

JAERI-M
83-162

プラズマ計測用高計数率波高分析
システムの開発

1983年10月

的場 徹・小川 俊英・川島 寿人
木村 豊秋

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Section, Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1983

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷(株)

プラズマ計測用高計数率波高分析システムの開発

日本原子力研究所東海研究所核融合研究部

的場 徹・小川 俊英
川島 寿人・木村 豊秋⁺

(1983年9月12日受理)

プラズマ計測の方法として重要なパルス波高分析法について、特にトカマクプラズマを主要な対象とする新しい形式の波高分析システムを試作開発した。主たる開発目標は「トカマクプラズマの1放電でX線等のスペクトルの時間変化を測定でき、将来実時間的な使用が可能なこと」であり、試作品はCAMAC規格の高計数率型4チャンネル波高分析器としてまとめた。JFT-2プラズマを使用して軟X線スペクトルを試験的に測定した結果、当初計画した通りの性能を確認することができ今後の実用機製作の足がかりを得ることができた。

⁺ 大型トカマク開発部

Development of a High Counting Rate Pulse Height Analyzing
System for Plasma Diagnosis

Tohru MATOBA, Toshihide OGAWA, Hisato KAWASHIMA
and Toyoaki KIMURA⁺

Department of Thermonuclear Fusion Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received September 12, 1983)

New type pulse height analyzing system is developed and tested for Tokamak plasma diagnosis. Main developing targets are as follows.

- (1) Time resolving spectrum of X-ray or others can be measured at single discharge of tokamak plasma.
- (2) In the near future, this system will have capability of real time mode operation.

The trial system is the high counting rate 4 channel pulse height analyzer by CAMAC standard, and it is demonstrated that this system desired specifications in measuring the soft X-ray spectrum in the JFT-2 Tokamak. These results gives technological base for a practical system.

Keywords : Pulse Height Analyzing System, Plasma Diagnosis, PHA, CAMAC,
Tokamak

⁺ Department of Large Tokamak Development, Tokai, JAERI

目 次

1. はじめに	1
2. 高計数率4チャンネル波高分析器の試作開発	1
2.1 回路構成	2
2.2 基本特性	2
3. JFT-2 プラズマにおける軟X線計測系での試験結果	4
4. 検 討	6
4.1 微分直線性とウインドウ特性	6
4.2 システム全体の適合性	6
5. まとめ	7
謝 辞	8

Contents

1. Introduction -----	1
2. The trial product of high counting rate 4 channel pulse height analyzer -----	1
2.1 Circuit Diagram -----	2
2.2 Basic characteristics -----	2
3. Test results of soft X-ray measurements in JFT-2 plasma --	4
4. Discussion -----	6
4.1 Differential linearity and window characteristics ----	6
4.2 Adaptability of total system -----	6
5. Conclusion -----	7
Acknowledgement -----	8

1. はじめに

トカマクプラズマから放射される軟X線のエネルギー分析には、従来のプラズマ計測で良く用いられていた吸収膜法に代って波高分析法を用いることが標準化してきている。吸収膜法は検出器に入ってくる軟X線量をアナログ的に測定すればよいので、特に時間変化の早い測定に適している。他方エネルギー分解能は極めて悪いので、特性X線の同定等の分析用機器にはこれに代ってウィルキンソン型に代表される波高分析器を用いている。ウィルキンソン型波高分析器は、入力パルスをピーク保持回路を通してピーク保持してから積分型ADCにより保持値をデジタル変換する方式であるので、直線性・波高分解能は極めて良いが200 MHzのクロックを用いても1000 CHの分解能でデッドタイムが平均で5 μ sec程度は必要となり実効計数率は20 kcps程度までしか使用できない。従来のトカマクプラズマでは閉じ込め時間が数10 msec程度であり、通常時間分解能として10 msec以下1 msec程度まで必要とされるので、上記計数率では1放電で1つの時間帯には最大でも200カウント程度となってしまう。この様な制約条件があるので解析できる程度のスペクトルデータを得るには通常10放電以上のデータ加算が必要であり、さらにプラズマからの放射の時間変化が大きい場合にはダイナミックレンジの小さいのをカバーするために常時最大計数率附近で使用することが必須条件となり、適切な条件設定と厳密なパイルアップ除去対策が不可欠となる。以上の様なウィルキンソン型波高分析器の欠点を克服してトカマクプラズマの計測に適するものとするには、波高分解能はある程度犠牲にしてもデッドタイムを最小にして計数率特性を向上させることが必要となる。今回我々が試作開発を行ったのは、デッドタイムを原理的には無くすることができ計数率特性も現在の電子回路技術で到達できる最大の所に設定可能なマルチ弁別器型波高分析器である。この型式の波高分析器はさらに細分化して考えれば第1表に示す2方式が想定できるが、今回はこの内開発費が少なくて試作品がそのまま実験に応用使用可能なウィンドー型マルチ弁別器方式の波高分析器を試作したので試験結果をまとめて報告する。

第2節では今回試作開発した高計数率型4チャンネル波高分析器の構成と基本特性について述べる。

第3節ではJFT-2プラズマで軟X線検出器と組合せて試験データを取った結果についてまとめる。

第4節では今回の試験結果について評価検討を行ない問題点を明らかにする。

第5節では今回の試作開発の成果をまとめ、あわせて将来の見通しについても言及する。

2. 高計数率4チャンネル波高分析器の試作開発

従来システムの中で特に問題となる波高分析器（以下PHAと略記する）について、以下の様な項目を開発目標としてエレクトロニクス課と共同で高計数率4チャンネル波高分析器（以下

1. はじめに

トカマクプラズマから放射される軟X線のエネルギー分析には、従来のプラズマ計測で良く用いられていた吸収膜法に代って波高分析法を用いることが標準化してきている。吸収膜法は検出器に入ってくる軟X線量をアナログ的に測定すればよいので、特に時間変化の早い測定に適している。他方エネルギー分解能は極めて悪いので、特性X線の同定等の分析用機器にはこれに代ってウイルキンソン型に代表される波高分析器を用いている。ウイルキンソン型波高分析器は、入力パルスをピーク保持回路を通してピーク保持してから積分型ADCにより保持値をデジタル変換する方式であるので、直線性・波高分解能は極めて良いが200 MHzのクロックを用いても1000 CHの分解能でデッドタイムが平均で5 μ sec程度は必要となり実効計数率は20 kcps程度までしか使用できない。従来のトカマクプラズマでは閉じ込め時間が数10 msec程度であり、通常時間分解能として10 msec以下1 msec程度まで必要とされるので、上記計数率では1放電で1つの時間帯には最大でも200カウント程度となってしまふ。この様な制約条件があるので解析できる程度のスペクトルデータを得るには通常10放電以上のデータ加算が必要であり、さらにプラズマからの放射の時間変化が大きい場合にはダイナミックレンジの小さいのをカバーするために常時最大計数率附近で使用することが必須条件となり、適切な条件設定と厳密なパイルアップ除去対策が不可欠となる。以上の様なウイルキンソン型波高分析器の欠点を克服してトカマクプラズマの計測に適するものとするには、波高分解能はある程度犠牲にしてもデッドタイムを最小にして計数率特性を向上させることが必要となる。今回我々が試作開発を行ったのは、デッドタイムを原理的には無くすることができ計数率特性も現在の電子回路技術で到達できる最大の所に設定可能なマルチ弁別器型波高分析器である。この型式の波高分析器はさらに細分化して考えれば第1表に示す2方式が想定できるが、今回はこの内開発費が少なくて試作品がそのまま実験に応用使用可能なウィンドー型マルチ弁別器方式の波高分析器を試作したので試験結果をまとめて報告する。

第2節では今回試作開発した高計数率型4チャンネル波高分析器の構成と基本特性について述べる。

第3節ではJFT-2プラズマで軟X線検出器と組合せて試験データを取った結果についてまとめる。

第4節では今回の試験結果について評価検討を行ない問題点を明らかにする。

第5節では今回の試作開発の成果をまとめ、あわせて将来の見通しについても言及する。

2. 高計数率4チャンネル波高分析器の試作開発

従来システムの中で特に問題となる波高分析器（以下PHAと略記する）について、以下の様な項目を開発目標としてエレクトロニクス課と共同で高計数率4チャンネル波高分析器（以下

FAST PHAと略記する)を試作した*)。

(開発目標)

- (1) トカマクプラズマの1放電でX線等のエネルギースペクトルを必要な時間分解能(最小 1 msec 程度)で測定できること。
- (2) 将来実時間的な使用方法も可能であること。
- (3) 計算機による操作が可能であること。
- (4) エネルギー分解能はトカマクプラズマの金属不純物に対応する特性K線の識別が可能であること。

従来のウィルキンソン型波高分析器(以下SLOW PHAと略記する)は高エネルギー分解能を指向しているのに対し、本試作品は適度なエネルギー分解能で高時間分解能、高速実時間使用を指向したものとなっている。

2.1 回路構成

本試作品のブロック回路図を第1図に示す。波高分析の部分は2台のコンパレータを差動方式で使用するものであり、比較基準値をCAMAC規格バスを使用して計算機から指定する方式としている。代表的な電気的特性を第2表にまとめて示す。完成した試作品をエレクトロニクス課で試験した結果、同表に示した仕様はすべて満足していた。これらの仕様以外の項目でPHAの性能として重要な積分直線性については実測例を第2図に示すが、1.2%以下という実測値が得られているので一応トカマクプラズマ用軟X線測定系に使用できるものと判断した。

2.2 基本特性

実際のプラズマによる測定を始める前に基本特性として弁別特性、微分直線性及びパイルアップ率について実測値を求めた。最初にコンパレータの弁別特性を測定した例を第3図に示す。高レベル又は低レベル単独の特性はデジタル設定値の1ステップ以内ではほぼ切替わるので問題はない。補正なしで使用できる最小ウィンド幅としては大体デジタル設定の5ステップ分程度である。但し第3節に後述するように入力波形にノイズが重畳している場合には見掛上この特性は大幅に悪くなるので注意が必要である。次に微分直線性については、ここではこれらの弁別レベルの実測値と設定値の差によって表わすこととして、今回の試験結果をまとめて第4図に示す。横軸はコンパレータの弁別レベル設定値(E)をステップ単位で示し、縦軸は実測値と設定値の差(δ)をステップ単位で示している。設定の再現性については今回の試験の範囲では問題とならなかった。これより微分直線性としてほぼ1ステップ幅程度にはおさまっているが、各コンパレータ毎に異なるオフセット値を有するので実際の使用にあたっては各チャンネルのウィンド設定をするたびに補正値を求めておくことが必要となろう。

*) 日本原子力研究所技術部エレクトロニクス課 ; "エレクトロニクス課技報 No.26" (1982年3月)

最後にパイルアップ率についての実測結果を示すが、比較のために標準的な SLOW PHA についてもデータを示す。テストシステムのブロック図を第 5 図に示すが、検出器は NaI シンチレータを使用して標準 γ 線源の波高分析データを得た。まず SLOW PHA 系の実測波高分析データ例を第 6 図に示す。 ^{137}Cs 線源と 50 cps の標準パルスを重畳して、波形整形時定数 1.0 μsec の増幅器と SLOW PHA にてデータを収集しているので全パイルアップ率は標準パルスの計数率低下から求めることができる。次に今回試作の FAST PHA による実測例を第 7 図に示す。この場合の波形整形時定数は 20 nsec としているので、実効的なパイルアップ率は検出器の方で制限されているものと考えられる。パイルアップ率の計算に必要な関係式を以下にまとめて示す。全パイルアップ率を R 、波形整形時間に依存するドウェルタイムを τ_D 、パイルアップ補正した全計数率を \dot{N}_{OP} とすれば

$$R = \tau_D \dot{N}_{OP} \quad (1)$$

と書ける。一方標準パルスの見掛けの全計数率を \dot{N}_{PT} 、標準パルスのエネルギー値の変らない部分の計数率を \dot{N}_{PO} とすれば、

$$\dot{N}_{PO} = \dot{N}_{PT} (1 - R) \quad (2)$$

と表わされる。スペクトル全体の見掛けの全計数率を \dot{N}_O とすれば

$$\dot{N}_{OP} = \dot{N}_O \frac{\dot{N}_{PT}}{\dot{N}_{PO}} \quad (3)$$

となる。真の全計数率 \dot{N}_{OT} は \dot{N}_{OP} にデッドタイム補正係数 C_D をかける必要がある。 C_D は標準パルスの真の全計数率 \dot{N}_P (今回の場合は 50 cps としている) を用いて

$$C_D = \frac{\dot{N}_P}{\dot{N}_{PT}} \quad (4)$$

と表わされる。実測値として \dot{N}_P 、 \dot{N}_{PT} 、 \dot{N}_{PO} 、 \dot{N}_O が得られれば(1)~(4)式を用いて R 、 τ_D 、 C_D 、 \dot{N}_{OP} 、 \dot{N}_{OT} が求まる。以上の方法で求めたパイルアップ率を第 8 図にまとめて示す。

SLOW PHA の場合には真の全計数率に対しては 10 kcps をこえるとパイルアップ率は飽和の傾向を示すが、デッドタイムの効果を差引いてパイルアップに寄与する見掛けの入力計数率でプロットすると今回のデータ範囲では比例関係を保っている。デッドタイムを今回のデータから推定すると 6~10 μsec 程度となり SLOW PHA のカタログ値と矛盾のない値となっている。

FAST PHA ではデッドタイムは回路の調整で決まっておき今回の試作品では 50 nsec に設定されており、第 8 図の測定範囲では考慮する必要はない。FAST PHA のパイルアップ率の測定値は測定時間が短いためにデータにばらつきが目立つけれども、ほぼ比例関係は保っており値自体も小さく問題となるレベルではない。ドウェルタイム τ_D は(1)式より求められて

$$\begin{array}{ll} \text{SLOW PHA} & \tau_D \sim 1 \times 10^{-5} \quad (\text{sec}) \\ \text{FAST PHA} & \tau_D \sim 5 \times 10^{-7} \quad (\text{sec}) \end{array}$$

となる。波形整形時定数が SLOW PHA は 1.0 μsec 、FAST PHA は 20 nsec であるので、

τ_D は SLOW PHA では波形整形時定数で決っており FAST PHA では波形整形時定数から予想される値 2×10^{-7} sec より大きな値となっている。これは NaI 検出器自身の減衰特性（約 $0.3 \mu\text{sec}$ と予想される）がきいているものと思われるので FAST PHA のパイルアップ率を正確に実測するには減衰特性のすぐれた検出器を用いる必要がある。第 6 図の ^{137}Cs 線源のデータを見てわかるように 662 keV のピークに対して 2 倍のエネルギーの所にいわゆるパイルアップピークが認められる。 662 keV のピークと 1324 keV のパイルアップピークの計数率の比を計算した結果を第 9 図に示す。この場合のパイルアップ率は 2 つのパルスがほぼ完全に重なったもののみを数えているので当然全パイルアップ率より小さな値となり、SLOW PHA, FAST PHA 共に約 $1/5$ 程度となっている。SLOW PHA においては標準パルスピークによる値も求めているが ^{137}Cs ピークによる値より 50% 程度大きくなっている。この原因としては、標準パルサーの波形と検出器波形に若干差があるためと考えられる。

3. JFT-2 プラズマにおける軟 X 線計測系での試験結果

基本特性の試験結果は当初予定した通りの性能を発揮することが確認できたので、これを JFT-2 トカマクプラズマの軟 X 線計測系に組み入れて実用性確認試験を行った。JFT-2 プラズマでの軟 X 線測定においては時間変化を詳細に見ることが重要であるので第 10 図に示す様な試験システムを構成した。検出器とプリアンプは ORTEC 社製 Si (Li) 検出器と専用プリアンプをそのまま使用し、波形整形用増幅器以後は基本特性測定時と同じ構成としている。但し高速弁別器は全計数率の測定に使用している。スケーラー出力をプラズマ生成時間と同期してクレートコントローラの計算機メモリに記憶させるために KS 社製 3655 型タイミングパルスジェネレータを使用している。データ収集動作タイムチャートを第 11 図に示すが、キーボードにより初期値設定を行えば外部トリガー信号によりあらかじめ決められた時間幅で決められた回数（今回のプログラムでは最大 64 回）だけデータ収集を行う。今回使用したスケーラーがバッファメモリなしであるので、データ収集時間幅の後に 1 msec のデータ転送時間を必要とする。2 回目以後は手動収集以外に必要ながあれば自動収集も可能である。

実際の測定に先立ち 4 チャンネルのウィンドウ設定を標準線源でエネルギー較正した標準パルサーを用いて行った。今回は Si (Li) 検出器のプリアンプは特に高計数率化対策を行っていないので波形整形時定数は $0.1 \mu\text{sec}$ とした。最終的に実験に用いたウィンドウ特性を第 12 図に示す。図中、(1E) ~ (4E) の記号は試作 FAST PHA の各チャンネルを表わし、(5E) は全計数率測定用高速弁別器を表わす。各チャンネル表示直後における () 内の数字は FAST PHA 各チャンネル毎の下側弁別 (LLD) と上側弁別 (ULD) の設定値を表わす。パルサーの入力計数率は 100 cps としている。弁別レベルの切れが悪いのは Si (Li) 検出器系のノイズレベル限界近くで使用しているためであり、データ解釈をする時に注意する必要がある。また (5E) の飽和レベルにおける読取値が 100 cps 以上になっているのは、弁別レベルをノイズ限界近くに設定しているため背景雑音を一部計数しているためである。JFT-2 プラズマにおいて問題となる金属不純物の K 線のエネルギー値を図中に示すが、(3E) のチャンネルがすべての

τ_D は SLOW PHA では波形整形時定数で決っており FAST PHA では波形整形時定数から予想される値 2×10^{-7} sec より大きな値となっている。これは NaI 検出器自身の減衰特性（約 $0.3 \mu\text{sec}$ と予想される）がきいているものと思われるので FAST PHA のパイルアップ率を正確に実測するには減衰特性のすぐれた検出器を用いる必要がある。第 6 図の ^{137}Cs 線源のデータを見てわかるように 662 keV のピークに対して 2 倍のエネルギーの所にいわゆるパイルアップピークが認められる。662 keV のピークと 1324 keV のパイルアップピークの計数率の比を計算した結果を第 9 図に示す。この場合のパイルアップ率は 2 つのパルスがほぼ完全に重なったもののみを数えているので当然全パイルアップ率より小さな値となり、SLOW PHA、FAST PHA 共に約 $1/5$ 程度となっている。SLOW PHA においては標準パルスピークによる値も求めているが ^{137}Cs ピークによる値より 50% 程度大きくなっている。この原因としては、標準パルサーの波形と検出器波形に若干差があるためと考えられる。

3. JFT-2 プラズマにおける軟 X 線計測系での試験結果

基本特性の試験結果は当初予定した通りの性能を発揮することが確認できたので、これを JFT-2 トカマクプラズマの軟 X 線計測系に組み入れて実用性確認試験を行った。JFT-2 プラズマでの軟 X 線測定においては時間変化を詳細に見ることが重要であるので第 10 図に示す様な試験システムを構成した。検出器とプリアンプは ORTEC 社製 Si (Li) 検出器と専用プリアンプをそのまま使用し、波形整形用増幅器以後は基本特性測定時と同じ構成としている。但し高速弁別器は全計数率の測定に使用している。スケーラー出力をプラズマ生成時間と同期してクレートコントローラの計算機メモリに記憶させるために KS 社製 3655 型タイミングパルスジェネレータを使用している。データ収集動作タイムチャートを第 11 図に示すが、キーボードにより初期値設定を行えば外部トリガー信号によりあらかじめ決められた時間幅で決められた回数（今回のプログラムでは最大 64 回）だけデータ収集を行う。今回使用したスケーラーがバッファメモリなしであるので、データ収集時間幅の後に 1 msec のデータ転送時間を必要とする。2 回目以後は手動収集以外に必要ながあれば自動収集も可能である。

実際の測定に先立ち 4 チャンネルのウィンドウ設定を標準線源でエネルギー較正した標準パルサーを用いて行った。今回は Si (Li) 検出器のプリアンプは特に高計数率化対策を行っていないので波形整形時定数は $0.1 \mu\text{sec}$ とした。最終的に実験に用いたウィンドウ特性を第 12 図に示す。図中、(1E) ~ (4E) の記号は試作 FAST PHA の各チャンネルを表わし、(5E) は全計数率測定用高速弁別器を表わす。各チャンネル表示直後における () 内の数字は FAST PHA 各チャンネル毎の下側弁別 (LLD) と上側弁別 (ULD) の設定値を表わす。パルサーの入力計数率は 100 cps としている。弁別レベルの切れが悪いのは Si (Li) 検出器系のノイズレベル限界近くで使用しているためであり、データ解釈をする時に注意する必要がある。また (5E) の飽和レベルにおける読取値が 100 cps 以上になっているのは、弁別レベルをノイズ限界近くに設定しているため背景雑音を一部計数しているためである。JFT-2 プラズマにおいて問題となる金属不純物の K 線のエネルギー値を図中に示すが、(3E) のチャンネルがすべての

不純物K線を含み、(2E)がTiのK線を少しかぶり、(4E)がNiのK線を少しかぶる。今回の設定で全く影響のないのは(1E)のみである。

一般的にSXスペクトルの傾きから電子温度を求めることが可能であるが、今回のウィンドウ特性から電子温度を求めるには各チャンネル出力の比と電子温度の関係をあらかじめ知っておくことが必要である。第13図に計算結果を示すが、横軸を電子温度、縦軸を各チャンネル出力の比で表わしている。計算上の仮定としては、プラズマ中の電子密度分布と電子温度分布はそれぞれ規格化半径を r として

$$n_e(r) \propto (1-r^2)$$

$$T_e(r) \propto (1-r^2)^2$$

とし、電子のエネルギー分布関数は単一のマックスウェル分布をするものとし、かつ不純物の寄与はないものとしている。実際のトカマクプラズマでは、数keV以上のエネルギー領域の電子は単一のマックスウェル分布をする場合はむしろまれで、高エネルギー成分が強調される場合が多く、また不純物のK線も検出可能な場合が多い。それ故(2E)/(1E)、(3E)/(1E)、(4E)/(1E)等の値からそれぞれ電子温度を評価して、お互いの一致度から高エネルギー成分や不純物の影響を考慮すべきである。

中性粒子入射加熱(以下NBIと略記する)及びイオンサイクロトロン共鳴加熱(以下ICRFと略記する)を用いた追加加熱実験時の測定例を第14図に示す。横軸はプラズマ点火時からの時間で、120 msecから追加加熱を開始している。縦軸は各チャンネルの計数値を計数率で表わしている。データ収集時間は4 msecに設定している。全計数率はジュール加熱時と追加加熱時で2桁近く異なるので、ここではジュール加熱時における計数値の統計的ばらつきを押さえるために10回の放電データを加算している。加算の効果については一般的に次の様に評価できる。各チャンネルの収集計数値の平均を S とし、 n 回放電のデータについての標準偏差を σ とする。まずプラズマが毎回完全に同じ場合の各チャンネル出力の統計的ばらつきは $1/\sqrt{S}$ で与えられる。また n 回平均の効果として標準偏差値を $\sqrt{S/n}$ として処理できる。他方プラズマの再現性が良くない場合には、ばらつきの標準偏差を σ_p とすれば

$$\sigma = \sqrt{S + \sigma_p^2}$$

と表わされる。よって $\sigma/S \gg 1/\sqrt{S}$ の場合には $\sigma_p \gg 1/\sqrt{S}$ となるのでプラズマにばらつきが多く加算平均により統計的ばらつきを押さえる意味がなくなる。第14図に示した測定例に対して $1/\sqrt{S}$ と σ/S を計算した結果を第15図に示す。この例ではジュール加熱時にはプラズマの再現性は悪くない(但し計数値が少ないので判別レベルは20~30%のばらつきに対してである)が、追加加熱時後半には(5E)と(1E)においてプラズマの再現性が悪く出ている(約10%程度のばらつき)。但し(2E)、(3E)については $1/\sqrt{S}$ の値自身が10%程度以上のレベルであるので、このレベルでのプラズマの再現性については議論できない。

第14図のデータを用いて第13図により電子温度を評価した結果を第16図に示す。図中(2E)/(1E)の各点には標準偏差から決まる誤差範囲をつけて示している。(3E)/(1E)、(4E)/(1E)の各点に対してはこれよりもはるかに大きな誤差幅となるので図には示していない。前述の様に高エネルギー成分と金属不純物の特性K線により電子温度評価は常

に高い方へずれるので、電子温度としては3点の内の最小のものをとるべきでありそれを図中実線で示す。但し今回のウィンドウ特性では

(2E) / (1E) : TiのK線

(3E) / (1E) : Ti, Cr, Fe, NiのK線

(4E) / (1E) : NiのK線及び高エネルギー成分

の様に3点共にそれぞれ別の原因で温度が高く評価される可能性が残っている。このことを確認するためにプラズマ中心のレーザー散乱計測により求めた電子温度も同時に同図中に示すが、追加熱直前においてはS X温度はかなり高く評価されており、追加熱中にはS X温度はレーザー温度より少し高い傾向ながら両者はかなり良く合っている。

4. 検 討

今回の試作開発品について実際のS X計測系に適用して試験した結果、おおむね予想した通りの成果が得られたが、いくつかの問題点も明らかとなった。これらの問題点について以下にまとめて検討をする。

4.1 微分直線性とウィンドウ特性

基本特性確認の段階で微分直線性が良くない点が認められたが、再現性は問題がないのでウィンドウ設定時に較正することで解決できることがわかった。むしろ今回試験して明らかになったことは検出器とプリアンプからの雑音がエネルギー分解能を決めるばかりでなく実効的なウィンドウ特性に影響を与えているので、計測系全体の設定が終わってからウィンドウ特性の較正值を取ることが必須条件となることである。今回得られた微分直線性の特性でもPHAとしてのチャンネル数は最大100CH程度はとることも可能である。但し今回試作のウィンドウ型ではウィンドウ幅がせまい時には計数効率が低下するので、100CH FAST PHAとしては第1表に示すLLDとスケーラの組合せを101組用意して並列使用するカスケード方式が望ましい。

ウィンドウ型としてはある程度広いエネルギー領域をそれぞれ別個のエネルギー幅で計数する目的に使用するのが最適であるので、今回の様な電子温度が1 keV以下のプラズマでは対象となるエネルギー領域がせまく半導体検出器システムの背景ノイズに影響されて十分に性能を発揮できない。対象プラズマの電子温度が1 keV以上となれば2台並列に用いて8 CH FAST PHAとして実時間的な使用が可能であろう。

4.2 システム全体の適合性

今回の試験システムでは検出器とプリアンプは従来通りの分解能重視型のものをそのまま使用したので、全計数率が100 kcpsを越えると短時間の内にプリアンプが飽和してしまうという不都合が生じた。また入力計数率が押さえられているのでそれに見合った波形整形時定数として今

に高い方へずれるので、電子温度としては3点の内の最小のものをとるべきでありそれを図中実線で示す。但し今回のウィンドウ特性では

(2E) / (1E) : TiのK線

(3E) / (1E) : Ti, Cr, Fe, NiのK線

(4E) / (1E) : NiのK線及び高エネルギー成分

の様に3点共にそれぞれ別の原因で温度が高く評価される可能性が残っている。このことを確認するためにプラズマ中心のレーザー散乱計測により求めた電子温度も同時に同図中に示すが、追加加熱直前においてはS X温度はかなり高く評価されており、追加加熱中にはS X温度はレーザー温度より少し高い傾向ながら両者はかなり良く合っている。

4. 検 討

今回の試作開発品について実際のS X計測系に適用して試験した結果、おおむね予想した通りの成果が得られたが、いくつかの問題点も明らかとなった。これらの問題点について以下にまとめて検討をする。

4.1 微分直線性とウィンドウ特性

基本特性確認の段階で微分直線性が良くない点が認められたが、再現性は問題がないのでウィンドウ設定時に較正することで解決できることがわかった。むしろ今回試験して明らかになったことは検出器とプリアンプからの雑音がエネルギー分解能を決めるばかりでなく実効的なウィンドウ特性に影響を与えているので、計測系全体の設定が終ってからウィンドウ特性の較正值を取ることが必須条件となることである。今回得られた微分直線性の特性でもPHAとしてのチャンネル数は最大100CH程度はとることも可能である。但し今回試作のウィンドウ型ではウィンドウ幅がせまい時には計数効率が低下するので、100CH FAST PHAとしては第1表に示すLLDとスケーラの組合せを101組用意して並列使用するカスケード方式が望ましい。

ウィンドウ型としてはある程度広いエネルギー領域をそれぞれ別個のエネルギー幅で計数する目的に使用するのが最適であるので、今回の様な電子温度が1 keV以下のプラズマでは対象となるエネルギー領域がせまく半導体検出器システムの背景ノイズに影響されて十分に性能を発揮できない。対象プラズマの電子温度が1 keV以上となれば2台並列に用いて8 CH FAST PHAとして実時間的な使用が可能であろう。

4.2 システム全体の適合性

今回の試験システムでは検出器とプリアンプは従来通りの分解能重視型のものをそのまま使用したので、全計数率が100 kcpsを越えると短時間の内にプリアンプが飽和してしまうという不都合が生じた。また入力計数率が押さえられているのでそれに見合った波形整形時定数として今

回は 100 nsec としている。今回使用した波形整形アンプは整形時定数として 20 nsec まで可能であるので、プリアンプ部を改造することで半導体検出器システムとして全計数率 500 kcps 程度までは比較的簡単にもっていけるものと思われる。但し分解能は相当犠牲になるので 1 keV 以上の高温プラズマが主要な対象となるものと考えられる。

本試作 FAST PHA の能力を最大限生かすには、SSD やプラスチックシンチレータ等の高速型検出器に電流型高速プリアンプと高速型波形整形アンプ（整形時定数としては 5 nsec 程度までであること）を用いる必要がある。この様な FAST PHA システムの有効な利用形態の 1 つとしては、核融合反応生成物としての高エネルギープロトンの検出システムが考えられる。これは真空容器の内側に X 線シールドなしで SSD を設置する必要があるので、高線量背景 X 線の存在下でプロトン検出の効率低下を最小限に押さえ、高精度の測定を可能とするものである。

5. ま と め

今回試作したウインドウ型マルチ弁別器方式の FAST PHA は当初設定した開発目標はほぼ達成できたと評価できるが、これを最大限使いこなすにはシステムを構成する検出器やプリアンプ、波形整形アンプ等についても高計数率化対策を徹底的に行う必要がある。但し、最大計数率よりはるかに低い計数率で使用する場合でも本 FAST PHA を使用すればデッドタイム補正は不用となりパイルアップ率も問題とならない程度に押さえることが可能となるのでシステム全体を簡素化できる利点は残る。今回の試作開発品で実証できた特長は以下の通りにまとめられる。

(1) 計数率は最大 20 Mcps まで可能である。

これはデッドタイムを 50 nsec に設定していることにより決っている。

(2) 最小パルス幅は 15 nsec まで受けけるので、パイルアップ率 1% レベルに相当する計数率は 670 kcps となり、この程度の計数率までは補正なしで使用可能である。

(3) 振幅弁別レベルを夫々個別にデジタル値で計算機から設定できる。

(4) リアルタイム的な使用方法に適している。

これは必要な情報が直接得られるように個々のウインドウ特性を別個に設定可能なため、余分な処理時間を必要としないことによる。

他方問題点として残った項目は以下の通りであり、現在考えられる対応策を同時に示す。

(1) 微分直線性が良くない。

ウインドウ設定後、ウインドウ特性の較正を行う必要がある。

(2) 今回の試作開発品ではウインドウ幅を最小値に近い所に設定した時には計数効率が低下する。カスケード型弁別器方式とすれば問題はなくなるものと考えられ、100 CH 程度の FAST PHA も構成可能である。

回は 100 nsec としている。今回使用した波形整形アンプは整形時定数として 20 nsec まで可能であるので、プリアンプ部を改造することで半導体検出器システムとして全計数率 500 kcps 程度までは比較的簡単にもっていけるものと思われる。但し分解能は相当犠牲になるので 1 keV 以上の高温プラズマが主要な対象となるものと考えられる。

本試作 FAST PHA の能力を最大限生かすには、SSD やプラスチックシンチレータ等の高速型検出器に電流型高速プリアンプと高速型波形整形アンプ（整形時定数としては 5 nsec 程度までであること）を用いる必要がある。この様な FAST PHA システムの有効な利用形態の 1 つとしては、核融合反応生成物としての高エネルギープロトンの検出システムが考えられる。これは真空容器の内側に X 線シールドなしで SSD を設置する必要があるので、高線量背景 X 線の存在下でプロトン検出の効率低下を最小限に押さえ、高精度の測定を可能とするものである。

5. ま と め

今回試作したウインドウ型マルチ弁別器方式の FAST PHA は当初設定した開発目標はほぼ達成できたと評価できるが、これを最大限使いこなすにはシステムを構成する検出器やプリアンプ、波形整形アンプ等についても高計数率化対策を徹底的に行う必要がある。但し、最大計数率よりはるかに低い計数率で使用する場合でも本 FAST PHA を使用すればデッドタイム補正は不用となりパイルアップ率も問題とならない程度に押さえることが可能となるのでシステム全体を簡素化できる利点は残る。今回の試作開発品で実証できた特長は以下の通りにまとめられる。

(1) 計数率は最大 20 Mcps まで可能である。

これはデッドタイムを 50 nsec に設定していることにより決っている。

(2) 最小パルス幅は 15 nsec まで受けけるので、パイルアップ率 1% レベルに相当する計数率は 670 kcps となり、この程度の計数率までは補正なしで使用可能である。

(3) 振幅弁別レベルを夫々個別にデジタル値で計算機から設定できる。

(4) リアルタイム的な使用方法に適している。

これは必要な情報が直接得られるように個々のウインドウ特性を別個に設定可能なため、余分な処理時間を必要としないことによる。

他方問題点として残った項目は以下の通りであり、現在考えられる対応策を同時に示す。

(1) 微分直線性が良くない。

ウインドウ設定後、ウインドウ特性の較正を行う必要がある。

(2) 今回の試作開発品ではウインドウ幅を最小値に近い所に設定した時には計数効率が低下する。カスケード型弁別器方式とすれば問題はなくなるものと考えられ、100 CH 程度の FAST PHA も構成可能である。

謝 辞

本試作開発を進めるにあたっては、基本構想から試作器製作の段階においてその目的とする所はJT-60装置用計測機器の開発の一部として始められたものであり、大型トカマク開発部の鈴木康夫JT-60第3開発室長、吉川允二次長、苫米地顕部長をはじめとする各氏には常に有益な御意見、御指導をいただいたことを感謝いたします。試作器の設計・製作についてはエレクトロニクス課の猪俣新次氏及び熊原忠士主任研究員に御尽力いただき、JFT-2プラズマによるデータ収集にも御協力いただいたことを感謝いたします。JFT-2プラズマによる実験データ収集にあたってはプラズマ実験研究室の河上知秀氏をはじめとする各氏および装置技術管理室の各氏に御協力・御助力をいただいたことを感謝いたします。本開発試験遂行にあたって常に有益な御意見、御指導をいただいた核融合研究部の田中裕二プラズマ実験研究室長、田中正俊次長、小幡行雄部長と磯康彦核融合研究開発センター所長、森茂理事に深く感謝の意を表わします。

第1表 波高分析器 (PHA) の方式比較

(1) ウィルキンソン型 (SLOW PHA)

従来一般的に用いられているもので、ピーク保持回路に積分型 ADC を組合せたものである。

(2) マルチ弁別器型 (FAST PHA)

(a) ウィンドウ型

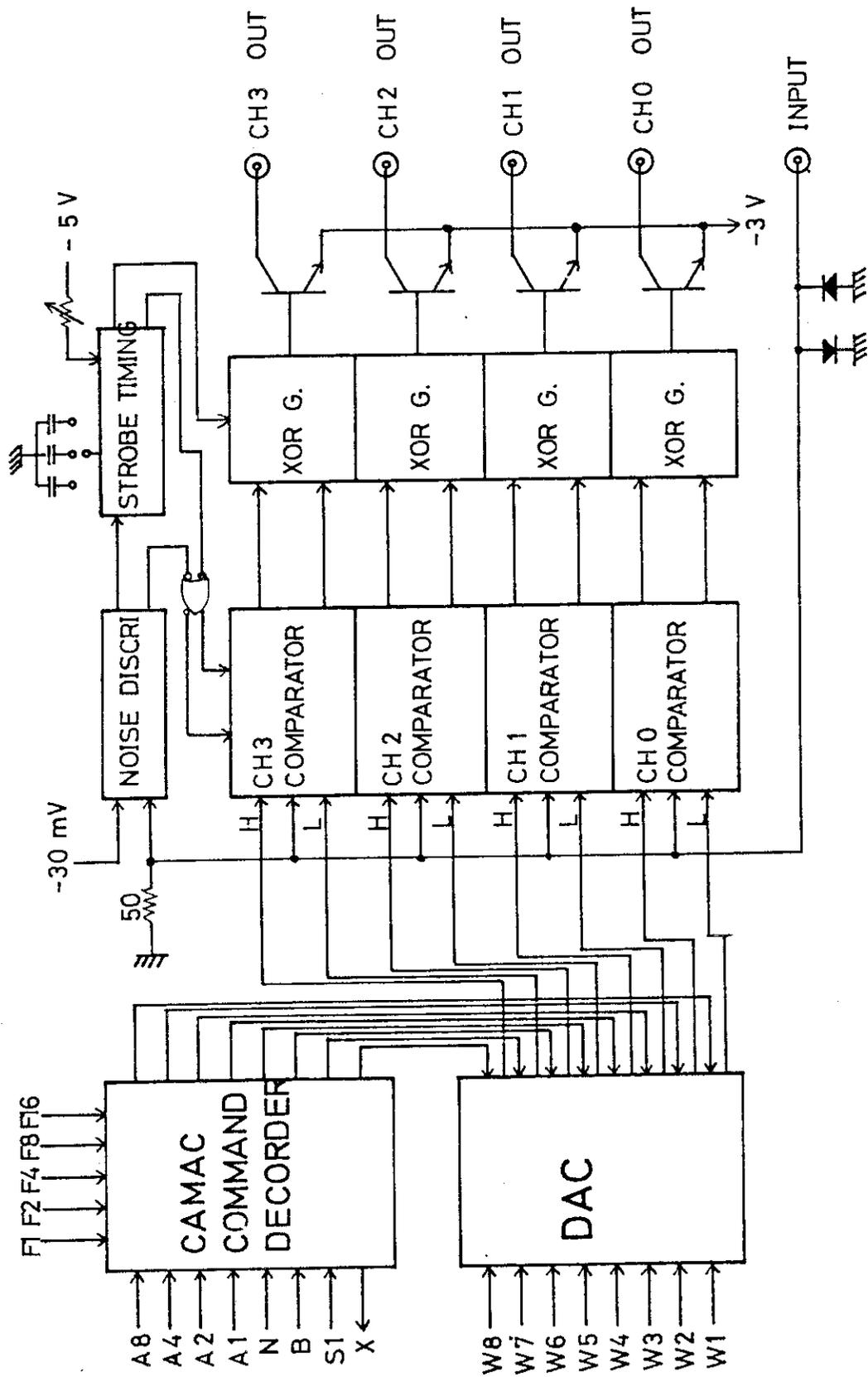
各チャンネル独立に下側弁別器と上側弁別器を有するものであり、シングルチャンネルアナライザ (SCA) を並列に使用する。

(b) カスケード型

下側弁別器とスケーラの組合せを必要なチャンネル数並べて、各チャンネル出力としては差信号で取出す。

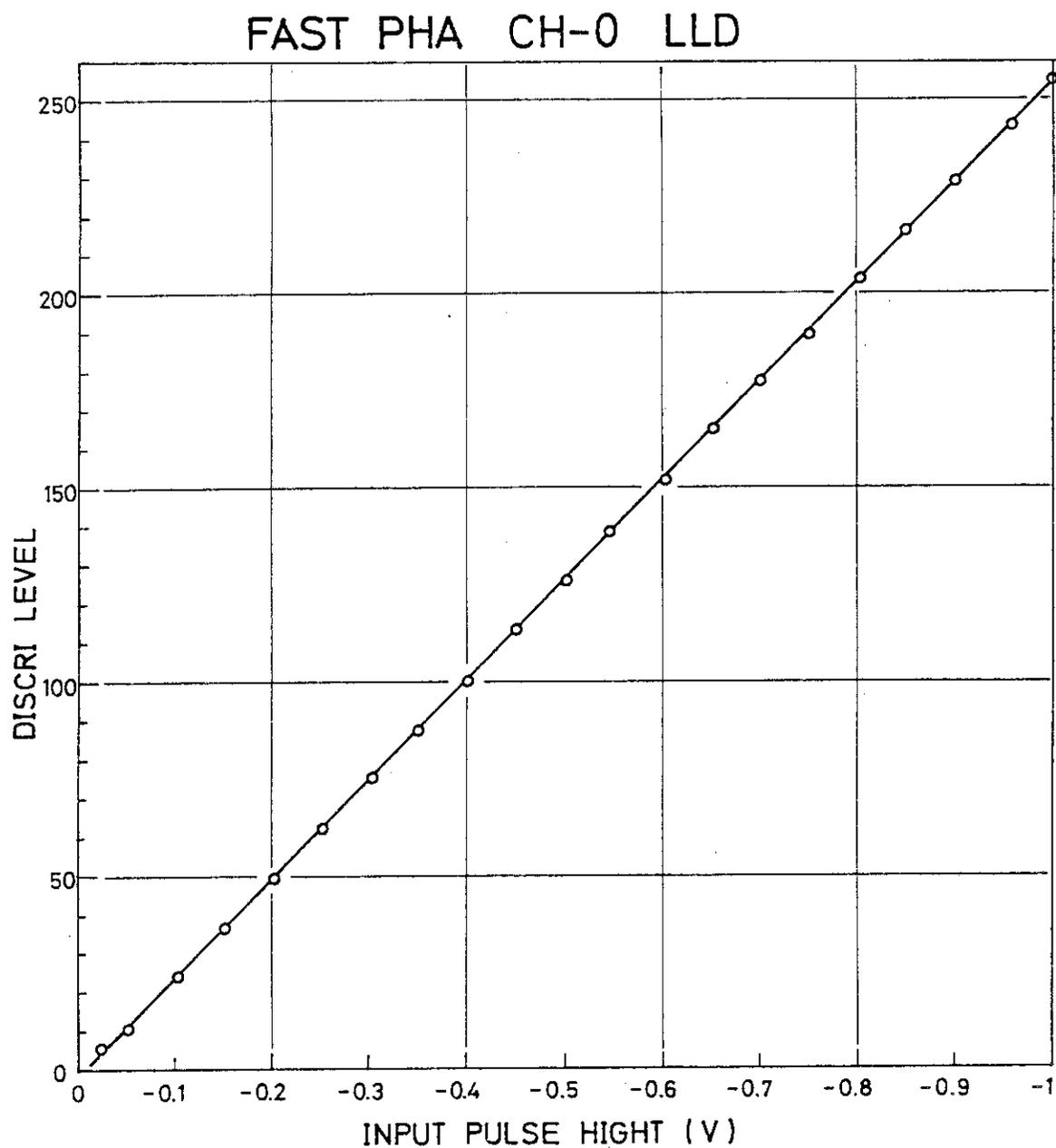
第2表 高速波高分析器性能仕様

- 入力信号 振 幅 $-30\text{ mV} \sim -1\text{ V}$
パルス幅 15 nsec 以上
インピーダンス $50\ \Omega$
- 波高分析レベル設定 $0 \sim -1\text{ V}$ を 8bit デジタルデータで設定可能
- 出力信号 振 幅 -0.7 V
パルス幅 5 nsec
- 最高繰返し率 20 MHz
- ダブルパルス分解能 (Dead Time) 50 nsec
- 入力・出力間遅延 25 nsec
- ストローブタイミング $5 \sim 1600\text{ nsec}$ 可変
- 形 状 CAMAC 1 幅ユニット

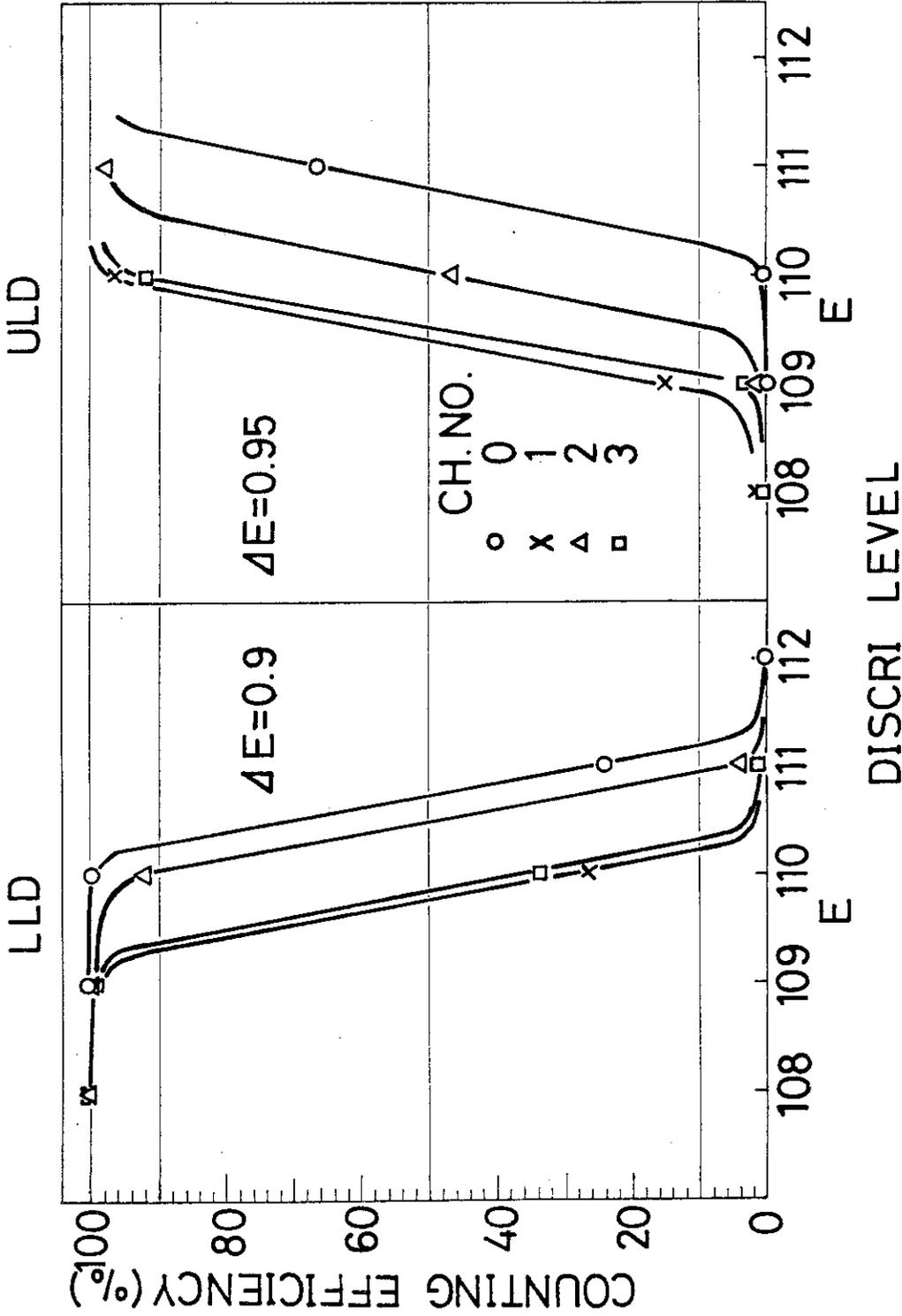


FAST 4-CH ANALYZER

第1図 高計数率4チャンネル波高分析器の構成図



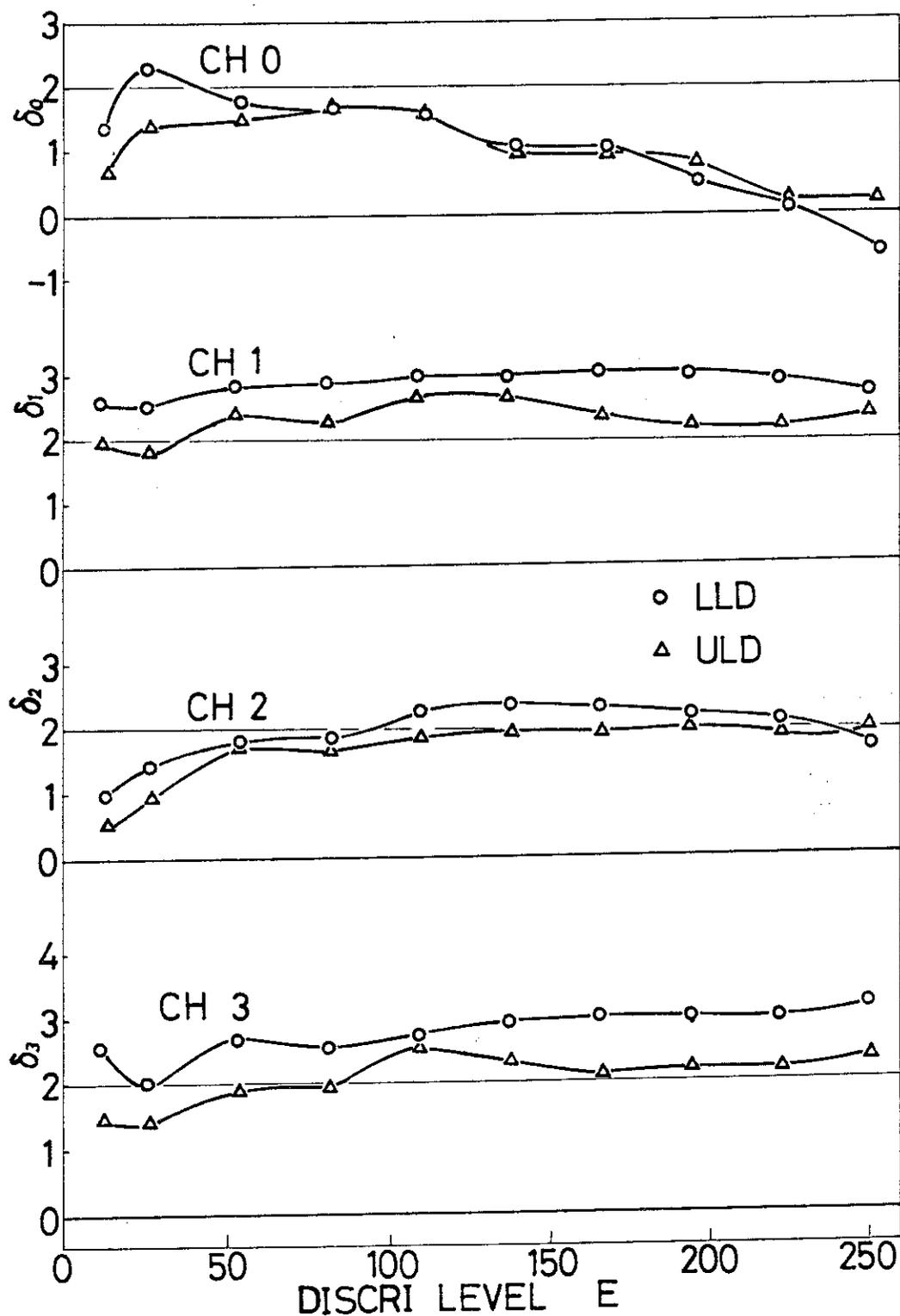
第2図 試作高計数率波高分析器の積分直線性特性図
 横軸：入力試験パルスの波高値
 縦軸：第0チャンネルの下側弁別器のデジタル設定値



第3図 試作高計数率波高分析器の弁別特性

横軸：下側弁別器 (LLD) と上側弁別器 (ULD) のデジタル設定値

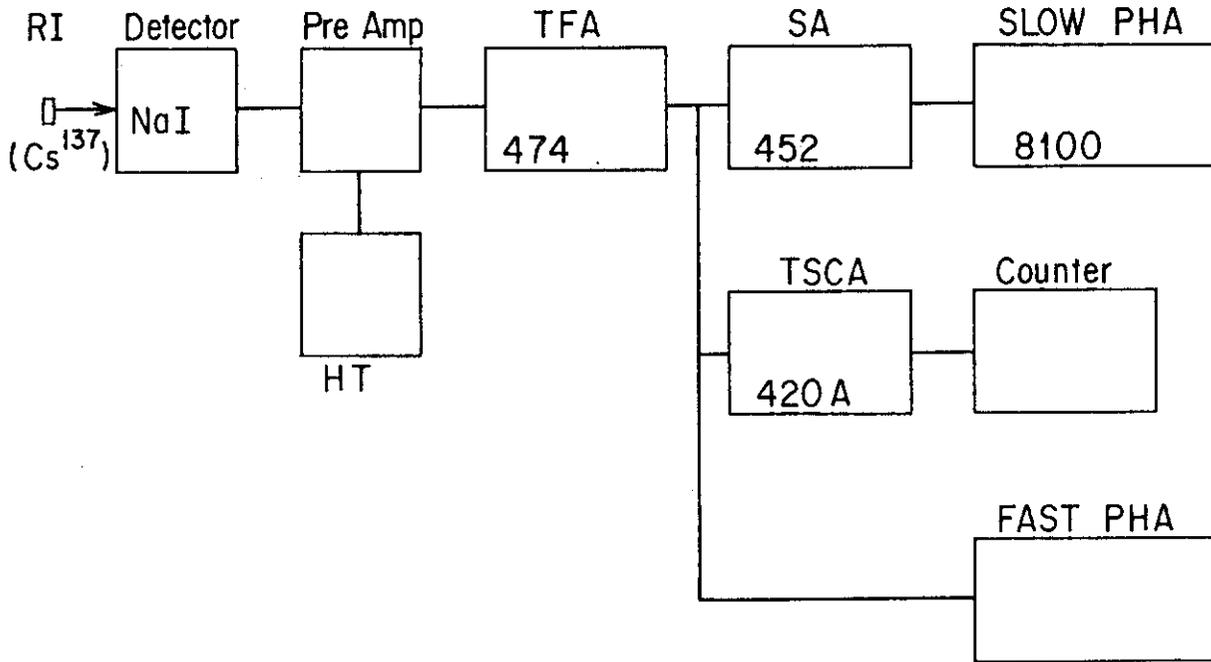
縦軸：計数効率 (標準パルス入力数に対する弁別計数の百分比)



第4図 試作高計数率波高分析器の微分直線性特性図

横軸：弁別器のデジタル設定値

縦軸：実測値と設定値の差 (δ)



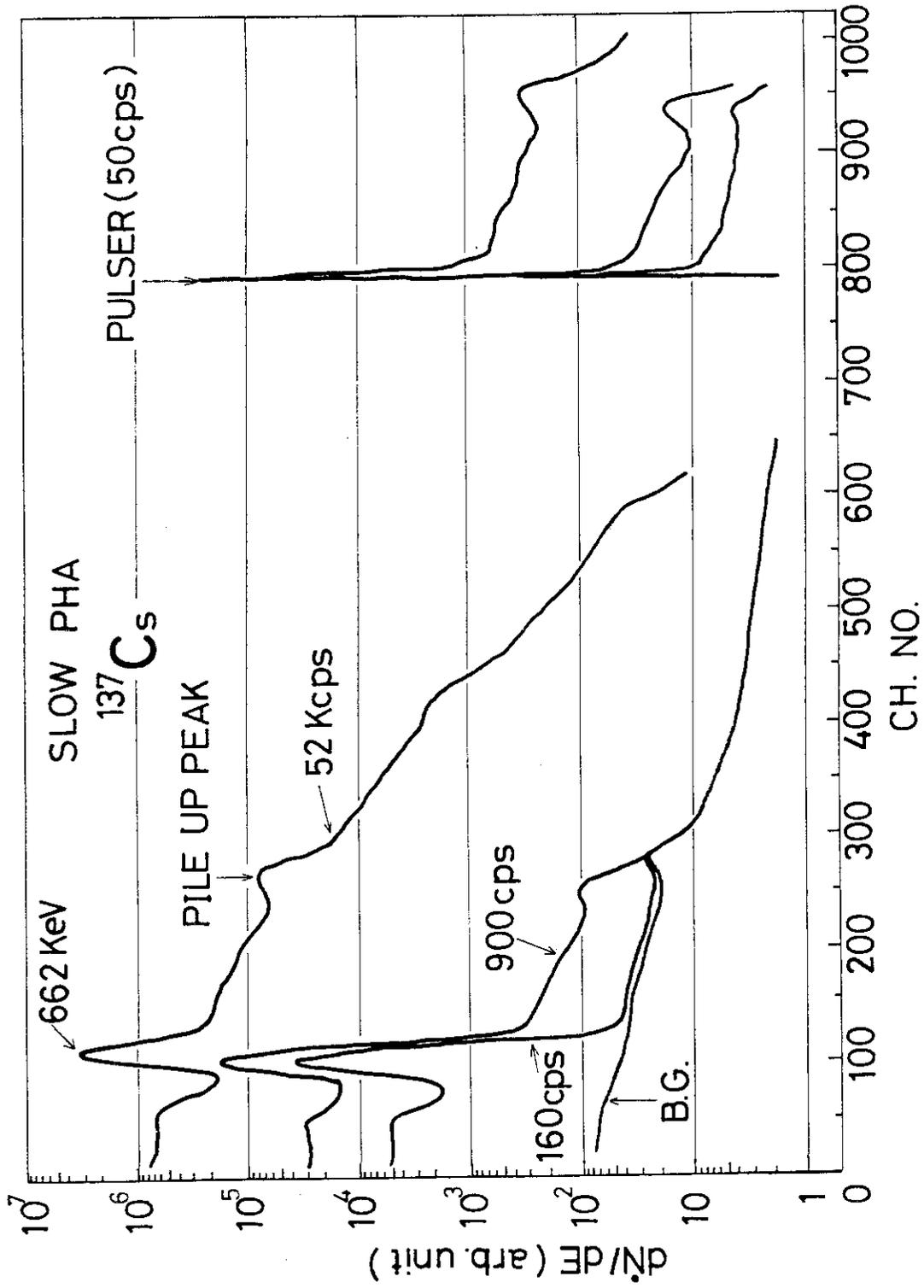
第5図 パイルアップ特性測定ブロック構成図

HT : 高圧電源

TFA : 高速型波形整形増幅器

SA : 低速型波形整形増幅器

TSCA : シングル波高分析器

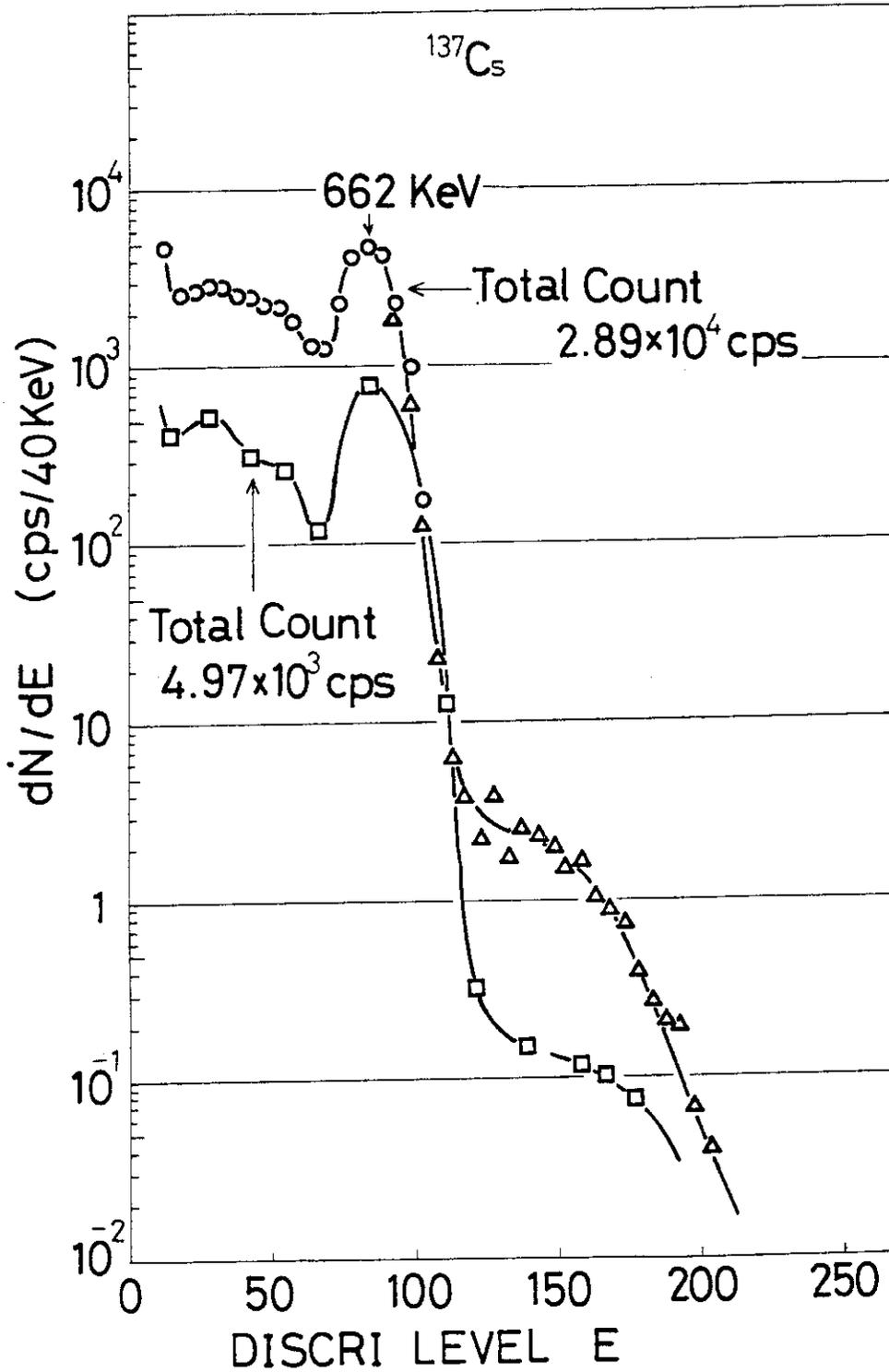


第6図 SLOW PHA 系の波高分析図

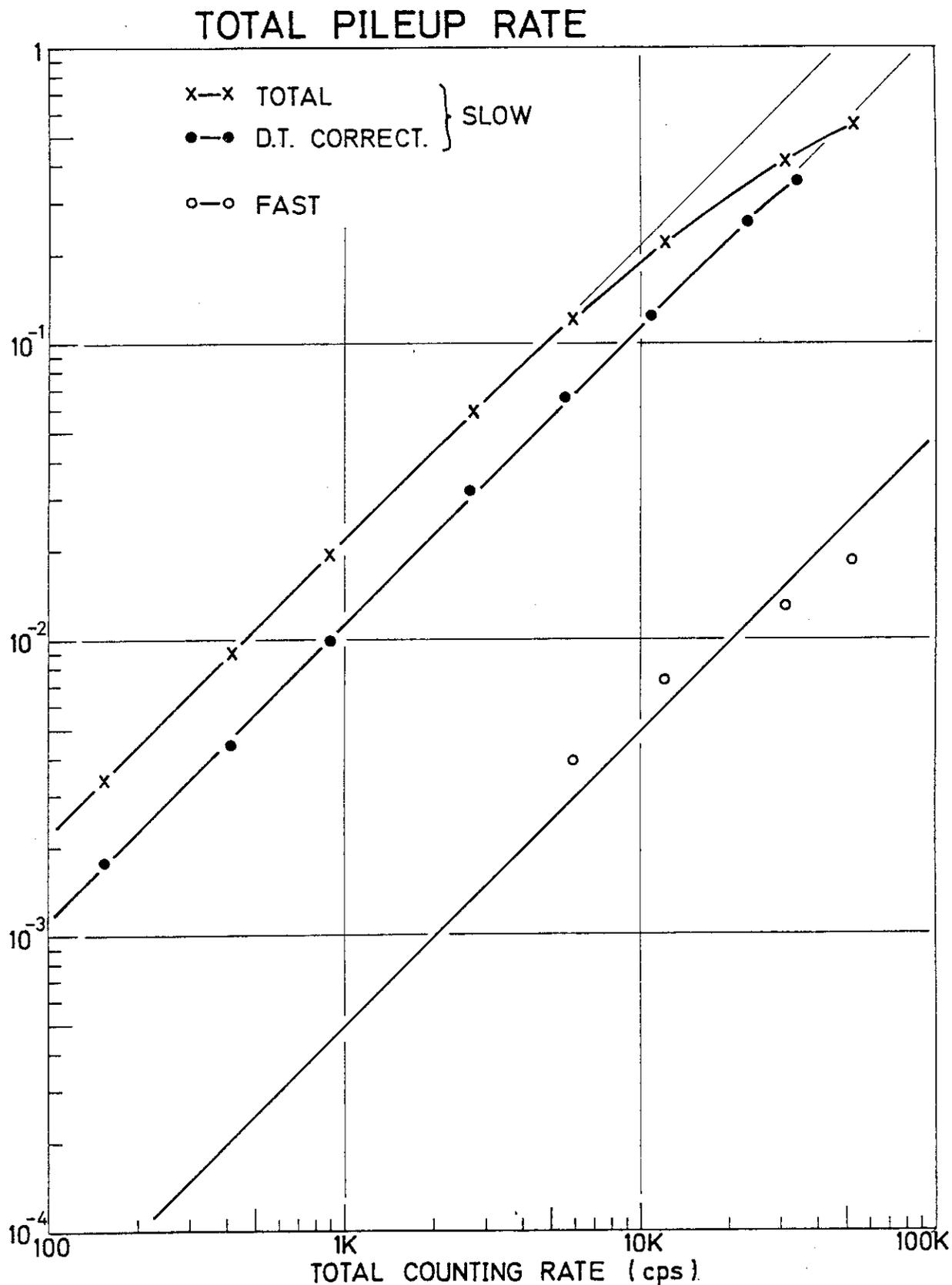
横軸：分析エネルギー値 (チャンネル数で示す)

縦軸：各波高値毎の計数率

FAST PHA



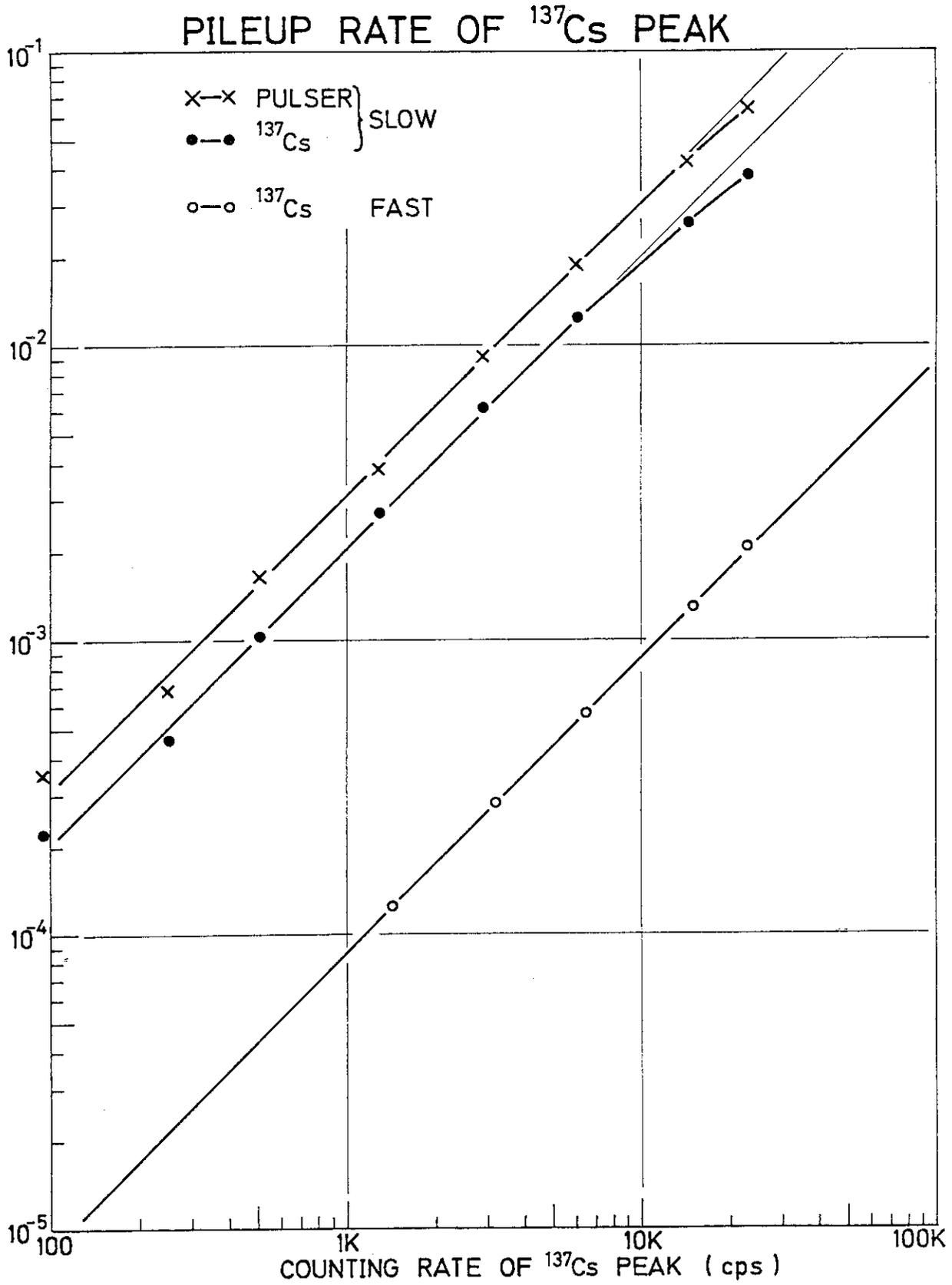
第7図 FAST PHA 系の波高分析図
 横軸：分析エネルギー値（弁別器のデジタル設定で示す）
 縦軸：一定のウィンドウ幅で規格化した計数率



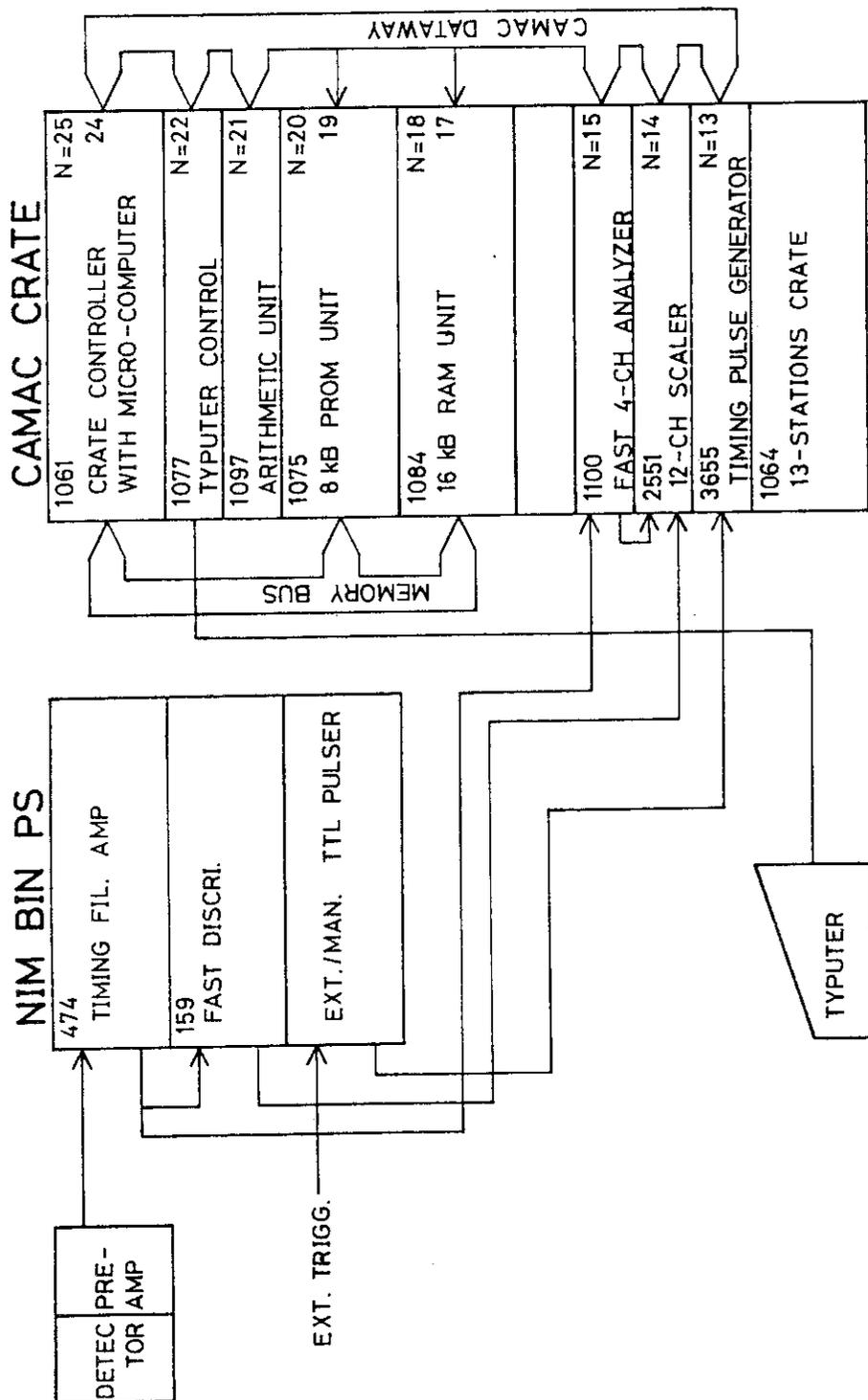
第8図 全計数率のパイルアップ特性

横軸：真の全計数率。但し黒丸印については SLOW PHA 系のデッド
 タイムを補正した計数率を示す。

縦軸：パイルアップ率

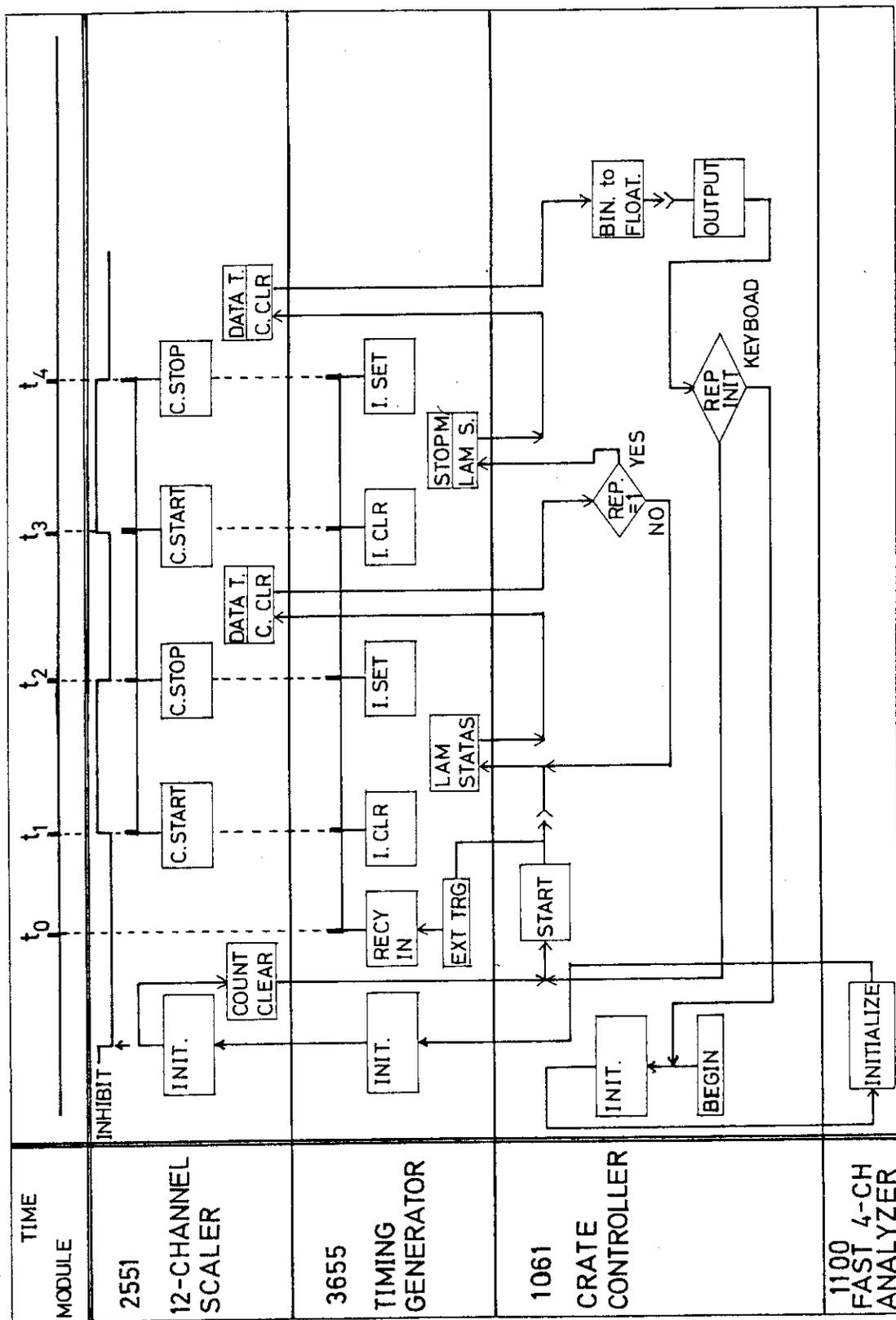


第9図 ^{137}Cs 線源の 662 keV ピークに対するパイルアップ特性
 横軸： ^{137}Cs ピーク計数率
 縦軸： ^{137}Cs ピークのパイルアップ率

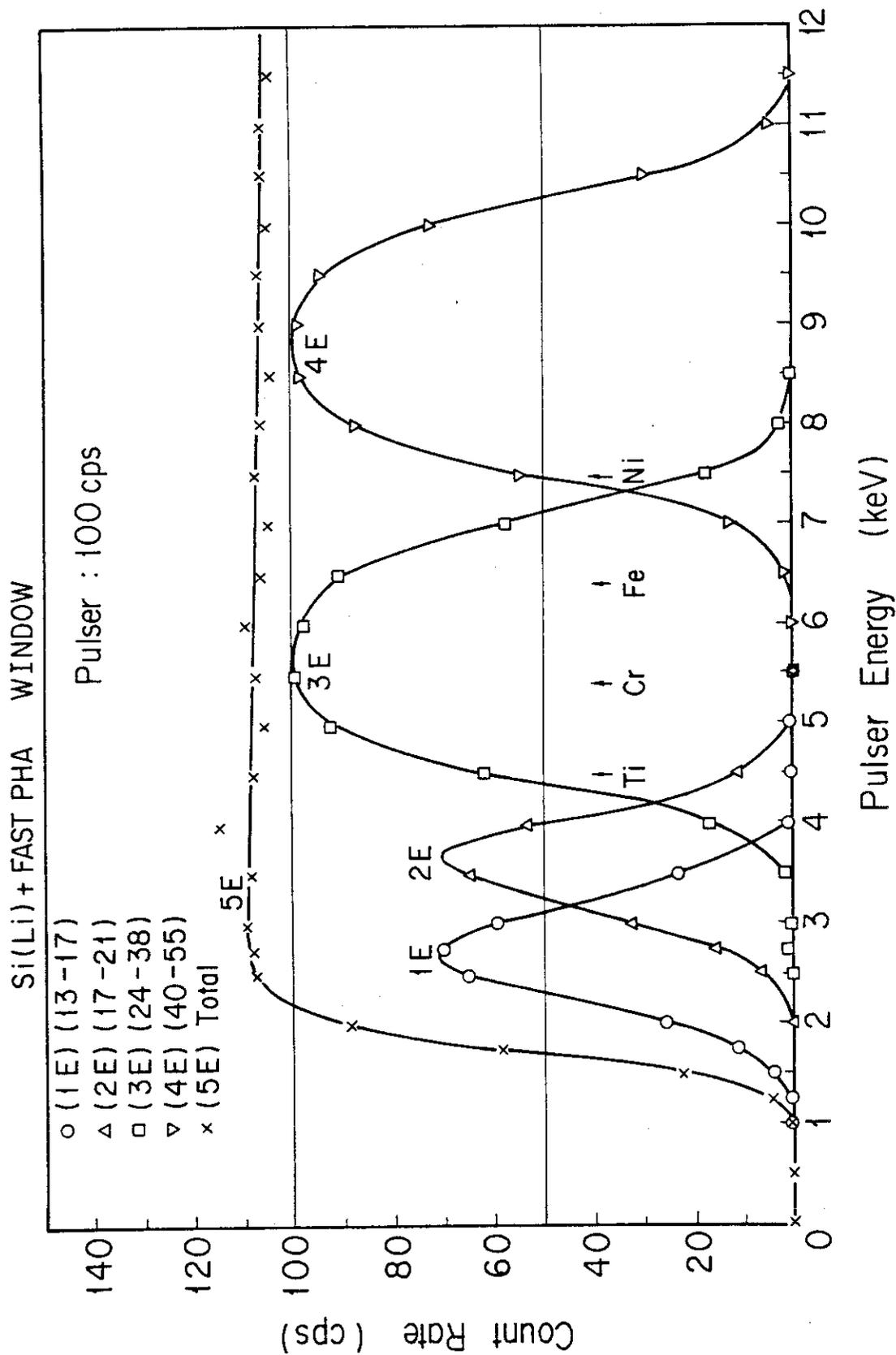


4-CH FAST PHA SYSTEM

第10図 FAST PHA によるJFT-2 プラズマの軟X線計測系のブロック図



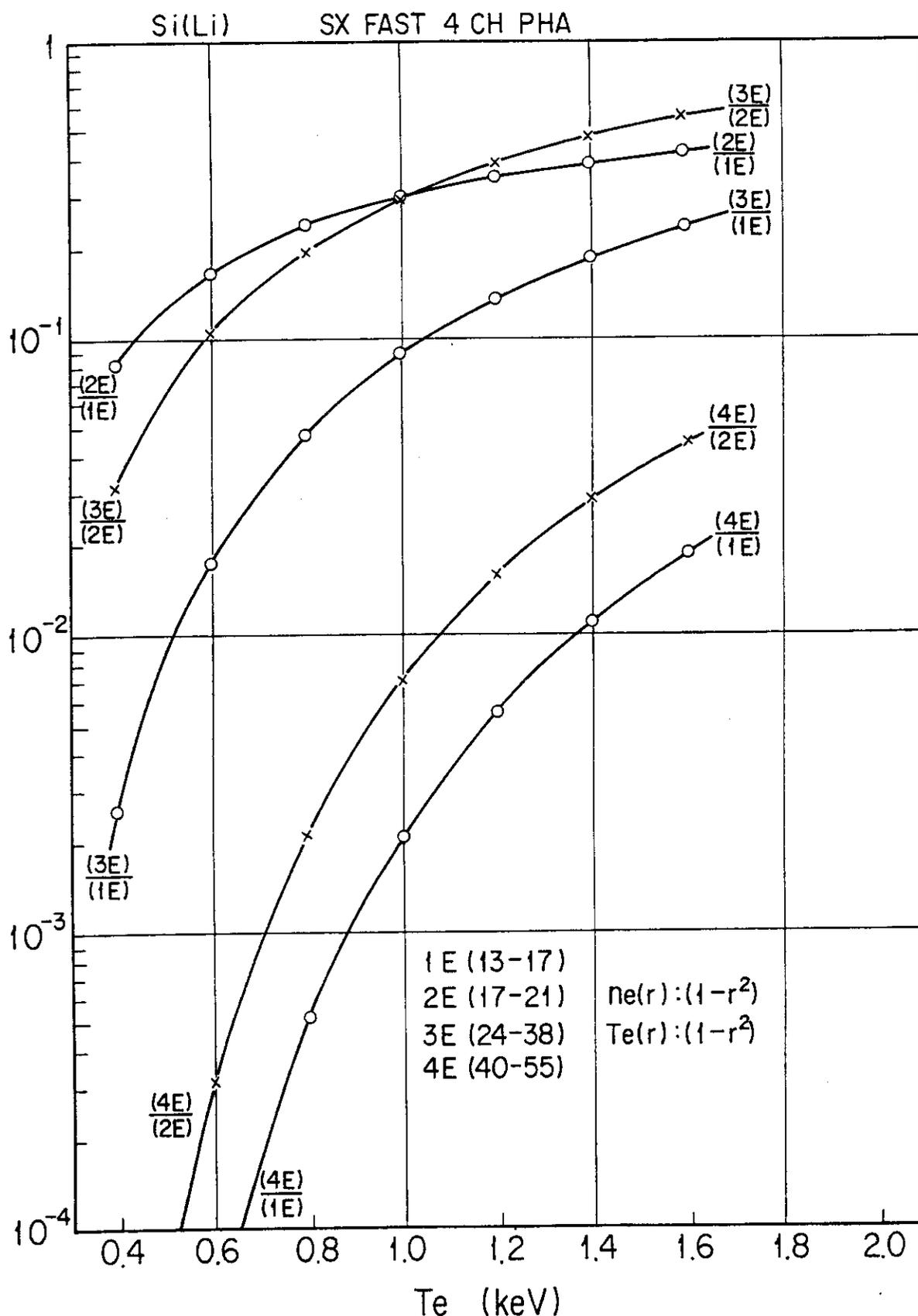
第11図 FAST PHA のデータ収集動作タイムチャート
 t_0 において外部トリガー信号で起動し、 $t_1 \sim t_2$ でデータ収集、 $t_2 \sim t_3$ でデータ転送を指定回数より1回少ない回数繰返し、最後に $t_3 \sim t_4$ でデータ収集をしてから収集データをまとめて出力する。



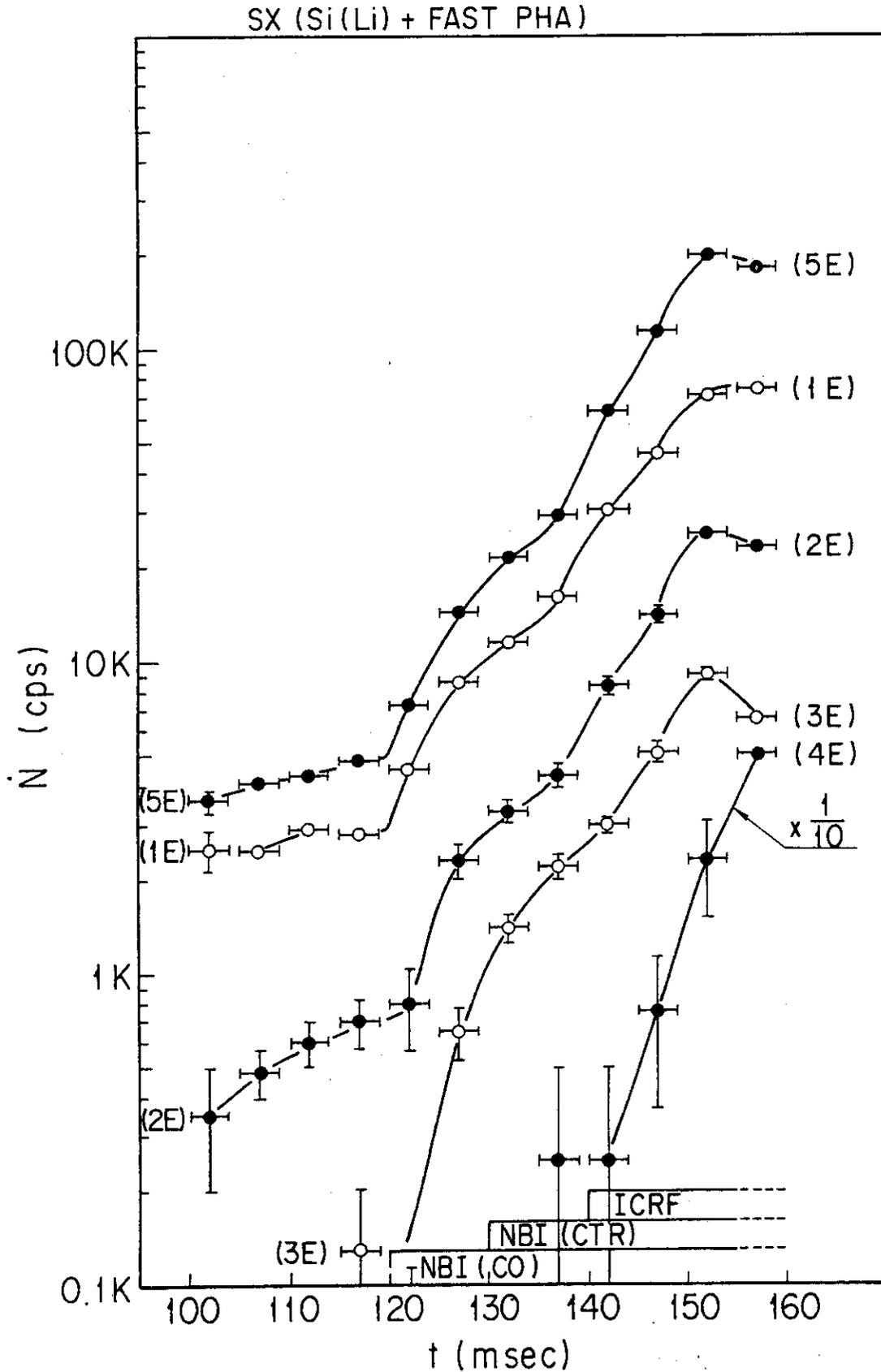
第12図 JFT-2 プラズマでの FAST PHA による軟 X 線計測系のウインドウ特性

横軸：エネルギー校正したパルサー出力波高値

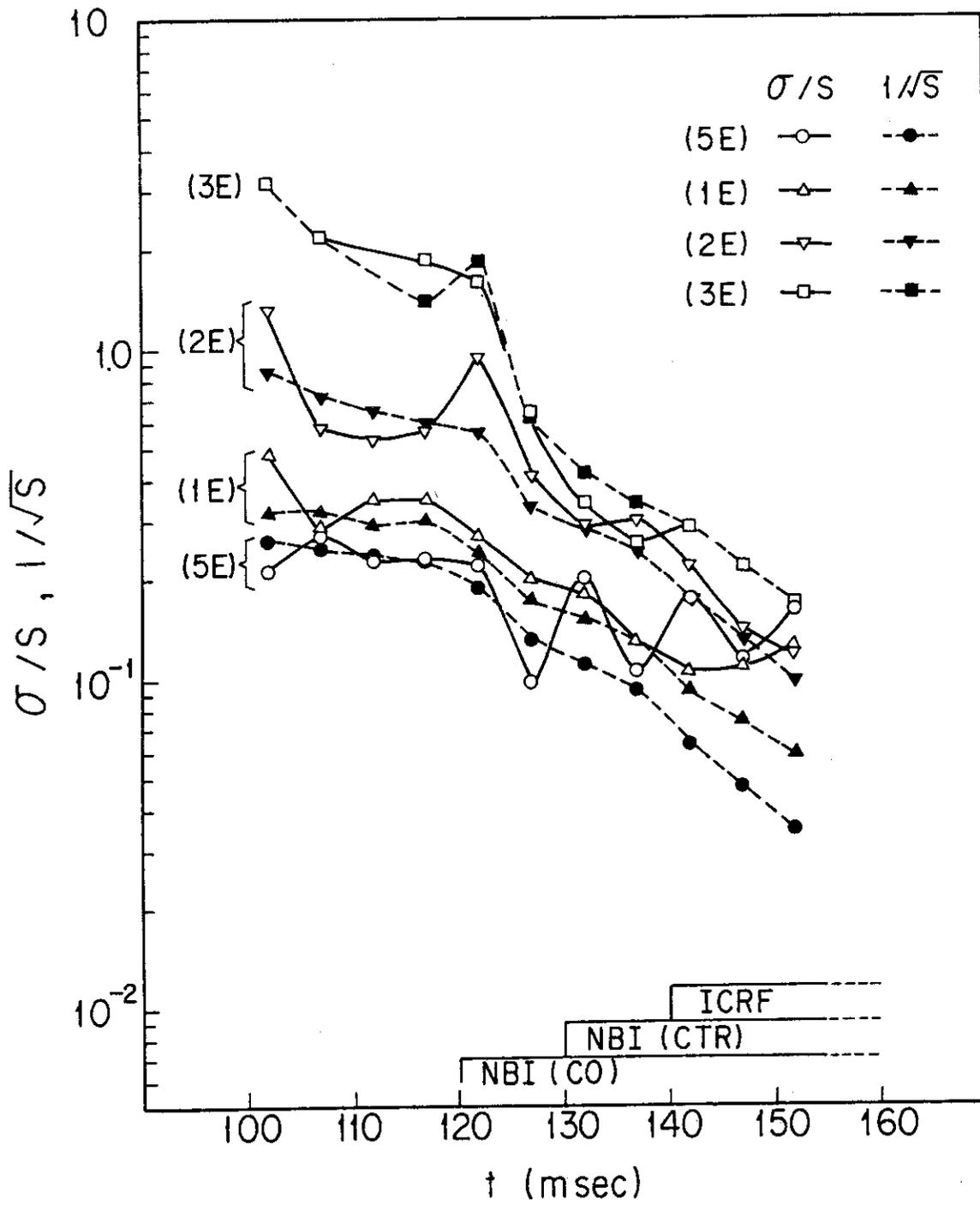
縦軸：標準パルサー入力（100 cps に設定）に対する各ウインドウ毎の出力計数値



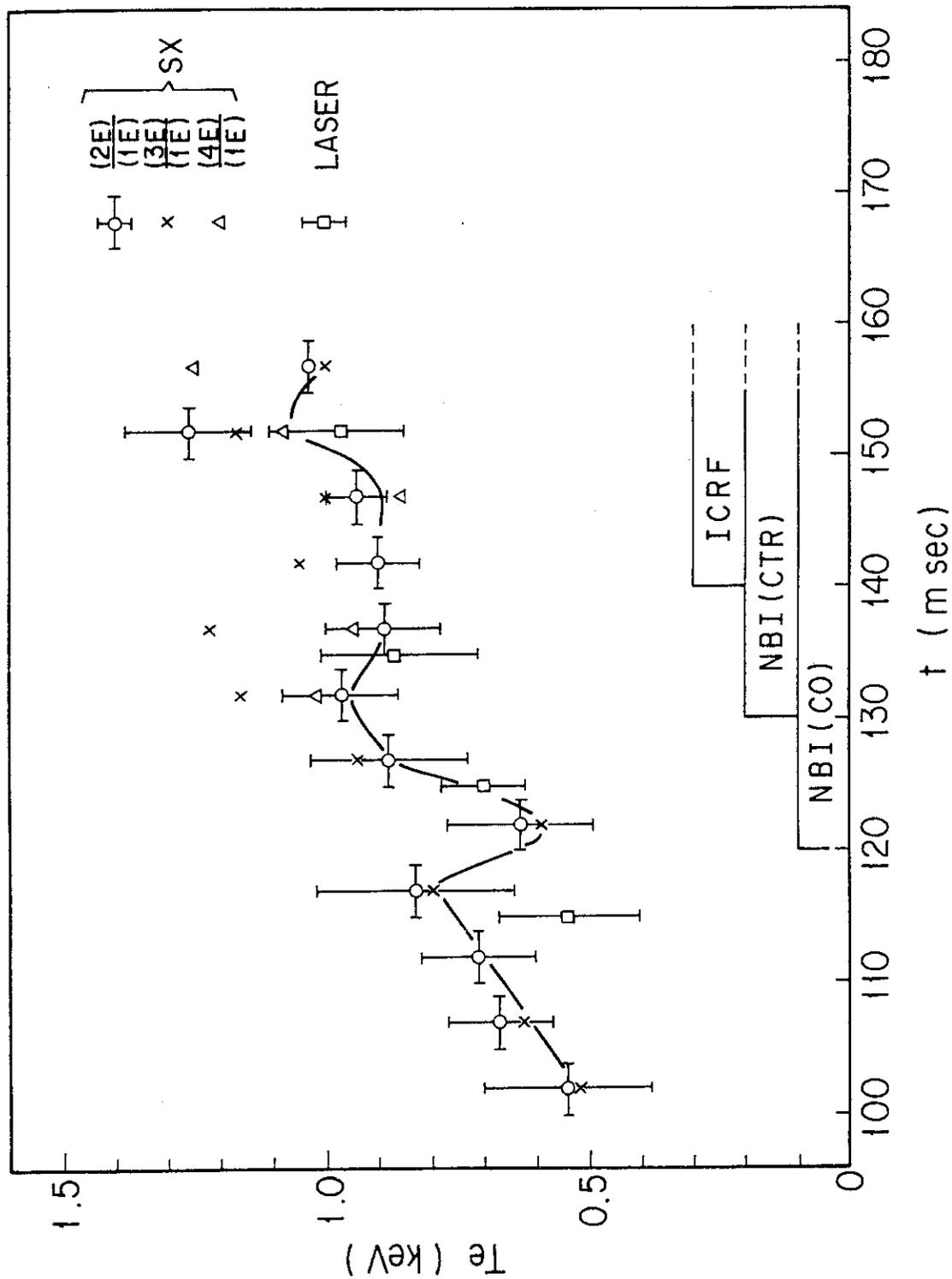
第13図 ウィンドウ出力比の電子温度依存性
 横軸：プラズマ中心の電子温度
 縦軸：ウィンドウ出力比の計算値



第14図 JFT-2プラズマにおける軟 X 線スペクトルの測定例
 120msec まではジュール加熱のみであり、それ以後10
 msec 毎に NBI の電流方向入射 (CO), 反電流方向入
 射 (CTR), ICRF と加熱入力を増加している。



第15図 軟 X 線測定値の誤差評価
 $1/\sqrt{S}$: 統計的ばらつきの規格化した推定値
 σ/S : n回平均のばらつきの標準偏差 (実験値)



第16図 軟X線による電子温度評価
比較のためにレーザー散乱法による電子温度の
測定値を四角印で示す。