会甲賀研究所のガンマ線照射サー

ビスを利用した。内容量 10 ml のプラスチック製サンプル管に 5 g ずつ分けて入れ、梱包用ダンボール箱に紙製の緩衝材とともに詰めた。梱包用ダンボールごとガンマ線照射された後、返送されてきたものを直後に測定した。照射後 2-3 日後の測定となった。

ESR 測定は試料を直径 5mm の石英製 ESR 測定管に 100mg となるよう正確にいれ、室温で測定した。ESR 装置条件は、マイクロ波周波数 (Freq.) 約 9.2GHz (試料によって異なる共鳴周波数に合わせた)、マイクロ波出力 (Power) 1 mW、測定磁場 (Field)  $330.00 \pm 5.0$ mT、磁場変調 (Mod.) 100kHz 0.02mT、測定時定数 (Time C.) 0.03sec、掃引時間 (Sweep Time) 4min で、日本電子製デジタルマーカ―を使用して一定量のマンガンを挿入し、信号強度の基準マーカ―として使用した。

照射用試料として、本項の実験では以下の 12 種の塩類を使用した。

- 炭酸カルシウム (ナカライテスク社製、特級)
- 炭酸カルシウム (ナカライテスク社製、高純度試薬)
- 硫酸カルシウム 2 水和物 (ナカライテスク社製、特級)
- 硫酸カルシウム 2 水和物 (関東化学社製、特級)
- 硫酸カルシウム無水物 (ナカライテスク社製、特級)
- 硫酸カルシウム 0.5 水和物 (関東化学社製)
- フッ化カルシウム (ナカライテスク社製、特級)
- グルコン酸カルシウム (関東化学社製、特級)
- ヒドロキシアパタイト (ナカライテスク社製、カラム用特製試薬)
- 炭酸ナトリウム (ナカライテスク社製、特級)
- 硫酸カリウム (ナカライテスク社製、特級)
- セメント粉 (トーヨーマテラン社製)

#### 4.1.3 測定結果と考察

炭酸カルシウム、硫酸カルシウム無水物、硫酸カルシウム 2 水和物にガンマ線を 10 kGy 照射して得られた ESR スペクトルと照射前のスペクトルを図 4.1.1 に示した。炭酸カルシウムでは 10 kGy の照射で幅広い異方性をもった信号が強く観測された。これらの信号は前年度に X 線照射で得られた ESR 信号に似ており g 値は一致している。無水硫酸カルシウムでは非常に多くのピークからなる複雑な信号が観測された。硫酸カルシウム 2 水和物では非常に鋭い 2 本の信号を含み、その間を線幅の広いピークが重なる信号が観測された。

硫酸カルシウム 0.5 水和物（焼石膏）とヒドロキシアパタイトで得られた ESR スペクトルを図 4.1.2 に示した。硫酸カルシウム 0.5 水和物も複数のピークを含む複雑な信号が観測された。同じ硫酸カルシウムでも結晶水の有無で大きく信号形状が異なるが、0.5 水和物は中央の大きなピークは 2 水和物のものに、低磁場の 2 つのピークは無水物のものに酷似している。ヒドロキシアパタイトは 4 つのブロードなピークからなる信号が観測された。硫酸カルシウム 0.5 水和物（焼石膏）の信号に似た部分があるが  $g$  値は異なり、違うラジカル種だと考えられる。むしろ  $g$  値は炭酸カルシウムに一致している。歯エナメル質中のラジカルは微量（数%）含まれている炭酸カルシウム由来と言われている。ただし、線形は大きく異なっている。フッ化カルシウム、セメント粉末から得られた ESR スペクトルを図 4.1.3 に示した。いずれもベースラインのうねりともとれる非常にブロードな信号の中にそれよりも鋭い信号が加わっている。 $g$  値は他のものと一致しない。グルコン酸カルシウム（図 4.1.4）は幅広いピークが複数重なり、非常にブロードな信号が著しく強く観測された。今回測定した中で最もピーク強度が強く、幅も広い。乳酸カルシウム、塩化カルシウム、硫酸ナトリウム、硫酸カリウム、炭酸ナトリウムでは信号は観測されなかった。このうち硫酸カリウム、炭酸ナトリウムを図 4.1.4 に示した。硫酸塩、炭酸塩であってもカルシウムのみがガンマ線照射で安定なラジカルを生じている。

炭酸カルシウム、硫酸カルシウム 2 水和物について異なる純度・メーカーの試薬で実験し、製品間の差がないかを調べた。炭酸カルシウムは特級試薬ではメーカーが異なる 2 種に違いはなかったが、純度の異なる試薬では大きな差が見られた。図 4.1.5 に特級試薬（規格 99%以上）と高純度試薬（規格 99.5%以上）から得られた信号を示した。両者で信号の形状、強度ともに全く異なっている。これまでに報告されている信号は特級試薬のものに一致する。両者は全く一致する部分がなく、信号強度もかなり高いので不純物であることは考えにくい。微細な結晶構造の違いに起因する可能性があるが詳細はわからない。硫酸カルシウム 2 水和物は同じ特級試薬でもメーカーの違いで信号の見た目が違った（図 4.1.6）。ただし、こちらは基本的なピーク位置は同じで鋭い 2 本のピークの高さが違うのみで、含水量の微妙な違いが起因していると考えられる。

今回観測された試料はいずれも複雑な信号形状をしており、報告例も少なくより詳細な検討が必要である。

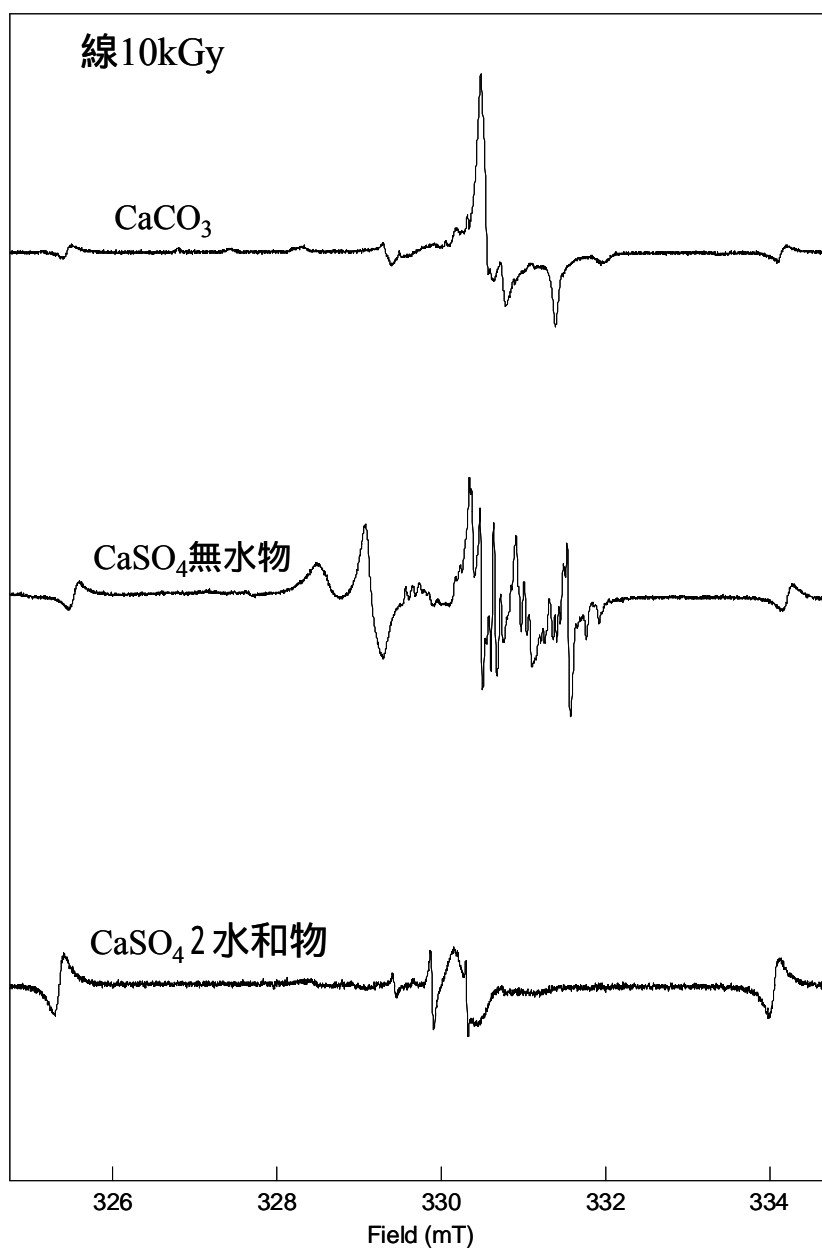


図 4.1.1 炭酸カルシウム ( $\text{CaCO}_3$ )、硫酸カルシウム( $\text{CaSO}_4$ )無水物、硫酸カルシウム( $\text{CaSO}_4$ ) 2 水和物にガンマ線照射 (10kGy) した試料から得られた ESR スペクトル

ESR 条件: Power 1mW (9.27GHz), Field  $330 \pm 5$ mT, Mod.  $20 \mu\text{T}$  (100kHz), Time Const.0.03sec, Sweep Time 4min,  $\text{Mn}^{2+}$  外部標準マーカを挿入

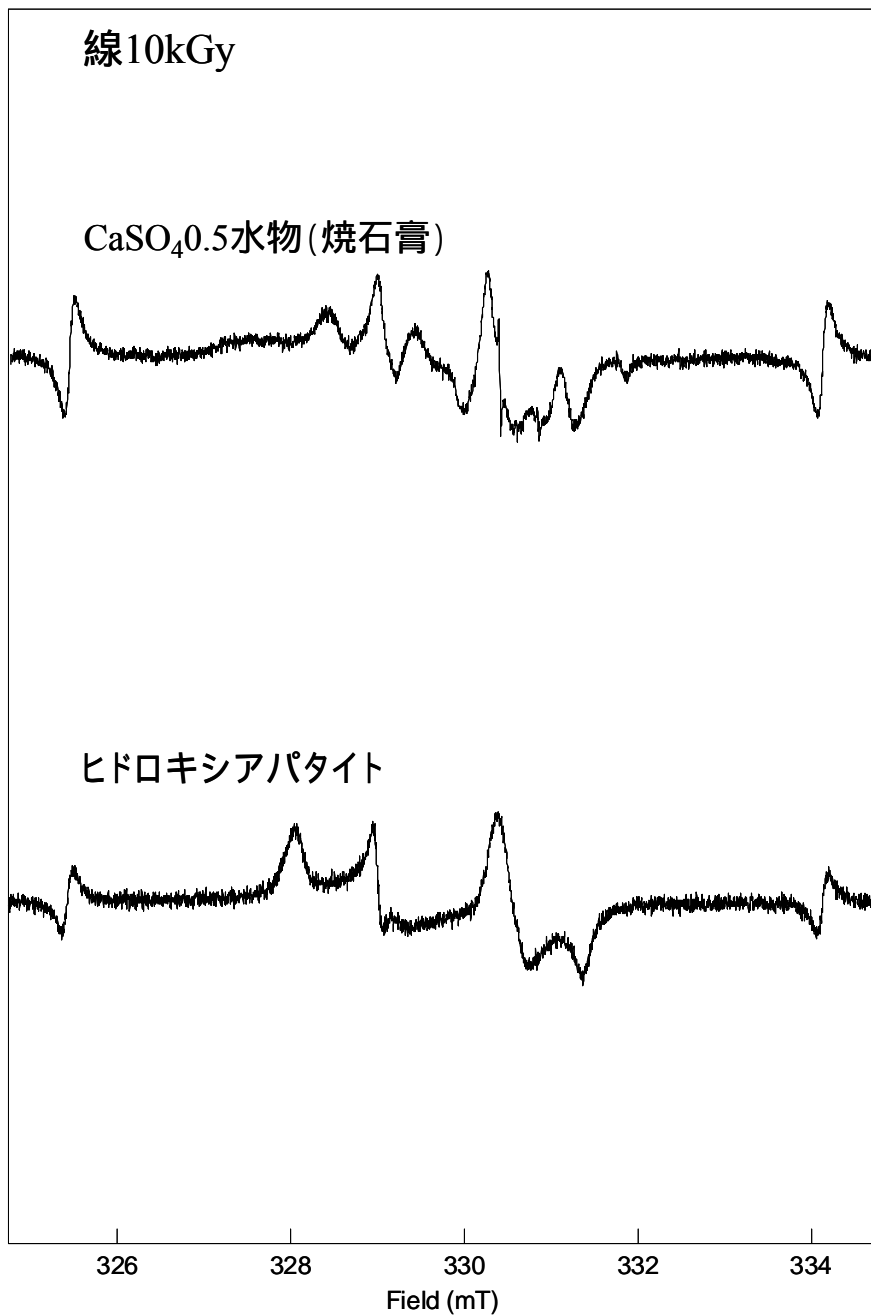


図 4.1.2 硫酸カルシウム(CaSO<sub>4</sub>)0.5水和物、ヒドロキシアパタイトにガンマ線照射(10kGy)した試料から得られた ESR スペクトル

ESR 条件: Power 1mW (9.27GHz), Field 330±5mT, Mod. 20μT (100kHz), Time Const.0.03sec, Sweep Time 4min, Mn<sup>2+</sup> 外部標準マーカを挿入

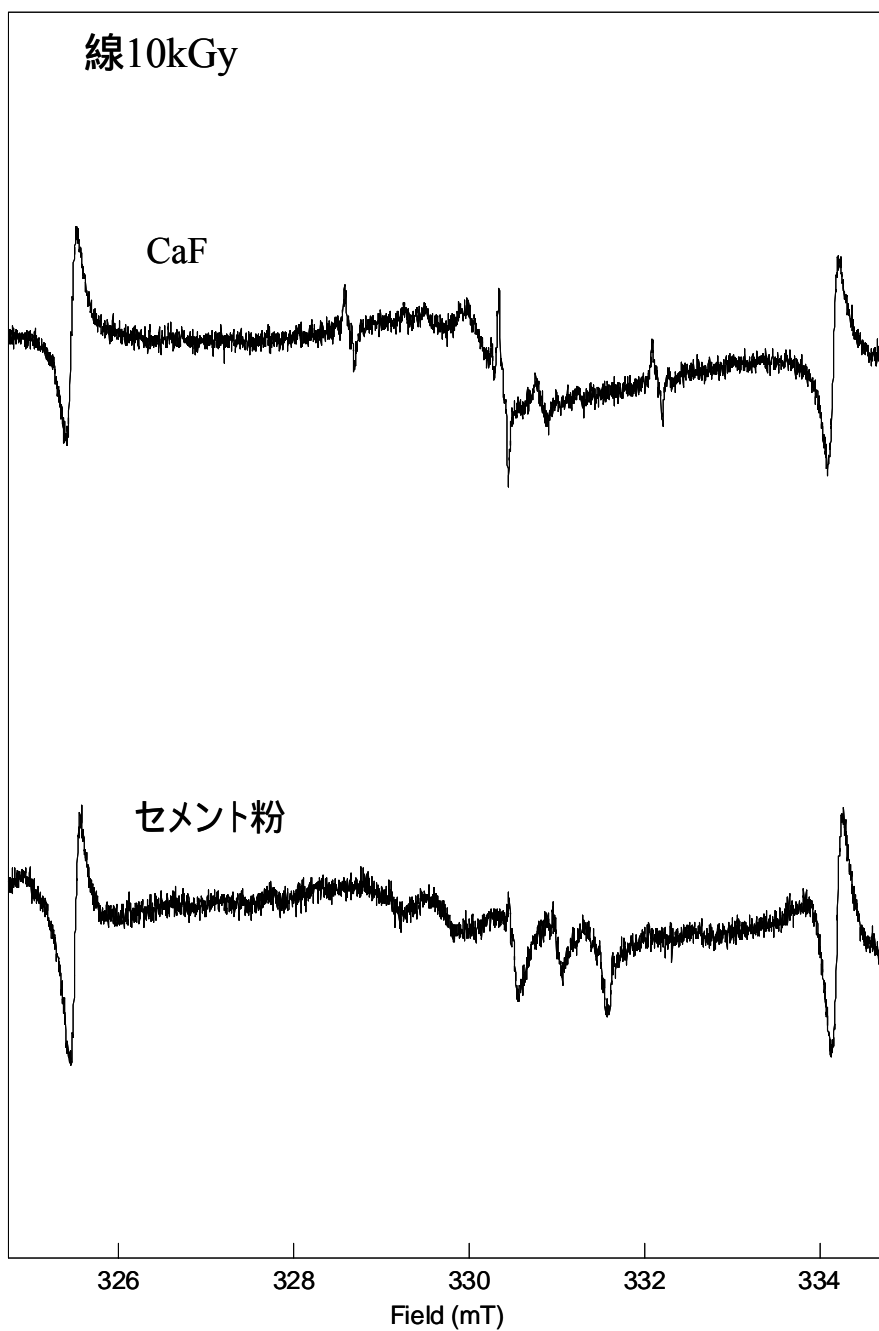


図 4.1.3 フッ化カルシウム(CaF)、セメント粉末にガンマ線照射 (10kGy) した試料から得られた ESR スペクトル

ESR 条件: Power 1mW (9.27GHz), Field  $330 \pm 5$ mT, Mod.  $20 \mu$ T (100kHz), Time Const. 0.03sec, Sweep Time 4min,  $Mn^{2+}$  外部標準マーカを挿入



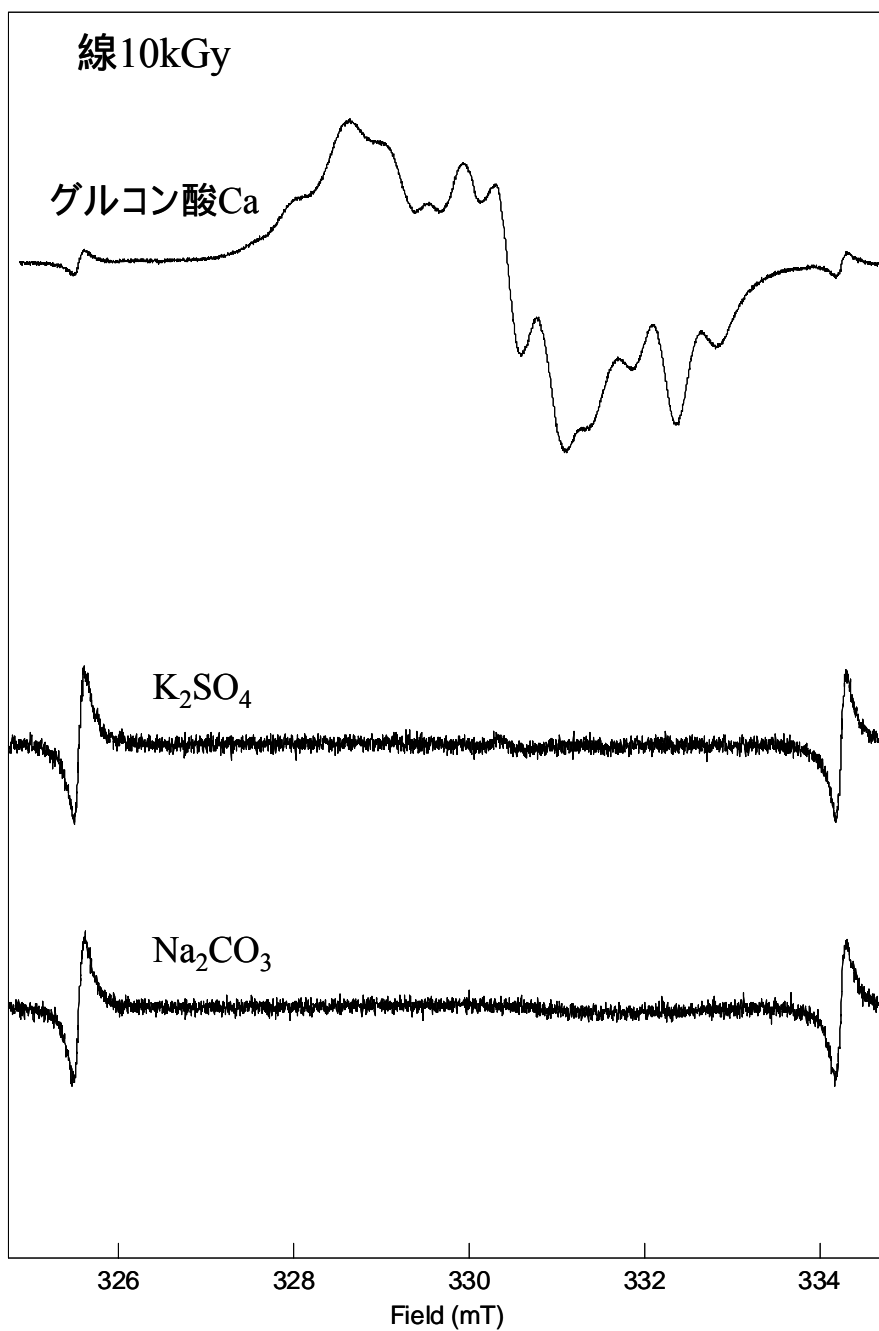


図 4.1.4 グルコン酸カルシウム、硫酸カリウム( $K_2SO_4$ )、炭酸ナトリウム( $Na_2CO_3$ )  
にガンマ線照射 (10kGy) した試料から得られた ESR スペクトル  
ESR 条件: Power 1mW (9.27GHz), Field  $330 \pm 5$ mT, Mod. 20  $\mu$ T (100kHz), Time  
Const.0.03sec, Sweep Time 4min,  $Mn^{2+}$  外部標準マーカを挿入

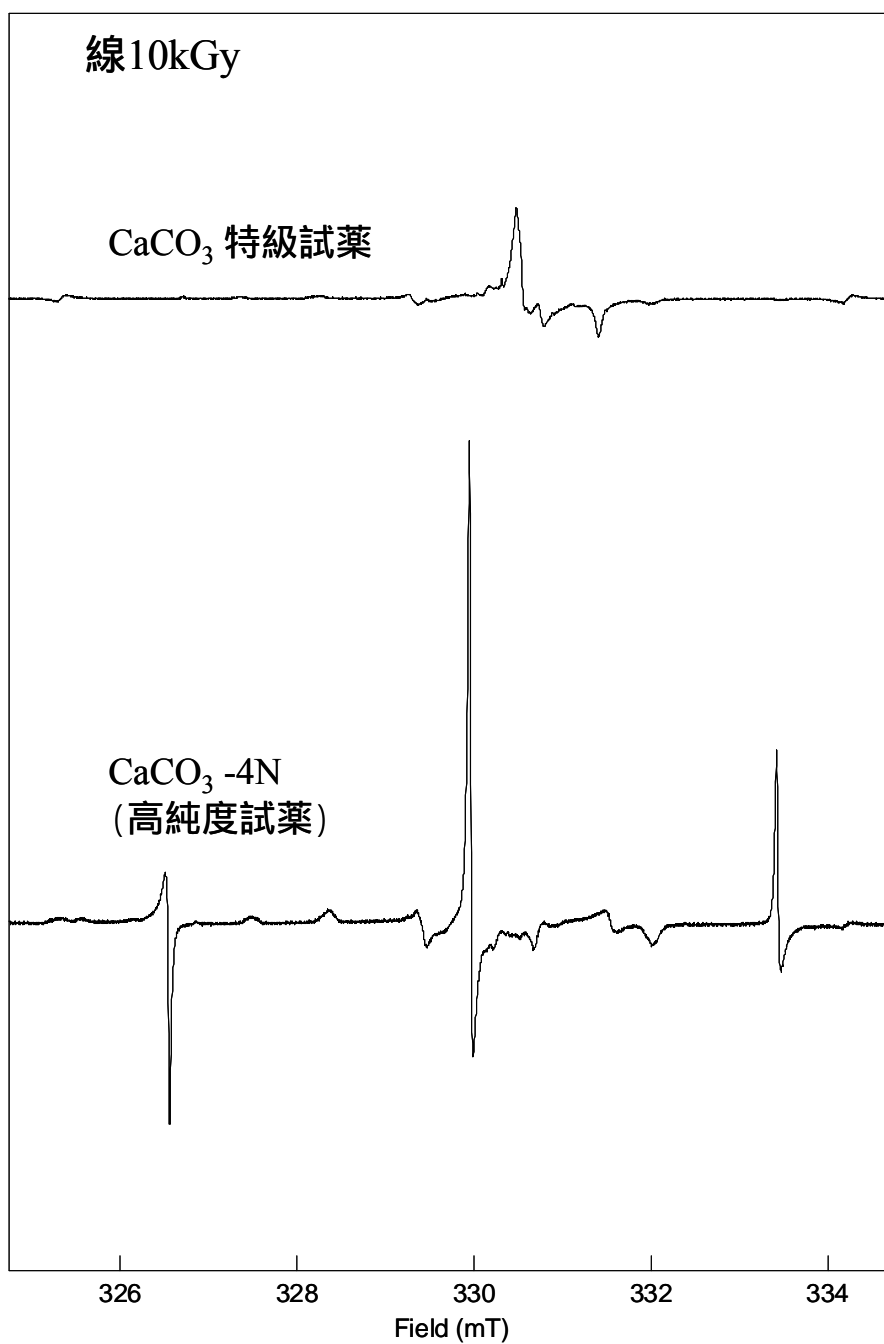


図 4.1.5 炭酸カルシウムの特級試薬と高純度試薬にガンマ線照射(10kGy)した試料から得られた ESR スペクトル

ESR 条件: Power 1mW (9.27GHz), Field 330±5mT, Mod. 20 μT (100kHz), Time Const.0.03sec, Sweep Time 4min, Mn<sup>2+</sup> 外部標準マーカ-を挿入

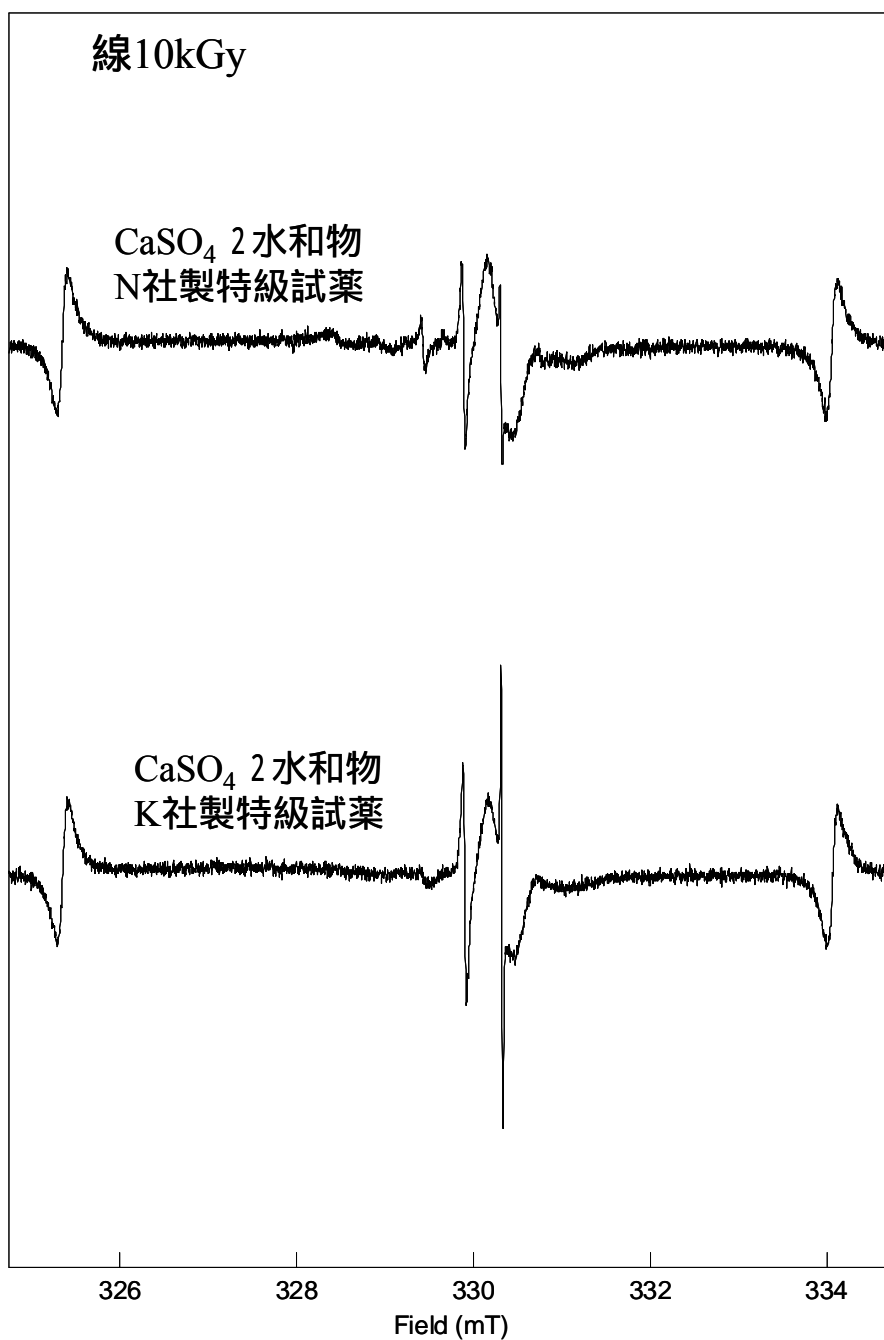


図 4.1.6 硫酸カルシウム 2 水和物のナカライテスク社製特級試薬と関東化学社製特級試薬にガンマ線照射 (10kGy) した試料から得られた ESR スペクトル  
ESR 条件: Power 1mW (9.27GHz), Field 330±5mT, Mod. 20 μT (100kHz), Time Const.0.03sec, Sweep Time 4min, Mn<sup>2+</sup> 外部標準マーカ-を挿入

## 4.2 ガンマ線照射試料から観測される ESR 信号の解析

### 4.2.1 概要

前節における、ガンマ線照射によって安定で十分観測が可能なラジカルを生成する9種のカルシウム塩（炭酸カルシウム（特級、高純度）、硫酸カルシウム2水和物（ナカライ製、関東化学製）、硫酸カルシウム無水物、硫酸カルシウム0.5水和物、ヒドロキシアパタイト、フッ化カルシウム、グルコン酸カルシウム）について、生成するラジカルの ESR 特性について基礎的な知見の収集を実施した。

### 4.2.2 実験方法

使用した装置や試料は前節と同じで実施した。

ESR 測定の実出力飽和測定は試料を変えことなく、マイクロ波出力のみを調整して連続して測定した。

### 4.2.3 結果と考察

信号解析として ESR 測定時のマイクロ波出力変化による信号形状の変化挙動解析を行った。ESR 測定時のマイクロ波は通常出力が高いほど信号強度が増大するが、出力が大きくなりすぎると飽和現象（power saturation）によって逆に観測される信号が減少する。この現象はラジカルの種類（状態）によって異なることから、複数の成分が含まれている場合、ピークによって信号強度の変化挙動が異なることが多い。各試料にガンマ線 1 kGy, 20 kGy 照射したものをマイクロ波出力を変えて測定し、それぞれの最強信号のピーク高さ、および信号全体の2回積分値（ピーク面積）をプロットしたものを図示した。図 4.2.1~2 に炭酸カルシウム、図 4.2.3~4 に高純度炭酸カルシウムについて示したが、いずれも挙動は一致しており、不純物の影響によって信号に差が出ているのではないと考えられる。硫酸カルシウム2水和物、図 4.2.5~6 に硫酸カルシウム無水物について、マイクロ波出力と信号形状変化を表す図を示した。炭酸カルシウムでは全体が同じように減衰しており、単一成分の可能性が高いが、硫酸カルシウム2水和物では2つのピークは全く異なっており、硫酸カルシウム無水物では3種の挙動に分かれ、複数の状態が混在している可能性が高い。これは不純物など全く異なる物質由来のラジカルが混在するのか、1つの物質から複数のラジカルが生成するのか、同一ラジカル種で異なる状態（結晶中の位置の違いなど）が混在するのかが不明で

ある。またこれらの知見は、各試料の測定条件を決める際に非常に重要となる。マイクロ波出力を高くすればS/Nが小さく見た目が良好な信号を得ることができるが、高出力で著しく信号強度が下がるような試料では、誤った結果を与える。硫酸カルシウム0.5水和物(図4.2.11)、ヒドロキシアパタイト(図4.2.12)は高出力での飽和が少ないので高出力で測定できるが、炭酸カルシウムや硫酸カルシウムは高出力で著しく信号が小さくなるので、できるだけ低出力で測定する必要がある。

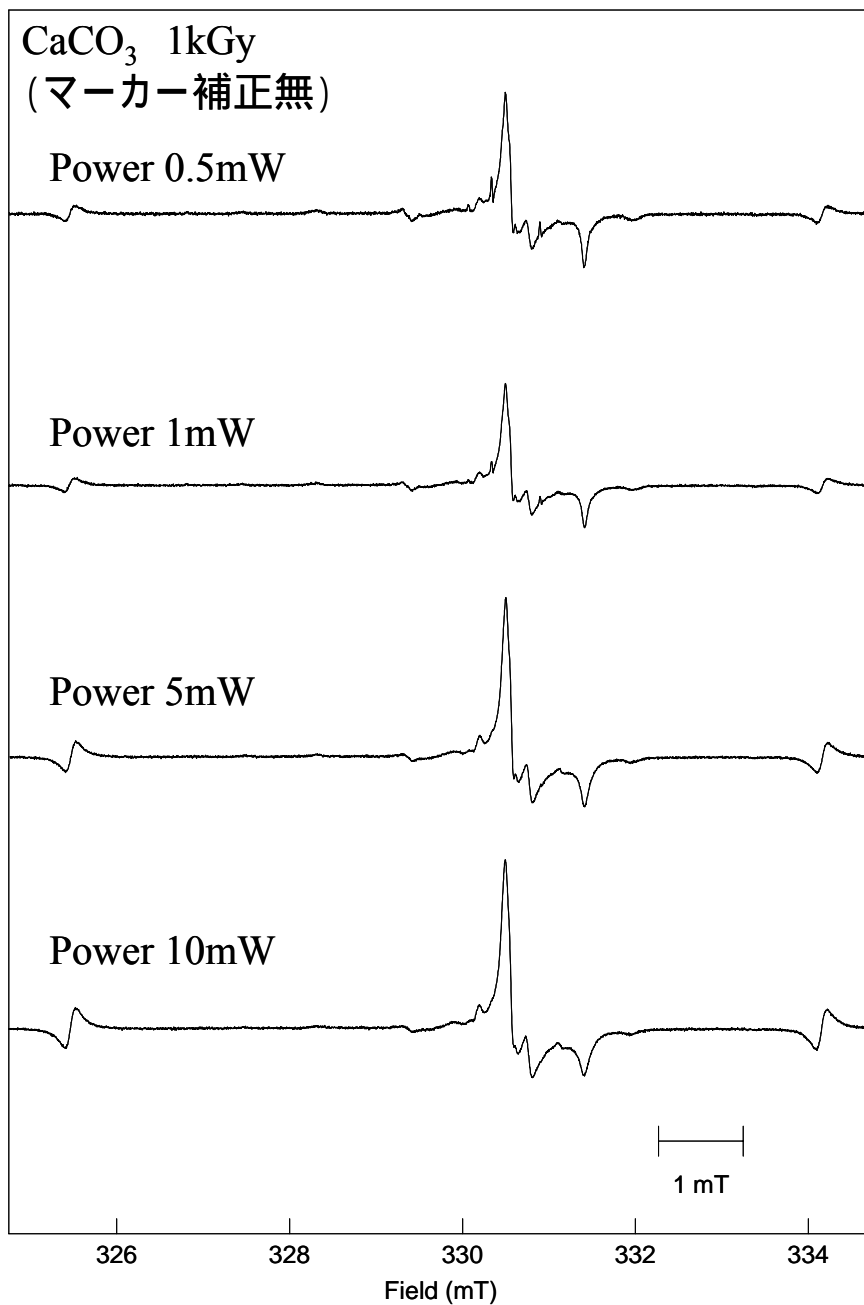


図 4.2.1\_1 炭酸カルシウムに 線を1kGy照射した試料についてESRマイクロ波出力を変えて得られた ESR スペクトル

ESR 条件: 9.27GHz, Field 330 ± 5mT, Mod. 20 μT (100kHz), Time Const. 0.03sec, Sweep Time 4min, Mn<sup>2+</sup> 外部標準マーカを挿入  
マーカによる信号強度の規格化は行っていない。

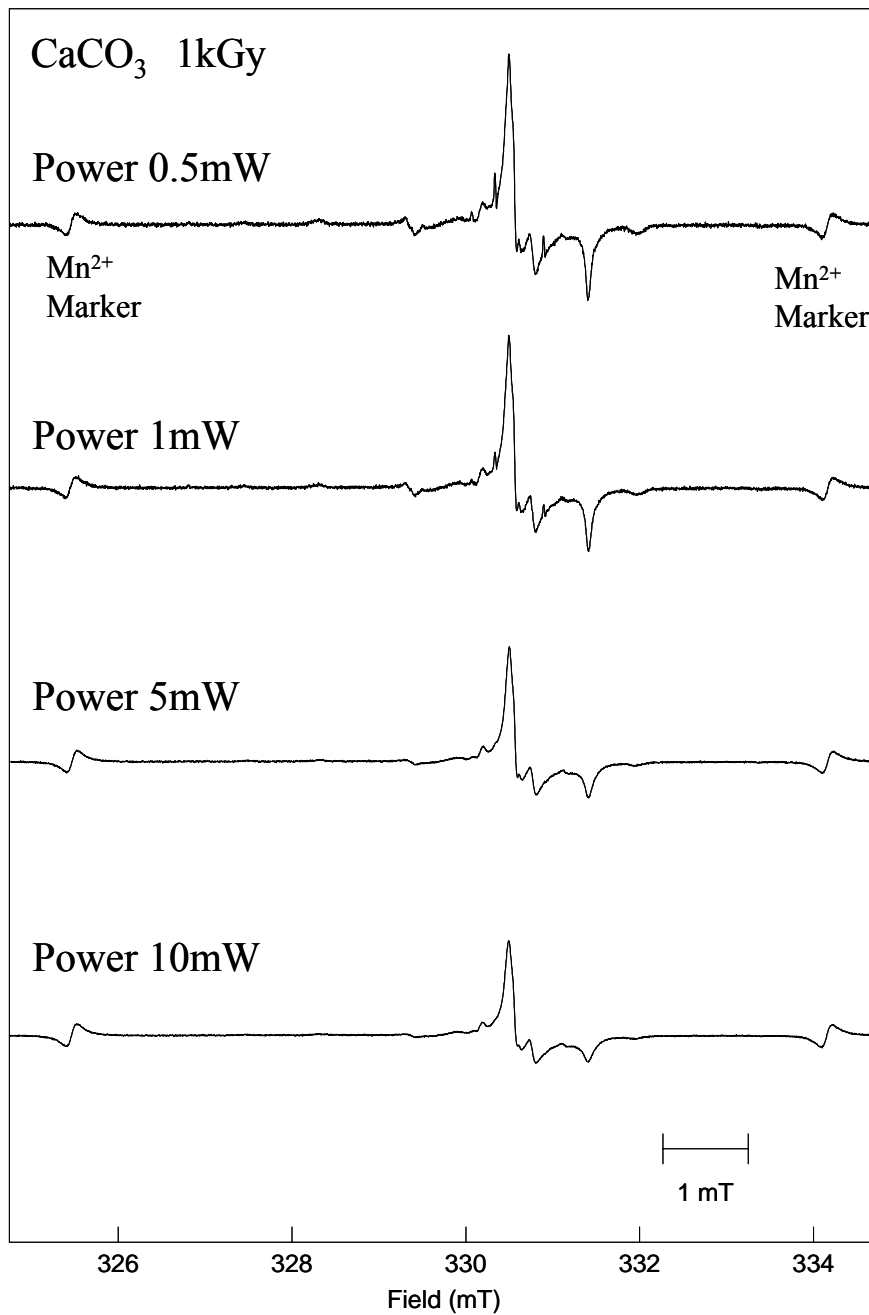


図 4.2.1\_2 炭酸カルシウムに 線を 1kGy 照射した試料について ESR マイクロ波出力を変えて得られた ESR スペクトル  
 ESR 条件: 9.27GHz, Field  $330 \pm 5$  mT, Mod. 20  $\mu$  T (100kHz), Time Const. 0.03sec, Sweep Time 4min, Mn<sup>2+</sup> 外部標準マーカを挿入  
 マーカー強度で信号強度を規格化したもの。

表 4.2.1 炭酸カルシウム 線 1kGy 照射試料から得られた ESR スペクトル (図 4.2.1\_2) の最大ピーク強度と信号面積を算出したもの

ファイル名	ピーク高			線幅(mT)		ピーク面積		
	基準信号	標的信号	比	基準信号	標的信号	基準信号	標的信号	比
CaCO3-1kGy-Pow0.5mW	164	1761	10.7378	0.136752	0.905983	449730	23952482	53.25969
CaCO3-1kGy-Pow1mW	154	1449	9.409091	0.153846	0.915751	459192	20833142	45.36913
CaCO3-1kGy-Pow5mW	319	2104	6.595611	0.117216	0.913309	983385	32470547	33.01916
CaCO3-1kGy-Pow10mW	410	2187	5.334146	0.112332	0.315018	1330802	36282159	27.26338

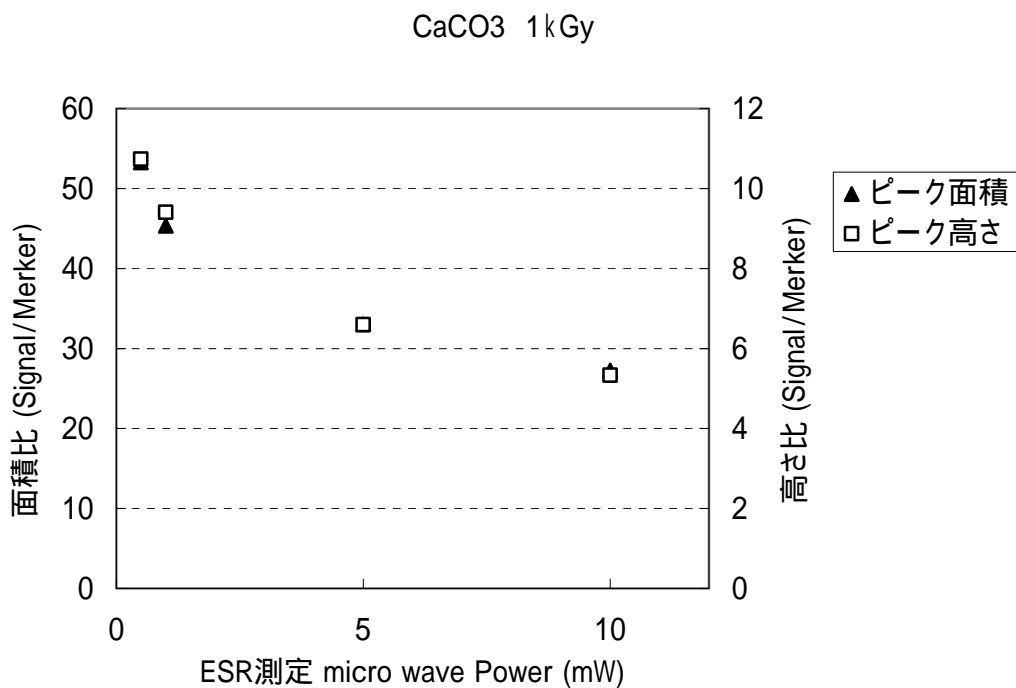


図 4.2.1\_3 炭酸カルシウム 線 1kGy 照射試料から得られた ESR スペクトル (図 4.2.1\_2) についてマイクロ波出力と ESR 信号強度および面積 (Mn マーカーとの比) でプロットしたもの



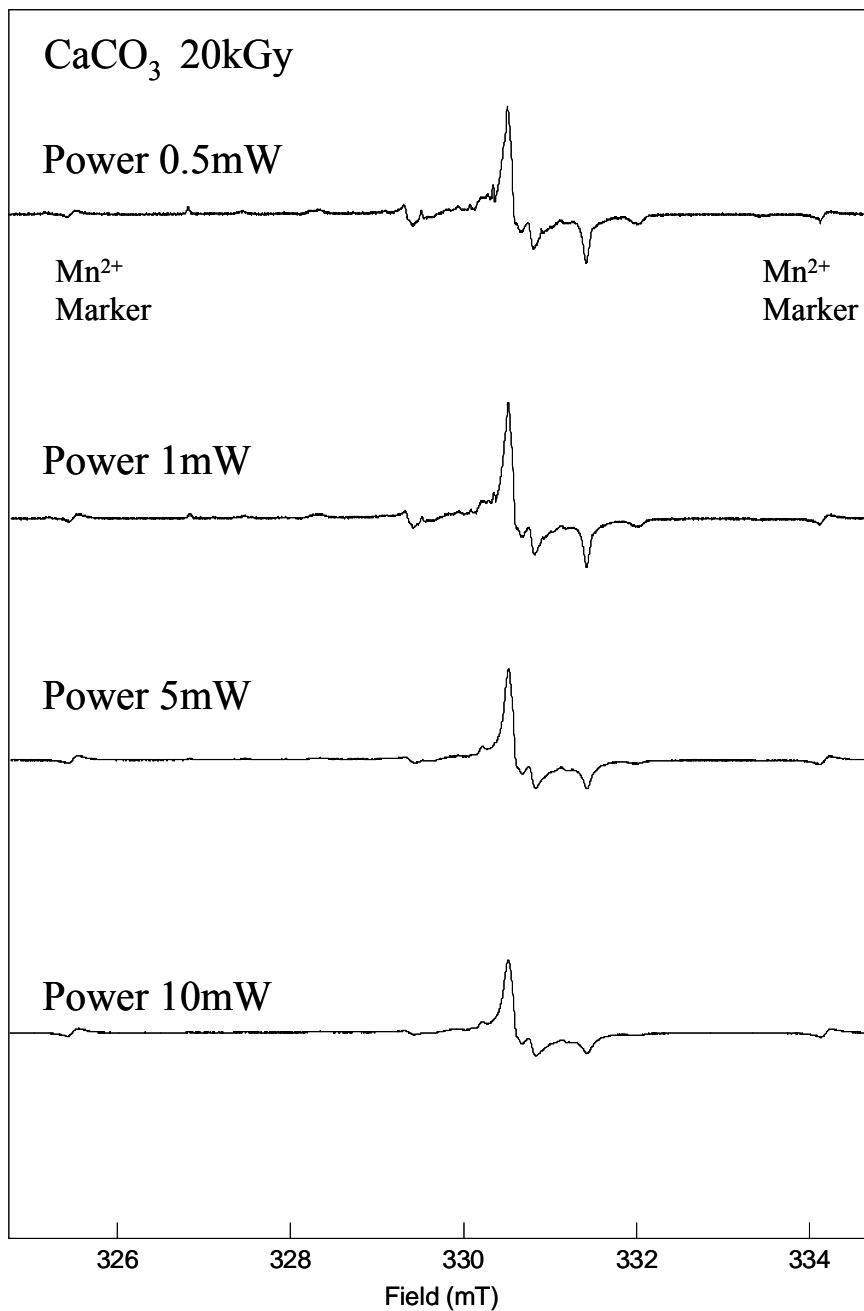


図 4.2.2\_1 炭酸カルシウムに 線を 20kGy 照射した試料について ESR マイクロ波出力を変えて得られた ESR スペクトル  
 ESR 条件: 9.27GHz, Field  $330 \pm 5$ mT, Mod. 20  $\mu$ T (100kHz), Time Const. 0.03sec, Sweep Time 4min, Mn<sup>2+</sup> 外部標準マーカを挿入  
 マーカー強度で信号強度を規格化したもの。

表 4.2.2 炭酸カルシウム 線 20kGy 照射試料から得られた ESR スペクトル (図 4.2.2\_1) の最大ピーク強度と信号面積を算出したもの

ファイル名	ピーク高			線幅(mT)		ピーク面積		
	基準信号	標的信号	比	基準信号	標的信号	基準信号	標的信号	比
CaCO3-20kGy-Pow05	92	1055	11.46739	0.119658	0.302808	109937	26223215	238.5295
CaCO3-20kGy-Pow1	98	1413	14.41837	0.124542	0.310134	145949	33434715	229.0849
CaCO3-20kGy-Pow5	167	2277	13.63473	0.156288	0.315018	305251	49665951	162.7053
CaCO3-20kGy-Pow10	206	2439	11.83981	0.126984	0.31746	405607	54700465	134.8608

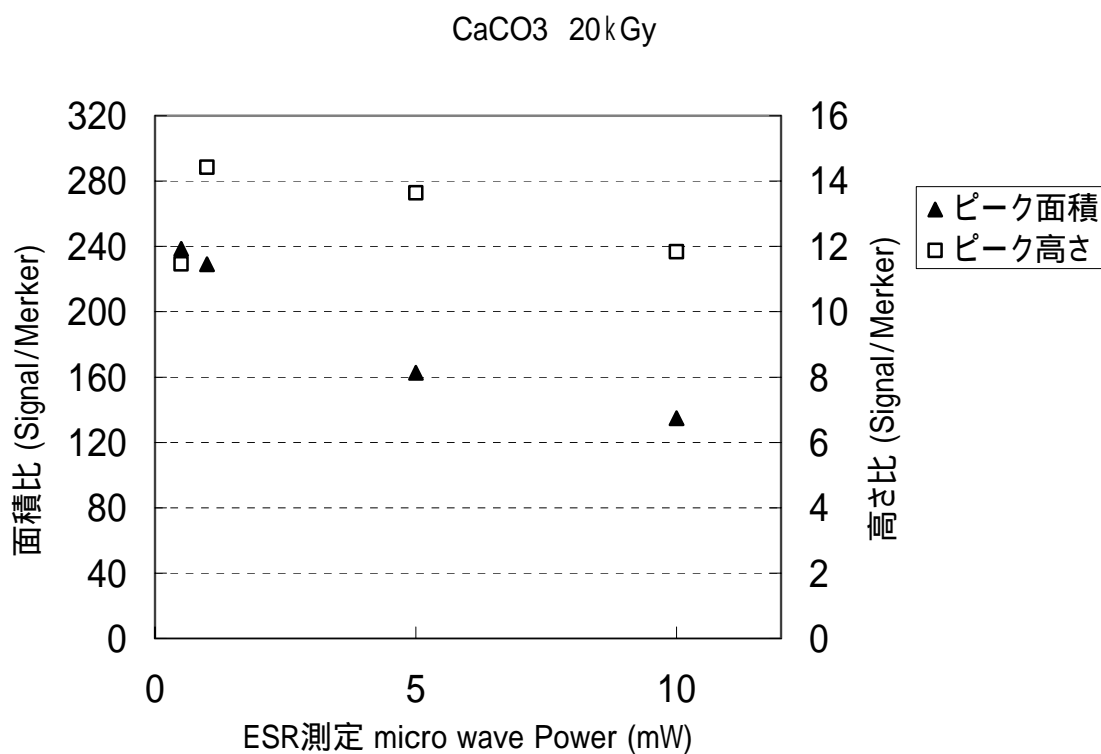


図 4.2.2\_2 炭酸カルシウム 線 20kGy 照射試料から得られた ESR スペクトル (図 4.2.2\_1) についてマイクロ波出力と ESR 信号強度および面積 (Mn マーカーとの比) でプロットしたもの

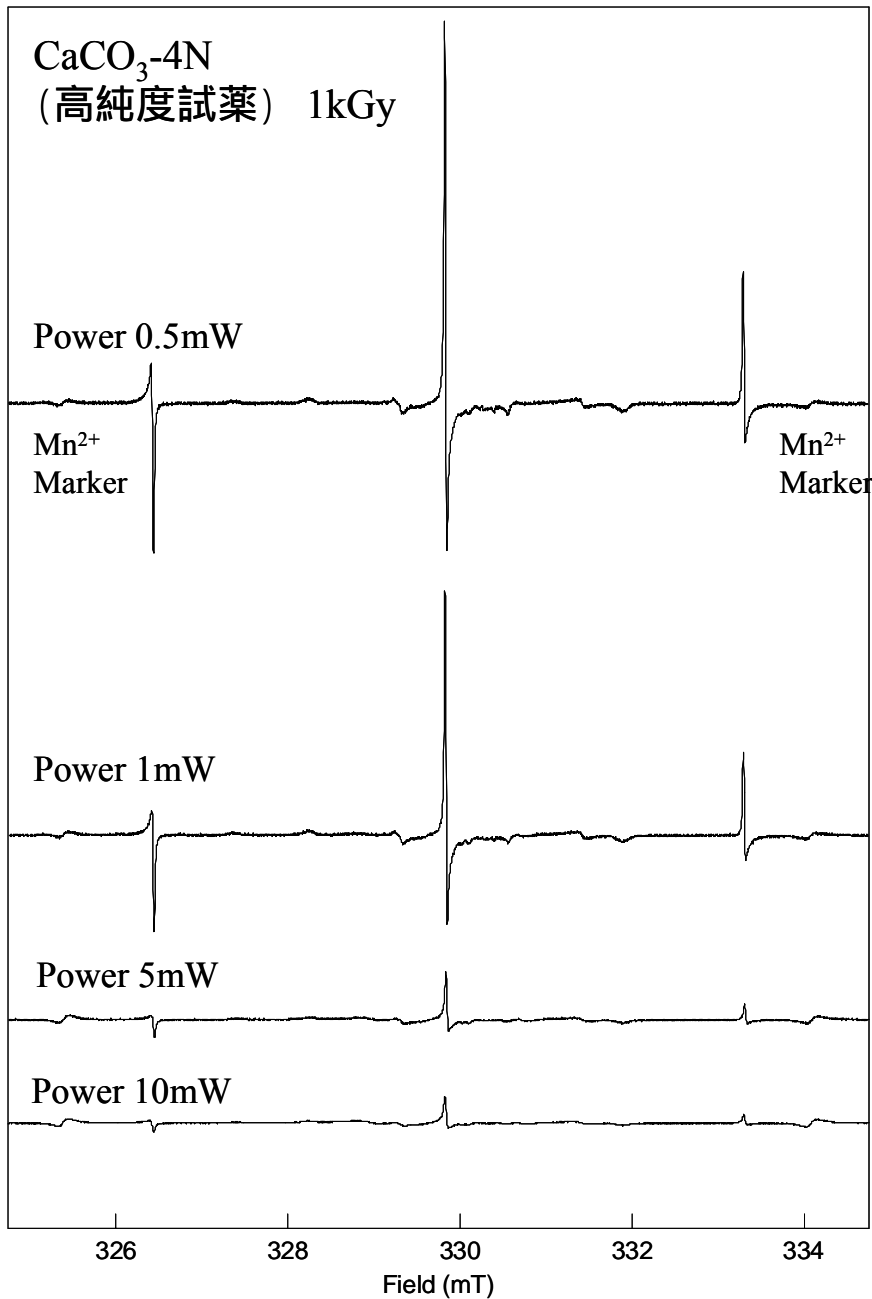


図 4.2.3\_1 炭酸カルシウム(高純度試薬)に 線を 1kGy 照射した試料について ESR マイクロ波出力を変えて得られた ESR スペクトル  
 ESR 条件: 9.27GHz, Field 330 ± 5mT, Mod. 20 μT (100kHz), Time Const. 0.03sec, Sweep Time 4min, Mn<sup>2+</sup> 外部標準マーカを挿入  
 マーカー強度で信号強度を規格化したもの。

表 4.2.3 炭酸カルシウム(高純度試薬) 線 1kGy 照射試料から得られた ESR スペクトル(図 4.2.3\_1)の最大ピーク強度と信号面積を算出したもの

ファイル名	ピーク高			線幅(mT)		ピーク面積		
	基準信号	標的信号	比	基準信号	標的信号	基準信号	標的信号	比
CaCO3-4N-1kGy-Pow05	35	2355	67.28571	0.136752	0.02442	33486	3390232	101.2433
CaCO3-4N-1kGy-Pow1	44	1862	42.31818	0.105006	0.02442	45093	5583453	123.8208
CaCO3-4N-1kGy-Pow5	75	560	7.466667	0.153846	0.03663	92146	8020971	87.04633
CaCO3-4N-1kGy-Pow10	186	736	3.956989	0.139194	0.041514	244247	19632857	80.38116

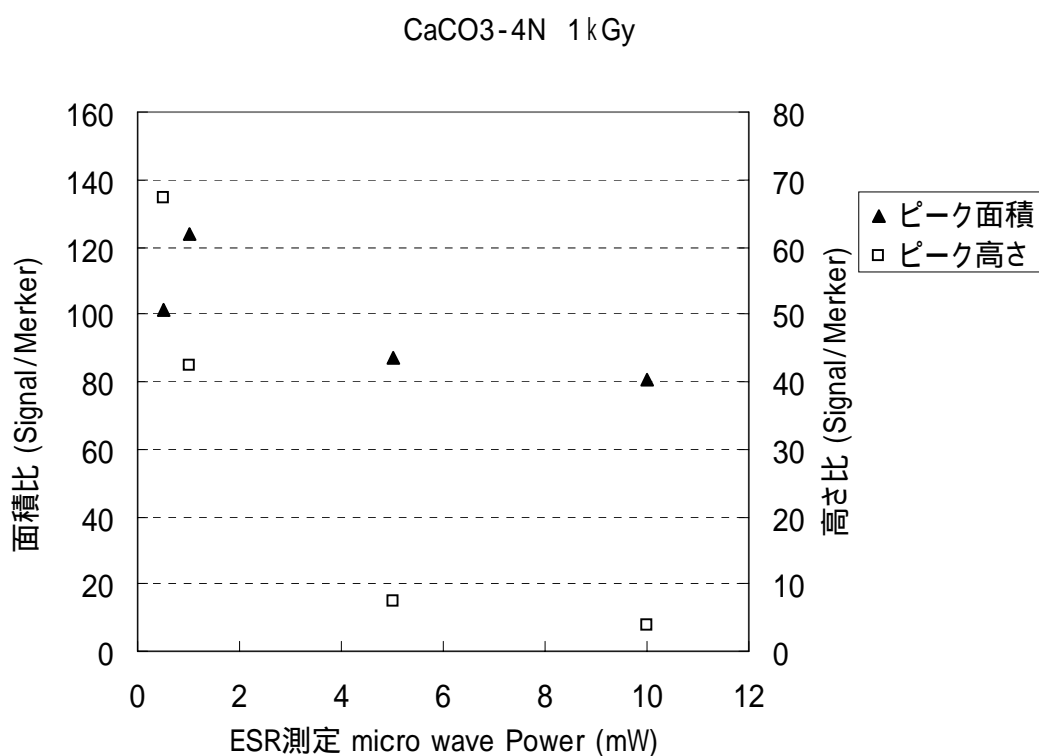


図 4.2.3\_2 炭酸カルシウム(高純度試薬) 線 1kGy 照射試料から得られた ESR スペクトル(図 4.2.3\_1)についてマイクロ波出力と ESR 信号強度および面積(Mn マーカーとの比)でプロットしたもの

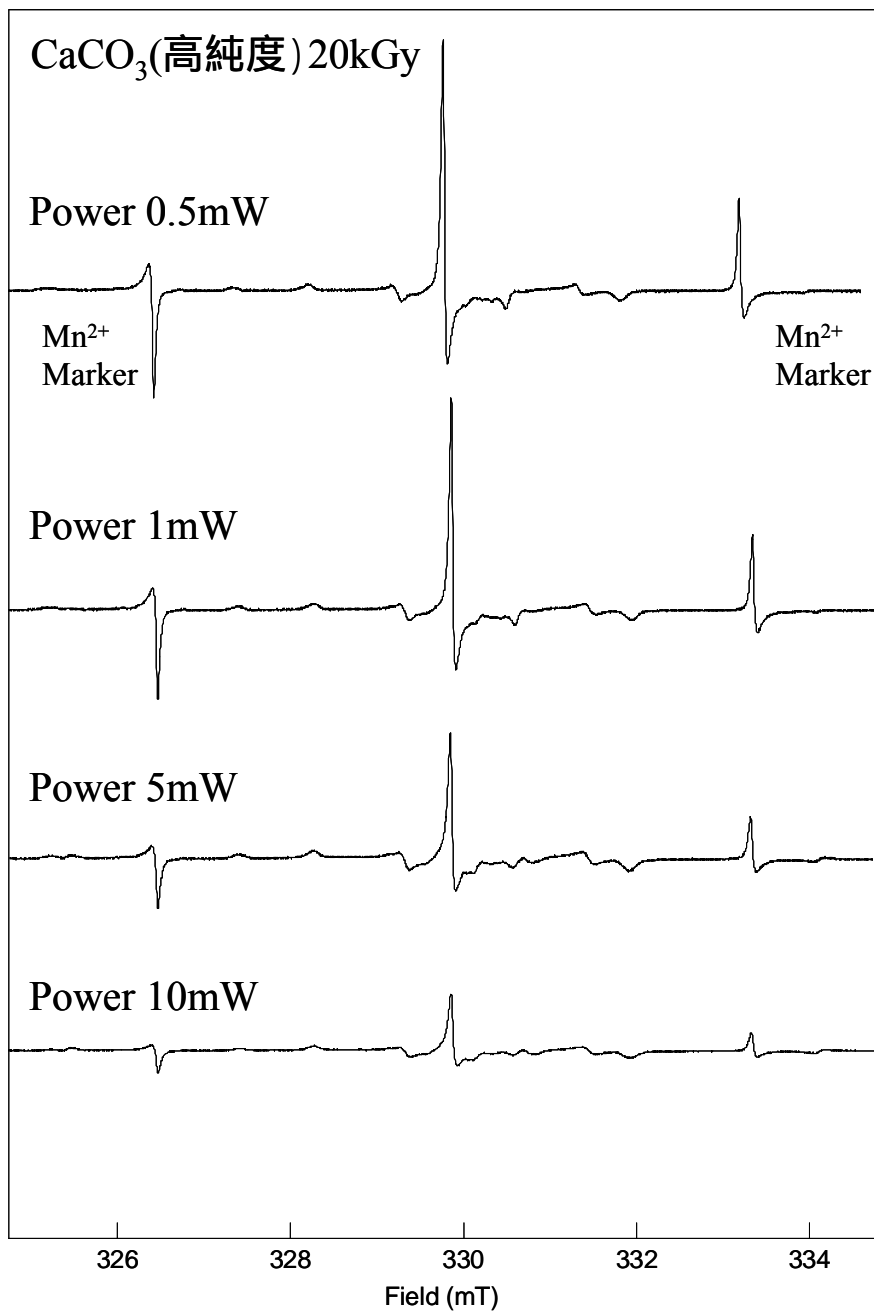


図 4.2.4\_1 炭酸カルシウム（高純度試薬）に 線を 20kGy 照射した試料について ESR マイクロ波出力を変えて得られた ESR スペクトル  
 ESR 条件: 9.27GHz, Field 330 ± 5mT, Mod. 20 μT (100kHz), Time Const. 0.03sec, Sweep Time 4min, Mn<sup>2+</sup> 外部標準マーカを挿入  
 マーカー強度で信号強度を規格化したもの。

表 4.2.4 炭酸カルシウム（高純度試薬）線 20kGy 照射試料から得られた ESR スペクトル（図 4.2.4\_1）の最大ピーク強度と信号面積を算出したもの

ファイル名	ピーク高			線幅(mT)		ピーク面積		
	基準信号	標的的信号	比	基準信号	標的的信号	基準信号	標的的信号	比
CaCO3-4N-20kGy-Pow05	27	2316	85.77778	0.432234	0.051282	25165	4844181	192.4968
CaCO3-4N-20kGy-Pow1	28	2017	72.03571	0.1221	0.053724	31571	7917868	250.7956
CaCO3-4N-20kGy-Pow5	48	1340	27.91667	0.139194	0.06105	75043	17456234	232.6164
CaCO3-4N-20kGy-Pow10	49	937	19.12245	0.1221	0.080586	99806	21103434	211.4445

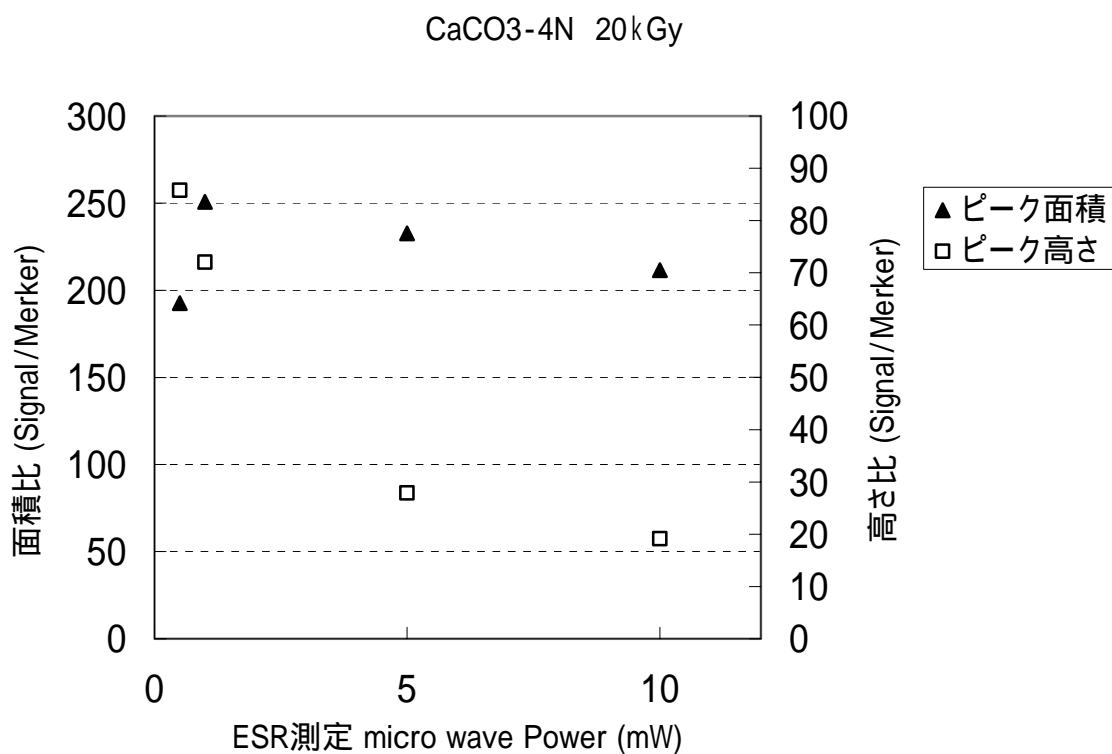


図 4.2.4\_2 炭酸カルシウム（高純度試薬）線 20kGy 照射試料から得られた ESR スペクトル（図 4.2.4\_1）についてマイクロ波出力と ESR 信号強度および面積（Mn マーカーとの比）でプロットしたもの

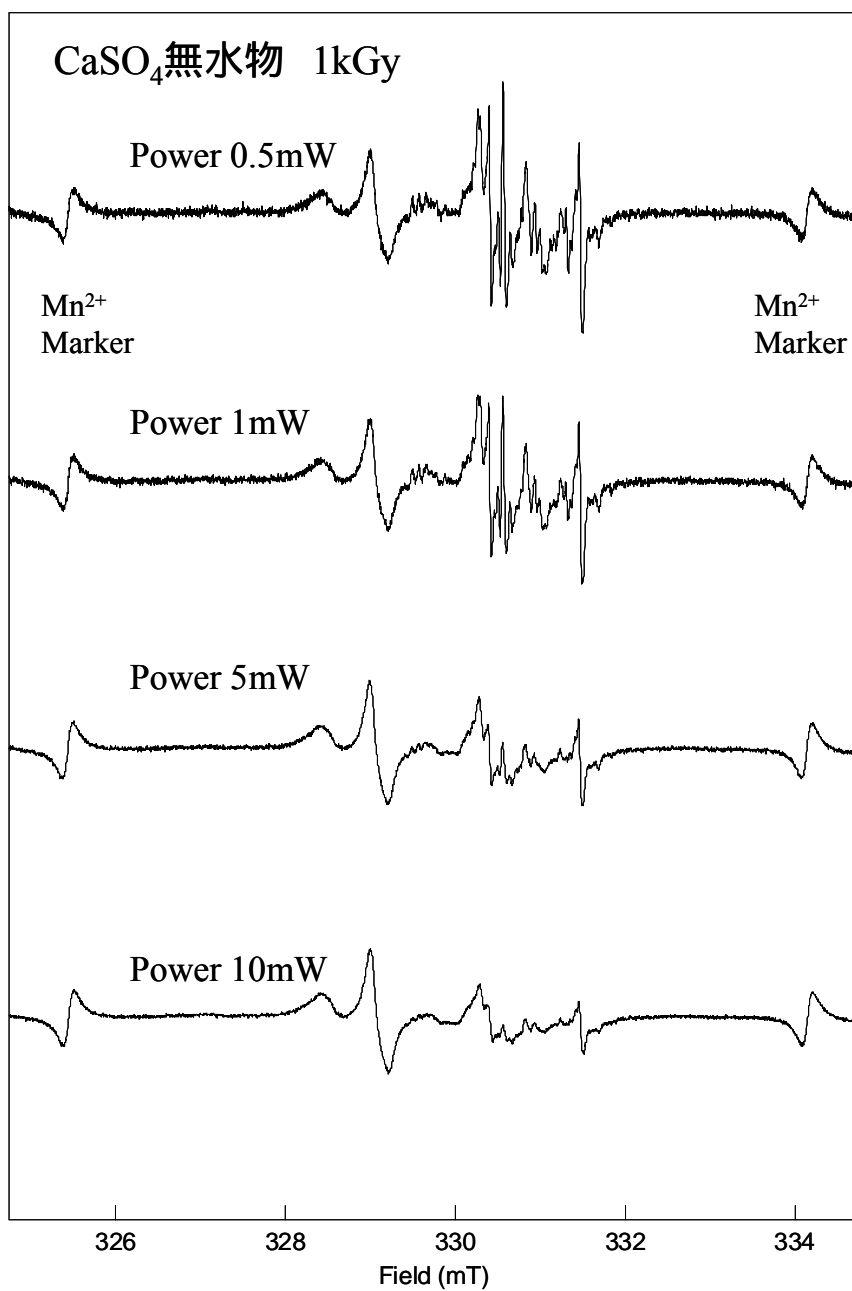


図 4.2.5\_1 硫酸カルシウム無水物に 線を1kGy照射した試料についてESR マイクロ波出力を変えて得られた ESR スペクトル  
 ESR 条件: 9.27GHz, Field  $330 \pm 5$  mT, Mod.  $20 \mu\text{T}$  (100kHz), Time Const. 0.03sec, Sweep Time 4min,  $\text{Mn}^{2+}$  外部標準マーカを挿入  
 マーカー強度で信号強度を規格化したもの。

表 4.2.5 硫酸カルシウム無水物 線 1kGy 照射試料から得られた ESR スペクトル  
 ( 図 4.2.5\_1 ) の最大ピーク強度と信号面積を算出したもの

ファイル名	ピーク高			線幅(mT)		ピーク面積		
	基準信号	標的信号	比	基準信号	標的信号	基準信号	標的信号	比
CaSO4AH-1kGy-Pow05	231	1022	4.424242	0.126984	0.940171	503400	32685810	64.9301
CaSO4AH-1kGy-Pow1	302	1060	3.509934	0.105006	1.230769	719523	42280153	58.76136
CaSO4AH-1kGy-Pow5	625	1193	1.9088	0.124542	1.213675	1578581	69635339	44.11262
CaSO4AH-1kGy-Pow10	849	1048	1.234393	0.124542	1.218559	2180082	85028869	39.0026

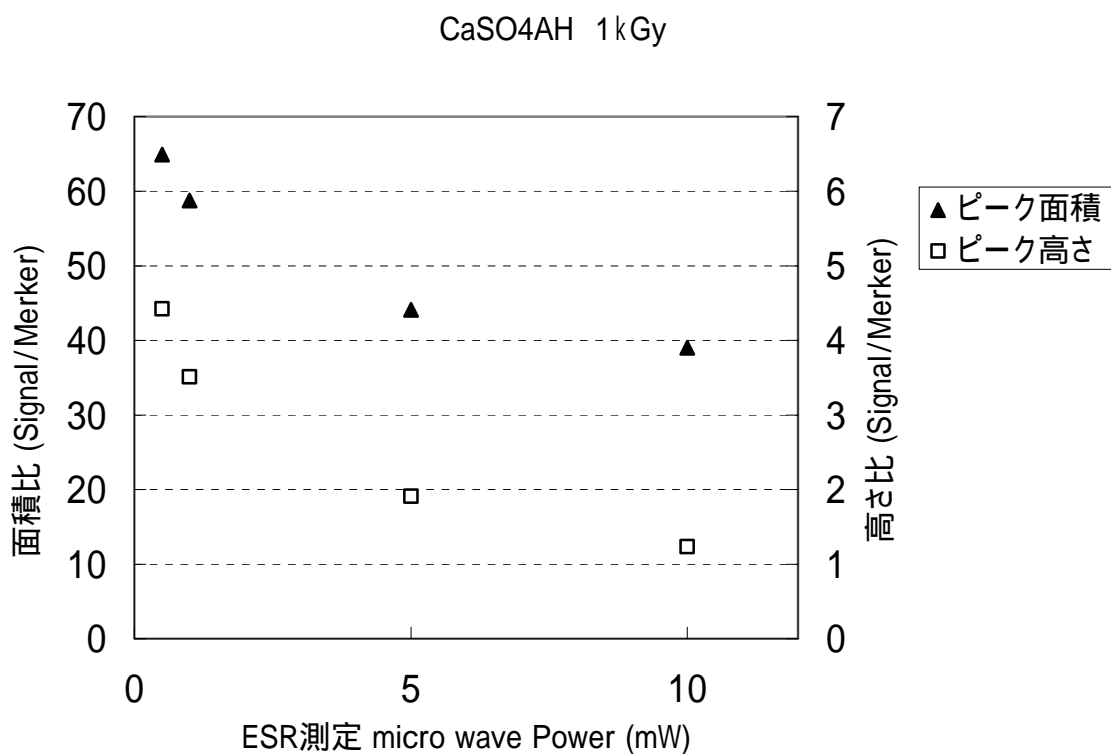


図 4.2.5\_2 硫酸カルシウム無水物 線 1kGy 照射試料から得られた ESR スペクトル( 図 4.2.5\_1 )についてマイクロ波出力と ESR 信号強度および面積 ( Mn マーカーとの比) でプロットしたもの



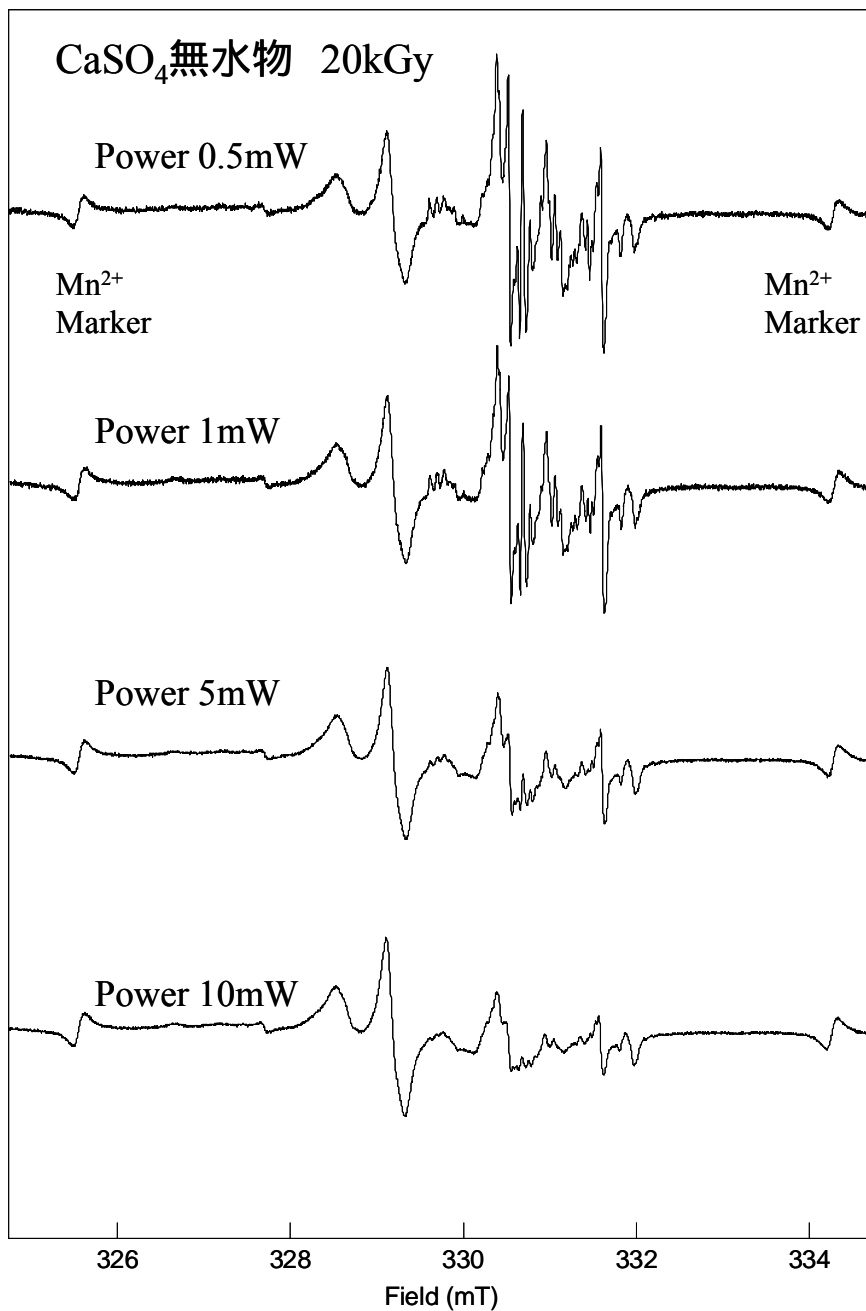


図 4.2.6\_1 硫酸カルシウム無水物に 線を 20kGy 照射した試料について ESR マイクロ波出力を変えて得られた ESR スペクトル  
 ESR 条件: 9.27GHz, Field  $330 \pm 5$ mT, Mod. 20  $\mu$ T (100kHz), Time Const. 0.03sec, Sweep Time 4min,  $\text{Mn}^{2+}$  外部標準マーカを挿入  
 マーカー強度で信号強度を規格化したもの。

表 4.2.6 硫酸カルシウム無水物 線 1kGy 照射試料から得られた ESR スペクトル  
 ( 図 4.2.6\_1 ) の最大ピーク強度と信号面積を算出したもの

ファイル名	ピーク高			線幅(mT)		ピーク面積		
	基準信号	標的信号	比	基準信号	標的信号	基準信号	標的信号	比
CaSO4AH-20kGy-Pow05	217	2037	9.387097	0.13431	0.161172	388175	1.01E+08	260.7027
CaSO4AH-20kGy-Pow1	147	1169	7.952381	0.117216	0.163614	324792	67615225	208.1801
CaSO4AH-20kGy-Pow5	309	1175	3.802589	0.124542	0.163614	597054	1.24E+08	208.0647
CaSO4AH-20kGy-Pow10	413	1018	2.464891	0.124542	0.168498	760213	1.6E+08	210.9316

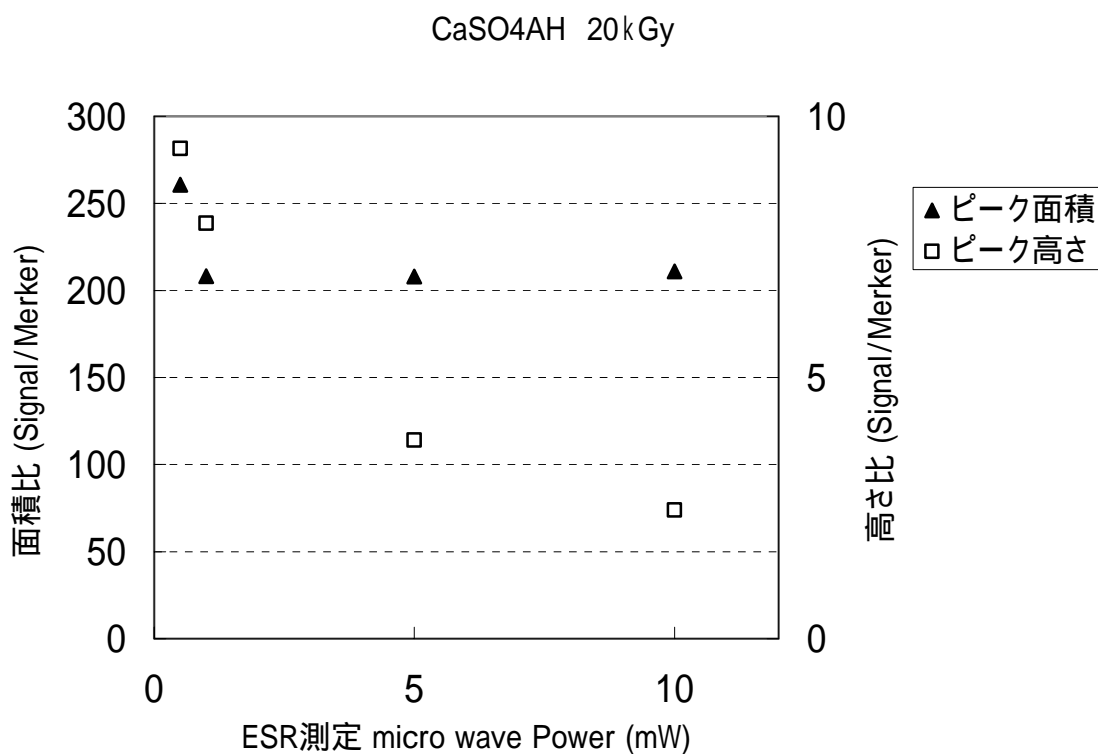


図 4.2.6\_2 硫酸カルシウム無水物 線 20kGy 照射試料から得られた ESR スペクトル ( 図 4.2.6\_1 ) についてマイクロ波出力と ESR 信号強度および面積 ( Mn マーカーとの比 ) でプロットしたもの

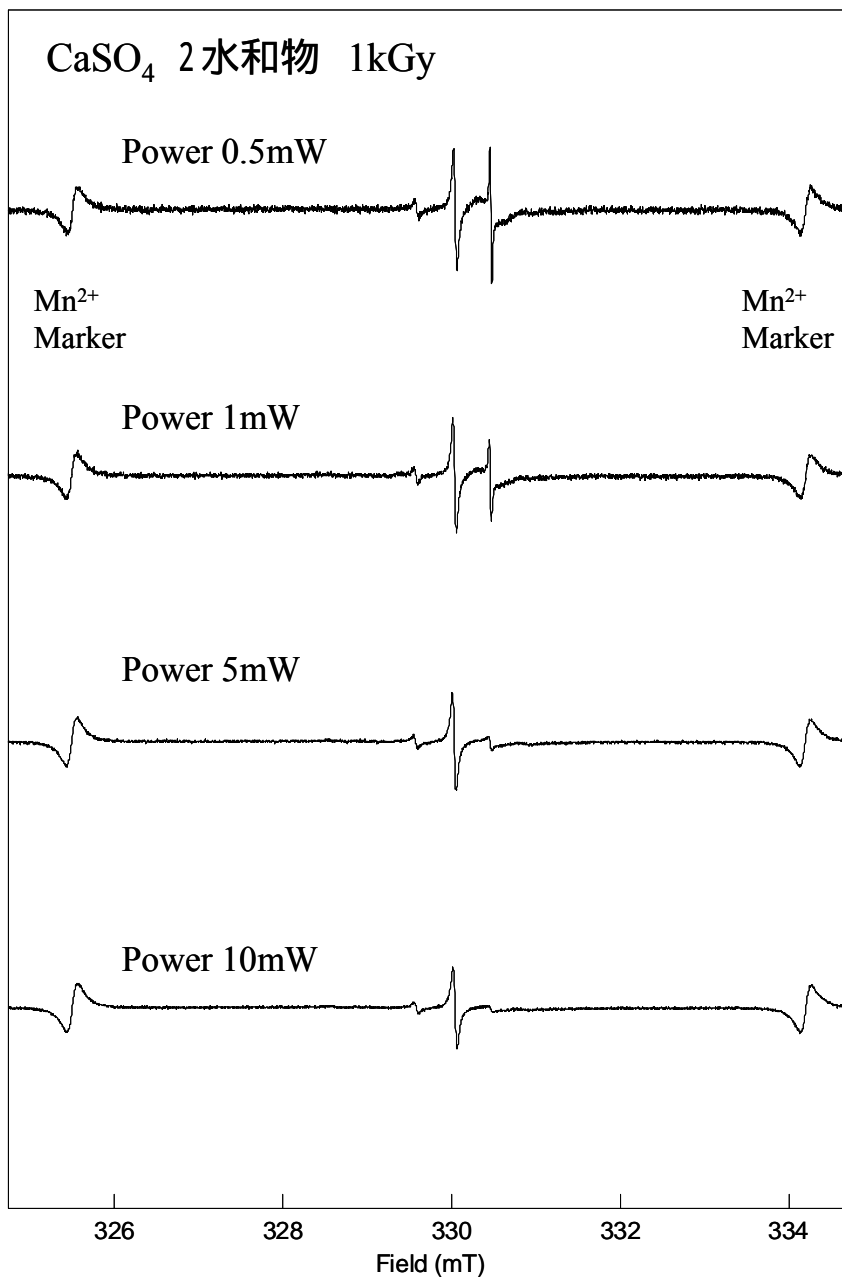


図 4.2.7\_1 硫酸カルシウム 2 水和物(ナカライテスク社製)に 線を 1kGy 照射した試料について ESR マイクロ波出力を変えて得られた ESR スペクトル  
 ESR 条件: 9.27GHz, Field  $330 \pm 5\text{mT}$ , Mod.  $20 \mu\text{T}$  (100kHz), Time Const. 0.03sec, Sweep Time 4min,  $\text{Mn}^{2+}$  外部標準マーカを挿入  
 マーカー強度で信号強度を規格化したもの。

表 4.2.7 硫酸カルシウム 2 水和物 (ナカライテスク社製) 線 1kGy 照射試料から得られた ESR スペクトル (図 4.2.7\_1) の最大ピーク強度と信号面積を算出したもの

ファイル名	ピーク高			線幅(mT)		ピーク面積		
	基準信号	標的信号	比	基準信号	標的信号	基準信号	標的信号	比
CaSO4DH-N-1kGy-Pow05	504	1391	2.759921	0.139194	0.021978	1336574	4130284	3.090202
CaSO4DH-N-1kGy-Pow10	731	1717	2.348837	0.119658	0.041514	1868399	4678826	2.50419
CaSO4DH-N-1kGy-Pow5	1454	2875	1.977304	0.126984	0.046398	4084135	5780401	1.415331
CaSO4DH-N-1kGy-Pow10	1891	3108	1.643575	0.112332	0.04884	5557248	6132593	1.103531

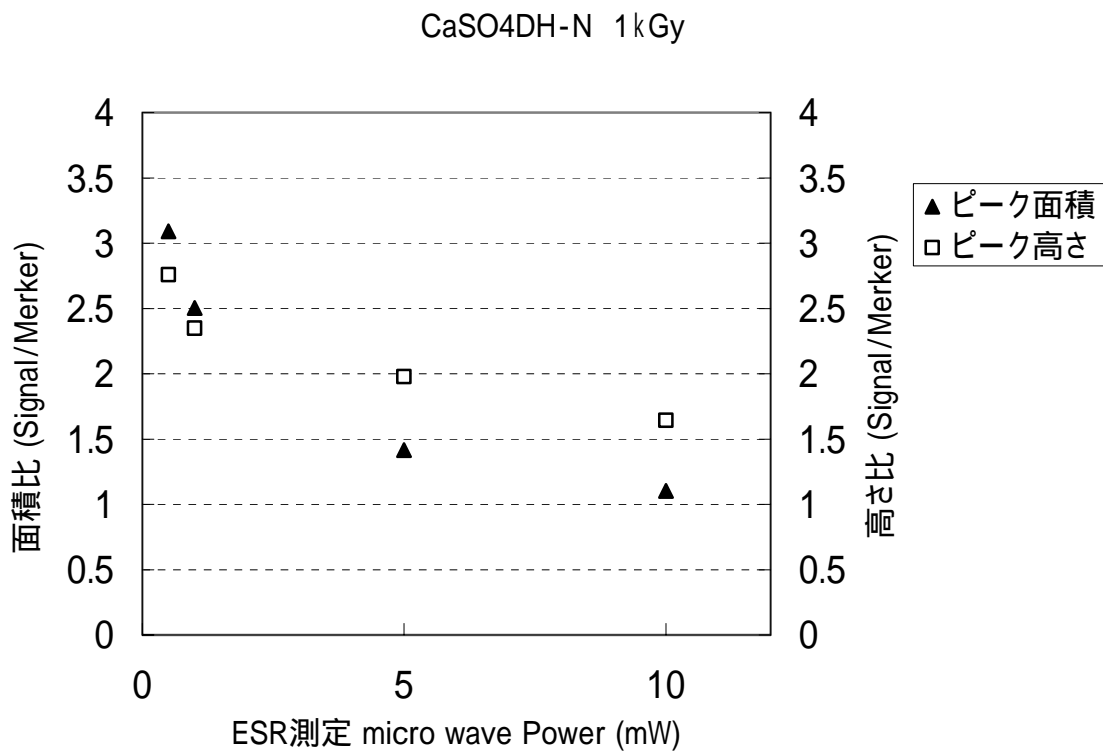


図 4.2.7\_2 硫酸カルシウム 2 水和物 (ナカライテスク社製) 線 1kGy 照射試料から得られた ESR スペクトル (図 4.2.7\_1) についてマイクロ波出力と ESR 信号強度および面積 (Mn マーカーとの比) でプロットしたもの

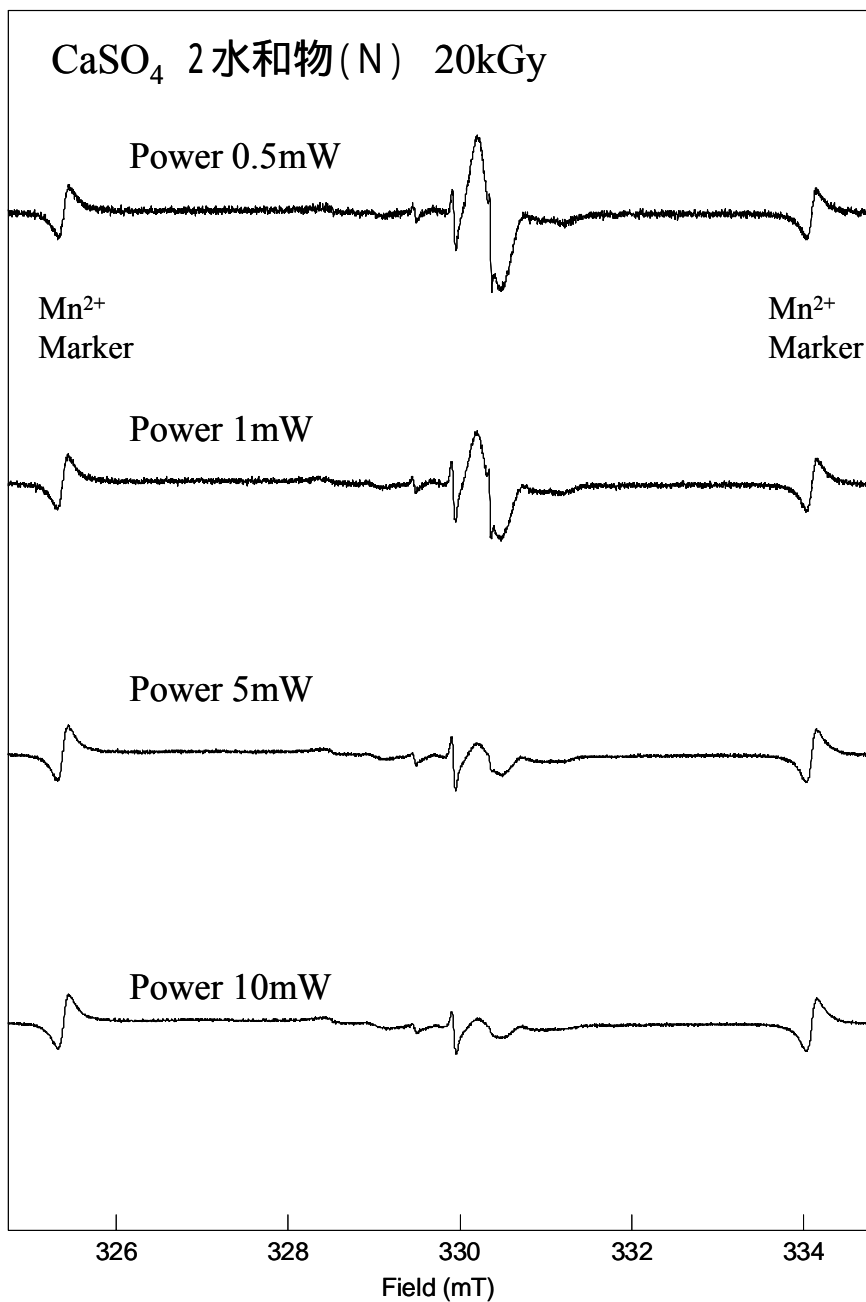


図 4.2.8\_1 硫酸カルシウム 2 水和物 (ナカライテスク社製) に 線を 20kGy 照射した試料について ESR マイクロ波出力を変えて得られた ESR スペクトル  
 ESR 条件: 9.27GHz, Field 330 ± 5mT, Mod. 20 μT (100kHz), Time Const. 0.03sec, Sweep Time 4min, Mn<sup>2+</sup> 外部標準マーカを挿入  
 マーカー強度で信号強度を規格化したもの。

表 4.2.8 硫酸カルシウム 2 水和物(ナカライテスク社製) 線 20kGy 照射試料から得られた ESR スペクトル(図 4.2.8\_1)の最大ピーク強度と信号面積を算出したもの

ファイル名	ピーク高			線幅(mT)		ピーク面積		
	基準信号	標的信号	比	基準信号	標的信号	基準信号	標的信号	比
CaSO4DH-N-20kGy-Pow0	241	723	3	0.117216	0.17094	531347	14793426	27.84137
CaSO4DH-N-20kGy-Pow1	327	661	2.021407	0.112332	0.26862	762418	17342956	22.74731
CaSO4DH-N-20kGy-Pow5	674	660	0.979228	0.117216	0.046398	1762876	27332120	15.50428
CaSO4DH-N-20kGy-Pow1	908	712	0.784141	0.129426	0.04884	2299498	35229512	15.32052

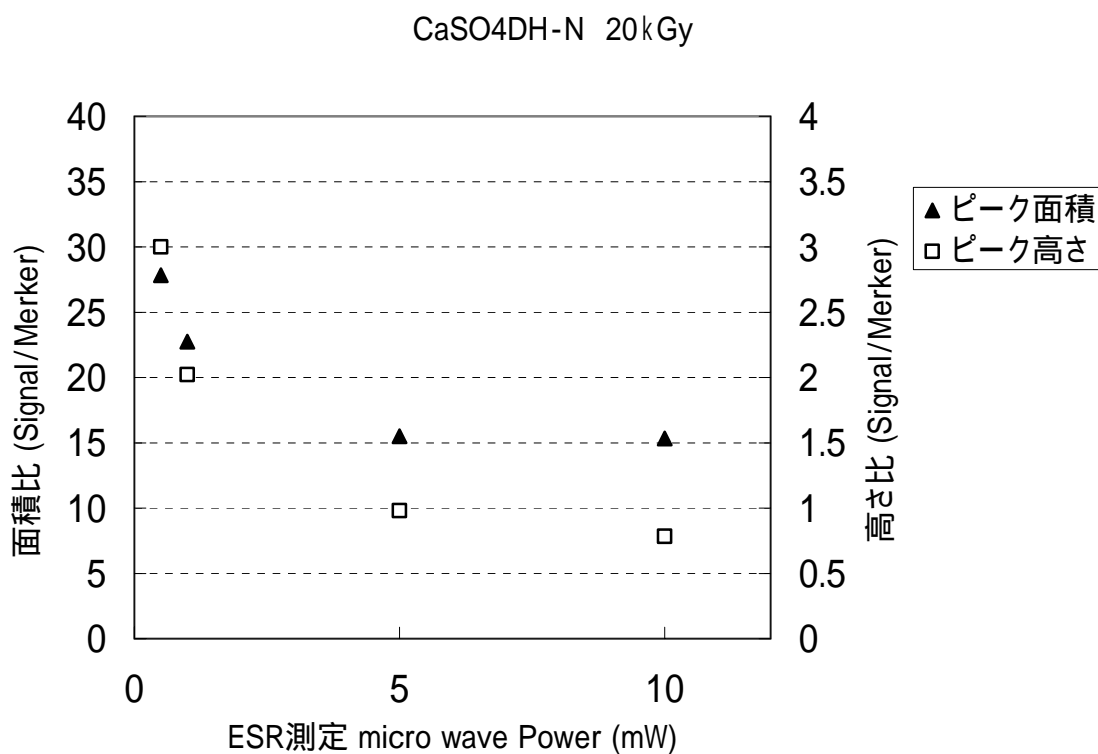


図 4.2.8\_2 硫酸カルシウム 2 水和物(ナカライテスク社製) 線 20kGy 照射試料から得られた ESR スペクトル(図 4.2.8\_1)についてマイクロ波出力と ESR 信号強度および面積 (Mn マーカーとの比) でプロットしたもの

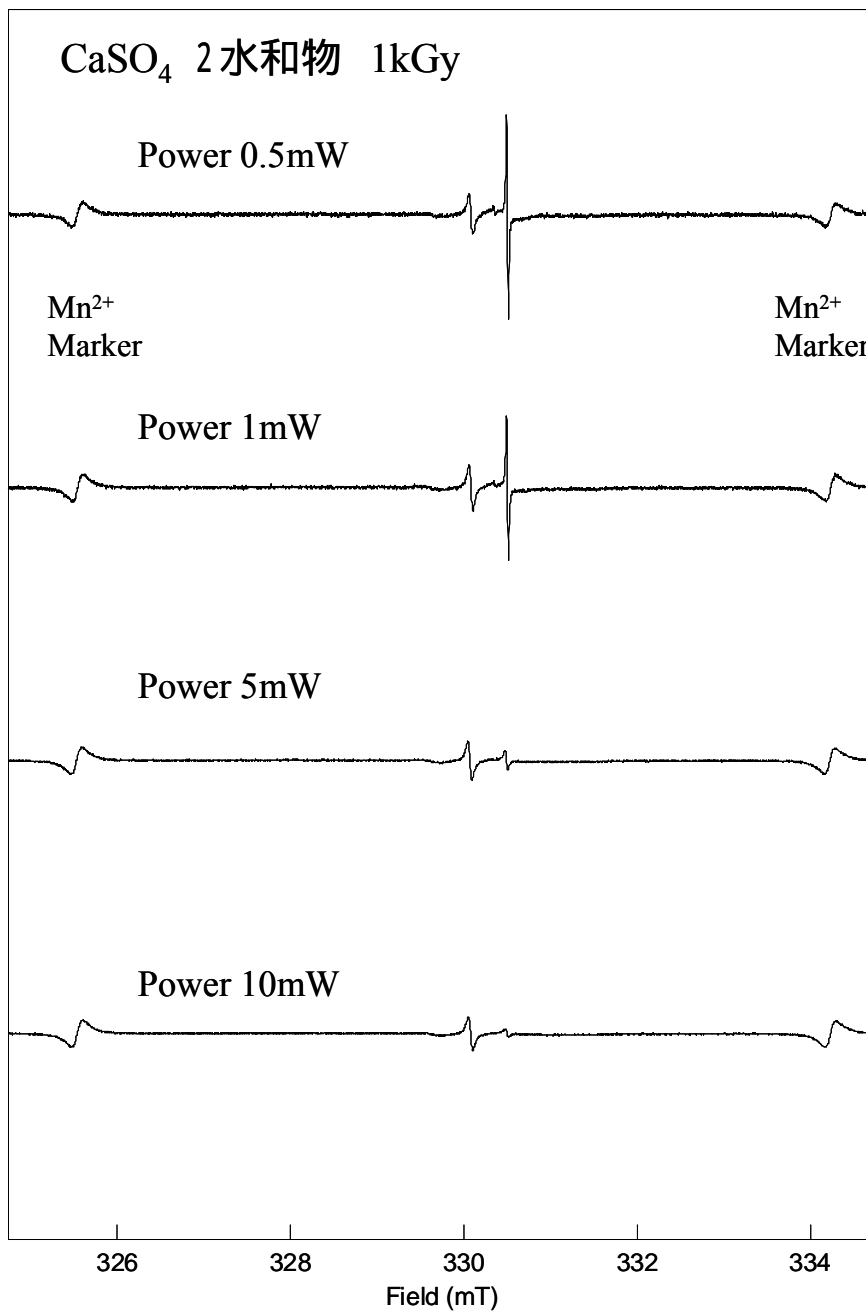


図 4.2.9\_1 硫酸カルシウム 2 水和物( 関東化学社製 )に 線を 1kGy 照射した試料について ESR マイクロ波出力を変えて得られた ESR スペクトル  
 ESR 条件: 9.27GHz, Field 330 ± 5mT, Mod. 20 μT (100kHz), Time Const. 0.03sec, Sweep Time 4min,  $\text{Mn}^{2+}$  外部標準マーカを挿入  
 マーカー強度で信号強度を規格化したもの。

表 4.2.9 硫酸カルシウム 2 水和物（関東化学社製）線 1kGy 照射試料から得られた ESR スペクトル（図 4.2.9\_1）の最大ピーク強度と信号面積を算出したもの

ファイル名	ピーク高			線幅(mT)		ピーク面積		
	基準信号	標的信号	比	基準信号	標的信号	基準信号	標的信号	比
CaSO4DH-k-1kGy-Pow08	274	2046	7.467153	0.13431	0.019536	653364	1304264	1.996229
CaSO4DH-k-1kGy-Pow10	338	1778	5.260355	0.129426	0.021978	940310	1460192	1.552884
CaSO4DH-k-1kGy-Pow5	733	1057	1.442019	0.136752	0.046398	2040975	1562205	0.765421
CaSO4DH-k-1kGy-Pow10	970	1187	1.223711	0.136752	0.046398	2779158	1605776	0.577792

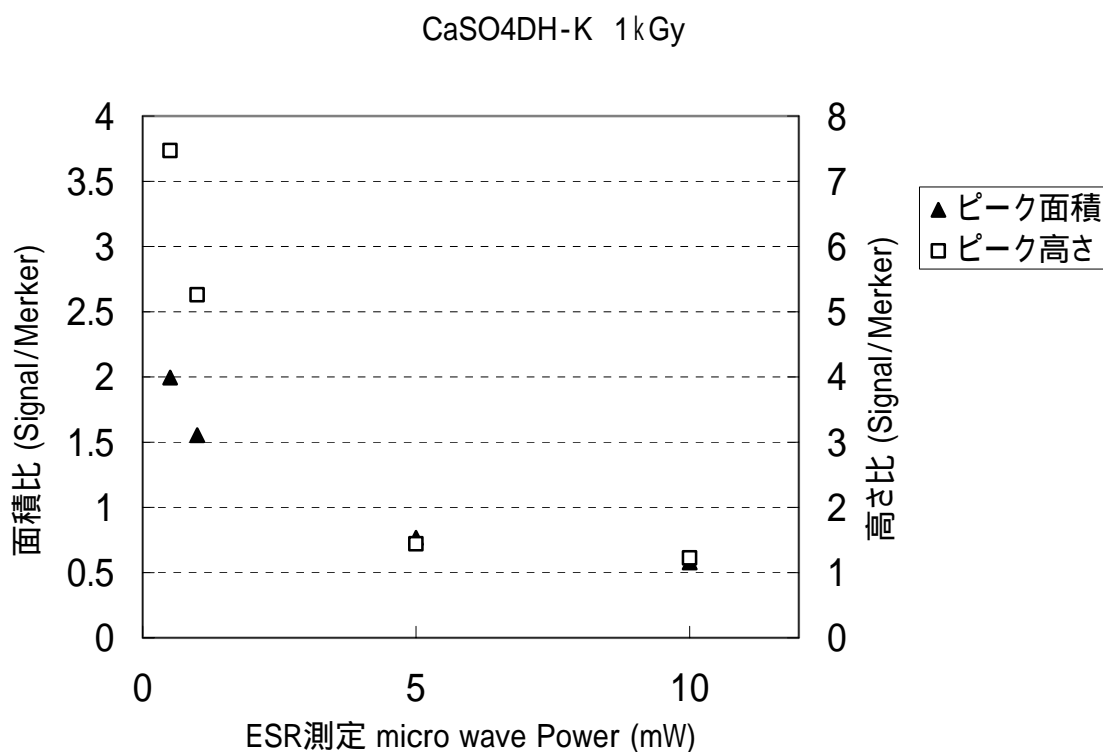


図 4.2.9\_2 硫酸カルシウム 2 水和物（関東化学社製）線 1kGy 照射試料から得られた ESR スペクトル（図 4.2.9\_1）についてマイクロ波出力と ESR 信号強度および面積（Mn マーカーとの比）でプロットしたもの



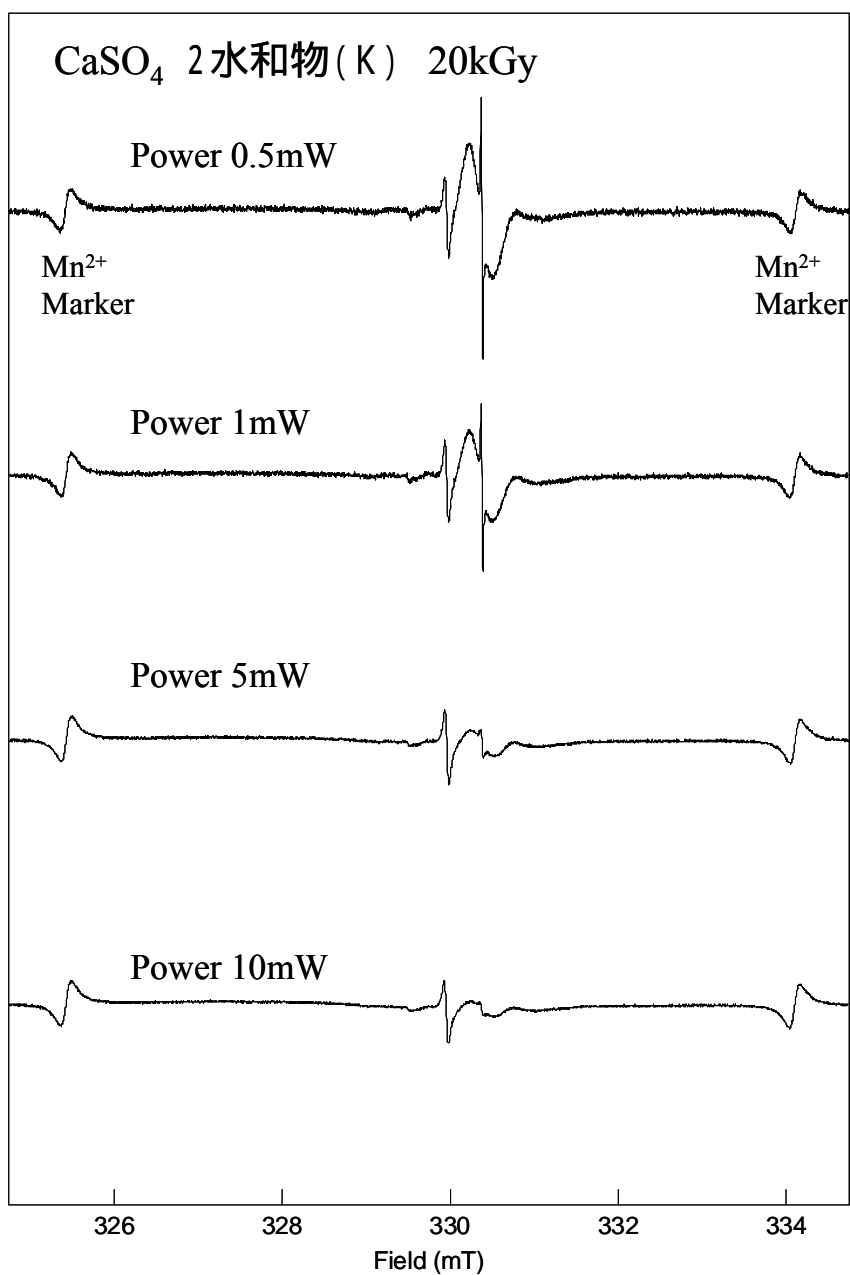


図 4.2.10\_1 硫酸カルシウム 2 水和物( 関東化学社製 )に 線を 20kGy 照射した  
 試料について ESR マイクロ波出力を変えて得られた ESR スペクトル  
 ESR 条件: 9.27GHz, Field 330 ± 5mT, Mod. 20 μ T (100kHz), Time Const. 0.03sec,  
 Sweep Time 4min, Mn<sup>2+</sup> 外部標準マーカを挿入  
 マーカー強度で信号強度を規格化したもの。

表 4.2.10 硫酸カルシウム 2 水和物 ( 関東化学社製 ) 線 20kGy 照射試料から得られた ESR スペクトル ( 図 4.2.10\_1 ) の最大ピーク強度と信号面積を算出したもの

ファイル名	ピーク高			線幅(mT)		ピーク面積		
	基準信号	標的信号	比	基準信号	標的信号	基準信号	標的信号	比
CaSO4DH-k-20kGy-Pow0	236	1424	6.033898	0.124542	0.021978	529665	6437326	12.15358
CaSO4DH-k-20kGy-Pow1	334	1237	3.703593	0.126984	0.021978	756604	6284386	8.306044
CaSO4DH-k-20kGy-Pow5	664	1134	1.707831	0.105006	0.041514	1690466	5047673	2.985965
CaSO4DH-k-20kGy-Pow10	921	1303	1.414767	0.1221	0.051282	2310644	4191754	1.814106

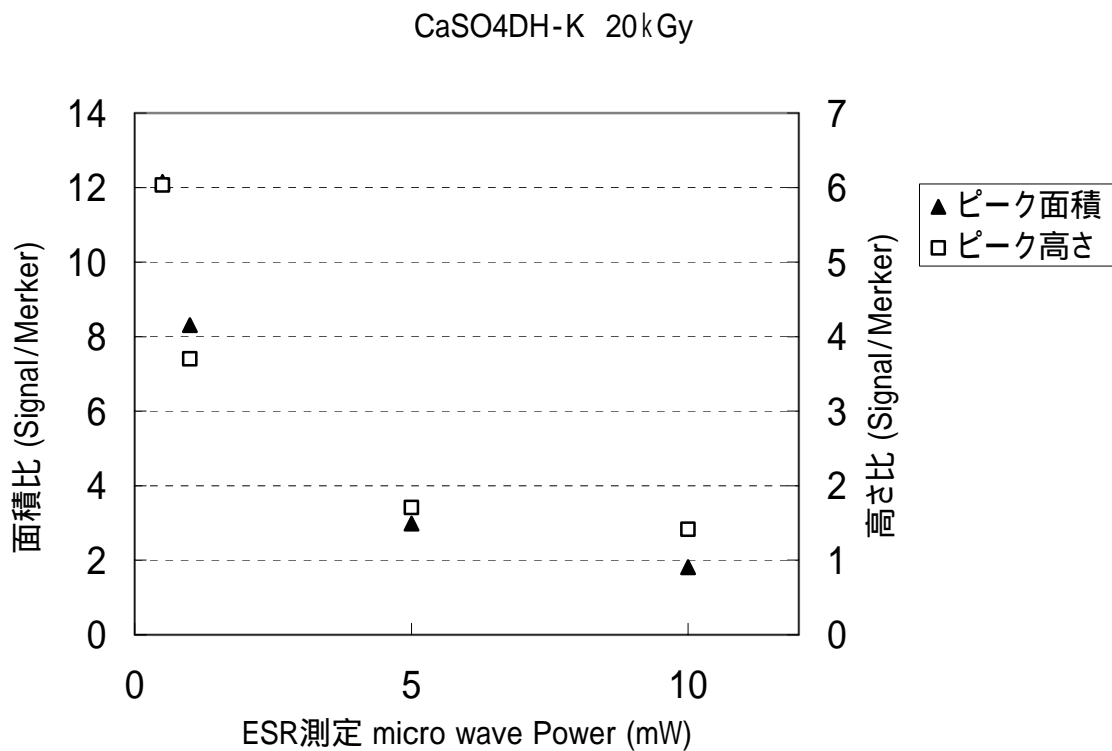


図 4.2.10\_2 硫酸カルシウム 2 水和物 ( 関東化学社製 ) 線 20kGy 照射試料から得られた ESR スペクトル ( 図 4.2.10\_1 ) についてマイクロ波出力と ESR 信号強度および面積 ( Mn マーカーとの比 ) でプロットしたもの

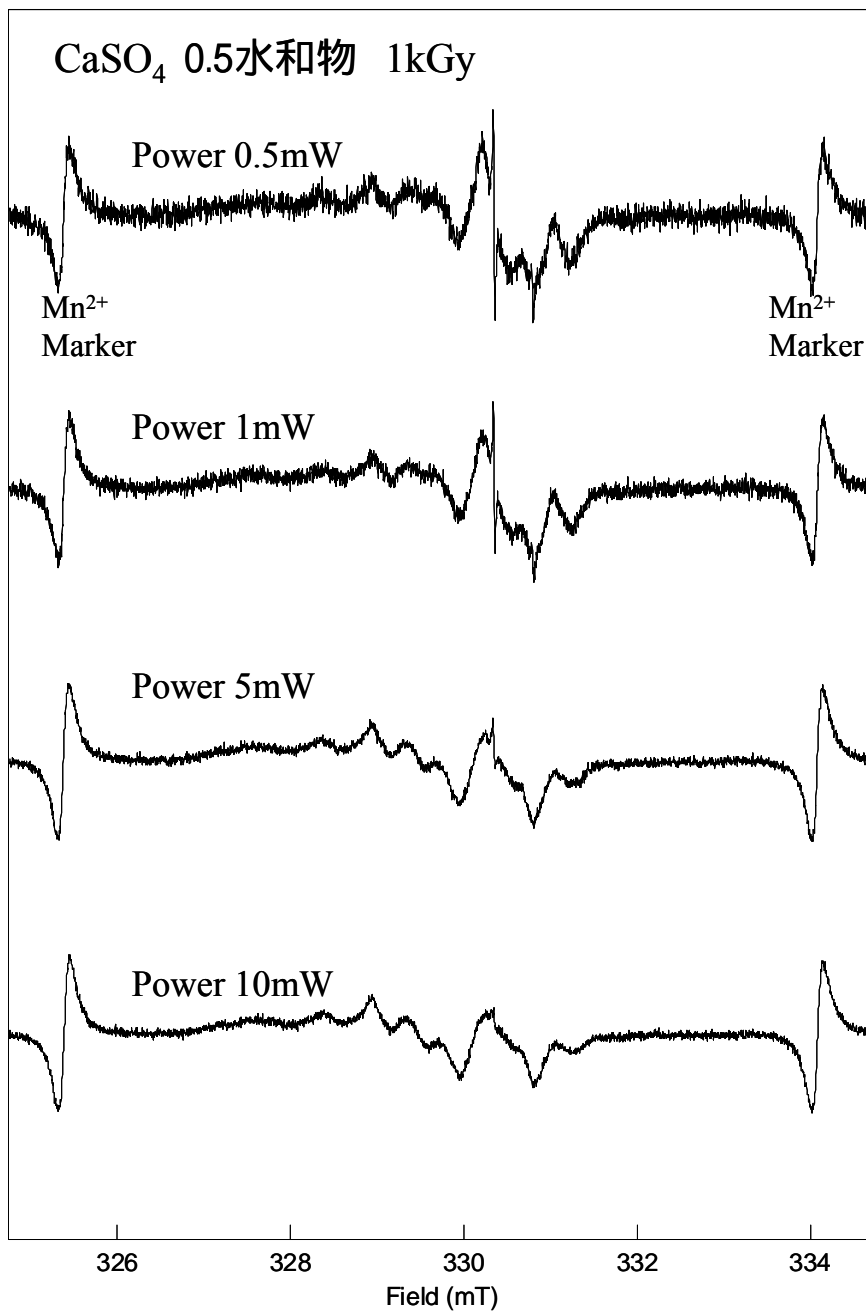


図 4.2.11\_1 硫酸カルシウム 0.5 水和物に 線を 1kGy 照射した試料について ESR マイクロ波出力を変えて得られた ESR スペクトル  
 ESR 条件: 9.27GHz, Field 330 ± 5mT, Mod. 20 μT (100kHz), Time Const. 0.03sec, Sweep Time 4min, Mn<sup>2+</sup> 外部標準マーカを挿入  
 マーカー強度で信号強度を規格化したもの。

表 4.2.11 硫酸カルシウム 0.5 水和物 線 1kGy 照射試料から得られた ESR スペクトル (図 4.2.11\_1) の最大ピーク強度と信号面積を算出したもの

ファイル名	ピーク高			線幅(mT)		ピーク面積		
	基準信号	標的信号	比	基準信号	標的信号	基準信号	標的信号	比
CaSO4DH-N-1kGy-Pow05	504	1391	2.759921	0.139194	0.021978	1336574	4130284	3.090202
CaSO4DH-N-1kGy-Pow10	731	1717	2.348837	0.119658	0.041514	1868399	4678826	2.50419
CaSO4DH-N-1kGy-Pow5	1454	2875	1.977304	0.126984	0.046398	4084135	5780401	1.415331
CaSO4DH-N-1kGy-Pow10	1891	3108	1.643575	0.112332	0.04884	5557248	6132593	1.103531

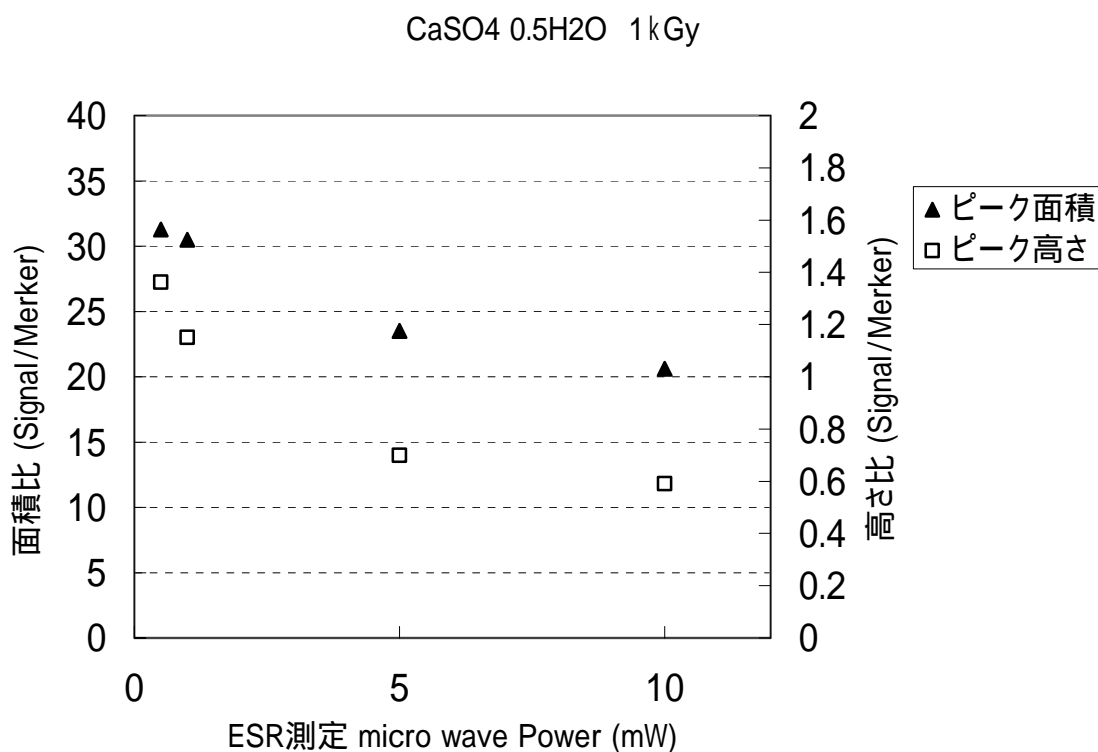


図 4.2.11\_2 硫酸カルシウム 0.5 水和物 線 1kGy 照射試料から得られた ESR スペクトル (図 4.2.11\_1) についてマイクロ波出力と ESR 信号強度および面積 (Mn マーカーとの比) でプロットしたもの

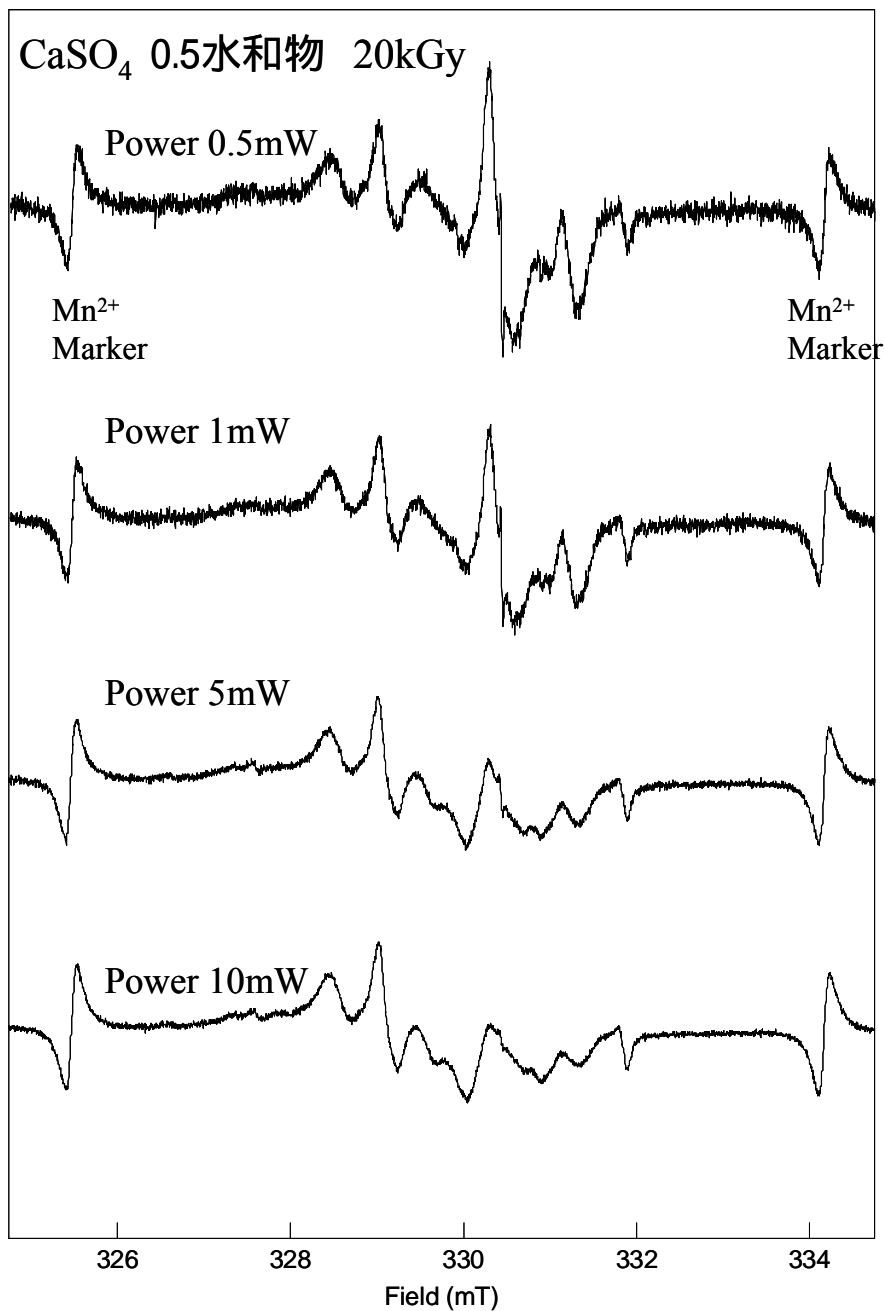


図 4.2.12\_1 硫酸カルシウム 0.5 水和物に 線を 20kGy 照射した試料について ESR マイクロ波出力を変えて得られた ESR スペクトル  
 ESR 条件: 9.27GHz, Field 330 ± 5mT, Mod. 20 μT (100kHz), Time Const. 0.03sec, Sweep Time 4min, Mn<sup>2+</sup> 外部標準マーカを挿入  
 マーカー強度で信号強度を規格化したもの。

表 4.2.12 硫酸カルシウム 0.5 水和物 線 20kGy 照射試料から得られた ESR スペクトル (図 4.2.12\_1) の最大ピーク強度と信号面積を算出したもの

ファイル名	ピーク高			線幅(mT)		ピーク面積		
	基準信号	標的信号	比	基準信号	標的信号	基準信号	標的信号	比
CaSO405H2O-20kGy-Pow	437	983	2.249428	0.107448	0.148962	882781	1E+08	113.6678
CaSO405H2O-20kGy-Pow	578	981	1.697232	0.124542	0.283272	1202762	1.32E+08	110.0098
CaSO405H2O-20kGy-Pow	1158	893	0.771157	0.112332	0.263736	2708212	2.33E+08	86.15471
CaSO405H2O-20kGy-Pow	1510	979	0.648344	0.139194	0.266178	3587229	2.91E+08	81.00372

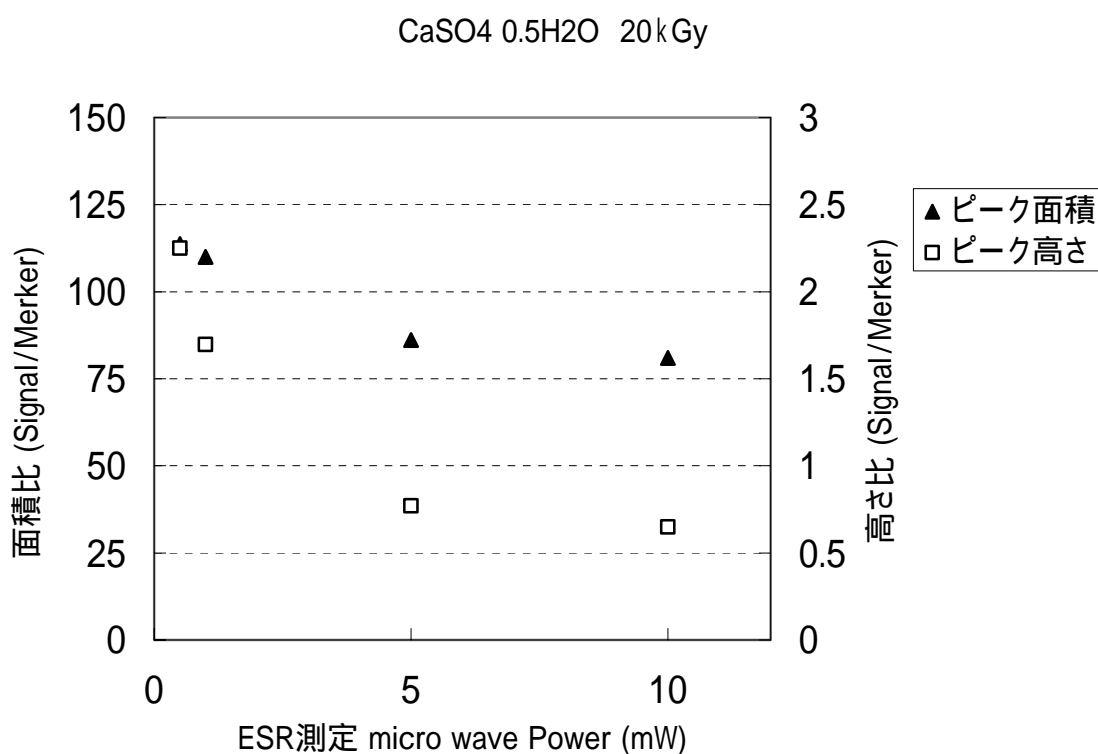


図 4.2.12\_2 硫酸カルシウム 0.5 水和物 線 1kGy 照射試料から得られた ESR スペクトル (図 4.2.12\_1) についてマイクロ波出力と ESR 信号強度および面積 (Mn マーカーとの比) でプロットしたもの

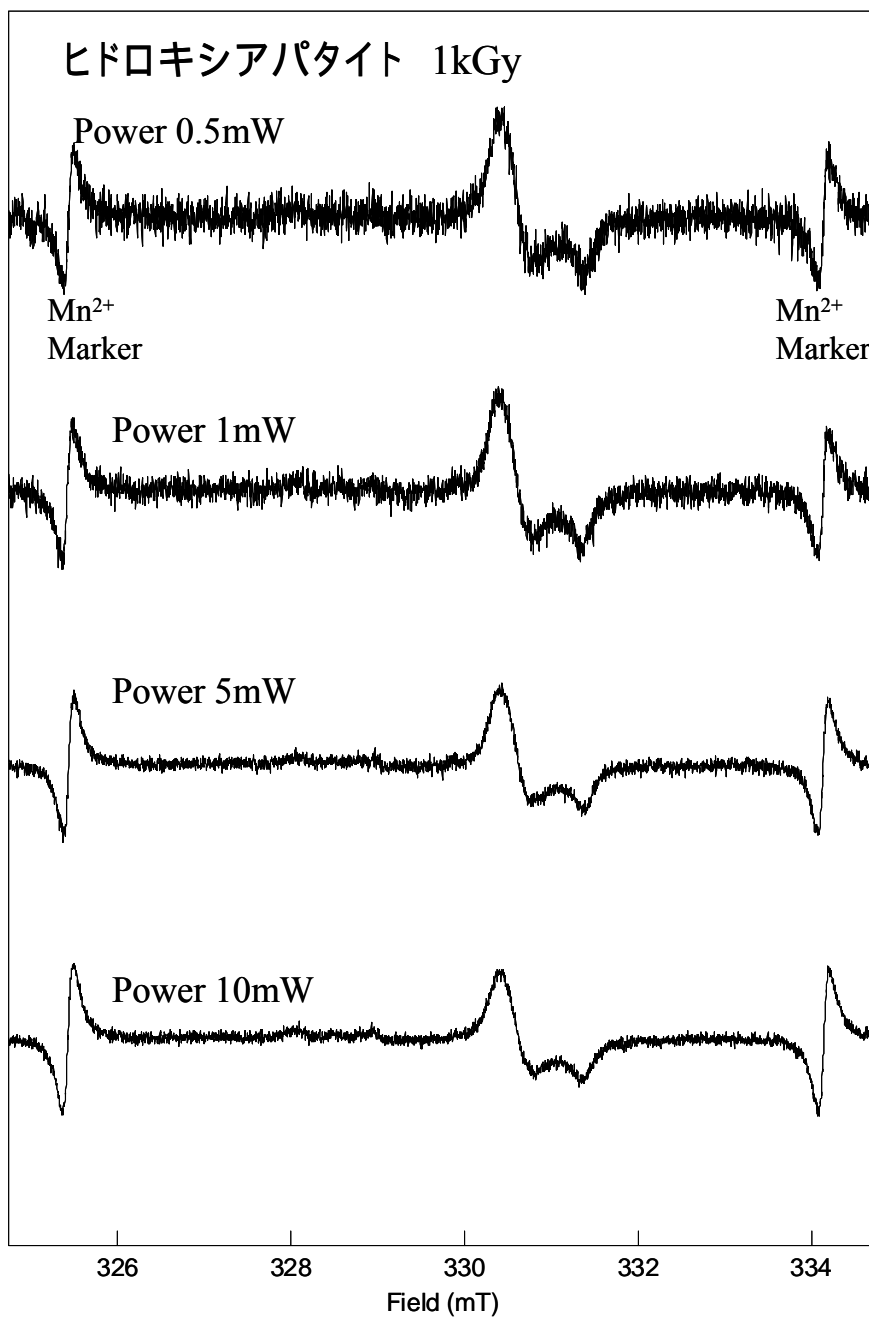


図 4.2.13\_1 ヒドロキシアパタイト粉末に 線を 1kGy 照射した試料について ESR マイクロ波出力を変えて得られた ESR スペクトル  
 ESR 条件: 9.27GHz, Field 330 ± 5mT, Mod. 20 μT (100kHz), Time Const. 0.03sec, Sweep Time 4min, Mn<sup>2+</sup> 外部標準マーカを挿入  
 マーカー強度で信号強度を規格化したもの。

表 4.2.13 ヒドロキシアパタイト粉末 線 1kGy 照射試料から得られた ESR スペクトル (図 4.2.13\_1) の最大ピーク強度と信号面積を算出したもの

ファイル名	ピーク高			線幅(mT)		ピーク面積		
	基準信号	標的的信号	比	基準信号	標的的信号	基準信号	標的的信号	比
HA-1kGy-Pow05	520	641	1.232692	0.10989	1.008547	1473960	23861215	16.18851
HA-1kGy-Pow1	720	832	1.155556	0.124542	0.940171	1908337	32355922	16.95504
HA-1kGy-Pow5	1911	1494	0.78179	0.129426	0.937729	6433071	75821634	11.78623
HA-1kGy-Pow10	1507	1325	0.87923	0.1221	0.913309	4537890	56847675	12.52734

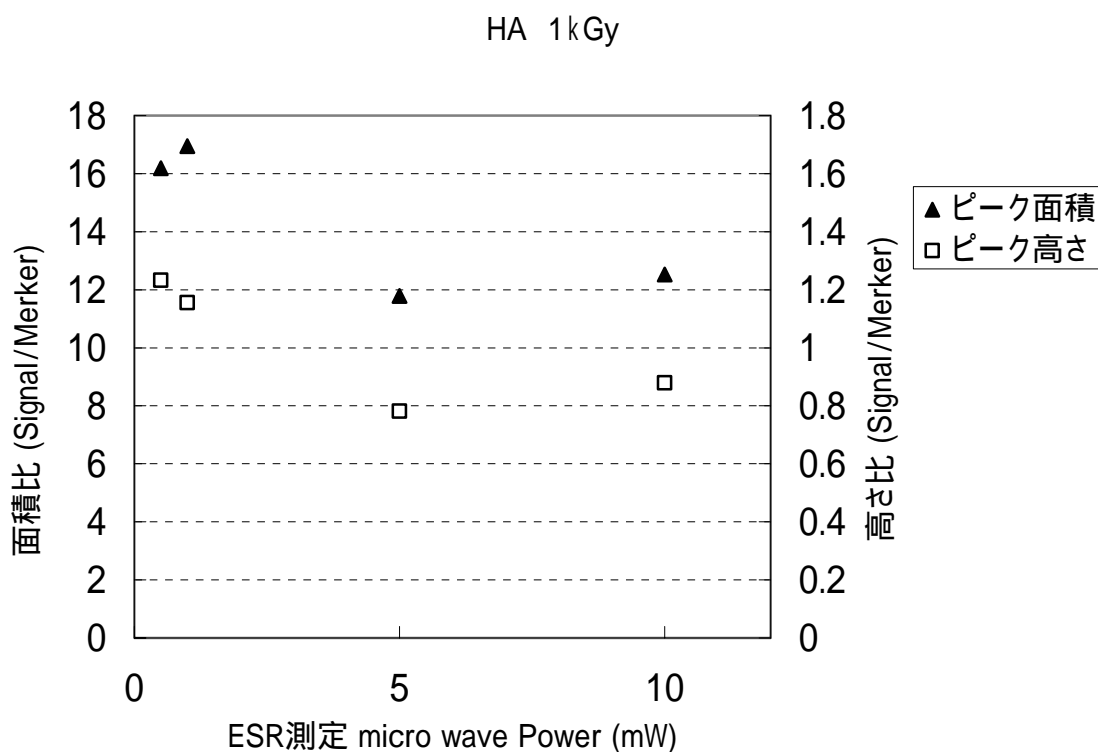


図 4.2.13\_2 ヒドロキシアパタイト粉末 線 1kGy 照射試料から得られた ESR スペクトル (図 4.2.13\_1) についてマイクロ波出力と ESR 信号強度および面積 (Mn マーカーとの比) でプロットしたもの



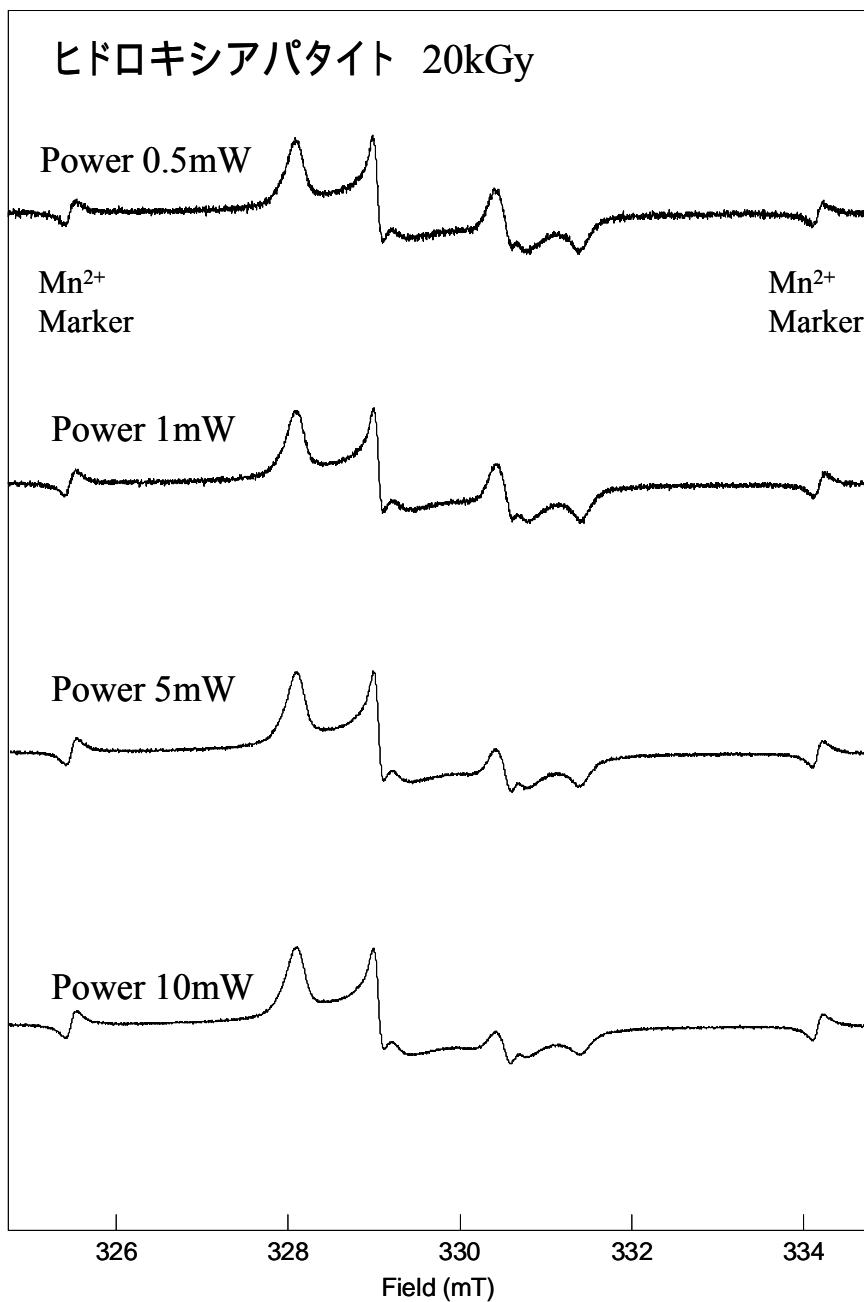


図 4.2.14\_1 ヒドロキシアパタイト粉末に 線を 20kGy 照射した試料について ESR マイクロ波出力を変えて得られた ESR スペクトル  
 ESR 条件: 9.27GHz, Field 330 ± 5mT, Mod. 20 μT (100kHz), Time Const. 0.03sec, Sweep Time 4min, Mn<sup>2+</sup> 外部標準マーカを挿入  
 マーカー強度で信号強度を規格化したもの。

表 4.2.14 ヒドロキシアパタイト粉末 線 20kGy 照射試料から得られた ESR スペクトル (図 4.2.14\_1) の最大ピーク強度と信号面積を算出したもの

ファイル名	ピーク高			線幅(mT)		ピーク面積		
	基準信号	標的信号	比	基準信号	標的信号	基準信号	標的信号	比
HA-20kGy-Pow05	138	602	4.362319	0.126984	2.385836	254295	101147400	397.7561
HA-20kGy-Pow1	193	794	4.11399	0.1221	2.388278	372688	141211381	378.8997
HA-20kGy-Pow5	371	1603	4.320755	0.117216	1.62149	854271	299525152	350.6208
HA-20kGy-Pow10	476	2100	4.411765	0.141636	2.490842	1149937	403204672	350.632

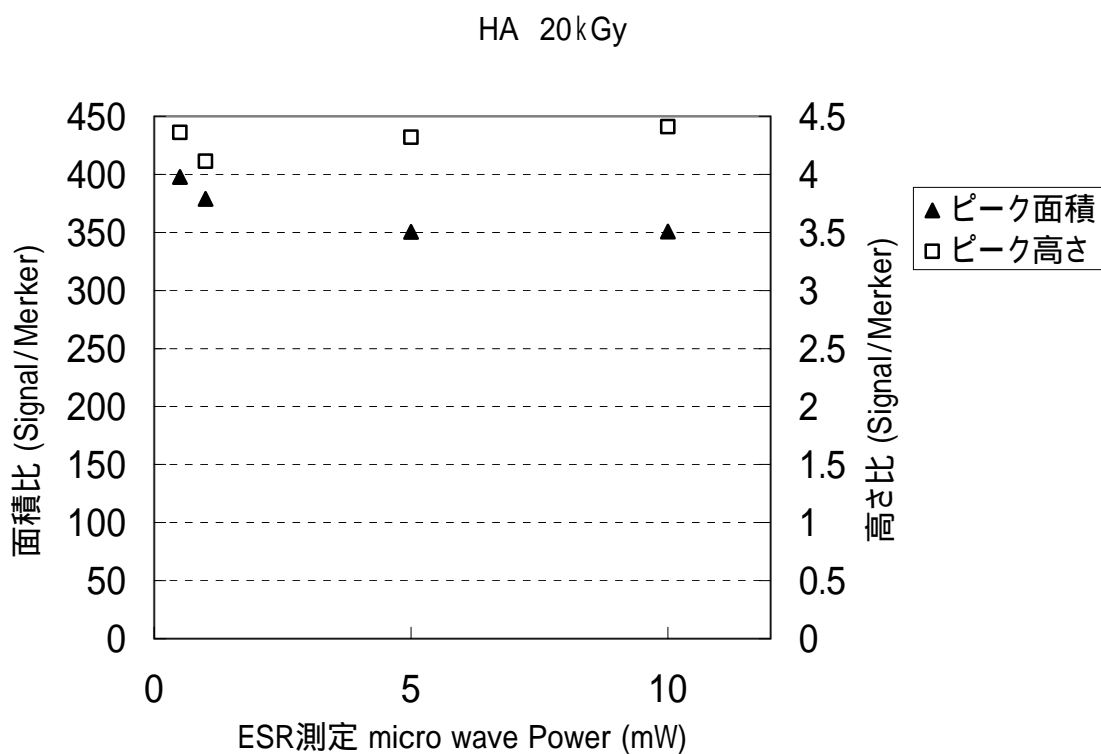


図 4.2.14\_2 ヒドロキシアパタイト粉末 線 20kGy 照射試料から得られた ESR スペクトル (図 4.2.14\_1) についてマイクロ波出力と ESR 信号強度および面積 (Mn マーカーとの比) でプロットしたもの

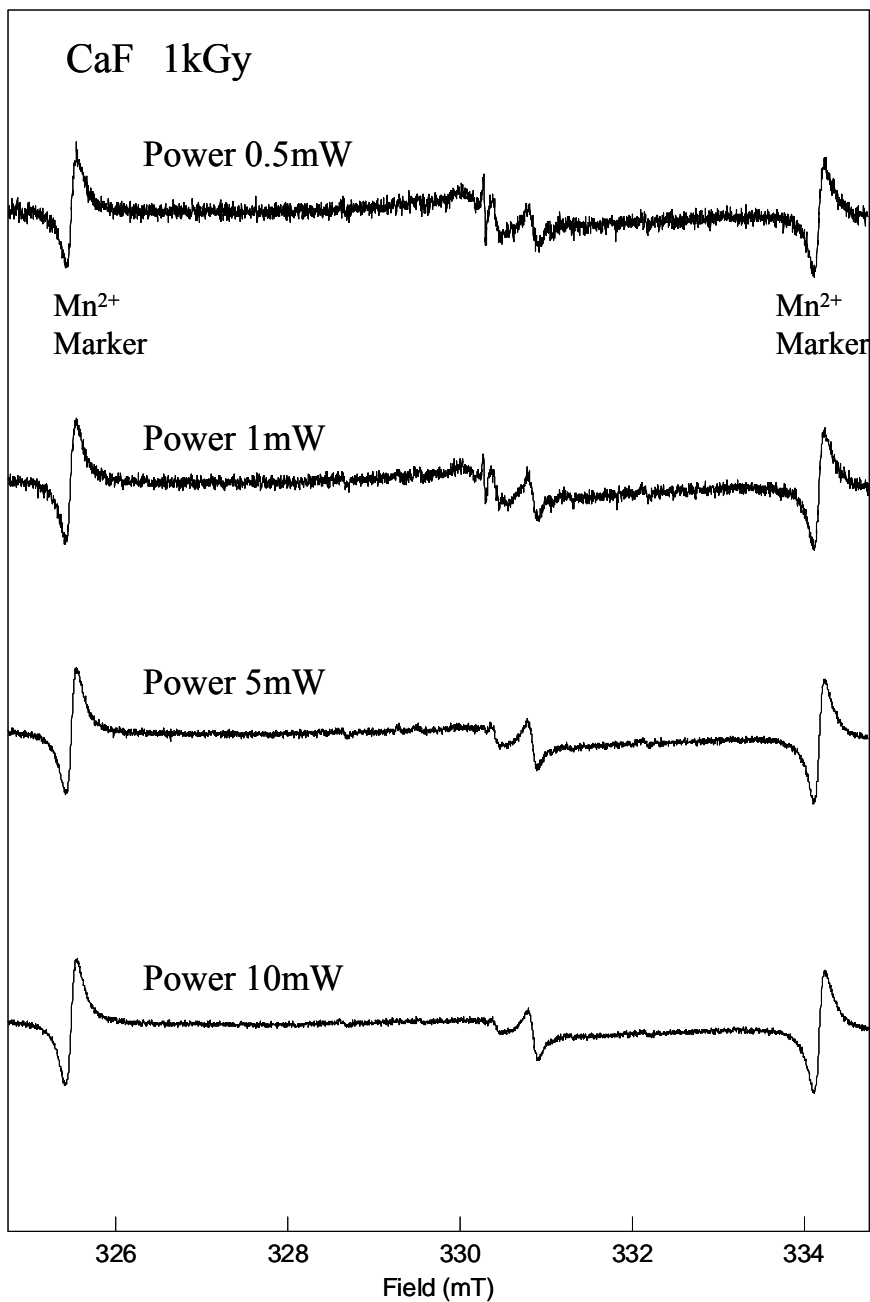


図 4.2.15\_1 フッ化カルシウムに 線を 1kGy 照射した試料について ESR マイクロ波出力を変えて得られた ESR スペクトル  
 ESR 条件: 9.27GHz, Field 330 ± 5mT, Mod. 20 μT (100kHz), Time Const. 0.03sec, Sweep Time 4min, Mn<sup>2+</sup> 外部標準マーカを挿入  
 マーカー強度で信号強度を規格化したもの。

表 4.2.15 フッ化カルシウム 線 1kGy 照射試料から得られた ESR スペクトル( 図 4.2.15\_1 ) の最大ピーク強度と信号面積を算出したもの

ファイル名	ピーク高			線幅(mT)		ピーク面積		
	基準信号	標的的信号	比	基準信号	標的的信号	基準信号	標的的信号	比
CaF-1kGy-Pow05	538	333	0.618959	0.131868	0.639805	1317086	6452130	4.898792
CaF-1kGy-Pow1	697	367	0.526542	0.1221	0.652015	1855799	7829174	4.218762
CaF-1kGy-Pow5	1412	578	0.409348	0.126984	0.10989	4009663	11783269	2.938718
CaF-1kGy-Pow10	1881	775	0.412015	0.141636	0.129426	5521413	13566654	2.457098

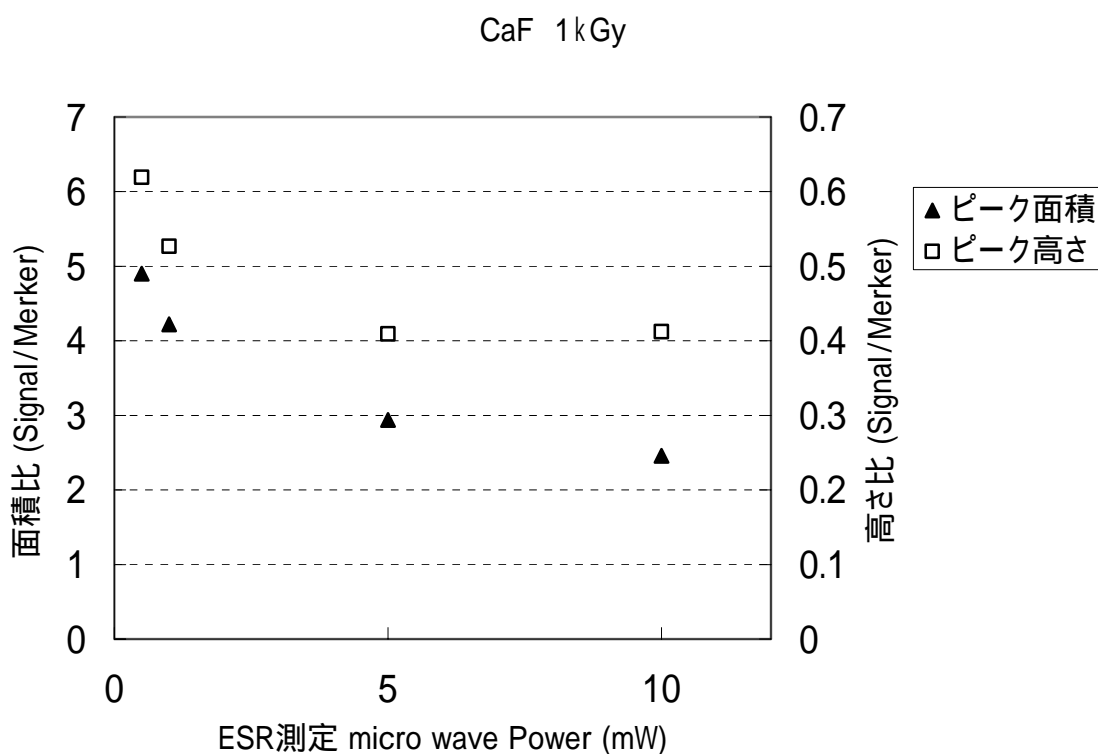


図 4.2.15\_2 フッ化カルシウム 線 1kGy 照射試料から得られた ESR スペクトル ( 図 4.2.15\_1 ) についてマイクロ波出力と ESR 信号強度および面積 ( Mn マーカーとの比) でプロットしたもの

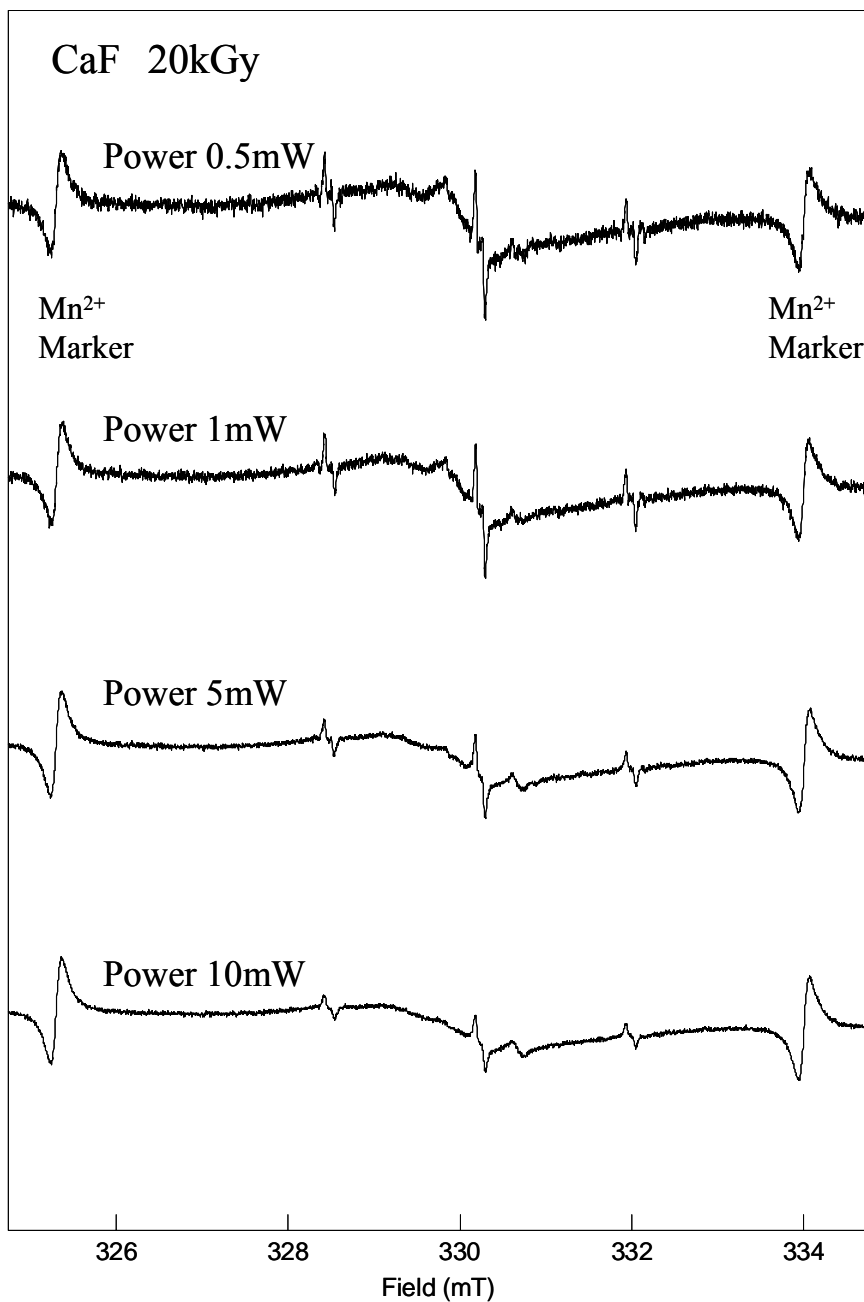


図 4.2.16\_1 フッ化カルシウムに 線を20kGy照射した試料についてESRマイクロ波出力を変えて得られた ESR スペクトル  
 ESR 条件: 9.27GHz, Field 330 ± 5mT, Mod. 20 μT (100kHz), Time Const. 0.03sec, Sweep Time 4min, Mn<sup>2+</sup> 外部標準マーカを挿入  
 マーカー強度で信号強度を規格化したもの。

表4.2.16 フッ化カルシウム 線20kGy照射試料から得られたESRスペクトル(図4.2.16\_1)の最大ピーク強度と信号面積を算出したもの

ファイル名	ピーク高			線幅(mT)		ピーク面積		
	基準信号	標的信号	比	基準信号	標的信号	基準信号	標的信号	比
CaF-20kGy-Pow05	456	659	1.445175	0.119658	0.112332	1052525	1.01E+08	95.67775
CaF-20kGy-Pow1	640	833	1.301563	0.126984	0.112332	1461529	1.36E+08	93.10584
CaF-20kGy-Pow5	1319	1069	0.810462	0.144078	0.114774	3332928	2.46E+08	73.79216
CaF-20kGy-Pow10	1756	963	0.548405	0.129426	0.1221	4041587	2.98E+08	73.65089

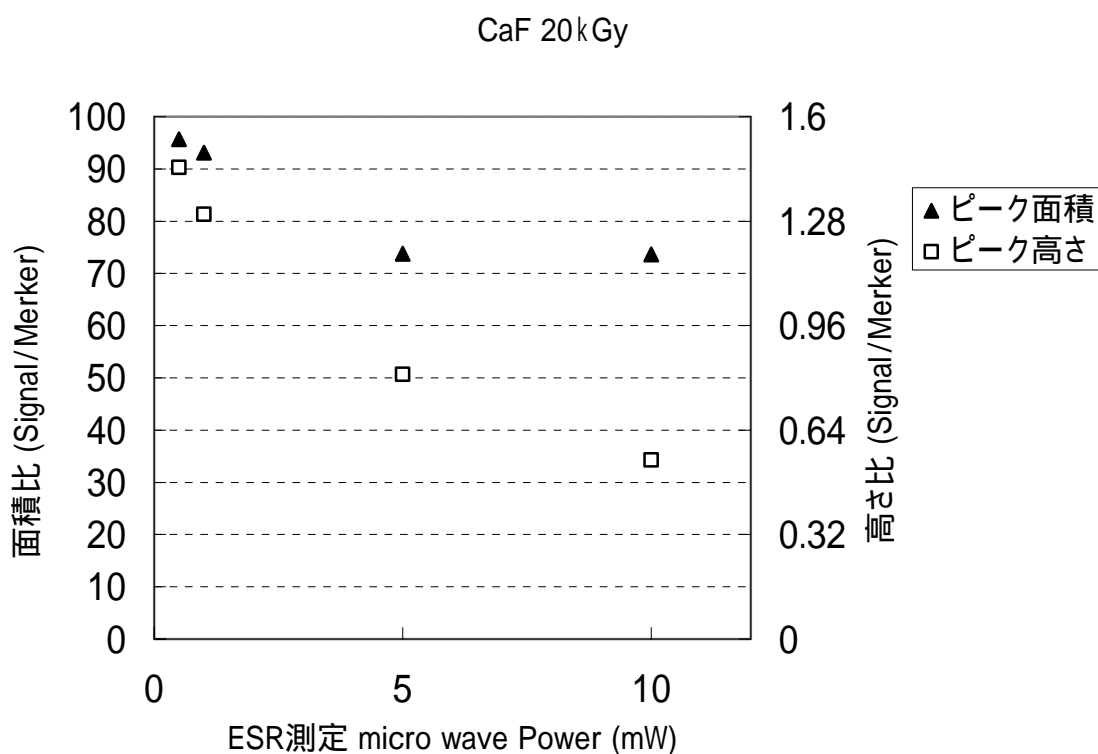


図 4.2.16\_2 フッ化カルシウム 線20kGy照射試料から得られたESRスペクトル(図4.2.16\_1)についてマイクロ波出力とESR信号強度および面積(Mnマーカ-との比)でプロットしたもの

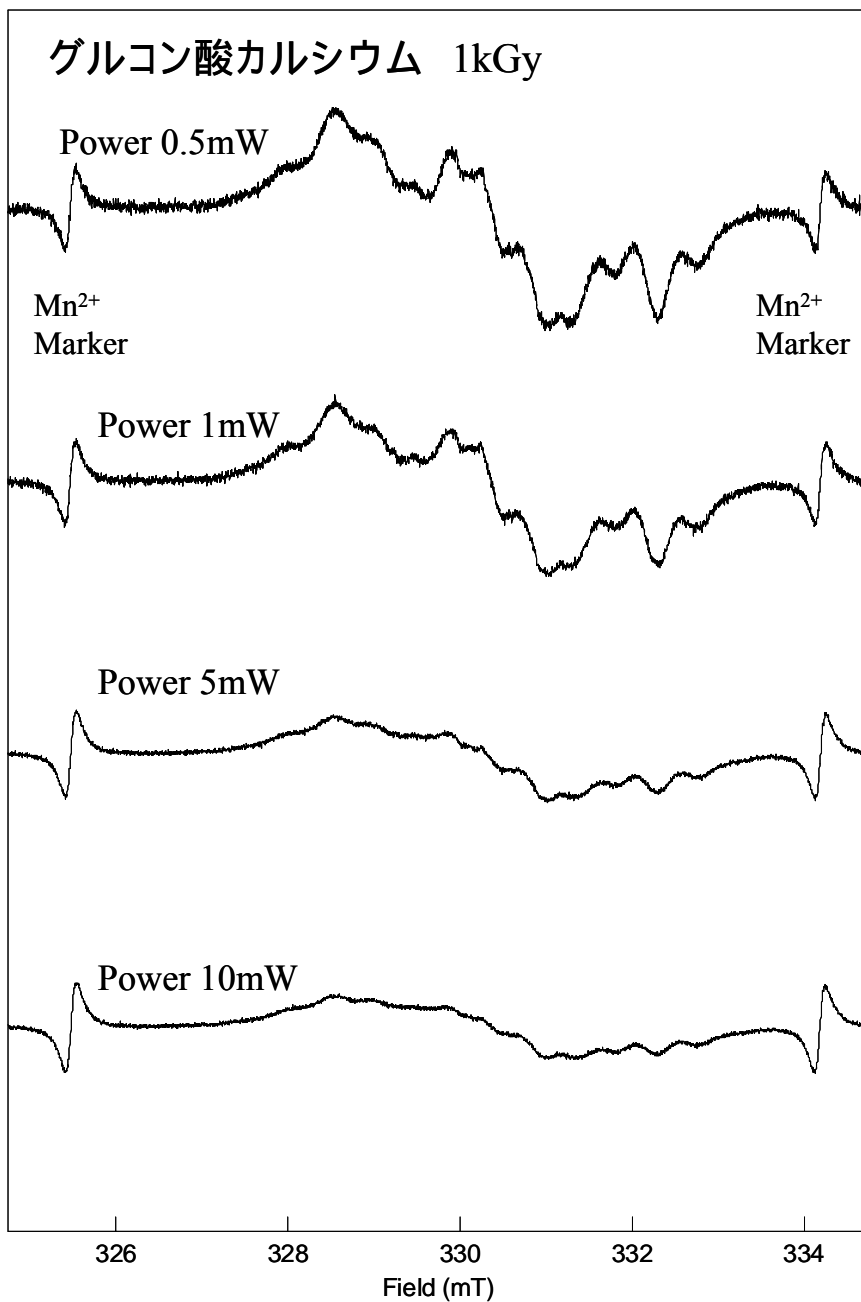


図 4.2.17\_1 グルコン酸カルシウムに 線を 1kGy 照射した試料について ESR マイクロ波出力を変えて得られた ESR スペクトル  
 ESR 条件: 9.27GHz, Field 330 ± 5mT, Mod. 20 μT (100kHz), Time Const. 0.03sec, Sweep Time 4min, Mn<sup>2+</sup> 外部標準マーカを挿入  
 マーカー強度で信号強度を規格化したもの。

表 4.2.17 グルコン酸カルシウム 1kGy 照射試料から得られた ESR スペクトル (図 4.2.17\_1) の最大ピーク強度と信号面積を算出したもの

ファイル名	ピーク高			線幅(mT)		ピーク面積		
	基準信号	標的信号	比	基準信号	標的信号	基準信号	標的信号	比
GlnCa-1kGy-Pow05	629	1297	2.062003	0.117216	1.130647	1835240	5.62E+08	306.2869
GlnCa-1kGy-Pow1	1704	2824	1.657277	0.136752	1.169719	5075012	1.2E+09	237.4083
GlnCa-1kGy-Pow5	1752	1416	0.808219	0.119658	1.184371	5713180	6.97E+08	122.0626
GlnCa-1kGy-Pow10	891	655	0.735129	0.1221	2.774115	3061385	2.88E+08	94.23151

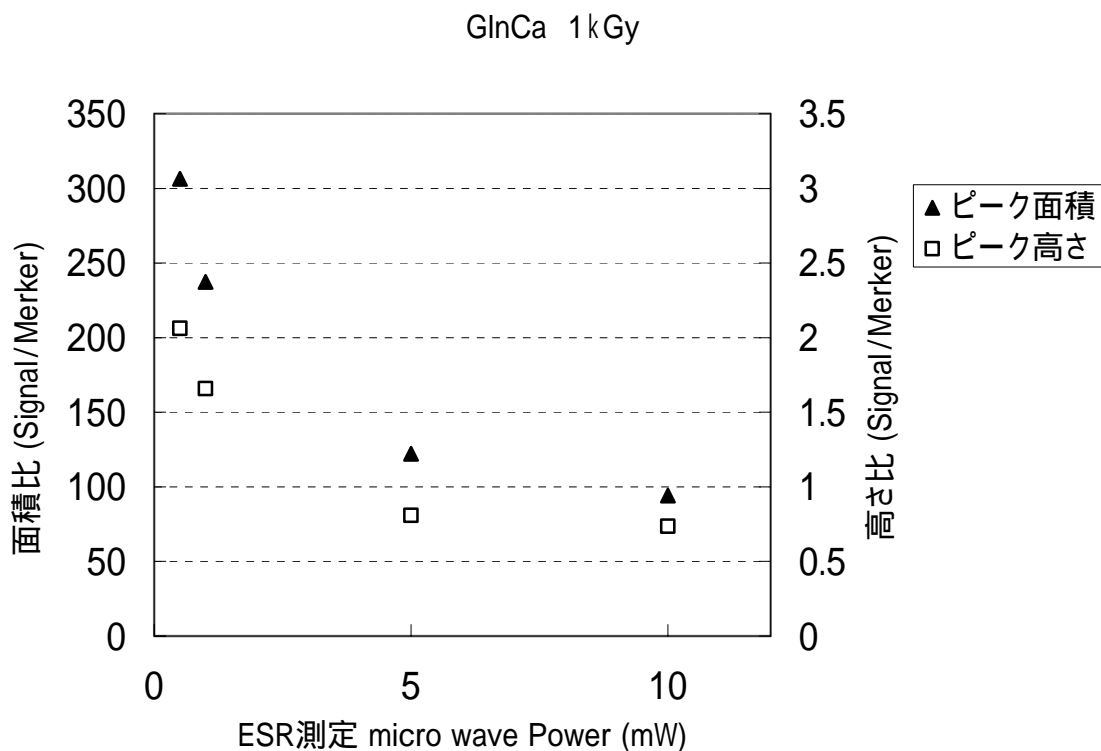


図 4.2.17\_2 グルコン酸カルシウム 線 1kGy 照射試料から得られた ESR スペクトル (図 4.2.17\_1) についてマイクロ波出力と ESR 信号強度および面積 (Mn マーカーとの比) でプロットしたもの



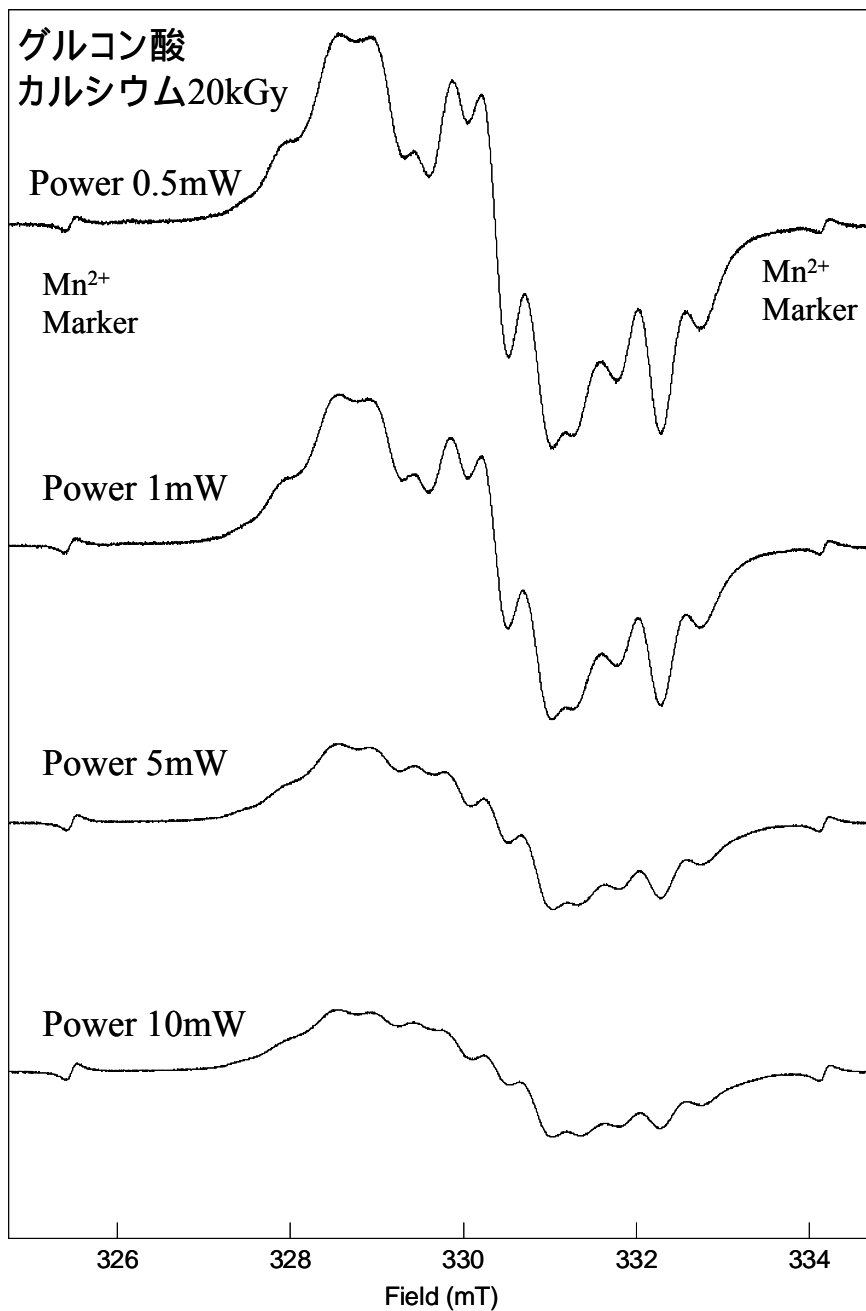


図 4.2.18\_1 グルコン酸カルシウムに線を 20kGy 照射した試料について ESR マイクロ波出力を変えて得られた ESR スペクトル  
 ESR 条件: 9.27GHz, Field 330 ± 5mT, Mod. 20 μT (100kHz), Time Const. 0.03sec, Sweep Time 4min, Mn<sup>2+</sup> 外部標準マーカを挿入  
 マーカー強度で信号強度を規格化したもの。

表 4.2.18 グルコン酸カルシウム 20kGy 照射試料から得られた ESR スペクトル (図 4.2.18\_1) の最大ピーク強度と信号面積を算出したもの

ファイル名	ピーク高			線幅(mT)		ピーク面積		
	基準信号	標的信号	比	基準信号	標的信号	基準信号	標的信号	比
GlnCa-20kGy-Pow05	109	2940	26.97248	0.156288	2.456654	245388	1.19E+09	4846.292
GlnCa-20kGy-Pow1	145	3238	22.33103	0.105006	2.437118	342393	1.32E+09	3861.629
GlnCa-20kGy-Pow5	302	3325	11.00993	0.141636	2.46398	738358	1.47E+09	1986.063
GlnCa-20kGy-Pow10	407	3212	7.891892	0.119658	2.493284	977526	1.48E+09	1518.652

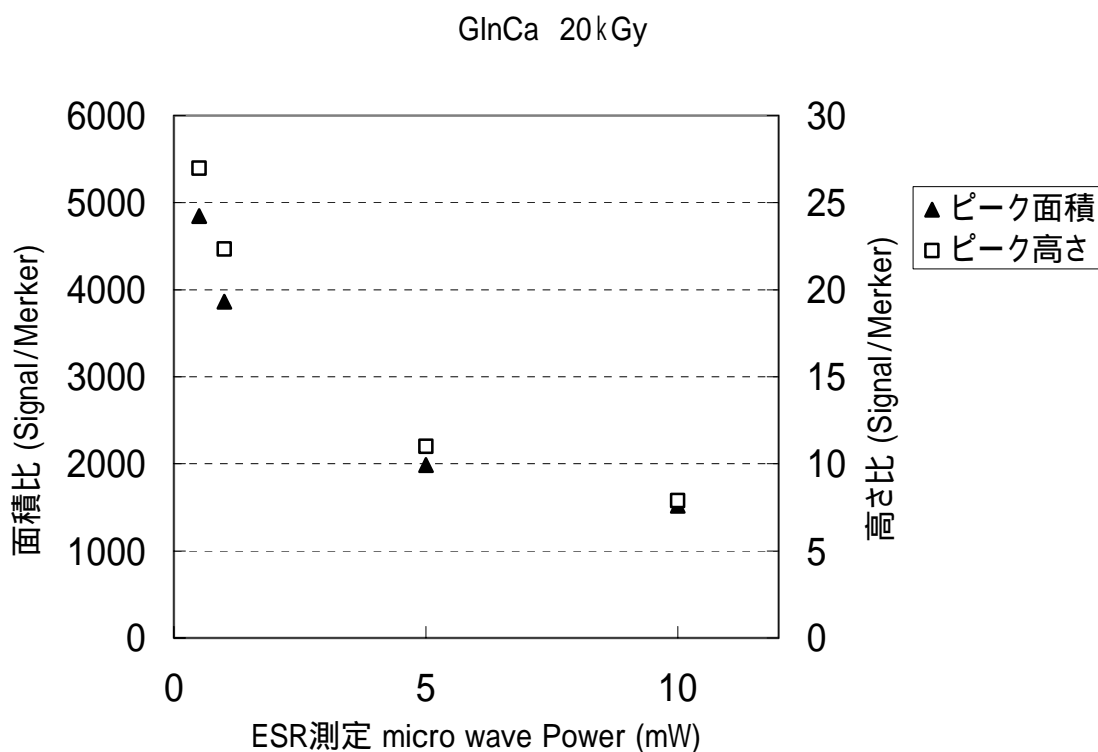


図 4.2.18\_2 グルコン酸カルシウム 線 20kGy 照射試料から得られた ESR スペクトル (図 4.2.18\_1) についてマイクロ波出力と ESR 信号強度および面積 (Mn マーカーとの比) でプロットしたもの

## 4.3 生成するラジカルの線量依存性

### 4.3.1 概要

前々節においてガンマ線照射によって安定で十分観測が可能なラジカルを生成する10種のカルシウム塩(炭酸カルシウム(特級、高純度)、硫酸カルシウム2水和物(ナカライ製、関東化学製)、硫酸カルシウム無水物、硫酸カルシウム0.5水和物、ヒドロキシアパタイト、フッ化カルシウム、グルコン酸カルシウム、セメント粉末)について、異なる線量で試料にガンマ線照射を行い、観測されるESR信号(ラジカル量)と照射線量との関係を調査した。

### 4.3.2 実験方法

使用した装置や試料は前節と同じで実施した。ガンマ線の照射量はアイソトープ協会の照射結果報告書に記載された値に従い、1.4 kGy, 2.8 kGy, 5.7 kGy, 11 kGy, 22 kGyとした。

量別のサンプルについては、各重量ごとに別の試料管に調製し、精密に重量を測定した。

### 4.3.3 結果と考察

ESR 試料管へ加える試料量と信号強度の関係についてガンマ線 1 kGy を照射し硫酸カルシウム無水物を用いて調査した。試料管にいれる粉末量を 10 mg ~ 500 mg に変化させた(図 4.3.1)。ESR 試料管は内径 5mm 長さ 30cm の石英製なので、粉末試料では 5 g 程度投入できるが、ESR の測定管の中で信号測定に有効な部分は限られている(図 4.3.2)。ピーク高さ、面積ともに試料量 200 mg までは比例的に増加しているが、それ以上では頭打ちとなっている(図 4.3.2)。装置備え付けの指標(図 4.3.1\_2 左の板)では 300mg までが範囲内であった。200mg までは比例的に増加しているので、試料の秤量値がサンプル毎に若干異なっても、この範囲であれば補正できると思われる。

炭酸カルシウムへの 0~20 kGy 照射を行って作成した試料 100mg を ESR 測定してえられたスペクトルを図 4.3.3\_1 に、ピークの高さおよび面積と照射線量をプロットしたものを図 4.3.3\_2 に、照射線量を対数軸にしたものを図 4.3.3\_3 に示した。ESR 信号は試料の状態によって感度に変化することもあるため、マーカーとしてマンガンを挿入して信号強度を補正した。マンガンの信号は各スペクトル

の両端近くに信号と逆位相で観測されている。また ESR 信号は感度向上の為の処理でスペクトルとして観測されるのは微分系である。信号の量（吸収量）は 2 回積分して得られる。線形が同じで信号全体の大小のみが変化している場合はスペクトルの高さ（観測される微分系の peak-to-peak）と吸収量（2 回積分値）の変化は同じになる。ピーク高さ、面積ともに高線量で頭打ちとなっている。硫酸カルシウムも結晶水の違いにかかわらず 1-5-10 kGy でも直線とはなっていない。特にピーク高さはまちまちで、生成するラジカル量が多く、ラジカル同士の再結合など副反応がおきている可能性もある。フッ化カルシウム（図 4.3.10）、グルコン酸カルシウム（図 4.3.12）は 0-20 kGy でほぼ直線となっており、高線量計測への応用が期待できる。ヒドロキシアパタイト（図 4.3.9）の低磁場側信号やセメント粉末（図 4.3.11）積分値も直線性が高い。

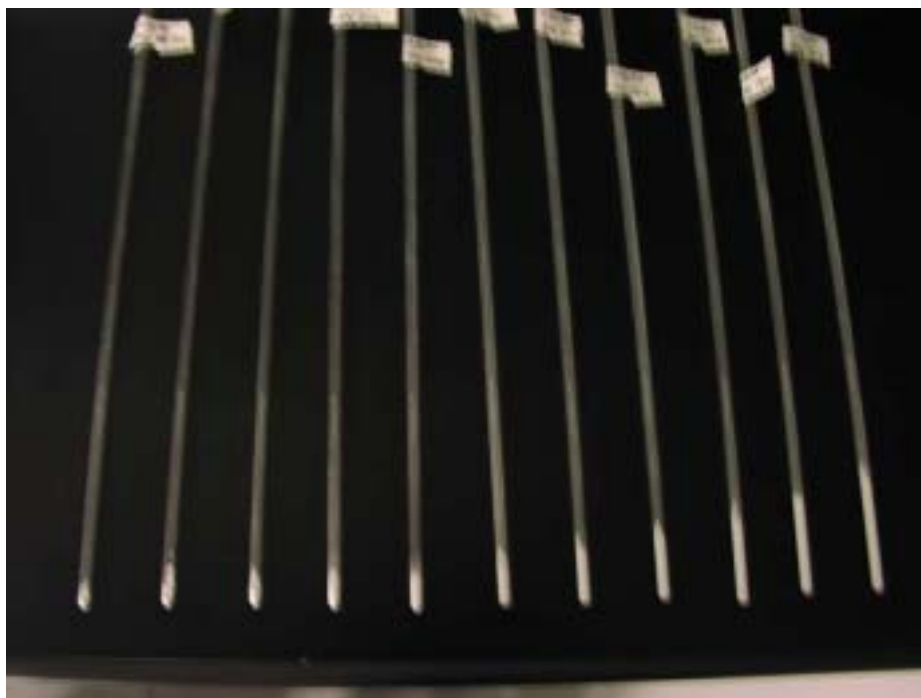


図 4.3.1 サンプル量の異なる試料管写真  
20 mg ~ 510 mg まで、内径 5 mm の標準試料管

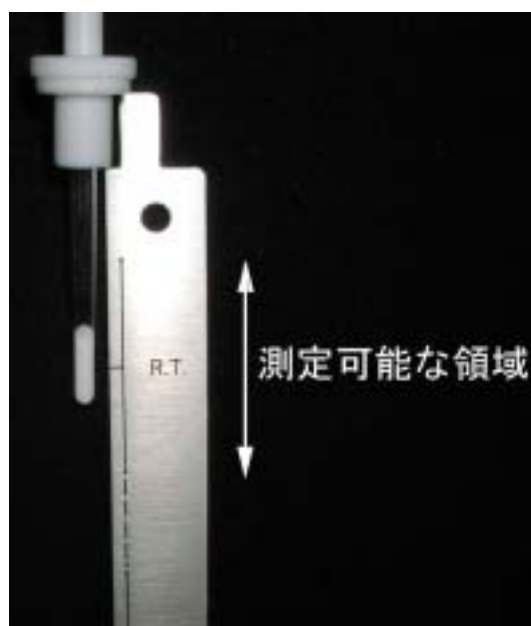


図 4.3.1\_2 使用した装置 (JES-TE300) の試料測定可能領域  
写真の試料は硫酸カルシウム無水物 101 mg

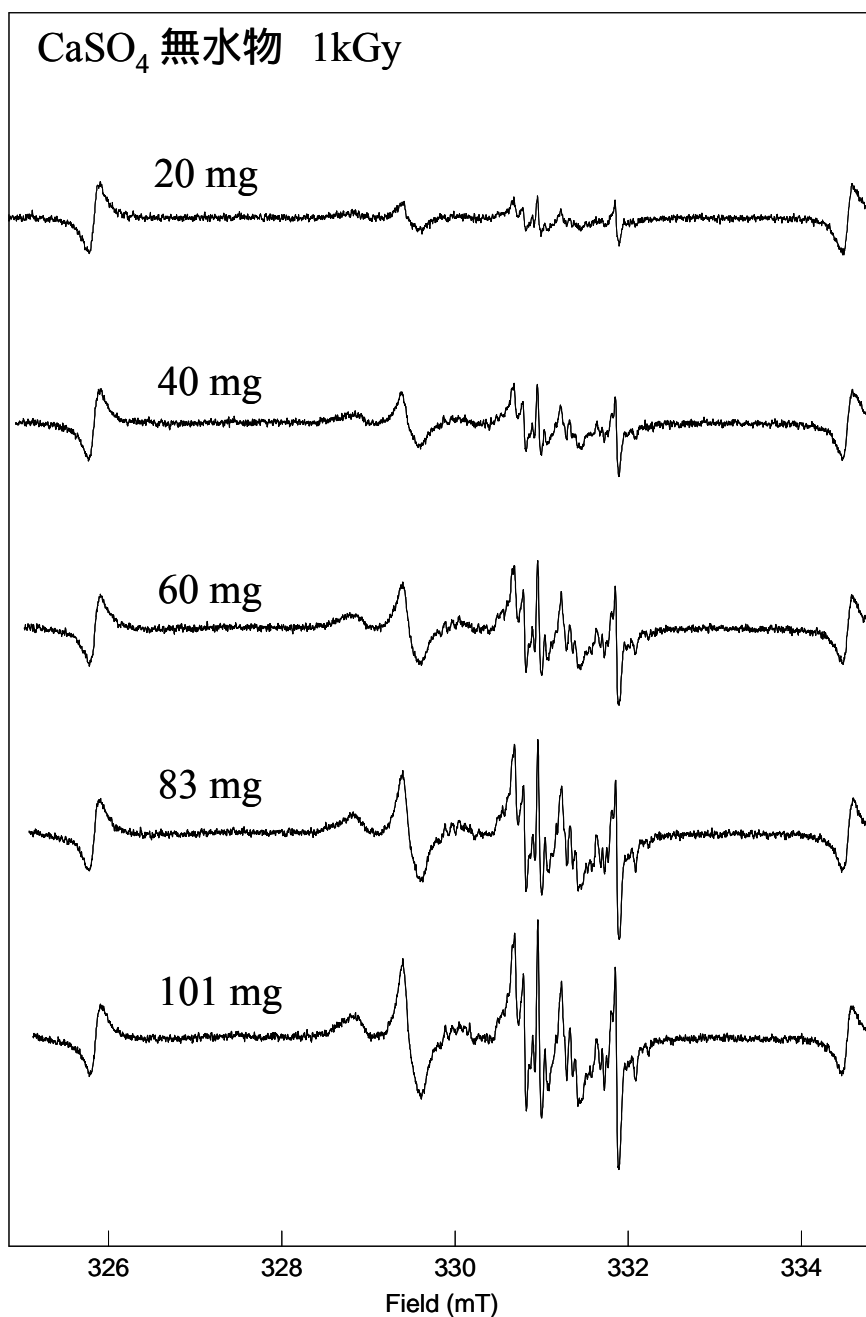


図 4.3.2\_1 硫酸カルシウム無水物に 線を 1kGy 照射した試料について試料管内のサンプル量を変えて得られた ESR スペクトル  
 ESR 条件: 9.27GHz, Field 330 ± 5mT, Mod. 20 μT (100kHz), Time Const. 0.03sec, Sweep Time 4min, Mn<sup>2+</sup> 外部標準マーカを挿入  
 マーカー強度で信号強度を規格化したもの。

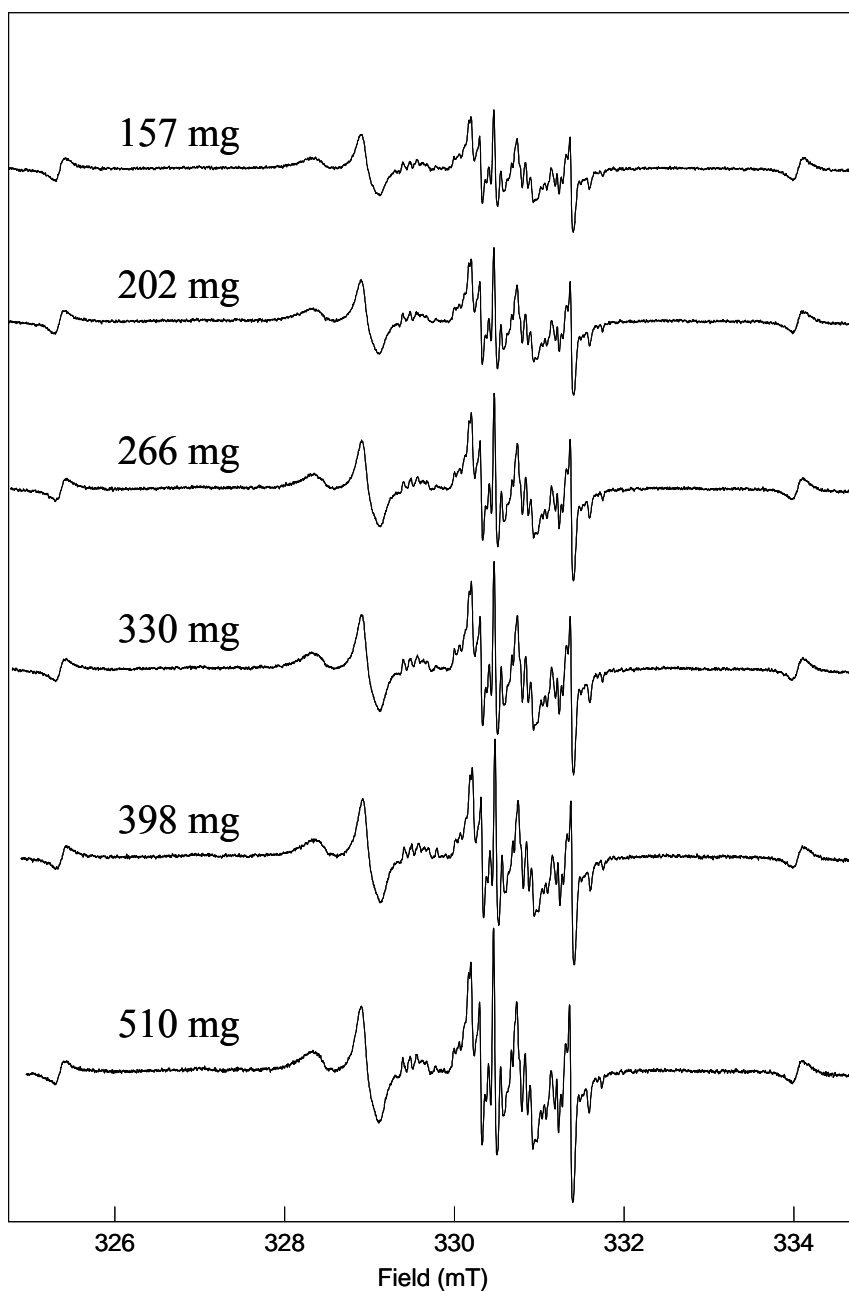


図 4.3.2\_2 硫酸カルシウム無水物に 線を 1kGy 照射した試料について試料管内のサンプル量を変えて得られた ESR スペクトル ( 続き )

ESR 条件: 9.27GHz, Field  $330 \pm 5$ mT, Mod.  $20 \mu$ T (100kHz), Time Const. 0.03sec, Sweep Time 4min,  $Mn^{2+}$  外部標準マーカを挿入  
マーカー強度で信号強度を規格化したもの。

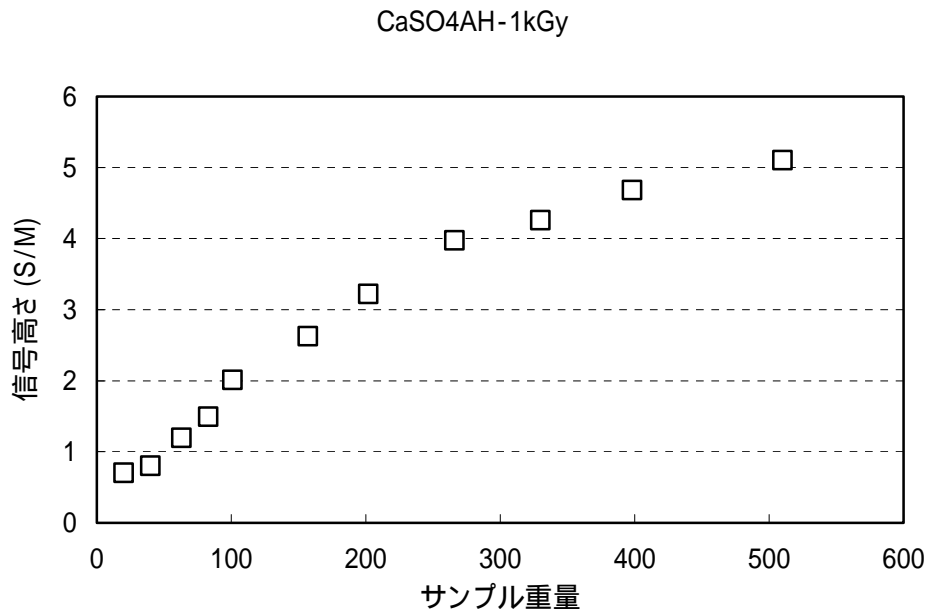


図 4.3.2\_3 図 4.3.2\_1~2 についてサンプル質量と信号高さ(信号/マーカ-比)でプロットしたもの

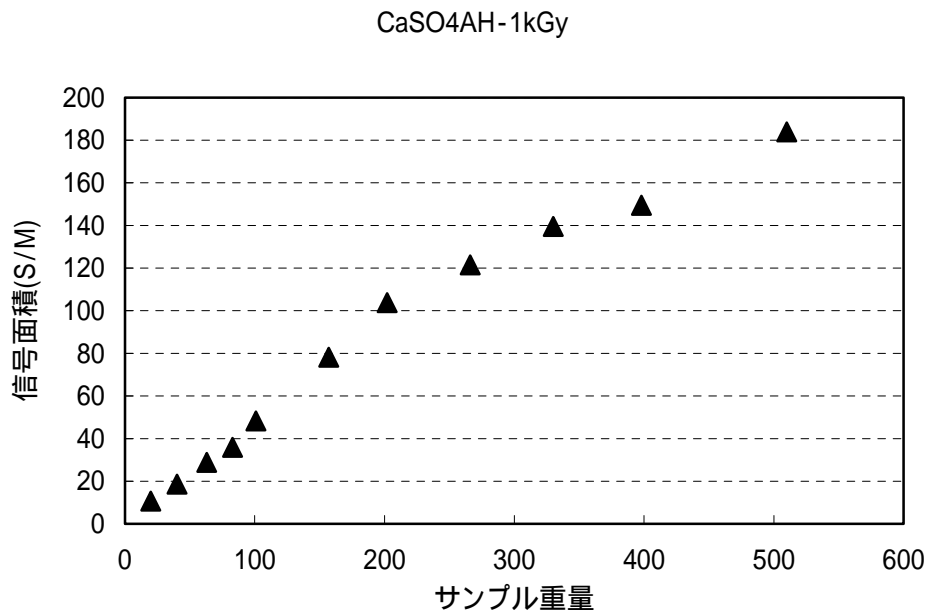


図 4.3.2\_4 図 4.3.2\_1~2 についてサンプル質量と信号の面積(信号/マーカ-比)でプロットしたもの



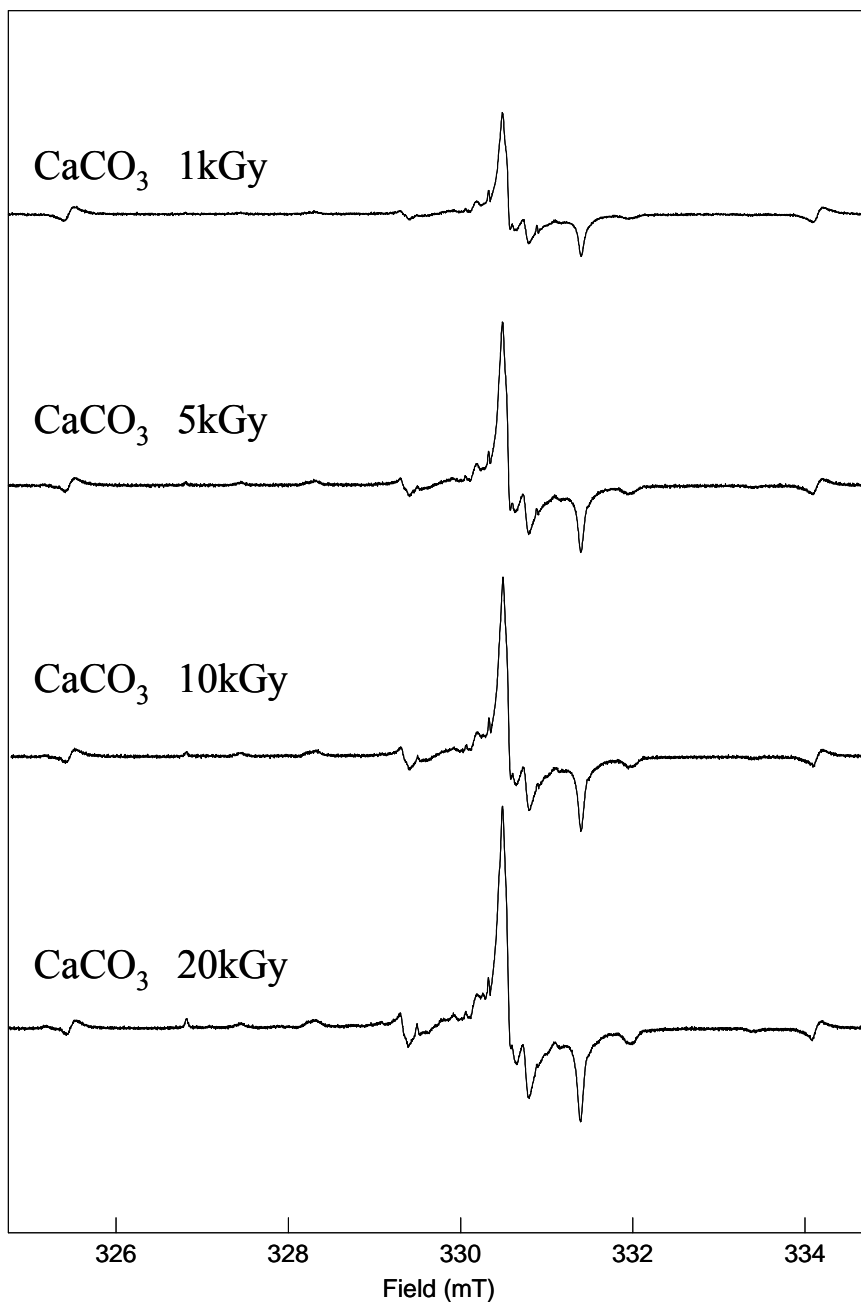


図 4.3.3\_1 炭酸カルシウムに線量を変えて 線照射した試料から得られた ESR スペクトル

ESR 条件: 9.27GHz, Field  $330 \pm 5$ mT, Mod.  $20 \mu\text{T}$  (100kHz), Time Const. 0.03sec, Sweep Time 4min,  $\text{Mn}^{2+}$  外部標準マーカを挿入  
マーカ強度で信号強度を規格化したもの。

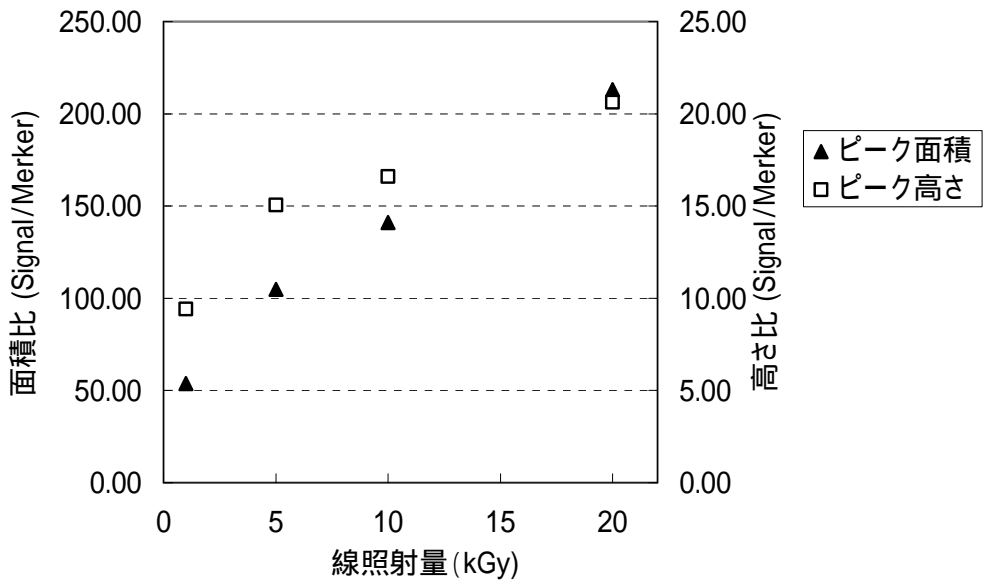


図 4.3.3\_2 炭酸カルシウムに線量を変えて 線照射した試料から得られた ESR スペクトル(図 4.3.3\_1)について 線照射量と ESR 信号強度および面積 (Mn マーカーとの比) でプロットしたもの

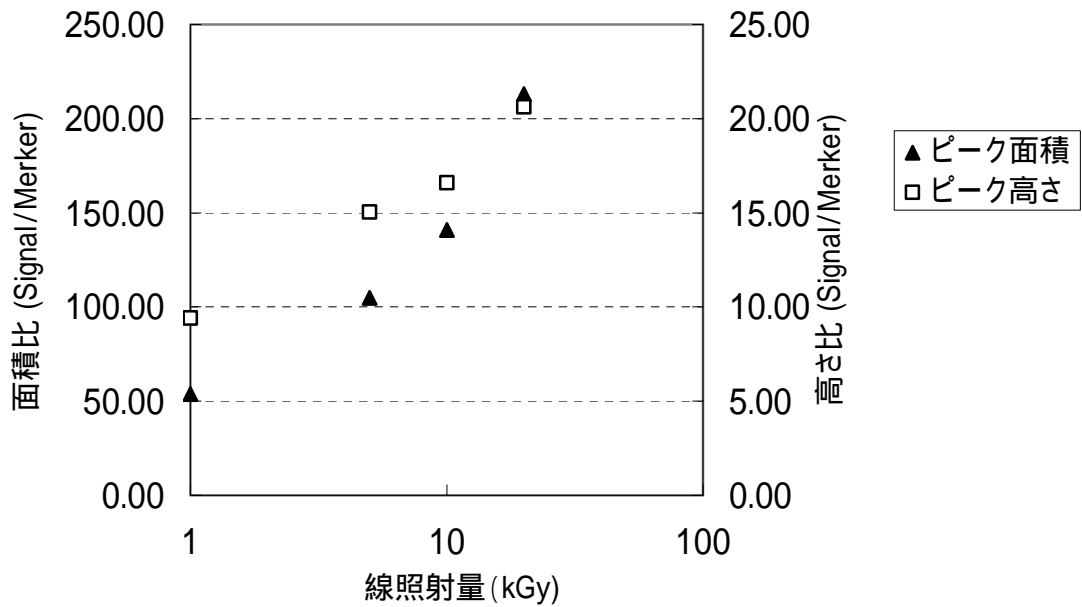


図 4.3.3\_3 図 4.3.3\_2 の横軸を対数スケールとしたもの

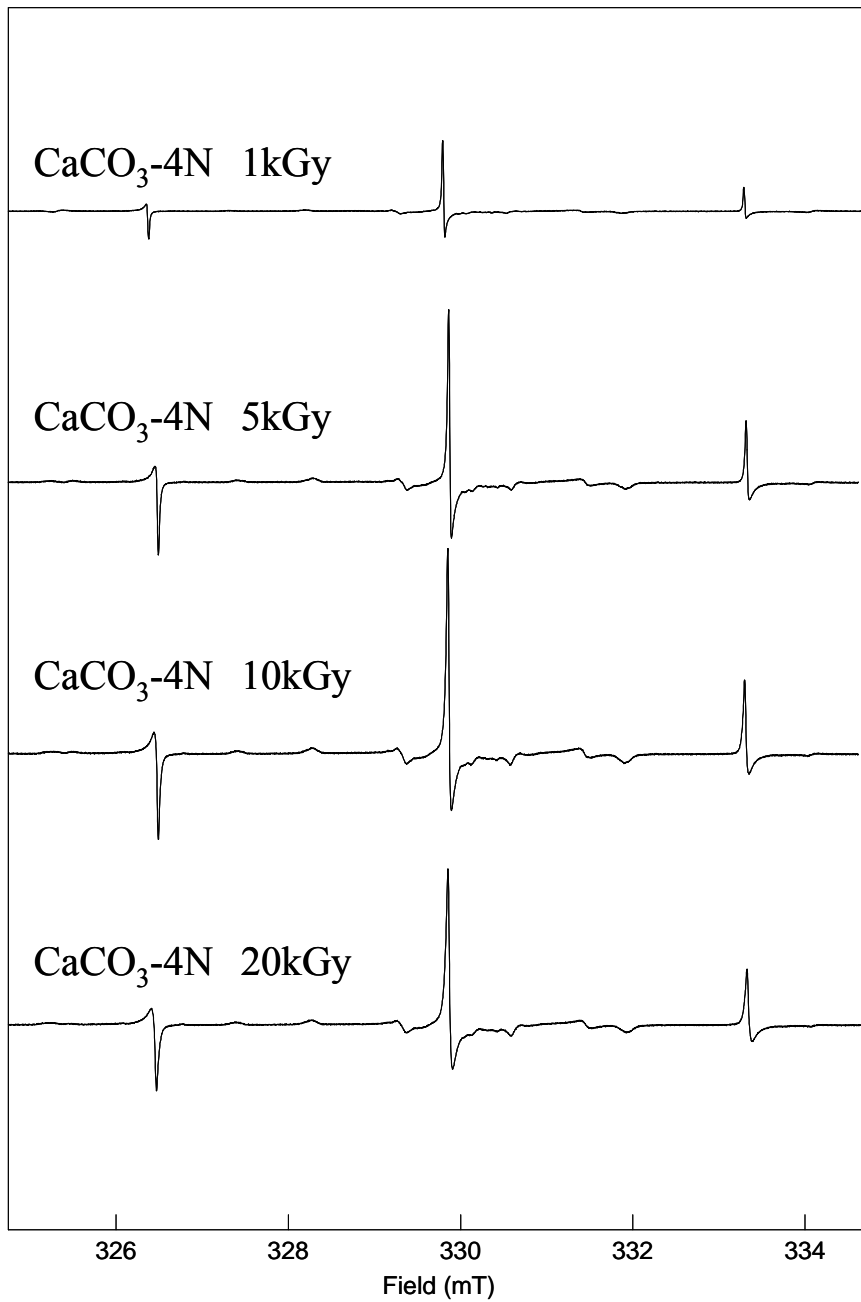


図 4.3.4\_1 炭酸カルシウム（高純度試薬）に線量を変えて 線照射した試料から得られた ESR スペクトル

ESR 条件: 9.27GHz, Field 330 ± 5mT, Mod. 20 μT (100kHz), Time Const. 0.03sec, Sweep Time 4min, Mn<sup>2+</sup> 外部標準マーカを挿入  
 マーカー強度で信号強度を規格化したもの。

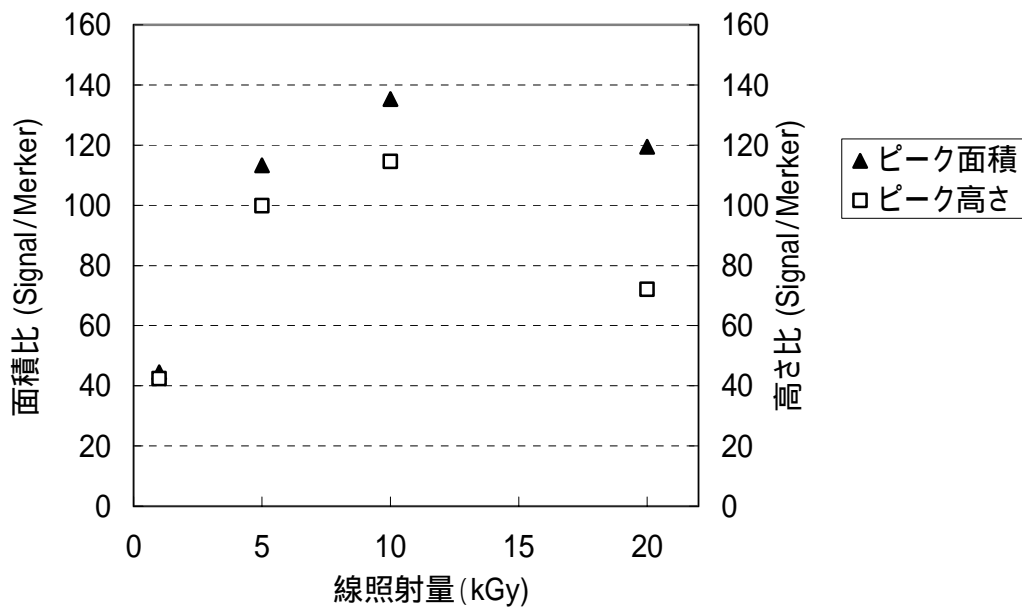


図 4.3.4\_2 炭酸カルシウム(高純度試薬)に線量を変えて線照射した試料から得られた ESR スペクトル(図 4.3.4\_1)について線照射量と ESR 信号強度および面積(Mn マーカーとの比)でプロットしたもの

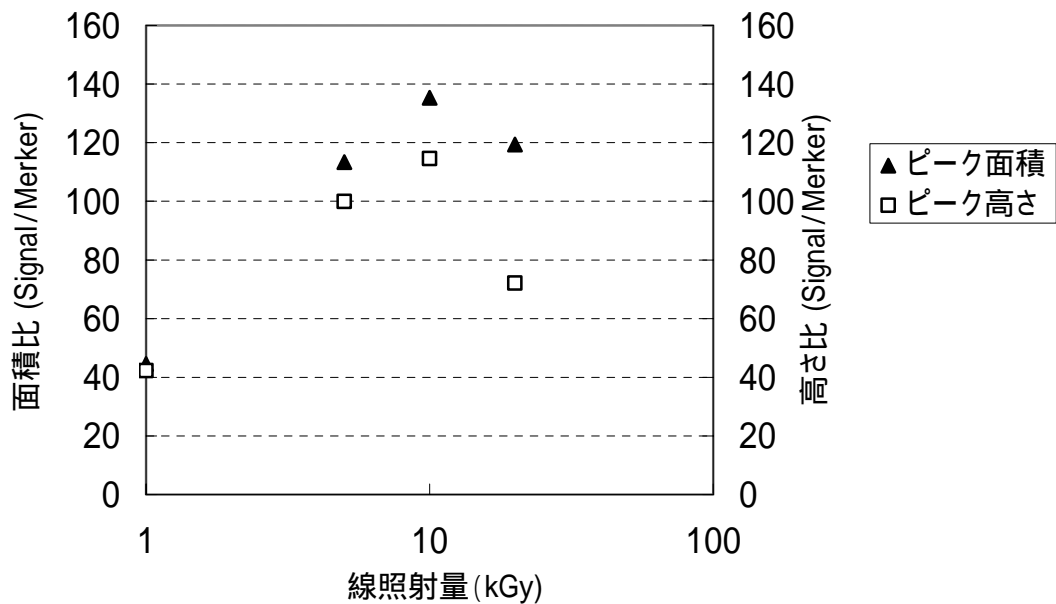


図 4.3.4\_3 図 4.3.4\_2 の横軸を対数スケールとしたもの

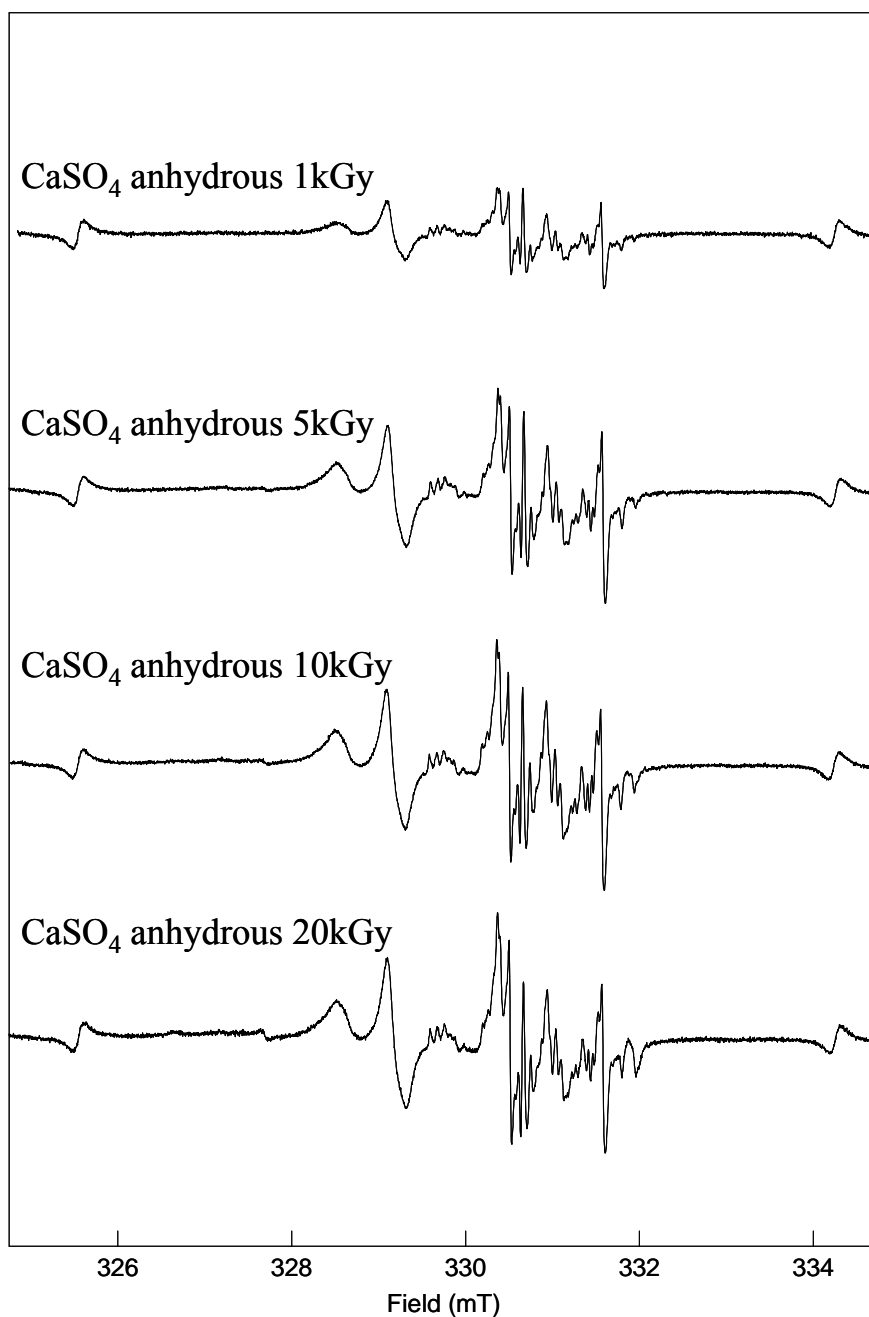


図 4.3.5\_1 硫酸カルシウム無水物に線量を変えて 線照射した試料から得られた ESR スペクトル

ESR 条件: 9.27GHz, Field 330 ± 5mT, Mod. 20 μT (100kHz), Time Const. 0.03sec, Sweep Time 4min, Mn<sup>2+</sup> 外部標準マーカを挿入  
マーカ強度で信号強度を規格化したもの。

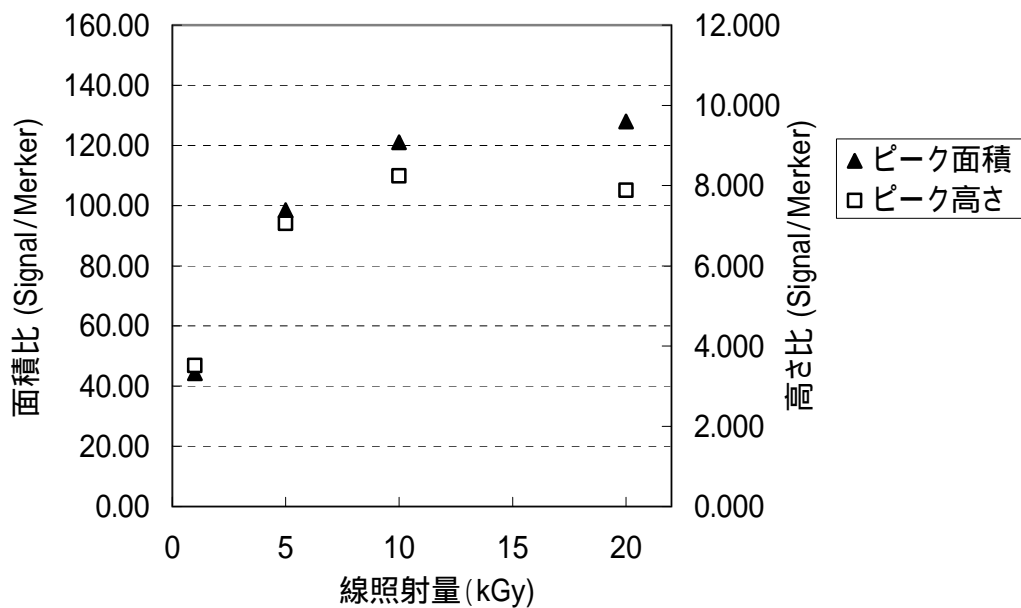


図 4.3.5\_2 硫酸カルシウム無水物に線量を変えて 線照射した試料から得られた ESR スペクトル (図 4.3.5\_1) について 線照射量と ESR 信号強度および面積 (Mn マーカーとの比) でプロットしたもの

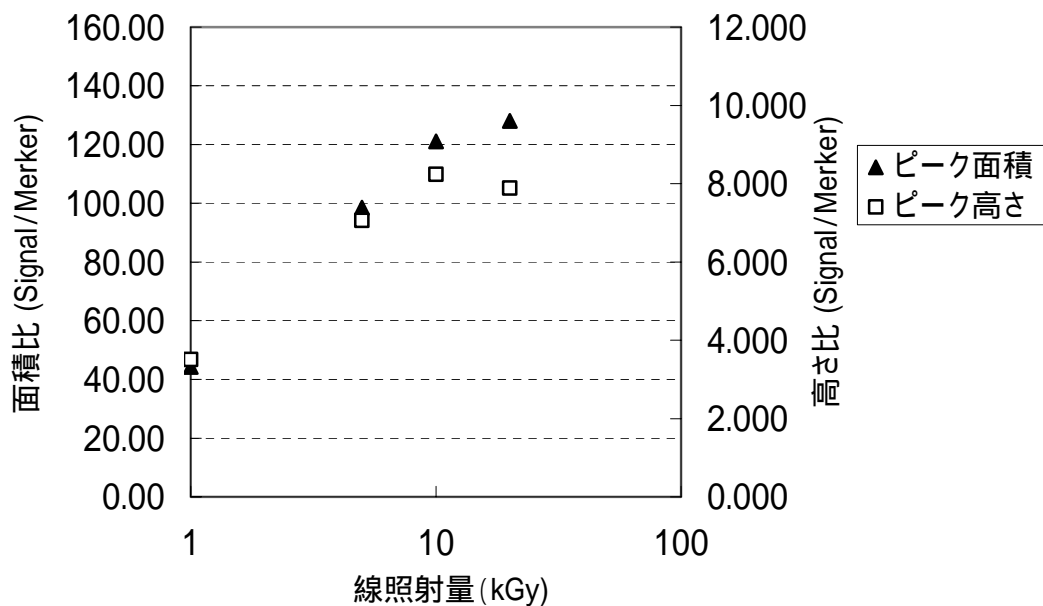


図 4.3.5\_3 図 4.3.5\_2 の横軸を対数スケールとしたもの

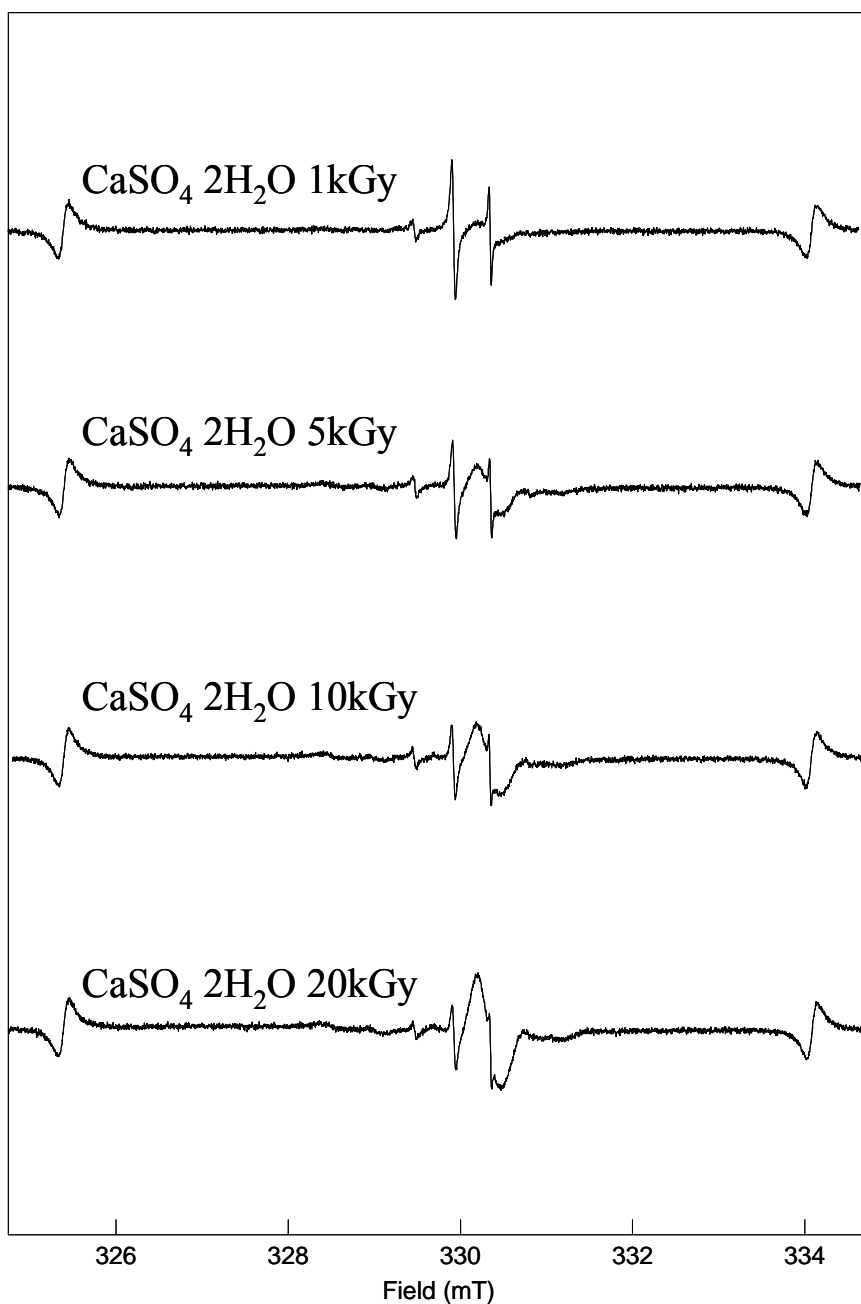


図 4.3.6\_1 硫酸カルシウム 2 水和物 (ナカライテスク社製) に線量を変えて線照射した試料から得られた ESR スペクトル

ESR 条件: 9.27GHz, Field  $330 \pm 5\text{mT}$ , Mod.  $20 \mu\text{T}$  (100kHz), Time Const. 0.03sec, Sweep Time 4min,  $\text{Mn}^{2+}$  外部標準マーカを挿入  
マーカ強度で信号強度を規格化したもの。

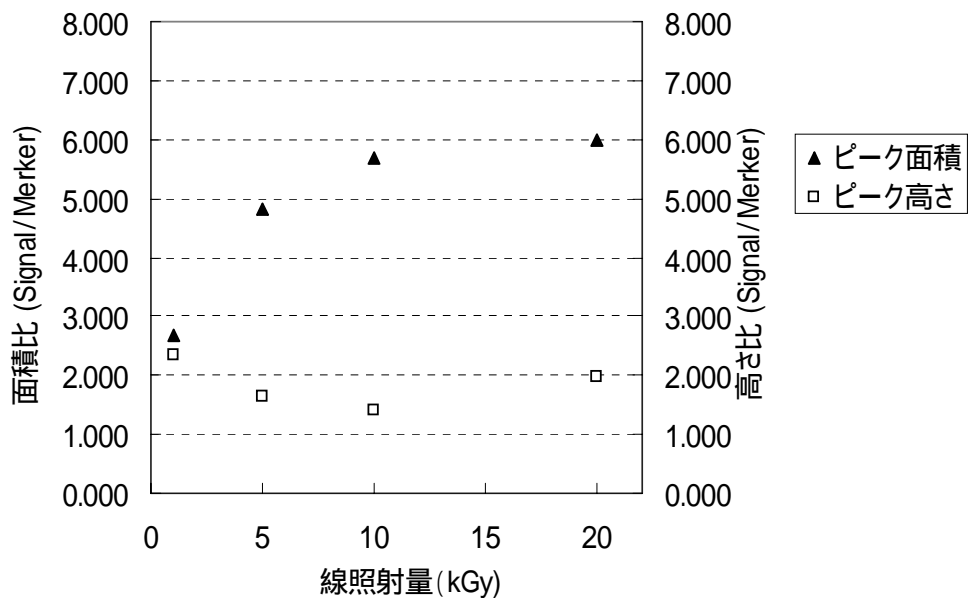


図 4.3.6\_2 硫酸カルシウム 2 水和物(ナカライテスク社製)に線量を変えて 線照射した試料から得られた ESR スペクトル(図 4.3.6\_1)について 線照射量と ESR 信号強度および面積 (Mn マーカーとの比) でプロットしたもの

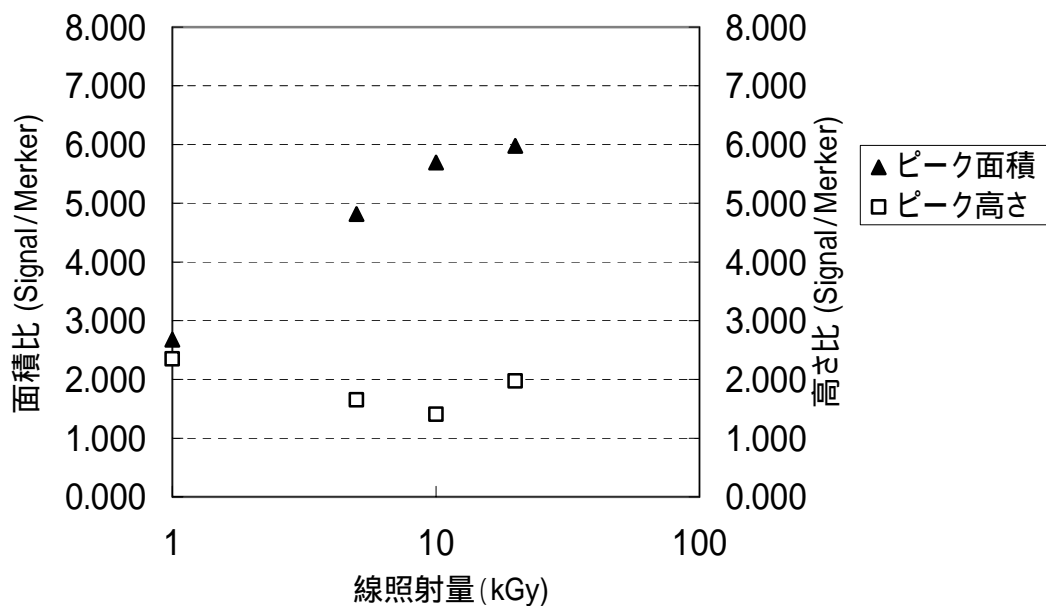


図 4.3.6\_3 図 4.3.6\_2 の横軸を対数スケールとしたもの



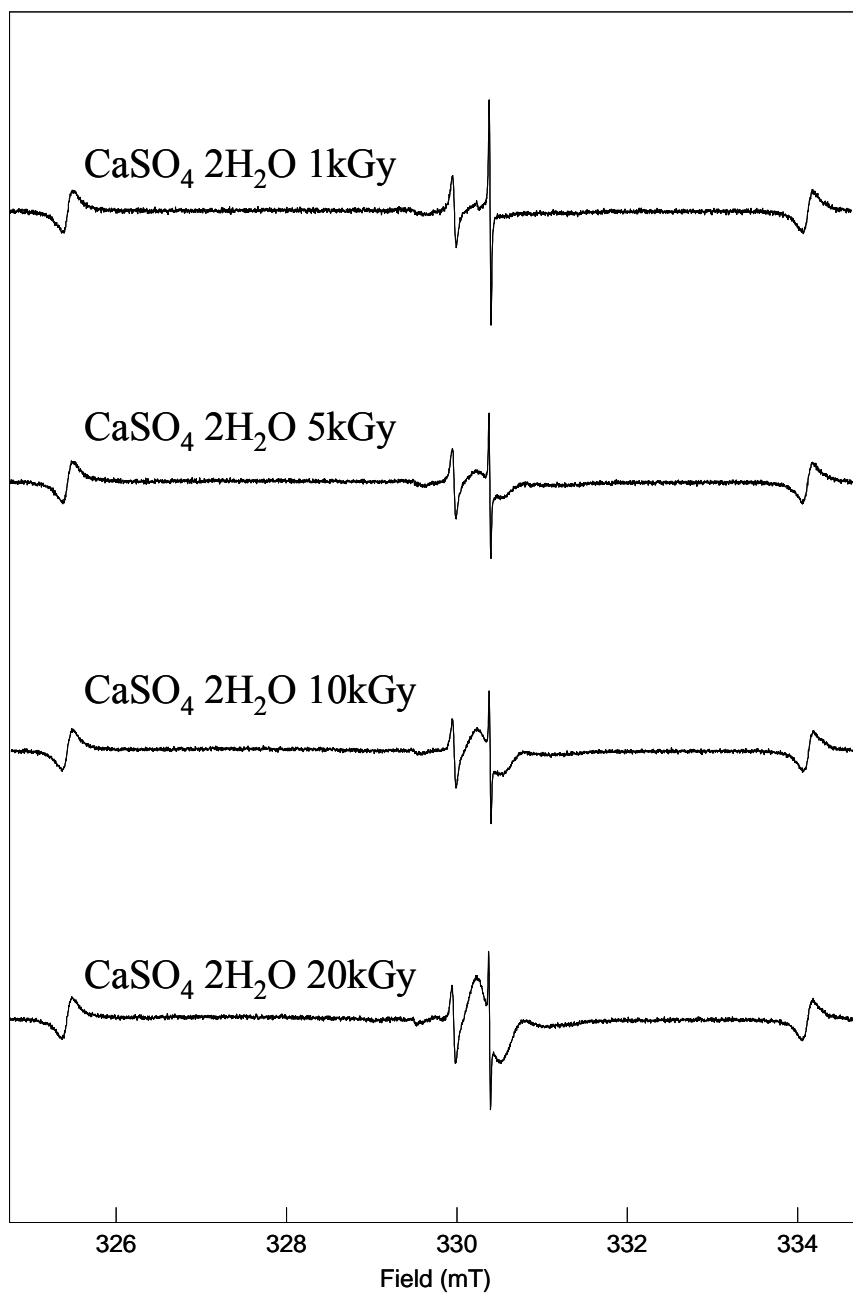
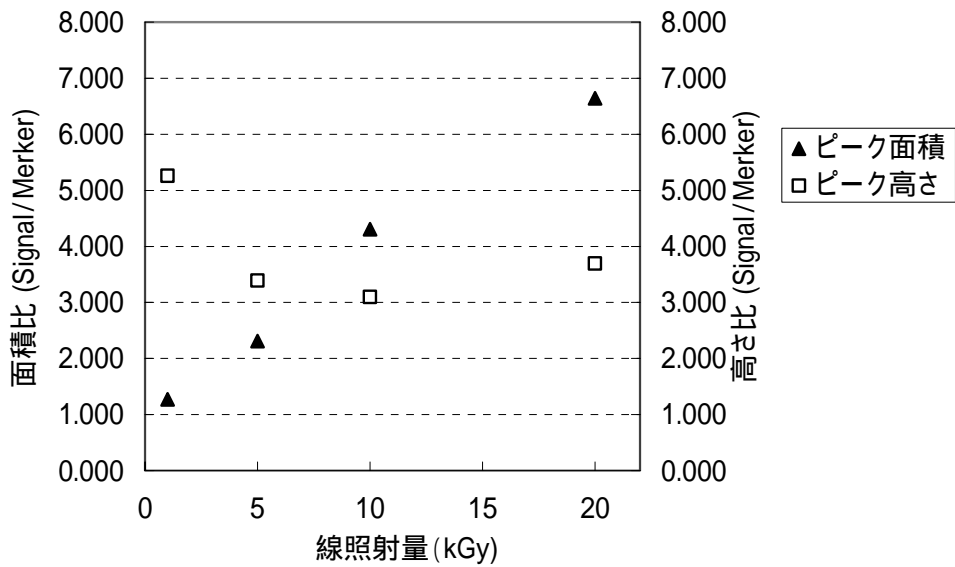


図 4.3.7\_1 硫酸カルシウム 2 水和物 (関東化学社製) に線量を変えて 線照射した試料から得られた ESR スペクトル ESR 条件: 9.27GHz, Field  $330 \pm 5\text{mT}$ , Mod.  $20 \mu\text{T}$  (100kHz), Time Const. 0.03sec, Sweep Time 4min,  $\text{Mn}^{2+}$  外部標準マーカ-を挿入  
 マーカー強度で信号強度を規格化したもの。



図

4.3.7\_2 硫酸カルシウム 2 水和物（関東化学社製）に線量を変えて 線照射した試料から得られた ESR スペクトル（図 4.3.3\_1）について 線照射量と ESR 信号強度および面積（Mn マーカーとの比）でプロットしたもの

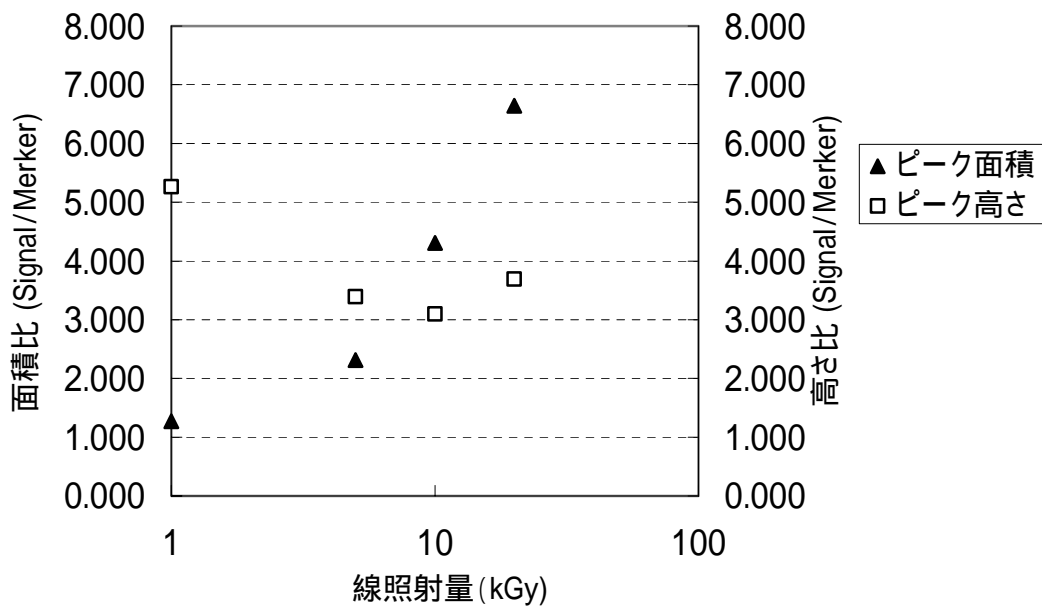


図 4.3.7\_3 図 4.3.3\_2 の横軸を対数スケールとしたもの

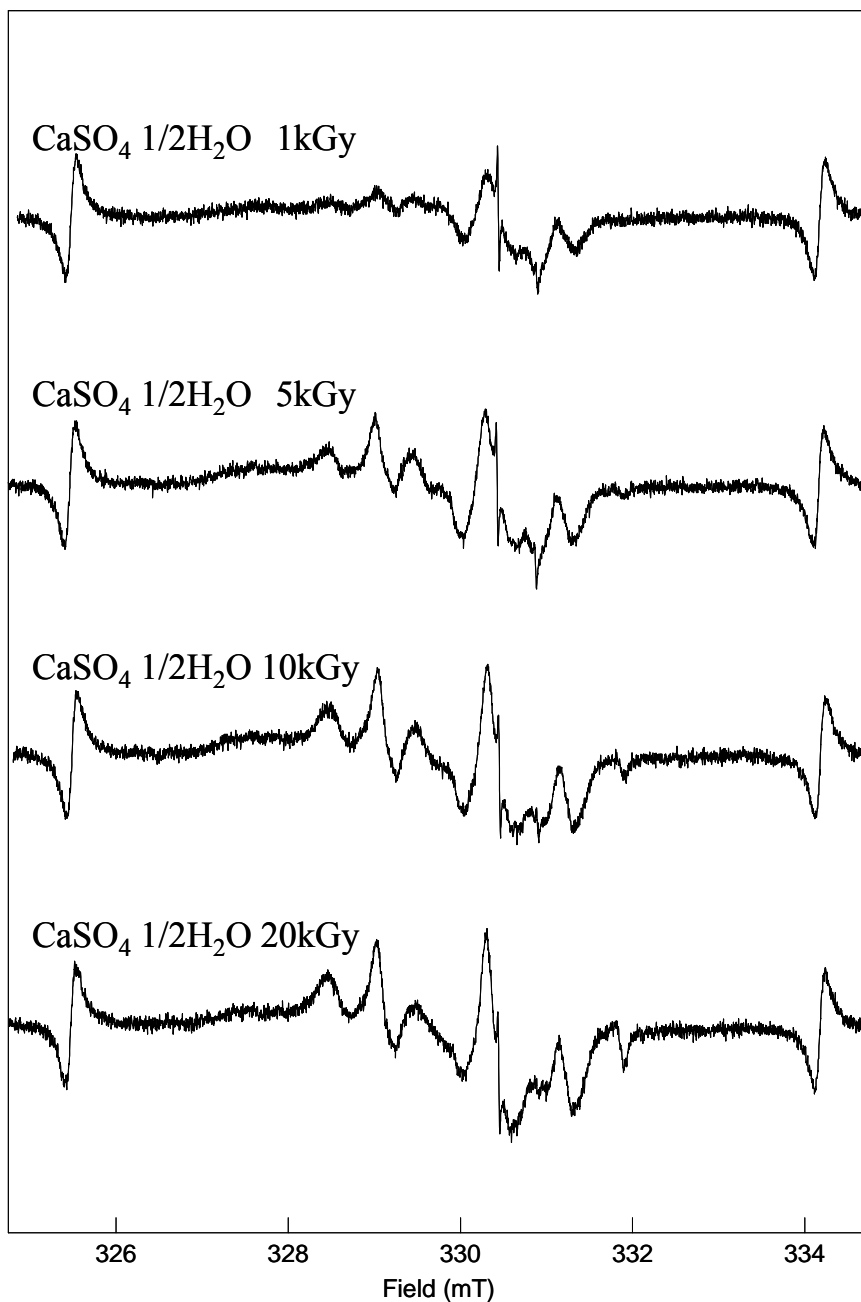


図 4.3.8\_1 硫酸カルシウム 0.5 水和物に線量を変えて 線照射した試料から得られた ESR スペクトル

ESR 条件: 9.27GHz, Field  $330 \pm 5\text{mT}$ , Mod.  $20 \mu\text{T}$  (100kHz), Time Const. 0.03sec, Sweep Time 4min,  $\text{Mn}^{2+}$  外部標準マーカを挿入  
マーカー強度で信号強度を規格化したもの。

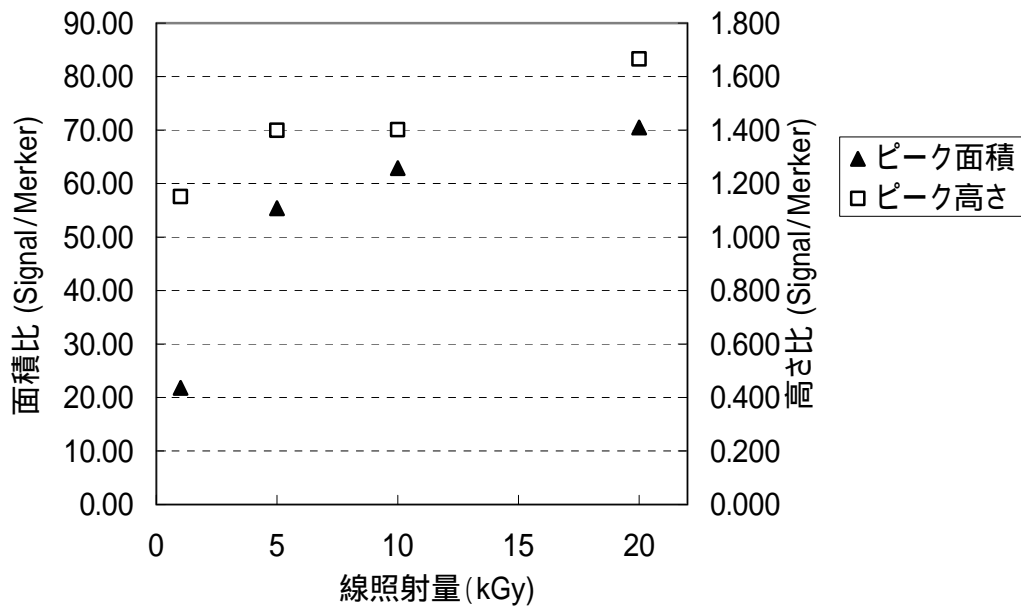


図 4.3.8\_2 硫酸カルシウム 0.5 水和物に線量を変えて 線照射した試料から得られた ESR スペクトル (図 4.3.8\_1) について 線照射量と ESR 信号強度および面積 (Mn マーカーとの比) でプロットしたもの

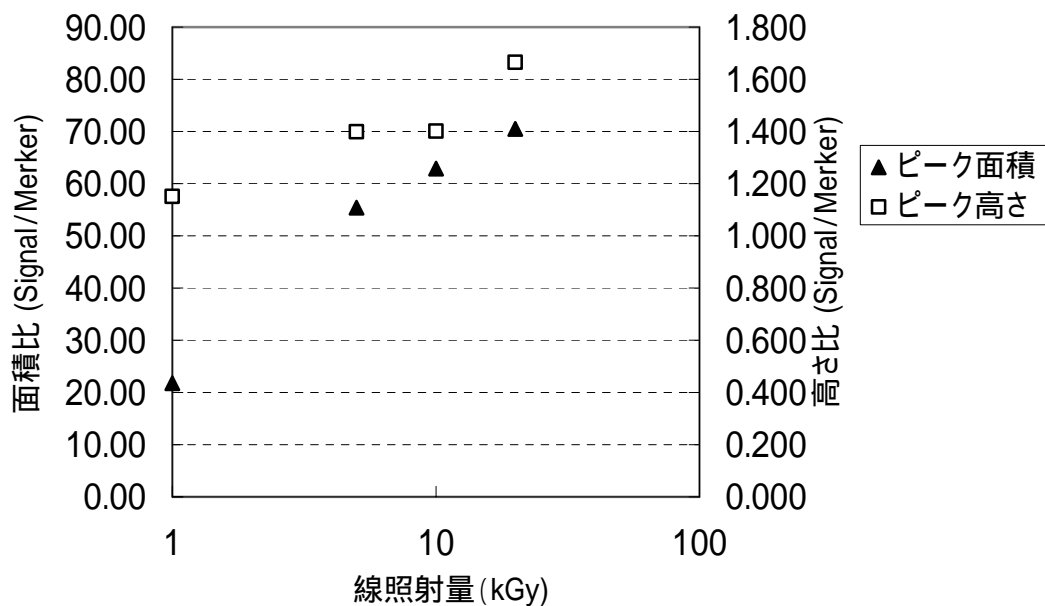


図 4.3.8\_3 図 4.3.8\_2 の横軸を対数スケールとしたもの

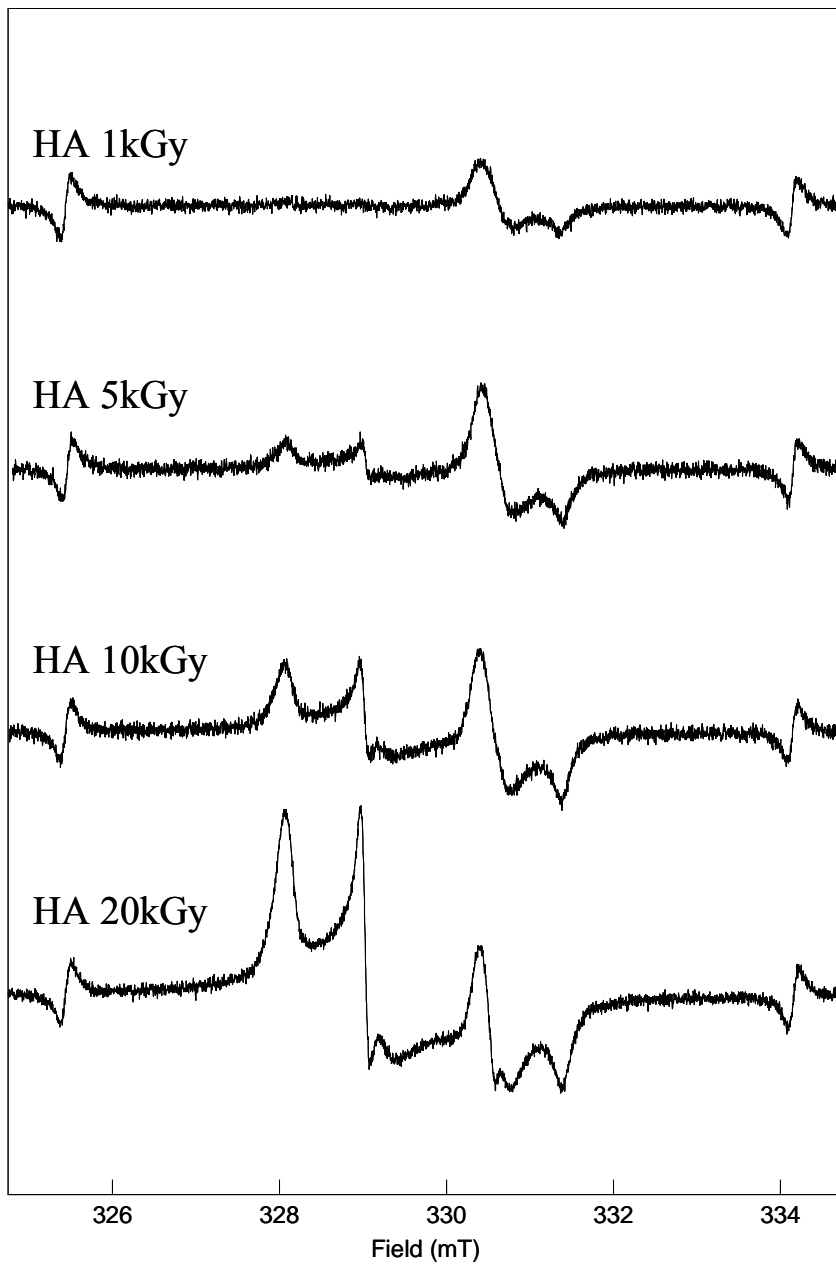


図 4.3.9\_1 ヒドロキシアパタイトに線量を変えて 線照射した試料から得られた ESR スペクトル

ESR 条件: 9.27GHz, Field  $330 \pm 5$ mT, Mod.  $20 \mu$ T (100kHz), Time Const. 0.03sec, Sweep Time 4min,  $Mn^{2+}$  外部標準マーカを挿入  
マーカ強度で信号強度を規格化したもの。

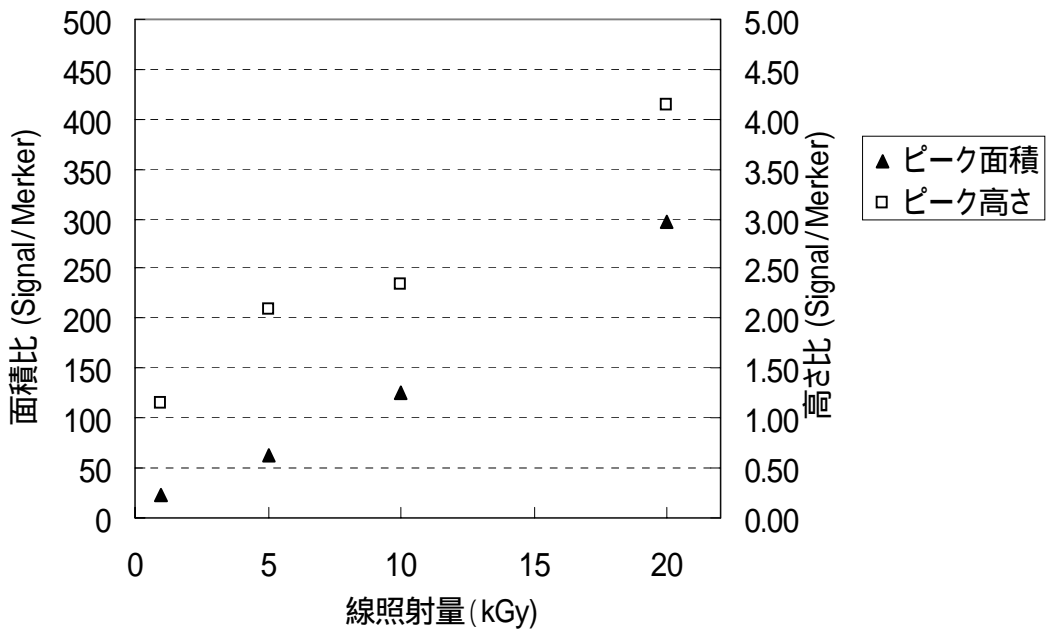


図 4.3.9\_2 ヒドロキシアパタイトに線量を変えて 線照射した試料から得られた ESR スペクトル(図 4.3.10\_1)について 線照射量と ESR 信号強度および面積 (Mn マーカーとの比) でプロットしたもの

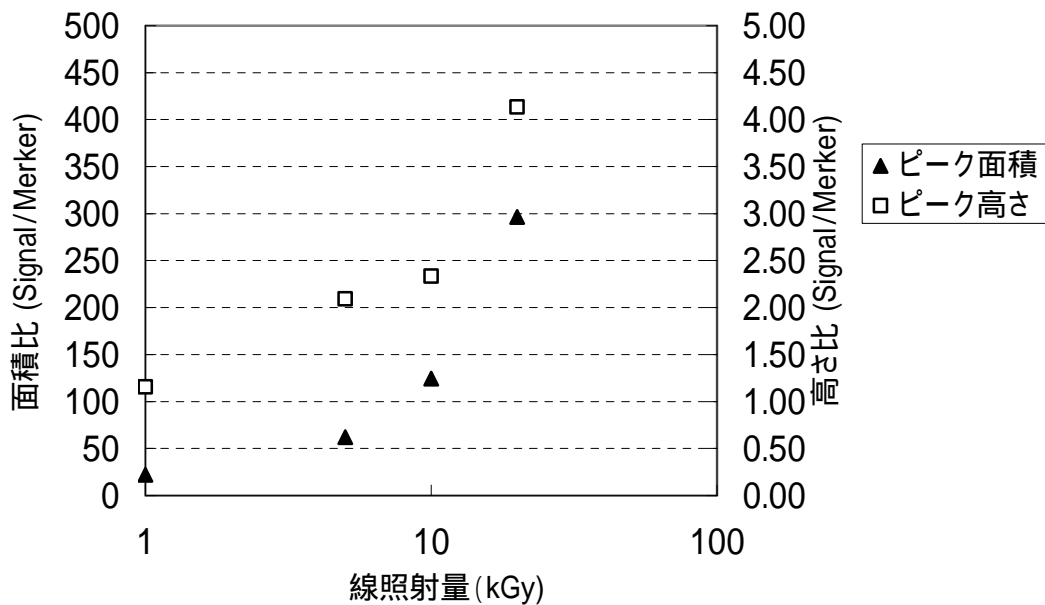


図 4.3.9\_3 図 4.3.9\_2 の横軸を対数スケールとしたもの

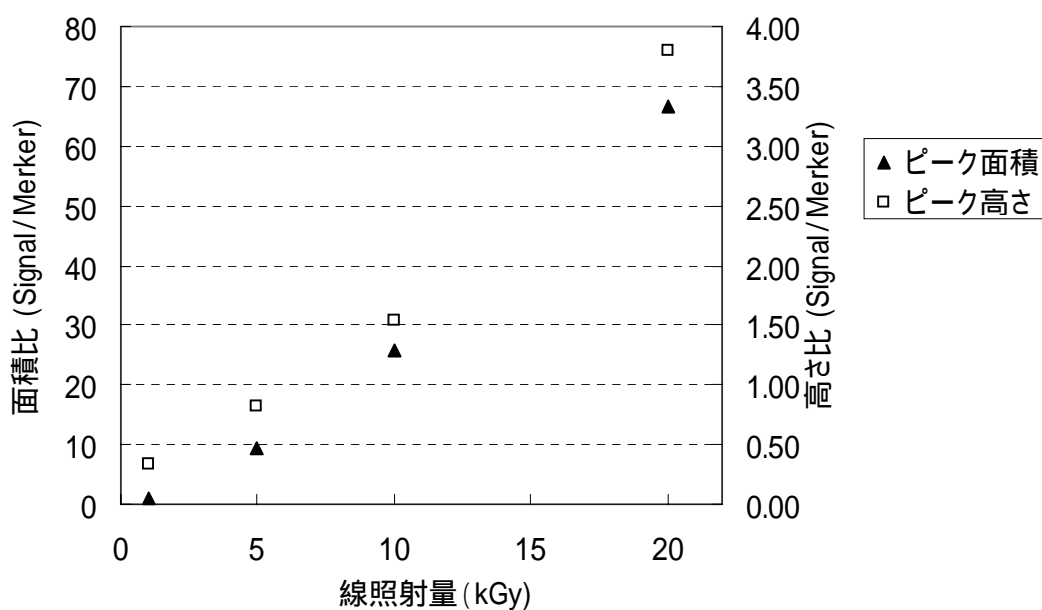
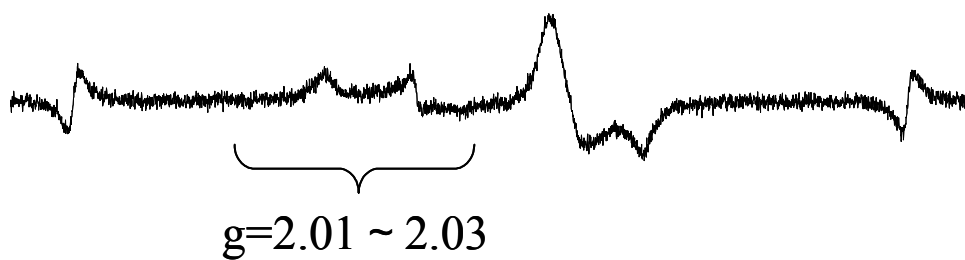


図 4.3.9\_3 ヒドロキシアパタイトに線量を変えて 線照射した試料から得られた ESR スペクトル(図 4.3.10\_1)について 線照射量と ESR 信号強度および面積 (Mn マーカーとの比)でプロットしたもの  
上図の低磁場部分のみ

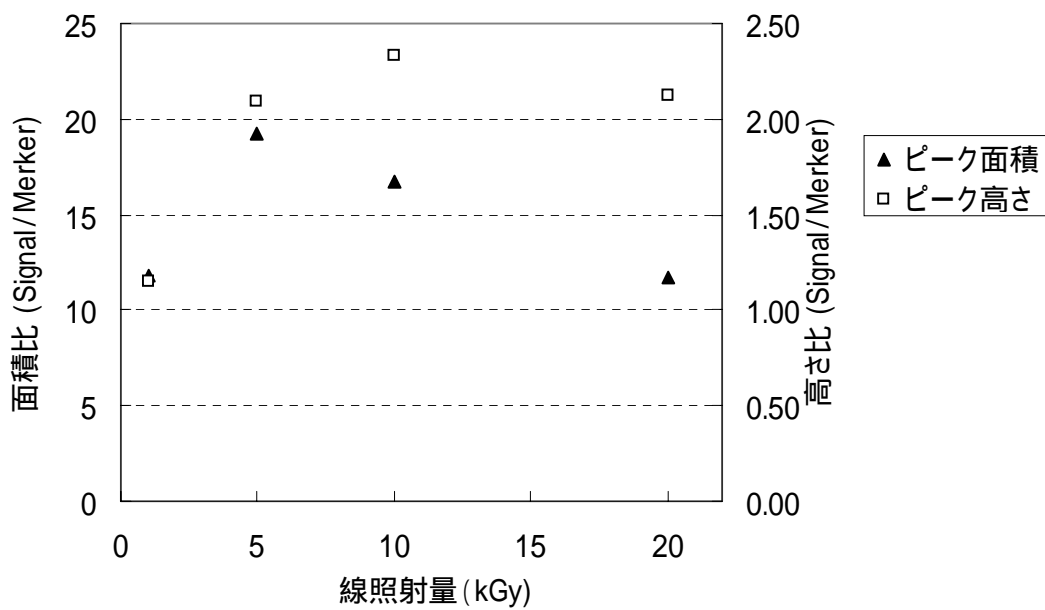
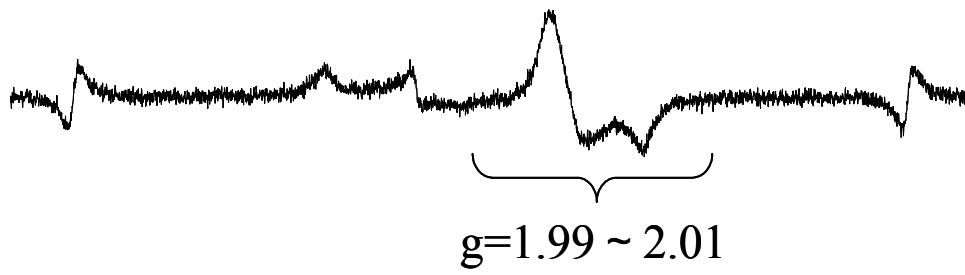


図 4.3.9\_4 ヒドロキシアパタイトに線量を変えて 線照射した試料から得られた ESR スペクトル(図 4.3.10\_1)について 線照射量と ESR 信号強度および面積 (Mn マーカーとの比)でプロットしたもの  
上図の高磁場部分のみ



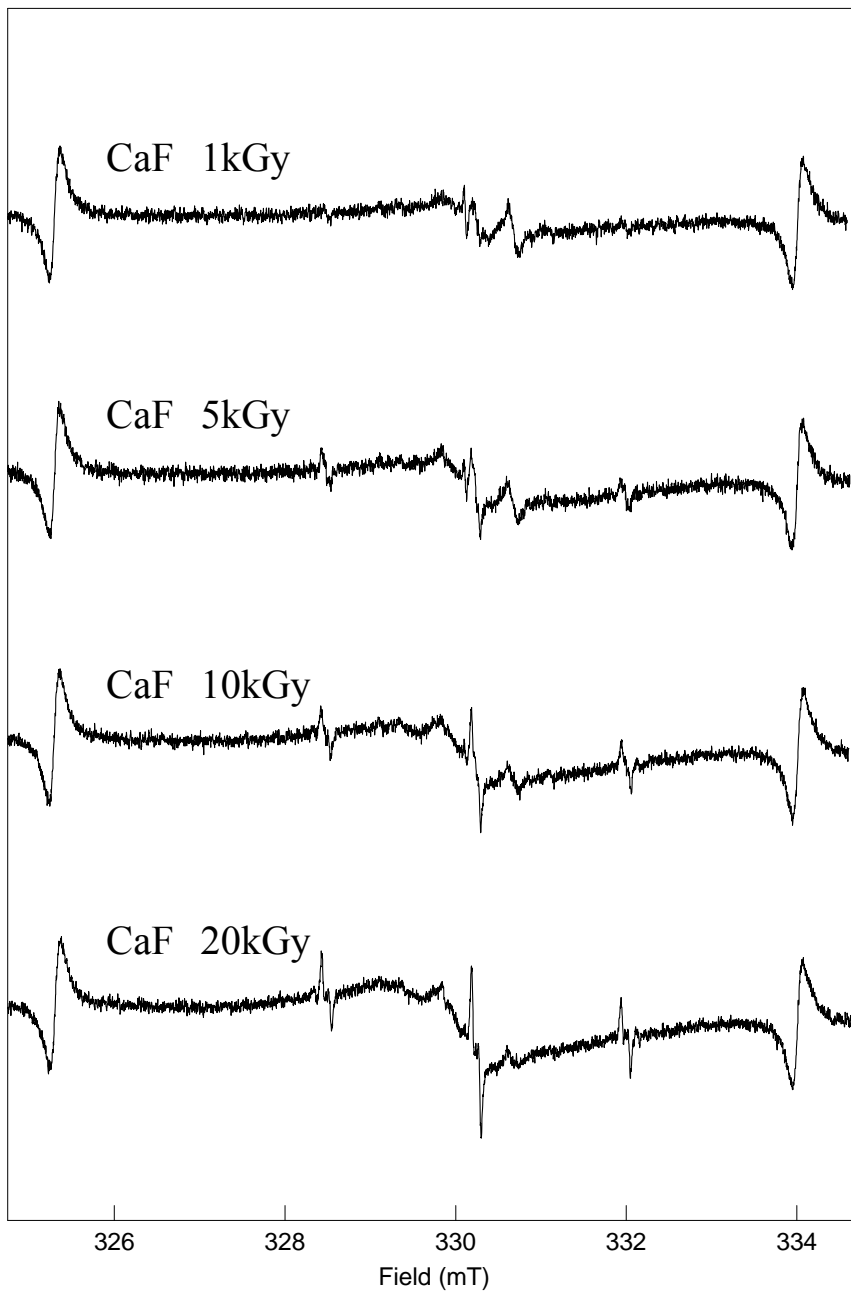


図 4.3.10\_1 フッ化カルシウムに線量を変えて 線照射した試料から得られた ESR スペクトル

ESR 条件: 9.27GHz, Field  $330 \pm 5$ mT, Mod. 20  $\mu$ T (100kHz), Time Const. 0.03sec, Sweep Time 4min,  $Mn^{2+}$  外部標準マーカを挿入  
マーカ強度で信号強度を規格化したもの。

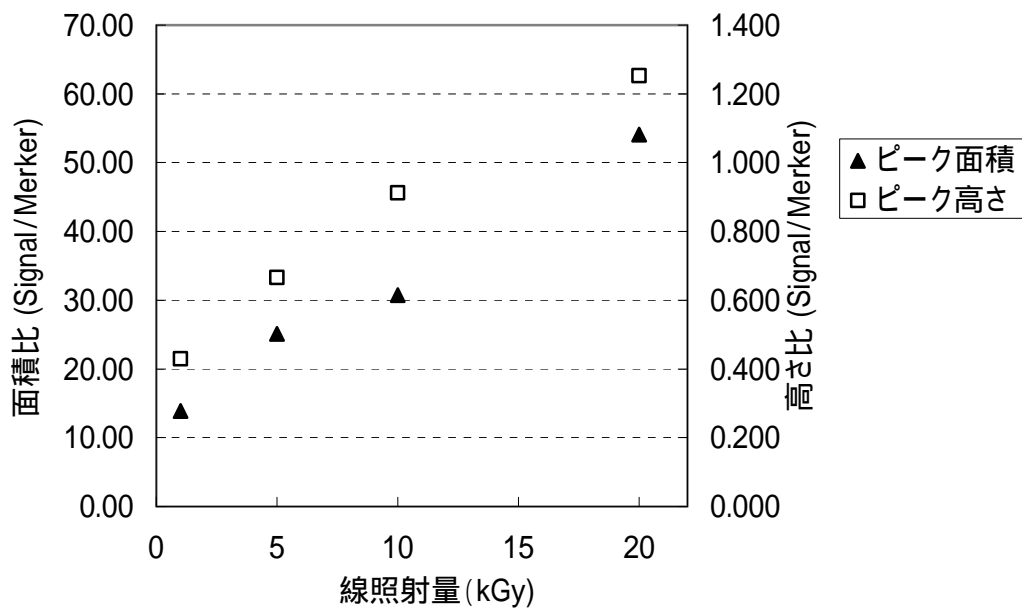


図 4.3.10\_2 フッ化カルシウムに線量を変えて 線照射した試料から得られた ESR スペクトル(図 4.3.10\_1)について 線照射量と ESR 信号強度および面積(Mn マーカーとの比)でプロットしたもの

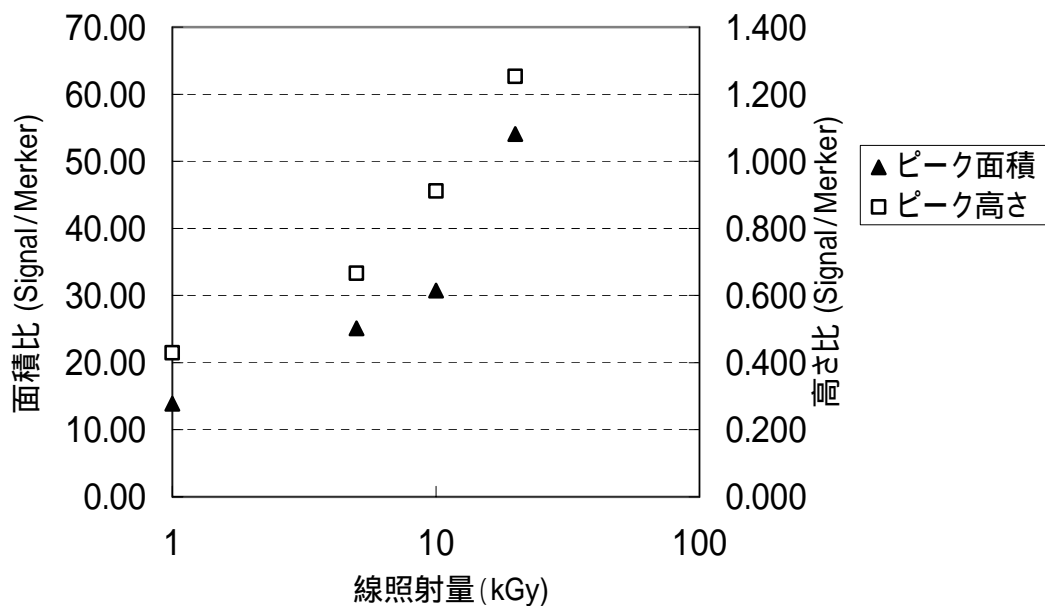


図 4.3.10\_3 図 4.3.10\_2 の横軸を対数スケールとしたもの

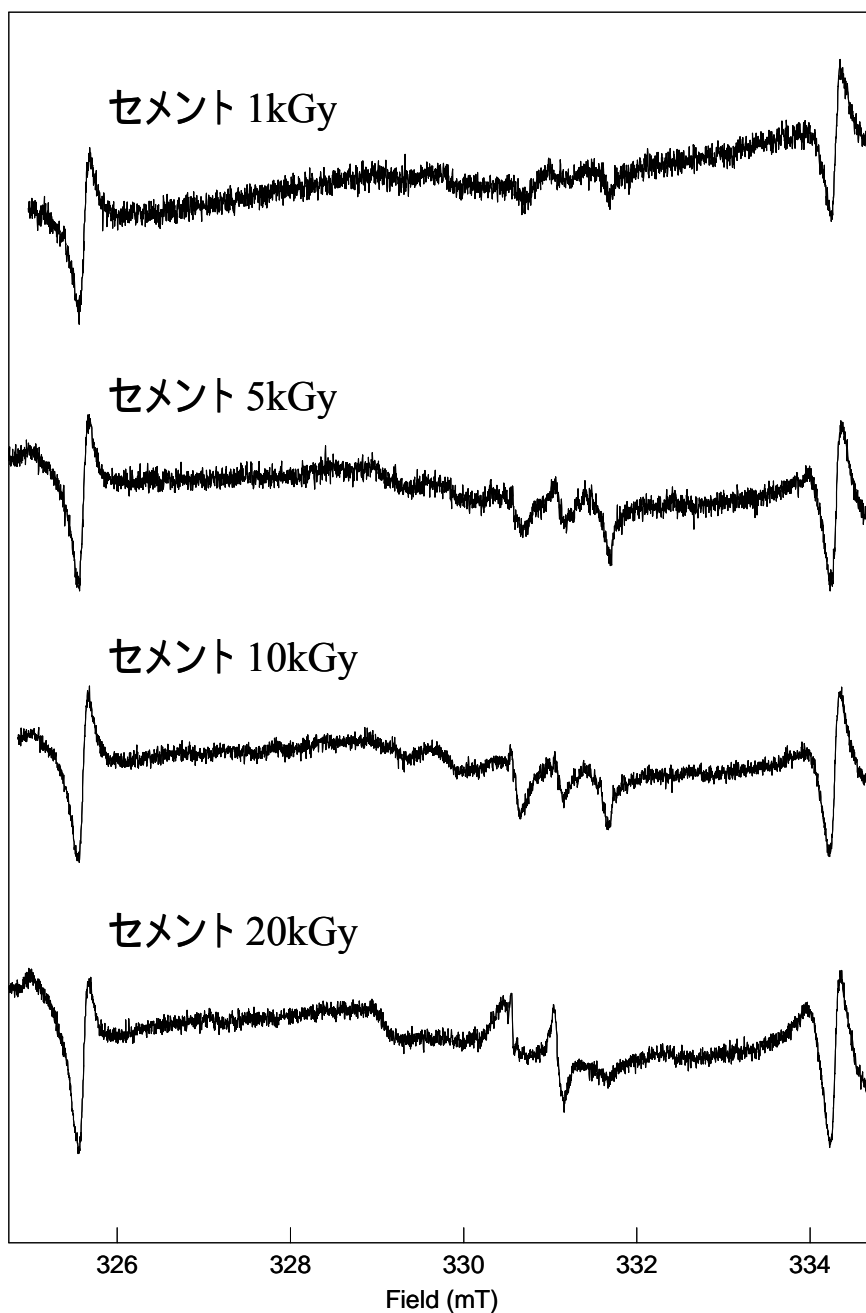


図 4.3.11\_1 セメント粉末に線量を変えて 線照射した試料から得られた ESR スペクトル

ESR 条件: 9.27GHz, Field  $330 \pm 5$ mT, Mod.  $20 \mu$ T (100kHz), Time Const. 0.03sec, Sweep Time 4min,  $Mn^{2+}$  外部標準マーカを挿入  
マーカ強度で信号強度を規格化したもの。

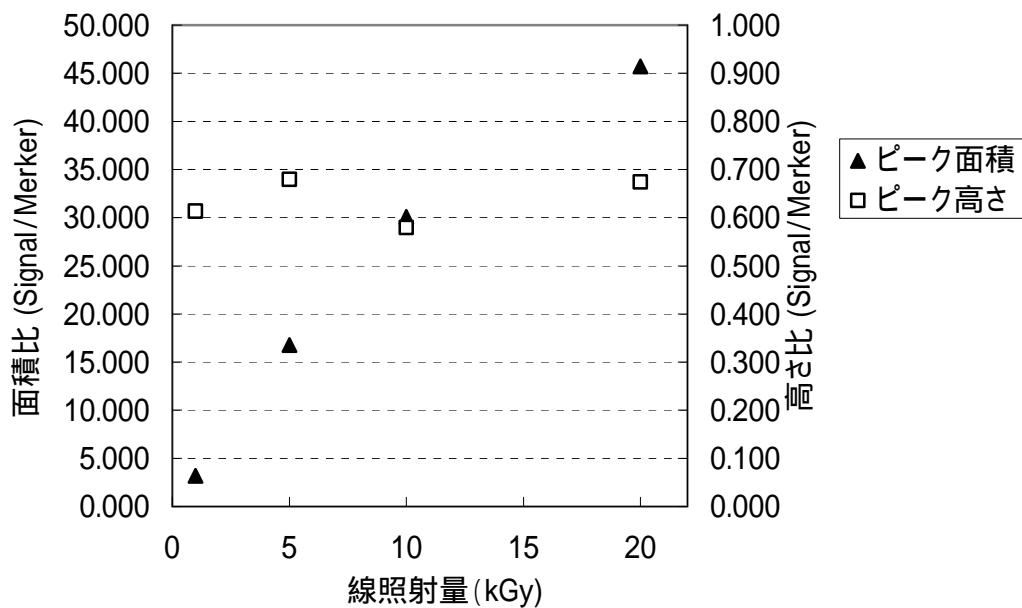


図 4.3.11\_2 セメント粉末に線量を変えて 線照射した試料から得られた ESR スペクトル (図 4.3.11\_1) について 線照射量と ESR 信号強度および面積 (Mn マーカーとの比) でプロットしたもの

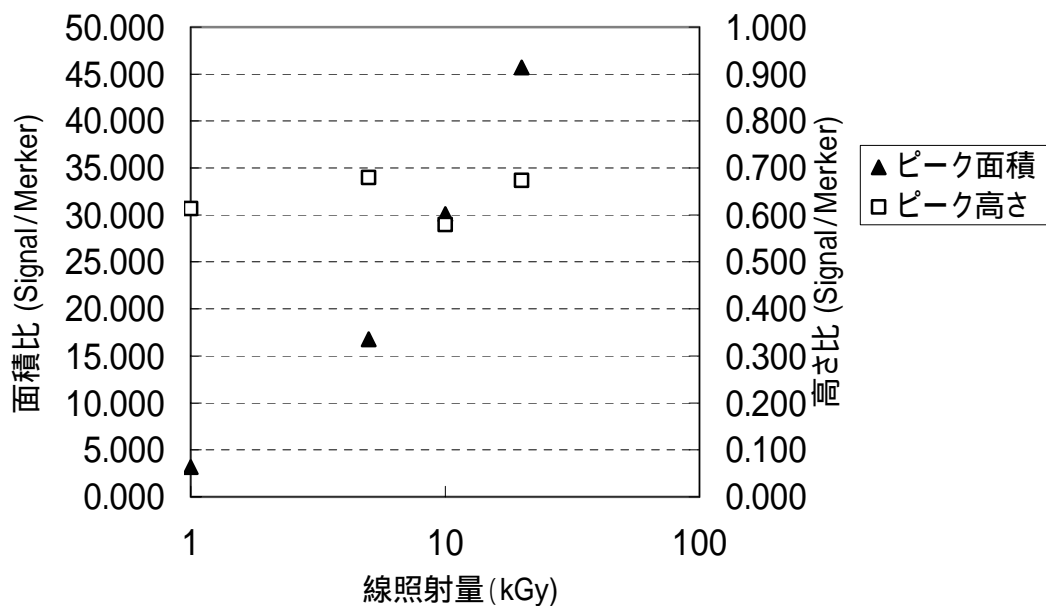


図 4.3.11\_3 図 4.3.11\_2 の横軸を対数スケールとしたもの

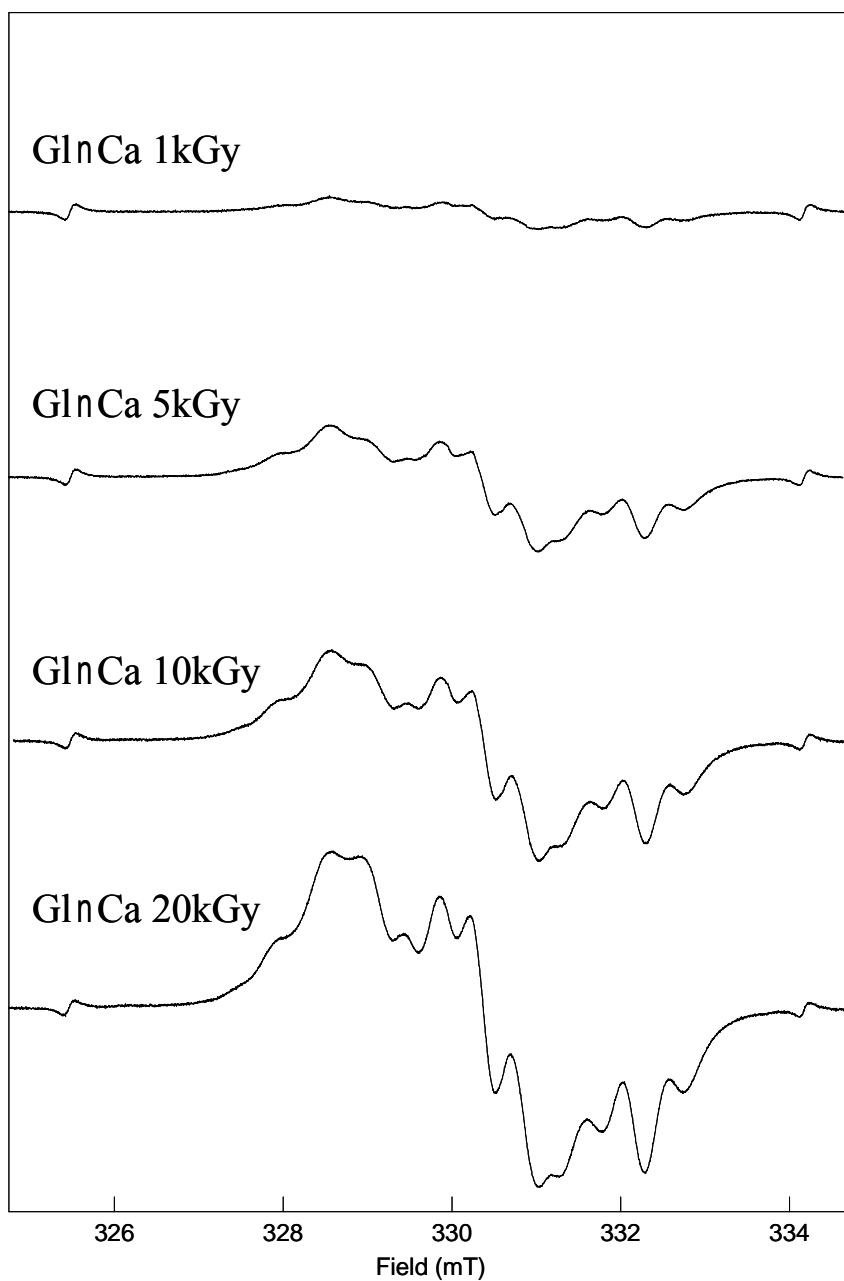


図 4.3.12\_1 グルコン酸カルシウムに線量を変えて 線照射した試料から得られた ESR スペクトル

ESR 条件: 9.27GHz, Field  $330 \pm 5$ mT, Mod.  $20 \mu$ T (100kHz), Time Const. 0.03sec, Sweep Time 4min,  $Mn^{2+}$  外部標準マーカを挿入  
 マーカー強度で信号強度を規格化したもの。

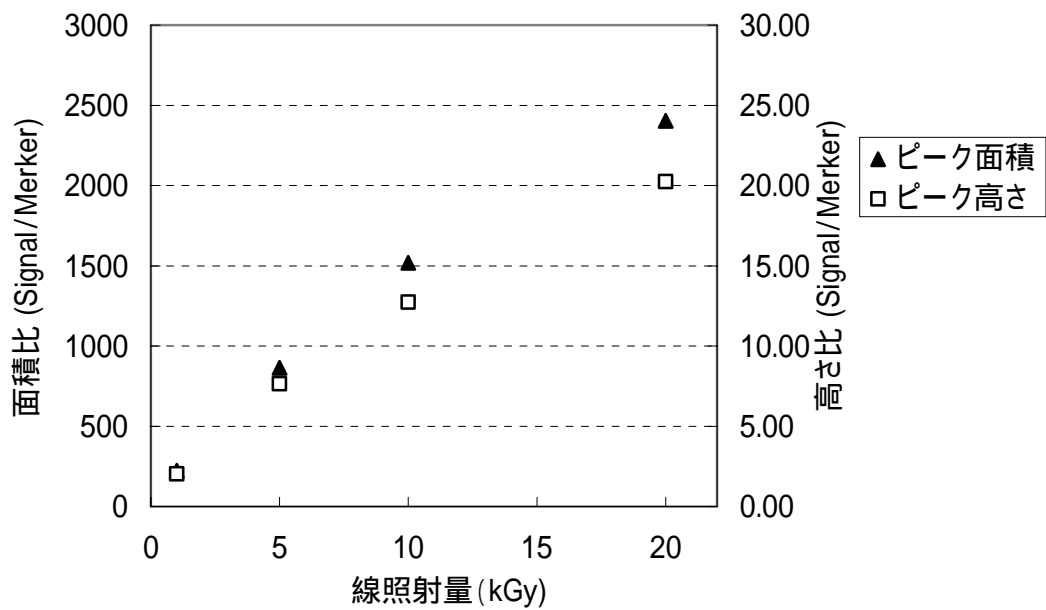


図 4.3.12\_2 グルコン酸カルシウムに線量を変えて 線照射した試料から得られた ESR スペクトル (図 4.3.12\_1) について 線照射量と ESR 信号強度および面積 (Mn マーカーとの比) でプロットしたもの

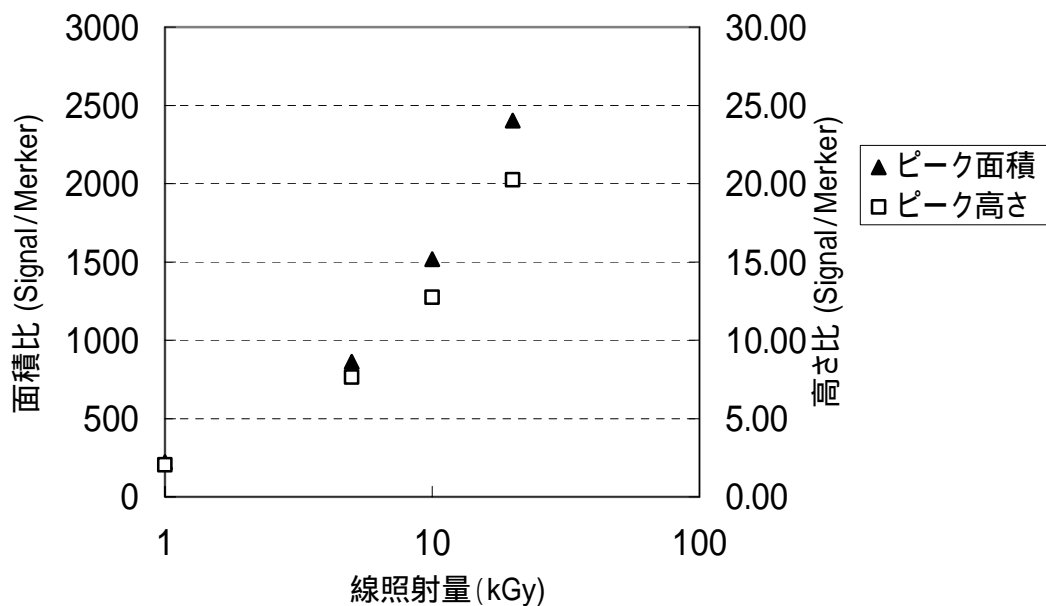


図 4.3.12\_3 図 4.3.12\_2 の横軸を対数スケールとしたもの

## 4.4 線源の違いによるラジカル種の比較

### 4.4.1 概要

ガンマ線照射、X線照射によって安定で十分観測が可能なラジカルを生成する炭酸カルシウム(特級)、硫酸カルシウム無水物、硫酸カルシウム2水和物について、異なる線源(Co60ガンマ線、X線)で試料に照射を行い、観測されるESR信号との関係を調査した。

### 4.4.2 実験方法

使用した装置や試料は前節と同じで実施した。

X線照射は医療用X線照射装置(150kV, 20mA, 5Gy/min)を用い、照射時間を調整して照射線量とした。

### 4.4.3 結果と考察

炭酸カルシウム(図4.4.1)、硫酸カルシウム無水物(図4.4.2)、硫酸カルシウム2水和物(図4.4.3)についてX線1~100Gy、ガンマ線1~20kGyの照射で生成するラジカル種から観測されるESR信号、およびその信号ピーク高さ、ピーク面積をプロットしたものを図示した。委託先および利用できる実験機器の関係でX線は100Gyまで、ガンマ線は1kGy以上と線量に大きな差がある実験となったが、両方で観測される信号に違いは認められなかった。ピーク高さ、面積と照射量のプロットからは両軸とも対数軸なので、かなり漠然とした評価しかできないが、連続性が認められることから、顕著な違いはないと思われる。今後は線量が同じとなるような実験系を確保する必要がある。



図 4.4.1\_1 炭酸カルシウム（高純度試薬）に X 線を 10 Gy 線を 10 kGy 照射した試料について測定して得られた ESR スペクトル

ESR 条件: 9.27GHz, Field  $330 \pm 5$ mT, Mod.  $20 \mu\text{T}$  (100kHz), Time Const. 0.03sec, Sweep Time 4min,  $\text{Mn}^{2+}$  外部標準マーカを挿入



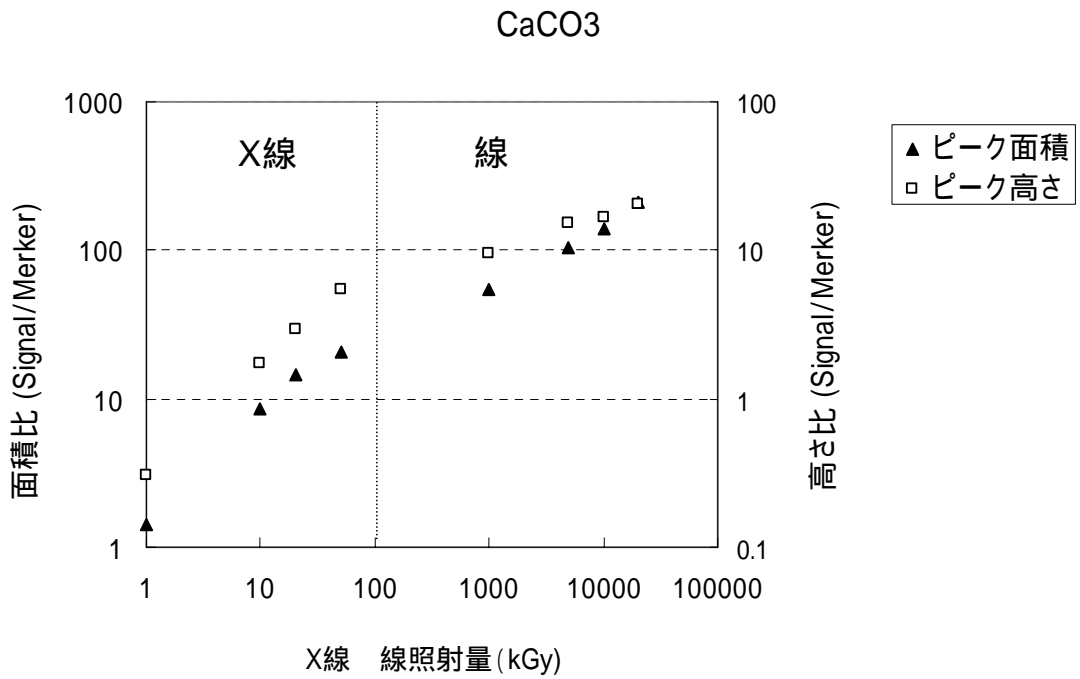


図 4.4.1\_2 炭酸カルシウム（高純度試薬）に X 線， $\gamma$  線を照射した試料について測定して得られた ESR スペクトルからピーク強度、面積を算出してプロットしたものの

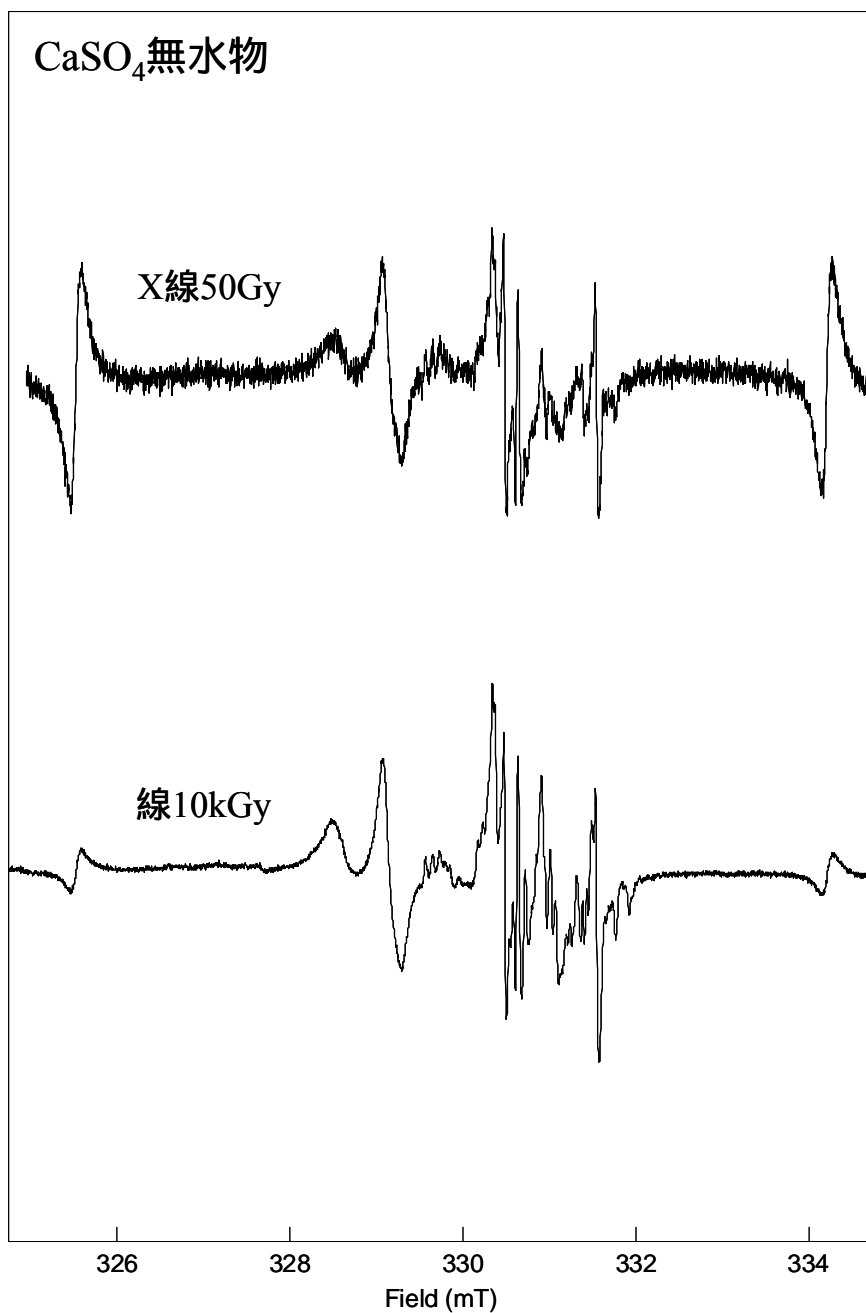


図 4.4.2\_1 硫酸カルシウム無水物に X 線を 50 Gy 線を 10 kGy 照射した試料について測定して得られた ESR スペクトル

ESR 条件: 9.27GHz, Field  $330 \pm 5$ mT, Mod.  $20 \mu$ T (100kHz), Time Const. 0.03sec, Sweep Time 4min,  $Mn^{2+}$  外部標準マーカを挿入

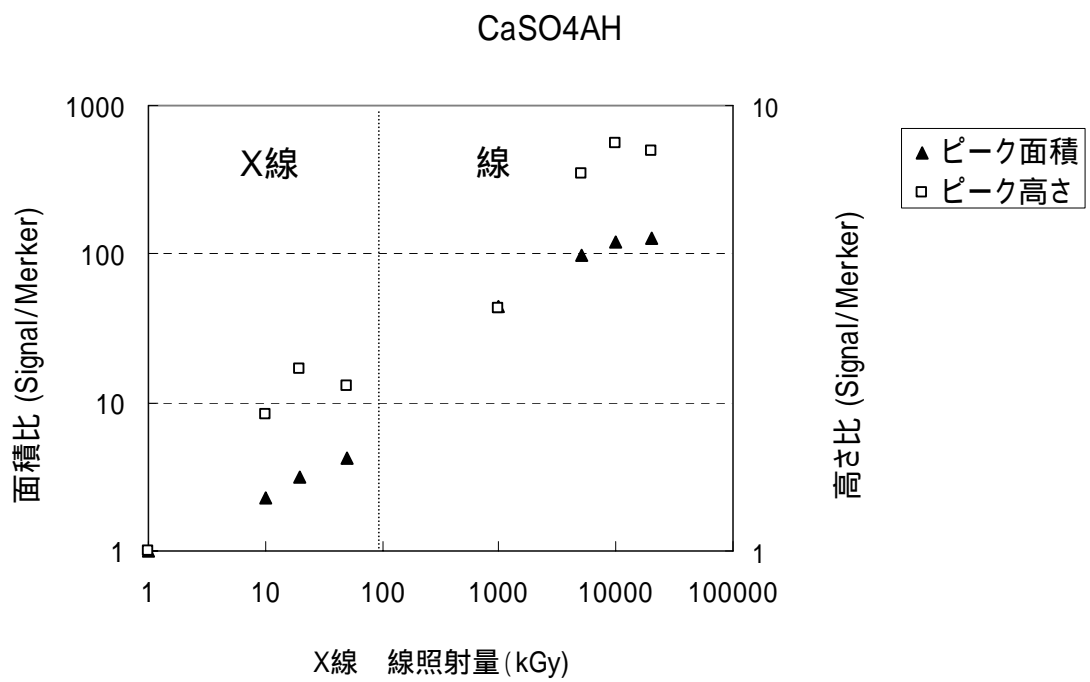


図 4.4.2\_2 硫酸カルシウム無水物に X 線, 線を照射した試料について測定して得られた ESR スペクトルからピーク強度、面積を算出してプロットしたもの

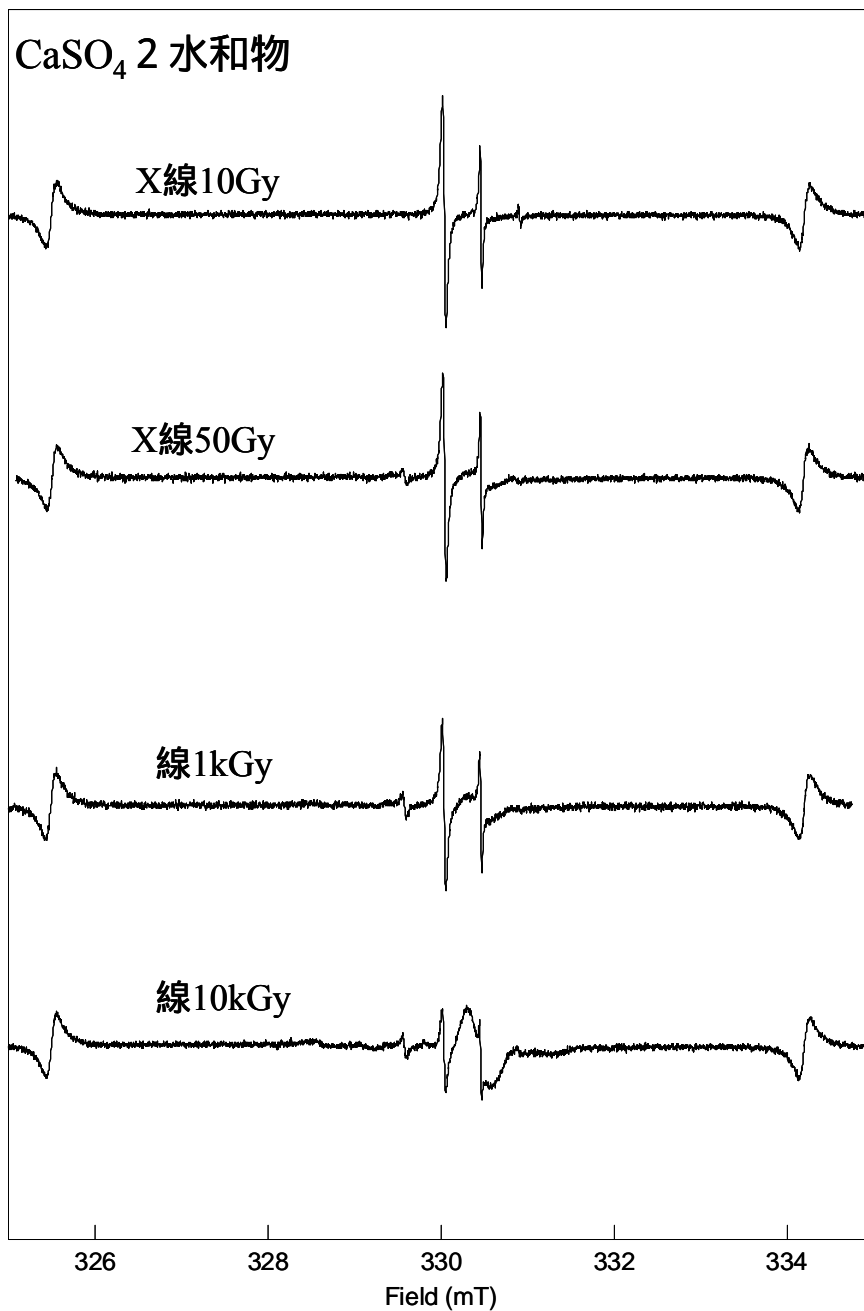


図 4.4.3\_1 硫酸カルシウム 2 水和物 (ナカライテスク社製) に X 線を 10 Gy, 50 Gy 線を 1 kGy, 10 kGy 照射した試料について測定して得られた ESR スペクトル  
ESR 条件: 9.27GHz, Field 330 ± 5mT, Mod. 20 μ T (100kHz), Time Const. 0.03sec, Sweep Time 4min, Mn<sup>2+</sup> 外部標準マーカ-を挿入  
マーカ-強度で信号強度を規格化したもの

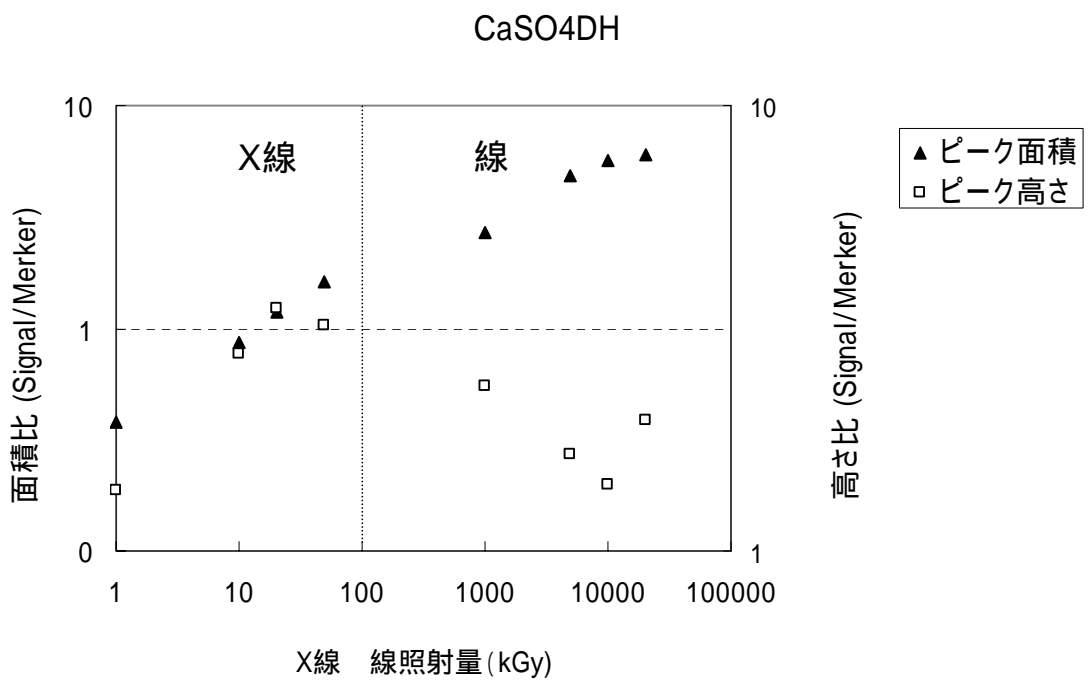


図 4.4.3\_2 硫酸カルシウム 2 水和物 (ナカライテスク社製) に X 線, 線を照射した試料について測定して得られた ESR スペクトルからピーク強度、面積を算出してプロットしたもの

## 4.5 分割照射による積算性の検討

### 4.5.1 概要

ガンマ線照射によって十分観測が可能なラジカルを生成し、比較的高線量でも線量と信号強度の直線性が高い3種のカルシウム塩（炭酸カルシウム（高純度）、硫酸カルシウム無水物、ヒドロキシアパタイト）について、異なる線量で複数回試料にガンマ線照射を行い、観測される ESR 信号と照射線量との関係を調査した。

### 4.5.2 実験方法

使用した装置や試料は前節と同じで実施した。照射の間隔は1週間おきで、1+2+2 kGy（計5 kGy）の場合3週間で実施した。ガンマ線の照射量はアイソトープ協会の照射結果報告書に記載された値に従い、1.4 kGy, 2.8 kGy, 5.7 kGy とした。指定線量よりいずれも多いが、ほぼ等間隔となっており、今回の実験・考察には影響しない。

### 4.5.3 結果と考察

いずれの試料でも、追加照射によって信号の増強は認められるが、ばらつきが大きい。2 kGy 1回照射と1 kGy の2回照射は比較的一致しているが、5 kGy の1回照射と1+2+2 kGy の3回照射では違いが大きいものが多い。また1+2 kGy 照射と2+1 kGy 照射でも異なる。ピーク高さが一致しても、面積が一致しないなど理解できない部分も多い。信号としては新たなものが観測されるなどといったことはない。試料の部位（照射試料量5 gのうち測定に使用する量は100 mg）によるばらつきや同一試料の測定によるばらつきよりも、はるかに大きな変動となっており、今回用いた試料では積算性は低い可能性が高い。しかしその理由について見当がつかず大きな課題を残した。

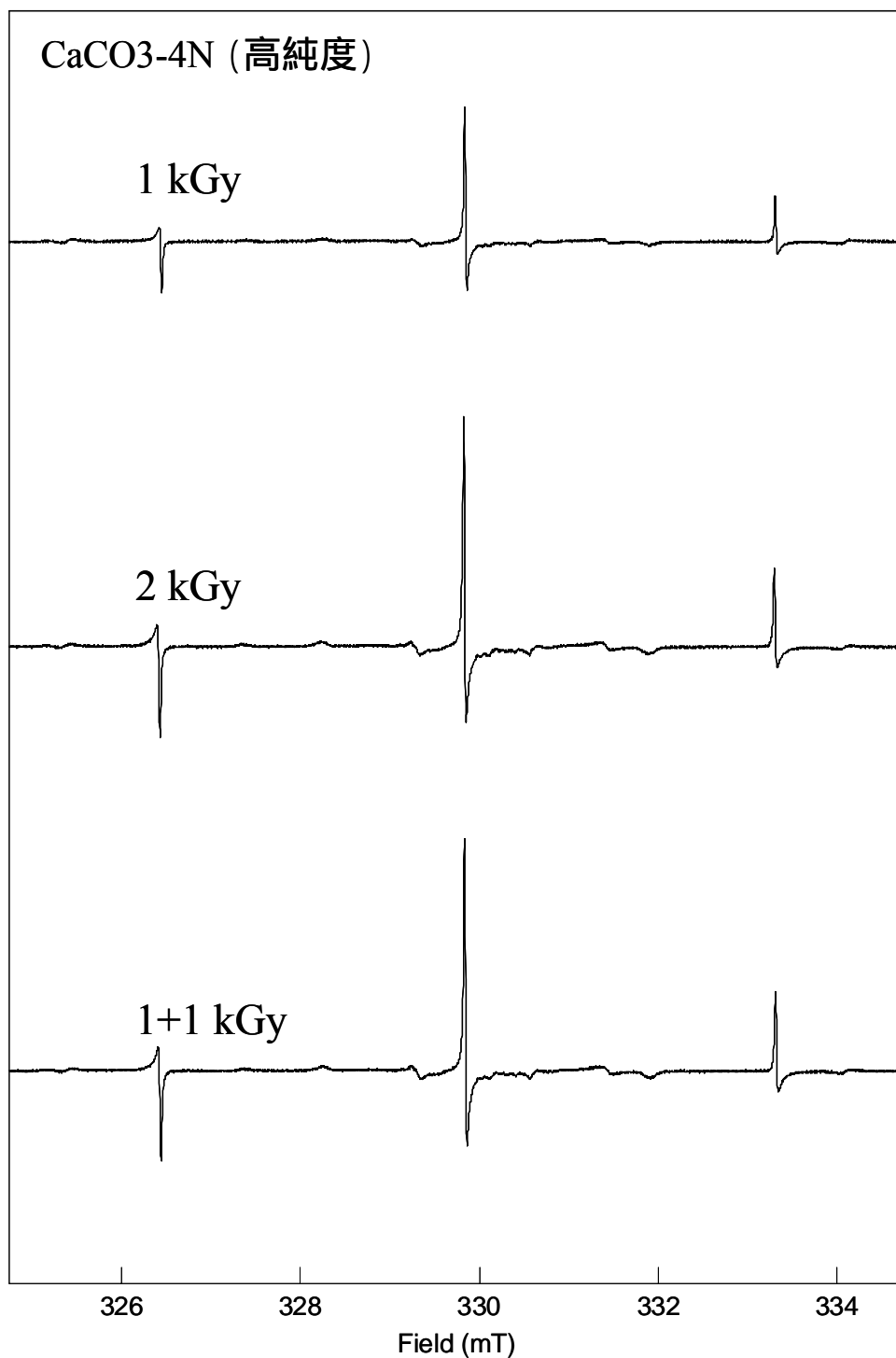


図 4.5.1\_1 炭酸カルシウム (高純度試薬) に 線を 1 kGy, 2 kGy, 1 kGy を 2 回 (1 週間間隔で 2 回) 照射した試料について測定して得られた ESR スペクトル

ESR 条件: 9.27GHz, Field 330 ± 5mT, Mod. 20 μT (100kHz), Time Const. 0.03sec, Sweep Time 4min, Mn<sup>2+</sup> 外部標準マーカを挿入  
マーカ強度で信号強度を規格化したもの

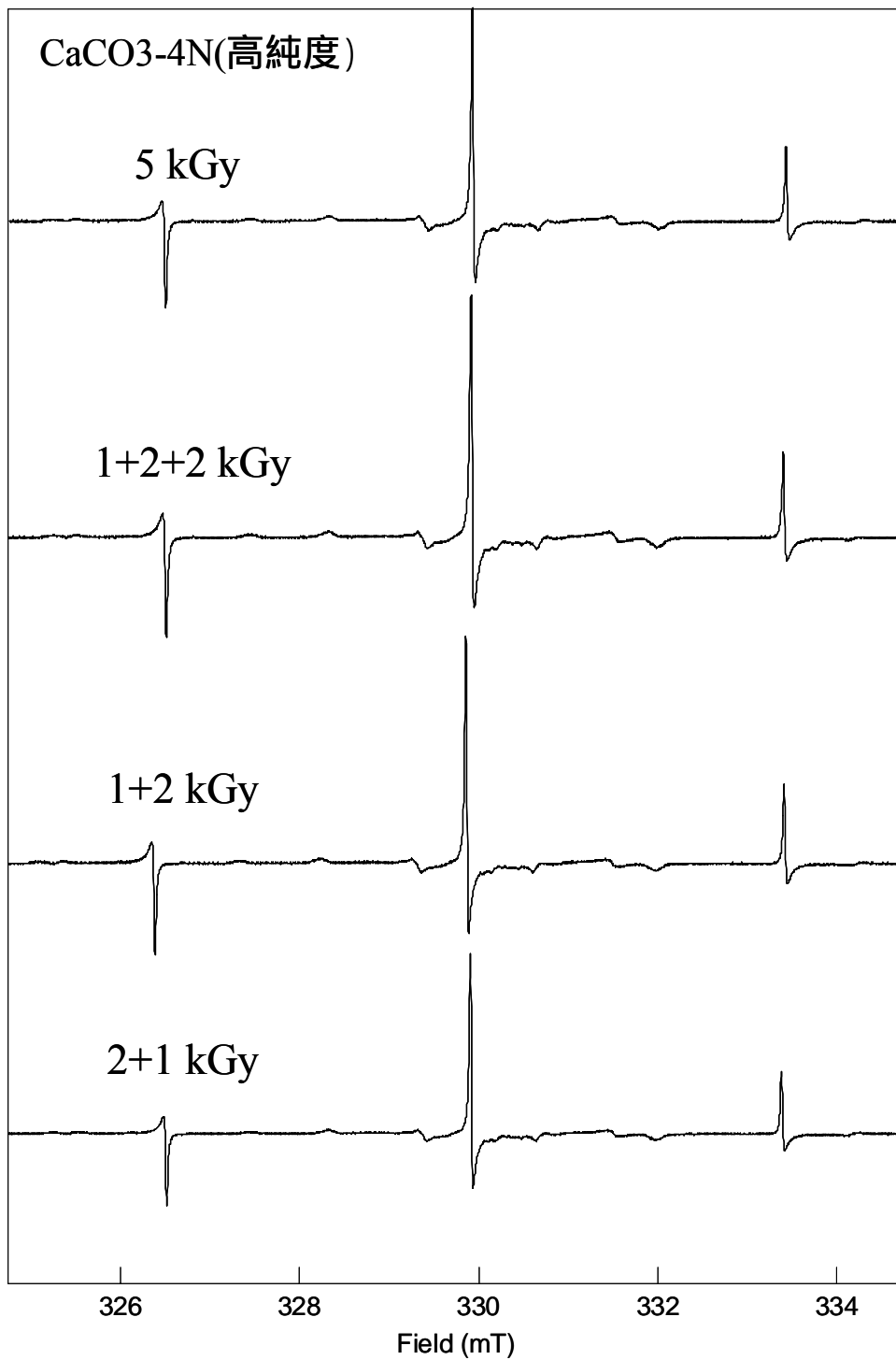


図 4.5.1\_2 炭酸カルシウム（高純度試薬）に 線を 5 kGy, 1 kGy+2 kGy + 2 kGy, 1 kGy + 2kGy , 2 kGy + 1 kGy 照射した試料について測定して得られた ESR スペクトル  
 ESR 条件: 9.27GHz, Field 330±5mT, Mod. 20 μT (100kHz), Time Const.0.03sec, Sweep Time 4min, Mn<sup>2+</sup> 外部標準マーカを挿入  
 マーカー強度で信号強度を規格化したもの



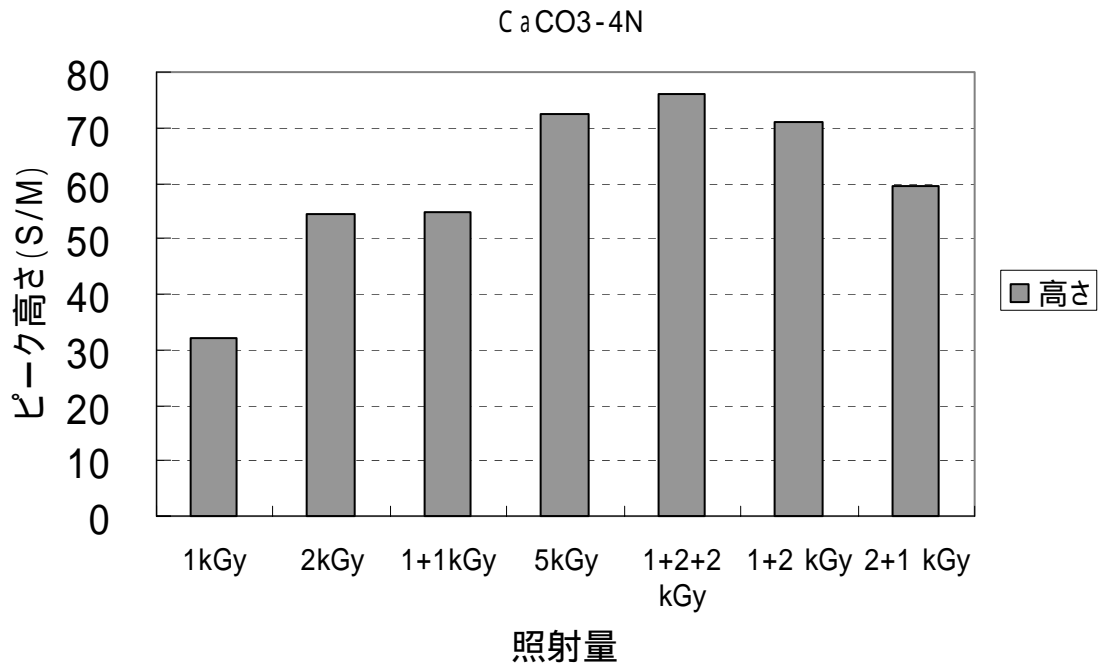


図 4.5.1\_3 図 4.5.1\_1~2 について照射量と信号高さ (信号/マーカ-比) でグラフ化したもの

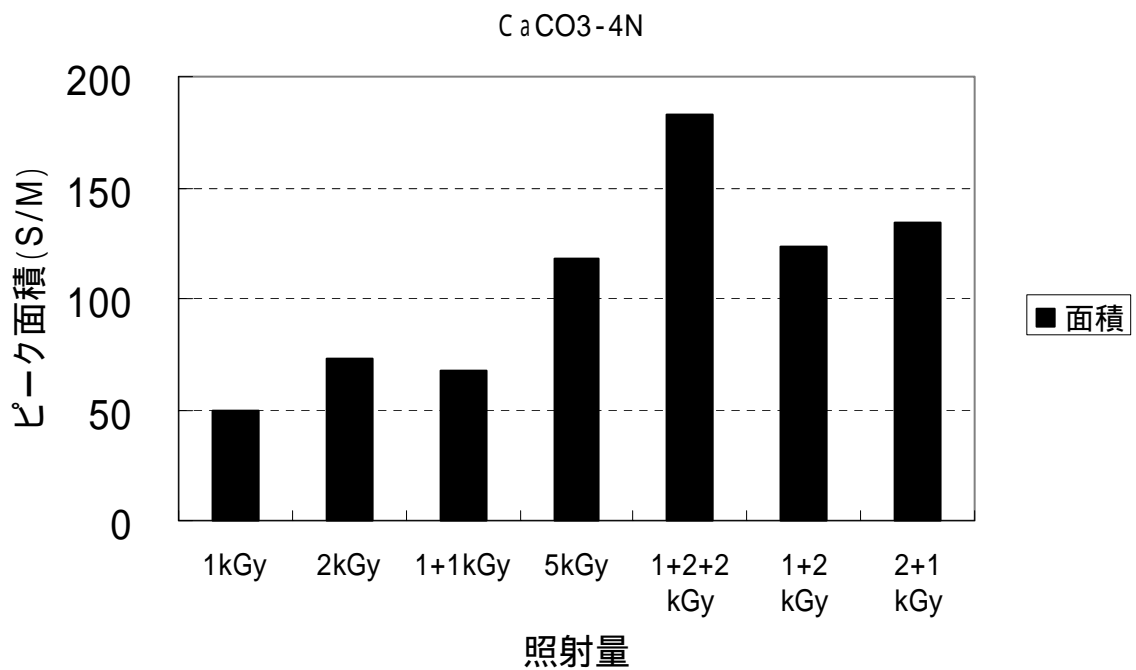


図 4.5.1\_4 図 4.5.1\_1~2 について照射量と信号面積 (信号/マーカ-比) でグラフ化したもの

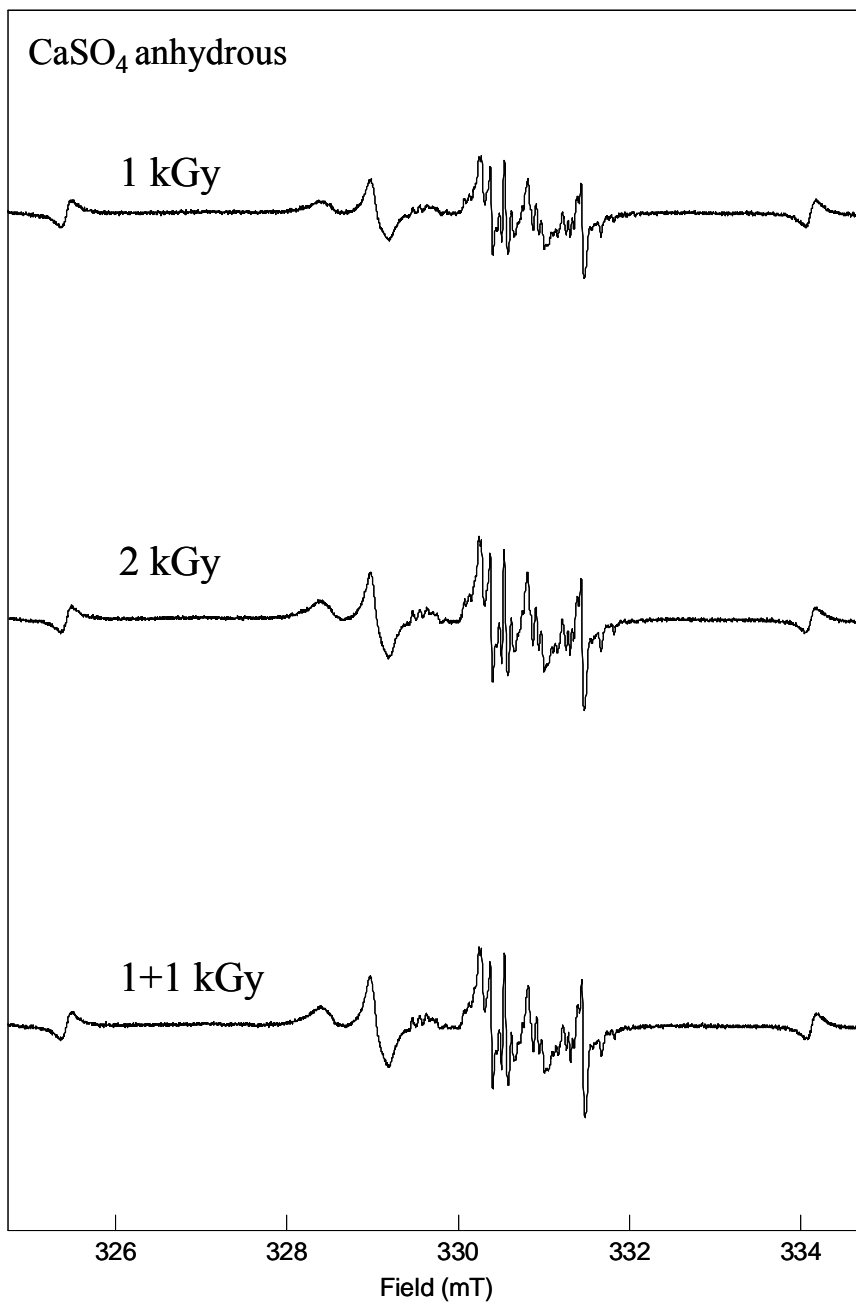


図 4.5.2\_1 硫酸カルシウム無水物に 線を 1 kGy, 2 kGy, 1 kGy を 2 回 ( 1 週間間隔で 2 回 ) 照射した試料について測定して得られた ESR スペクトル  
ESR 条件: 9.27GHz, Field  $330 \pm 5$ mT, Mod.  $20 \mu\text{T}$  (100kHz), Time Const. 0.03sec, Sweep Time 4min,  $\text{Mn}^{2+}$  外部標準マーカを挿入  
マーカー強度で信号強度を規格化したもの

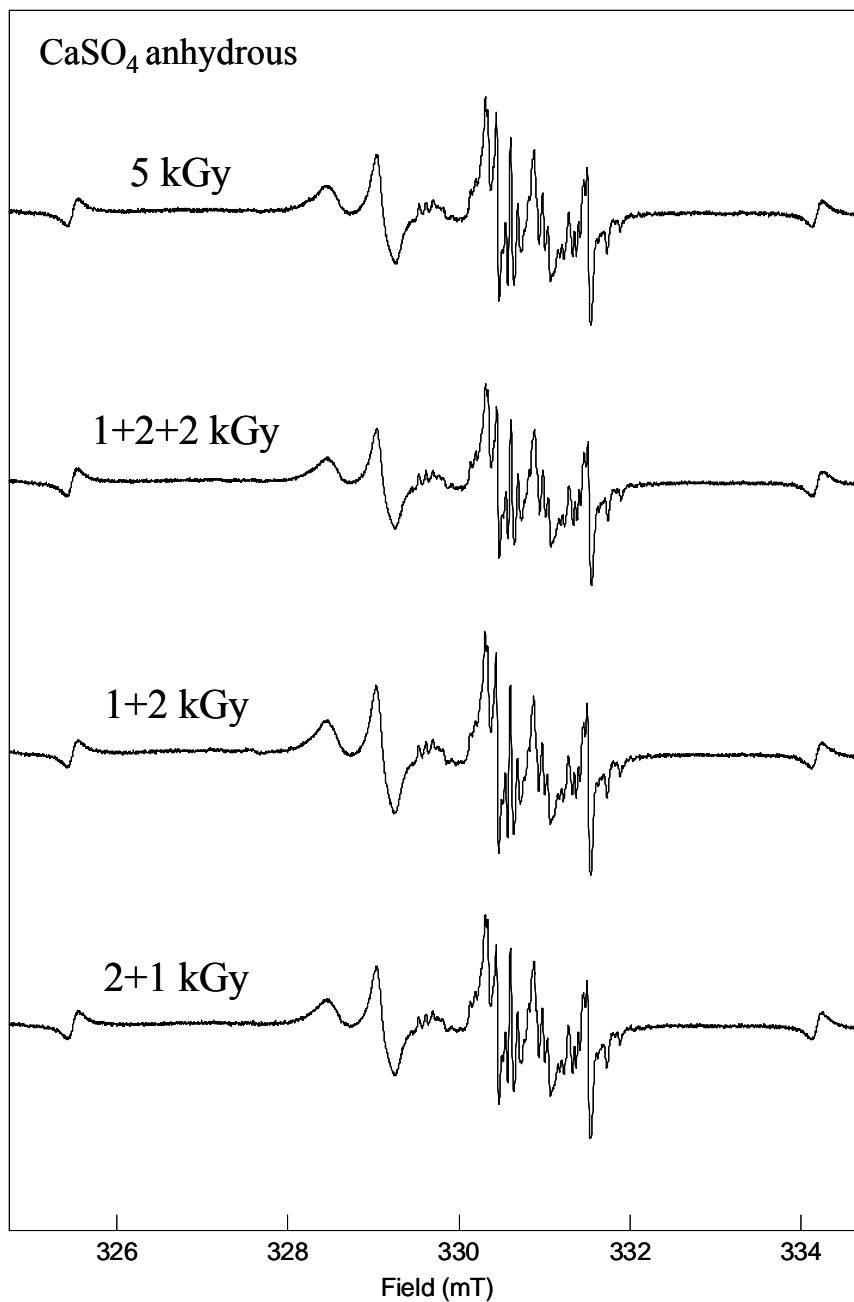


図 4.5.2\_2 硫酸カルシウム無水物に 線を 5 kGy, 1 kGy+2 kGy + 2 kGy, 1 kGy + 2kGy , 2 kGy + 1 kGy 照射した試料について測定して得られた ESR スペクトル  
 ESR 条件: 9.27GHz, Field  $330 \pm 5$ mT, Mod.  $20 \mu$ T (100kHz), Time Const. 0.03sec, Sweep Time 4min,  $\text{Mn}^{2+}$  外部標準マーカを挿入  
 マーカー強度で信号強度を規格化したもの

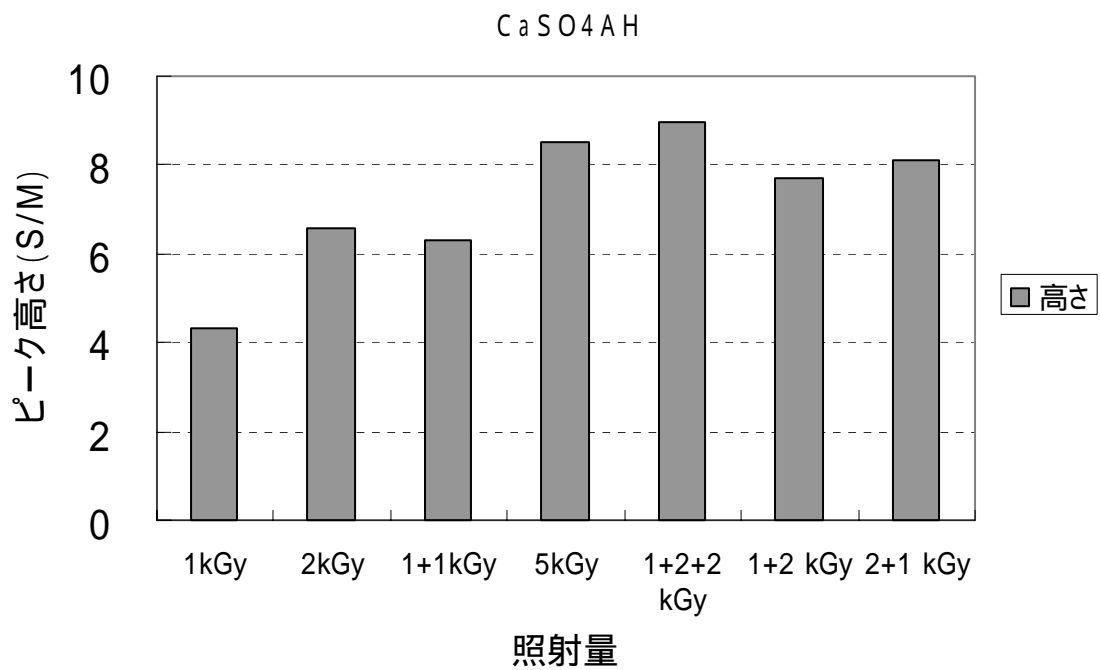


図 4.5.2\_3 図 4.5.2\_1~2 について照射量と信号高さ (信号/マーカー比) でグラフ化したもの

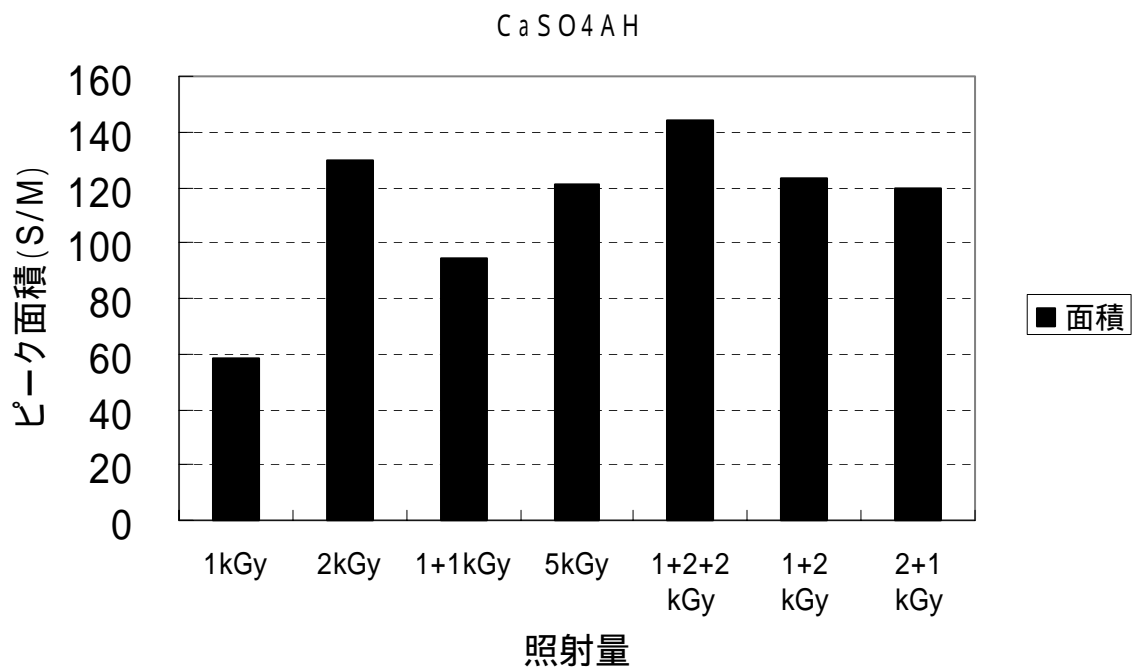


図 4.5.2\_4 図 4.5.2\_1~2 について照射量と信号面積 (信号/マーカー比) でグ

ラフ化したもの

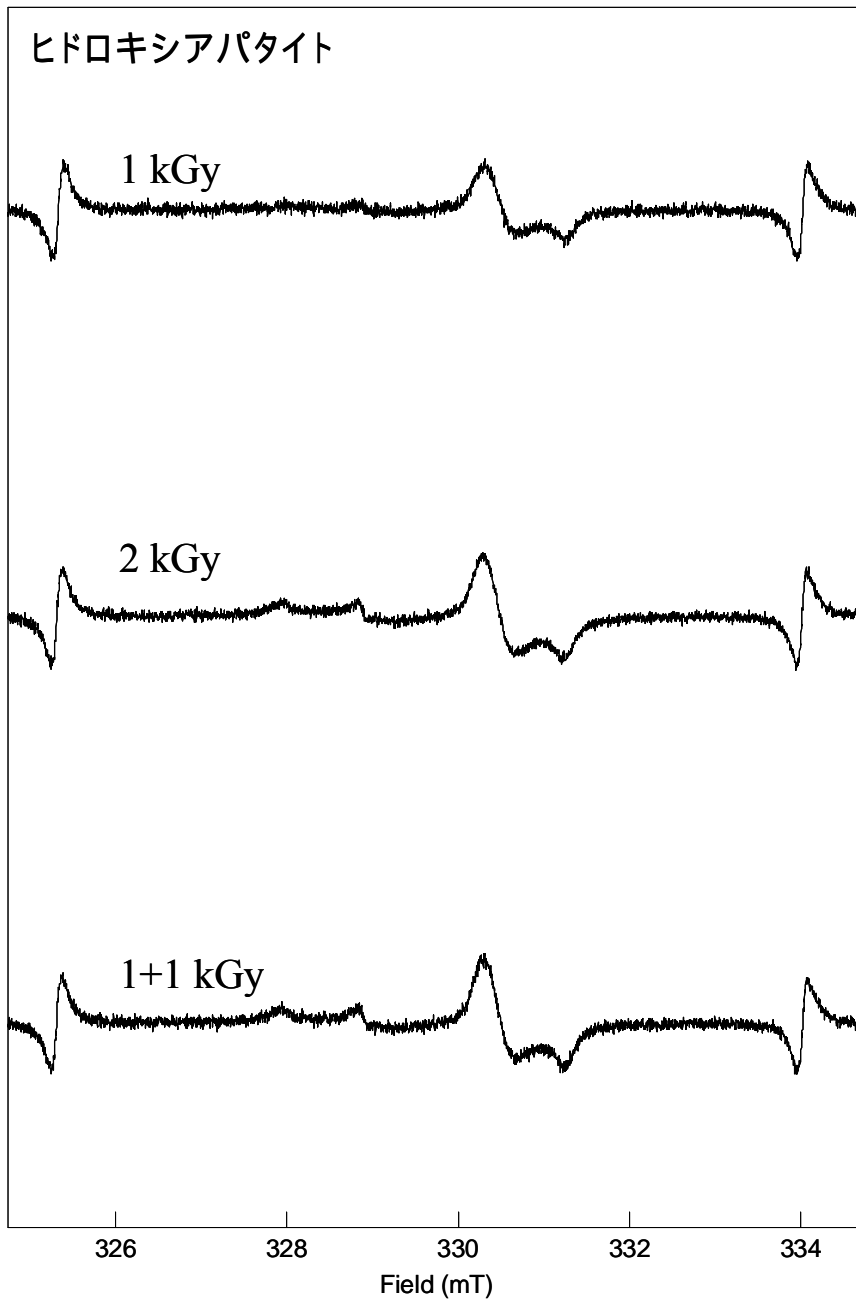


図 4.5.3\_1 ヒドロキシアパタイト粉末に 線を 1 kGy, 2 kGy, 1 kGy を 2 回 ( 1 週間間隔で 2 回 ) 照射した試料について測定して得られた ESR スペクトル  
ESR 条件: 9.27GHz, Field 330 ± 5mT, Mod. 20 μT (100kHz), Time Const. 0.03sec, Sweep Time 4min, Mn<sup>2+</sup> 外部標準マーカを挿入  
マーカ強度で信号強度を規格化したもの

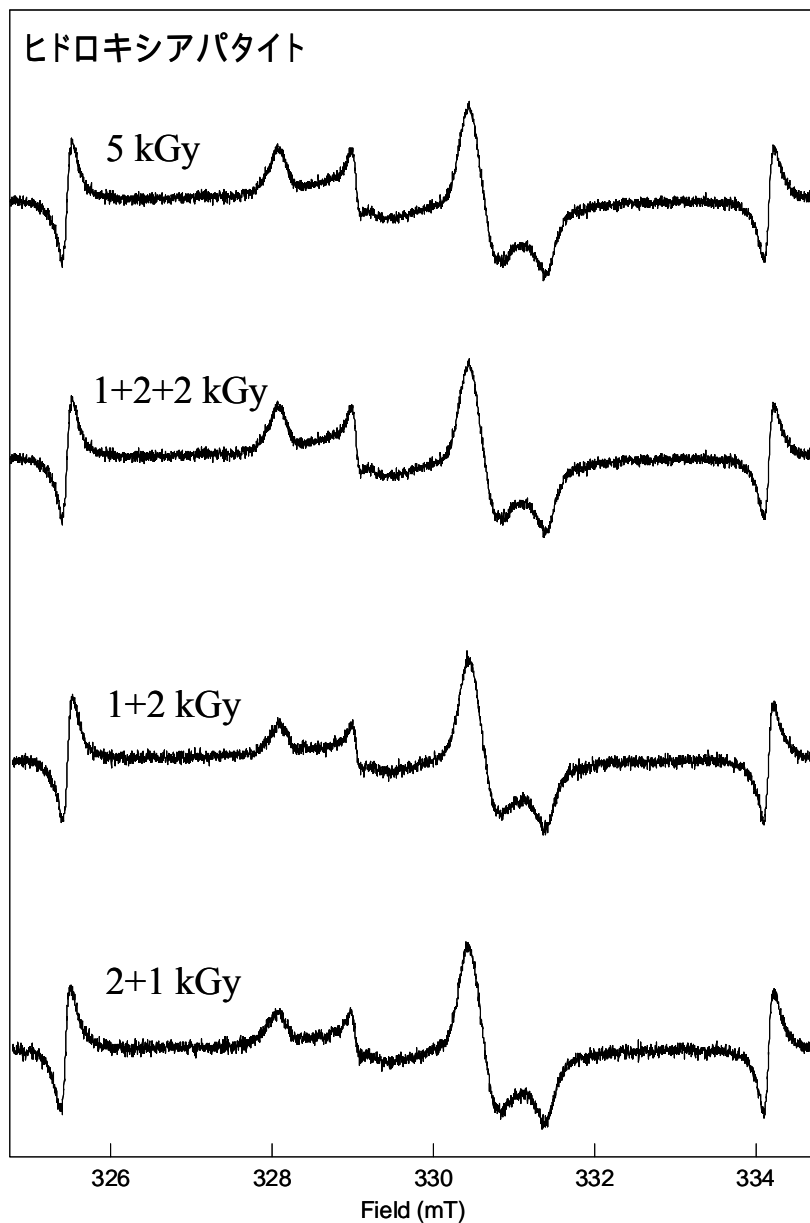


図 4.5.3\_2 ヒドロキシアパタイト粉末に 線を 5 kGy, 1 kGy+2 kGy + 2 kGy, 1 kGy + 2kGy , 2 kGy + 1 kGy 照射した試料について測定して得られた ESR スペクトル

ESR 条件: 9.27GHz, Field 330 ± 5mT, Mod. 20 μT (100kHz), Time Const. 0.03sec, Sweep Time 4min, Mn<sup>2+</sup> 外部標準マーカを挿入  
 マーカー強度で信号強度を規格化したもの

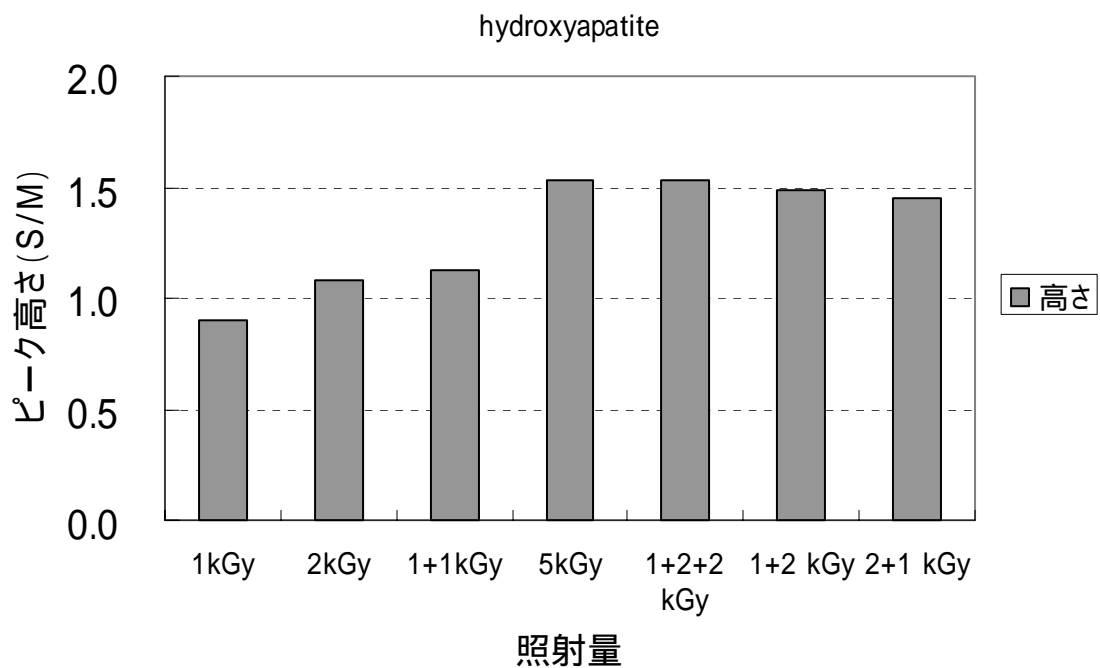


図 4.5.3\_3 図 4.5.3\_1~2 について照射量と信号高さ (信号/マーカ-比) でグラフ化したもの

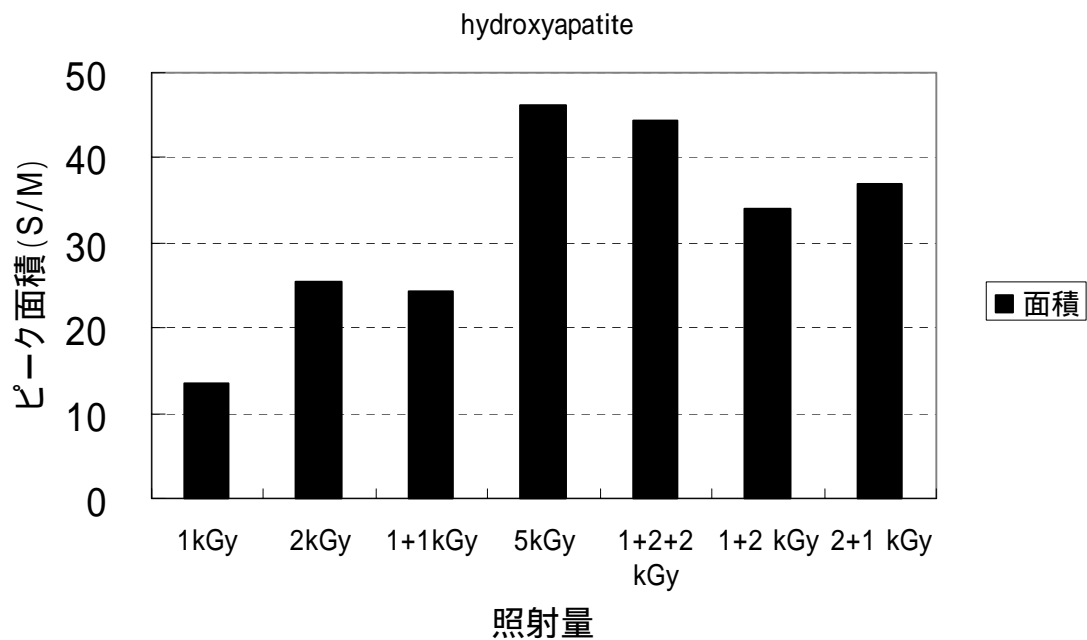


図 4.5.1\_4 図 4.5.1\_1~2 について照射量と信号面積 (信号/マーカ-比) でグラフ化したもの



## 4.6 ガンマ線照射で生じるラジカル種の生体分子への影響調査

### 4.6.1 概要

前々節においてガンマ線照射によって大量のラジカルを生成し、比較的水溶性の高いカルシウム塩（炭酸カルシウム（高純度）、硫酸カルシウム 2 水和物（ナカライ製）、硫酸カルシウム無水物、グルコン酸カルシウム）について、水や有機物と接触することで反応性の高いラジカルが遊離しないかを検討し、生体分子への影響を調査した。

### 4.6.2 実験方法

使用した装置やガンマ線照射試料は前節と同じものを使用した。ガンマ線の照射量は 22 kGy のものを使用した。

短寿命ラジカルの捕捉であるスピントラッピング法に使用した試薬は DMP0 (5,5-dimethyl-1-pyrroline-N-oxide), PBN(alpha-phenyl-tert-butyl nitron) を使用し、それぞれラボテック社、ラジカルリサーチ社から専用試薬を購入して使用した。

水溶液の測定には石英製扁平セルを使用した。

イオンクロマトグラフ分析にはイオンクロマトグラフ (IC) 分析は同様の装置に検出器として電気伝導度計 CM-8020 を追加して使用した。カラムには東ソー製 TSKgel IC-Anion-PWXL(4.6mm×3.5cm) を使用した。イオンクロマトグラフ分析の溶離液には東ソー製 TSKeluent IC をそのまま使用した。

### 4.6.3 結果と考察

大量照射による成分変化について検討するため、炭酸カルシウム、硫酸カルシウムのガンマ線照射試料を水に溶解し、イオンクロマトグラフ分析を行った。グルコン酸カルシウムは今回用いた装置で保持・検出できなかった。標準試料の分離結果を図 4.6.1 に、炭酸カルシウムの未照射試料と 20 kGy 照射試料について分析を行った結果を図 4.6.2 に示した。照射の有無で変化は無く、陰イオンでは炭酸イオンのみが検出された。同様に硫酸カルシウム無水物（図 4.6.3）、硫酸カルシウム 2 水和物（図 4.6.4）に関しても分析を実施したが、いずれも変化は認められなかった。現段階では ESR 信号を与えているラジカル種は断定できないが、炭酸ラジカルや硫酸ラジカルだとすると、水に溶解することで電子が戻り、もと

のイオン種に戻っていると思われる。

この場合でも、何らかの分子から電子のやり取りが行われているはずである。ガンマ線で生成したラジカル同士の再結合であれば、新たな反応はないが、水から電子を奪うもしくは与える場合は、反応性の高いヒドロキシルラジカルか水素原子が生じる。空気中の酸素や窒素であってもそれぞれのラジカルが生成するはずである。これらの発生の有無を検討するため、スピントラッピング-ESR 法を行った。スピントラッピング-ESR 法は短寿命で検出困難なラジカル種を安定な反磁性化合物に捕捉させ、安定なラジカルに変換してこれを ESR で測定することで元のラジカル種の定量・定性を行うものである（図 4.6.5）。今回は酸素ラジカルの捕捉に優れる DMPO と PBN を用いて実験した。

図 4.6.6\_1 に照射した炭酸カルシウムをスピントラップ剤無しでエタノール、水に溶解させて測定したスペクトルを示した。溶解により強い信号がほとんど消えている。若干見られる信号もろ過によって失われることから、懸濁している粉末に由来すると考えられ、水溶液にすることでラジカルは失われている。図 4.6.6\_2 にスピントラップ剤の DMPO, PBN を添加して測定した結果を示したが、新たな信号は観測されなかった。しかし、同様の実験を硫酸カルシウム無水物（図 4.6.7）でおこなったところ、DMPO の添加で 4 本線の信号が現れた。これは解析の結果 DMPO にヒドロキシルラジカルが付加した DMPO-OH の信号と同定された。グルコン酸カルシウム（図 4.6.8）では強い信号が観測され、同定の結果スーパーオキシドアニオンラジカルの付加体であることが判った。これはそれぞれ水の電離や酸素の還元が起きていることが示された。

これらのラジカルは活性酸素種でラジカル種の中でも、最も生体に関連が深く（図 4.6.9）作用が強い。ガンマ線照射物が水に触れて活性酸素を生じるという結果は、生体影響という点で非常に大きな意味を持つ。

サンプル名 : STD IV  
サンプル波長 (nm) : A: 200.1 B: 230.1 C: 260.1 D: 320  
リファレンス波長 (nm) :  
計算方法 : 百分率法  
検出率 : 1.000  
換算係数 : 1.000  
収集開始時間 (分) : 0.0  
収集終了時間 (分) : 30.0  
収集間隔 (msec) : 500  
収集波長上限 (nm) : 400  
収集波長下限 (nm) : 200  
平均化点数 : 1

<9070754>

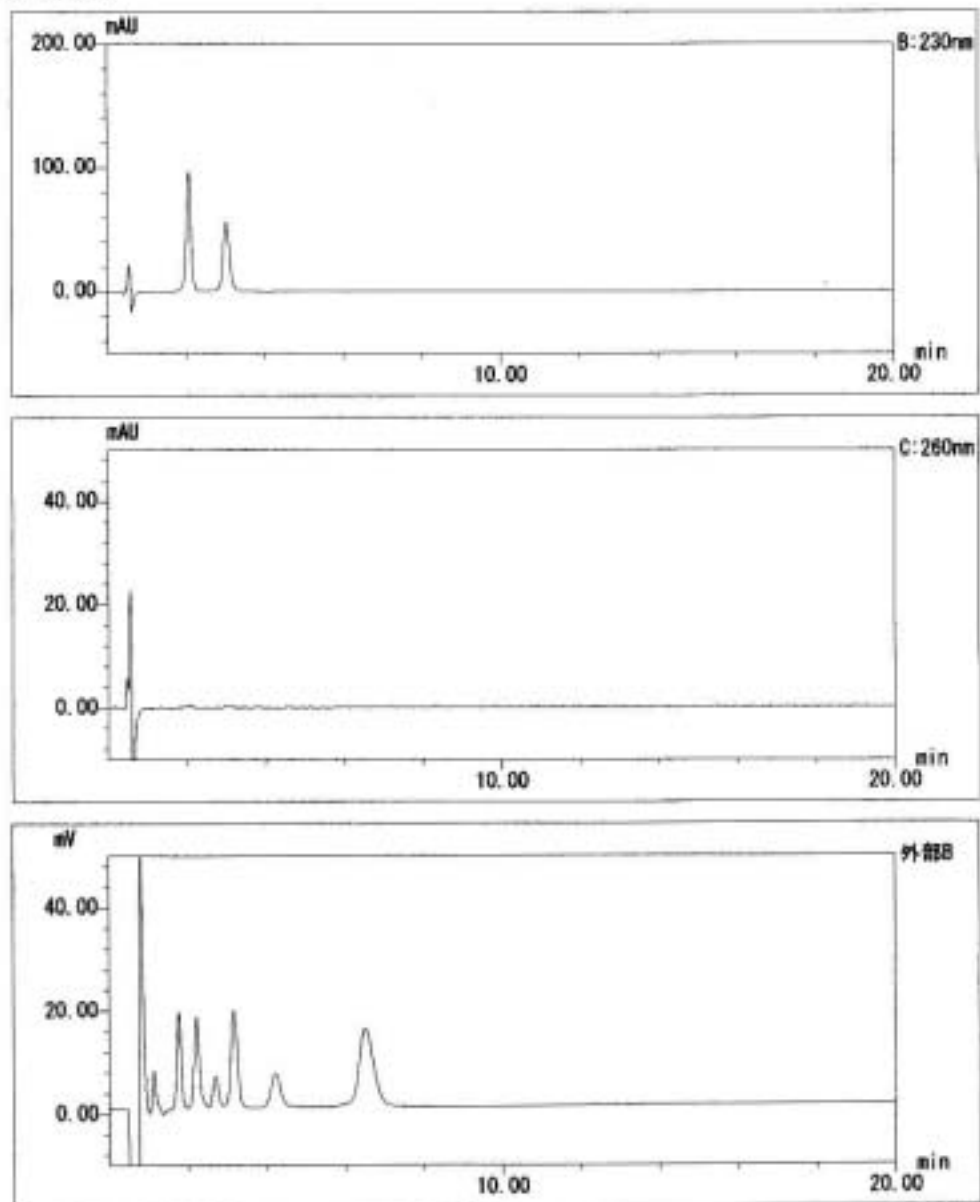


図 4.6.1 標準試料 ( $F^-$ ,  $Cl^-$ ,  $NO_2^-$ ,  $Br^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $PO_4^{3-}$ ,  $SO_4^{2-}$ を含む; 溶出順) のイオンクロマトグラフ

サンプル名 : CaCO<sub>3</sub>-4N 100mg/L  
サンプル波長 (nm) : A: 230,1 B: 260,1 外部B  
ワット波長 (nm) :

計算方法 : 百分率法  
希釈率 : 1.000  
換算係数 : 1.000

収集開始時間 (分) : 0.0  
収集終了時間 (分) : 30.0  
収集間隔 (msec) : 500  
収集波長上限 (nm) : 400  
収集波長下限 (nm) : 200  
平均化点数 : 1

<グラフ 34>

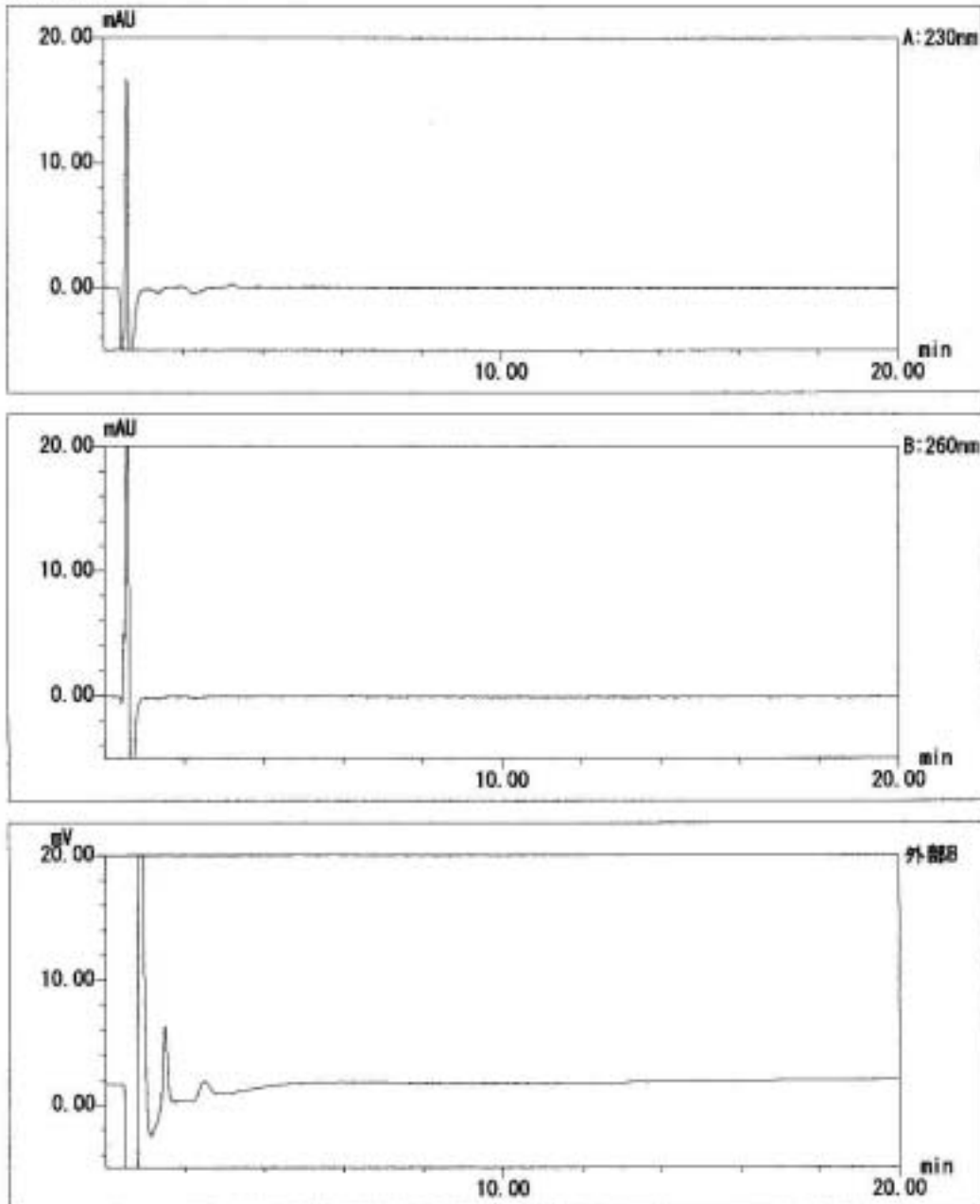


図 4.6.2\_1 炭酸カルシウム (高純度試薬 ; 非照射) のイオンクロマトグラフ

サンプル名 : CaCO<sub>3</sub>-4N 20kGy  
サンプル波長 (nm) : A: 230, 1 B: 260, 1 外部B  
リファレンス波長 (nm) :

計算方法 : 百分率法  
希釈率 : 1.000  
換算係数 : 1.000

収集開始時間 (分) : 0.0  
収集終了時間 (分) : 30.0  
収集間隔 (msec) : 500  
収集波長上限 (nm) : 400  
収集波長下限 (nm) : 200  
平均化点数 : 1

<クロマトグラム>

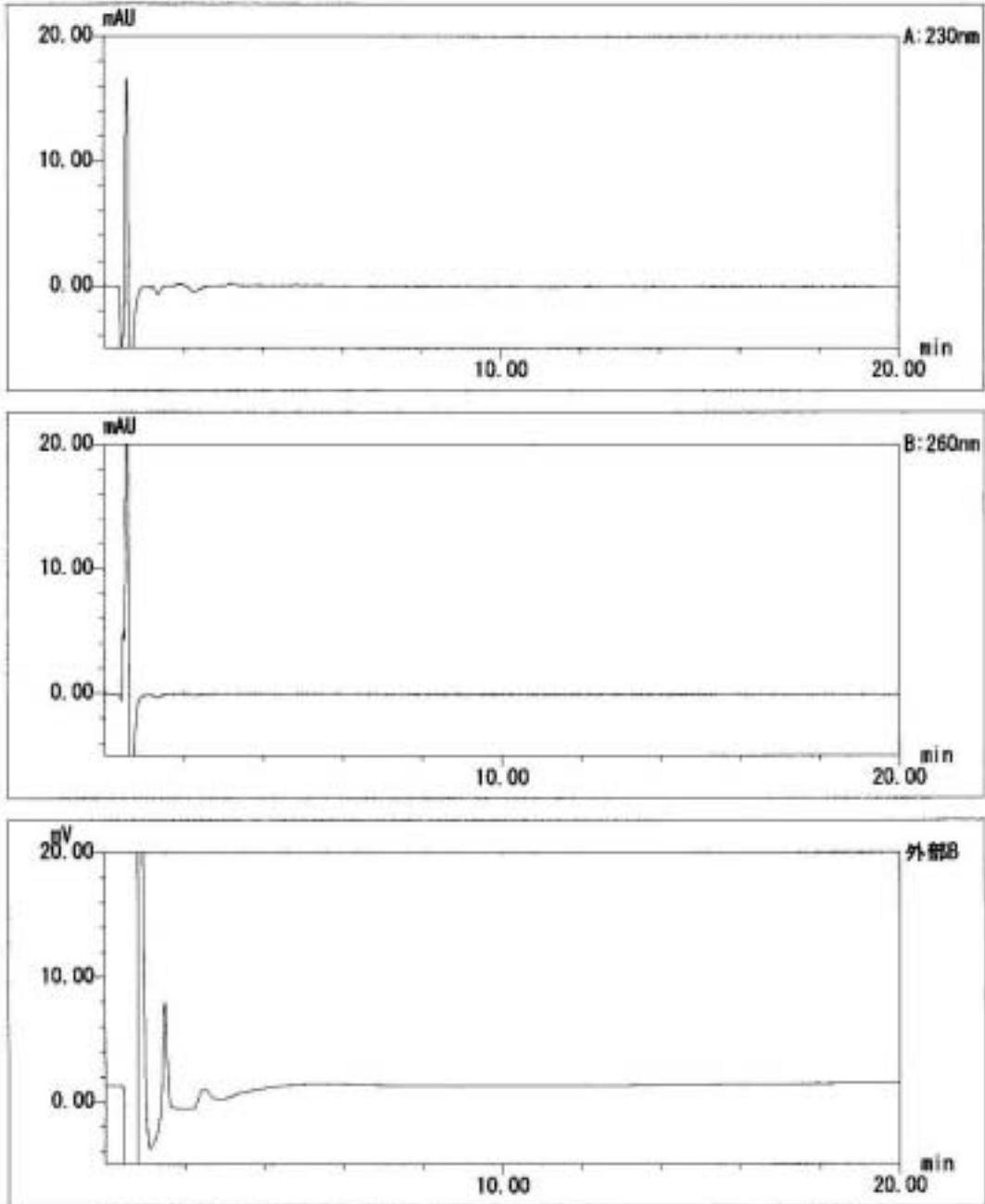


図 4.6.2\_2 炭酸カルシウム (高純度試薬 ; 20 kGy 照射) のイオンクロマトグラフ

サンプル名 : CaSO4AH 100mg/L  
サンプル波長 (nm) : A: 230.1 B: 260.1 外部B  
リファレンス波長 (nm) :

計算方法 : 百分率法  
希釈率 : 1.000  
換算係数 : 1.000

収集開始時間 (分) : 0.0  
収集終了時間 (分) : 30.0  
収集間隔 (msec) : 500  
収集波長上限 (nm) : 400  
収集波長下限 (nm) : 200  
平均化点数 : 1

<クロマトグラム>

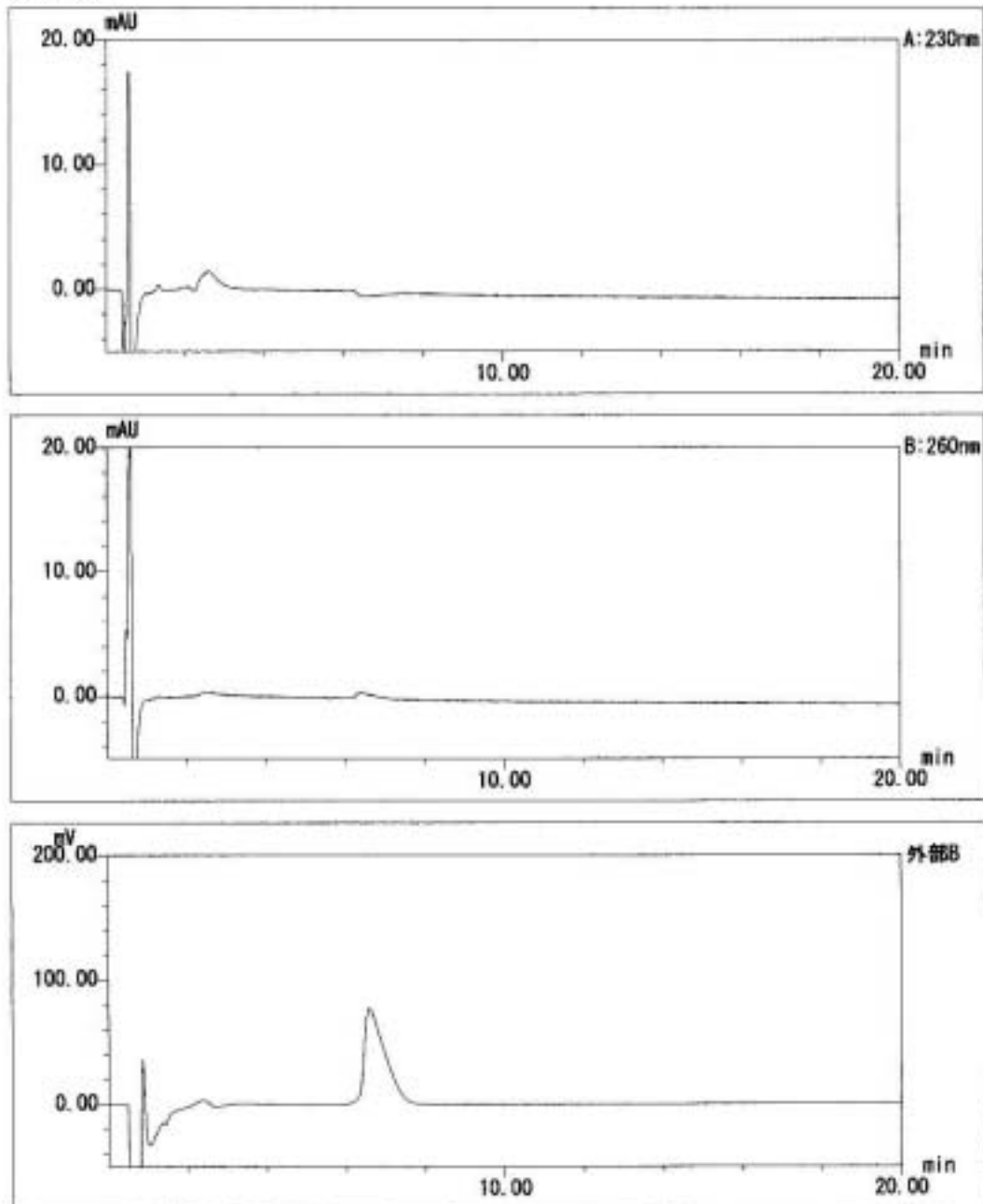


図 4.6.3\_1 硫酸カルシウム無水物 (非照射) のイオンクロマトグラフ

サンプル名 : CaSO4AH-20kGy  
サンプル波長 (nm) : A: 230.1 B: 260.1 外部B  
リファレンス波長 (nm) :

計算方法 : 百分率法  
希釈率 : 1.000  
換算係数 : 1.000

収集開始時間 (分) : 0.0  
収集終了時間 (分) : 30.0  
収集間隔 (msec) : 500  
収集波長上端 (nm) : 400  
収集波長下端 (nm) : 200  
平均化点数 : 1

<クロマトグラム>

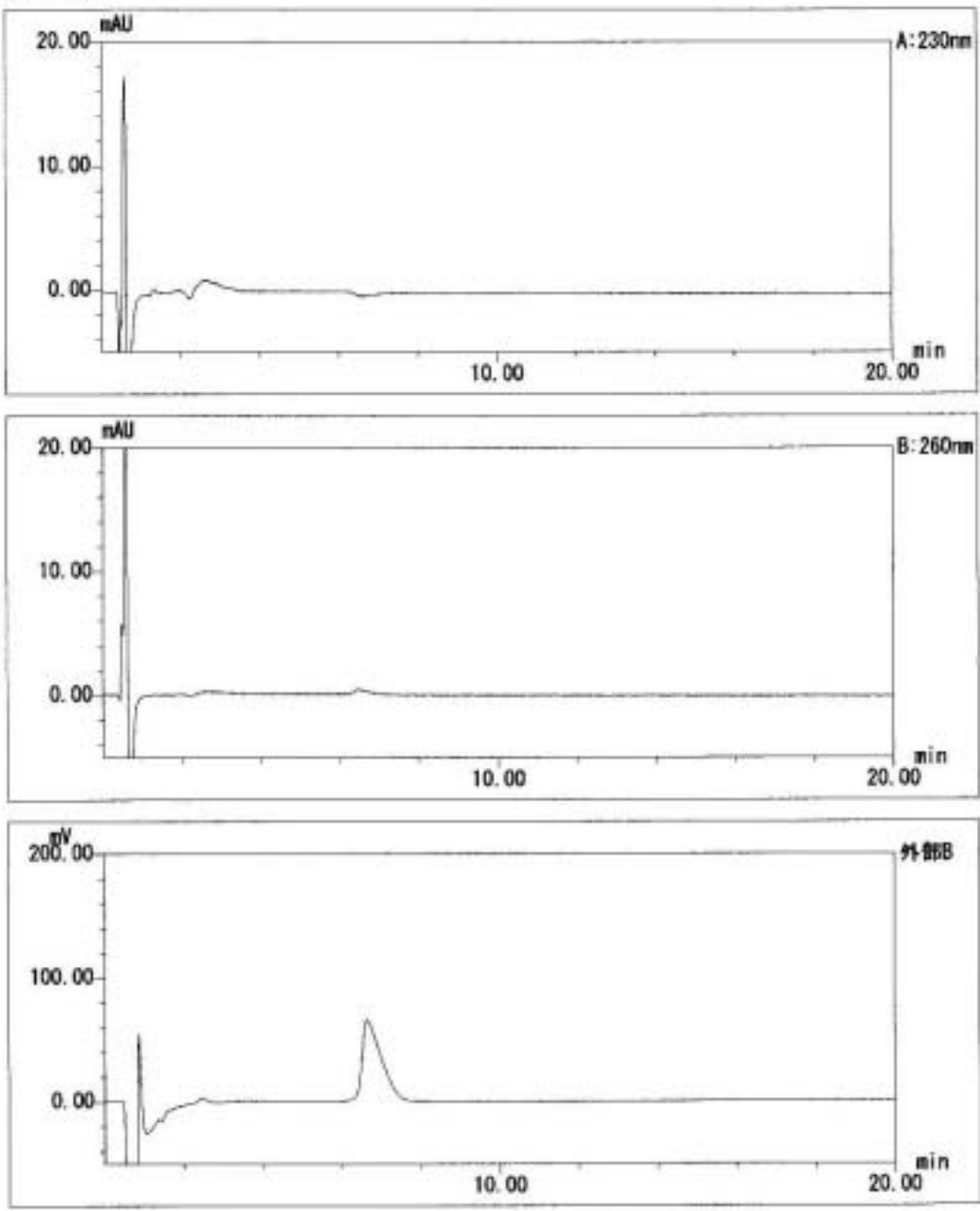


図 4.6.3\_2 硫酸カルシウム無水物 (20 kGy) のイオンクロマトグラフ

サンプル名 : CaSO<sub>4</sub>H 100mg/L  
サンプル波長 (nm) : A: 230.1 B: 260.1 外部B  
リファレンス波長 (nm) :

計算方法 : 百分率法  
希釈率 : 1.000  
換算係数 : 1.000

収集開始時間 (分) : 0.0  
収集終了時間 (分) : 30.0  
収集間隔 (msec) : 500  
収集波長上限 (nm) : 400  
収集波長下限 (nm) : 200  
平均化点数 : 1

<データ名>

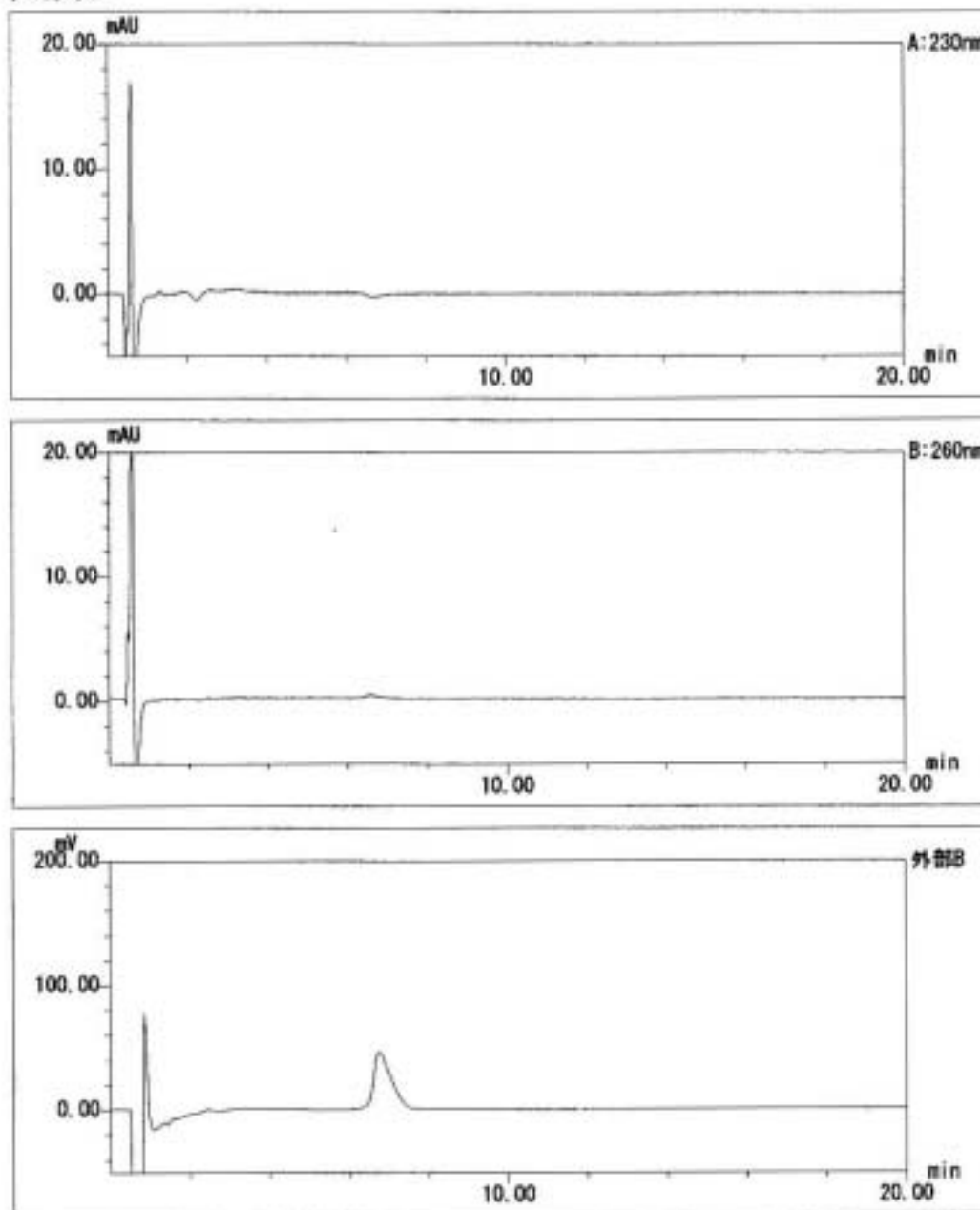


図 4.6.4\_1 硫酸カルシウム 2 水和物 (非照射) のイオンクロマトグラフ



サンプル名 : CaSO4・2H2O-20kGy  
サンプル波長 (nm) : A: 230, 1 B: 260, 1 外部B  
リファレンス波長 (nm) :

計算方法 : 百分率法  
希釈率 : 1.000  
換算係数 : 1.000

収集開始時間 (分) : 0.0  
収集終了時間 (分) : 30.0  
収集間隔 (msec) : 500  
収集波長上限 (nm) : 400  
収集波長下限 (nm) : 200  
平均化点数 : 1

<クロマトグラム>

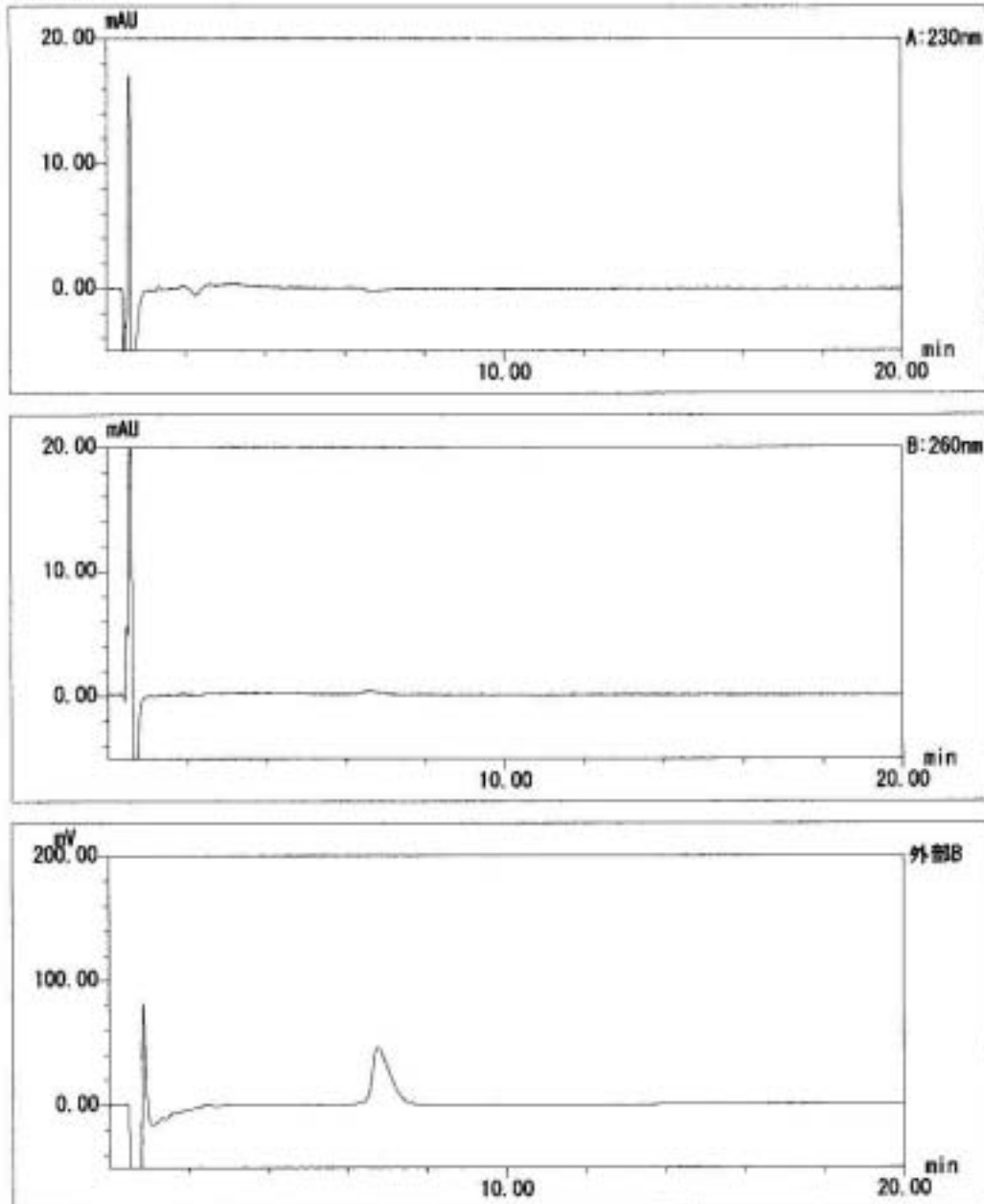


図 4.6.4\_2 硫酸カルシウム 2 水和物 (20 kGy 照射) のイオンクロマトグラフ

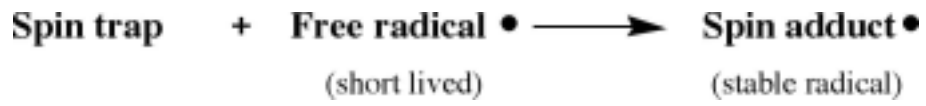


図 4.6.5\_1 スピントラッピング法

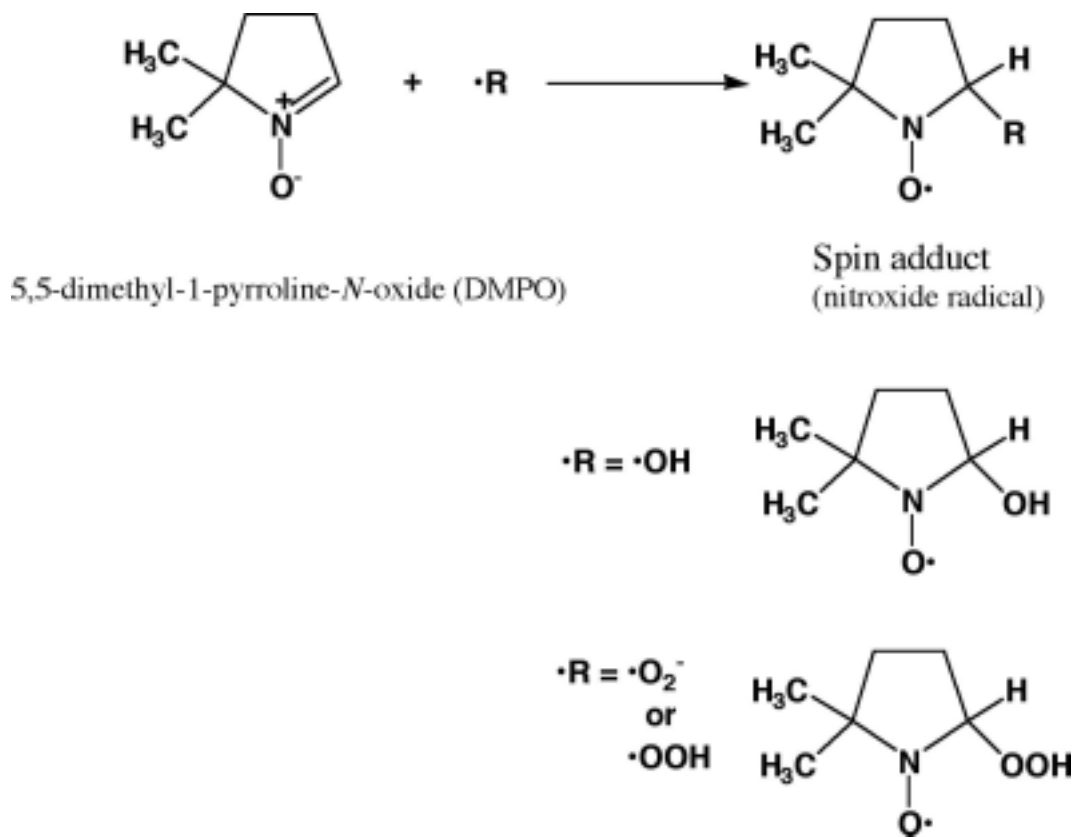


図 4.6.5\_2 DMPO を用いたスピントラッピング法のメカニズム

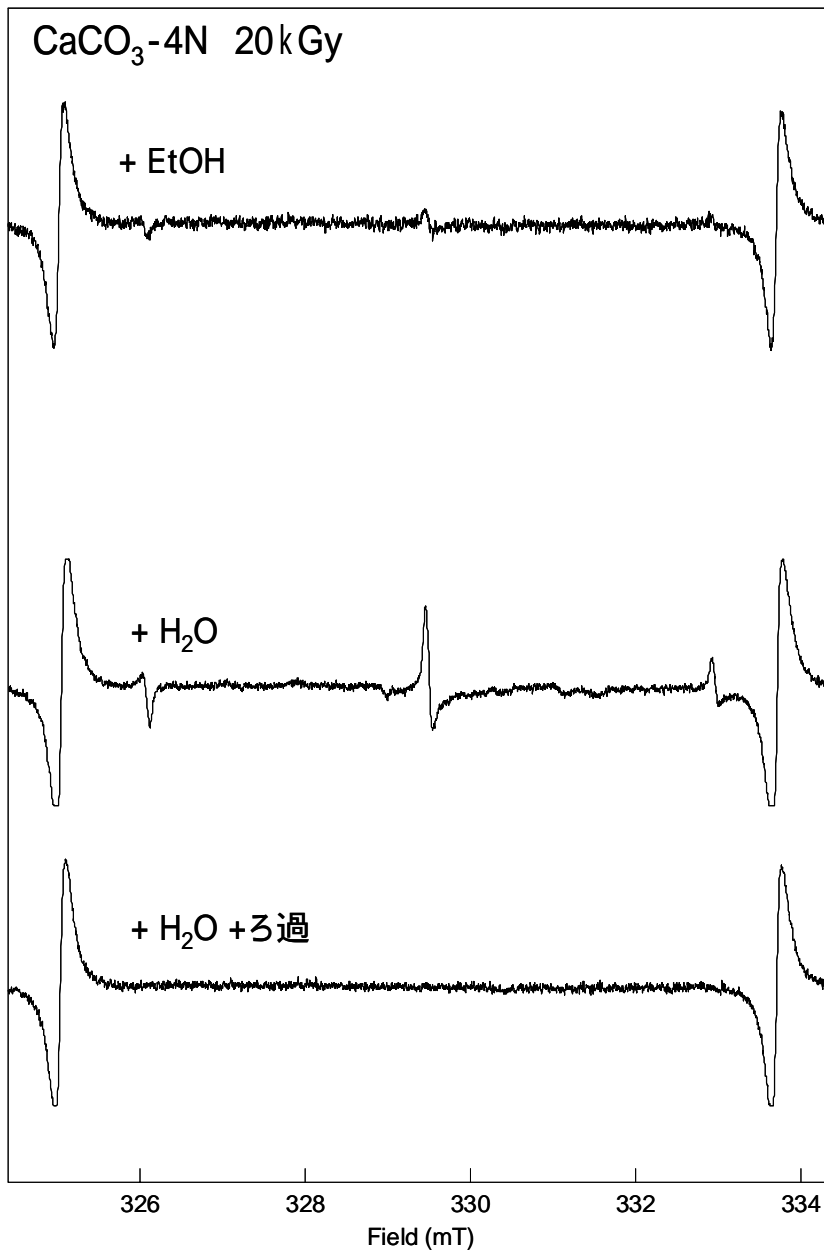


図 4.6.6\_1 線 20 kGy を照射した炭酸カルシウム(高純度試薬)をエタノール、水に溶解させた後に得られる ESR スペクトル

上から 5 mg CaCO<sub>3</sub>/ 1ml エタノール、5 mg CaCO<sub>3</sub>/ 1ml 水、5 mg CaCO<sub>3</sub>/ 1ml 水を 0.22 μm のフィルターでろ過したもの

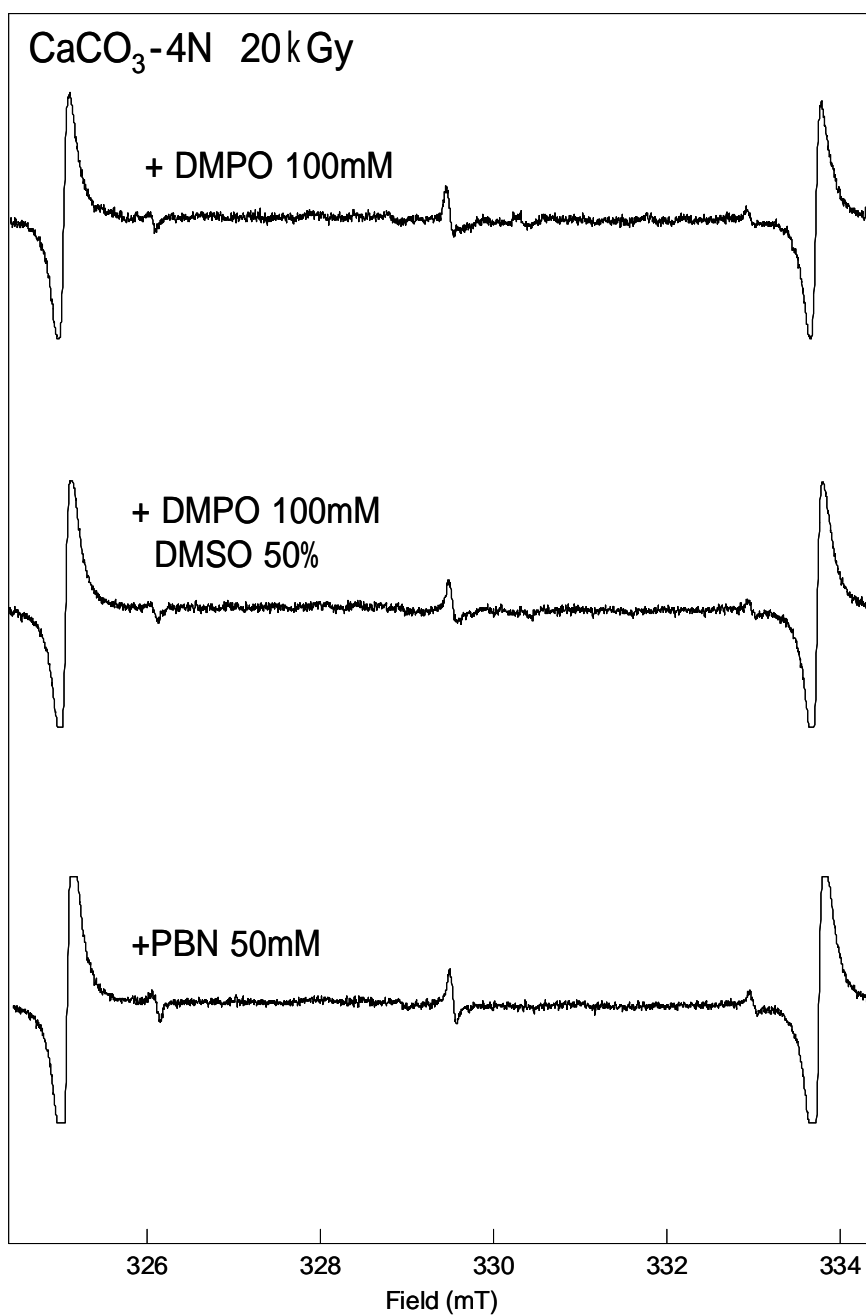


図 4.6.6\_2 線 20 kGy を照射した炭酸カルシウム（高純度試薬）をスピントラッピング試薬を含む水に溶解させたときに得られた ESR スペクトル

上から 5 mg CaCO<sub>3</sub>/100mM DMPO 水溶液 1ml、5 mg CaCO<sub>3</sub>/100mM DMPO を含む 50% DMSO-水溶液 1ml、5 mg CaCO<sub>3</sub>/50mM PBN 水溶液 1ml

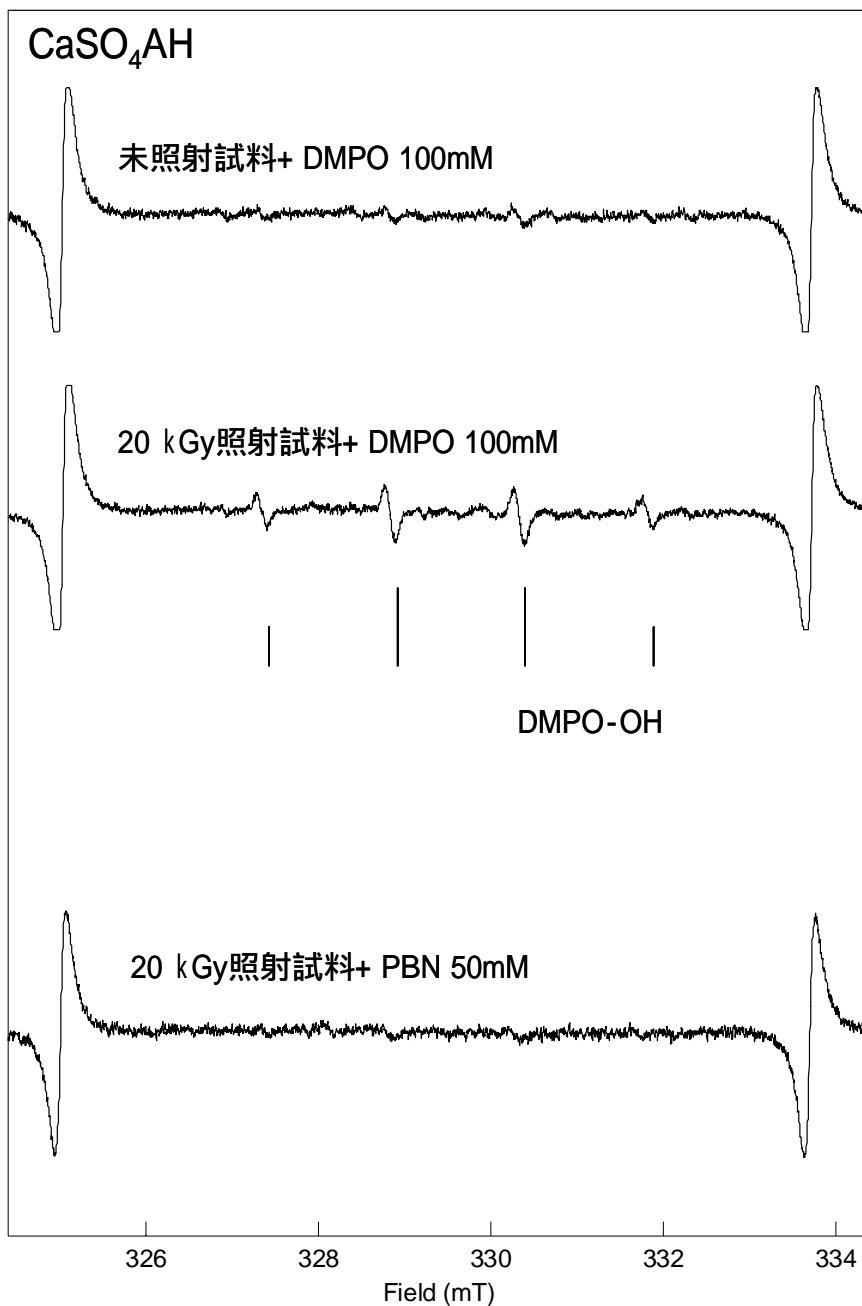


図 4.6.7 線 20 kGy を照射した硫酸カルシウム無水物をスピントラッピング試薬を含む水に溶解させたときに得られた ESR スペクトル

上から 5 mg 未照射 CaSO<sub>4</sub>/ 100mM DMPO 水溶液 1ml、5 mg 照射 CaSO<sub>4</sub>/ 100mM DMPO 水溶液 1ml、5 mg 照射 CaSO<sub>4</sub>/ 50mM PBN 水溶液 1ml

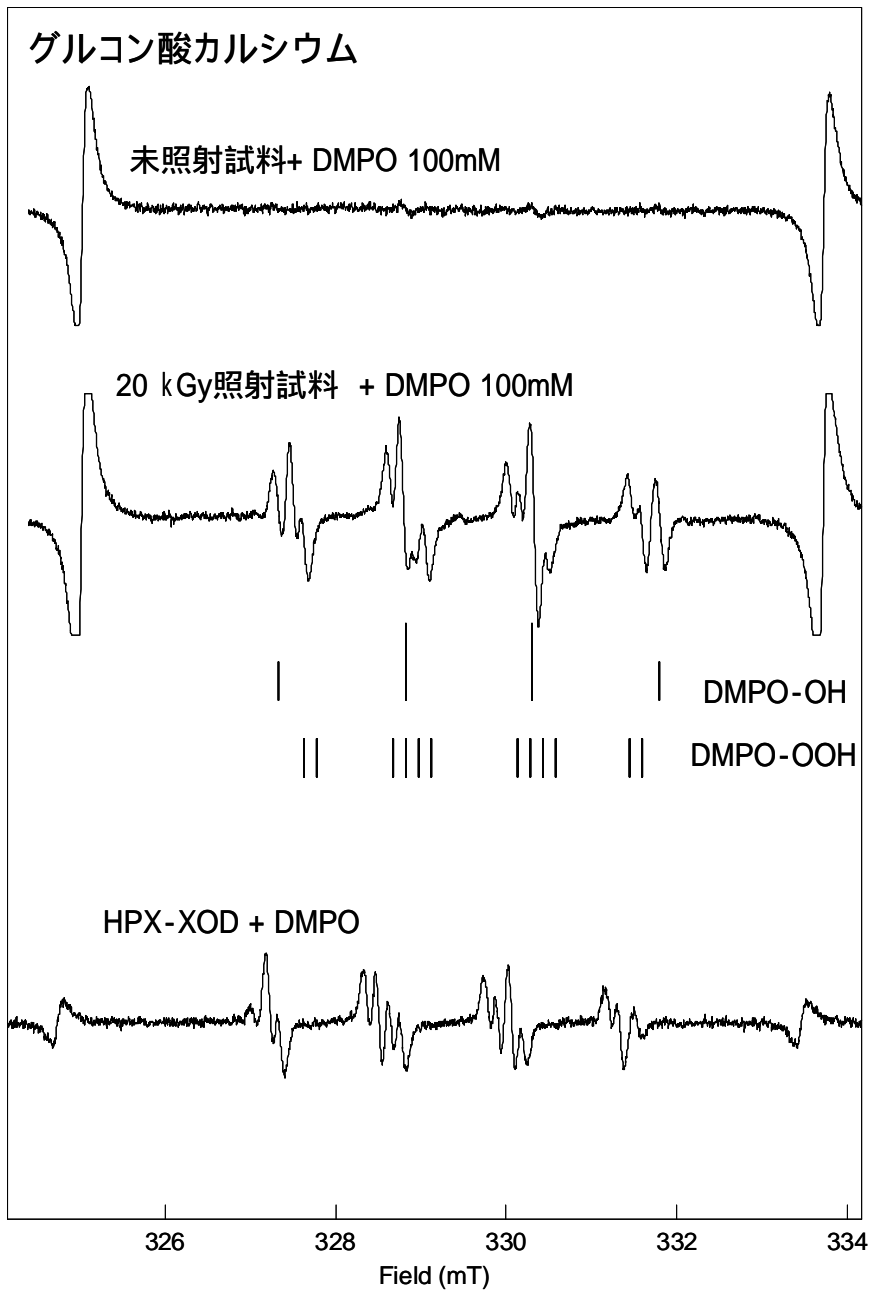


図 4.6.8 線 20 kGy を照射したグルコン酸カルシウムをスピントラッピング試薬を含む水に溶解させたときに得られた ESR スペクトル

上から 5 mg 未照射 GlnCa/ 100mM DMPO 水溶液 1ml、5 mg 照射 GlnCa/ 100mM DMPO 水溶液 1ml、酵素反応（キサンチン - キサンチンオキシダーゼ系）でスーパーオキシドアニオンラジカルを発生させ、DMPO で捕捉した時に得られた信号

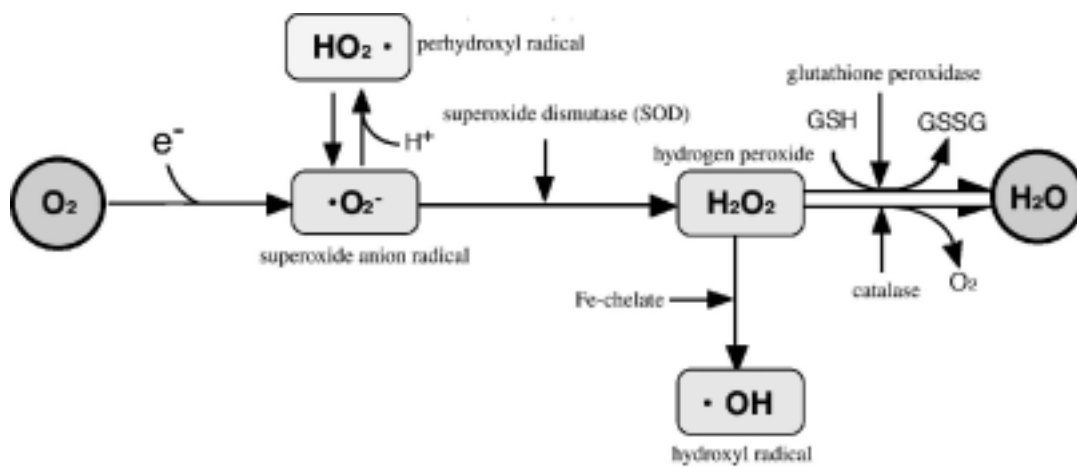


図 4.6.9 活性酸素種 (ROS) と ROS の生体内生成系

## 第5章 まとめ

臨界事故等で発生する、急速に立上り 1msec ~ 1sec 持続するバースト状の大強度放射線（特に中性子放射線）を対象とした、高線量放射線計測データ取込みシステムを検討し、以下の事が明らかにされた。本研究で検討した放射線計測システムは、1) 信号検出部、2) データ取込み部、3) トリガー発生部、4) 警報発生部、5) 自己診断部、の5つの部分で構成される。

1) DC 電流モードによる信号検出であるため、対象とする放射線（中性子）1個による出力波形は、半値全幅が 10~40ns ピーク値が 0.2~2V のパルス信号であり、出力波形の時間変化は、放射線強度が強いときは時間的に密な、又放射線強度が弱いときは時間的に粗なパルス信号からなる。

2) 信号検出部の出力電圧信号（アナログ）は、A/D コンバータでデジタルデータに変換され、記憶装置に順次格納される。A/D 変換されたデータは PC のメインメモリーに転送され、演算処理および表示等が行われ、最終的には内蔵ハードディスク(HD)あるいは外部に接続された HD に保管・記録される。本計測システムは、サンプリング周波数が非常に高速であり、臨界事故等で放射線バーストが放射される時間幅も 1ms ~ 1s と考えられる為、膨大な量のデータ取込みについての検討が必要となる。

3) A/D 変換、データ転送、データの記録を行う場合、測定システム全体で見れば性能は HD での記録速度により律速される。すべてのデータをリアルタイムに記録することが出来ず、変換後のデータはいったん A/D 回路内のメモリーに蓄え、A/D 処理を一旦停止して、転送・記録することになる。A/D コンバータと記録装置を組合わせた基本システムを複数用意し、それらを多重化したシステム構成により、この問題を解決する事が出来る。

4) 保存するデータ量は膨大になり、システムの性能は、記録装置の容量と記録速度で制約される。バースト状の高線量放射線は、発生 of 初期段階で強度が強く時間的に密な中性子は検出系に入射するが、時間の経過と共に強度が弱くなり入射するパルスの時間間隔は徐々に粗になると考えられる。このような状況では、リアルタイムでデータを圧縮し不要なデータを逐次捨てることにより、記憶装置に起因する制約から逃れることができる。

5) 波高値の異なる非常に幅の狭いパルス(パルス幅 10 ~ 50ns)の検出信号が、単位



時間あたりのパルス数 1cps (自然放射線レベル) から 1kcps (線源放射線レベル) になったときにトリガー信号を発生させる回路を設計し、電子回路シミュレーション (Micro-Cap 7/CQ 版) により本設計回路の動作確認を行った。入力信号が 1kcps 以上となったとき、トリガー信号が発生可能であることを確認した。

6) データ取込み部についての検討は、現在利用可能なエレクトロニクス部品を想定したが、この分野は益々発展すると考えられるので、本研究で検討した制約は、近い将来、かなり緩和されると考えられる。

タンデム加速器で加速された He ビームを Be に照射し、放出される中性子を用いて DC 電流モード放射線検出器の応答特性評価実験を実施した。He ビームのエネルギー  $E_{\text{He}}$  は 9MeV 又は 15MeV、Be ターゲットの厚さは  $5\mu\text{m}$  及び 0.2mm である。検出器はビーム進行方向に対し  $45^\circ$  の角度で Be ターゲットより 80cm 離れた位置に設置した。放射線検出系は、液体シンチレータ (NE213)、光電子増倍管、高速プリアンプ (周波数帯域 [-3dB]、50kHz~1.5GHz) からなり、信号の観測及びデータ取り込みは周波数帯域 500MHz、最大サンプリングレート 5GS/s のデジタルオシロスコープを使用した。分解能を 800ps、サンプリング時間を  $8 \times 10^{-10}$ s、記憶時間長を 3.2ms、記録個数を  $4 \times 10^6$  個とした。4M 個の数値データは、実験中はハードディスク内に保管し、実験終了後別の PC に移しデータ処理・解析等を行った。

検出器への放射線の入射により観測された信号の時間変化は多くのパルス形状の信号からなり、1 個の波形は半値全幅が  $\sim 16.4\text{ns}$ 、立上り時間 (10% $\rightarrow$ 90%) が  $\sim 6.6\text{ns}$ 、立下り時間 (90% $\rightarrow$ 10%) が  $\sim 17.7\text{ns}$  のパルス形状であった。半値全幅程度のパルス信号まで分解可能であるので、本研究で試作した DC 電流モード放射線検出系の最大カウントレートは  $\sim 60\text{Mcps}$  であることが分かる。

本研究のデータ解析では、3.2ms 間の各データに含まれるパルス信号のピーク値と半値全幅の積を足し合わせた値を、検出器に入射する放射線強度とした。 $5\mu\text{m}$  厚さの Be ターゲットを用いた計測では、 $E_{\text{He}}=15\text{MeV}$  の場合、照射イオン電流が  $I_{\text{He}} \geq 2\mu\text{A}$  の領域で、 $E_{\text{He}}=9\text{MeV}$  の場合、照射 He 電流が  $I_{\text{He}} \geq 5\mu\text{A}$  の領域で、放射線強度と  $I_{\text{He}}$  の直線性とは良好であったが、広範囲の領域では直線性を示さなかった。低照射電流領域で、検出器に飛来する放射線の個数が少ない為に生じたシステムティックエラーと考えられる。

$5\mu\text{m}$  厚 Be ターゲットへの He 照射により生成される放射線のパルスモード計測

による n- $\gamma$  分別実験を実施し、以下のことが明らかになった。

- 1) エネルギーが 9MeV 及び 15MeV のヘリウムビームが厚さ 5 $\mu$ m のベリリウムを衝撃する時、ビーム進行方向に対し $\sim 78^\circ$ に放射される中性子及びガンマ線の個数割合は、中性子が 0.58-0.63, ガンマ線が 0.37-0.42 であり、検出器前面に厚さ 10cm の鉛ブロックを設置することにより個数割合は中性子が 0.71-0.77, ガンマ線が 0.23-0.29 となる。鉛ブロックの設置により、検出器に入射する中性子も減少するが、ガンマ線がより強く減衰されるためと考えられる。
- 2) ガンマ線によるシンチレータ発光の波高分布はチャンネル数の少ない部分に集中している。
- 3) 電流モード計測のデータ処理で用いている放射線強度は発光強度とパルス幅を乗じた値を用いている。検出されたガンマ線が波高値の小さい値に分布する為、放射線強度は中性子による寄与が個数割合より格段と大きくなると考えられる。

より高線量の中性子に対する DC 電流モード検出器の応答特性を評価するために、厚さが 0.2mm の Be ターゲットを用いた 15MeVHe 照射実験を行い、以下の事が明らかにされた。

- 1) 検出器前面の鉛ブロック厚を 0cm (鉛無し), 5cm, 10cm とした場合、いずれ場合も照射 He 電流  $I_{\text{He}}$  が  $0.2\mu\text{A} \leq I_{\text{He}} \leq 3.6\mu\text{A}$  の範囲で、放射線強度は He 電流  $I_{\text{He}}$  に対し良好な比例関係にある。
- 2) 鉛ブロックを増加すると、放射線強度は直線的に減少し、厚さが 10cm で強度は $\sim 1/10$  となった。
- 3) 本実験条件で計測された放射線カウントレートの最大は 5Mkcps であった。

本実験の放射線検出器に入射する中性子のエネルギースペクトルを調査する為に、実験と同じ空間配置で、MeV He の Be ターゲット衝撃により発生する中性子の輸送をモンテカルロ法に基づく計算機シミュレーションより計算し、以下のことが明らかにされた。

- 1) Be の厚さを 5 $\mu$ m から 0.2mm とすることにより、検出器に入射する中性子フラックスは、 $E_{\text{He}}=9\text{MeV}$  の場合 $\sim 6.7$  倍、 $E_{\text{He}}=15\text{MeV}$  の場合 $\sim 22$  倍増加する。
- 2)  $E_{\text{He}}=15\text{MeV}$  の He 照射で Be ターゲットより放射され、検出器系に入射する中性子のエネルギーは、Be の厚さが 5 $\mu$ m 及び 0.2mm の場合、0.5-1MeV から 7-8MeV

の範囲が圧倒的に多い。

上記のように、臨界事故等で発生するバースト状高線量中性子計測のための放射線計測システムを検討した。H16年度の結果を簡単にまとめると、以下の通りである。試作した電流モードによる放射線計測部では最大 60Mcps のカウントレートまで観測可能であることが分かった。加速器ビームを用いた実験では、放射線強度は、入射放射線が $\sim 5$ Mcps まで、入射フラックスに比例して増加することが確かめられた。中性子に伴って検出器に入射するガンマ線に対する対策は、依然として重要な問題と思われる。ガンマ線に感度の良い計測機器を併用する事も1つの考え方である。DC 電流モードでの計測では、膨大なデータを扱う為、データの取込みが重要となが、この分野のエレクトロニクスの急速な発展により、十分対応が可能と考えられる。

電子スピン共鳴法を用いた放射線線量計測法の確立を目指した研究を実施した。カルシウム塩にガンマ線照射で生成する安定ラジカルを ESR 装置で測定し、精密な信号解析を行い、高感度化を目指した線量評価特性の調査を実施した。カルシウム塩（炭酸カルシウム、硫酸カルシウム 2 水和物、硫酸カルシウム無水物、グルコン酸カルシウム、ヒドロキシアパタイト、フッ化カルシウム）にガンマ線を照射し、安定なラジカルを生成した種類について、生成したラジカルによる信号と線量の相関および減衰特性を評価した。いずれも線量依存的に信号は増大し、また室温付近ではラジカルは安定に保存されることが確認された。また、これらを成分として含む素材が線量計測に利用できる可能性を示した。また、硫酸カルシウム、グルコン酸カルシウムは水に溶解することで活性酸素種を生成することが明らかになり、ガンマ線照射で生成する安定ラジカルが化学反応によって生体分子へ影響を及ぼす可能性を示唆した。