

## モジュール式エレクトロニクスを使用したシステムの構成例

ORTEC のモジュール式エレクトロニクスは、カウンティング、時間スペクトル分析、波高スペクトル分析、エネルギースペクトル分析、同時測定等々幅広いアプリケーションに対応した構成ができます。実際に特定の目的で類似する構成を組み立てるためのクイックガイドとして、以下に例を示します。図中、多くの機器にモデル番号を記していますが、大抵の場合同じ機能を持つ他のモデルで代用することが出来ます。各機能において最適なモデルを選択するために、ORTEC カタログのセクションガイドおよびデータシートをご利用下さい。

### ➤ カウンティング

図 1 および 2 は、時間に対するイベントをカウントするための高速および低速システムの構成例です。図 1 ではシングルフォトン光電子増倍管 (PMT) で検出します。PMT の優れたパルス分解能は、高速アンプでアノード出力パルス进行处理することで保持されています。モデル 9302 のディスクリミネータは低振幅ノイズを除去し、実質的にすべての光子パルスをカウントするよう調整されています。タイマーで制御される簡単なカウンタ (モデル 994) でイベントを記録し、あるいはマルチチャンネルスケラ (MCS-pci) で時間に対するカウントレートの特長を測定することができます。

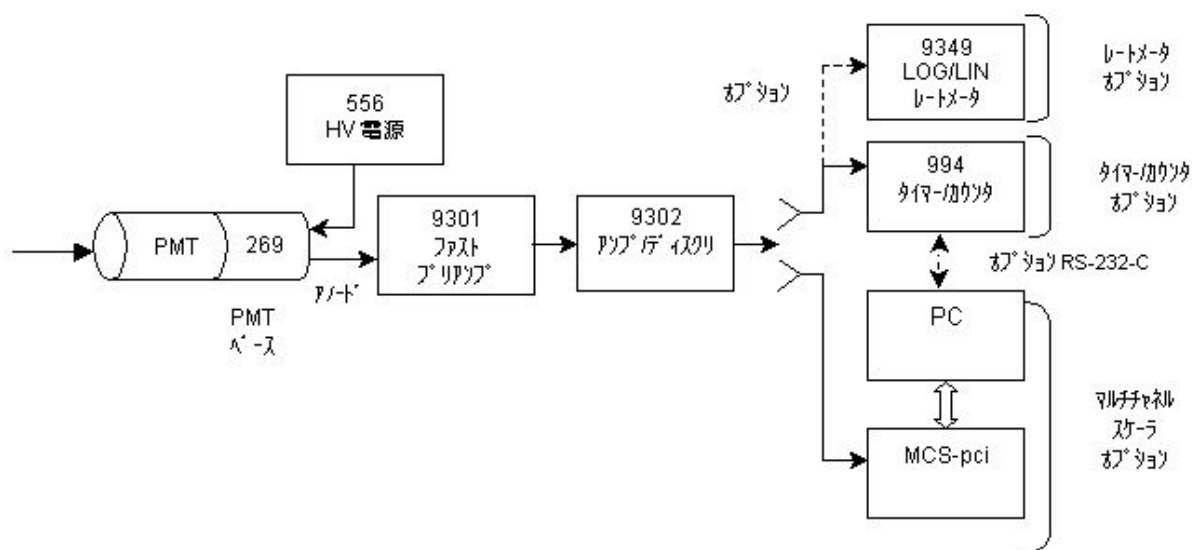


図 1. PMT アノードからの高速シングルフォトンパルスカウンティング

図 2 に示すのは、波高 (エネルギー) 分解能が良くなるようパルス分解時間を調整したカウンティングシステムです。モデル 113 電荷積分型プリアンプおよびモデル 575A アンプは NaI(Tl) シンチレーション検出器で許容できるエネルギー分解能を得るために必要なスローパルス整形を行います。特定の線エネルギーに対応するパルス振幅の狭い範囲は、モデル 550A シングルチャンネルアナライザ (SCA) またはマルチチャンネルスケラ内蔵の SCA で選択できます。選択されたイベントは、カウンタ / タイマーまたはマルチチャンネルスケラで記録されません。

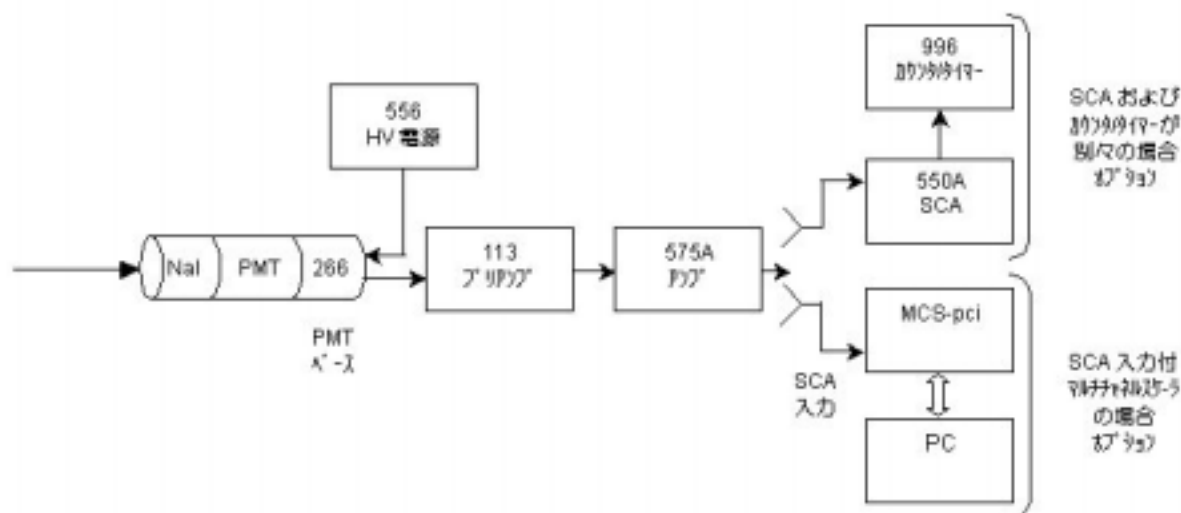


図 2. NaI(Tl)シンチレーション検出器からの低速リニア信号の選択振幅カウンティング

### ➤ 波高、電荷、エネルギースペクトル分析

図 3～10 では様々なタイプの検出器を使用した波高分析システムの例を示します。

- ・マイクロチャンネルプレート検出器 (図 3)
- ・マイクロチャンネルプレート光電子増倍管 (図 3)
- ・NaI (TI) シンチレーション検出器 (図 4)
- ・従来型光電子増倍管 (図 5)
- ・比例計数管 (図 6)
- ・シリコン荷電粒子検出器 (図 7)
- ・Si (Li) 検出器 (図 8 および 10)
- ・Ge 検出器 (図 8、9、10)

核放射線または X 線が検出されると、通常、波高は放射線エネルギーに換算して測定されます。そこで“エネルギースペクトロスコーピ”の用語が使用されます。その他の種類の信号源では、波高は単にイベントによって検出器に蓄積された電荷を示します。従って、測定プロセスは“電荷”または“波高”スペクトル測定のいずれかで見なすことができます。図 3 から 9 において、プリアンプは検出器に蓄積された電荷を積分し、アンプは波高分析のためにパルスを整形し、そしてマルチチャンネルバッファ (ADC+メモリ) は波高をスペクトルに分類します。

図 6 で低ノイズ 142PC プリアンプは標準の 142IH プリアンプより 6 倍高い感度を有します。この感度が高いことにより、低いガス増幅率でも比例計数管のオペレーションが可能になります。利点は比例計数管の計数率に対するガス増幅率の影響を低減できることです。結果として、比例計数管は記録されたエネルギースペクトルにピークシフトが起きる前に高計数率で動作します。

図 7 の 142A/B/C プリアンプは時間 (T) およびエネルギー (E) スペクトル分析のため同時出力を提供します。この手法の詳細は図 13 を参照して下さい。

図 8 および 9 で、アンプと MCB 間の BUSY と PUR 信号の接続は MCB の Gedcke-Hale Live-Time Clock で正確なデッドタイム補正を行うために必要です。

図 9 ではゲーティッドインテグレートアンプ (973U) は、良好なエネルギー分解能、且つ超高計数率で同軸型 Ge 検出器のオペレーションが出来るよう、電荷収集時間の変動を補正します。トランジスタリセットプリアンプ (TRP) もまた超高計数率でのオペレーションに重要です。詳細は 973U、921E のデータシートをご覧ください。

図 10 は X 線または  $\gamma$  線スペクトル分析のためのエレクトロニクスパッケージを使用した例です。このケースでは、DSPEC PLUS のデジタルシグナルプロセッシング (DSP) 技術でより高性能が得られます。詳細は DSPEC PLUS カタログをご覧ください。



図 3. マイクロチャンネルプレート検出器、マイクロチャンネルプレート PMT を用いた波高 (電荷) 分析

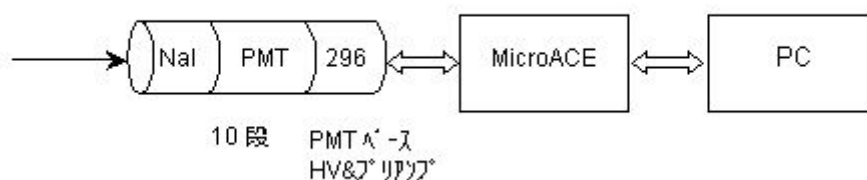


図 4. NaI (TI) シンチレーション検出器を用いた波高 (エネルギー) 分析

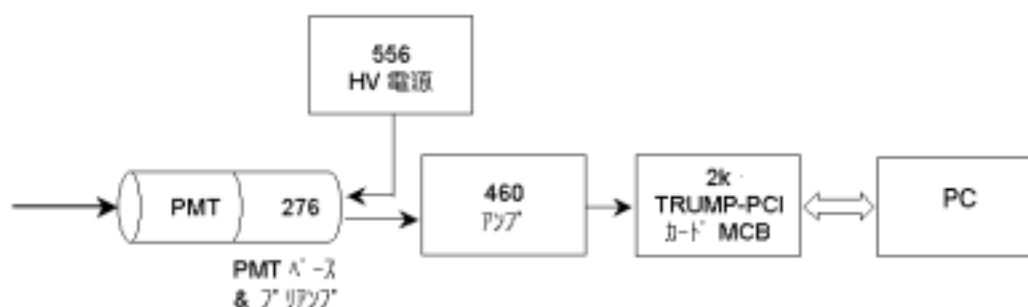


図 5. 光電子増倍管を用いた波高 (電荷) 分析

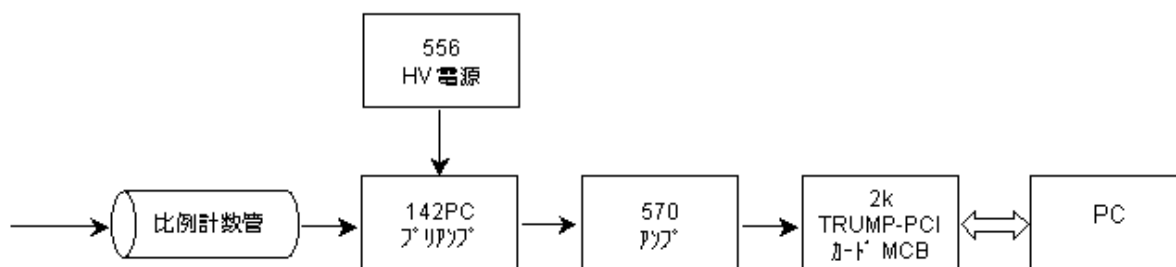


図 6. 比例計数管を用いた波高（エネルギー）分析

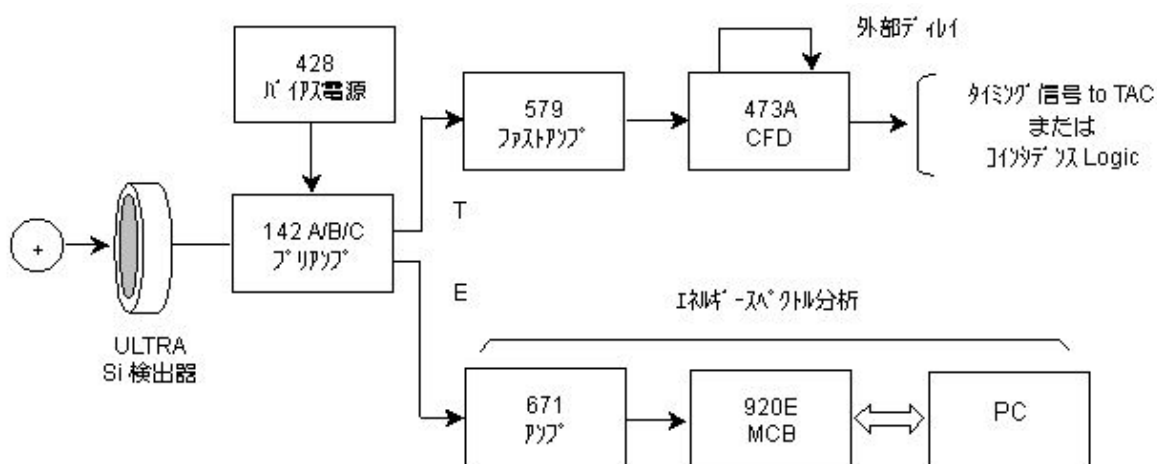


図 7. オプションのタイミング信号出力を含めた Si 荷電粒子検出器を用いた波高（エネルギー）分析

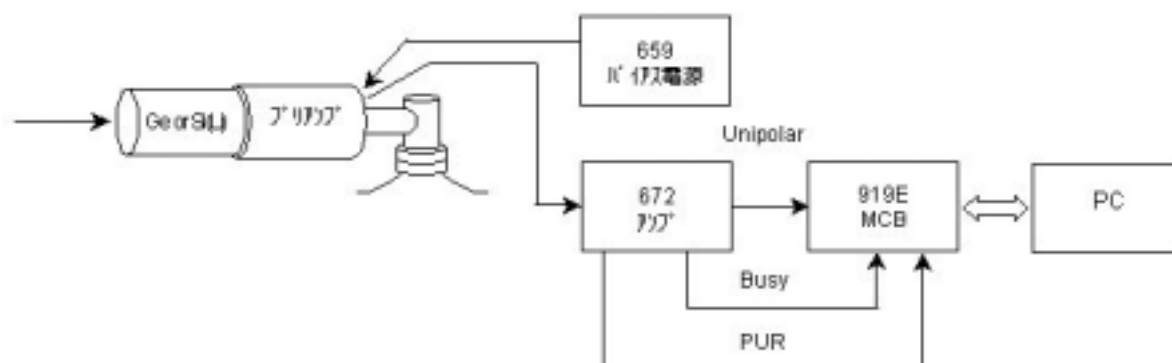


図 8. 線用 Ge 検出器または X 線用 Si (Li) 検出器を用いた波高（エネルギー）スペクトル分析

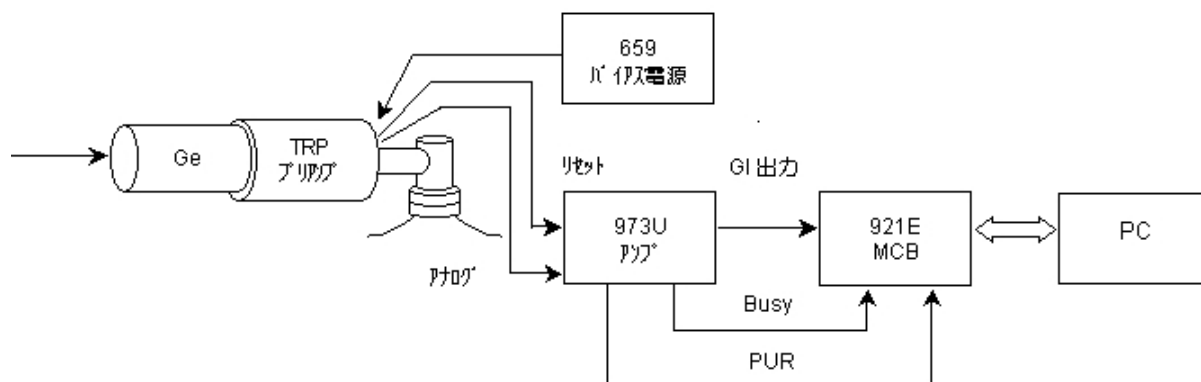


図 9. 同軸型 Ge 検出器を用いた高計数率 線エネルギー - スペクトル分析

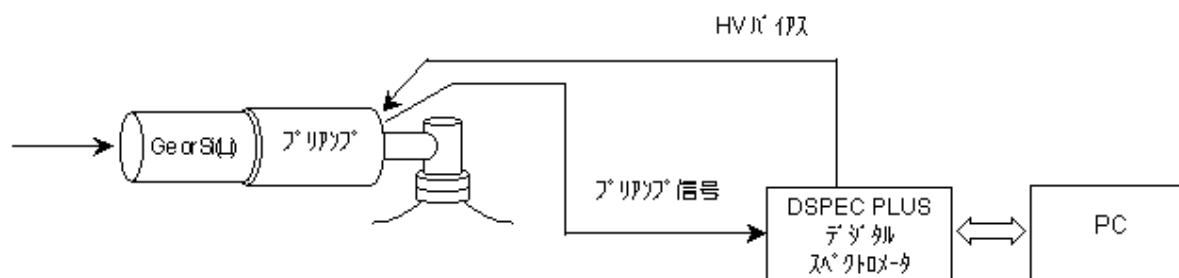


図 10. DSP による 線用 Ge 検出器、または X 線用 Si(Li)検出器を用いた波高（エネルギー）スペクトル分析

### ➤ シングルフォトンによるピコ秒時間分解能システム

図 11 は蛍光寿命測定においてピコ秒時間分解能を得るためのシステムを示します。パルスレーザーはサンプルの蛍光を励起し、個々の蛍光光子はマイクロチャンネルプレート（MCP）PMT で検出します。時間スペクトル分析器はレーザーパルス（フォトダイオードで検出）と MCP PMT で検出した蛍光光子の時間間隔を測定し、蛍光減衰のプロフィールを記録します。（図 11(A)でスタートとストップの入力を反転する利点に関しては、総合カタログ TAC のセクションを参照下さい。）数十ピコ秒から数十ナノ秒の蛍光寿命測定が可能です。これより長い寿命の場合、図 11(B)に示す通り MCP 検出器の代わりに従来型の光電子増倍管を、レーザーの代わりにナノ秒フラッシュランプを使用できます。数十マイクロ秒オーダーの蛍光寿命測定の場合、図 11(A)の TAC および MCA に代えてモデル T914 Turbo-MCS を使用します。ピコからマイクロ秒の寿命範囲全体にわたる測定では、モデル 9308 ピコ秒タイムアナライザが Turbo-MCS および TAC/MCA（図 12 参照）の両方に代えて使用されます。T914 および 9308 では図 11A のスタート/ストップ接続を交換して従来のスタート/ストップ構成とし、図 12 の通り 425A を従来のストップ入力に移動します。詳細はアプリケーションノート AN50 および AN52 をご覧下さい。

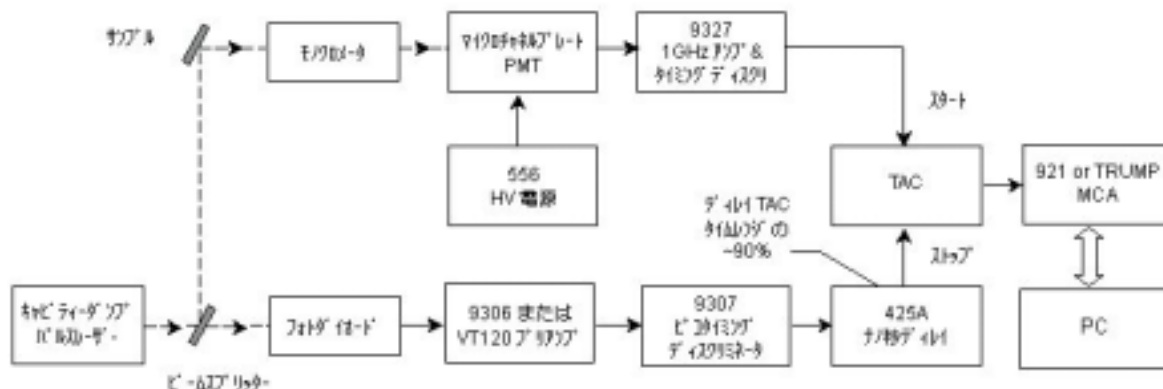


図 11(A). マイクロチャネルプレート PMT、TAC、MCA を用いた蛍光寿命スペクトル分析の典型的なブロック図

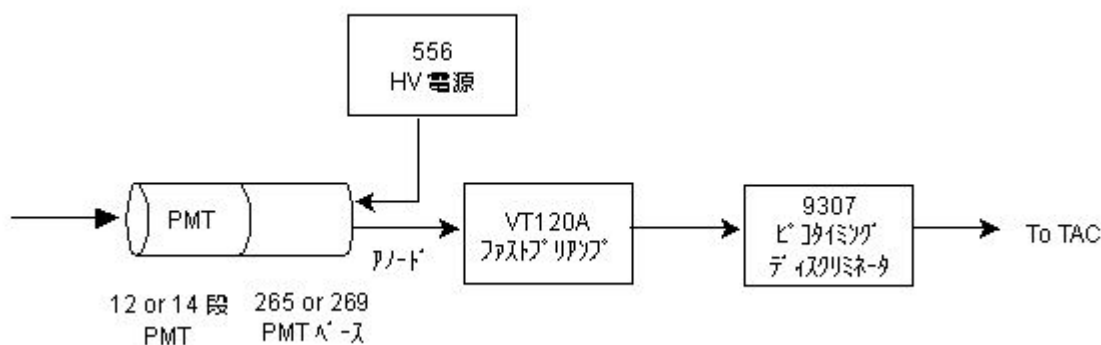


図 11(B). 図 11(A)の MCP の代わりに従来型 PMT を用いたシングルフォトンタイミングのための代替案、タイムピクオフ構成

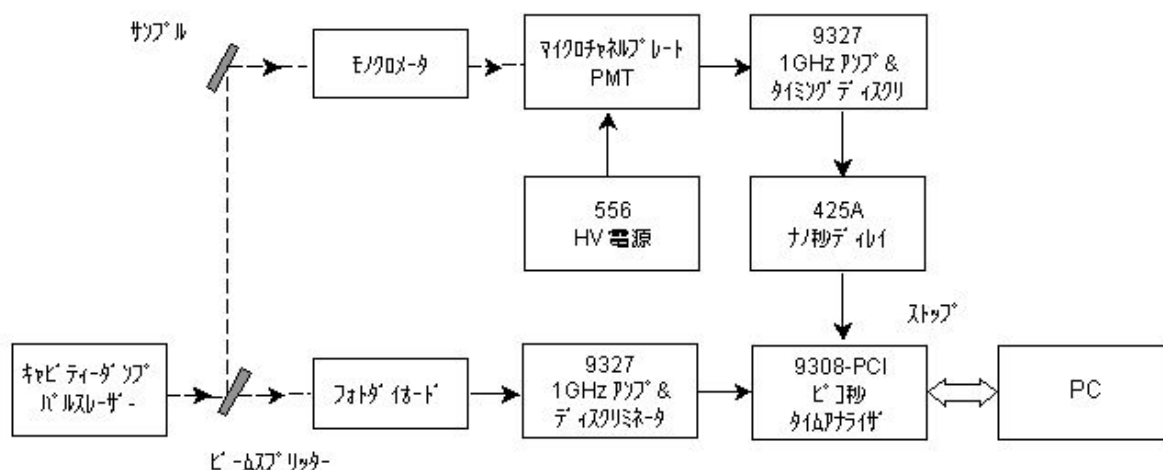


図 12. モデル 9308 を用いた蛍光/リン光寿命スペクトル分析の従来のスタート/ストップ構成

### ➤ 出力が一つの検出器を用いた時間および波高スペクトルの同時測定

検出器は1出力、でも時間スペクトルと波高スペクトル両方の分析が必要という時、図13のシステムが現実的な解決方法です。モデル142A プリアンプは検出器の出力を受けてタイミング(T)および波高またはエネルギー(E)測定のための別々のプリアンプ出力を提供します。この仕組みは波高スペクトル分析に必要な低ノイズを保ち、さらに時間スペクトル分析のために高速の立ち上がり時間を確保します。この手法はマイクロチャンネルプレート検出器、マイクロチャンネルプレートPMT、Si 荷電粒子検出器およびGe 検出器に有益です。最高の性能を得るには、検出器とプリアンプ間の接続の長さを出来る限り短くしなければなりません。

AD413A 4連ADC は各々検出されたイベントの時間およびエネルギー情報を記録します。デッドタイムを最小限にするため、TAC へのスタートおよびストップ入力は反転されます。検出器からの低レート信号はスタート入力に投入され、パルス励起ソースからの高レート信号はディレイをかけてストップ入力に投入されます。

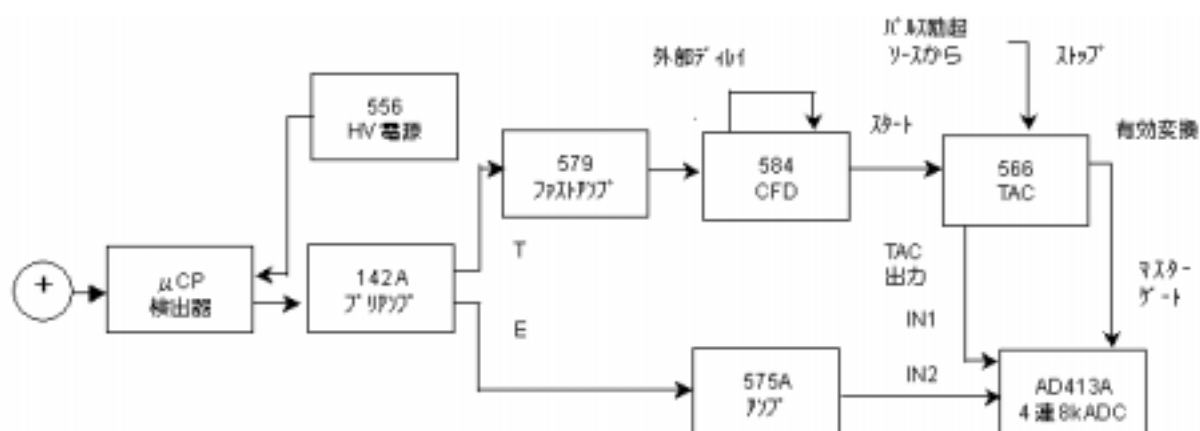


図13. マイクロチャンネルプレート検出器を用いた時間および波高の同時測定

### ➤ 10 μs を超える時間スペクトル分析：Time-of-Flight (TOF) 質量分析と LIDAR

10 μs を超える時間レンジでは TAC よりも Turbo-MCS を使用すると一層効果的です。マルチチャンネルスケーラ (MCS) は一つのスタートパルスに続いて複数のストップパルスを記録できるからです。時間スペクトルに歪みが無く、高いデータ収集レートを得られることが利点です。

図14(A) は Turbo-MCS を使用した飛行時間質量分析 (TOF-MS) の典型的なアプリケーションです。励起パルスによって試料からイオンが放出されると、マルチチャンネルスケーラがスキャンを開始します。イオンがマルチチャンネルプレートに達すると、TOF-MS を通過したイオンの飛行時間に対応する MCS チャンネルで計数されます。励起およびスキャンのプロセスを繰り返すことで、MCS のメモリに時間スペクトルを形成します。MCS のスキャン開始パルスは TAC のスタートパルスに対応し、MCS のディスクリミネータ入力はストップパルス入力としての役割を果たします。MCS は各スキャンの間に複数のストップパルスを受け入れ、記録します。

測定した飛行時間からイオンの質量を 
$$m = \frac{2zV_{\text{acct}}^2}{s^2} \quad (1) \quad \text{で求めます。}$$

ここで、 $z$  はイオンの電荷、 $V_{acc}$  は加速電圧、 $s$  は飛行距離です。サブナノ秒デジタル分解能を達成するには、VT120A プリアンプおよび Turbo-MCS に代えて、モデル 9327 1-GHz アンプ・タイミングディスクリミネータおよび 9308 ピコ秒タイムアナライザを使用します。図 14 (B) およびアプリケーションノート AN52 を参照下さい。

Turbo-MCS および 9308 で検出したそれぞれのイベントを処理する過程にはデッドタイムがあるので、この 2 つの製品は TOF-MS アプリケーションのシングルイオンカウンティング/タイミングモードでの動作に限られています。入力が一つのイベントの処理で塞がっている時、デッドタイムの間は次のイベントの到着には対応出来ません。これは、飛行時間スペクトルの主要なピークにイベントを検出する可能性が、いかなるスキャンの間も 1% 以下に限られることを意味します。数学的なデッドタイム補正でこの限界を 10%に引き上げることが出来ます。しかし、いずれの場合も許容可能なイオンレートは非常に低いです。この結果、データ収集時間が 1 秒よりさらに短い時、ピークカウントの統計上の不確かさは > 10%になります。

図 15 の (A) と (B) に示すように、FASTFLIGHT デジタルシグナルアベレージャを採用すればイオンレートは 100 倍以上増加します。その結果、統計上の精度や検出限界は 10 倍向上します。FASTFLIGHT はフラッシュ ADC を使用して検出器からのアナログ信号を 0.5、1、2ns 間隔でサンプル、デジタル化し、イベント処理のデッドタイムを排除します。検出器およびフラッシュ ADC はパルス内のイオン数に直線的にตอบสนองするため、検出器パルス幅内に到着した複数のイオンは全てカウントされます。詳細はカタログのマルチチャネルスケーラ、マルチストップ時間スペクトロメータ、デジタルシグナルアベレージャの各箇所またはアプリケーションノート AN53 および AN54 を参照下さい。

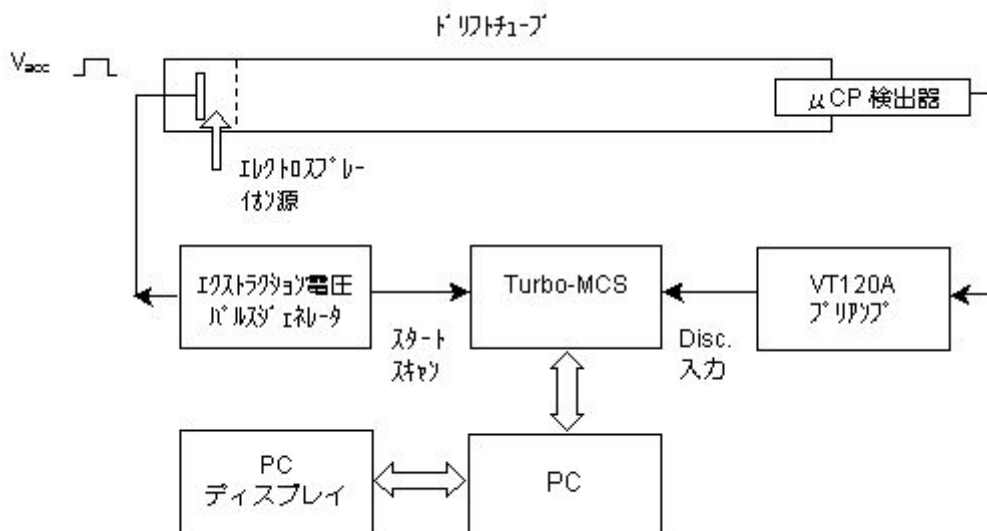


図 14(A).マルチストップ時間分析器として Turbo-MCS を用いた Time-of-Flight 質量分析の簡略化したブロック図



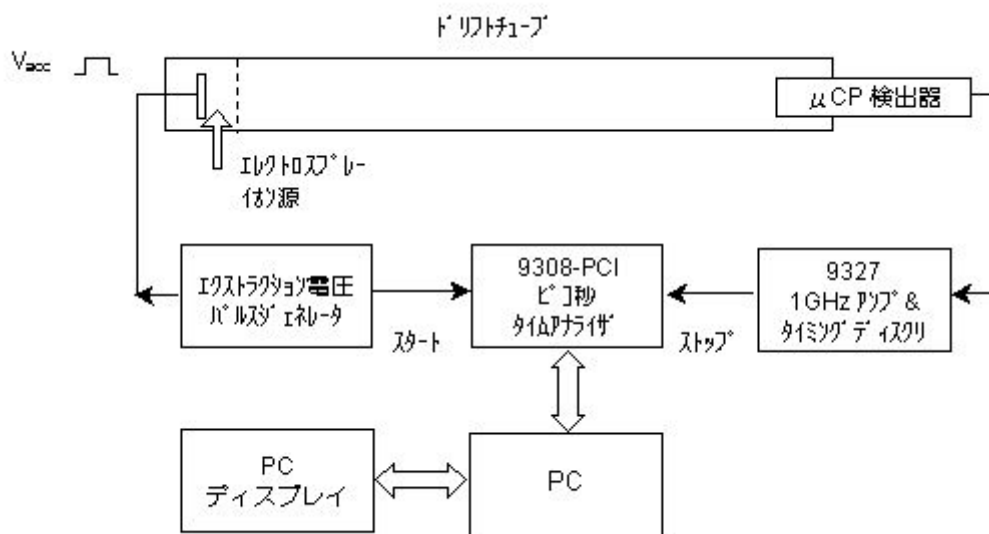


図 14(B). マルチストップ時間分析器として 9308 ピコ秒タイムアナライザを用いた Time-of-Flight 質量分析の簡略化したブロック図

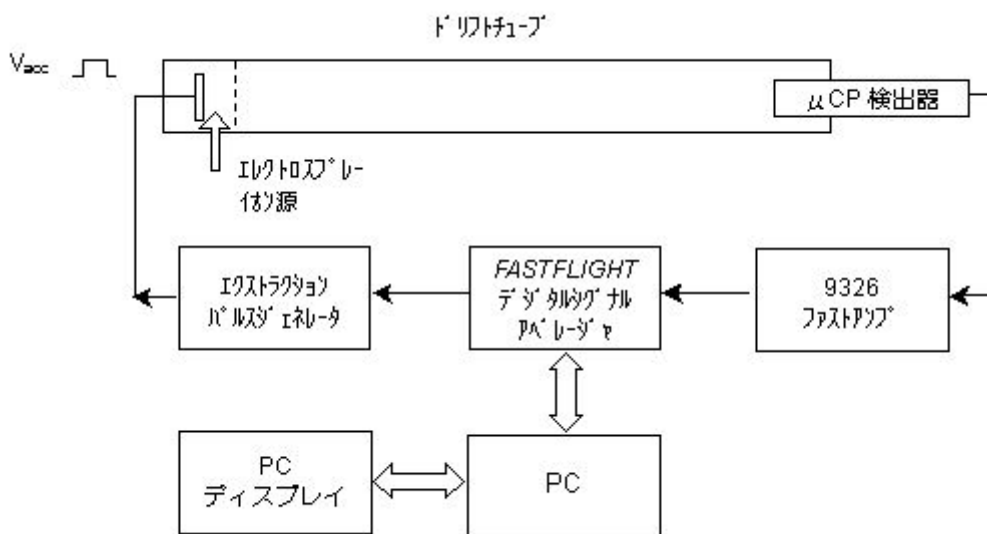


図 15(A). FASTFLIGHT デジタルシグナルアベレージャに接続した エレクトロスプレイ TOF-MS の簡略化したブロック図

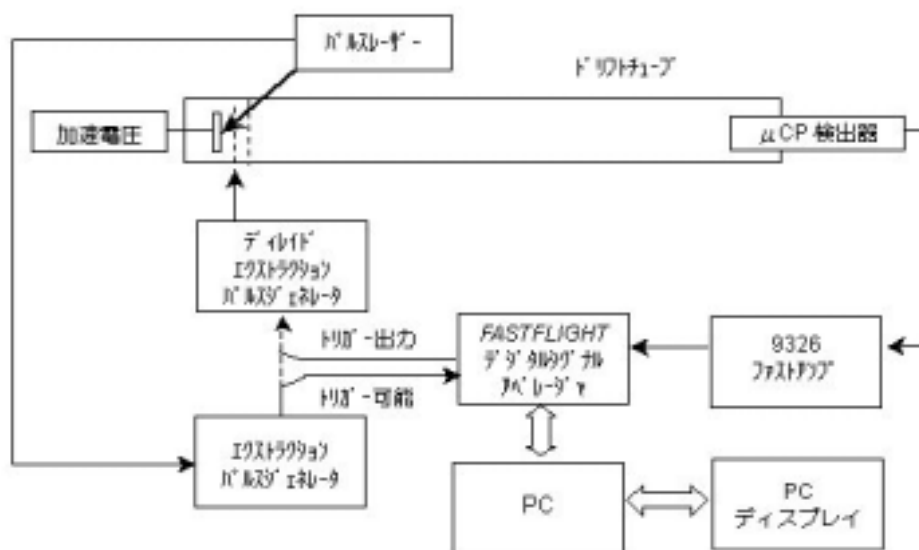


図 15(B). FASTFLIGHT デジタルシグナルアベレージャに接続した Delayed Extraction Grid を用いた MALDI TOF-MS の簡略化した図

図 16 (A) は大気中の高さの関数として化合物の濃度を研究するために Turbo-MCS を使用した LIDAR システムのアプリケーションを示します。大気中の分子によって散乱されたレーザーパルスは光電子増倍管で検出されます。光子の往復飛行時間は Turbo-MCS で測定され、その散乱が起きた高さを決定します。検出された光子の計数率は特定化合物の濃度を測定するために使用します。実際に、レーザーおよび光電子増倍管はレンズのシステムに組み込まれ、視界を制限して、レーザーで励起された容量と光電子増倍管で視ることができる容量の間のオーバーラップを保証するように作られています。一般に、異なる波長でのレスポンスを測定するために 2 つの並行するシステムが使用されます。これにより、微分吸収補正が適用されます。後者のテクニックは微分吸収 LIDAR (DIAL) と呼ばれます。LIDAR でサブナノ秒分解能を必要とする場合には図 16 (B) の機器を選択します。

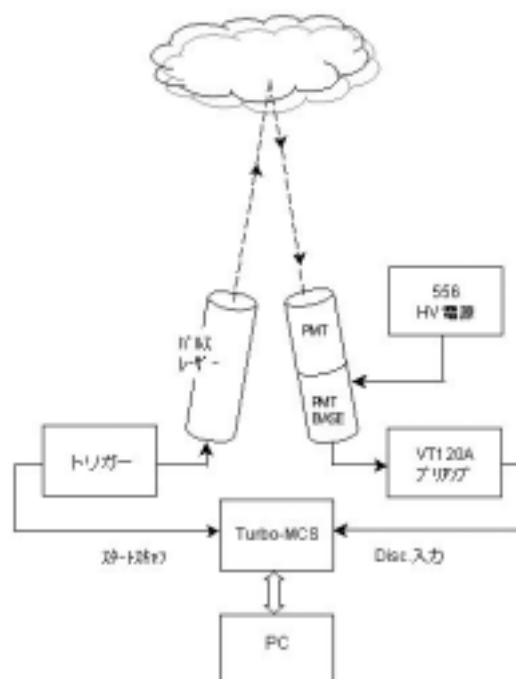


図 16(A). Turbo-MCS を用いた LIDAR による大気測定アプリケーションの簡略化した図

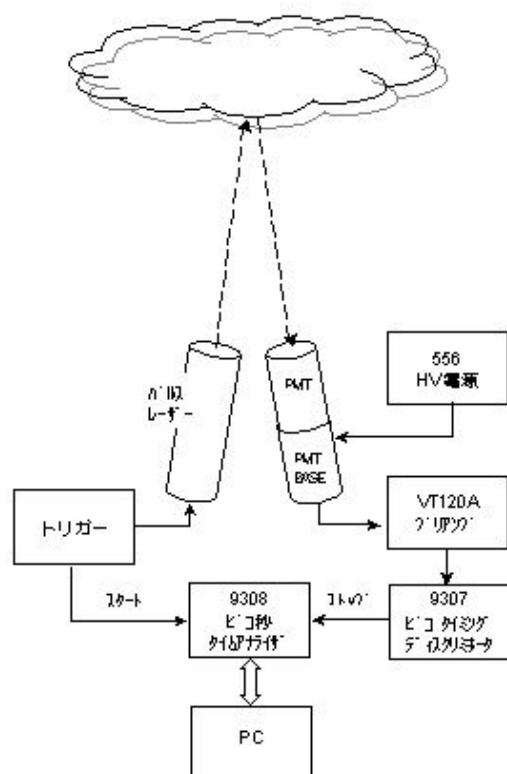


図 16(B). 9308 ピコ秒タイムアナライザを用いた LIDAR による大気測定アプリケーションの簡略化した図

### ➤ シンチレーション検出器を用いたタイミング測定

図 17、18、19 はシンチレーション検出器を用いた高分解能時間スペクトル分析の例です。放射線源から同時に放出される一対の線はそれぞれ対向するシンチレーション検出器で検出されます。

図 17 はファスト/スロー（高速/低速）タイミングシステムを示します。“ファスト”とは PMT からのファストアノード信号でタイミング情報を得ることを指します。ダイノード出力は 113 プリアンプで積分し、460 アンプでスローパルスとして処理された後 551 SCA に供給されて、各検出器に必要なパルス波高（エネルギー）レンジを選択します。414A ファストコインシデンス出力による TAC のストローブ信号は、選択されたエネルギーウィンドウ内のパルスだけが記録された時間スペクトルに寄与することを確実にします。

図 18 はエネルギーウィンドウの幅を変化させた時の時間分解能への影響を示すものです。

図 19 は“ファスト/ファスト”タイミングシステムを示します。ここではファストアノード信号を 1)タイミング情報を得る、2)パルス振幅のレンジを選択する、両方の機能に使用します。583B コンスタントフラクショナルディファレンシャルディスクリミネータの上限、下限ディスクリミネータはパルス振幅のレンジを選択し、またコンスタントフラクショナルゼロクロッシングディスクリミネータはさらにタイミング情報を追加します。このファスト/ファストシステムの利点は図 17 のファスト/スローシステムより高カウントレートで動作可能なことです。

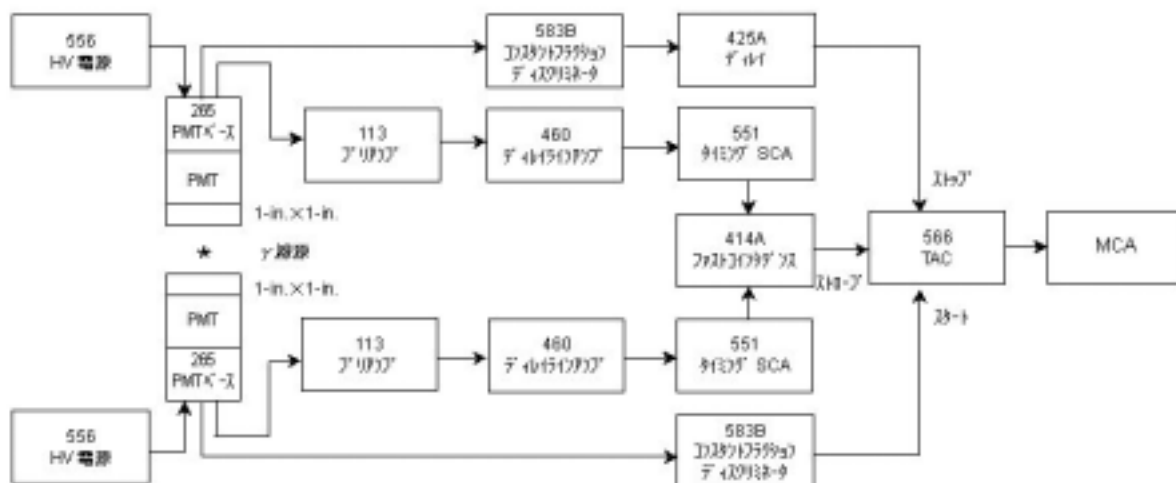


図 17. シンチレータおよび光電子増倍管を用いた代表的な - コインシデンス測定のためのファスト/スロー タイミングシステム

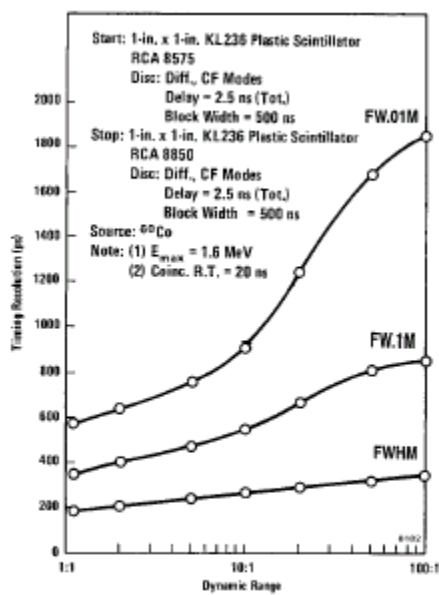


Fig. 18. Typical Time Resolution vs. Dynamic Range for a  $^{60}\text{Co}$  Source Using the ORTEC Model 583 Constant-Fraction Discriminator.

図 18. ORTEC モデル 583\*コンスタントフラクションディスキリミネータを用いた  $^{60}\text{Co}$  線源の典型的な時間分解能 対 ダイナミックレンジ

(583\*コンスタントフラクションディスキリミネータは製造中止になりました。現在は " 583B " が後継機です。)

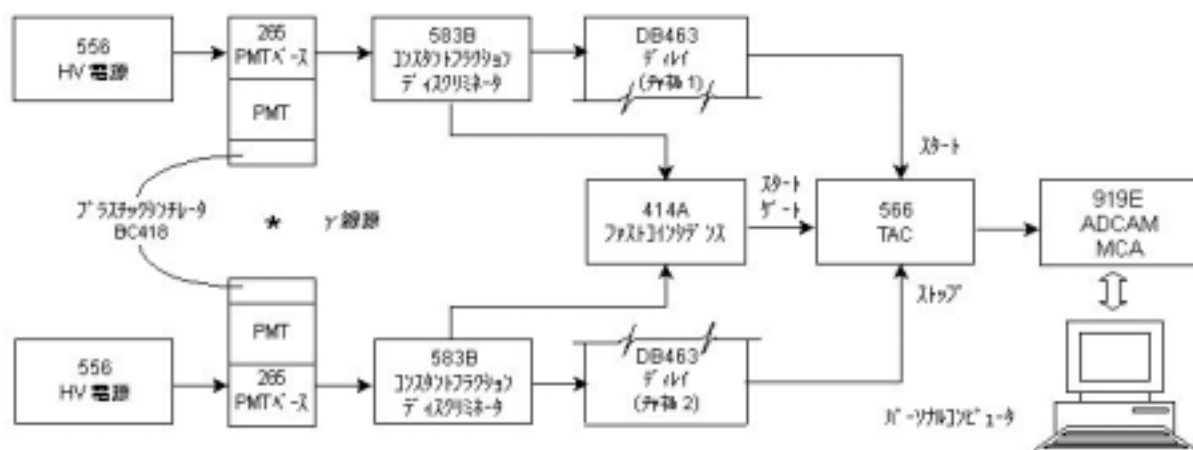


図 19. ファスト/ファストタイミングシステムにおいて 583B ディファレンシャル CFD と高速シンチレーション検出器 2 台を使用した時間スペクトル分析

### ➤ ゲルマニウム検出器を用いた時間スペクトル分析

図 20 のシステムを使用して Ge 検出器のタイミング特性を測定することができます。ファストプラスチックシンチレーション検出器の時間分解能は Ge 検出器に比べて良いため、時間スペクトルに記録されたピークは Ge 検出器の特性を示します。表 1、表 2 は幅広いサイズの Ge 検出器を使用して得た時間分解能を要約したものです。詳細についてはアンプ、ファストタイミングディスクリミネータの説明を参照下さい。

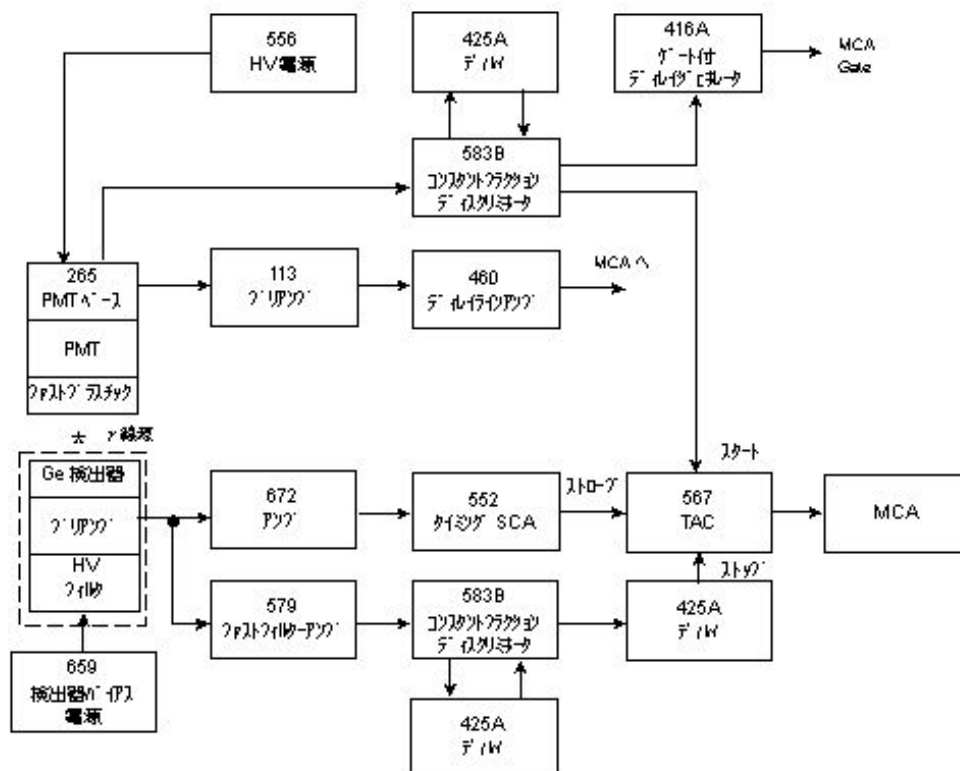


図 20. Ge 検出器を用いた時間スペクトル分析

## ➤ シリコン荷電粒子検出器を用いたタイミング

表面障壁型またはイオン注入型シリコン検出器は、荷電粒子のエネルギーを検出し、測定するために使用されます。多くの場合、荷電粒子の到着時間も測定する必要があります。図 21 はエネルギー信号と共にタイミング信号を抽出するためのブロック図を含みます。572 アンプの出力は通常 ADC に送られてエネルギースペクトルを記録し、584 の出力は TAC の Stop 入力を駆動します。マルチパラメータ分析が実験の目的であるなら、TAC 出力は時間スペクトルを記録するためにマルチパラメータ ADC の第二入力に送られます。Si 検出器では電荷収集時間が一様に短いため、サブナノ秒パルス幅のレーザーダイオードを使用して荷電粒子の影響をシミュレートすることができます。図 22 は図 21 で得た典型的な時間スペクトルを示しています。図 23 および 24 は時間分解能が荷電粒子のエネルギー（光パルスによるシミュレーション）に依存すること、また検出器の静電容量に依存することを示します。時間分解能は 30 ~ 700 ps の範囲で可能です。この時間分解能はノイズ / 信号の傾きの比によって決定されます。詳細は 142A/B/C データシートを参照下さい。

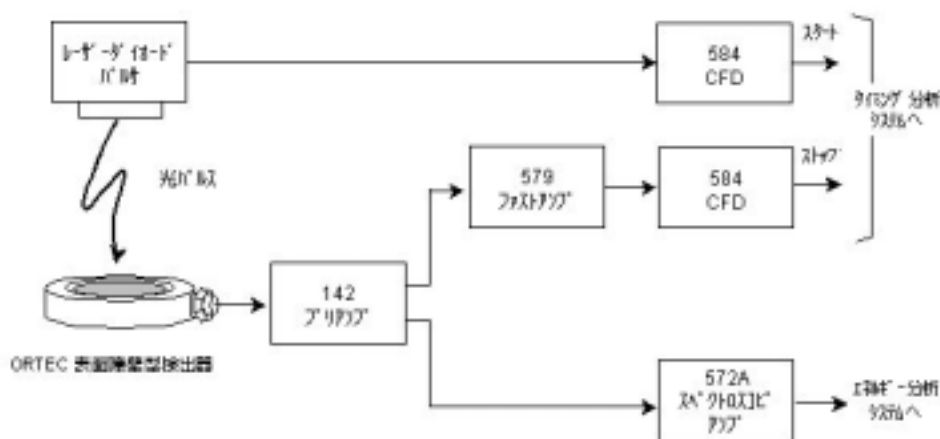


図 21. 荷電粒子検出器を用いたタイミングシステムのブロック図

## ➤ コインシデンススペクトル分析システム

図 25、26 は一度の崩壊で複数の光子を放出する放射性同位元素の研究を目的とするコインシデンススペクトル分析の例を示します。

図 25 のモデル 551 タイミング SCA は 2 つの検出器に入射した 線が真に同時であるかどうかを決定するためのスロータイミング情報を提供します。検出器 A に接続されたタイミング SCA は、MCB 上で検出器 A の全エネルギースペクトルが測定できるように広いウィンドウ幅で動作します。検出器 B に対してはタイミング SCA は単一の 線エネルギーを選択するように調整されています。結果として、MCB は検出器 B に入射した選択された 線と同時のタイミングで検出器 A に入射した 線のエネルギースペクトルを記録することになります。

図 26 のシステムは図 25 の構成よりさらに強力なデータ収集能力を提案します。オプション 1 の 2 パラメータデータ収集では、2 つの検出器からの同時計数スペクトルの 3 次元画像が得られます。更に、オプション 2 で各検出器からのコインシデンスゲーテッドシングルスペクトルを同時に記録することが出来ます。Kmax ソフトウェアを使用すれば、マルチパラメータデータ収集および表示が可能です。

図 26 でモデル 567 TAC/SCA はファストコインシデンス分解時間を設定します。これは図 25 の構成に比べて一段と便利です。何故なら TAC 時間スペクトルが TAC/SCA でゲートされた ADC で表示され、また SCA ウィンドウは真のコインシデンスピークだけを受け入れるように調整されているからです。オプションの TAC/SCA のスタートゲートを使用して TAC のデッドタイムを減らすことができます。

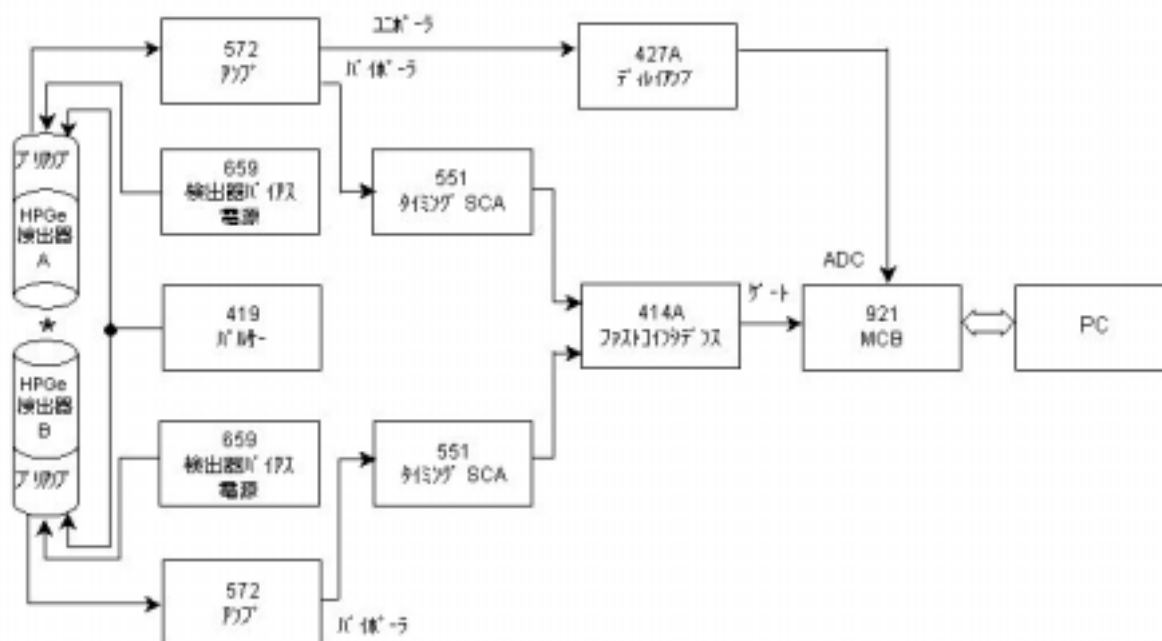


図 25. 2 台の Ge 検出器のひとつでエネルギースペクトル分析を行う簡単な コインシデンスシステム

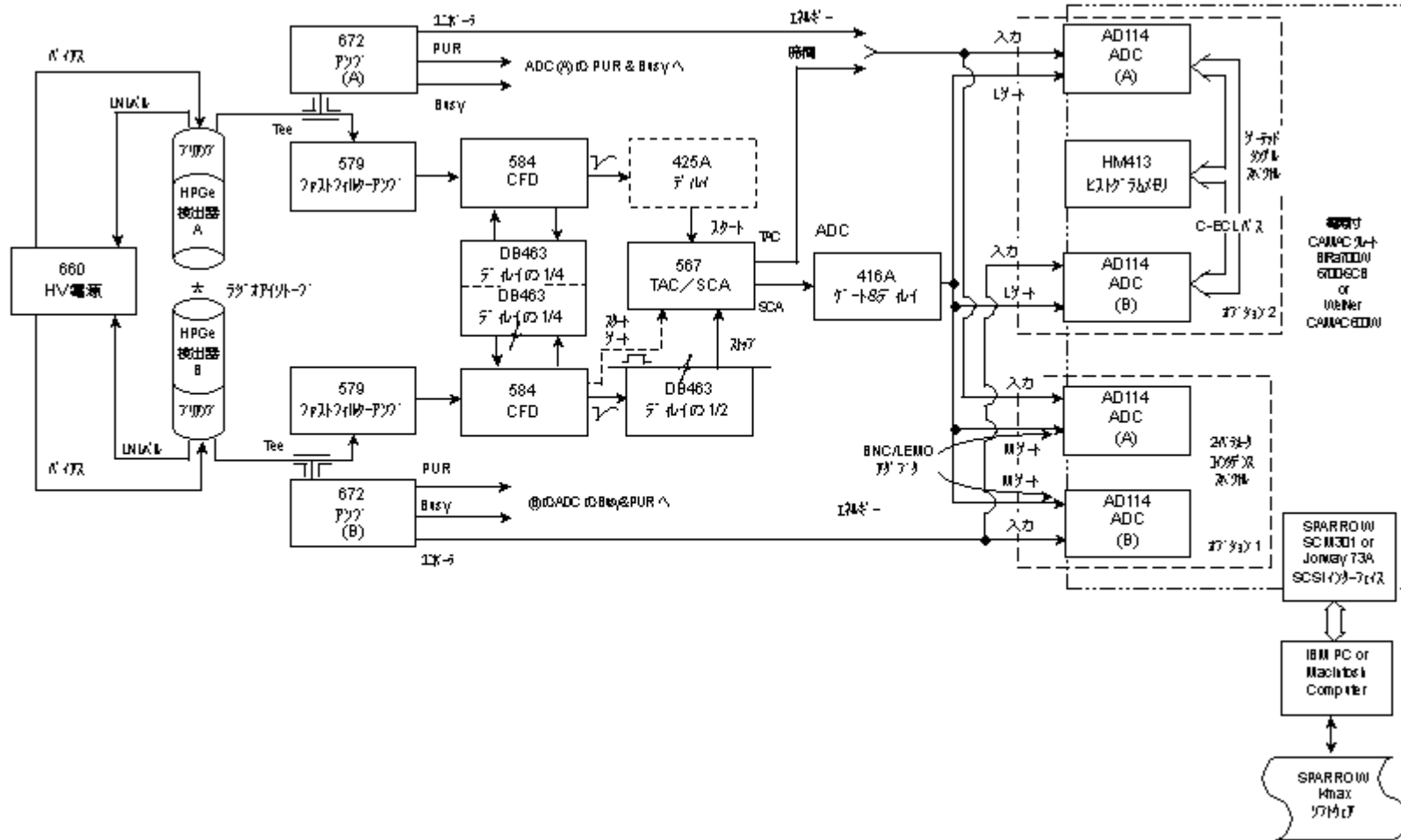


図 26. Ge 検出器と 2 パラメータエネルギースペクトル分析を用いた - コインシデンスシステム



## ➤ 波形分析による放射線のタイプ選別

あるシンチレータは異なる減衰時間を示すことで種類の異なる放射線に応答します。そのような状況では、波形分析を用いてある特定の種類の放射線を識別し、選択的に分析することができます。図 27 は不要な線バックグラウンド中に含まれる中性子をカウントするための波形分析のアプリケーションを示します。552 パルスシェイプアナライザおよび 567 TAC は 460 アンプからのパルスの立下り時間を測定します。460 はディレイライン波形整形増幅器なので、立下り時間はパルスの立ち上がり時間と同一で、立ち上がり時間はシンチレータの減衰時間に一致します。図 28 は TAC 出力の立ち上がり時間スペクトルを示します。中性子のピークを挟むように TAC SCA ウィンドを設定し、SCA 出力で MCA にゲートをかけることでシステムは中性子に起因するエネルギースペクトルだけを記録します。詳細は「Neutron-Gamma Discrimination with Stilbene and Liquid Scintillators」のアプリケーションノートを参照下さい。この手法は、他のタイプの検出器、例えば 2 種類のシンチレータによるサンドウィッチ構造を持つフォスウィッチ検出器のような透過深度によって放射線の種類を識別する検出器にも適用できます。

## ➤ 飛行時間によるエネルギー測定

高速中性子の相互作用で優れたエネルギー分解能の信号を発生する検出器を設計することは困難です。そのため、中性子エネルギーは通常一定距離の中性子の飛行時間を測定することで決定されます。この距離を  $s$ 、飛行時間を  $t$  とすれば、中性子のエネルギーは

$$E = \frac{m s^2}{2 t^2} \quad (2)$$

反対に、エネルギー  $E$  が制御されれば (2) の式を用いて未知の粒子の質量を求めることが出来ます。この手法は核反応における荷電粒子の識別、または TOF 質量分析における分子の種類の識別に用いられます。(図 14 および 15 参照)

図 29 は典型的な中性子飛行時間スペクトル測定系を示します。重水素イオン ( ${}^2_1\text{H}^+$ ) は静電加速装置で約 200keV に加速され、トリチウム ( ${}^3_1\text{H}$ ) を含むターゲットに衝突します。

その結果、核反応  ${}^3_1\text{H} ({}^2_1\text{H}^+, n) {}^4_2\text{He}$  により、14.2MeV のエネルギーを持つ中性子と 3.6MeV のエネルギーを持つ反跳粒子が発生します。サンプルから散乱した後、中性子は(a)非弾性散乱によって励起されたサンプル中の原子核の状態と、(b)散乱角度によって離散的に異なるエネルギーを示します。

飛行時間スペクトルは粒子が ULTRA 検出器に到着した時と中性子が中性子検出器に到着した時の時間差で測定されます。粒子検出器からの高計数率の信号は遅らせてストップパルスとして使用され、中性子検出器からの低い計数率の信号は TAC のスタート入力に送られます。このスタート/ストップの反転で TAC のデッドタイムを減少させます。図 27 に示したパルスシェイプアナライザは、ガンマ線のバックグラウンドを除去するために使用します。モデル 552 SCA はまた中性子信号を受け入れるための波高下限値を定義することが出来ます。この下限値は中性子検出器の検出効率を決定するために重要です。

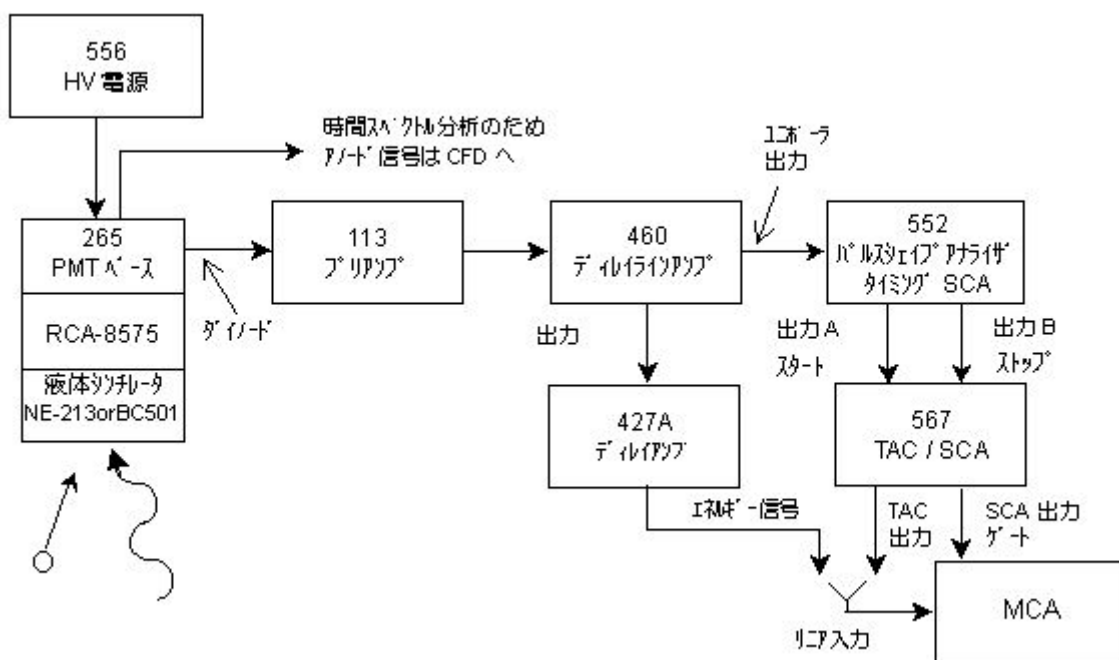


図 27. パルスシェイプ（立ち上がり時間）分析による中性子 - 線弁別

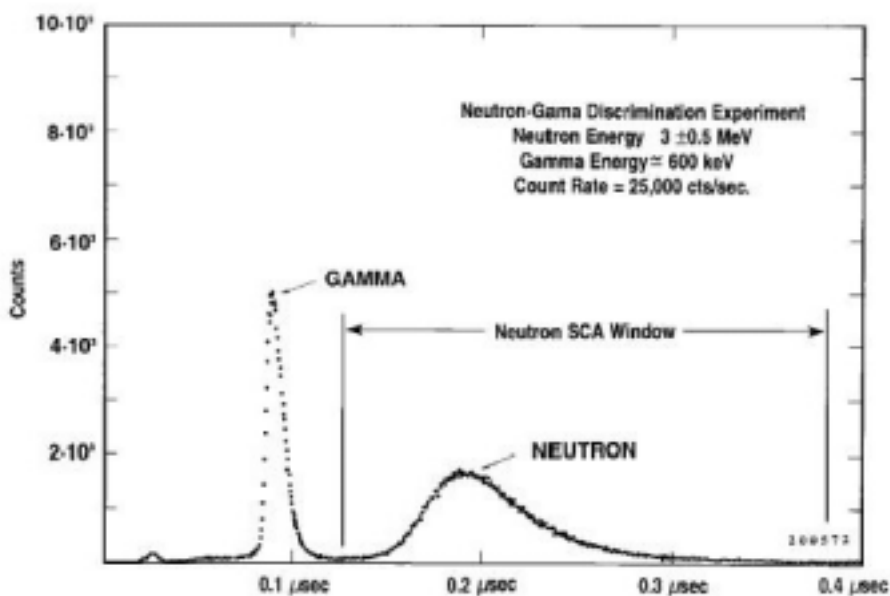


図 28. 図 27 の TAC 出力からの中性子 - 線立ち上がり時間スペクトル

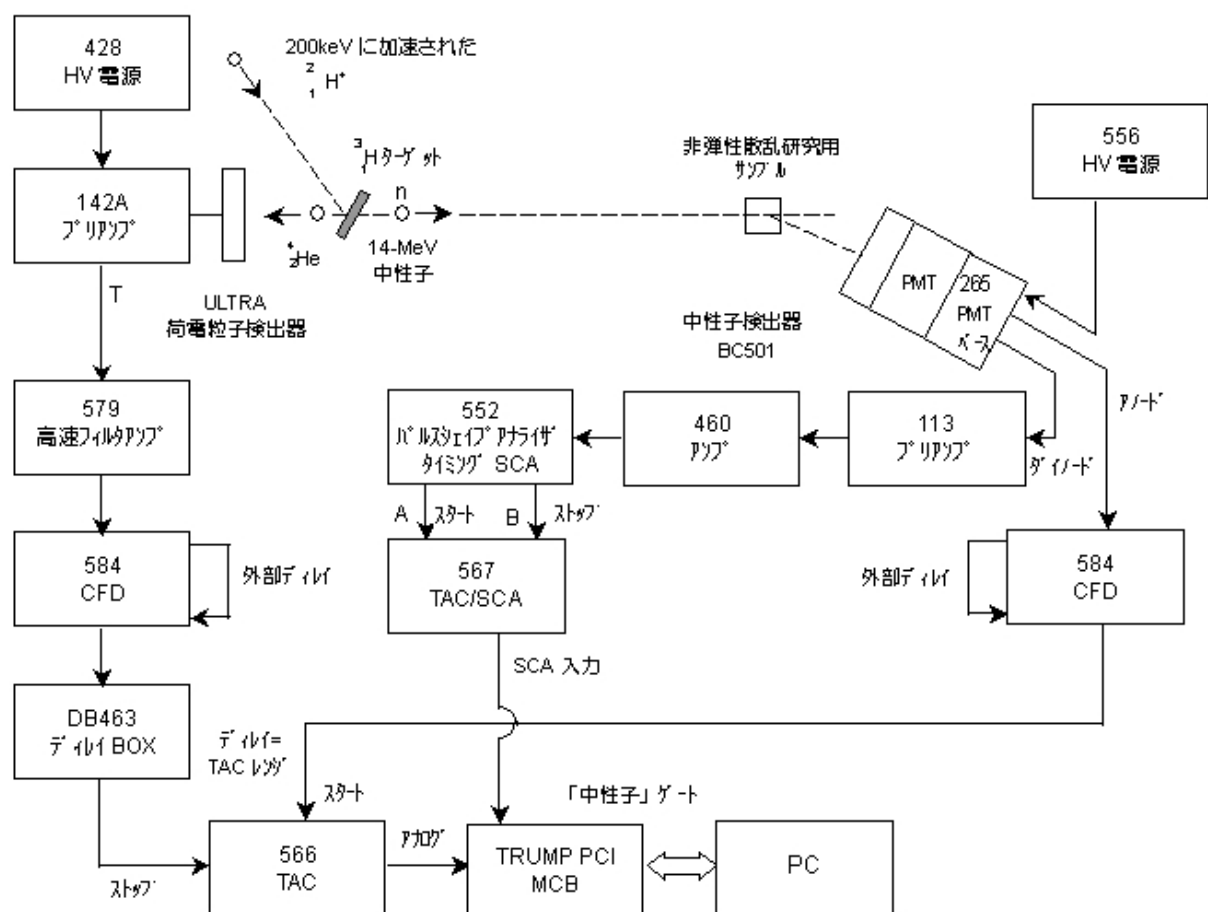


図 29. 中性子 - 線パルスシェイプ弁別による中性子飛行時間スペクトル測定