

JAERI - M
85-005

トカマクプラズマ用128チャンネル高速波
高分析器の開発

1985年2月

川島寿人・的場 徹・小川俊英・河上知秀

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

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。
入手の問合わせは、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 Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura,
Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1985

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 高野高速印刷

トカマクプラズマ用 128 チャンネル
高速波高分析器の開発

日本原子力研究所東海研究所核融合研究部
川島寿人・的場 徹・小川俊英・河上知秀

(1985年1月10日受理)

トカマクプラズマにおけるX線等のエネルギースペクトル計測用として、通常のマルチチャンネル波高分析器に比べて、高い計数率で波高分布の時間変化を測定できる高速マルチチャンネルアナライザを試作した。本試作器の開発目的は以下の通りである。

1. 最大計数率が 4 M cps 以上で 10 ms の時間分解能で計測できること。
2. エネルギー分解能は、特性 X 線の識別が可能なこと。
3. 計算機処理が可能なこと。

J F T - 2 Mにおいて半導体検出器を使用して軟 X 線スペクトルを試験的に測定した結果、当初の計画通りの性能を確認することができた。

The Development of 128 ch Fast Multi Channel
Pulse Height Analyzer for a tokamak plasmas

Hisato Kawashima, Tohru Matoba, Toshihide Ogawa
and Tomohide Kawakami

Department of Thermonuclear Fusion Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received January 10, 1985)

A high counting rate multi channel pulse height analyzer was developed and tested to measure the detailed time evolution of X-ray energy spectrum radiated from a tokamak plasmas. Main developing objects of this analyzer are as follows.

1. The maximum counting rate and the minimum time resolution are 4 Mcps and 10 ms, respectively.
2. The energy resolution has ability to distinguish the characteristic X-ray line.
3. Computer has to be used for operating system.

This fast multi channel analyzer is using to measure the Soft X-ray spectrum on JFT-2M tokamak, and is confirmed to be useful for a practical measuring system.

Keywords: Fast Multi Channel Pulse Height Analyzer, Soft X-ray Energy Spectrum, JFT-2M Tokamak, Energy Resolution

目 次

1. はじめに.....	1
2. 128 チャンネル高速波高分析器の開発.....	1
2.1 回路構成.....	1
2.2 基本特性.....	2
3. JFT-2M プラズマにおける軟X線計測系での実験結果.....	3
4. 検討.....	4
4.1 回路素子.....	4
4.2 エネルギー分解能.....	4
5. まとめ.....	5
謝 辞.....	5
参考文献.....	6

Contents

1. Introduction	1
2. The development of 128 ch fast multichannel analyzer.....	1
2.1 Circuit Diagram.....	1
2.2 Basic characteristics	2
3. Test results of soft X-ray measurements in JFT-2M plasma.....	3
4. Discussion	4
4.1 Circuit elements	4
4.2 Energy resolution	4
5. Conclusion	5
Acknowledgement	5
References	6

1. はじめに

トカマクプラズマのエネルギー波高分析を行うときに特に必要とされる波高分析器（以下 P H A と記す）は、第 1 に特性 X 線を同定できるような分解能を有すること、第 2 に 1 回の放電で精度の良いデータが得られるような計数率の高いものであることの 2 点である。

現在多く使用されているUILKINSON型のP H A は、分解能、直線性、安定性、コストの面では優れているが、デッドタイムが大きく平均計数率が数 10 Kcps で頭打ちになる欠点がある。

以前に、原研で試作したMULTI-DISCRIM 型のP H A は、¹⁾ デッドタイムが原理的に零で最大計数率を 20 Mcps まで改善できた。反面、波高分解能、積分直線性、コストの面では難があった。

今回ピーク検出アナログデジタル変換回路（A D C）を使用して試作した 128 チャンネル高速波高分析器（以下FAST MCA と記す）は、上記 2 種の優れた面を取り入れてトカマクプラズマ計測用としてバランスのとれた中間機種となるものである。

2 節では FAST MCA 開発の目的、回路構成、基本特性について述べ、3 節では J F T - 2 M プラズマを使用した試験結果、4 節ではその検討について述べる。

2. 128 チャンネル高速波高分析器 (FAST MCA) の開発

試作した FAST MCA は、原研エレクトロンクス課と共同で開発したもので、主な開発目的は以下の通りである。²⁾

1. 最大計数率が 4 Mcps 以上で、10 ms の時間分解能で計測できること。
2. エネルギー分解能は、特性 X 線の識別が可能のこと。
3. 計算機による操作が可能のこと。

一般の MCA に比べて、チャンネル数及びエネルギー分解能は必要最小限として、特に高い計数率を目指したものとなっている。

2.1 回路構成

基本回路構成を第 1 図に示す。また全体の製作仕様値を第 1 表に示すが本 FAST MCA は、3 幅の CAMAC モジュールにタイマ及びダブルバッファメモリ、ピーク検出 A D C、及びレベルモニタをおさめたもので、高速化のため主要素子には E C L を使用している。整形されたパルスが入力されると、L L D、U L D によって波高範囲が弁別され、ピーク保持が行われる。ピークが検出されると、微分直線性を改善するためのスキャニングオフセット電圧と共に 8 ビットのフラッシュ型 A D C によってアナログ・デジタル変換が行われる。この出力データはデジタル演算によりオフセット電圧が減算されパルス波高に対応したアドレスデータが得られる。メモリ部分はこのアドレスデータに対応するメモリ内容を読み出しこの値に 1 を加えて同じアドレスに書き込む。タイマがプリセット値に達するともう一方のメモリに切り替えられてデータ収集とヒストグラム作成が継続する。データ収集の終ったメモリ内容は、CAMAC データウェイを通して順次外部に読み出される。このメモリは次のタイ

1. はじめに

トカマクプラズマのエネルギー波高分析を行うときに特に必要とされる波高分析器（以下 P H A と記す）は、第 1 に特性 X 線を同定できるような分解能を有すること、第 2 に 1 回の放電で精度の良いデータが得られるような計数率の高いものであることの 2 点である。

現在多く使用されている ウィルキンソン型 の P H A は、分解能、直線性、安定性、コストの面では優れているが、デッドタイムが大きく平均計数率が数 10 Kcps で頭打ちになる欠点がある。

以前に、原研で試作した MULTI-DISCRIM 型の P H A ¹⁾ は、デッドタイムが原理的に零で最大計数率を 20 Mcps まで改善できた。反面、波高分解能、積分直線性、コストの面では難があった。

今回ピーク検出アナログデジタル変換回路（A D C）を使用して試作した 128 チャンネル高速波高分析器（以下 FAST MCA と記す）は、上記 2 種の優れた面を取り入れてトカマクプラズマ計測用としてバランスのとれた中間機種となるものである。

2 節では FAST MCA 開発の目的、回路構成、基本特性について述べ、3 節では J F T - 2 M プラズマを使用した試験結果、4 節ではその検討について述べる。

2. 128 チャンネル高速波高分析器（FAST MCA）の開発

試作した FAST MCA ²⁾ は、原研エレクトロンクス課と共同で開発したもので、主な開発目的は以下の通りである。

1. 最大計数率が 4 Mcps 以上で、10 ms の時間分解能で計測できること。
2. エネルギー分解能は、特性 X 線の識別が可能のこと。
3. 計算機による操作が可能のこと。

一般の M C A に比べて、チャンネル数及びエネルギー分解能は必要最小限として、特に高い計数率を目指したものとなっている。

2.1 回路構成

基本回路構成を第 1 図に示す。また全体の製作仕様値を第 1 表に示すが本 FAST MCA は、3 幅の CAMAC モジュールにタイマ及びダブルバッファメモリ、ピーク検出 A D C、及びレベルモニタをおさめたもので、高速化のため主要素子には E C L を使用している。整形されたパルスが入力されると、L L D、U L D によって波高範囲が弁別され、ピーク保持が行われる。ピークが検出されると、微分直線性を改善するためのスキャニングオフセット電圧と共に 8 ビットのフラッシュ型 A D C によってアナログ・デジタル変換が行われる。この出力データはデジタル演算によりオフセット電圧が減算されパルス波高に対応したアドレスデータが得られる。メモリ部分はこのアドレスデータに対応するメモリ内容を読み出しこの値に 1 を加えて同じアドレスに書き込む。タイマがプリセット値に達するともう一方のメモリに切り替えられてデータ収集とヒストグラム作成が継続する。データ収集の終ったメモリ内容は、CAMAC データウェイを通して順次外部に読み出される。このメモリは次のタイ

ムアップによってデータ収集用に切り替えられる。このようにして中断されることなく波高測定が行われ波高分布の時間変化が得られる。

2.2 基本特性

2.2.1 スムージング方式の効果

微分直線性を改善する目的で採用されたものがスキャニングオフセット電圧によるスムージング方式である。従来、波高値基準レベルは0Vに固定してあるのに対し、本方式では可変オフセット電圧となっている。オフセット電圧と信号の足し合わせたものをピーク保持回路に通し、ADCでデジタル値とした後でオフセット電圧分を差し引く。さらにオフセット電圧をスキャンすることによりスキャン幅内で平均化を行うという手法である。

第2図(a), (b)にまず標準パルサー信号のみでスムージング有、無の比較を示す。標準パルサー信号は波高値が極めて安定なため、スムージング無の場合にはFAST MCAの出力は(a)図に示すように1つのチャンネルのみに出る。他方スムージング有の場合には、(b)図のようにFWHM値で約2% (128チャンネル基準で) の拡がりを持ち、これがFAST MCA単体の分解能を意味する。

第3図(a), (b)に⁶⁰Coの標準線源をNaIシンチレータで測定した較正実験におけるスムージング有、無の比較を示すが(a)図は、スムージング無のもので⁶⁰Coの特性 γ 線は明確であるが、それ以下のコンプトンスペクトルには微分直線性の悪いことによるばらつきが目立つ。それに対し(b)図のスムージング有のものは、ばらつきが押さえられて、特にコンプトンエッヂ以下の連続スペクトルの部分がはっきり出ている。またこの場合には、総合的な分解能がFWHM値で約4%となり検出器系の分解能が支配的である。このためFAST MCAのスムージングによる分解能劣化は直接特性 γ 線の拡がりとして現われていない。

2.2.2 積分直線性と微分直線性

積分直線性を第4図(a)に示す。直線性はスムージング無の場合±1.41%，スムージング有の場合、±1.72%といずれも2%以下に押さえられている。

次に微分直線性を第4図(b)に示す。スムージング無の場合最大+4.03%，及び-3.61%とばらつきが目立つ。これに対しスムージング有の場合には微分直線性は±2%以下に改善される。但し分解能については前述したようにスムージングにより約2%に悪化するが、総合的な性能のバランスはスムージング有が最良である。すなわち、通常の実験はスムージング有で使用することとし、スムージング無は特に分解能の高いことを要求されるような特殊な場合のみ使用するのがよい。

2.2.3 パイルアップ特性

第5図に半導体検出器を用いた軟X線計測用のシステムブロック図を示す。このシステムでは同時に全計数率を別途スケーラ系で収集している。FAST MCAのデッドタイムは第1表に示すように250nsec以下である。それに対し波形整形アンプのドウェルタイム(τ_D)は最大波高値のパルスで約500nsecに選んでいるのでパイルアップ特性には主として τ_D が寄与する。

第6図に¹³⁷Cs線源と標準パルサーを用いた場合の実験結果を示す。この場合、検出器としては半導体検出器の代りにNaI(Tl)シンチレータをプリアンプ付で使用している。データとしては標準パ

ルサーの全パイルアップ率、標準パルサーによる ^{137}Cs 特性 γ 線のピークパイルアップ率を示す。全パイルアップ率の実測値から評価した τ_D は約400 nsec となり、パルサーの波高値をフルスケールに近い値に選んでいることから妥当な値と言える。このとき全計数率が100 kcps を超えても全パイルアップ率は数%のオーダーである。

実際のプラズマからの放射スペクトルにおけるパイルアップについては前述のようなパルサーと特性 γ 線ピークによるパイルアップと同等には扱えない。これは、プラズマからの放射スペクトルは低エネルギー成分が圧倒的に多いので、特性 γ 線で得た400 nsec のドウェルタイムよりさらに短い実効的ドウェルタイムとなると予想されることによる。第7図に同一条件プラズマでSi(Li) 半導体検出器を用いてコリメータ径を変化させた場合の実測例を示す。この場合には500 kcps 程度までは変化がなく、600 kcps を超えると急にスペクトルの変形が目立つ。第8図に見掛けの計数率に対する真の計数率の実測値と τ_D を一定と仮定した場合の計算値を示す。プラズマの条件によりややバラツキが見られるが計数率が飽和する（飽和レベルは約900 kcps）まではほぼ300 nsec の τ_D 値で説明できる。これは実測パルスの波高分布が低エネルギー側に集中しているので、前述のパルサーの場合より小さい τ_D となり飽和領域ではより波高値の小さいパルス成分が主要な寄与をしているとして説明できる。第8図には同時に第7図に示したスペクトルの場合の電子温度の評価結果も示すが500 kcps では約10%高く評価され、それ以上の計数率となると急激に評価温度が高くなる。それ故本FAST MCAでプラズマからの軟X線スペクトルをパイルアップの影響を考慮せずに測定できる限界としては最大飽和計数率の約1/2の計数率となる。実際の実験では常時全計数率をモニターして上記の限界値以下で測定することが必要である。このときパイルアップ率としては最大でも14%程度であり、放射量評価上はほとんど問題とならないし、必要があれば補正計算することも可能である。

3. JFT-2Mプラズマにおける軟X線計測系での試験結果

軟X線計測用としては第5図に示すように低エネルギー域（1～20 KeV）で使用可能なSi(Li) 検出器と広いエネルギー範囲（5～200 KeV）で使用可能なGe(I) 検出器の2種の半導体検出器を用いている。これらの検出器用プリアンプは高計数率計測のためにフィードバック抵抗値を小さくしている。この結果今回の実験例ではプリアンプ部においてプラズマ放電中に動作領域を外すことはなかった。今回使用した波形整形アンプは高速形のものであり、最大波高値パルスに対してドウェルタイムで約200 nsec 位まで可能である。但しプリアンプの雑音特性に問題があり、Si(Li) 検出器を使用した場合の最小検出エネルギーレベルを2KeV以下にするためにドウェルタイムで約500 nsec の波形整形を行っている。このときの雑音レベルはパルサー半値幅で約10%となり、FAST MCA固有の分解能2%よりかなり悪い値となる。

FAST MCAの出力は、CAMACデータウェイを通してデータ収集され、計算機処理後スペクトルの図形出力が行われる。

データ収集時間は、FAST MCA内蔵のタイマーで最小10 msec から最大650 sec まで10 msec 単位で設定できる。収集回数は計算機のメモリー容量で決まる値まで任意に設定可能である。

第9図に、NBI加熱プラズマの軟X線エネルギースペクトル測定例を示す。これは9ショットの

ルサーの全パイルアップ率、標準パルサーによる ^{137}Cs 特性 γ 線のピークパイルアップ率を示す。全パイルアップ率の実測値から評価した τ_D は約400 nsec となり、パルサーの波高値をフルスケールに近い値に選んでいることから妥当な値と言える。このとき全計数率が100 kcps を超えても全パイルアップ率は数%のオーダーである。

実際のプラズマからの放射スペクトルにおけるパイルアップについては前述のようなパルサーと特性 γ 線ピークによるパイルアップと同等には扱えない。これは、プラズマからの放射スペクトルは低エネルギー成分が圧倒的に多いので、特性 γ 線で得た400 nsec のドウェルタイムよりさらに短い実効的ドウェルタイムとなると予想されることによる。第7図に同一条件プラズマでSi(Li) 半導体検出器を用いてコリメータ径を変化させた場合の実測例を示す。この場合には500 kcps 程度までは変化がなく、600 kcps を超えると急にスペクトルの変形が目立つ。第8図に見掛けの計数率に対する真の計数率の実測値と τ_D を一定と仮定した場合の計算値を示す。プラズマの条件によりややバラツキが見られるが計数率が飽和する（飽和レベルは約900 kcps）まではほぼ300 nsec の τ_D 値で説明できる。これは実測パルスの波高分布が低エネルギー側に集中しているので、前述のパルサーの場合より小さい τ_D となり飽和領域ではより波高値の小さいパルス成分が主要な寄与をしているとして説明できる。第8図には同時に第7図に示したスペクトルの場合の電子温度の評価結果も示すが500 kcps では約10%高く評価され、それ以上の計数率となると急激に評価温度が高くなる。それ故本FAST MCAでプラズマからの軟X線スペクトルをパイルアップの影響を考慮せずに測定できる限界としては最大飽和計数率の約1/2の計数率となる。実際の実験では常時全計数率をモニターして上記の限界値以下で測定することが必要である。このときパイルアップ率としては最大でも14%程度であり、放射量評価上はほとんど問題とならないし、必要があれば補正計算することも可能である。

3. JFT-2Mプラズマにおける軟X線計測系での試験結果

軟X線計測用としては第5図に示すように低エネルギー域（1～20 KeV）で使用可能なSi(Li) 検出器と広いエネルギー範囲（5～200 KeV）で使用可能なGe(I) 検出器の2種の半導体検出器を用いている。これらの検出器用プリアンプは高計数率計測のためにフィードバック抵抗値を小さくしている。この結果今回の実験例ではプリアンプ部においてプラズマ放電中に動作領域を外すことはなかった。今回使用した波形整形アンプは高速形のものであり、最大波高値パルスに対してドウェルタイムで約200 nsec 位まで可能である。但しプリアンプの雑音特性に問題があり、Si(Li) 検出器を使用した場合の最小検出エネルギーレベルを2KeV以下にするためにドウェルタイムで約500 nsec の波形整形を行っている。このときの雑音レベルはパルサー半値幅で約10%となり、FAST MCA固有の分解能2%よりかなり悪い値となる。

FAST MCAの出力は、CAMACデータウェイを通してデータ収集され、計算機処理後スペクトルの図形出力が行われる。

データ収集時間は、FAST MCA内蔵のタイマーで最小10 msec から最大650 sec まで10 msec 単位で設定できる。収集回数は計算機のメモリー容量で決まる値まで任意に設定可能である。

第9図に、NBI加熱プラズマの軟X線エネルギースペクトル測定例を示す。これは9ショットの

平均値で最大計数率は 150 kcps まで行っており電子温度を求めるとき約 1.3 keV である。この条件では鉄系不純物の K 線は出でていない。第 10 図に求めた電子温度と全計数率の時間変化を示す。軟 X 線スペクトルによる電子温度評価は観測視線に沿っての最大値が求まるので、本 FAST MCA の採用によりその時間変化を詳細に数ショットの放電で得ることが可能となった。

4. 檢討

前回試作品である MULTI-DISCRIMINATOR 型 PHA の問題点の改善をねらった本 FAST MCA の試験結果としては、第 1 に微分直線性がスマージング方式の採用により 2% 以内に収まること。第 2 に検出器のプリアンプを計数率重視型に改造したためプリアンプでの計数率飽和はなくなったこと。以上 2 点の改善により、実際の軟 X 線計測系に適用して予想通りの性能を確認することができた。

実際のプラズマからの軟 X 線スペクトルの測定をして判明したいくつかの問題点の検討を以下に述べる。

4.1 回路素子

A D 変換素子に E C L 素子を使用しているため、電流消費量と発熱量が多く電源の負担が大きい。現在、E C L 素子を T T L 素子に交換した新しい FAST MCA 製作の準備をしている。これにより許容範囲内で若干の性能低下はあるものの大幅な消費電流の改善が期待できる。

4.2 エネルギー分解能

計数率重視型にしたため、エネルギー分解能が約 2% 程度となり、低エネルギー限界付近のスペクトル測定には若干の注意を要する。但し今回使用した軟 X 線スペクトル測定システムとしての総合分解能は約 10% であり主としてプリアンプの雑音特性で規定されている。その様子を示したものが第 11 図であるが、10 keV の標準パルサーのエネルギーに対し図のような拡がりを持つ。実際に軟 X 線エネルギースペクトルに対してこの拡がりがどのように影響するかを以下検討する。

一般的にエネルギー分解能が有限の系における測定スペクトルを $C(E)$ とすれば、良く知られているように放射スペクトル $f(E)$ に対してコンボリューションの手法を用いて、

$$C(E) = \int_{-\infty}^{\infty} f(E') g(E-E') dE' \quad (1)$$

と表わせる。ここで E は光子エネルギーであり、 $g(E)$ は有限の分解能を規定する装置関数である。

第 11 図に示す拡がりに対しては、

$$g(E) = \exp\left(-\left(\frac{E}{4\Delta E}\right)^2\right) \quad (2)$$

で良く近似できる。ここで ΔE は、FAST MCA の 1 チャンネル当りのエネルギー幅である。又、

平均値で最大計数率は 150 kcps まで行っており電子温度を求めるとき約 1.3 keV である。この条件では鉄系不純物の K 線は出でていない。第 10 図に求めた電子温度と全計数率の時間変化を示す。軟 X 線スペクトルによる電子温度評価は観測視線に沿っての最大値が求まるので、本 FAST MCA の採用によりその時間変化を詳細に数ショットの放電で得ることが可能となった。

4. 檢討

前回試作品である MULTI-DISCRIMINATOR 型 PHA の問題点の改善をねらった本 FAST MCA の試験結果としては、第 1 に微分直線性がスムージング方式の採用により 2 % 以内に収まること。第 2 に検出器のプリアンプを計数率重視型に改造したためプリアンプでの計数率飽和はなくなったこと。以上 2 点の改善により、実際の軟 X 線計測系に適用して予想通りの性能を確認することができた。

実際のプラズマからの軟 X 線スペクトルの測定をして判明したいくつかの問題点の検討を以下に述べる。

4.1 回路素子

A/D 変換素子に ECL 素子を使用しているため、電流消費量と発熱量が多く電源の負担が大きい。現在、ECL 素子を TTL 素子に交換した新しい FAST MCA 製作の準備をしている。これにより許容範囲内で若干の性能低下はあるものの大幅な消費電流の改善が期待できる。

4.2 エネルギー分解能

計数率重視型にしたため、エネルギー分解能が約 2 % 程度となり、低エネルギー限界付近のスペクトル測定には若干の注意を要する。但し今回使用した軟 X 線スペクトル測定システムとしての総合分解能は約 10 % であり主としてプリアンプの雑音特性で規定されている。その様子を示したものが第 11 図であるが、10 keV の標準パルサーのエネルギーに対し図のような拡がりを持つ。実際に軟 X 線エネルギースペクトルに対しこの拡がりがどのように影響するかを以下検討する。

一般的にエネルギー分解能が有限の系における測定スペクトルを $C(E)$ とすれば、良く知られているように放射スペクトル $f(E)$ に対してコンボリューションの手法を用いて、

$$C(E) = \int_{-\infty}^{\infty} f(E') g(E-E') dE' \quad (1)$$

と表わせる。ここで E は光子エネルギーであり、 $g(E)$ は有限の分解能を規定する装置関数である。

第 11 図に示す拡がりに対しては、

$$g(E) = \exp\left(-\left(\frac{E}{4\Delta E}\right)^2\right) \quad (2)$$

で良く近似できる。ここで ΔE は、FAST MCA の 1 チャンネル当りのエネルギー幅である。又、

$f(E)$ としては電子温度 T_e での制動放射として、

$$f(E) = \frac{A}{T_e^{1/2}} \exp \left(-\frac{E}{T_e} \right) \quad (3)$$

と表わすことができる。ここで A は定数である。 T_e を与えて (T_{true} とする) (1) 式を計算した結果を第 12 図に示す。このスペクトルから改めて $E = 3 \sim 10 \text{ keV}$ の範囲で電子温度 T_{em} を求め T_{true} と T_{em} を比較すると第 13 図のよう、 T_{em} は T_{true} より 10 eV 程度とわずかに高くなるだけなので、他の実験誤差を考慮すれば無視できる値である。即ち分解能はあまり良くないけれども、装置関数の形がマクスウェル分布関数より急俊なために電子温度評価にはほとんどきかないで実際の使用に当たり複雑な補正計算なしに電子温度評価が可能である。

5. ま　　と　　め

今回試作したピーカ検出 A D C を使用した F A S T MCA は当初設定した開発目標はほぼ達成できただと評価できる。現在軟 X 線スペクトル測定装置として運用しており、以下の特長を有する。

- (1) 実際の測定に使用するランダムパルスでの平均計数率は、最大 900 kcps まで可能である。
これは波形整形アンプのドウェルタイムで決まっているがエネルギー分解能との兼ね合いで現在のシステムではこの程度が限界である。
 - (2) パイルアップの影響が大きくなるのは 600 kcps 以上の平均計数率の場合である。500 kcps 以下の平均計数率では補正なしの測定が可能である。
 - (3) エネルギー分解能は F A S T MCA 単体では 2% であるがシステムとしては約 10% となる。
しかしながら電子温度を求める場合はこの影響は無視でき、特性 K 線の識別も一応可能である。
 - (4) 数ショットの積算で電子温度の時間変化測定が可能である。
- 他方、若干の問題点が残されておりその対応策は以下の通りである。
- (1) 電流消費量が多く、発熱量が大きい。
対応策としては現在 E C L 素子を T T L 素子に交換した新しい F A S T MCA の製作を検討中である。
 - (2) エネルギー分解能が従来方式より悪くなり、低エネルギー限界付近のスペクトル測定は注意が必要である。この対応策としてはまず専用の高速、低雑音のプリアンプを開発する必要がある。

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 J T - 60 装置用計測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 J T - 60 第 3 開発室長、吉川允二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清水和明氏及び熊原忠士主任研究員に御尽力いただき、J F T - 2 M プラズマによるデータ収集にも御協力頂いたことを

$f(E)$ としては電子温度 T_e での制動放射として、

$$f(E) = \frac{A}{T_e^{1/2}} \exp \left(-\frac{E}{T_e} \right) \quad (3)$$

と表わすことができる。ここで A は定数である。 T_e を与えて (T_{true} とする) (1) 式を計算した結果を第 12 図に示す。このスペクトルから改めて $E = 3 \sim 10 \text{ keV}$ の範囲で電子温度 T_{em} を求め T_{true} と T_{em} を比較すると第 13 図のよう、 T_{em} は T_{true} より 10 eV 程度とわずかに高くなるだけなので、他の実験誤差を考慮すれば無視できる値である。即ち分解能はあまり良くないけれども、装置関数の形がマクスウェル分布関数より急俊なために電子温度評価にはほとんどきかないで実際の使用に当たり複雑な補正計算なしに電子温度評価が可能である。

5. ま　　と　　め

今回試作したピーカ検出 A D C を使用した F A S T MCA は当初設定した開発目標はほぼ達成できただと評価できる。現在軟 X 線スペクトル測定装置として運用しており、以下の特長を有する。

- (1) 実際の測定に使用するランダムパルスでの平均計数率は、最大 900 kcps まで可能である。
これは波形整形アンプのドウェルタイムで決まっているがエネルギー分解能との兼ね合いで現在のシステムではこの程度が限界である。
 - (2) パイルアップの影響が大きくなるのは 600 kcps 以上の平均計数率の場合である。500 kcps 以下の平均計数率では補正なしの測定が可能である。
 - (3) エネルギー分解能は F A S T MCA 単体では 2% であるがシステムとしては約 10% となる。
しかしながら電子温度を求める場合はこの影響は無視でき、特性 K 線の識別も一応可能である。
 - (4) 数ショットの積算で電子温度の時間変化測定が可能である。
- 他方、若干の問題点が残されておりその対応策は以下の通りである。
- (1) 電流消費量が多く、発熱量が大きい。
対応策としては現在 E C L 素子を T T L 素子に交換した新しい F A S T MCA の製作を検討中である。
 - (2) エネルギー分解能が従来方式より悪くなり、低エネルギー限界付近のスペクトル測定は注意が必要である。この対応策としてはまず専用の高速、低雑音のプリアンプを開発する必要がある。

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 J T - 60 装置用計測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 J T - 60 第 3 開発室長、吉川允二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清水和明氏及び熊原忠士主任研究員に御尽力いただき、J F T - 2 M プラズマによるデータ収集にも御協力頂いたことを

$f(E)$ としては電子温度 T_e での制動放射として、

$$f(E) = \frac{A}{T_e^{1/2}} \exp \left(-\frac{E}{T_e} \right) \quad (3)$$

と表わすことができる。ここで A は定数である。 T_e を与えて (T_{true} とする) (1) 式を計算した結果を第 12 図に示す。このスペクトルから改めて $E = 3 \sim 10 \text{ keV}$ の範囲で電子温度 T_{em} を求め T_{true} と T_{em} を比較すると第 13 図のよう、 T_{em} は T_{true} より 10 eV 程度とわずかに高くなるだけなので、他の実験誤差を考慮すれば無視できる値である。即ち分解能はあまり良くないけれども、装置関数の形がマクスウェル分布関数より急峻なために電子温度評価にはほとんどきかないで実際の使用に当たり複雑な補正計算なしに電子温度評価が可能である。

5. まとめ

今回試作したピーク検出 A D C を使用した F A S T MCA 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。現在軟 X 線スペクトル測定装置として運用しており、以下の特長を有する。

- (1) 実際の測定に使用するランダムパルスでの平均計数率は、最大 900 kcps まで可能である。これは波形整形アンプのドウェルタイムで決まっているがエネルギー分解能との兼ね合いで現在のシステムではこの程度が限界である。
- (2) パイルアップの影響が大きくなるのは 600 kcps 以上の平均計数率の場合である。 500 kcps 以下の平均計数率では補正なしの測定が可能である。
- (3) エネルギー分解能は F A S T MCA 単体では 2% であるがシステムとしては約 10% となる。しかしながら電子温度を求める場合はこの影響は無視でき、特性 K 線の識別も一応可能である。
- (4) 数ショットの積算で電子温度の時間変化測定が可能である。

他方、若干の問題点が残されておりその対応策は以下の通りである。

- (1) 電流消費量が多く、発熱量が大きい。
対応策としては現在 E C L 素子を T T L 素子に交換した新しい F A S T MCA の製作を検討中である。
- (2) エネルギー分解能が従来方式より悪くなり、低エネルギー限界付近のスペクトル測定は注意が必要である。この対応策としてはまず専用の高速、低雑音のプリアンプを開発する必要がある。

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 J T - 60 装置用計測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 J T - 60 第 3 開発室長、吉川允二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清水和明氏及び熊原忠士主任研究員に御尽力いただき、J F T - 2 M プラズマによるデータ収集にも御協力頂いたことを

感謝します。JFT-2M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各氏及び装置技術管理室の各氏に御協力、御助力を頂いたことを感謝します。本開発試験遂行にあたって常に有益な御意見、御指導を頂いた核融合研究部の田中裕二プラズマ実験研究室室長、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します。

参 考 文 献

- 1) 的場徹、小川俊英、川島寿人、木村豊秋：JAERI-M 83-162
- 2) T. Kumahara, K. Shimizu, T. Matoba and Y. Suzuki : IEEE Trans. on Nucl. Sci., NS-29, 907 (1982)

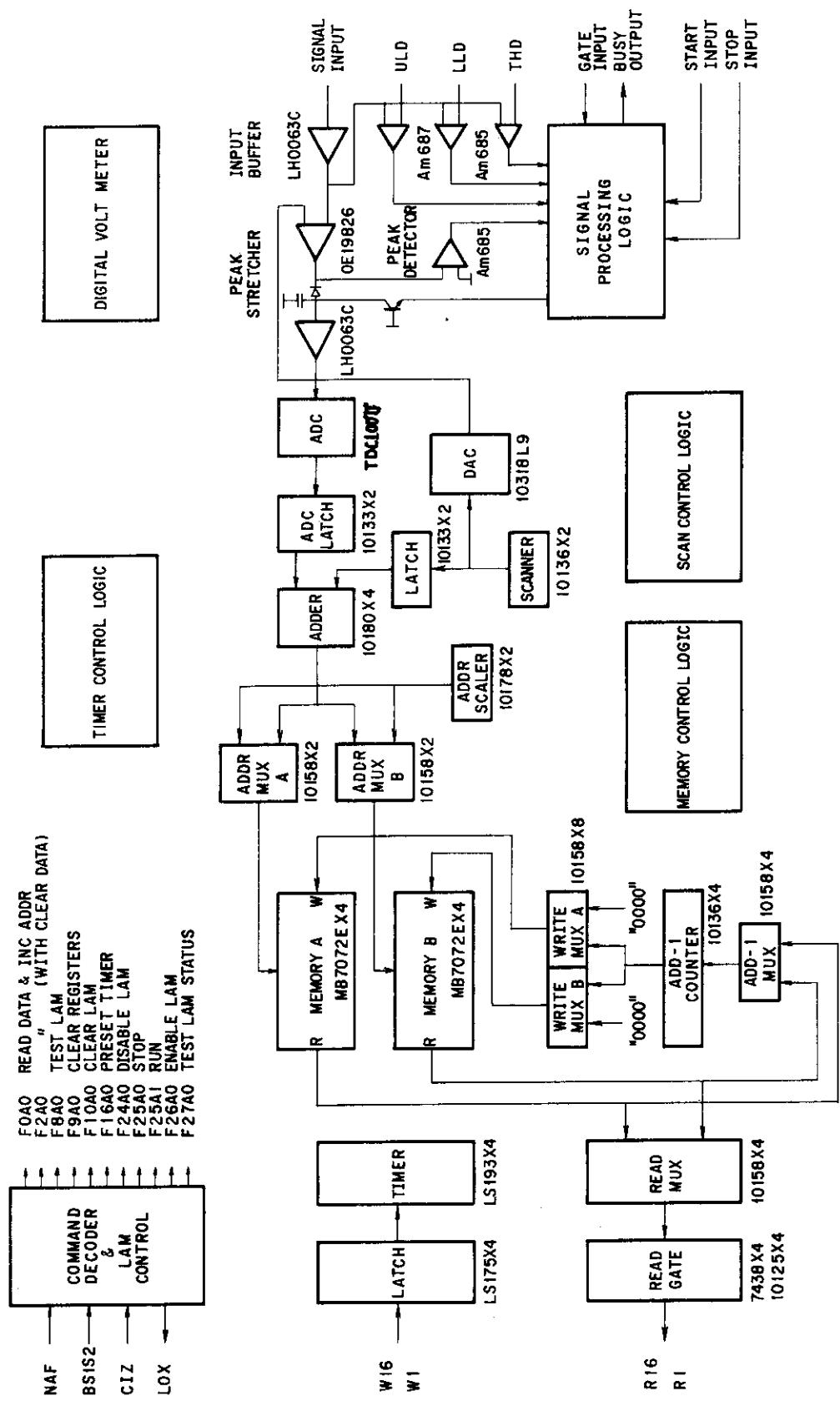
感謝します。JFT-2Mプラズマによる実験データ収集にあたってはプラズマ実験研究室の各氏及び装置技術管理室の各氏に御協力、御助力を頂いたことを感謝します。本開発試験遂行にあたって常に有益な御意見、御指導を頂いた核融合研究部の田中裕二プラズマ実験研究室室長、田中正俊次長、小幡行雄部長と磯康彦核融合研究開発センター所長、森茂理事に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

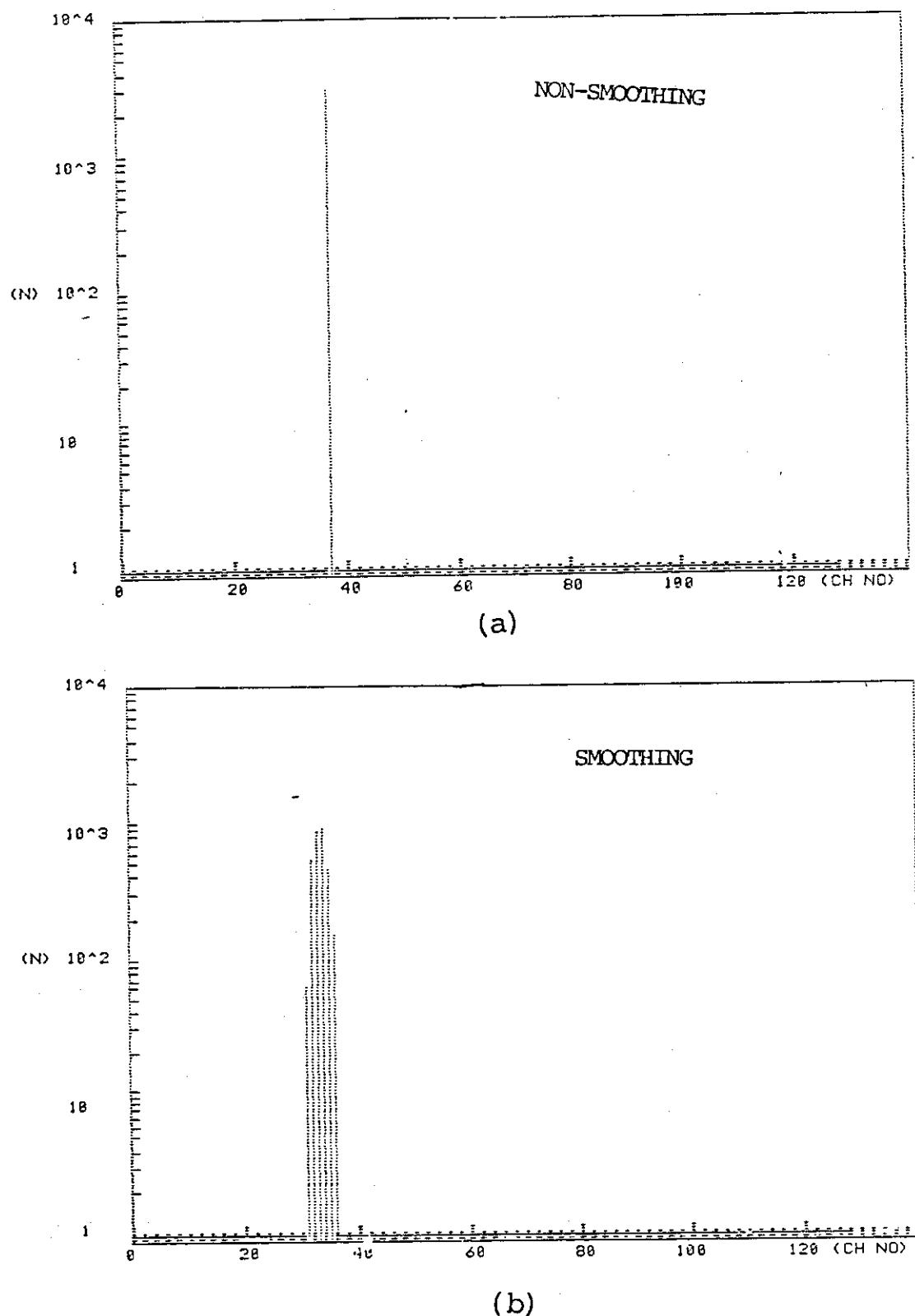
- 1) 的場徹、小川俊英、川島寿人、木村豊秋：JAERI-M 83-162
- 2) T. Kumahara, K. Shimizu, T. Matoba and Y. Suzuki : IEEE Trans. on Nucl. Sci., NS-29, 907 (1982)

第1表 F A S T M C A 製作仕様

チャンネル数	1 2 8 ch (7 bit)
計数容量	1 6 bit
変換時間	2 5 0 nsec以下
入力信号	振幅 - 0.1 V ~ - 2 V 半値幅 1 0 0 ~ 3 0 0 nsec
積分直線性	± 2 %以下
微分直線性	± 2 %以下
タイマー設定範囲	0.0 1 sec ~ 6 5 0 sec
構 造	CAMAC 規格 3 幅
消費電流	- 6 V, 7.5 A

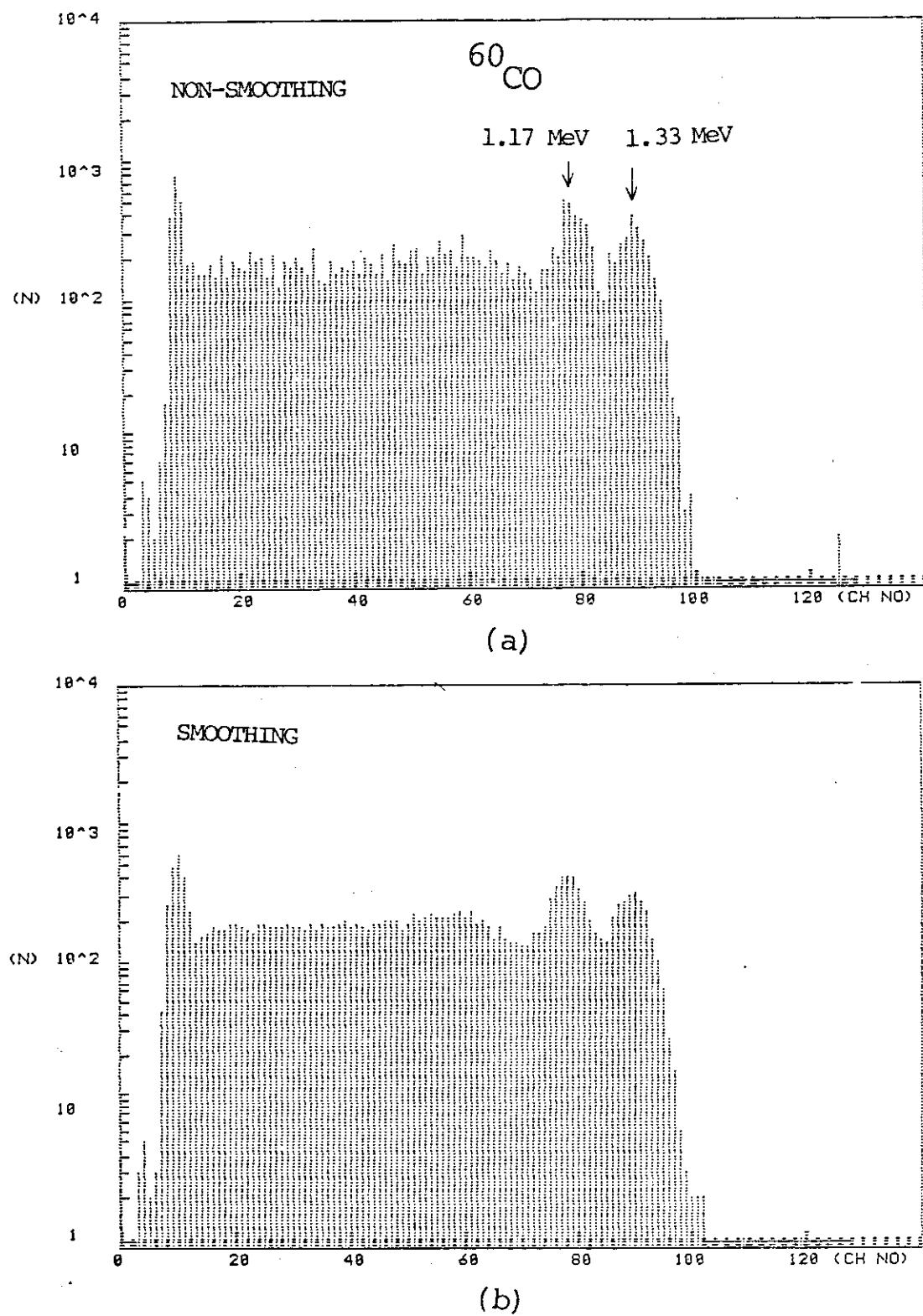


第1図 F A S T M C A 基本回路構成図

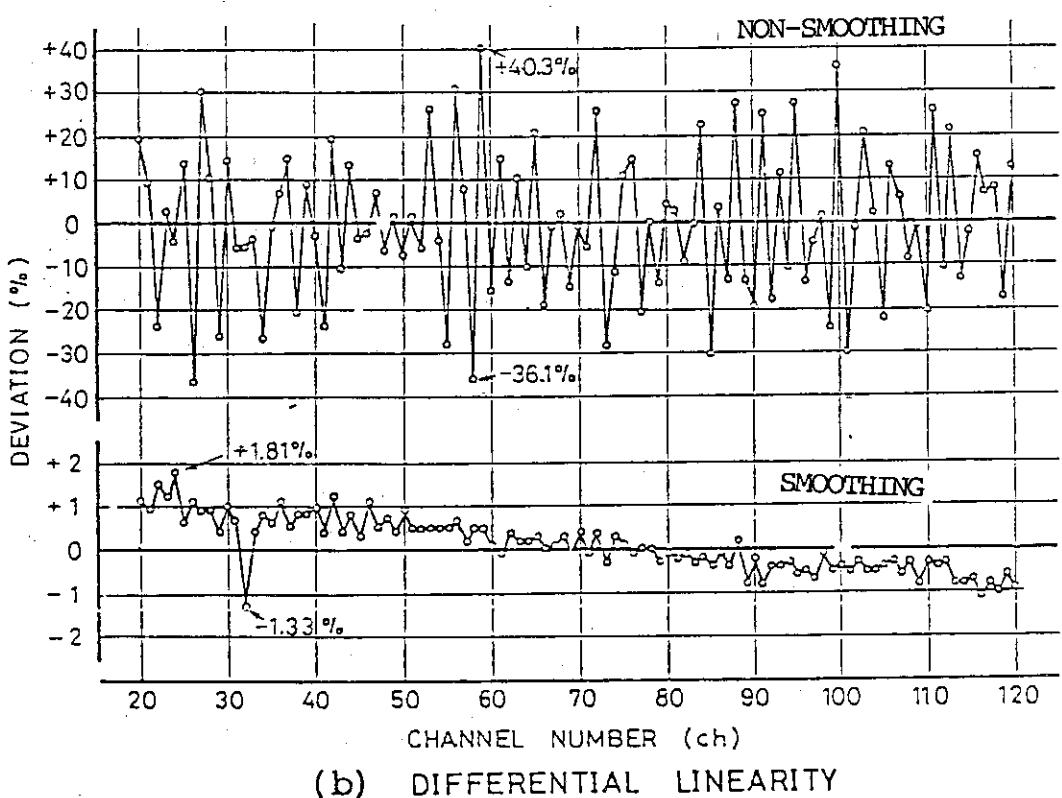
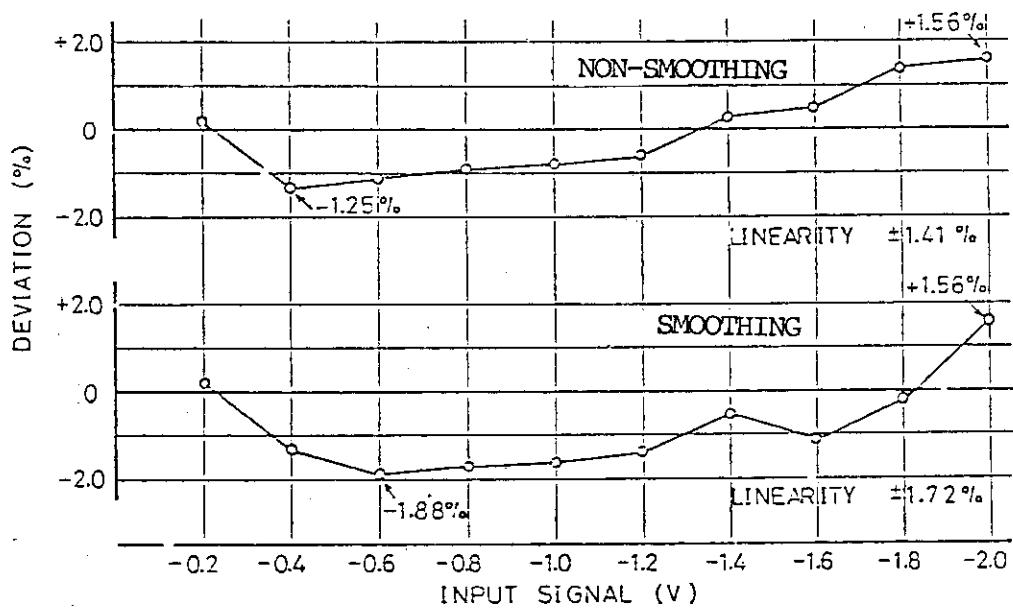


第2図 標準パルサーによる出力スペクトル

- (a) スムージング無の場合
- (b) スムージング有の場合

第3図 ^{60}Co の標準線源を NaI シンチレータで測定した出力スペクトル

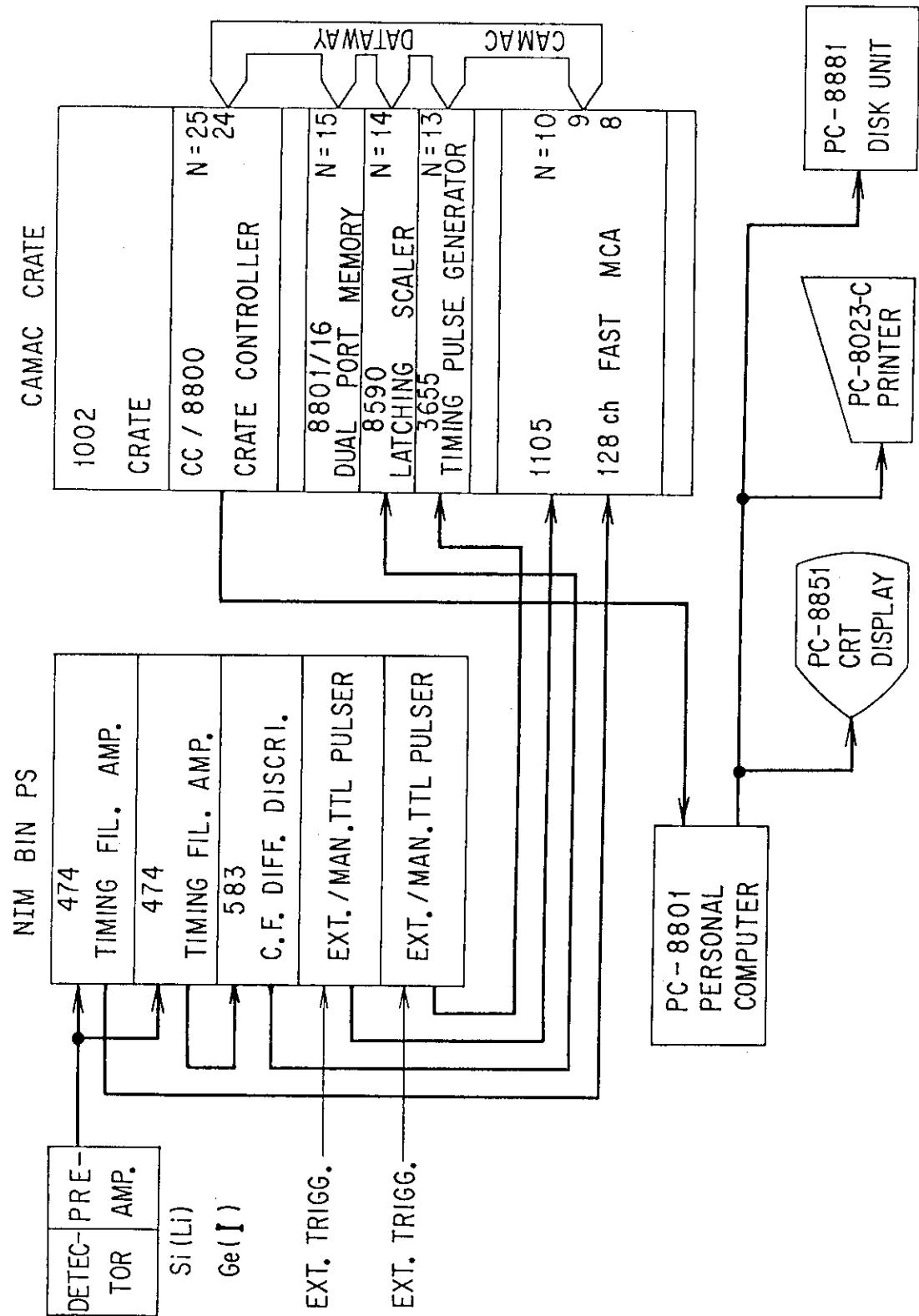
- (a) スムージング無の場合
- (b) スムージング有の場合



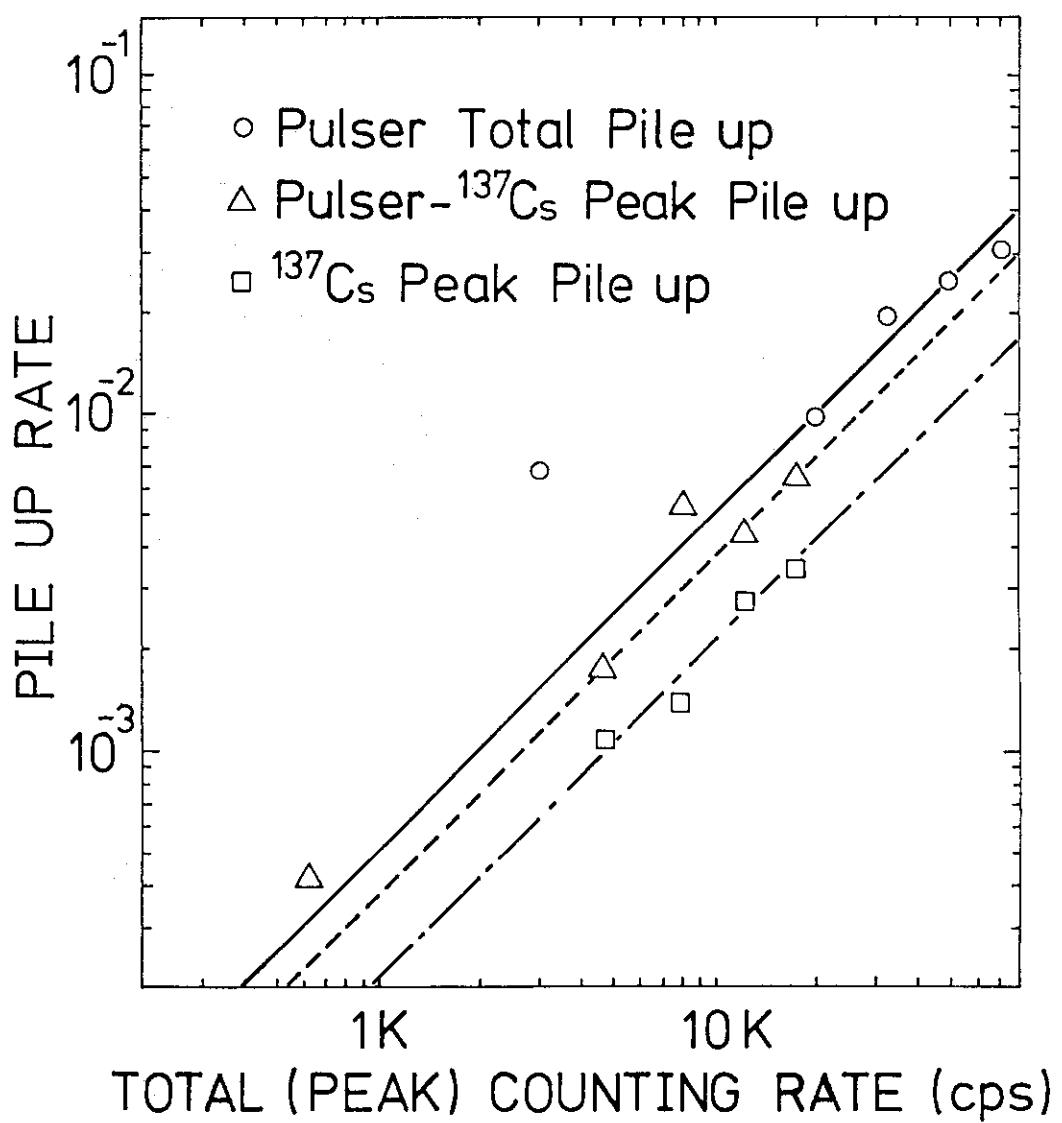
第4図 直線性の実測値

(a) 積分直線性

(b) 微分直線性



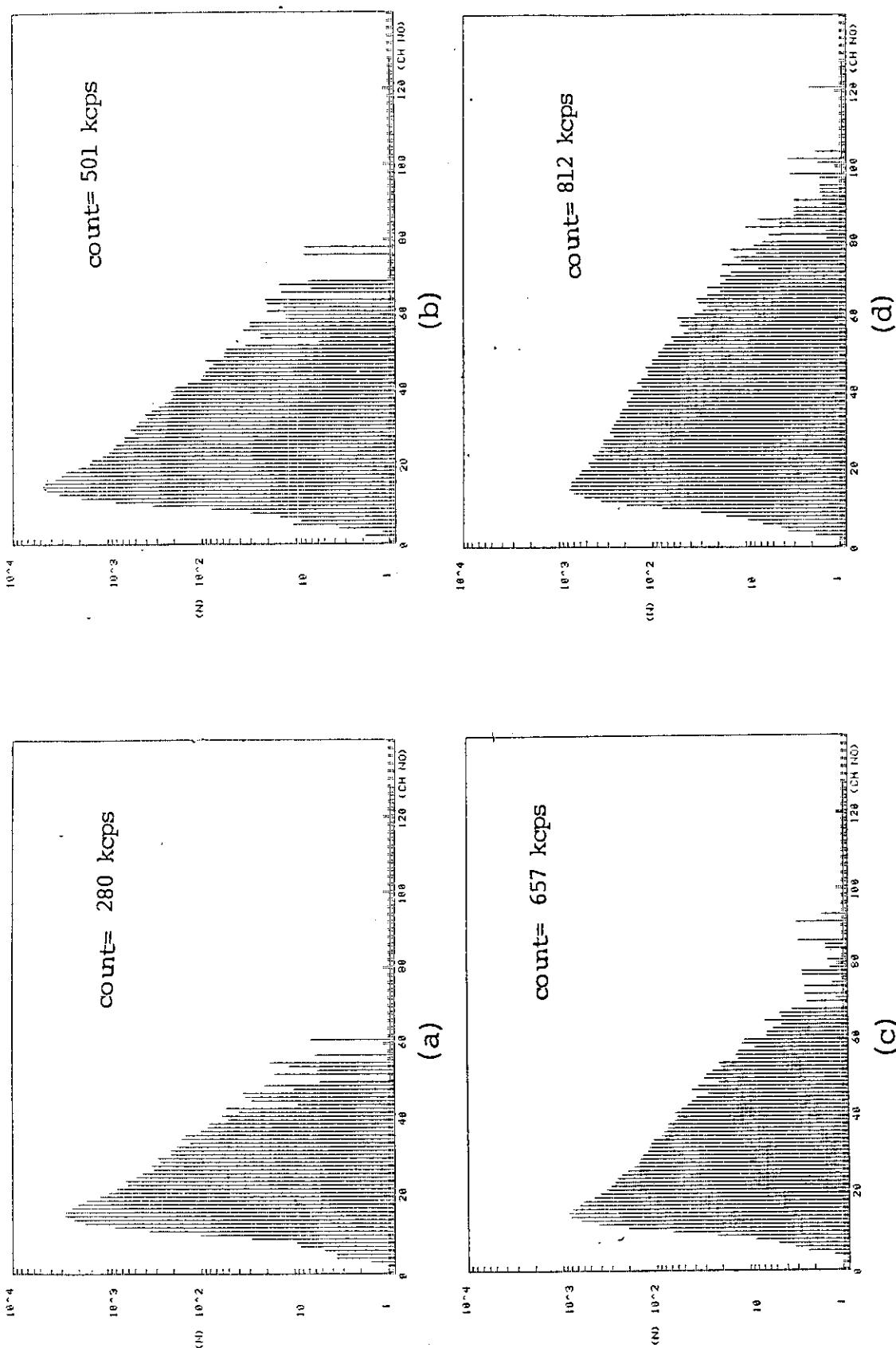
第5図 軟X線計測用システムブロック図



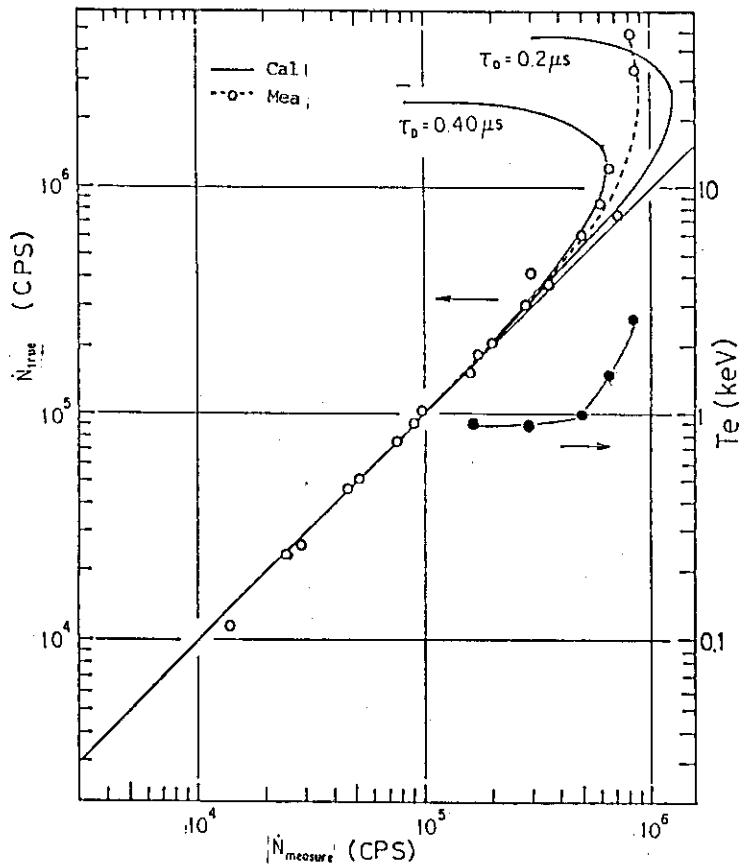
第6図 パイルアップ特性図

¹³⁷Cs 線源と標準パルサーによる実測値。

検出器にはNa エシンチレータを使用している。

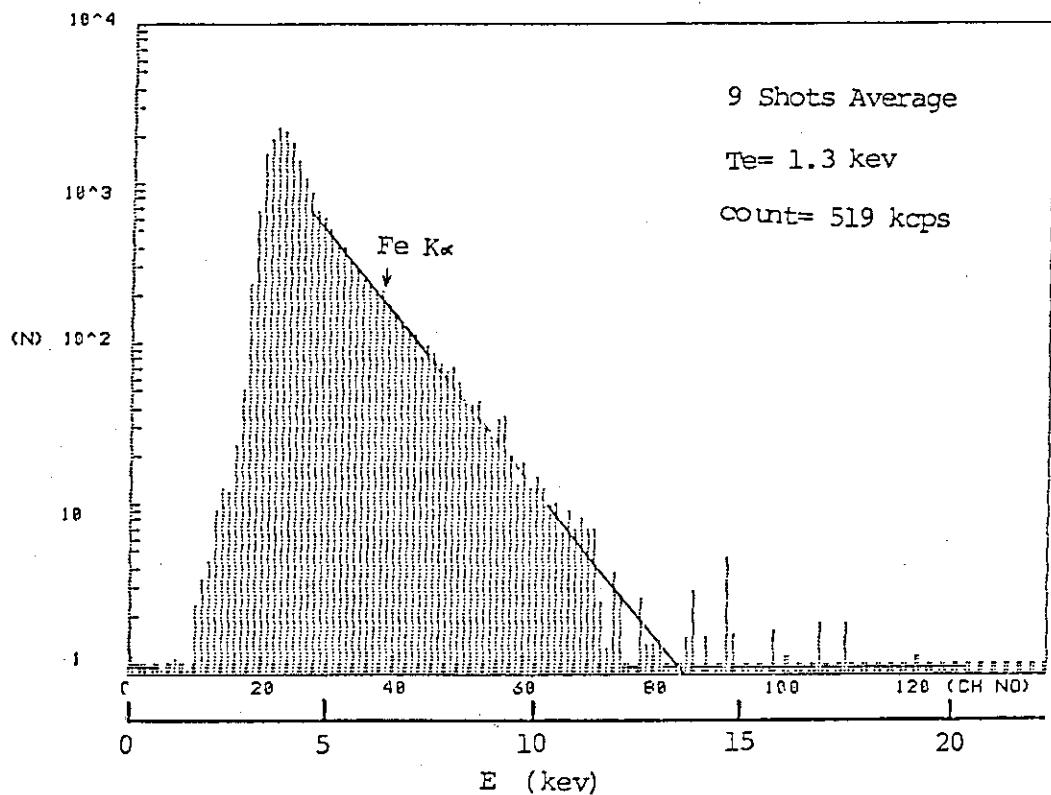


第7図 プラズマからの軟X線放射スペクトルの実測例Si(Li)半導体検出器を使用して同一条件プラズマでコリメータを変えて測定した例
 (a) 平均計数率が 2.8 kcps の場合 (b) 平均計数率が 5.01 kcps の場合 (c) 平均計数率が 6.57 kcps の場合 (d) 平均計数率が 8.12 kcps の場合
 スペクトルにパイルアップの影響が出はじめると、パイルアップの影響が顕著となる。

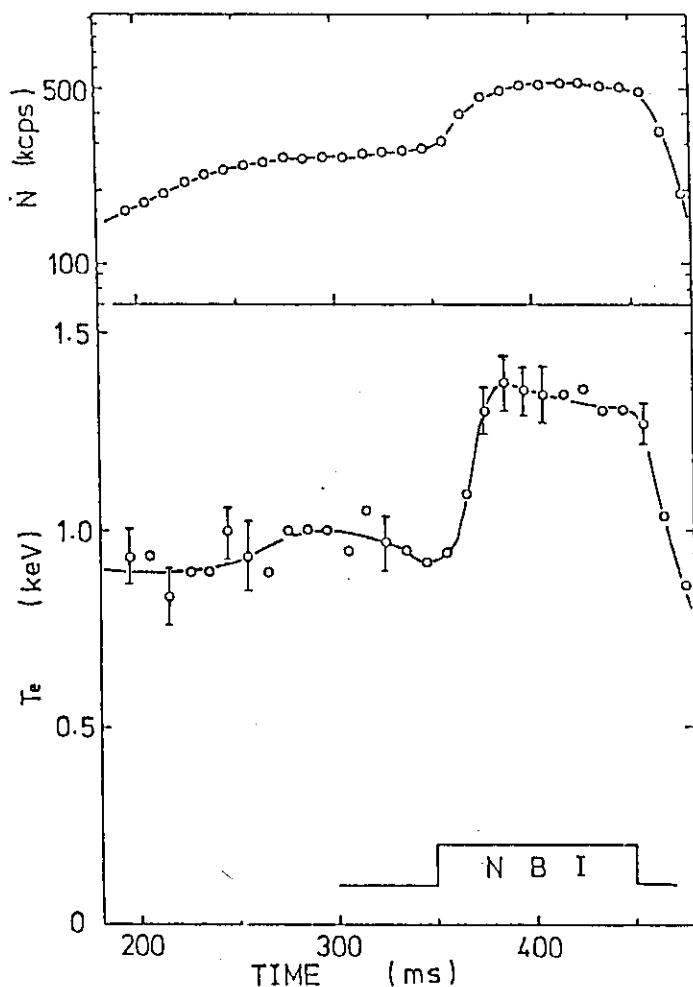


第8図 実測計数率と評価電子温度の計数率依存性

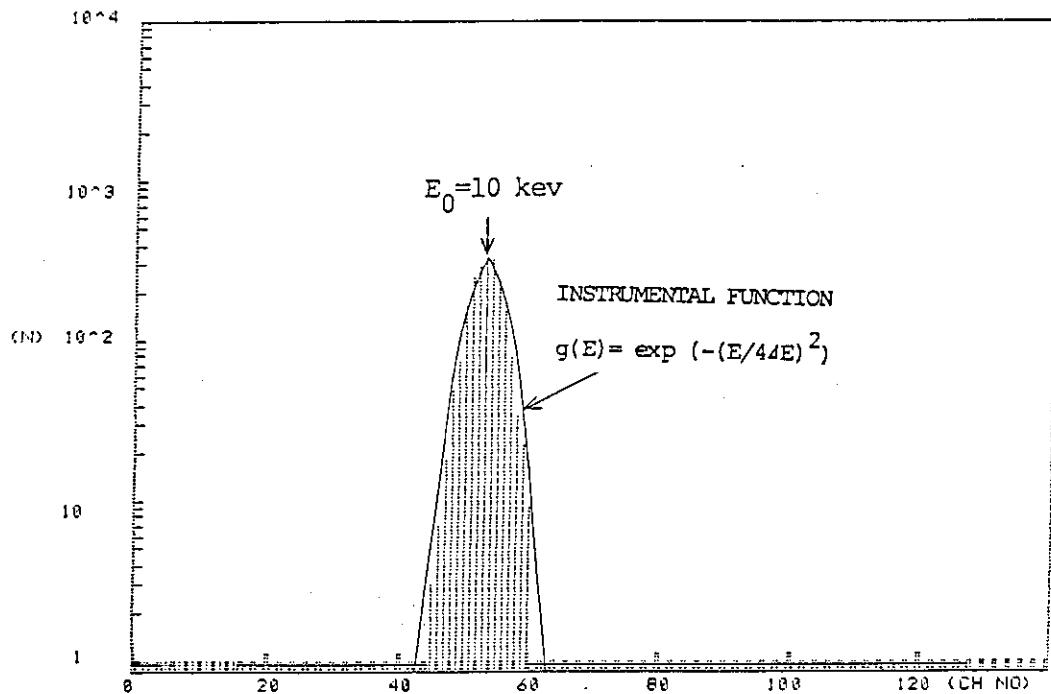
○は見掛けの計数率 (N_{measure}) に対する真の計数率 (N_{true}) の実測値である。 ●は実測スペクトルから算出した電子温度 (T_e) である。



第9図 NB-I 加熱プラズマの軟X線スペクトル測定例

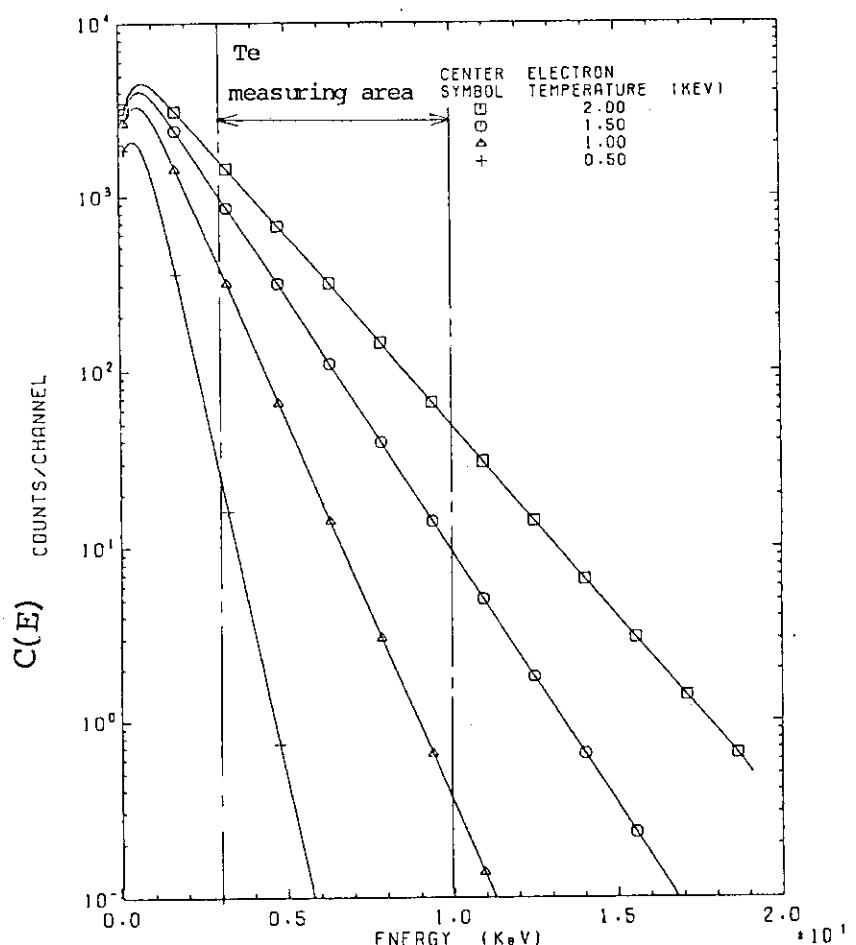


第10図 NB I 加熱プラズマの軟X線スペクトルから求めた電子温度と全計数率の時間変化

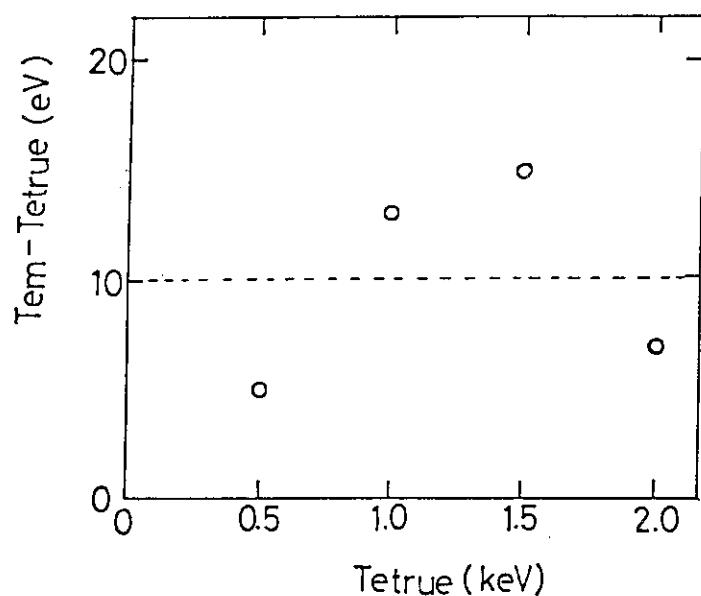


第11図 軟X線スペクトル測定システムの標準パルサー出力スペクトル

標準パルサーのエネルギー $E_0 = 10 \text{ keV}$ に対し全半値幅 10 % の分解能を持つ。この拡がりを装置関数 $g(E) = \exp(-(E/4\Delta E)^2)$ 近似できる。



第12図 装置関数の影響を考慮した軟X線スペクトルの計算値
軟X線スペクトルを電子温度が 0.5, 1.0, 2.0 keV の制動放射として装置関数を入れてコンボリューションの手法を用いて計算した。



第13図 真の電子温度 (Ttrue) とコンボリューションスペクトル $C(E)$ から求めた電子温度 (Tem) の比較
第12図において Tem は 3 ~ 10 keV のエネルギー領域の傾きから求めたものである。