

本資料は 年 月 日付けで登録区分、
変更する。 2001. 7. 3
[技術情報室]

I
N 241 72-05

γ線検出法による非破壊・ 燃焼度測定システムの概要

1972年2月

動力炉・核燃料開発事業団

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

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

ま え が き

高速炉の経済性を左右する大きな要素の一つに、燃料のバーンアップの問題がある。炉心設計の立場から経済性を向上させるためには、信頼性の高い手法およびデータによる“むだのない設計”と、バーンアップをできるだけ高くとって“核燃料の有効利用を図る”ことが必要である。さらに安全性に関しても、FPガスの放出、スエリング等バーンアップに関連した種々の問題がある。

現在のところ、燃焼計算の精度、特に空間的なバーンアップ分布の計算精度は充分なものではなく、それを実験的に確認するための高速炉体系での測定データも公表されているものは極めて少ない。また最近の核拡散防止条約による査察問題とからんで、核燃料管理が重要な問題になってきており、非破壊測定法がその方面からも注目されつつある。

これらの背景のもとに、燃焼度測定法を確立して精度のよい測定データを提供し、“燃焼解析精度の向上”を図って“原子炉運転計画”に役立てるためにγ線検出法による非破壊燃焼度測定システムの開発を計画した。開発の第一段階として一通りの測定装置がそろったので、ここにその概要を紹介する。

金城 勝 哉 (高速増殖炉開発本部)

小林 節 雄 (" ")

目 次

はじめに	1
1. γ 線スペクトロメータシステム	2
1-1 Ge(Li) γ 線検出器	2
1-2 測定回路	4
1-3 多チャンネル波高分析装置(PHA)	5
2. ソフトウェア	17
2-1 γ 線スペクトル解析コード	17
2-2 絶対燃焼度への変換コード	18
2-3 Burup Indicator としてのFP核種	19
3. PNCの開発計画	26
参考文献	36

はじめに

原子炉の設計研究に占める炉心燃焼特性解析は、燃焼のための余剰反応度の決定、それに関連した制御棒仕様の決定、燃焼による出力分布の変化に伴う燃料体温度分布、流量分布の変化、原子炉運転に関連した制御棒パターンの決定、最適な燃料交換法、交換スケジュールの検討、さらには燃料管理計画へと原子炉の経済性、安全性に直接関係した非常に重要な広範囲の分野にわたっている。

しかしながら、詳細な燃焼解析を行なうためには、大容量の計算機と膨大な計算時間を要することになり、また分裂生成物の核反応断面積の取扱い等に不確定な要素が多く10%前後の誤差は避けられない現状にある。そのために実際の測定データとの比較による実験的確認が強く要望されているが、軽水炉に比べて数倍以上も高い燃焼度が要求されている高速炉燃料については、高中性子束で、しかもエネルギースペクトルの硬い照射ベットは極く限られており測定データもほとんど公表されていない。

現在、精度のよい燃焼度測定法として、破壊法による質量分析が広く行なわれているが、大量の照射済燃料を取扱うには非破壊法による γ 線スキヤニングが効果的であり、Ge 半導体を中心とした分解能の高い検出器の開発、最小二乗法を応用したスペクトル解析コードの開発等が始められている。特に原子炉が運転状態に入り、燃料交換がルーチン・ワークとして行なわれるようになると、燃焼度測定もその一環として、システムをルーチン化しておくことが是非とも必要になるであろう。非破壊による燃焼度測定法としては、他にも、核分裂中性子検出法、発熱量分布測定法等による種々の方法が考えられているが、ここでは、現在開発を進めている γ 線検出法について紹介する。

本燃焼度測定システムは、 γ 線検出器、測定電子回路、データプロセッサを含めた多チャンネル波高分析装置、等から構成され以下それぞれについて説明していく。また第2章では測定データの処理、解析のためのソフトウェアについて、第3章ではPNCの開発計画についてその概要を述べる。

1. γ 線スペクトロメータシステム

γ 線スペクトロメータの開発は、燃焼度測定のためばかりでなく医療用、核物理、炉物理実験等のいろいろな分野からの要望が強く精力的な研究、開発が進められている。特に大容量の、しかも低雑音のGe(Li)半導体による γ 線検出器およびFET(cold field-effect-transistor)を用いた低雑音の前増幅器の開発により従来のNaI(Tl)シンチレータに比べて非常に分解能の高い γ 線スペクトルが得られるようになってきた。

ここで取り上げる γ 線スペクトロメータシステムは、Ge(Li)半導体を用いた γ 線検出器、検出されたパルス信号を一定の大きさに増幅して、いろいろな補正を行なうための電子回路および電子回路を通ったパルス信号を一定時間蓄積して、得られた γ 線スペクトルを表示、解析するための多チャンネル波高分析装置から構成されている。¹⁾

1-1 Ge(Li) γ 線検出器^{2,3)}

LiをドリフトさせたGe半導体による検出器はFig 1-1に示すように、p-i-nの各層から構成され、 γ 線がi領域(真性領域)で吸収あるいは散乱されると、そのエネルギーの一部分または全部を受けついで高速の電子が生成され、それが集められてパルス信号となり γ 線として検出される。その時のパルス信号の大きさは入射 γ 線のエネルギーに依存しているので、一定の分布を持ったホトピークが γ 線のエネルギーに対応して得られる。

γ 線とGe(Li)検出器の相互作用としては、(1)光電効果、(2)コンプトン散乱、(3)電子対生成の3つの過程が考えられるが、Fig.1-2に示すように γ 線のエネルギーによって起こる確率が変わる。⁴⁾すなわち200 KeV以下の低エネルギー領域においては光電効果の起こる確率が最も高く、200 KeV ~ 8 MeVの中間領域ではコンプトン散乱が主体になり、高エネルギーになるにつれて、電子対生成の起こる確率が増加してくる。燃焼度を決定するために注目するFP核種の γ 線エネルギー範囲は0.5 ~ 2 MeV程度であるので、特にコンプトン散乱によるバックグラウンドの増加をいかに補正して完全なエネルギーピークを得るかが重要な問題になってくる。

単結晶のGe(Li)検出器にはFig 1-1に示したようにプレーナ型と同軸型があり、それぞれの用途により使い分けられている。プレーナ型はその構造上、単結晶の大きさにより実効容積が1200以下に制限されるので、検出効率は低い時間分解能が優れてい

る。同軸型は原理上、いくらでも検出容積の大きいものが可能であり、現在10000以上の検出効率の高いものまで開発されている。⁵⁾ また特殊なものとして、井戸型の検出器も開発されており⁶⁾低レベル線源の検出に効果を上げている。

上述の、 γ 線との相互作用によるバックグラウンドの広がりや余分なescape peakを補正して完全なphoto peakを得るには、 γ 線のエネルギーをすべて検出器の i 領域内で吸収させればよく、実効容積を増して行けばある程度は可能であろう。しかしながら、実際には製作上の限界があり、また時間分解能は検出器の大きさと型に依存しているので応答時間が遅くなり、さらに検出器自体の雑音も多くなる欠点を持っている。これらの問題を解決する方法として、NaIシンチレータを組合わせたコインシデンス法^{10, 11, 12)}や2結晶加算型 γ 線検出器の開発^{7, 8, 9)}が進められており、コンプトン効果の補正等によりピーク対コンプトン比の高い分解能のよいスペクトルが得られている。

2結晶加算型 γ 線検出器には、Fig. 1-3に示すようにいろいろな形式のものが考案されているが、加算の方法としては個々に増巾した両検出器の出力を加算するか(a)、検出器の共通電極から検出器内部で加算されたパルスを取り出す方法(b, c)とに大別される。(a)の方式では増巾器の出力の調整がむづかしく、(b), (c)の方法がより優れていると云える。また燃焼度測定に用いられる γ 線のエネルギー範囲(0.5~2 MeV)では、Fig. 1-2に示したようにコンプトン散乱を起こす確率が90%以上を占めている。従って従来の、コンプトン効果を除去して光電効果を起こした γ 線のみを検出するようなアンチコインシデンス方式では極端に計数効率が低くなる。

これらの得失の検討により、燃焼度測定用の検出器としてFig. 1-3の(b)の方式を選択し、製作を発注した。^{*}基本仕様はTable 3-1に示した通りであるがFig. 1-4に示すように、2分割型Ge(Li)検出器とさらにその回りの2分割したNaIシンチレータとからなっている。2分割型検出器は同軸型Ge(Li)半導体の n 領域を2分割した型のもので、中心の P 領域から加算信号が導き出される。真性領域(i 領域)の電界分布に影響を及ぼさないためには分割溝は浅いほど望ましいが、 n 層を完全に分割するため2mm前後が適当とされている。(b)図は検出器内部での加算信号の取出し方を示したものであるが、主信号は電荷増巾型プリアンプ(A)を通して得られる。 n 領域からのコインシデンス信号は電圧増巾型プリアンプ(B, C)により得られる。

その動作原理は次のように説明される。

領域①に入射した γ 線がコンプトン散乱を起こしてそのエネルギーの一部を失ない、散

* ㈱堀場製作所

乱された r 線が領域②で残りのエネルギーを失なうと、領域①、②からのパルス信号が同時計数されその場合のみ Sum signal が P 極から検出されるしくみになっている。コンプトン散乱による r 線が検出領域外に逃れていく場合には領域①、②の同時計数は行なわれず、コンプトンエッジを構成するような r 線の部分吸収エネルギーがカットされる。外側の NaIシンチレータは多重コンプトン散乱および電子対生成による escape peak の除去を行なうためのものである。

また Ge(Li) 検出器を安定な状態で使用するためには、極低温に保つ必要があり、液体窒素による冷却 (77°K) が行なわれている。その最適温度に関しては、いろいろ研究がなされているようである。クライオスタットへの取付けは Fig.1 - 5 に示す通りであるが、標準型に比べて冷却棒が長いので液体窒素による冷却を十分に行なうことがむづかしい。またピーク対コンプトン比を大きくするため断面積の大きな Ge を使用しているのでマウントの仕方が大変困難になっている。Al キャップの内径を大きくすればマウントは楽になるが、放熱面積が広がるので十分な冷却が行なえず逆に分解能が落ちることにもなる。管壁からの放熱をできるだけ押えるために 1 L/e のイオンポンプを取付け、管内の圧力を 10^{-7} mm Hg 程度に保っている。

Ge(Li) 検出器用前置増巾器の前段部は、その性能上、冷却管内に納めた方が望ましいが取付、調整に問題があり止むなく外に出してある。そのために浮遊容量が ~ 10 PF 増加しており、分解能にも ~ 1 KeV 程度の影響を及ぼしている。

1-2 測定回路

基本的な測定回路は高圧電源、前置増巾器、主増巾器、およびバイアスアンプ等から構成されている。Ge(Li) 検出器の作動する電圧範囲は 1000 ~ 2500 V とかなり高く、高圧電源に要求される性能としては

- 雑音レベルが低いこと
- 約 3000 V まで電圧調整が可能なこと
- 正、負の両極性が得られること
- 最大電流 1 mA までとれること
- 電圧変動が少ないこと

などがあげられる。

前置増巾器は、検出器からの信号を受けてそれを電圧パルスに変換するもので、スペク

トロメータの分解能に大きく影響する。そのために低雑音で入力インピーダンスの高い FET (Cold Field - Effect - Transistor) による増巾器が開発されており、その特性を向上させるために入力側をある程度冷却する方式もとられている。

前置増巾器を出た信号は主増巾器で S / N 比の極めて高いパルス波形に形成、増巾される。要求される性能として

- 電圧利得が調整可能なこと
- 各々のパルスが分解され、Pile up の傾向が少ないこと
- 主要な timing および amplitude の特性が変動しないこと

等が上げられる。

計数率が高い状態で分解能が劣化する一つの原因として、システム内のカップリングキャパシタの充、放電による不規則パルスのためにベースラインが変動することが上げられる。それを改善するために DC restorer が用いられることもある。またバイアスアンプは測定するスペクトルのエネルギー範囲を任意に調整するためのものである。

前節で述べたように、コンプトン散乱によるスペクトルの広がりや、電子対生成による余分な photo peak を除去して高分解能の γ 線スペクトルを得るために、コインシデンス回路 (同時計数回路) を Fig.1 - 6 のように構成した。検出器からのエネルギー信号は、2分割された n 側からの時間信号が同時に計数された時のみゲートを通るようになっている。さらに電子対生成が起った場合には、両側の NaIシンチレータからの信号が逆同時計数されるので、それにより escape peak の除去を行なうことができる。個々の構成要素の仕様は Table 3 - 1 にまとめた。

1-3 多チャンネル波高分析装置 (P H A)

Ge (Li) 検出器によって検出され、測定回路を通ったパルス信号は P H A に入力されて γ 線スペクトルの解析が行なわれる。P H A の検出部に相当する A - D 変換器に要求される性能として

- アナログ量からデジタル量への変換の際の直線性が良いこと
- 温度、時間等に対する安定性が良好なこと
- A \rightarrow D 変換のスピードが速いこと

などが上げられる。最近の γ 線スペクトロメータの分解能向上に伴ない、多チャンネル (4 0 9 6 ~ 8 1 9 2) の P H A に対する有用性が高まっており、各ピークをカバーする

エネルギー点（チャンネル数）が多いほど、ピーク・フィッティング、面積分等の正確な解析が可能になる。それに伴って測定データの量も増加するため、データがオンラインで処理できるように小型計算機（コア容量 4 K 語程度）の接続が標準化されている。^{14~17)}しかしながら、より詳細な処理・解析コードを組込んでデータの解析を行なうには、さらにメモリーの拡張が必要である。

Fig.1 - 7 は燃焼度測定に使用するデータ処理用 P H A システムで、次のような構成になっている。

- (1) A - D 変換器
- (2) デジタルプロセッサ
- (3) 小型計算機
- (4) テレタイププリンター
- (5) オシロスコープ
- (6) X - Y プロッター

このシステムが従来の P H A と大きく異なる点は、ユニバス方式を採用した P D P - 11 という小型計算機を中心に構成されているところにある。従来の方式ではデータの貯蔵、処理および付属装置のコントロールを行なうのに、いちいち、計算機のコントロール・ロジックを通さなければならなかったのに対して、ユニバス方式では、このユニバスにより本体と他の機器類がすべて並列に接続されているため、メモリ間のデータ転送が容易であり、また他の装置の接続が比較的簡単に行なえるので制御用システムとしても優れている。Fig.1 - 8 にその違いを示した ユニバスとは入力・出力ラインが 1 本になった高速データ転送用 Bus のことである。

A - D 変換器によりデジタル化されたパルス信号はその大きさにより指定されたチャンネルに分類され、デジタルプロセッサ内に記憶される。一定時間蓄積されたデータはオシロスコープにより γ 線スペクトルとして表示され、また計算機により種々のデータ処理を行なうことができる。計算機には“CLASS”と呼ばれる FORTRAN に類似した言語によるコントロール・プログラムが組込まれており、下記のコマンドの実行が可能である。

C L E A R

指定されたチャンネルのデータをゼロクリアする。

COLLECT

データの収集を行なうため、収集モード、測定時間等を指定する。

DISPLAY

収集の完了したデータをオシロスコープに表示する。

PRINT

指定された範囲のデータをプリントアウトする。

INTEG

指定されたチャンネル間のデータを積分してプリントアウトする。

AREA

バックグラウンドを差引いた正味のデータ量を積分してプリントアウトする。

SMOOTH

データを5点平均法により smoothing する。

SUBTOT

各チャンネルのデータを次々に加算して表示する。

DIFF

SUBTOTの逆を行なう。

NORM

指定された値を指定されたチャンネルのデータに積算、加算する。

XFER

指定されたチャンネルのデータを指定されたチャンネルへ転送する。

STRIP

指定されたチャンネル間のデータの差引きを行なう。

OUTPUT

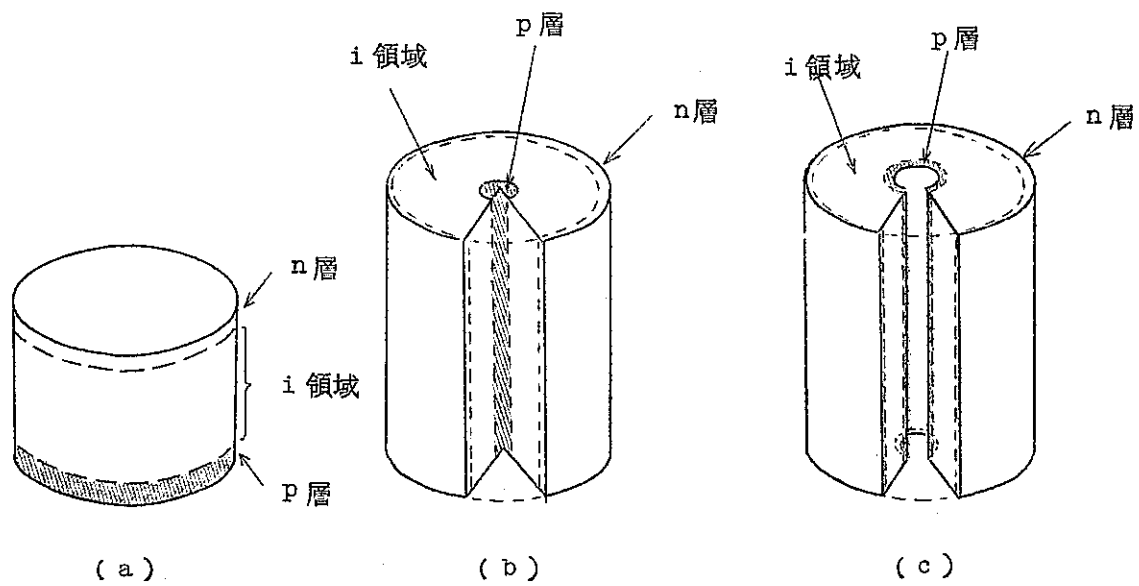
結果を指定された装置により出力する。

INPUT

データを指定された装置から入力する。

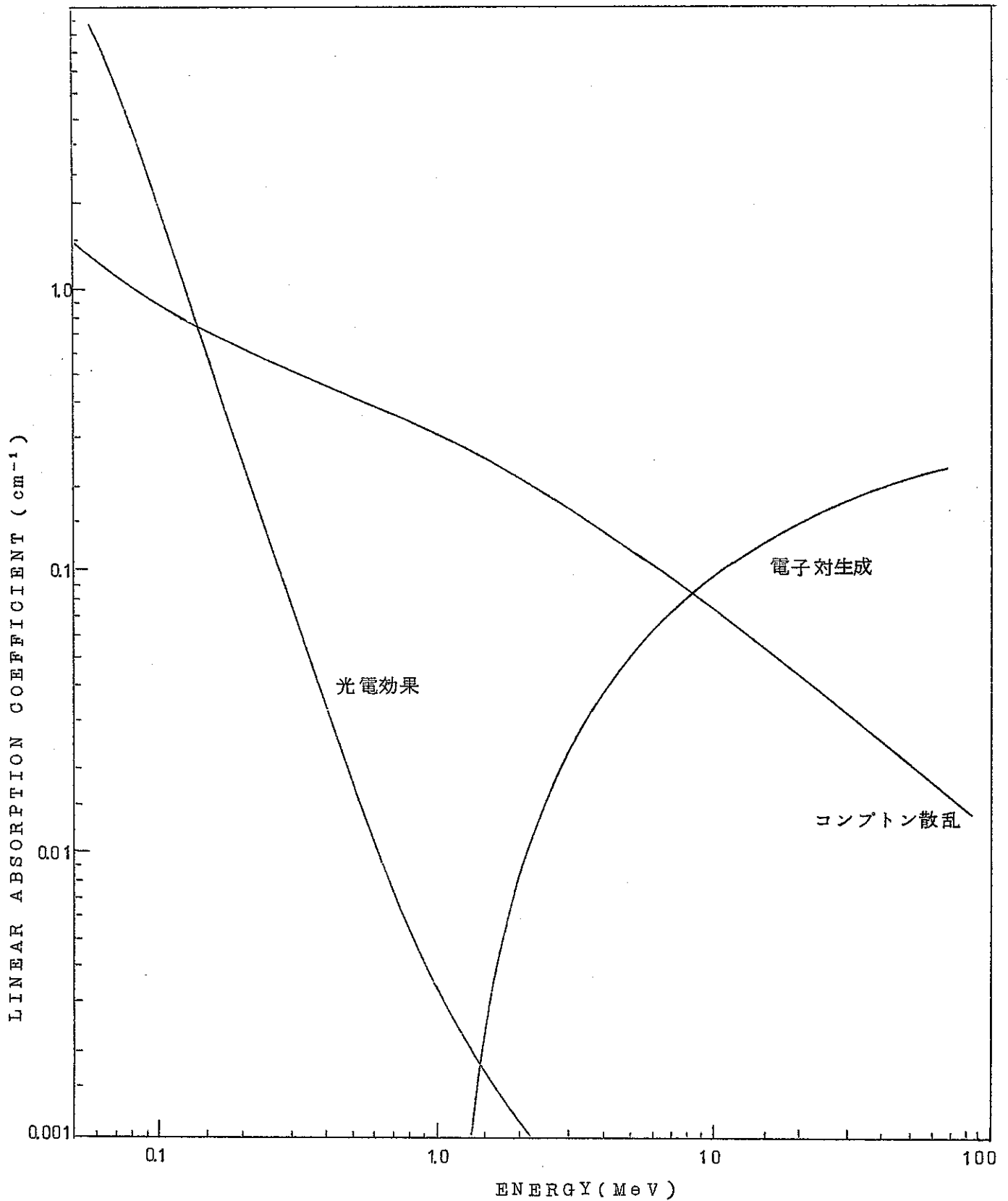
P H A のコントロールはすべて Teletype を通して行なうようになっておりプログラムテープをかけることにより一連のデータ処理が自動的に行なえる。

また X-Y プロッターをインターフェイスさせることによりデータのプロットイングも自動化させるようにした。その他、使用者が任意のプログラムを作成してデータの解析を行なうことが可能である。



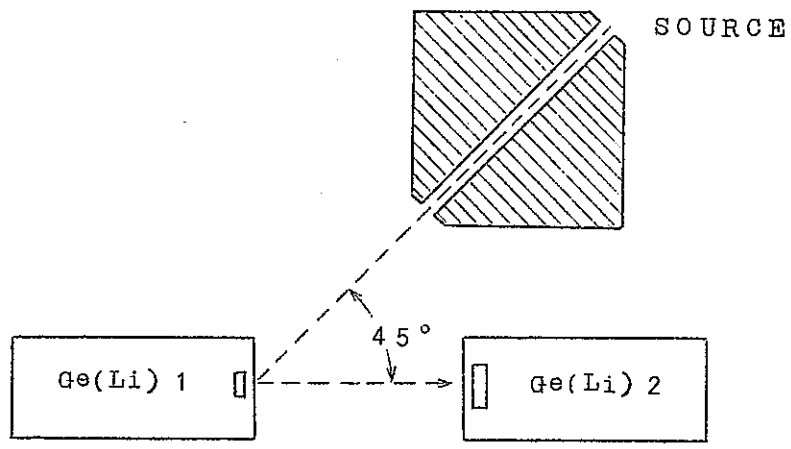
(a) プレーナ型 (b) 同軸型
 (c) 中空同軸型

Fig. 1-1 種々のGe(Li)半導体検出器

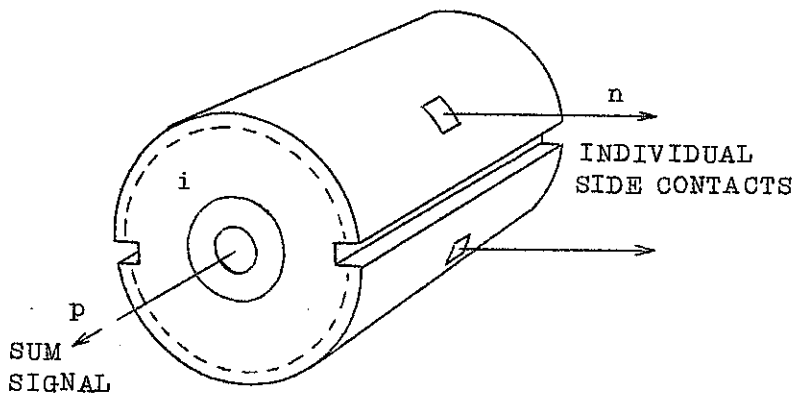


The linear absorption coefficients for Compton Scattering, photoelectric effect, and pair production in germanium⁴⁾ To obtain the absorption cross sections in barns/atom divide by 4.42×10^{-2} to obtain the mass absorption coefficients in cm^2/gm Multiply by 120.

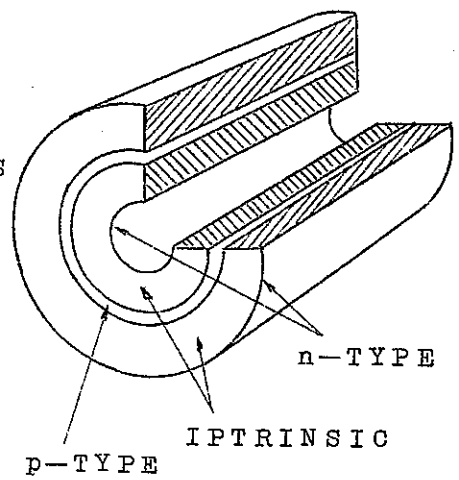
Fig. 1-2 GeのLinear absorption coefficient



(a) 2 結晶コンプトンスペクトロメータ 7)

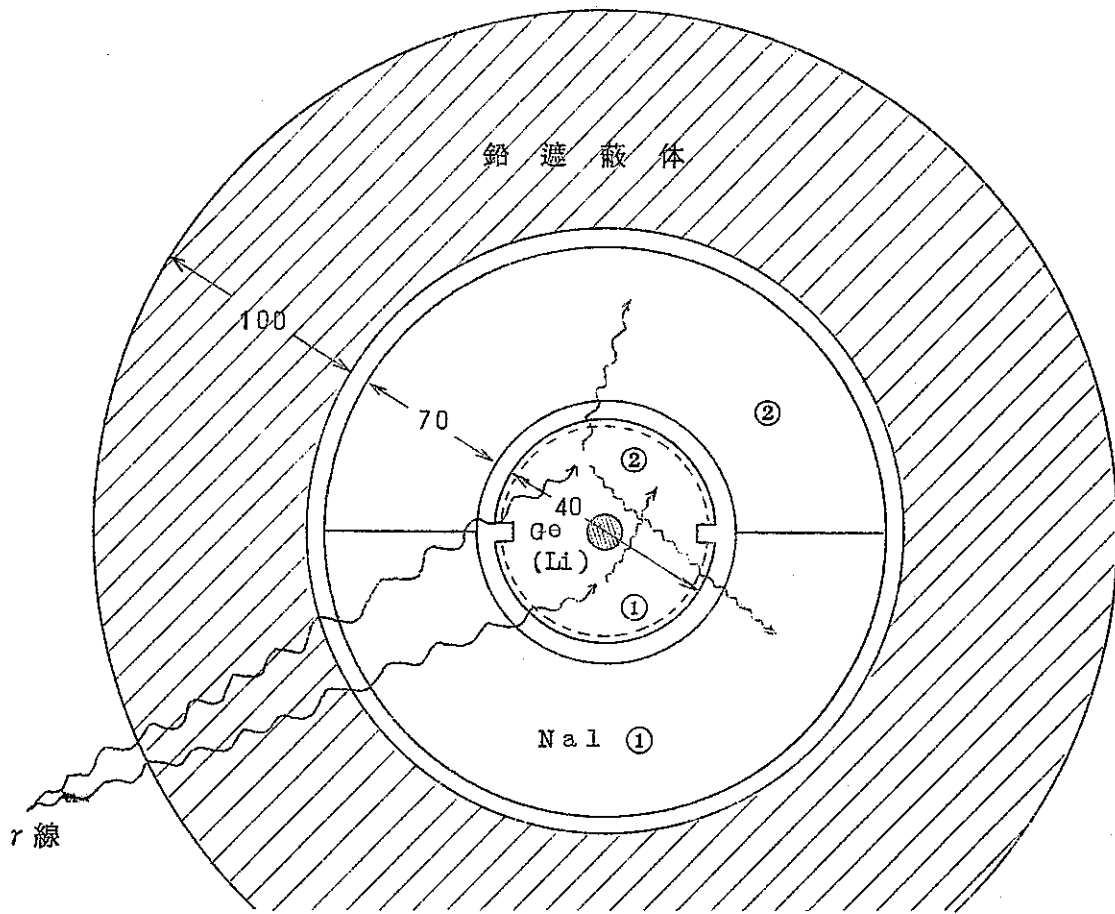


(b) 2 分割結晶同軸型 8)

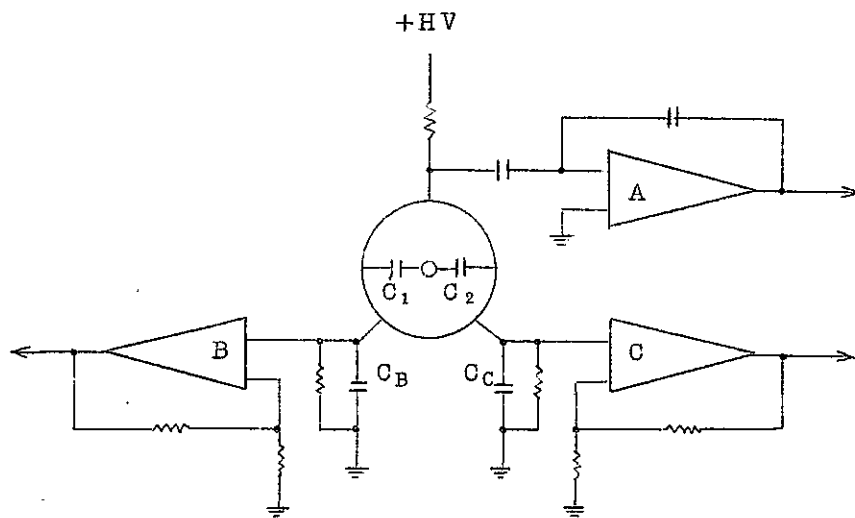


(c) 同心ダブルダイオード同軸型 9)

Fig. 1-3 2 結晶加算型 γ 線スペクトロメータ



(a) 2分割型 Ge(Li) 検出器の構成



(b) Internal Summing technique 8)

Fig. 1-4 γ 線スペクトロメータ

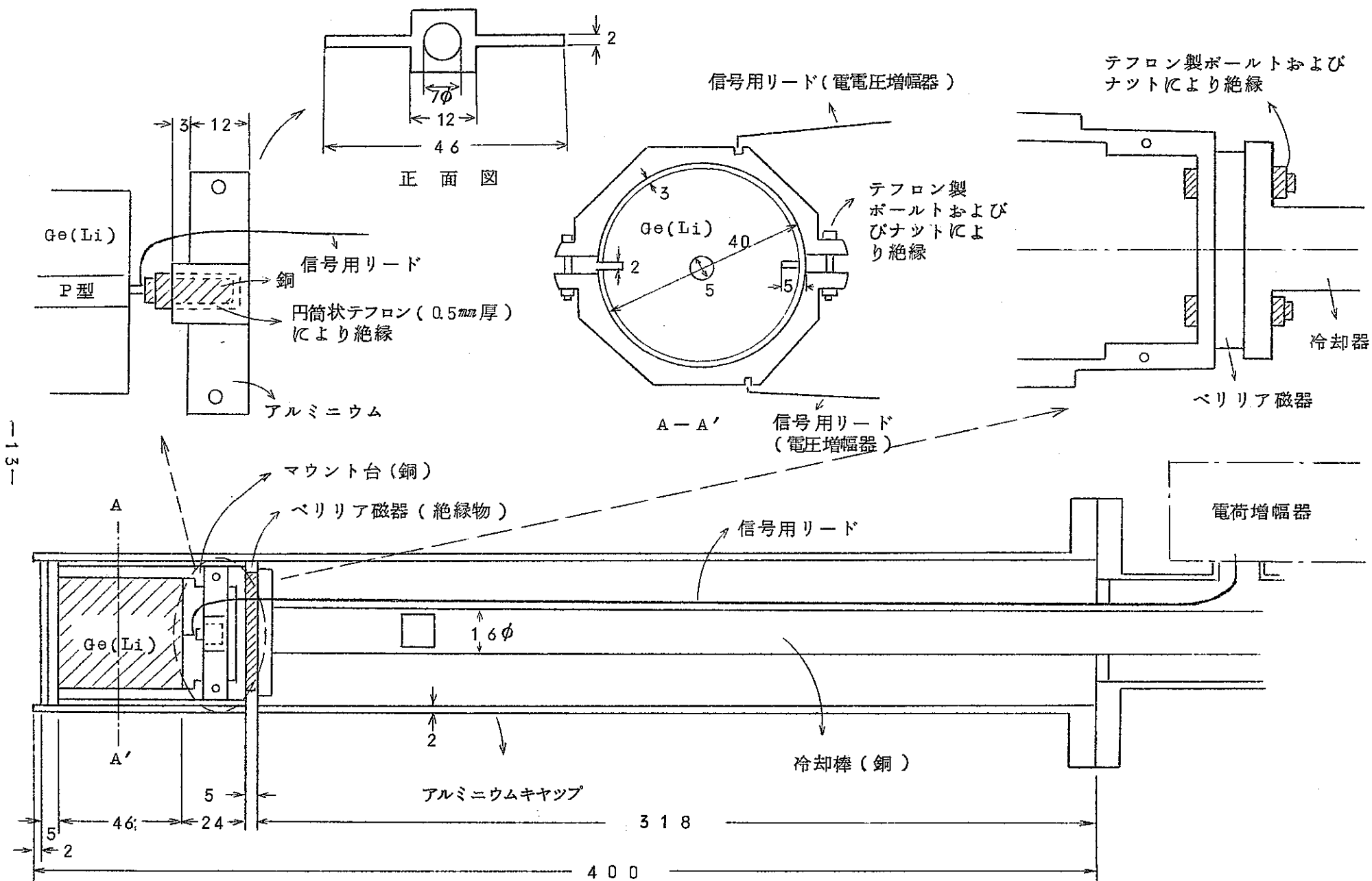


Fig. 1-5 Ge(Li)検出器マウント図

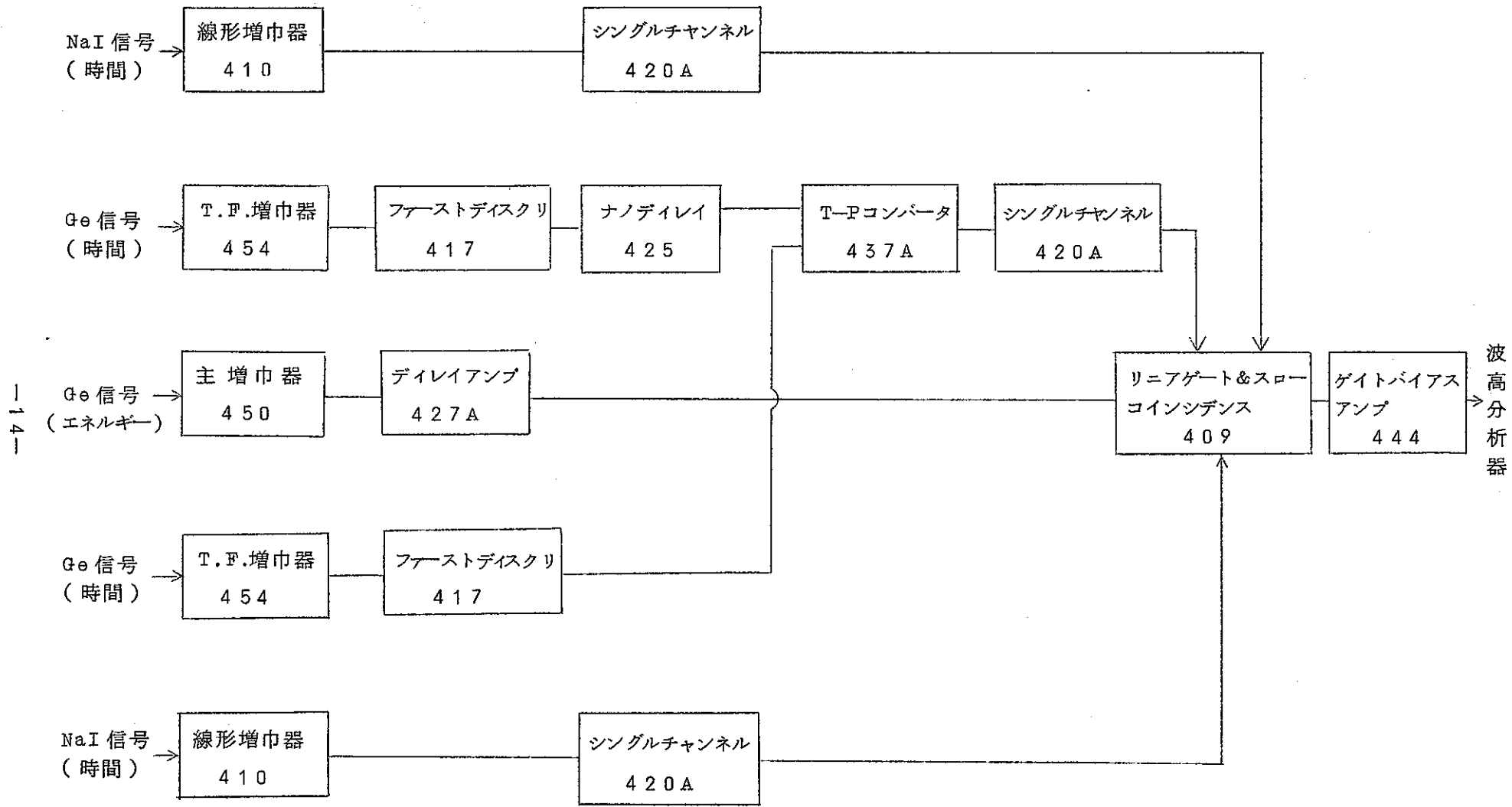
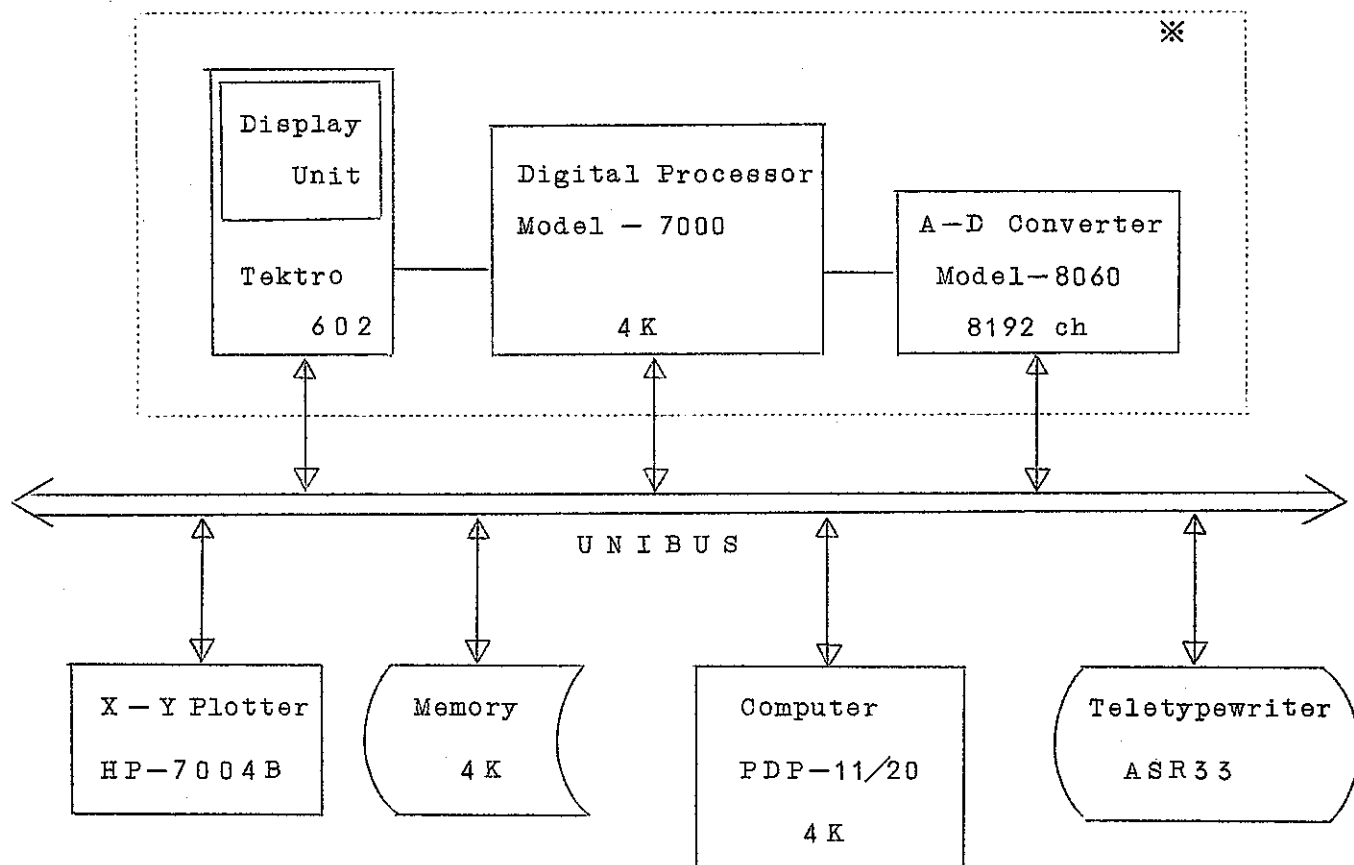
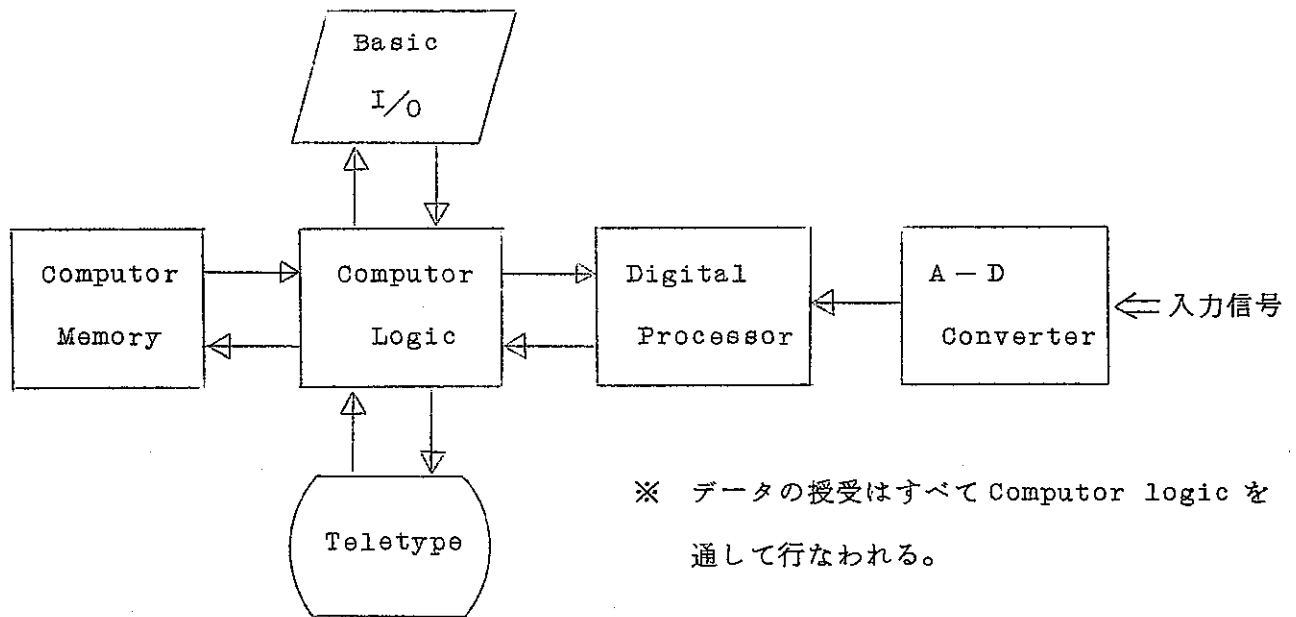


Fig. 1-6 γ 線スペクトロメータ回路図 (ORTEC製品による構成)

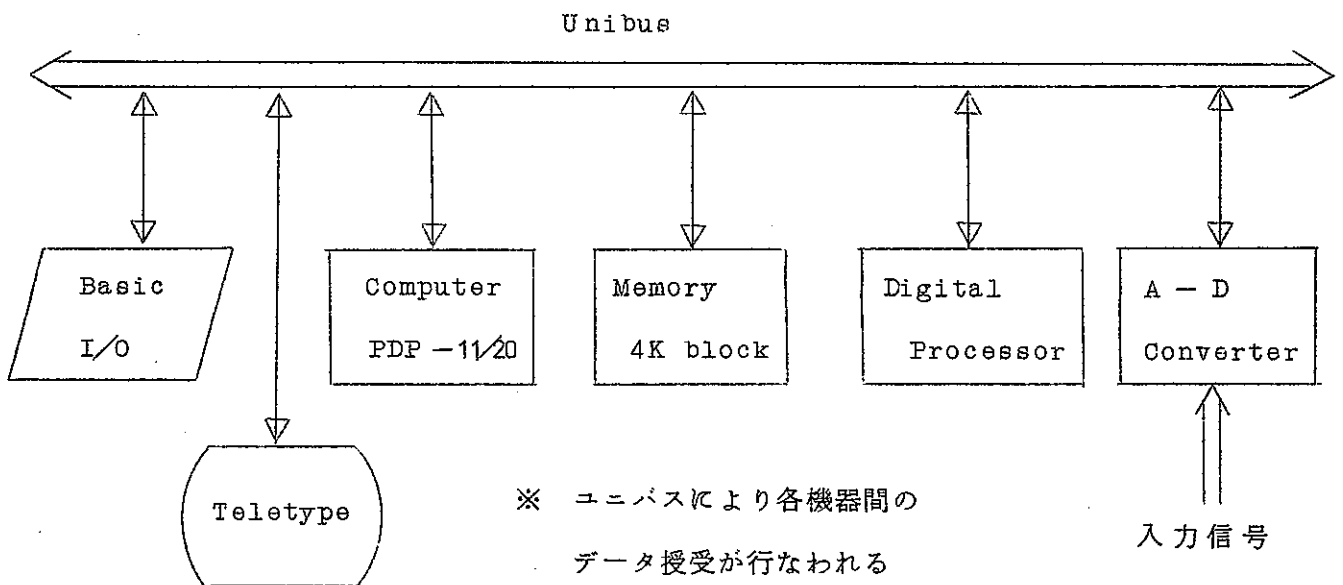


※ Manual により単独で操作することも可能である。

Fig. 1 - 7 多チャンネル波高分析装置



(a) 一般の多チャンネル波高分析装置



(b) ユニバス方式による多チャンネル波高分析装置

2. ソフトウェア

γ 線スペクトロメータによって得られる照射済試料の複雑な γ 線スペクトルを解析して燃焼度を決定するためには、データ処理・解析のためのプログラムを開発しなければならない。そのプロセスは、① γ 線スペクトルを Gauss 関数で fitting してバックグラウンドおよび他の γ 線ピークの影響による補正を行ない正確な γ 線ピーク強度を求めるルーチンと、②燃焼ヒストリーおよび測定上の各補正を考慮して注目する F P 核種の生成量を計算し、核分裂数に換算するルーチンとに大別される。

2-1 γ 線スペクトル解析コード

Ge(Li) γ 線検出器を中心としたスペクトロメータの開発が進んで高分解能の γ 線スペクトルが得られるようになってきたため、最少二乗法を用いた photo peak の Gauss fitting によるスペクトル解析が広く行なわれている。^{18~27)}以下に、その概要を求べる。

(1) photo peak の検索

γ 線スペクトロメータによって得られるスペクトルから正しい photo peak を見つけることは、スペクトルが複雑になるほど困難になり、またピークが重なり合った場合には従来の波高分析による検索は不可能である。それを解決する二、三のピーク検索の方法が考えられている。

その一つは二次微分を利用する方法である。²⁵⁾一般にピークは Gauss 関数で表現され、またバックグラウンドを個々のピーク間では線形関数で近似できるものとする

$$N_i = A \cdot \exp\left[-(i - i_0)^2 / (2\sigma^2)\right] + B + Ci \quad (2-1)$$

N_i : i チャンネルにおけるカウント数

i_0 : ピーク中心のチャンネル番号

σ : ($=\Gamma / 2.355$) Γ : ピーク半値巾

で表わせる。これらの関数の2次微分が、ピーク中心位置以外ではほとんど0に近いという性質を利用して $N_i'' \approx 0$ の点を見つける操作が行なわれるが、実際の測定データには、統計的な変動を含んでおり、単純な2次微分ではピーク位置を見つけることができない。そのため、隣り合った測定点どうしを平均化するような smoothing が行なわれ、修正された2次微分によってピーク位置が検索される。ピーク位置が決まると、2次微分

の標準偏差を利用してピーク巾が決定される。

他に、スペクトルの1次微係数の大きさからピークの有無を判別する方法等も研究されている。

(2) ピーク fitting

ホトピークの検索が済むと各ピークに対応するフィッティング関数が求められ最小二乗法を応用して、誤差

$$Q(P) = \sum_i (f(i;P) - N_i)^2 / N_i \quad (2-2)$$

$f(i;p)$: フィッティング関数

P : フィッティングパラメータ

を最小にするようにフィッティングパラメータ P がくり返し法によって計算される。その他にバックグラウンドのフィッティングに高次関数を用いる方法や、充分に分離されたピークについては、ガウス関数関数と誤差関数を複合した形で用いるとよい結果が得られるという研究報告等もでている。

ピークのフィッティング関数が決定されれば、あとはピーク下の面積を計算し各ピークの相対強度、ピーク中心のエネルギー等が Out Put される。計算のフローチャートを Fig.2 - 1 に示す。

2-2 絶対燃焼度への変換コード (28~33)

r線スペクトルの測定結果から照射済燃料の燃焼度を推定するためには、まず、多数の RI データの中から特定の核種を選んで、照射時間および冷却時間の関数として FP 生成量を次式により計算する。

$$\frac{dN_i}{dt} = \sum_j \nu_{ij} \sum_f f_j \phi + \sum_k \lambda_{ik} N_k + \sum_l \theta_{il} \phi - \lambda_i N_i - \sigma_i N_i \phi \quad (2-3)$$

ν : 核分裂収率

$\sum f$: 核分裂巨視断面積

λ : 崩壊定数

σ_i : 中性子捕獲微視断面積

ϕ : 中性子束

ここで右辺第1項は j 核種の分裂による N_i の生成を、第2項は k 核種の崩壊による生成、第3項は l 核種の中性子吸収による生成を表わしている。また第4項は i 核種の崩壊

による消失，第5項は中性子吸収による消失を表わしている。一般に第3項，第5項は省略できる場合が多い。

次にその生成量を用いて注目する r 線のピーク強度を計算し，これを実際の測定データによる計算値と比較して燃焼度を推定するプロセスがとられる。その簡単なフローチャートをFig.2-2に示す。計算には測定系に対する補正因子，照射履歴の補正因子等が考慮されるが，燃焼炉心の組成変化による中性子束分布の変化がF.P生成量の計算に誤差を生じ，またfission yieldに含まれている誤差等により数%の誤差は避けられない現状にある。

これらのデータ処理プログラムは委託研究としてすでに作成が開始されているので詳細は成果報告書を参照されたい。*

2-3 Burnup IndicatorとしてのFP核種^{34~39)}

燃焼度決定のために選ばれるFP核種の条件は次のようなものである。

- ① 中性子束の変動による影響をあまり受けたくないような半減期の長い核種であること。
- ② 中性子吸収断面積が小さいこと。
- ③ 各々の核分裂物質からの核分裂収率がほぼ等しいこと。
- ④ 核分裂収率が高いこと，また中性子エネルギーによる収率の変動が小さいこと。
- ⑤ 考えている r 線ピークのbranching ratioが高いこと。
- ⑥ photo peakが十分に分離されていること。
- ⑦ 燃料内での自己吸収が無視できる程度に高いエネルギーの r 線ピークを持っていること。
- ⑧ 注目している核種あるいはその先行核の揮発性が低いこと。

これらの条件をすべて満足する核種はないが，一般によく用いられる核種として，Cs-137，Ru-Rh-106，Ce-Pr-144，Zr-Nb-95，Cs-134，Ba-La-140，Ru-Rh-103等の崩壊系列が考えられている。これらのFP核種の核的性質をTable 2-1にまとめた。その得失について以下に述べる。

* (株) 東京原子力産業研究所

45年度委託研究成果報告書(47年1月)

46年度委託研究成果報告書(47年3月)

Cs-137

半減期が長いので照射履歴等の time factor の不確かさはそれほど問題にならず、長時間照射のモニターとしては最適である。ただ注目するピークの近くに Zr-Nb-95 の強いピークがあるので、そのオーバーラップによる影響が問題であり、精度よくピーク強度を計算するには分解能の高いスペクトルデータが要求される。冷却期間を長くすればその影響はいくらでも小さくできるが、そのためには少なくとも数週間の冷却期間が必要となろう。また燃料温度が 600°C 以上になると Cs の揮発性が高くなるので、使用温度の高いセラミック燃料の場合には migration (原子移動) の問題があり、ローカルな燃焼度測定には数%の誤差の生じることが指摘されている。一方、 γ 線のエネルギーが比較的低いので密度の高い金属燃料のような場合には γ 線の自己吸収が無視できなくなるであろう。

Ru-Rh-106

U_{-235} からの核分裂収率と Pu_{-239} からの核分裂収率とが極端に異なる点に特徴を持っている。従って分解能の高い検出器により Pu の核分裂数を決定することができ、特に高速炉用燃料のバーンアップ測定に注目される核種である。

Ce-Pr-144

半減期が比較的長く全核分裂数を決定する有効な indicator の1つである。短い冷却期間でも 2.2 MeV のピークはよく分離されるが、 γ 線の放射量が少ないので検出器の効率を高くする必要があり測定にも時間がかかる。またピークが弱いためにバックグラウンドが高いと解析がむつかしく誤差が大きくなる。

Zr-Nb-95

核分裂収率が高く中性子エネルギーに対する収率の変化も比較的小さい。また中性子吸収断面積、核種の揮発性もほとんど問題ない。ただ半減期が短いので長時間照射の場合にはモニターとして用いることはできず、time factor の不確かさが問題になる。また検出器の分解能が低いと Zr, Nb のピークを分離するのが困難である。

Cs-134

安定核種であり Cs-133 の (n, γ) 反応によってのみ生ずるので、その生成量から積分中性子束を推定するのに用いられる。ただ 800 KeV 付近のピークを分離するには長い冷却期間が必要である。

半減期が短いので直接の burnup indicator としては適当でないが、取出し直前の照射状態を知るのに利用できる。

これらの性質からわかるように、1つの核種ですべての条件を満足させることはできず、試料の形状、材質、照射条件、冷却条件等によって、それぞれ最も適する核種を選ばなければならない。また燃焼度を決定するために1つの核種だけに注目するのではなく、2つの核種の相対比率から、照射時間、冷却時間、および照射中の中性子束の値を推定する方法が研究されている。^{34, 36)}

さらに γ 線スキヤニングによって相対的な燃焼度分布を求める際には、 γ 線強度が直接、燃焼度に比例するかどうかの問題であり、被覆材の impurity のばらつきが大きい場合には、その放射化による影響も考慮しなければならない。

2-4 γ 線スキヤニング自動化プログラム

精度のよい燃焼度分布の測定を行なうには、検出器は固定した安定な状態で用いるのが望ましく、燃料棒駆動装置を計算機によりコントロールする方法がとられる。⁴⁰⁾ その自動化の概念を Fig. 2-3 に示す。

操作スイッチが入ると、計算機からの指令により測定間隔が決定され、測定点まで燃料棒が駆動される。次にあらかじめ設定された時間だけ 4096 チャンネルの波高分析装置による測定が行なわれ同時に結果が磁気テープに貯えられる。一点の測定が終了すると次のステップへ進み、最終点の測定が終了するまで繰返される。磁気テープに貯えられた測定データは、計算機によりオンラインで解析が行なわれる。

Table 2-1 F.P核種の核的性質

F P 先行核								崩壊による生成核				
核種	半減期	fission yield				Capture C·S		β崩壊		生成核	放射γ線	
		U ₂₃₅	U ₂₃₈	Pu ₂₃₉	Pu ₂₄₁	thermal (b)	fast (b)	核種	半減期		エネルギー (MeV)	放射強度 (%)
Zr-95	65d	641 ±030	4.8	5.2 ±0.30	5.0	0	0	Zr 95	65d	Nb95	0.760	43
											0.726	55
								Nb 95	35d	Mo95	0.768	99
Ru-103	397d	3.0	6.2	5.6	5.6	149	1030	Ru103	397d	Rh103	0.610 0.555 0.498	6
Ru-106	1.01 y (368.9 d)	0.39 ±0.05	2.9	4.4 ±0.4	5.5	9	16	Rh106	30s	Pd106	2.37 2.100 1.96 1.55 1.045 0.87 0.624 0.607 0.513	0.25 — 0.5 0.5 2 1 12 21
I-133	207h	6.67 ±0.20	5.2	6.50 ±0.8	6.45			Cs134	2.08 y (760 d)	Ba134	1.36520	3.3±0.3
Cs-133	stable					29	420					
Cs-137	29.8y	6.18 ±0.13	6.00	6.56 ±0.20	6.46	0.11	0.30	Cs137	29.8y	Ba137	0.6616	95
Ba-140	128d	6.30 ±0.12	5.8	5.50 ±0.22	6.00	12	4.7	La140	40h	Ce140	2.9 2.52 2.34 1.902 1.597 0.923 0.868 0.815 0.752 0.494 0.431	
Ce-144	285d	5.34 ±0.12	4.5	3.82	4.08	0.96	2.6	Pr144	172m	Nd144	2.18 1.49 0.691 0.610 0.475	0.8 0.26 1.6 1.34 1.34

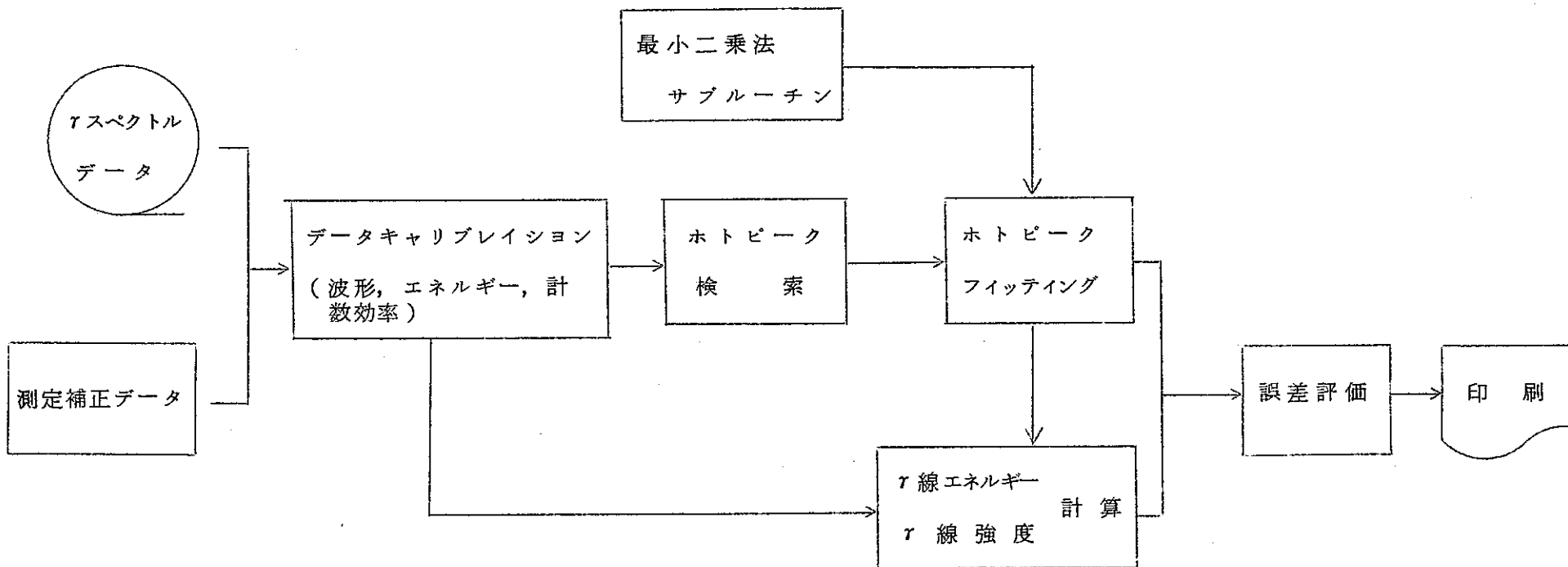


Fig. 2 - 1 γ線スペクトル解析コードのフローチャート

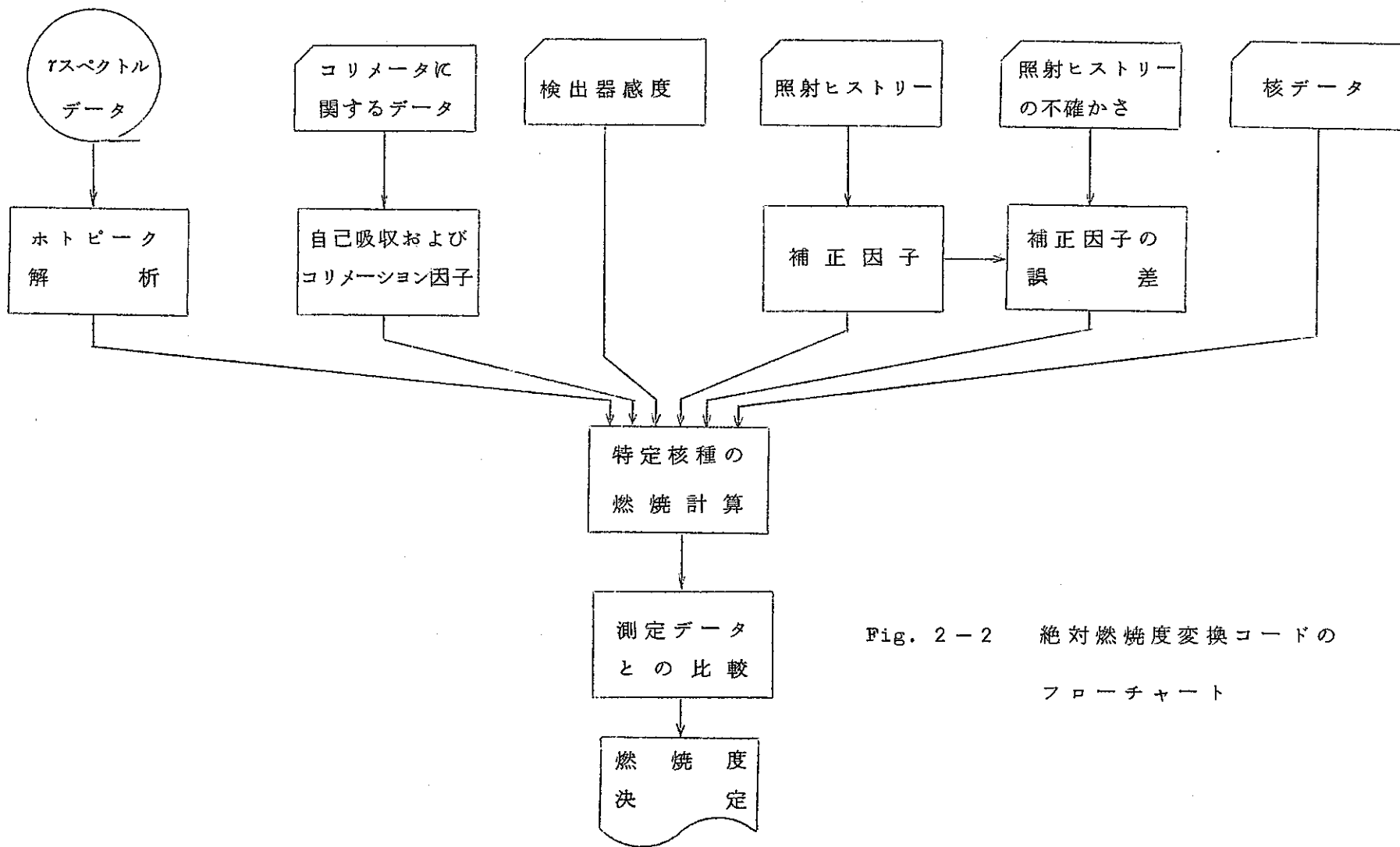


Fig. 2-2 絶対燃焼度変換コードの
フローチャート

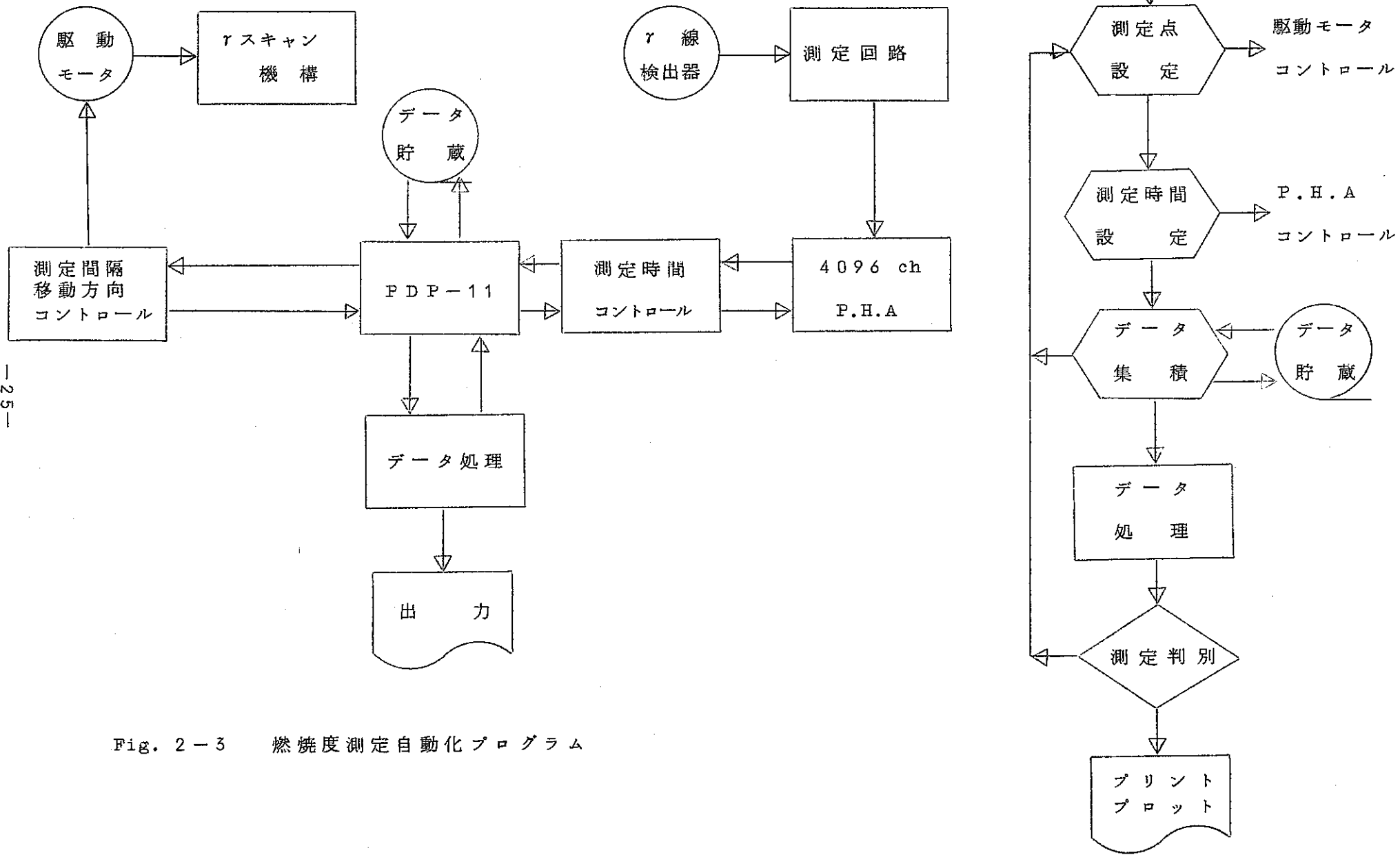


Fig. 2-3 燃焼度測定自動化プログラム

3. P N C の開発計画

第 1 章で説明した燃焼度測定装置の全構成を Fig.3 - 1 に示す。各コンポーネントの型式および基本仕様は Table 3 - 1 にまとめた。

今後さらに周辺機器（磁気テープ入出力装置，プリンター，燃料棒駆動装置，コリメータ等）を整備し，大洗工学センターの A G F に設置して，ドンレー，ラブソデイで照射された試料の燃焼度測定，解析を行なう予定である。将来は F M F (Fuel Monitoring Facility) の付属設備として「常陽」燃料の燃焼度測定，照射後試験等に活用する。以下に年度別の研究開発概要を示す。

45年度

(1) 測定装置の計画，構成機器の購入

- Ge(Li) 検出器
- NaI シンチレータ
- 鉛遮蔽体
- 測定用電子回路
- 多チャンネル波高分析装置

(2) 測定装置の調整・性能試験

- Ge(Li) 検出器の最適バイアスの決定
- コインシデンス回路の調整
- システム分解能の測定
- システム計数効率の算定
- 標準線源によるエネルギー較正

(3) 測定データ処理コードの作成および組込み

γ 線スペクトルデータを解析して指定する核種の γ 線ピーク強度を計算するためのコードを作成し，計算機に組込む。

46年度

(1) データ処理メモリーの拡張 (8 K → 16 K)

(2) コリメータに関する研究

照射済試料の測定条件とコリメータの最適な形状，寸法の間接を，線源強度， γ 線エネルギーおよび，試料との距離等をパラメータにとり，ピーク/コンプトン比，計数効率，分解能等に注目して検討する。

(3) 燃料棒駆動装置の調査, 検討

F M F に設置する予定の燃料棒駆動装置の設計仕様および小型計算機による自動制御方式について検討する。

(4) 燃焼度測定装置の性能および改良の検討

2分割型 γ 線スペクトロメータの得失を単結晶型との特性比較により行なう。

(5) 強放射線源による測定・解析条件の検討

照射済燃料の γ 線スペクトル解析, 模擬 F P 試料による γ 線スペクトル解析を行ない, 測定条件と解析精度の関係を研究する。

(6) データ処理コードの作成

γ 線ピーク強度から F P 核種の生成量を算出し, 全核分裂数に換算して燃焼度を求めるためのコードを作成する。

47年度以後

(1) 測定システムの整備

- 磁気テープ入出力装置, 高速リーダー & プリンター等の購入
- 燃料棒駆動装置の設計, 試作
- 自動化プログラミング

(2) データ処理プログラム

- 小型計算機への組込み, 質量分析結果との比較によるコード改良
- 高速炉燃料用コードの確立

(3) 測定, 解析

- 強放射線源に対するコリメータの性能検討
- F M F 用コリメータ製作
- Pu 燃料の燃焼度測定および burnup indicator の検討
- 高燃焼度試料に対する測定条件の検討

(4) 燃焼度測定データの活用

- データ fitting による燃焼体系の炉定数推定
- γ スキャンデータによる出力分布の推定
- 海外照射データ等の解析による燃焼計算法の実験的確認

なお, Fig.3-2 に基本的なタイム・スケジュールを示す。

Table 3-1 燃焼度測定装置構成要素の基本仕様

構成要素	数量	基本仕様
<u>検出部</u>		
Ge(Li) 検出器 (堀場)	1	実効容積 25cc+25cc (2分割型) 測定エネルギー範囲 0~2.5MeV 分解能 3.7KeV(at ^{60}Co 1333 KeV) ピーク対コンプトン比 20以上 計数効率 7%以上(3"φ×3"t NaI比) 静電容量 30PF以下(at 400V逆電圧)
NaI シンチレータ (堀場)	1	形状, 寸法 8"φ×6"t 中央に~2.5"穴(2分割型) 分解能 10%(at ^{137}Cs 662KeV) 光学窓 石英ガラス
光電子増倍管 (東芝7696)	6	寸法 2"φ シールド μメタル
クライオスタット (堀場)	1	容量 36ℓ 保存期間 2週間 液面警報器 ブザー&ランプ
イオンポンプ (日電バリオン)	1	排気速度 1ℓ/s 動作範囲 $10^{-5} \sim 10^{-10}$ Torr 圧力-電流特性 10^{-7} Torr/1μA
<u>電子回路部</u>		
Ge(Li) 用プリアンプ (ORTEC 120-3B)	1	型式 電荷増巾型 入力ノイズ 0.8 KeV/0 pF 転換利得 170 mV/MeV

構成要素	数量	基本仕様	
		立上り時間	20 nSec 0 pF
		"	25 nSec 20 pF
		立下り時間	50 μ Sec
		非線形性	0.05%以下
Ge(Li)用プリアンプ (堀場)	2	型式	電圧増巾型
		転換利得	~20
		非線形性	0.1%以下
		立上り時間	20 nSec
シンチレータ用プリアンプ (堀場BPA-1)	6	Unity gain	
		立上り時間	0.45~0.5 μ Sec
		非線形性	0.03%以下
タイミングフィルターアンプ (ORTEC 454)	2	連続利得	$\times 2 \sim \times 200$
		非線形性	1%以下
		ノイズ	10 μ V以下
		出力	+0.5~-6.0V
		立上り時間	4.5 nSec
ファーストディスクリミネータ (ORTEC 417)	2	立上り時間(ファースト)	2.5 nSec
		" (スロー)	20 nSec
		デスクリレンジ	150mV~1V
		非線形性	2%以下
		カウントレイト	10 ⁸ /Sec
リアーアンプ (ORTEC 410)	2	利得(RCモード)	0.35~480
		" (DLモード)	0.75~1300

構成要素	数量	基本仕様
		立上り時間 (ユニポーラー) 80 nSec " (バイポーラー) 100 nSec 非線形性 0.1 % 以下
リサーチアンプ (ORTEC 450)	1	立上り時間 120 nSec (利得 2.5 ~ 3000) バンド巾 100 Hz ~ 2 MHz 出力 バイポーラー, ユニポーラー, ファーストバイポーラー 非線形性 0.05 % 0.05 % 0.2 %
タイミングシングルチャンネル (ORTEC 420A)	3	入力範囲 100 mV ~ 10 V パルス巾 200 nSec ~ 20 μSec 非線形性 0.25 % 以下
ナノ デイレイ (ORTEC 425)	1	デイレイ長さ 1, 2, 4, 8, 16 nSec デイレイ精度 100 PSec
デイレイ アンプ (ORTEC 427A)	1	デイレイリップル 2 % 以下 デイレイタイム 60 nSec ~ 4.75 μSec 非線形性 0.08 % 以下
タイム パルス コンバータ (ORTEC 437A)	1	タイムレンジ 0.05 μSec ~ 80 μSec 時間分解能 10 PSec fwhm 非線形性 0.1 % (Integ) 2 % (Diff) カウントレイト スタート $3 \times 10^6 / \text{Sec}$ " ストップ $3 \times 10^7 / \text{Sec}$
リニアゲイト&スローコインシ デンス (ORTEC 409)	1	ゲイン巾 0.5 ~ 3 μSec 非線形性 0.2 %

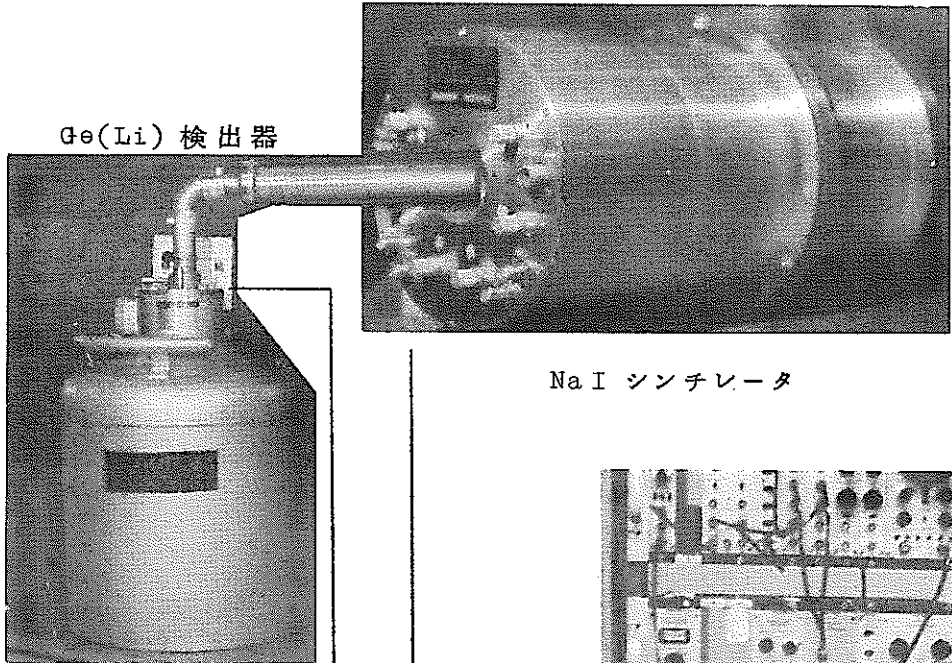
構成要素	数量	基本仕様
ゲイトバイアスアンプ (ORTEC 444)	1	ゲイト入力 3V以上, 100nSec 以上 立上り時間 0.5 μSec (Linear) " 50 nSec (Busy) 非線形性 0.05%以下(DC結合)
リサーチパルサー (ORTEC 448)	1	出力 ±0~10V 立上り時間 20~2000 nSec 立下り時間 5~1000 μSec パルス/Sec 1~100
<u>データ処理部</u>		
A-D変換器 (GEOS 8060)	1	デジタル・レンジ 8192チャンネル クロックレート 100MHz 積分直線性 0.025%以下 微分 " 0.7%以下 ドリフト 0.01%以下
デジタルプロセッサ (GEOS 7000)	1	メモリ容量 20ビット, 4096チャンネル メモリサイクル 3.5 μSec ドリフト 0.01%以下 積分直線性 0.05%以下
デジタル計算機 (PDP-11/20)	1	メモリ容量 16ビット, 8192語 サイクルタイム 1.2 μSec 演算速度(加減) 2.3 μSec 命令数 400 インデックスレジスタ 8 インターラプトレベル 4 ユニバス方式

構成要素	数量	基本仕様
<u>I/O 部</u>		
テレタイプ・プリンター (ASR33TC)	1	入出力形式 ページプリンター, テープパンチ&リーダー 入出力速度 10字/Sec
X-Yプロッター (HP-7004B)	1	出力形式 X-Yプロットイング, X-Yレコーディング 直線性 0.1% of full scale プロットイング速度 ~2点/Sec
オシロスコープ (Tektro 602)	1	形状 5" ディスプレイ ディスプレイタイム 16μSec/ch
<u>電源部</u>		
Ge(Li)用バイアス電源 (ORTEC 456)	1	出力 0~3000V, 0~10mA 電圧変動 0.01%/hr リップル 10mV以下 (p-to-p) 較正精度 0.25%
NaI(Tl)用高圧電源 (FLUKE 412B)	1	出力 0~2100V, 0~30mA 電圧変動 0.005%/hr リップル 1mV以下 (p-to-p) 較正精度 0.25%
プリアンプ用電源&ビン (東京原子 701-3)	1	出力 ±12, ±24V, 350mA DC 電圧変動 0.01%以下 リップル 1mV以下 (p-to-p)
各アンプ用電源&ビン (ORTEC 401A/402A)	3	出力 ±12V, 2A, ±24V, 1A 安定性 0.5% over six month リップル 3mv以下 (p-to-p) 較正精度 0.5%

構成要素	数量	基本仕様
P.H.A 用電源 (GEOS 6510)	1	
<u>その他</u>		
鉛遮蔽体 & 架台 (千代田保安)	1	遮蔽厚さ 10 cm 架台高さ 約 1 m SUS 27 被覆

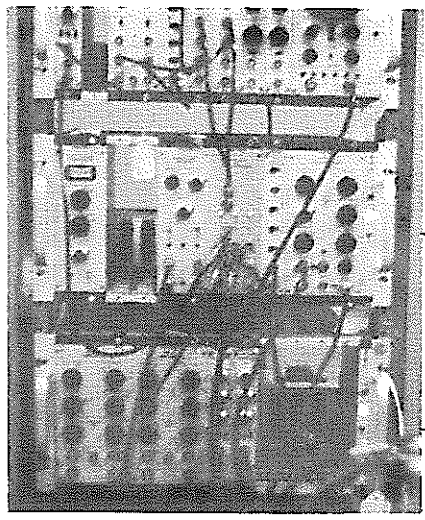
—34—

Ge(Li) 検出器

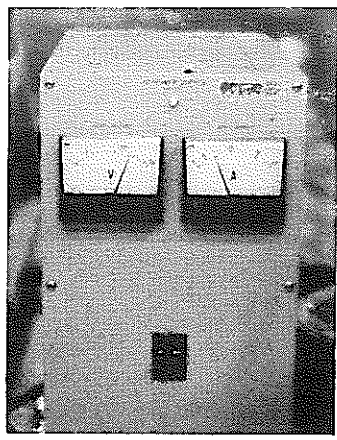
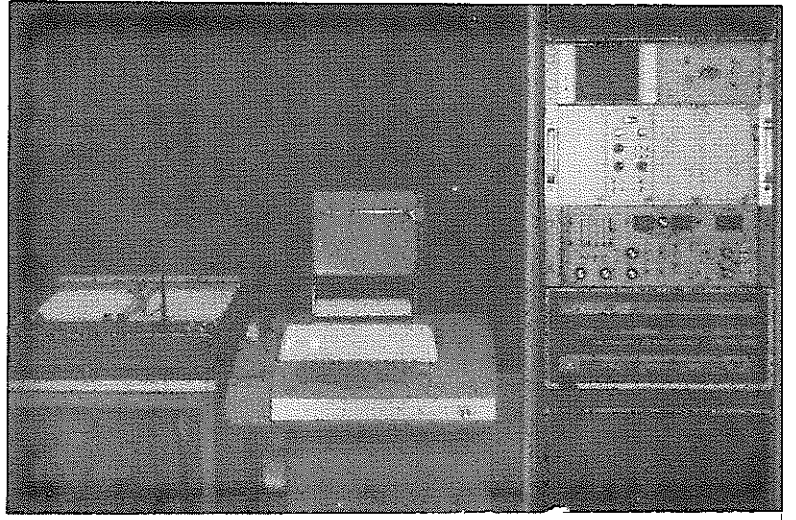


NaI シンチレータ

多重チャンネル波高分析装置



電子回路



SCR AC 定電圧装置

100V

117V

Fig. 3-1 燃焼度測定システム

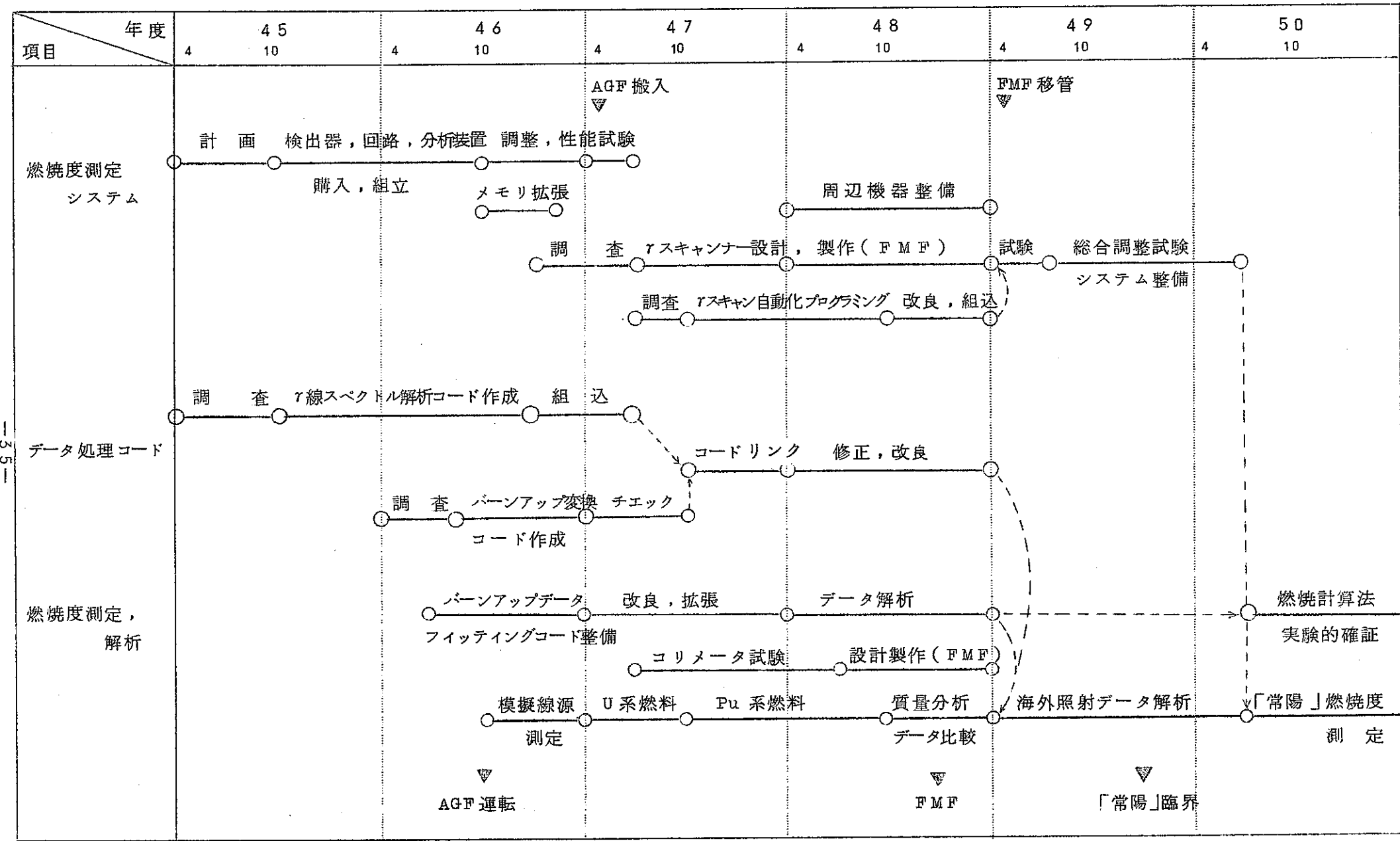


Fig. 3-2 燃焼度測定システム研究開発スケジュール

参 考 文 献

1. γ 線スペクトロメータシステム

- 1) Hans Fiedler, Orren Tench, Ge(Li) Gamma Spectrometer Systems, Cambera I.I.(1968)
- 2) Princeton Gamma-Tech, Ge(Li) Hand book (1969)
- 3) 阪井英次, 応用物理 Vol. 38 No. 1 (1969)
- 4) E.Storm, E.Gilbert, H.Israel, LA2237 (1958)
- 5) 阪井英次 片桐政樹, 川口千代二, JAERI - memo 4315 (1971)
- 6) Princeton Gamma - Tech, Ge(Li) Well Counters
- 7) J.Kantele, P.Suomine, Nucl.Instr. and Meth. 56,351(1967)
- 8) H.W.Kraner, R.L.Chase, IEEE NS-15(3), 381(1968) ✓
- 9) J.M.Palms, R.E.wood, O.H.Puckett, ibid, 397 (1968)
- 10) A.R.Sayres, J.A.Baicker, ibid, ,393 (1968)
- 11) H.Hick, R.Pepelnik, Nucl. Instr, and Meth, 68,240 (1969)
- 12) D.H.White, R.E.Birkett, ibid, 73,260 (1969)
- 13) David C. Comp, UCRL 71825 (1969)
- 14) E.Der Mateosian, Nucl. Instr. Meth. 73,77 (1969)
- 15) N.P.Wilburn, L.D.Coffin, IBM J.Res.Develop., January (1969)
- 16) N.I.Sax, J.C.Daly, Nucl. Appl. & Tech. Vol.8, 516 (1970)
- 17) Wm.C.McHarris etal, Conf - 690818

2. ソフトウェア

- 18) J.T.Routti, S.G.Prussin, Nucl. Instr. and Meth. 72,125 (1969)
- 19) L.Varnell, J.Trischuk, ibid, 76,109 (1969)
- 20) D.C.Robinson, AERE - R6144 (1969)
- 21) G.D.Seybold, BNWL - 1227 (1969)
- 22) J.T.Routti, UCRL - 19452 (1969)
- 23) V.Barnes, IEEE NS - 15(3) 437 (1968)
- 24) P.Quittner, Nucl. Instr and Meth. 76,115 (1969)

- 25) M.A.Mariscotti, *ibid*, 50,309 (1967)
- 26) M.A.Mariscotti, BNL - 10904 (1967)
- 27) A.Gavron, IA - 1193
- 28) J.Knoth, F.Sandroek, H.Schwenke, P.Wille, ATKE 14-64,342 (1969)
- 29) J.Knoth, H.Schwenke, *ibid*, 15 - 45, 231 (1970)
- 30) P.Popa, M.De Coster, D.Langela, Nucl. Appl. & Tech. Vol.9, 755 (1970)
- 31) H.Hick, M.Lammer, SGAE - PH - 98
- 32) V.F.Bulovic, Journal of Radioanal. Chem. Vol.4, 99 (1970)
- 33) N.F.Pravdyuk et al, Atomic Energy(USSR) Vol.21, No.2, 92 (1966)
- 34) M.Robin, M.Jastrzeb, S.Boisliveau, R.Boyer, R.Vidal, CEA - R - 3863 (1969)
- 35) M.J.Higatsberger et al, Proc. Symp. Nucl. Mat. Manag. IAEA, 817 (1966)
- 36) N.C.Rasmussen, J.A.Sovka, S.A.Mayman, *ibid*, 829
- 37) W.J.Mcgonnagle, *ibid*, 851
- 38) A.J.Fudge, E.Foster, L.Murphy, *ibid*, 867
- 39) F.L.Lisman, W.J.Maeck, J.E.Rein, Nucl. Sci. Eng.,42, 215 (1970)
- 40) R.Marten, H.Rosomm, ATKE 14 - 63,339 (1969)