

JAERI-M

7 2 8 9

画像解析装置(QTM)による UO_2 ペレットの
粒度・気孔度および気孔分布の測定

1977年9月

柳澤 和章

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

画像解析装置 (QTM) による UO_2 ペレットの
粒度・気孔度および気孔分布の測定

東海研究所安全工学部燃料安全第1研究室

柳澤 和章

(1977年8月24日受理)

画像解析装置 (QTM) を用いた焼きしまり実験解析で得られた知見および技術を明らかにした。

QTMの粒径測定のパフォーマンスは良好であった。そこでQTMを使用して焼きしまり実験に用いた UO_2 ペレットの粒径測定を行ないその結果を示した。

気孔および気孔分布測定上の問題点とその処理方法を明らかにした。そこから得た知見に基づき UO_2 ペレットの気孔分布を測定しその結果を示した。

Grain Size, Pore Size and Pore Distribution Measurement of
UO₂ Pellet by Utilizing a Image Analyzing Instrument (QTM)

Kazuaki YANAGISAWA

Division of Reactor Safety, Tokai Research Establishment,
JAERI

(Received August 24, 1977)

This report describes the experiences from the use of QUANTIMET image analyzing instrument(QTM) together with some results from the densification experiments.

It was demonstrated that the grain size measurement by QTM for standard specimen was very accurate, and the method was applied for the grain size determination of the UO₂ from the densification experiment.

The technical problems in the determinations of pore size and pore distribution were discussed and the methods to treat the problems were proposed. The pore distribution obtained by this method are demonstrated.

Keywords; Fuel Densification, Image Analyzing Instrument(QTM), Grain Size, UO₂ Pellet, Pore Size, Pore Distribution, Measuring Technique, Plateau Method.

目 次

1. はじめに	1
2. 測定因子	1
3. 較 正	1
4. 機 器	2
5. 操作の概要	2
6. UO_2 ペレットの粒径測定	4
7. UO_2 ペレットの気孔径と気孔分布の測定	6
8. QTM の今後の利用について	10
9. 結 言	10
参考文献	11

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Parameters on Measurements	1
3. Calibration	1
4. Instrument	2
5. Outline Operating Instructions	2
6. Grain Size Measurement of UO ₂ Pellet	4
7. Pore Size and Pore Distribution Measurement of UO ₂ Pellet	6
8. Availability and Extensive Utility on QTM	10
9. Conclusion	10

Figures

- Fig. 1 Frames available
- Fig. 2 Exhibitions of Basic Parameters Classified Counting, and Pattern Recognition
- Fig. 3 Exhibitions of Intercept and Feret's Diameter
- Fig. 4 Examples of Calibration
- Fig. 5 Instrument Illustration
- Fig. 6 Epidiascope
- Fig. 7 Type II Reichert Zetopan Microscope
- Fig. 8 Standard Two Deck QTM System
- Fig. 9 Function of Epidiascope
- Fig. 10 Function of Display and System Control
- (a) Display Mode
- (b) System Control Mode
- Fig. 11 Variable Frame and Scale
- Fig. 12 1D Auto Detector
- Fig. 13 Standard Computer
- Fig. 14 Image Editor
- Fig. 15 2D Amender
- Fig. 16 Function Computer
- Fig. 17 Classifier-Collector
- Fig. 18 Microscope
- Fig. 19 The Standard Comparison Charts (JIS 0552-1957)
- Fig. 20 Measuring Model. L is the Length of Standard Measuring Line
- Fig. 21 Calibration between Picture Points and Scale Length
- Fig. 22 Photomicrograph of the Preirradiated, etched UO_2 Pellets.
Etching sol: $H_2O_2/H_2SO_4 = 8/1$
- Fig. 23 Photomicrograph of the Postirradiated, etched UO_2 Pellets.
 $H_2O_2/H_2SO_4 = 8/1$
- Fig. 24 Deciding Grain Size by Image Analyzer (preirradiation, intercept procedure)
- Fig. 25 Relation between Grain Size in Three Dimensional and Densification (density change)
- Fig. 26 Pore Counting Model
- Fig. 27 Pore Size Distribution and Cut-Off Problem
- Fig. 28 Plateau Measuring and Its Optimum Value Searching Problem

- Fig. 29 Identical Specimen Variated its Magnification
(Postirradiated F sample, $M_1 = 50$, $M_2 = 200$, $M_3 = 800$)
- Fig. 30 Pore Size Distribution of Preirradiated UO_2 Pellet is
measuring by means of QTM Image Analyzer for a Sample A.
- Fig. 31 Identical with Fig. 30 but both for Samples B and C
- Fig. 32 Identical with Fig. 30 but for Sample D
- Fig. 33 Identical with Fig. 30 but for Sample E
- Fig. 34 Identical with Fig. 30 but for Sample F
- Fig. 35 Pore Size Distribution of Postirradiated UO_2 Pellet is
measuring by means of QTM Image Analyzer both for Sample
A and B.
- Fig. 36 Identical with Fig. 35 but Samples are C, D, and E.
- Fig. 37 Pore Volume (Porosity) as function of a Pore Diameter.
(Pore Size Distribution) Samples are taken out from A to F.
- Fig. 38 Standard Charts for deciding an Optimum Light Concentration
Level Constructed Circles and Lines.

Tables

- Table 1 Result of the measuring a standard grain chart.
- Table 2 Result of UO_2 pellet grain size measuring on densification
experiment.
- Table 3 Result of UO_2 pellet pore volume (porosity) and pore size
measuring on densification experiment.

1. はじめに

当研究室が画像解析装置 (Image Analyzer) を使用しはじめてから約1年がすぎた。画像解析装置は測定対象体の持つ粒度, 気孔度の個数, 面積, 長さ (周長, 直径) や大きさごとの分布を定量化することができる。この特性を利用して当研究室では UO_2 ペレットの照射挙動の研究 - 特に照射前後の粒径・気孔径・気孔分布^{1)~3)} - に成果をあげた。この装置は英国からの輸入品 (商品名 Quantimet 720 Image Analyzing Computer) であり, これと同型のもので数多くのモジュールを備えているものは国内で数台だけである。最近はこの機器のもつ特性を利用して研究に応用しようとする研究者が増えて原研内部のみならず外部からも利用の申込みがある。そこで画像解析装置の利用法の説明し, 使用の手引ならびにその応用として焼きしまり実験への適用例について報告する。

2. 測定因子

画像解析装置 (以下 QTM と略記する) の測定データは全て格子点の数 (picture point 以下 pp と略記する) で表示する。画面上には Fig. 1 に示すように固定格子 (standard frame) と可変格子 (variable frame) が取れる。可変格子は格子点数が任意に変えられる。

QTM で測定可能な因子 (量) には次のものがある。

- (1) 対象体の個数 (Number or Count)
- (2) 対象体の面積 (Area)
- (3) 対象体の長さ (Length)
- (4) 対象体の周長 (Perimeter)

Fig. 2 に上記1)~4)の基礎パラメータ, その測定 (Sizing), パターン認識をおこなったときの様子を示す。Fig. 3 は Feret 直径 (F_h)^(*) と交差数という測定モード (機器に付属している) が対象体の形によってどの様に相異なるか, およびトポロジカルな数が使用モードによってどの様に機器に捕えられるかを示したものである。

3. 較正

QTM のデータは TV 画面上に全て pp で表示される。従ってデータ値への実尺較正が必要になる。Fig. 4 はその較正例である。Fig. 4 の左側の図では Standard Frame (これは Fig. 1 でみるように 800 pp, 縦 625 pp, 計 500,000 pp をもった固定格子) の横軸の 800 pp を利用し

* これは水平又は垂直方向の図形の広がりを表わす尺度である。

1. はじめに

当研究室が画像解析装置 (Image Analyzer) を使用しはじめてから約1年がすぎた。画像解析装置は測定対象体の持つ粒度, 気孔度の個数, 面積, 長さ (周長, 直径) や大きさごとの分布を定量化することができる。この特性を利用して当研究室では UO_2 ペレットの照射挙動の研究 - 特に照射前後の粒径・気孔径・気孔分布^{1)~3)} - に成果をあげた。この装置は英国からの輸入品 (商品名 Quantimet 720 Image Analyzing Computer) であり, これと同型のもので数多くのモジュールを備えているものは国内で数台だけである。最近はこの機器のもつ特性を利用して研究に応用しようとする研究者が増えて原研内部のみならず外部からも利用の申込みがある。そこで画像解析装置の利用法の説明し, 使用の手引ならびにその応用として焼きしまり実験への適用例について報告する。

2. 測定因子

画像解析装置 (以下 QTM と略記する) の測定データは全て格子点の数 (picture point 以下 pp と略記する) で表示する。画面上には Fig. 1 に示すように固定格子 (standard frame) と可変格子 (variable frame) が取れる。可変格子は格子点数が任意に変えられる。

QTM で測定可能な因子 (量) には次のものがある。

- (1) 対象体の個数 (Number or Count)
- (2) 対象体の面積 (Area)
- (3) 対象体の長さ (Length)
- (4) 対象体の周長 (Perimeter)

Fig. 2 に上記1)~(4)の基礎パラメータ, その測定 (Sizing), パターン認識をおこなったときの様子を示す。Fig. 3 は Feret 直径 (F_h)^(*) と交差数という測定モード (機器に付属している) が対象体の形によってどの様に相異なるか, およびトポロジカルな数が使用モードによってどの様に機器に捕えられるかを示したものである。

3. 較正

QTM のデータは TV 画面上に全て pp で表示される。従ってデータ値への実尺較正が必要になる。Fig. 4 はその較正例である。Fig. 4 の左側の図では Standard Frame (これは Fig. 1 でみるように 800 pp, 縦 625 pp, 計 500,000 pp をもった固定格子) の横軸の 800 pp を利用し

* これは水平又は垂直方向の図形の広がりを表わす尺度である。

1. はじめに

当研究室が画像解析装置 (Image Analyzer) を使用しはじめてから約1年がすぎた。画像解析装置は測定対象体の持つ粒度, 気孔度の個数, 面積, 長さ (周長, 直径) や大きさごとの分布を定量化することができる。この特性を利用して当研究室では UO_2 ペレットの照射挙動の研究 - 特に照射前後の粒径・気孔径・気孔分布^{1)~3)} - に成果をあげた。この装置は英国からの輸入品 (商品名 Quantimet 720 Image Analyzing Computer) であり, これと同型のもので数多くのモジュールを備えているものは国内で数台だけである。最近はこの機器のもつ特性を利用して研究に応用しようとする研究者が増えて原研内部のみならず外部からも利用の申込みがある。そこで画像解析装置の利用法の説明し, 使用の手引ならびにその応用として焼きしまり実験への適用例について報告する。

2. 測定因子

画像解析装置 (以下 QTM と略記する) の測定データは全て格子点の数 (picture point 以下 pp と略記する) で表示する。画面上には Fig. 1 に示すように固定格子 (standard frame) と可変格子 (variable frame) が取れる。可変格子は格子点数が任意に変えられる。

QTM で測定可能な因子 (量) には次のものがある。

- (1) 対象体の個数 (Number or Count)
- (2) 対象体の面積 (Area)
- (3) 対象体の長さ (Length)
- (4) 対象体の周長 (Perimeter)

Fig. 2 に上記1)~(4)の基礎パラメータ, その測定 (Sizing), パターン認識をおこなったときの様子を示す。Fig. 3 は Feret 直径 (F_h)^(*) と交差数という測定モード (機器に付属している) が対象体の形によってどの様に相異なるか, およびトポロジカルな数が使用モードによってどの様に機器に捕えられるかを示したものである。

3. 較正

QTM のデータは TV 画面上に全て pp で表示される。従ってデータ値への実尺較正が必要になる。Fig. 4 はその較正例である。Fig. 4 の左側の図では Standard Frame (これは Fig. 1 でみるように 800 pp, 縦 625 pp, 計 500,000 pp をもった固定格子) の横軸の 800 pp を利用し

* これは水平又は垂直方向の図形の広がりを表わす尺度である。

て実尺度との対応をつけ下式が成立している。

$$800 \text{ pp} = 492 \text{ mm}$$

$$1 \text{ pp} = 61 \text{ } \mu\text{m}$$

右図では可変格子を利用して実尺と対応させて較正する。つまりこの場合、図にうつっているのは1目盛10 μm のマイクロメーターで、その361 μm が可変格子の540 μp に対応する。すなわち、

$$540 \text{ pp} = 361 \text{ } \mu\text{m}$$

$$1 \text{ pp} = 0.67 \text{ } \mu\text{m}$$

実際の測定では対象体が実物そのものでなく、倍率の入った写真であったりする場合が多く、この場合には少し工夫が必要になる。この対処法は応用として後述する。

4. 機 器

QTMは現在10の大きなモード(Mode)を有する。すなわち、

- (i) Epidiascope or Microscope
- (ii) Display and System Control
- (iii) Variable Frame and Scale
- (iv) 1D Auto Detector
- (v) Standard Computer
- (vi) Image Editor
- (vii) 2D Amender
- (viii) Function Computer
- (ix) Classifier Collector
- (x) Microscope

このうち(i), (x)は本体と分離しており、(ii)~(ix)は本体に取りつけられている。この他試料を画像上に直読できるように顕微鏡が設置されている。Fig. 5に解析装置の全容、Fig. 6は上記(i)、Fig. 7は(x)、Fig. 8には本体のどこに上記(ii)~(ix)が取り付けられているかの位置関係を示す。Fig. 9~Fig. 18は各モードの機能の配置図である。

5. 操作の概要

QTM自体の電氣的、機械的の点検、保守法についてここでは触れない。機器の性能を保つための準備はあらかじめできているものとする。

て実尺度との対応をつけ下式が成立している。

$$800 \text{ pp} = 492 \text{ mm}$$

$$1 \text{ pp} = 61 \text{ } \mu\text{m}$$

右図では可変格子を利用して実尺と対応させて較正する。つまりこの場合、図にうつっているのは1目盛10 μm のマイクロメーターで、その361 μm が可変格子の540 μp に対応する。すなわち、

$$540 \text{ pp} = 361 \text{ } \mu\text{m}$$

$$1 \text{ pp} = 0.67 \text{ } \mu\text{m}$$

実際の測定では対象体が実物そのものでなく、倍率の入った写真であったりする場合が多く、この場合には少し工夫が必要になる。この対処法は応用として後述する。

4. 機 器

QTMは現在10の大きなモード(Mode)を有する。すなわち、

- (i) Epidiascope or Microscope
- (ii) Display and System Control
- (iii) Variable Frame and Scale
- (iv) 1D Auto Detector
- (v) Standard Computer
- (vi) Image Editor
- (vii) 2D Amender
- (viii) Function Computer
- (ix) Classifier Collector
- (x) Microscope

このうち(i), (x)は本体と分離しており、(ii)~(ix)は本体に取りつけられている。この他試料を画像上に直読できるように顕微鏡が設置されている。Fig. 5に解析装置の全容、Fig. 6は上記(i)、Fig. 7は(x)、Fig. 8には本体のどこに上記(ii)~(ix)が取り付けられているかの位置関係を示す。Fig. 9~Fig. 18は各モードの機能の配置図である。

5. 操作の概要

QTM自体の電氣的、機械的の点検、保守法についてはここでは触れない。機器の性能を保つための準備はあらかじめできているものとする。

て実尺度との対応をつけ下式が成立している。

$$800 \text{ pp} = 492 \text{ mm}$$

$$1 \text{ pp} = 61 \text{ } \mu\text{m}$$

右図では可変格子を利用して実尺と対応させて較正する。つまりこの場合、図にうつっているのは1目盛10 μm のマイクロメーターで、その361 μm が可変格子の540 μp に対応する。すなわち、

$$540 \text{ pp} = 361 \text{ } \mu\text{m}$$

$$1 \text{ pp} = 0.67 \text{ } \mu\text{m}$$

実際の測定では対象体が実物そのものでなく、倍率の入った写真であったりする場合が多く、この場合には少し工夫が必要になる。この対処法は応用として後述する。

4. 機 器

QTMは現在10の大きなモード(Mode)を有する。すなわち、

- (i) Epidiastroscope or Microscope
- (ii) Display and System Control
- (iii) Variable Frame and Scale
- (iv) 1D Auto Detector
- (v) Standard Computer
- (vi) Image Editor
- (vii) 2D Amender
- (viii) Function Computer
- (ix) Classifier Collector
- (x) Microscope

このうち(i), (x)は本体と分離しており、(ii)~(ix)は本体に取りつけられている。この他試料を画像上に直読できるように顕微鏡が設置されている。Fig. 5に解析装置の全容、Fig. 6は上記(i)、Fig. 7は(x)、Fig. 8には本体のどこに上記(ii)~(ix)が取り付けられているかの位置関係を示す。Fig. 9~Fig. 18は各モードの機能の配置図である。

5. 操作の概要

QTM自体の電氣的、機械的の点検、保守法についてはここでは触れない。機器の性能を保つための準備はあらかじめできているものとする。

5.1 機器の記号化

次の様な手順で行なり。機器とそこに含まれている関数は全て記号化する。まずモジュールであるが、どの番号にどのモジュールが相当するかを Fig. 6～Fig. 8 に示した。これは 4 でのべた番号とその機器名(モジュール)に一致している。Fig. 6～Fig. 8 でモジュールを捜しあてたらそこに数字を記入してある。この数字はそのモジュールを 1 つ 1 つ示した Fig. 9～Fig. 18 の各図番号に相当しているからその図を捜す。各図中にはモードに番号が記されている(例えば①、②……)。次にその例を示す。

-例-

<1> (i)-①を押す。

(i) は Fig. 6 に示してある。それによると(i)g とあるから Fig. 9 にモードがのっている。

Fig. 9 をみると①とふってある装置がわかるから実際の機器でそこを押す(これは Epidiascope (i) の Power ①を入れる操作を意味する)。

<2> (ii)-②を上にする。

(ii)-③を右にまわして④の針が 0.2 になるようにする。

これはまず(ii)とあるから、Fig. 8 をみると添字が 10(a) or 10(b) になっている。そこで、Fig. 10(a) or 10(b) をみると 10(b) に②がある。そこでまず実際に②を上側に入れる。続いて③を右にまわせとあるので指示通り右にまわしていくと④の針が右に触れはじめるから指針が 0.2 のところになったらやめる(これは System Control の感度調整の手順である)。

5.2 測定

5.2.1 写真、ネガ等を画像解析する場合

(i) の上に目的の写真またはネガをのせる。

↓
本体のメインスイッチ (Fig. 8) ON

↓
(i)-① PUSH

↓
写真(不透明のもの)のとき (i)-② PUSH

ネガ(透明のもの)のとき (i)-③ PUSH

↓
機器が定常に達するまでまつ(3～4分)

↓
(ii)-① UP (STAND BY の表示が消え、TV 画面に光が入る)

↓
(ii)-② UP

↓
(ii)-③を静かに時計方向にまわしていって(ii)-④の針を 0.2 までもっていく。

↓
(ii)-② DOWN

(ii)-④をみながら(i)-④をゆっくりと(注意して)UPしていき(ii)-④の針がX2とある赤レンジの中に入るようにする。

↓
(i)の正面扉をあけてレンズ台を上下し、TV上に鮮明な像があらわれるまで動かす(ていねいに作業を遂行しないとレンズを機器(i)の天井に当てる恐れあり)

↓
(ii)-⑤をDOWNする。

↓
写真又はネガの場合の基本動作終了

5.2.2 顕微鏡から直接面像解析する場合

まず普通に行う様に顕微鏡上で試料の画像を作る。

↓
本体のメインスイッチ ON

↓
(X)-① UP

↓
機器が定常に達するまでまつ(3~4分)

↓
(iii)-① UP

↓
(ii)-② UP

↓
(ii)-③を静かに時計方向にまわし(ii)-④の針を0.2にする。

↓
(ii)-② DOWN

↓
(ii)-④をみながら(X)-②をゆっくりと時計方向にまわし(ii)-④の針がX2赤レンガ中に入るようにする。

↓
(ii)-⑤ DOWN

↓
顕微鏡試料の基本動作終了

5.2.3 応用動作

以後はその目的に応じたモジュール、関数機能を使用する。その仕様は使用する側の目的によって変わる。

以下QTMを使用して測定を行なった例およびその結果について示す。

6. UO₂ ペレットの粒径測定

QTMが正しく粒径を決定できるかどうかを確かめるためにFig. 19のような粒度標準図を用意してQTMにかけ、粒径を切断法で計算した。

(ii)-④をみながら(i)-④をゆっくりと(注意して)UPしていき(ii)-④の針がX2とある赤レンジの中に入るようにする。

↓
(i)の正面扉をあけてレンズ台を上下し、TV上に鮮明な像があらわれるまで動かす(ていねいに作業を遂行しないとレンズを機器(i)の天井に当てる恐れあり)

↓
(ii)-⑤をDOWNする。

↓
写真又はネガの場合の基本動作終了

5.2.2 顕微鏡から直接面像解析する場合

まず普通に行う様に顕微鏡上で試料の画像を作る。

↓
本体のメインスイッチ ON

↓
(X)-① UP

↓
機器が定常に達するまでまつ(3~4分)

↓
(iii)-① UP

↓
(ii)-② UP

↓
(ii)-③を静かに時計方向にまわし(ii)-④の針を0.2にする。

↓
(ii)-② DOWN

↓
(ii)-④をみながら(X)-②をゆっくりと時計方向にまわし(ii)-④の針がX2赤レンジの中に入るようにする。

↓
(ii)-⑤ DOWN

↓
顕微鏡試料の基本動作終了

5.2.3 応用動作

以後はその目的に応じたモジュール、関数機能を使用する。その仕様は使用する側の目的によって変わる。

以下QTMを使用して測定を行なった例およびその結果について示す。

6. UO_2 ペレットの粒径測定

QTMが正しく粒径を決定できるかどうかを確かめるためにFig. 19のような粒度標準図を用意してQTMにかけ、粒径を切断法で計算した。

6.1 切断法を用いた標準図の粒径

6.1.1 計算法

Fig. 20 のモデルで測定を行なったとする。基準線 L の線分長を $N[pp]$ とする。今 i 番目の測定で交点数が $n_i[pp]$ とすれば

$$N_L = \frac{n_i[pp]}{N[pp]} \quad n_i \geq 10 \quad \dots\dots\dots (1)$$

1 視野に対し n_i は常に 10 個になるようにすることが必要である。Fig. 21(1) のように測定を行なったそのままの状態であら尺をのせ、例えば 10mm が何 pp に相当するかを知るのとはごく簡単であり次のようにして換算率が求められる。

Fig. 21(1) で

$$530 \text{ pp} = 10 \text{ mm}$$

従って換算率(以後 CF と略記する) CF は

$$CF = \frac{10 [\text{mm}]}{530 [\text{pp}]} = 18.87 \quad [\mu\text{m/pp}]$$

しかし Fig. 21(2) のごとく基準スケールがレンズを通して縮尺または拡大されて写っている場合は、倍率 M とおくと真の CF は

$$\frac{CF}{M}$$

としておかなければならない。

一般に倍率 M を使った粒径 $d_i [\mu\text{m}]$ は次式で与えられる。

$$d_i = \frac{1}{n_i} \cdot \frac{CF \cdot N}{M} \quad , \quad [\mu\text{m}] \quad \dots\dots\dots (2)$$

6.1.2 標準図粒径測定の結果

ATSM 粒径番号 5, 6, 8 を対象体として実験を行なった。実験の結果とは別に理論モデルに¹⁾よる数値もあわせて Table 1 に示す。

6.2 UO₂ ペレット写真を用いての粒径測定

標準図を用いて測定を行なってみたところ、良好な結果を得たので実際に焼きしまり実験試料の粒径測定に適用した。Fig. 22 は未照射 UO₂ ペレットの 6 種類の試料に対するエッチング写真であり、Fig. 23 は照射済の UO₂ ペレットの写真である。これらの写真を用いて粒径測定を行なっている様子を Fig. 24 に示す。Table 2 はその粒径測定の結果をまとめたものである。

焼きしまりにおよぼす UO₂ ペレットの初期粒径の大きさ、および照射中の粒径の変化を捕えるた

めに上記のようなQTMによる粒径測定を行なって粒径を定量化した。

このようにして得た粒径と焼きしまり量との関係をプロットしたのがFig. 25である。ただし最終的に用いた粒径は二次元から三次元へ変換を行なうため二次のデータ値に1.2を乗じた値¹⁾になっている。

7. UO₂ ペレットの気孔径と気孔分布の測定

気孔径とその分布（以下この章においては簡単に径と分布と略記する）の測定は下記のような問題点が含まれている。

- (i) 気孔の大きさは、大きいものには一定の限度が存在しているが、小さいものは測定倍率をかえることにより相当小さなものまで捕えられる。したがって測定範囲をどこに絞るかが問題となる。
- (ii) 小さい気孔から大きい気孔まで連続的に分布している場合、単一倍率の写真ではとりきれないから幾つかの倍率を分けて撮影することになる。この分割した写真をQTMにかけると同じものを2度以上重ねて測定する可能性がある。つまりFig. 26にみられるように倍率 M_1 で気孔量を測定して1つの分布曲線を得たとする。 M_1 では極く小さい気孔をとりきらないので倍率の高い $M_2 > M_1$ で M_1 の一部を拡大してその気孔分布曲線を作ればハッチング部分はすでに M_1 でカウントしており2重になっている。最終的には同一のUO₂ペレットの分布なのであるから、 $M_1 < M_2 < M_3 \dots$ の各倍率での分布曲線をつなげなくてはならない（カット・オフ問題）。結合のモデル図をFig. 27に示す。実際の測定では M_3 以下は相当小さいものまで可能と考えられるので ∞ 記号をつけた。|||||は M_3 を基準に測定したときの倍率 M_2 との重なり量である。
- (iii) QTMの機能上の問題であるが、機器はある光の濃度を基準にして（例えば写真の素地の白）それより黒いものを濃度ごとに次々と測定していくシステムになっている。そのため写真の地の色が同一ペレットのものでも現像状態、エッチング状態で異なると値が大きくくい違うことになる。
- (iv) (iii)に関連して基準濃度レベルと機器の測定値との関係を調べてみるとFig. 28のようなプラトー域があらわれる。この基準濃度レベルの設定の仕方が適当でないと誤ったデータを測定することになる。
- (v) 測定は全てpp (picture points)で行なわれるから実験の設計段階での換算計算が複雑である。

以上(i)-(v)の問題に対してどの様に処理を行なったかを逐次のべていく。

7.1 測定範囲の問題

照射前後のUO₂ペレットの気孔写真は今のところ1000倍が最高倍率である。しかも気孔の分布は極く小さいものから大きいものまでであることが検鏡から知れた。そこで大きな気孔用に50倍、

めに上記のようなQTMによる粒径測定を行なって粒径を定量化した。

このようにして得た粒径と焼きしまり量との関係をプロットしたのがFig. 25である。ただし最終的に用いた粒径は二次元から三次元へ変換を行なうため二次のデータ値に1.2を乗じた値¹⁾になっている。

7. UO₂ ペレットの気孔径と気孔分布の測定

気孔径とその分布(以下この章においては簡単に径と分布と略記する)の測定は下記のような問題点が含まれている。

- (i) 気孔の大きさは、大きいものには一定の限度が存在しているが、小さいものは測定倍率をかえることにより相当小さなものまで捕えられる。したがって測定範囲をどこに絞るかが問題となる。
- (ii) 小さい気孔から大きい気孔まで連続的に分布している場合、単一倍率の写真ではとりきれないから幾つかの倍率を分けて撮影することになる。この分割した写真をQTMにかけると同じものを2度以上重ねて測定する可能性がある。つまりFig. 26にみられるように倍率 M_1 で気孔量を測定して1つの分布曲線を得たとする。 M_1 では極く小さい気孔をとりきれないので倍率の高い $M_2 > M_1$ で M_1 の一部を拡大してその気孔分布曲線を作ればハッチング部分はすでに M_1 でカウントしており2重になっている。最終的には同一のUO₂ペレットの分布なのであるから、 $M_1 < M_2 < M_3 \dots$ の各倍率での分布曲線をつなげなくてはならない(カット・オフ問題)。結合のモデル図をFig. 27に示す。実際の測定では M_3 以下は相当小さいものまで可能と考えられるので ∞ 記号をつけた。|||||は M_3 を基準に測定したときの倍率 M_2 との重なり量である。
- (iii) QTMの機能上の問題であるが、機器はある光の濃度を基準にして(例えば写真の素地の白)それより黒いものを濃度ごとに次々と測定していくシステムになっている。そのため写真の地の色が同一ペレットのものでも現像状態、エッチング状態で異なると値が大きくくい違うことになる。
- (iv) (iii)に関連して基準濃度レベルと機器の測定値との関係を調べてみるとFig. 28のようなプラト域があらわれる。この基準濃度レベルの設定の仕方が適当でないで誤ったデータを測定することになる。
- (v) 測定は全てpp(picture points)で行なわれるから実験の設計段階での換算計算が複雑である。

以上I~Vの問題に対してどの様に処理を行なったかを逐次のべていく。

7.1 測定範囲の問題

照射前後のUO₂ペレットの気孔写真は今のところ1000倍が最高倍率である。しかも気孔の分布は極く小さいものから大きいものまでであることが検鏡から知れた。そこで大きな気孔用に50倍、

中程度のもの用に200倍、微細なものに対して800倍の写真を照射前後に対して用意した。これによって大きな気孔はほぼ捕えられたが、小さなものは0.3~0.5 μm 程度のものしか捕えられなかった。上記にあわせれば

$$M_1 = 50 < M_2 = 200 < M_3 = 800$$

となる。測定範囲はその結果

$$0.3 \sim 100 \mu\text{m}$$

となった (Fig. 29 は F なる試料を M_1 , M_2 , M_3 の倍率で測定を行なっているところを示す。 M_3 倍でも機械で測定できないポアがあることに注意を要する。

7.2 カット・オフの問題

測定を行なって気孔径に対して気孔容積をプロットすると実際 Fig. 27 のような微分曲線が得られる。本来同一試料について測定しているのであるから、重なり具合が非常に接近してあらわれる場合はあるはずである。例えば Fig. 27 では CUT-OFF と記したところがそれに相当している。したがってこの付近で $M_3 \rightarrow M_2$, $M_2 \rightarrow M_1$ に曲線をつなげる (最終的には実線で結んだ曲線が得られる)。照射前の A~F 6 試料, 照射後の A~E 5 試料 (照射後の F は Fig. 29 にすでに出てい) 計 11 試料の様子を Fig. 30~Fig. 34 (照射前), Fig. 35~Fig. 36 (照射後) に示す。Fig. 30 は A 試料で気孔径を小さくとしたもの、左側が低倍率、右側が高倍率で上段が試料中心、中段が試料の外側と中心の間、下段が試料外側の気孔の様子を示す。Fig. 31 上段は B 試料で人工の気孔の形成物添加を行なっている。左側が低倍率、右側が高倍率で低倍率では大きい気孔をよく測定してるが微小な気孔を測定していない (写真上で光っていないのは計数されておらず、光っているのは計数されていてその計数値が左かたに数字で表示されている。この数値を使用しての気孔量の計算については後述する)。それに対して高倍率の右側では測定落ちはあるものの比較的小さい気孔を計数している。Fig. 31 の下段は気孔をあらかじめ小さく作った試料 (C 試料) で上段の B の同一倍率と比べて大きい気孔の数が少なく微小な気孔が分配しているのがわかる。同じようにして Fig. 32 (D 試料) は微小な気孔, Fig. 33 (E 試料) は気孔形成物添加の大きい気孔, Fig. 34 (F 試料) は小さな気孔である。

Fig. 35, 36 は照射前に比べて気孔がまるくなっているのが特徴的である。気孔径とその量について測定した結果を Fig. 37 に示す。A~F 各試料につき前後の分布が一緒になっている。

7.3 基準濃度の問題

Fig. 30 を注意してみると写真の地が場所場所で異っている。例えば Fig. 30 の上段は試料内側、中段は中、下段は外側付近の測定時写真であるが、表面状態がエッチング、現像状態等で異なる。この場合 1 つ 1 つ、1 ケ所 1 ケ所について測定時に最適となる基準濃度を設定しないとデータに誤差が生ずる。基準濃度設定の方法については 7.4 でのべる。

7.4 最適プラト・値の決定

測定対象の写真で場所を一たん決めると、次は地の濃度を設定することになる。この基準濃度レベルはMIN値からMAX値までカウント数一定のプラトーを作り出す(実際では僅かではあるが右あがりになる)。プラト範囲を見つけるには、あらかじめ面積または周長(半径)の知っている対象体を測定して最も近い値をカウントした濃度レベルを選べばよい。そこでFig. 38のような形状の知っているものをくり返し測定し濃度レベルの最適値 C_0 は次式で示されることを見出した。

$$C_0 = C_{min} + (C_{max} - C_{min}) \times 0.3$$

ただし、 C_{min} 、 C_{max} はそれぞれプラトーでの濃度レベルの最小、最大値である。したがって同一試料でも測定場所を変えた場合、地の濃度が前者と異なっていたとすればその都度 C_0 を決定して測定を行なわなければならない。

7.5 実験の設計

気孔分布の横軸は気孔径であるが、分布は対数正規分布であるから測定しようと思う気孔の大きさ(量)を対数值で分割していく必要がある。

7.5.1 対数が等差数列を成す数列の作り方

初項を d_0 とする。常用対数(底10)で考える。 p を公比として

$$\begin{array}{r} \log d_n - \log d_{n-1} = p \\ \log d_{n-1} - \log d_{n-2} = p \\ \vdots \\ \log d_1 - \log d_0 = p \\ \hline \log d_n - \log d_0 = (n-1)p \end{array}$$

但し、 n : 正整数 (≥ 1)

$$\therefore d_n / d_0 = 10^{(n-1)p}$$

を得る。

10のべきで変わる対数軸上を r 個分割(例えば1から10までの間を r 個に分割)するとすると、

$$d_n = 10^{\frac{n-1}{r-1}} \cdot d_0 \quad \dots \dots \dots (*)$$

なる式が得られる。各区間(例えば1~10, 10~100)で測定を4回行なうとすれば、 $r=4$ を上式(*)に代入して

$$d_n = 10^{\frac{n-1}{3}} \cdot d_0$$

d_0 は一般に $d_0=1$ とするのが一番簡単である。このとき

$$d_n = 10^{\frac{n-1}{3}}$$

すなわち、

$$d_1 = 10^{\frac{0}{3}} = 1.00$$

$$d_2 = 10^{\frac{1}{3}} = 2.15 \quad d_5 = 2.15 \quad d_8 = \dots\dots\dots$$

$$d_3 = 10^{\frac{2}{3}} = 4.64 \quad d_6 = 4.64$$

$$d_4 = 10^{\frac{3}{3}} = 10.00 \quad d_7 = 10.00$$

精度をあげるには r の値を大きくすればよい。この d の値は QTM 機器上では Fig. 17, (X)-④ を使用してとっていくのであるが、(X)-④ は pp の値であって例えば [μm] といった値ではないから最終的には $\text{pp} \rightarrow [\mu\text{m}]$ への換算が必要になる。

7.5.2 換算

仮に 7.5.1 で述べた $r = 4$ 分割の d_i [pp] を使って測定を行なったとする。簡単のため対象体を二次元、正方形モデルで考えれば気孔径 d_i [μm] での全気孔面積を A_i [pp] とすれば、換算係数 $\text{CF} [\mu\text{m}/\text{pp}]$ として下式が成立する。

$$d_i [\mu\text{m}] = (\text{CF}) [\mu\text{m}/\text{pp}] \cdot \sqrt{A_i [\text{pp}^2]}$$

(CF) の測定はレンズ等の倍率をかえない様にして実尺をのせれば一番簡単であるが、もともと測定に使用したものが写真である場合倍率 $M(p)$ が入っているから、

$$(\text{CF})' = \frac{(\text{CF})}{M(p)}$$

として (CF)' を上式 d_i に代入してやる必要がある。

二次元・円等価直径モデル (気孔分布はこのモデルに近いと思われる) のときには

$$\frac{\pi}{4} d_i^2 = (\text{CF})^2 \cdot A$$

より d_i を求めて、

$$d_i = 1.128 (\text{CF}) \sqrt{A}$$

を得る。

7.5.3 従来の測定方法との比較

d_i に対する気孔量が求まったことにより、一番大きく変わったのは焼きしまり実験での照射前後の気孔分布の変化、および気孔径の変化が定量化できたことである。

さらに従来最小と最大の気孔径から算術平均により求めていた気孔径が、分布が知れたことによ

り加重平均で求められることになった。すなわち d_i [μm] での気孔量 f_i とすれば、

$$\bar{d} = d_i f_i / \Sigma f_i$$

で平均気孔径が求められる。これは的確に分布のピーク付近を示すものであり、単なる算術平均とは意味が異なる。Table 3 に焼きしまり実験で得た気孔径とその平均径を示す。これは Fig. 37 の分布データに基づいて測定したものである。

8. QTMの今後の利用について

本文中では触れなかったが、例えば Fig. 14 の(V)の装置は画面上の図形を自由に削ったりつけたりすることができる他、余分な部分をとってしまったり、ある時間での図形のパターンを記憶しておいて次の図形と重ねあわせたりすることができる。さらに Fig. 15 の(VI)の装置は、画面上で不規則な形態をしている図形と等価の図形を写真でみるような形に自由に作りだすことができる。前者の応用としては、例えば簡単に長さが測れないような飛跡とか図形をいとも簡単に定量化することができる。従って被覆管に生じたクラックの長さや形状とかいったものは、従来の手法では形だけが測るだけであるのに QTM を使用することにより定量化が可能である。また後者の応用としては、非等軸晶の粒径を決定するのにパターンで捕えて決定すればこれも容易である。

画像解析装置はごく小さなものから大きなものまで実物又は写真が使用出来るので、その利用価値は高いと思われる。

9. 結 言

画像解析装置を用いた焼きしまり実験解析(粒度・気孔度および気孔分布)で得た知見および技術を明らかにした。得た知見を以下に示す。

- 〔i〕 機器の基本操作について説明した。
- 〔ii〕 粒度測定を ASTM (JIS) 標準図について行い良好の結果をみた。この換算の方法も示した。焼きしまり実験に使用した実際の UO_2 ペレットについて粒径測定を行った結果を示した。
- 〔iii〕 気孔と気孔分布測定時の問題点を並記しその対処法を示した。すなわち現段階では気孔測定範囲は写真の倍率に制約されること、カットオフの問題は倍率の組み合わせと測定回数をふやすことで十分に精度をあげられること、プラトーでの最適濃度レベル C_0 次式であらわされること、

$$C_0 = C_{\min} + (C_{\max} - C_{\min}) \times 0.3$$

また対数軸上を r 個分割する場合の分割 p_p は次式であらわすことができる等である。

$$d_n = 10^{\frac{n-1}{r-1} p} \cdot d_0$$

り加重平均で求められることになった。すなわち d_i [μm] での気孔量 f_i とすれば、

$$\bar{d} = d_i f_i / \sum f_i$$

で平均気孔径が求められる。これは的確に分布のピーク付近を示すものであり、単なる算術平均とは意味が異なる。Table 3 に焼きしまり実験で得た気孔径とその平均径を示す。これは Fig. 37 の分布データに基いて測定したものである。

8. QTM の今後の利用について

本文中では触れなかったが、例えば Fig. 14 の(VI)の装置は画面上の図形を自由に削ったりつけたることができる他、余分な部分をとってしまったり、ある時間での図形のパターンを記憶しておいて次の図形と重ねあわせたりすることができる。さらに Fig. 15 の(VII)の装置は、画面上で不規則な形態をしている図形と等価の図形を写真でみるような形に自由に作りだすことができる。前者の応用としては、例えば簡単に長さが測れないような飛跡とか図形をいとも簡単に定量化することができる。従って被覆管に生じたクラックの長さや形状とかいったものは、従来の手法では形だけが測るだけであるのに QTM を使用することにより定量化が可能である。また後者の応用としては、非等軸晶の粒径を決定するのにパターンで捕えて決定すればこれも容易である。

画像解析装置はごく小さなものから大きなものまで実物又は写真が使用出来るので、その利用価値は高いと思われる。

9. 結 言

画像解析装置を用いた焼きしまり実験解析（粒度・気孔度および気孔分布）で得た知見および技術を明らかにした。得た知見を以下に示す。

- 〔i〕 機器の基本操作について説明した。
- 〔ii〕 粒度測定を ASTM (JIS) 標準図について行い良好の結果をみた。この換算の方法も示した。焼きしまり実験に使用した実際の UO_2 ペレットについて粒径測定を行った結果を示した。
- 〔iii〕 気孔と気孔分布測定時の問題点を並記しその対処法を示した。すなわち現段階では気孔測定範囲は写真の倍率に制約されること、カットオフの問題は倍率の組み合わせと測定回数をふやすことで十分に精度をあげられること、プラトーでの最適濃度レベル C_0 次式であらわされること、

$$C_0 = C_{\min} + (C_{\max} - C_{\min}) \times 0.3$$

また対数軸上を r 個分割する場合の分割 p は次式であらわすことができる等である。

$$d_n = 10^{\frac{n-1}{r-1} p} \cdot d_0$$

り加重平均で求められることになった。すなわち d_i [μm] での気孔量 f_i とすれば、

$$\bar{d} = d_i f_i / \sum f_i$$

で平均気孔径が求められる。これは的確に分布のピーク付近を示すものであり、単なる算術平均とは意味が異なる。Table 3 に焼きしまり実験で得た気孔径とその平均径を示す。これは Fig. 37 の分布データに基いて測定したものである。

8. QTMの今後の利用について

本文中では触れなかったが、例えば Fig. 14 の(V)の装置は画面上の図形を自由に削ったりつけたることができる他、余分な部分をとってしまったり、ある時間での図形のパターンを記憶しておいて次の図形と重ねあわせたりすることができる。さらに Fig. 15 の(VI)の装置は、画面上で不規則な形態をしている図形と等価の図形を写真でみるような形に自由に作りだすことができる。前者の応用としては、例えば簡単に長さが測れないような飛跡とか図形をいとも簡単に定量化することができる。従って被覆管に生じたクラックの長さや形状とかいったものは、従来の手法では形だけが測るだけであるのに QTM を使用することにより定量化が可能である。また後者の応用としては、非等軸晶の粒径を決定するのにパターンで捕えて決定すればこれも容易である。

画像解析装置はごく小さなものから大きなものまで実物又は写真が使用出来るので、その利用価値は高いと思われる。

9. 結 言

画像解析装置を用いた焼きしまり実験解析（粒度・気孔度および気孔分布）で得た知見および技術を明らかにした。得た知見を以下に示す。

- 〔i〕 機器の基本操作について説明した。
- 〔ii〕 粒度測定を ASTM (JIS) 標準図について行い良好の結果をみた。この換算の方法も示した。焼きしまり実験に使用した実際の UO_2 ペレットについて粒径測定を行った結果を示した。
- 〔iii〕 気孔と気孔分布測定時の問題点を並記しその対処法を示した。すなわち現段階では気孔測定範囲は写真の倍率に制約されること、カットオフの問題は倍率の組み合わせと測定回数をふやすことで十分に精度をあげられること、プラトーでの最適濃度レベル C_0 次式であらわされること、

$$C_0 = C_{\min} + (C_{\max} - C_{\min}) \times 0.3$$

また対数軸上を r 個分割する場合の分割 p_p は次式であらわすことができる等である。

$$d_n = 10^{\frac{n-1}{r-1} p} \cdot d_0$$

あわせて $pp \leftrightarrow \mu m$ の換算方法も示した。焼きしまり実験で使用した UO_2 ペレットにつき気孔度および気孔分布の測定を行い結果を示した。また分布のもつ有意義性につき言及した。

参 考 文 献

- 1) K. YANAGISAWA, "Concepton, Definition, Measuring Procedure of Grain Size - A grain size diameter determination of a UO_2 pallet" JAERI-M 6839 (1976)
- 2) M. UCHIDA, K. YANAGISAWA, M. ICHIKAWA, "Densification of Uranium Dioxide Fuel Pellet (I)" JAERI-M 6904 (1977)
- 3) K. YANAGISAWA, M. UCHIDA, K. HAYASHI "Study on Densification of Uranium Dioxide Fuel Pallet" JAERI-M 7210 (1977)

あわせて $pp \leftrightarrow \mu m$ の換算方法も示した。焼きしまり実験で使用した UO_2 ペレットにつき気孔度および気孔分布の測定を行い結果を示した。また分布のもつ有意義性につき言及した。

参 考 文 献

- 1) K. YANAGISAWA, "Concepton, Definifion, Measuring Procedure of Grain Size - A grain size diameter determination of a UO_2 pallet" JAERI-M 6839 (1976)
- 2) M. UCHIDA, K. YANAGISAWA, M. ICHIKAWA, "Densification of Uranium Dioxide Fuel Pellet (I)" JAERI-M 6904 (1977)
- 3) K. YANAGISAWA, M. UCHIDA, K. HAYASHI "Study on Densification of Uranium Dioxide Fuel Pallet" JAERI-M 7210 (1977)

Table 1 Result of the measuring a standard grain chart.

ASTM GRAIN SIZE NO.	GRAIN DIAMETER (μm)		
	ASTM	EXPERIMENT	THEORY (CIRCLE MODEL)
5	64	64	63
6	45	43	45
8	22	19	22

Table 2 Result of UO_2 pellet grain size measuring on densification experiment.

Type	A	B	C	D	E	F
Normalization :	small	large	small	large	large	large
(1) Pre-irradiat.	3.0	7.8	4.6	9.4	10.9	10.6
(2) Post-irradiat.	3.4	6.2	4.0	14.9	10.7	15.0
Difference (2)-(1)	0.4	-1.6	-0.6	5.5	-0.2	4.4

(*) Grain sizes obtained here were multiplying a two-dimensional, mean intercept diameter by 1.2 for the conversion of a two-dimensional into the three-dimensional intercept measurements.

Table 3 Result of UO₂ pellet pore volume (porosity) and pore size measuring on densification experiment.

Type	A	B	C	D	E	F
Normalization :	small	large	small	small	large	small
	-	Naphthalene	-	-	Naphthalene	-
Porosity :	4.64	6.85	2.30	3.97	4.76	2.41
(%) (1) pre-irradiat.						
(2) post-irradiat.	2.38	6.11	1.44	1.92	4.41	1.69
<u>porosity change</u>	2.26	0.74	0.86	2.05	0.35	0.72
(1)-(2)						
Weighted mean pore diameter ^{*)}						
(μm) (3) pre-irradiat.	15.5	30.5	11.1	16.2	25.7	7.6
(4) post-irradiat.	17.7	56.0	44.9	21.5	45.5	18.1
<u>diameter change</u>	2.2	25.5	33.8	5.3	19.8	10.5
(4)-(3)						

*) Used two dimensional, circle equivalent diameter model.

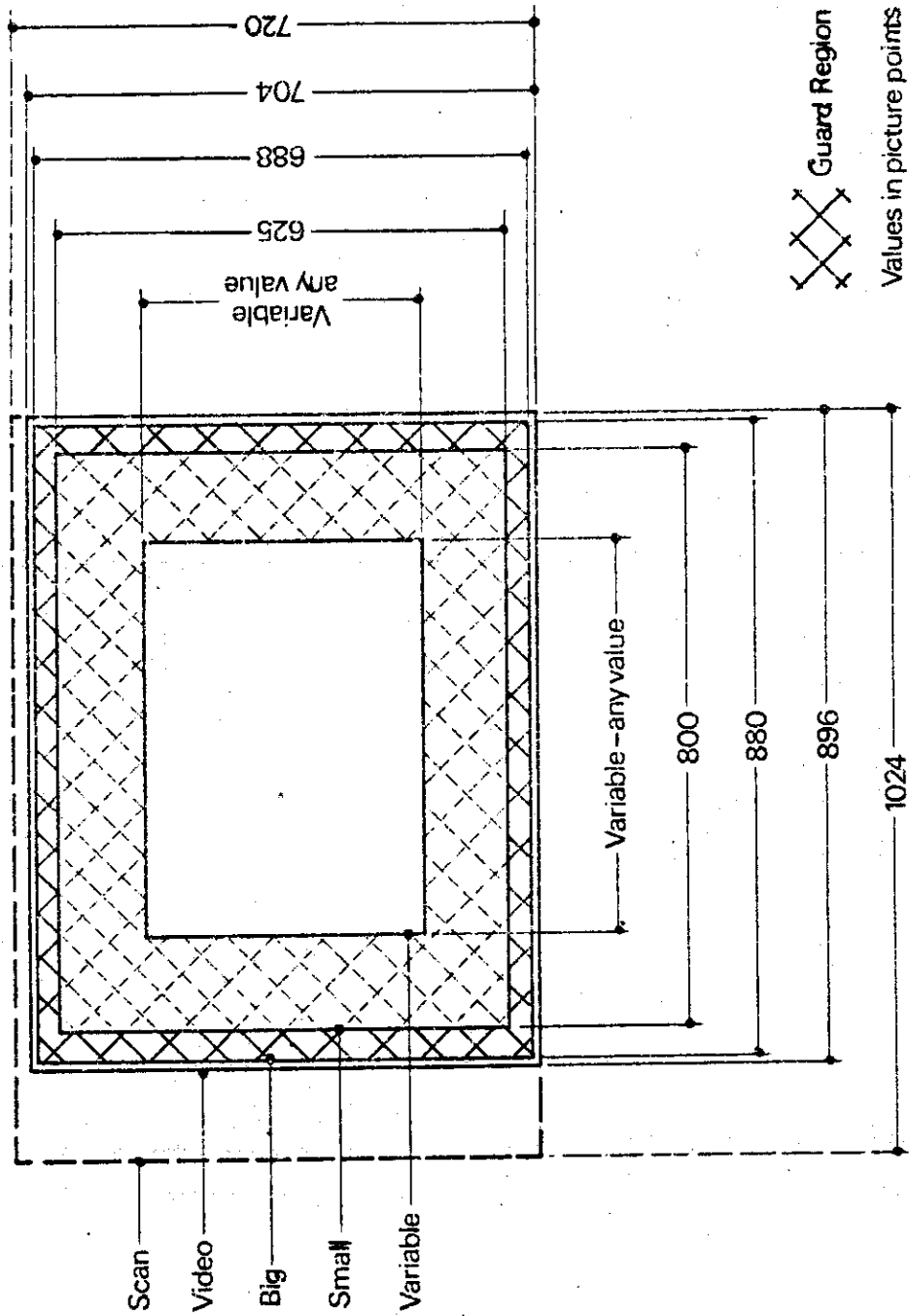


Fig. 1 Frames available

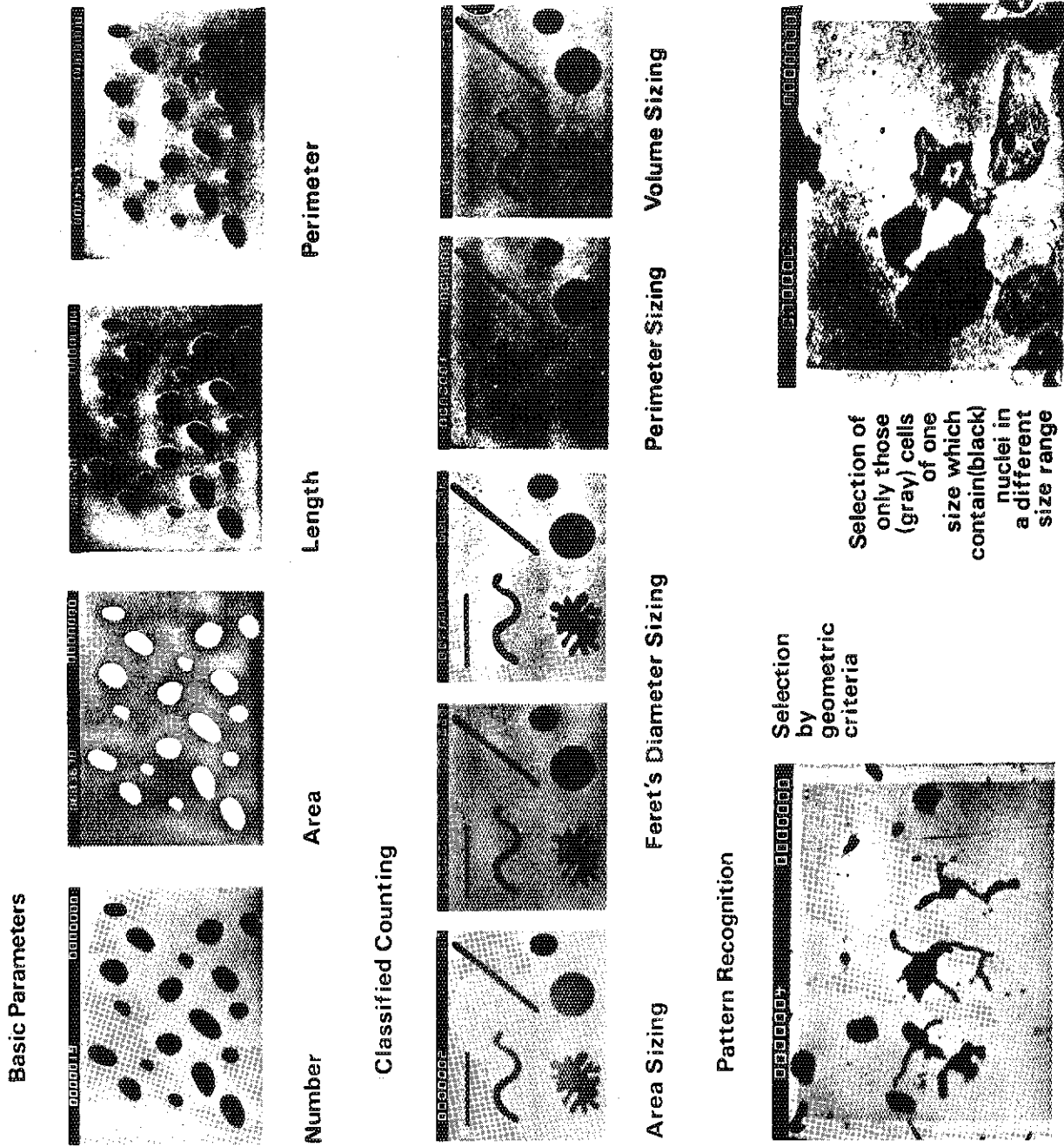


Fig. 2 Exhibitions of Basic Parameters Classified Counting, and Pattern Recognition

Intercept and Feret's Diameter

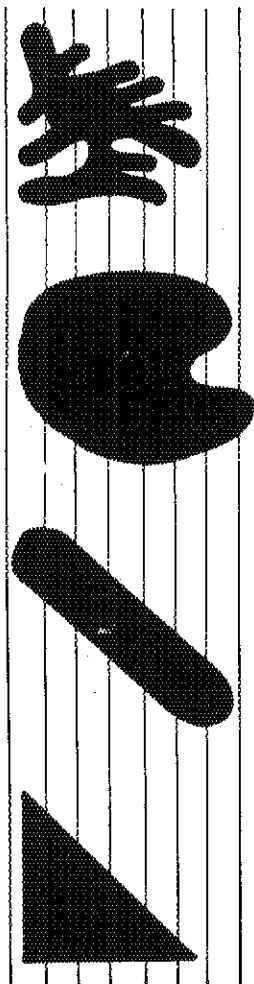
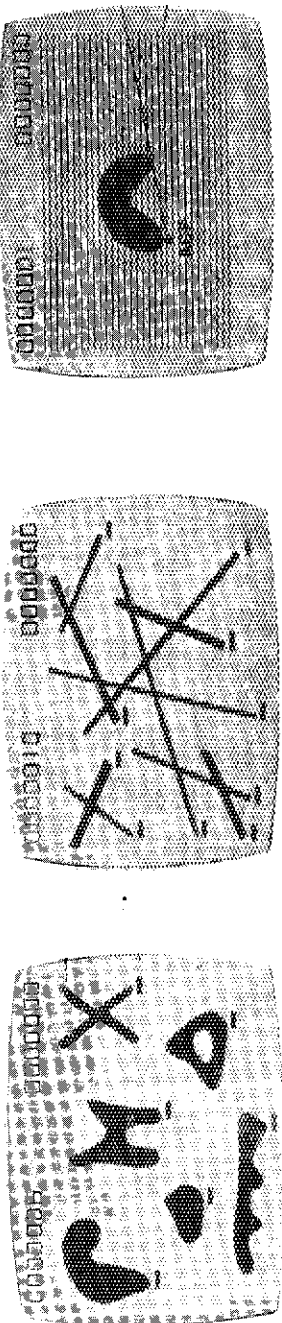


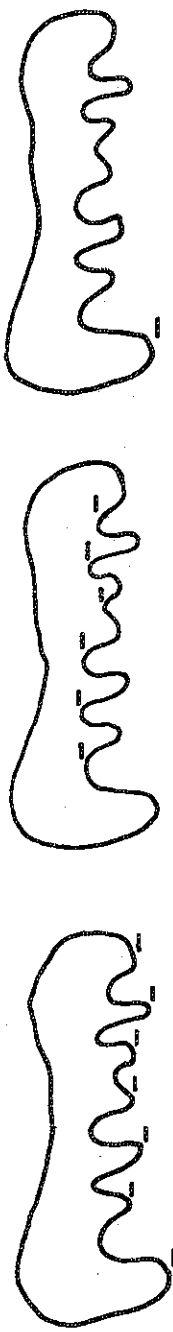
Diagram showing the difference between Horizontal Feret's Diameter (F_h) and Horizontal Intercept (l_h)

$F_h = 5$	$F_h = 6$	$F_h = 7$	$F_h = 5$
$l_h = 5$	$l_h = 6$	$l_h = 8$	$l_h = 13$



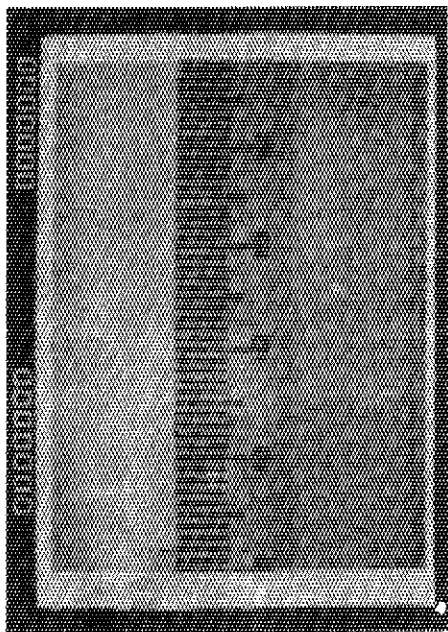
Full Feature Count End Count Anti Co-Incidence Point Count

Topological Count



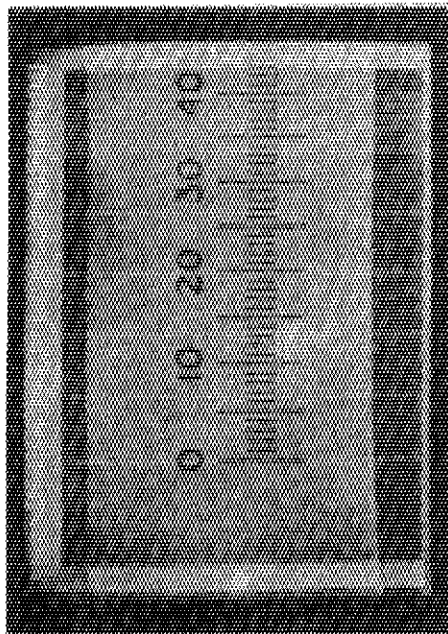
End Count = 7 Fork Count = 6 Topological Count = 1
(7 - 6)

Fig. 3 Exhibitions of Intercept and Feret's Diameter



Screen image showing live frame 800pp wide covering object distance of 49.2 mm.

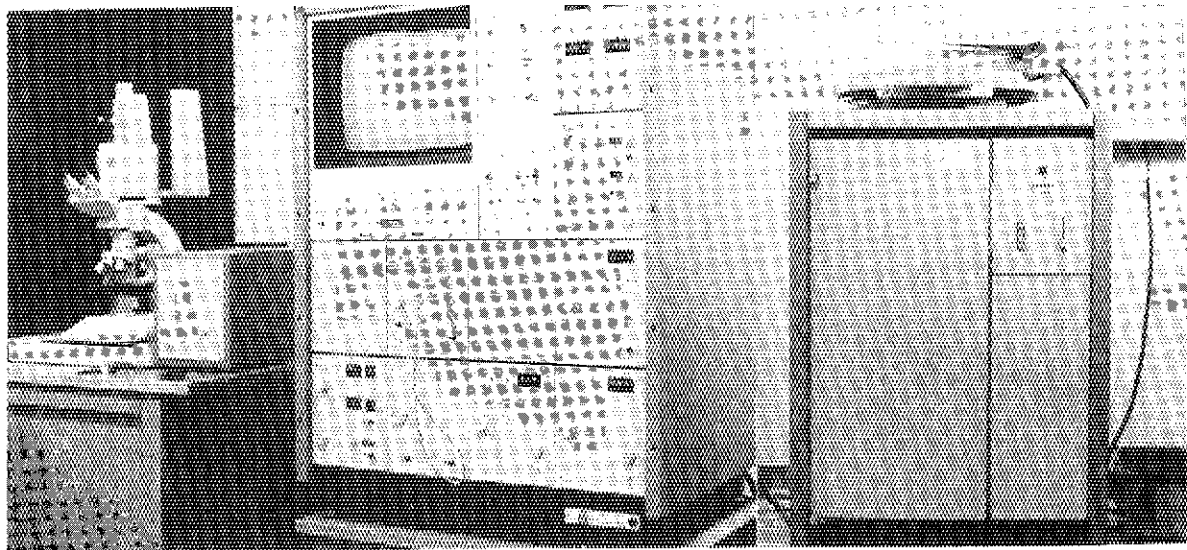
1 pp = .061 mm



Screen image showing graticule superimposed on stage micrometer of microscope.

1 large division on graticule = 100pp
 1 small division on graticule = 10pp
 1 small division in micrometer = .010 mm
 540pp = .361 mm
 1 pp = .000670 mm

Fig. 4 Examples of Calibration

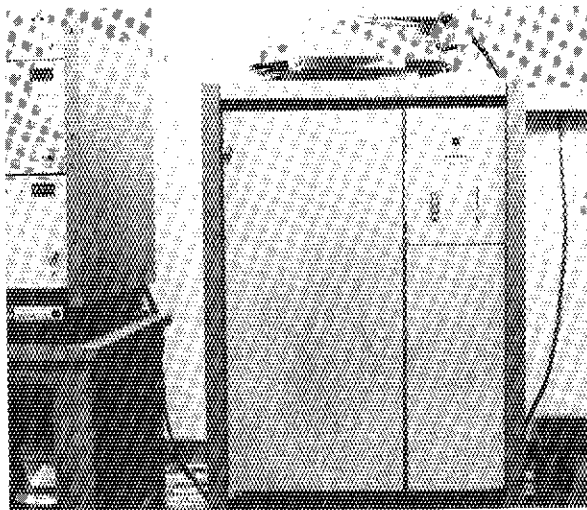


(c)

(a)

(b)

Fig. 5 Instrument Illustration



(i)

Fig. 6 Epidiascope



(X)18

Fig. 7 Type II Reichert Zetopan Microscope

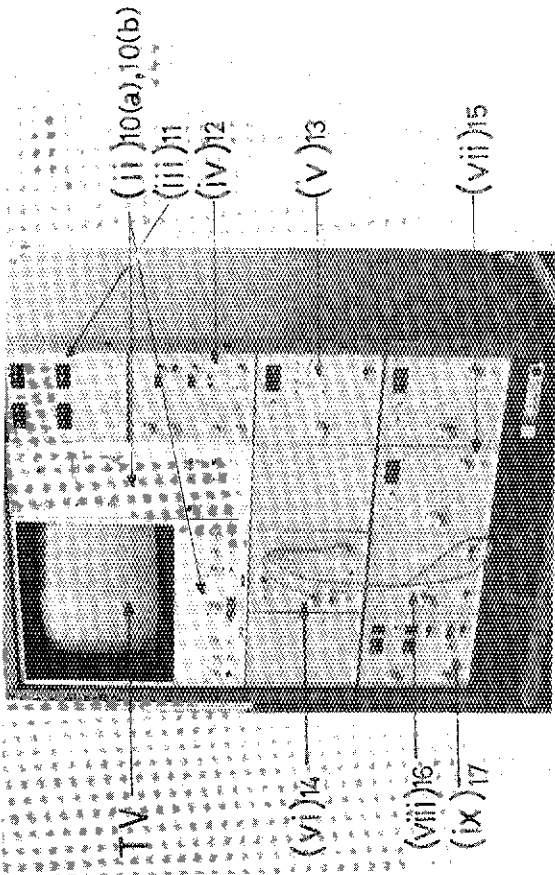
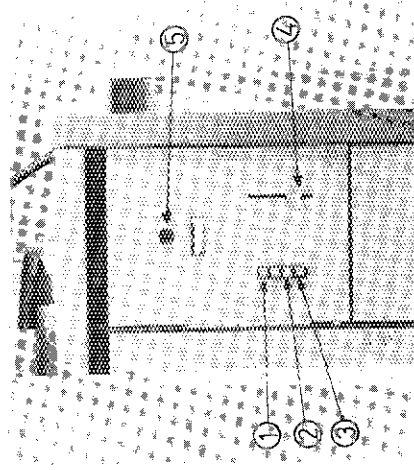
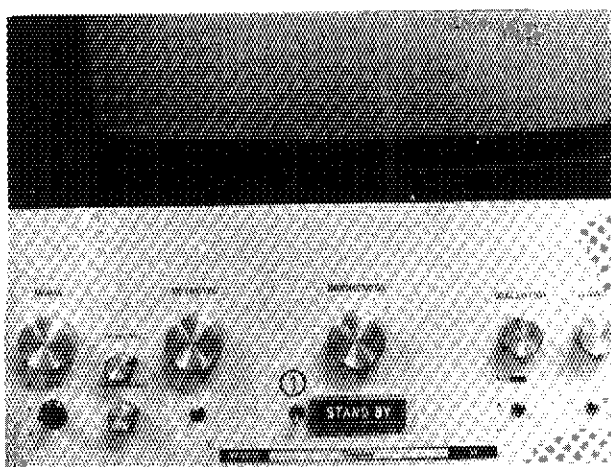


Fig. 8 Standard Two Deck QIM System



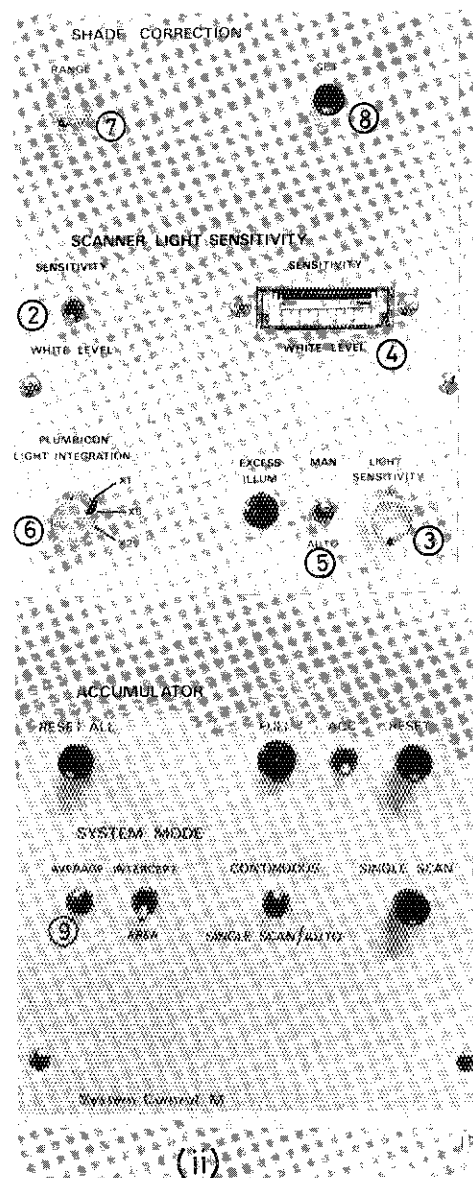
(11)

Fig. 9 Function of Epidiascope



(ii)

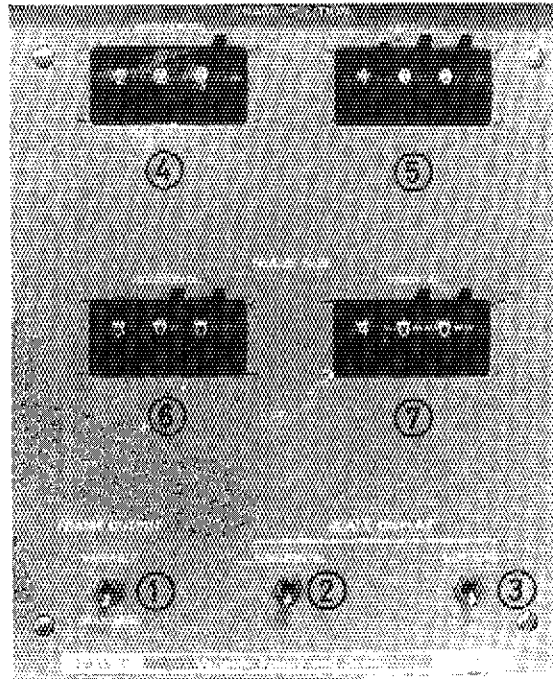
(a) Display Mode



(ii)

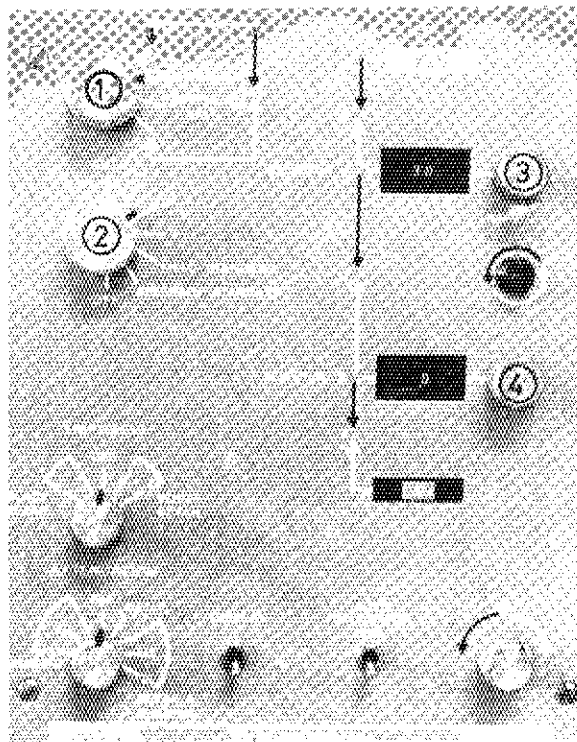
(b) System Control Mode

Fig. 10 Function of Display and System Control



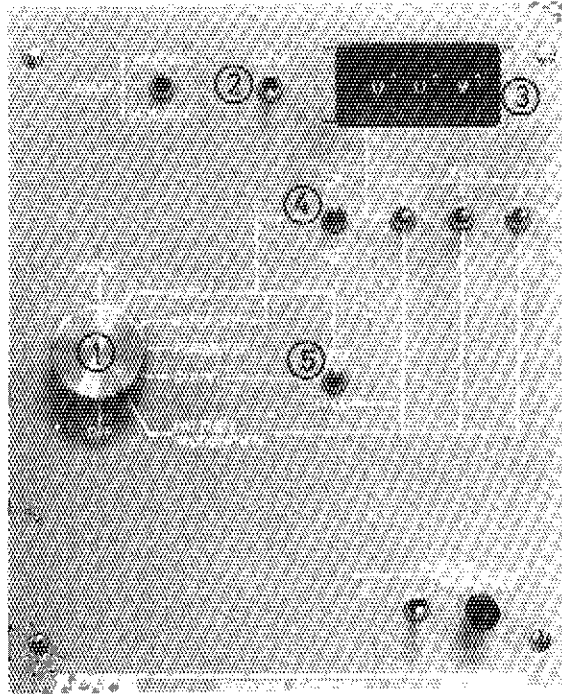
(iii)

Fig. 11 Variable Frame and Scale



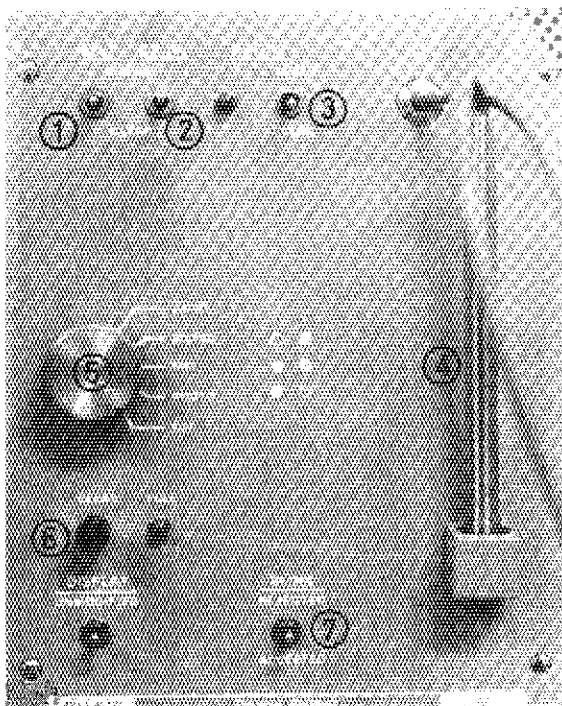
(iv)

Fig. 12 1D Auto Detector



(v)

Fig. 13 Standard Computer



(vi)

Fig. 14 Image Editor

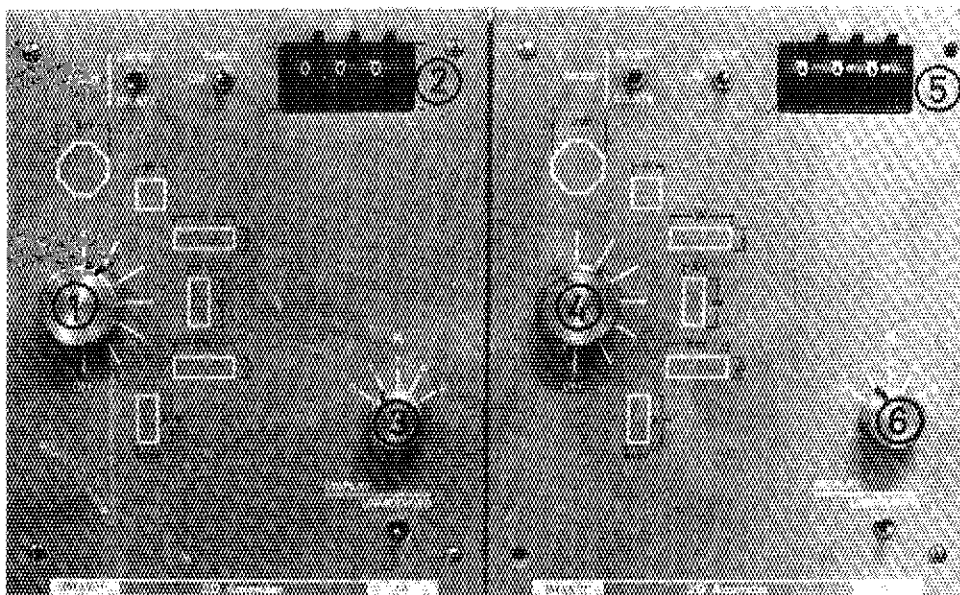
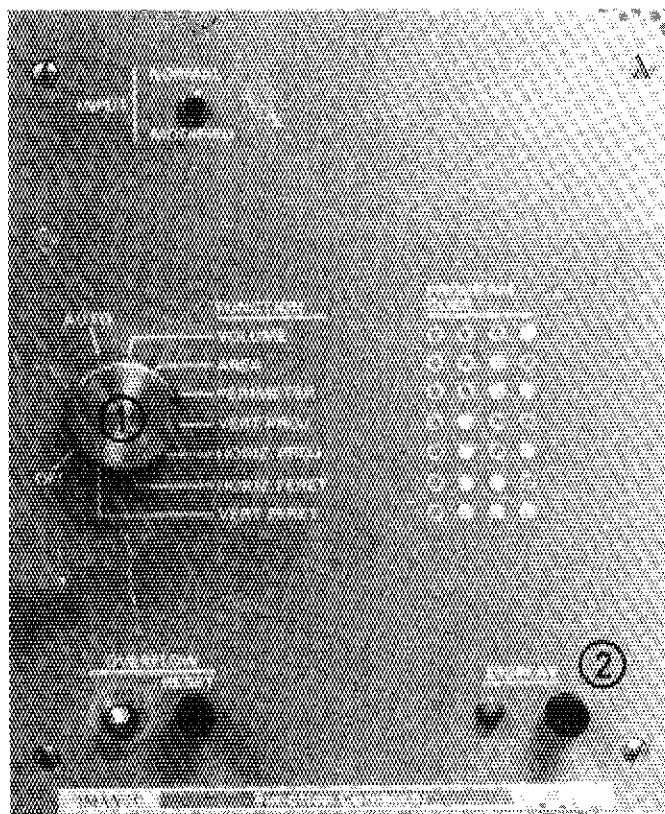
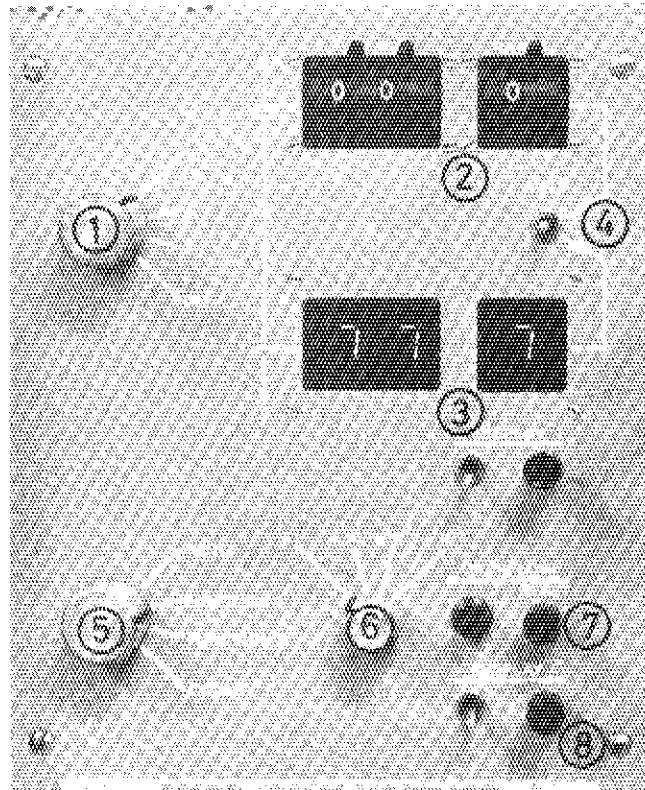


Fig. 15 2D Amender



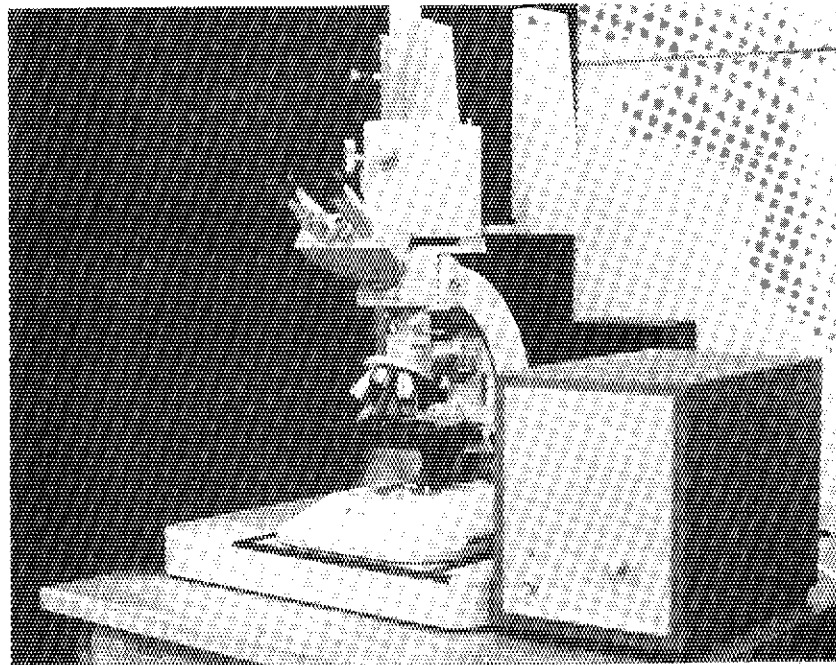
(VII)

Fig. 16 Function Computer



(ix)

Fig. 17 Classifier-Collector

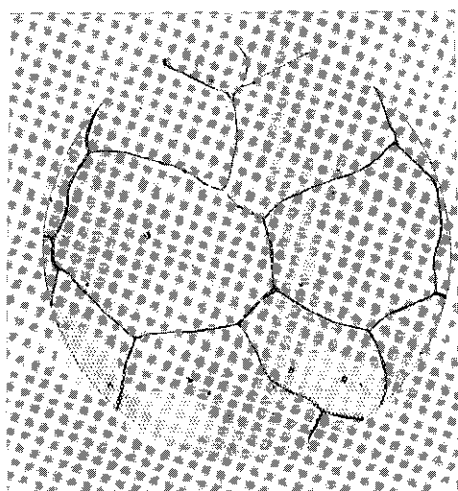


(x)

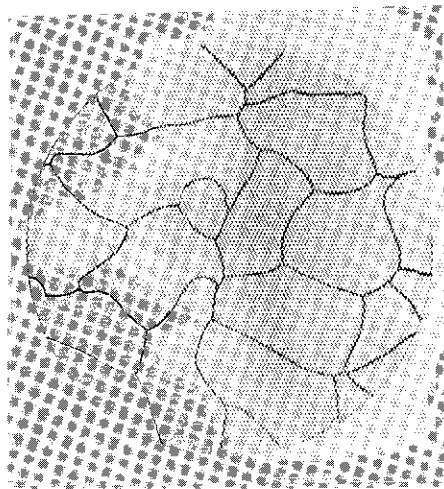
Fig. 18 Microscope

The Standard Comparison Charts

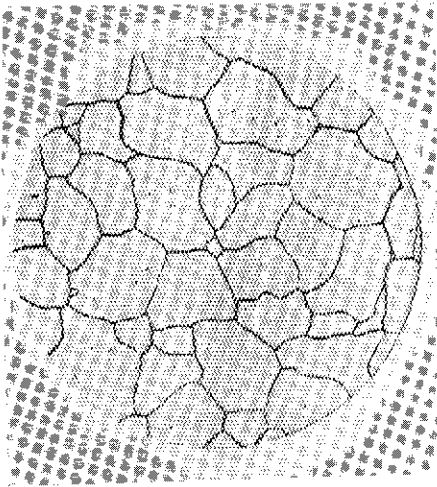
JIS 0552-1957



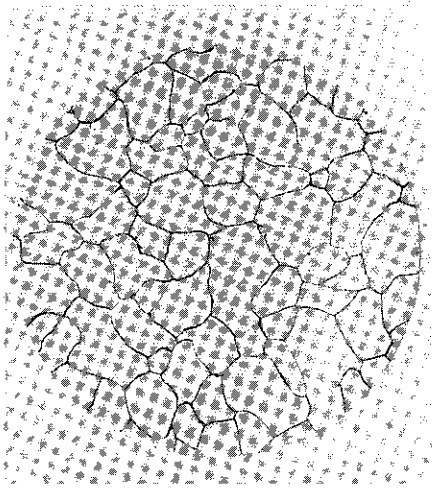
2



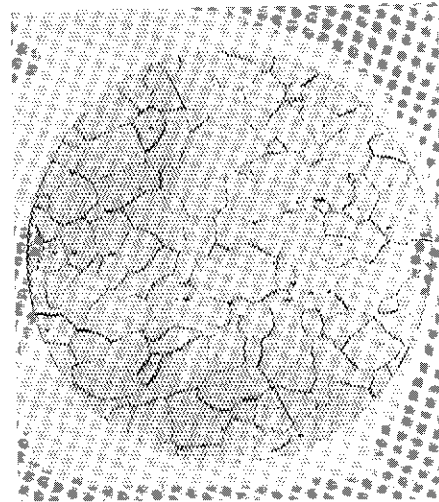
3



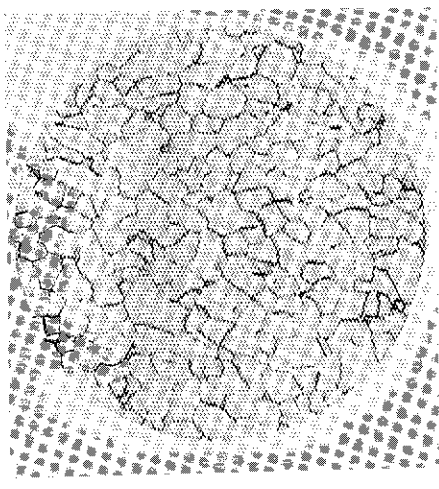
4



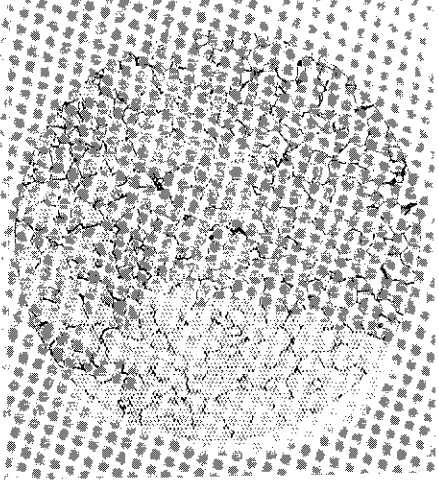
5



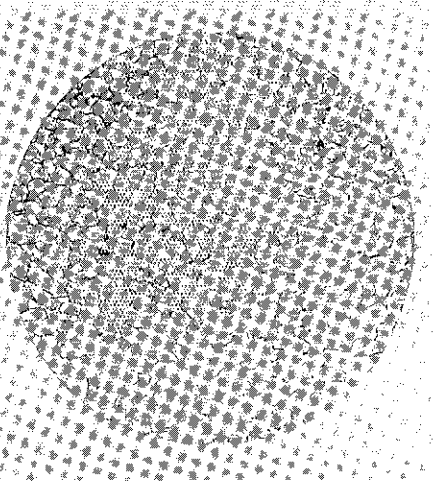
6



7



8



9

Fig. 19 The Standard Comparison Charts (JIS 0552-1957)

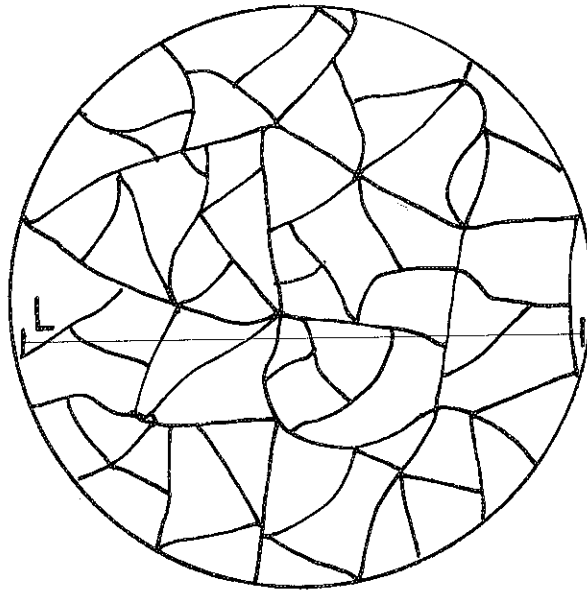


Fig. 20 Measuring Model. L is the Length of Standard Measuring Line

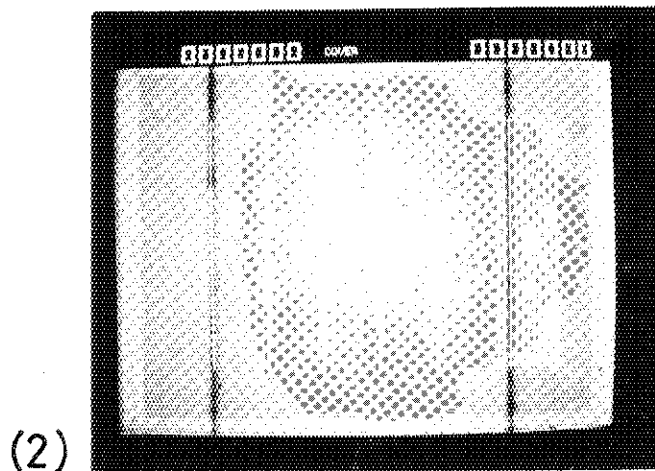
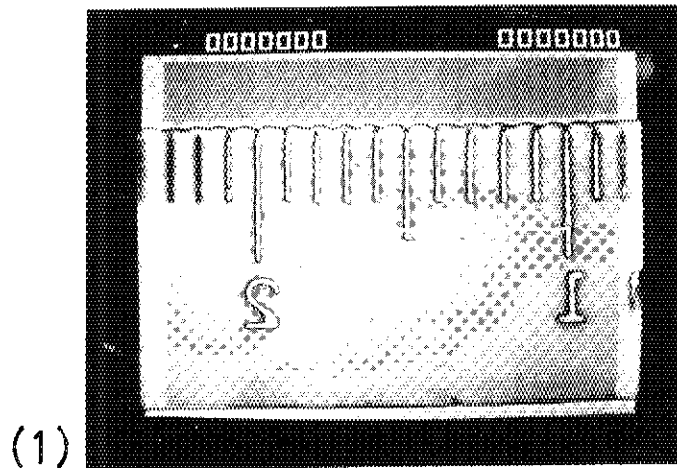


Fig. 21 Calibration between Picture Points and Scale Length

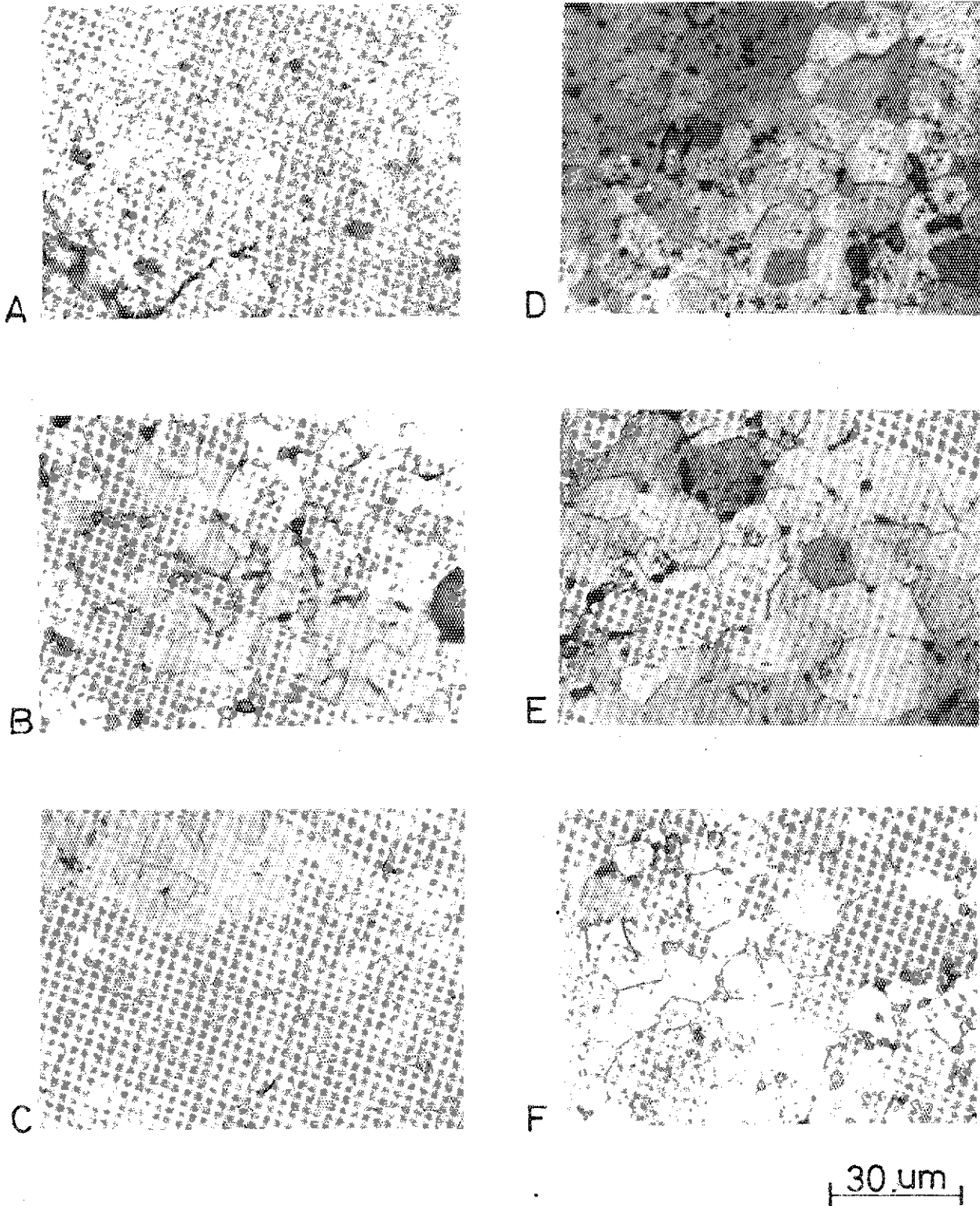


Fig. 22 Photomicrograph of the Preirradiated, etched UO_2 Pellets.
Etching sol: $H_2O_2/H_2SO_4 = 8/1$

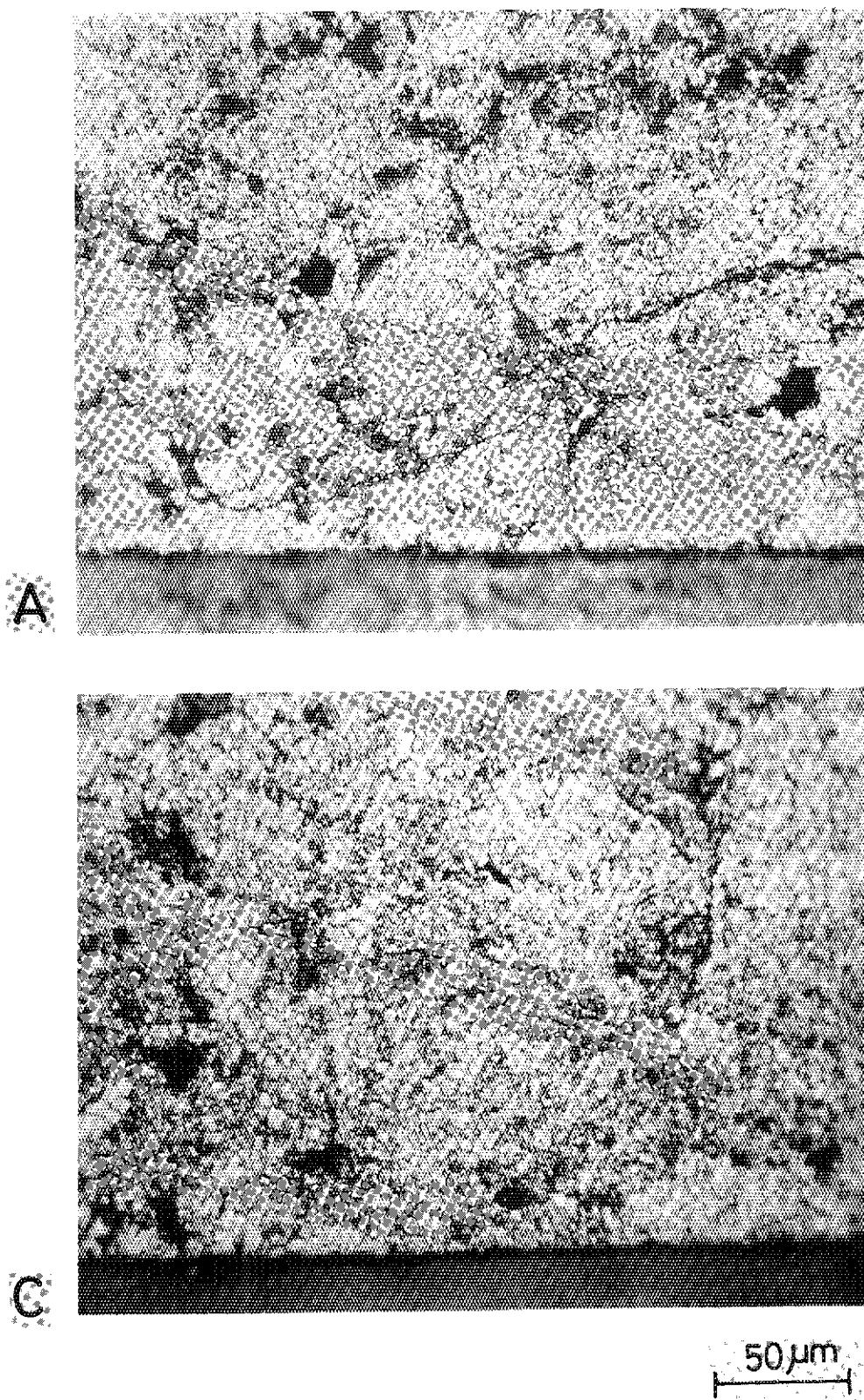


Fig. 23 Photomicrograph of the Postirradiated, etched UO₂ Pellets.
 $H_2O_2/H_2SO_4 = 8/1$

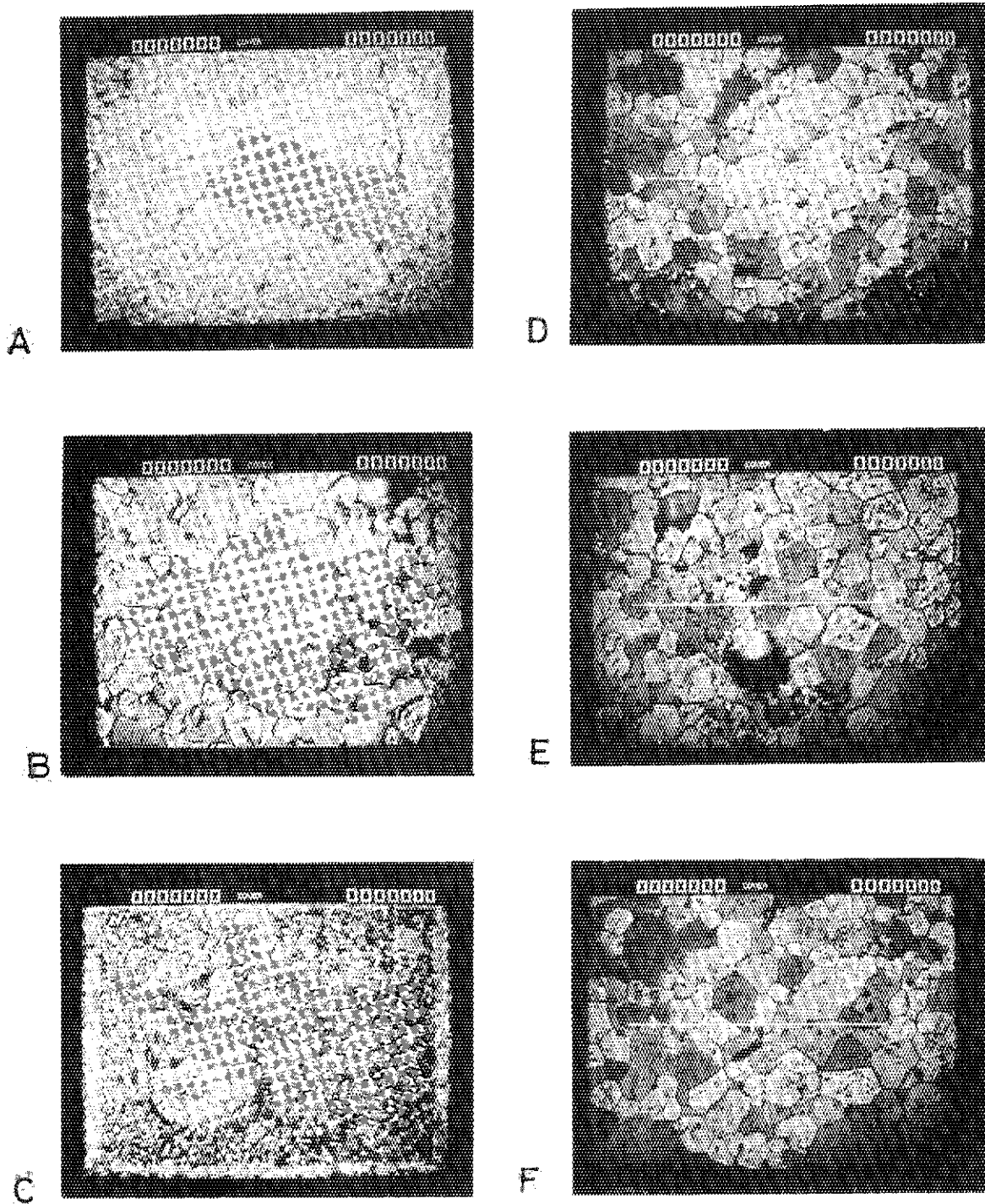


Fig. 24 Deciding Grain Size by Image Analyzer (preirradiation, intercept procedure)

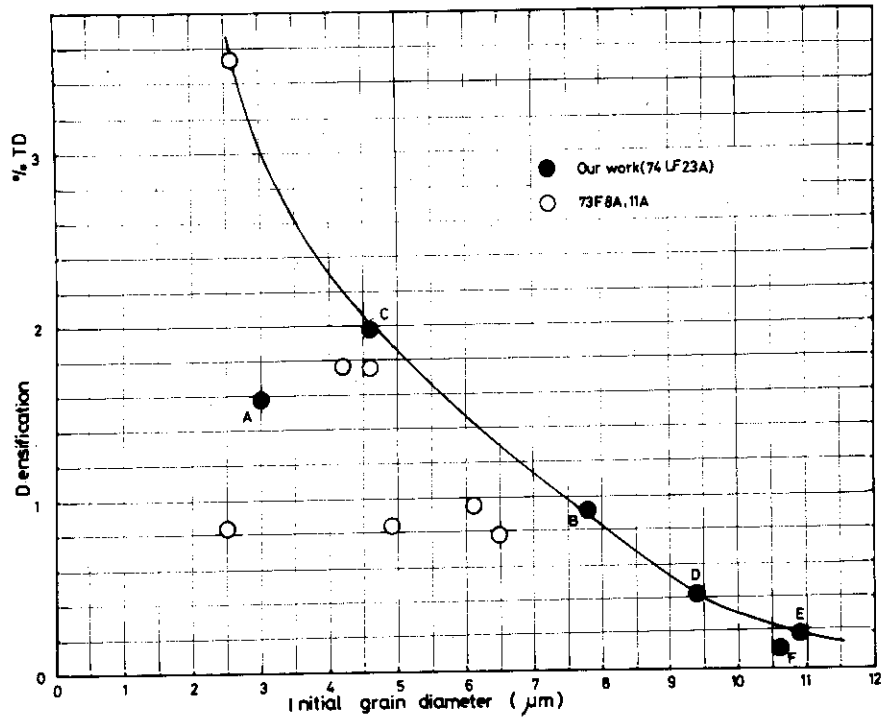


Fig. 25 Relation between Grain Size in Three Dimensional and Densification (density change)

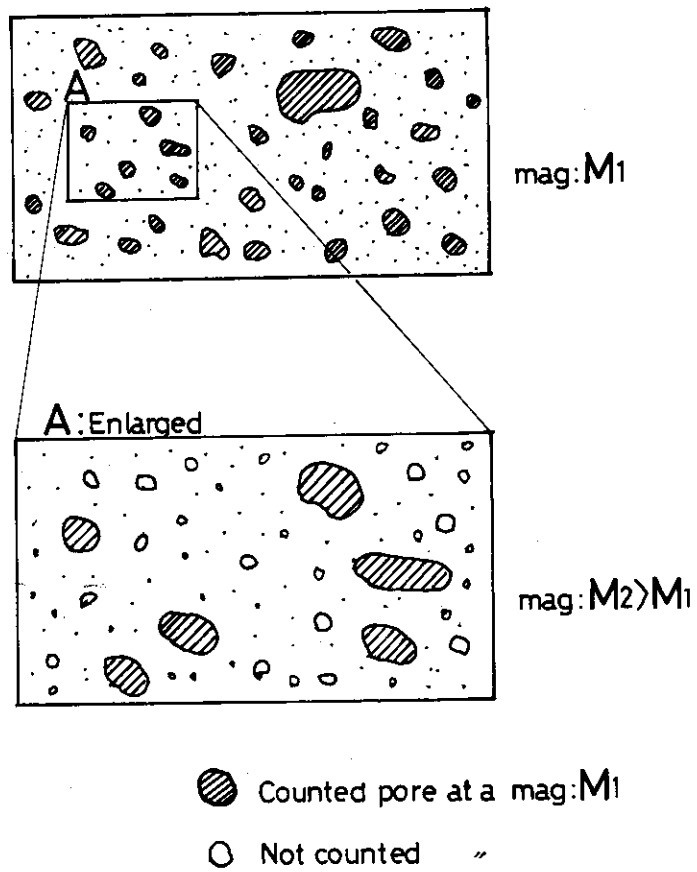


Fig. 26 Pore Counting Model

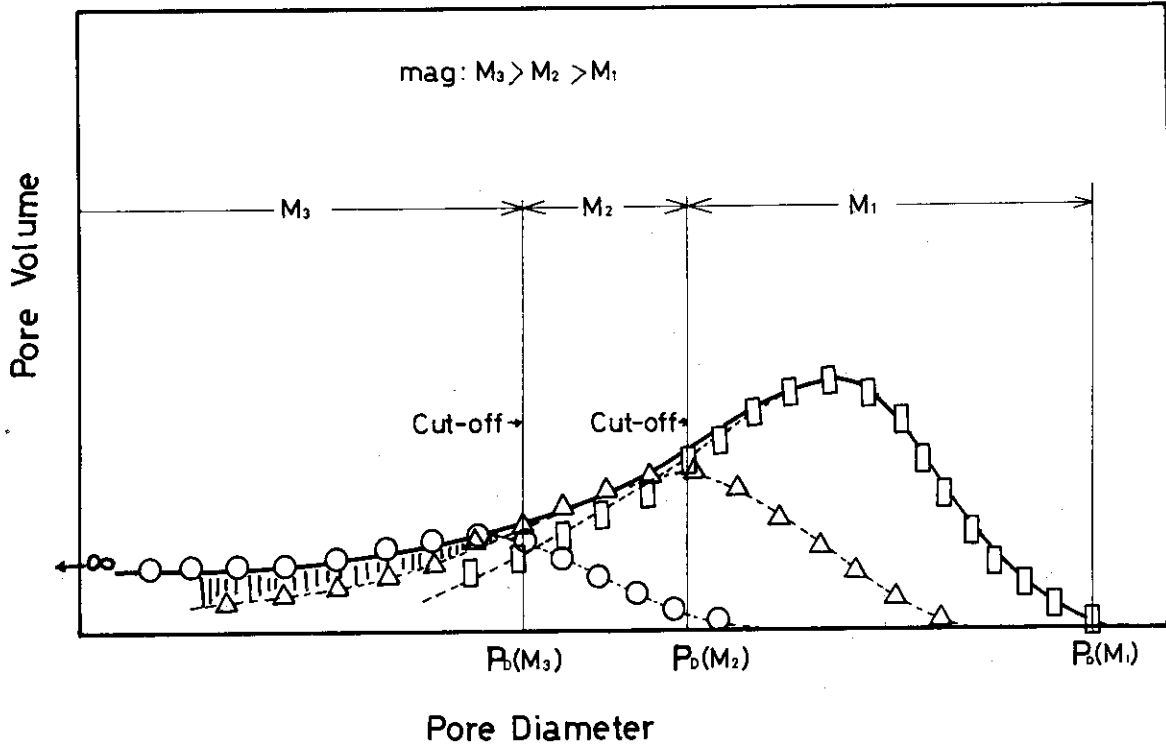


Fig. 27 Pore Size Distribution and Cut-Off Problem

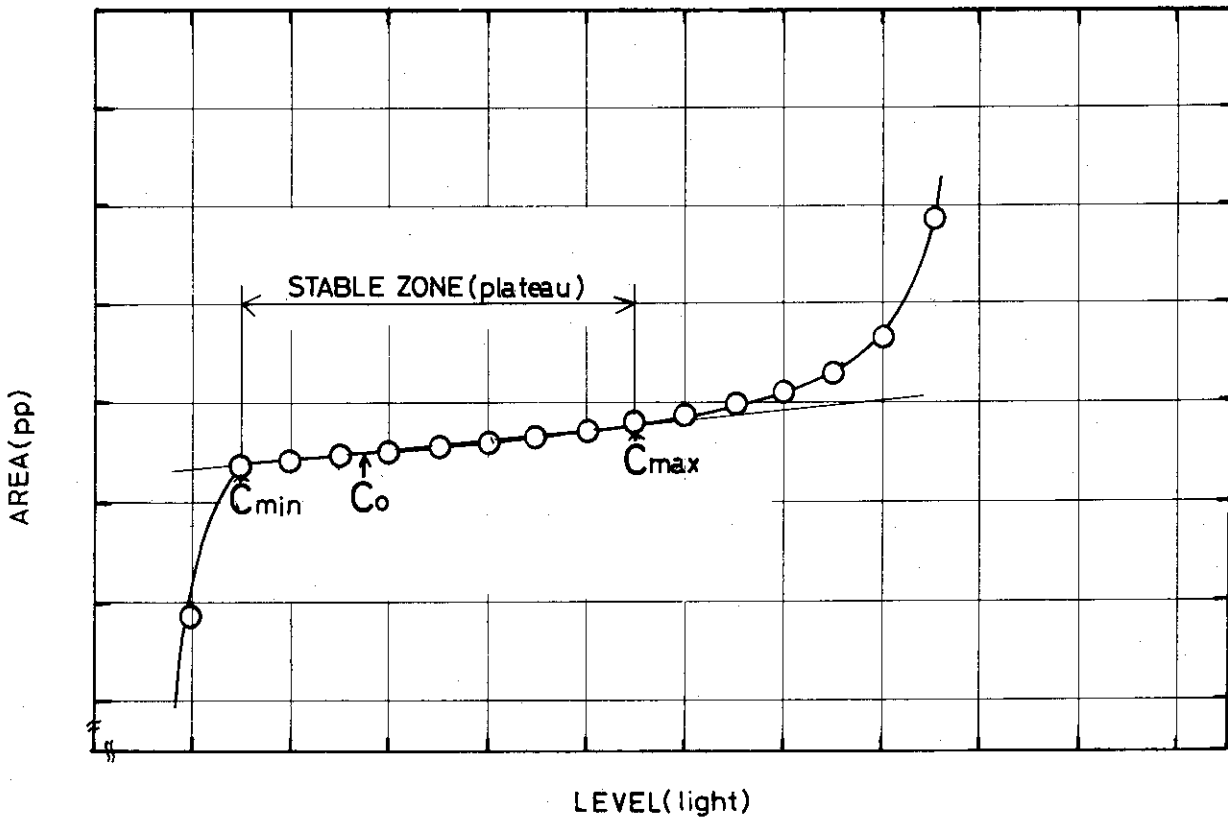


Fig. 28 Plateau Measuring and Its Optimum Value Searching Problem

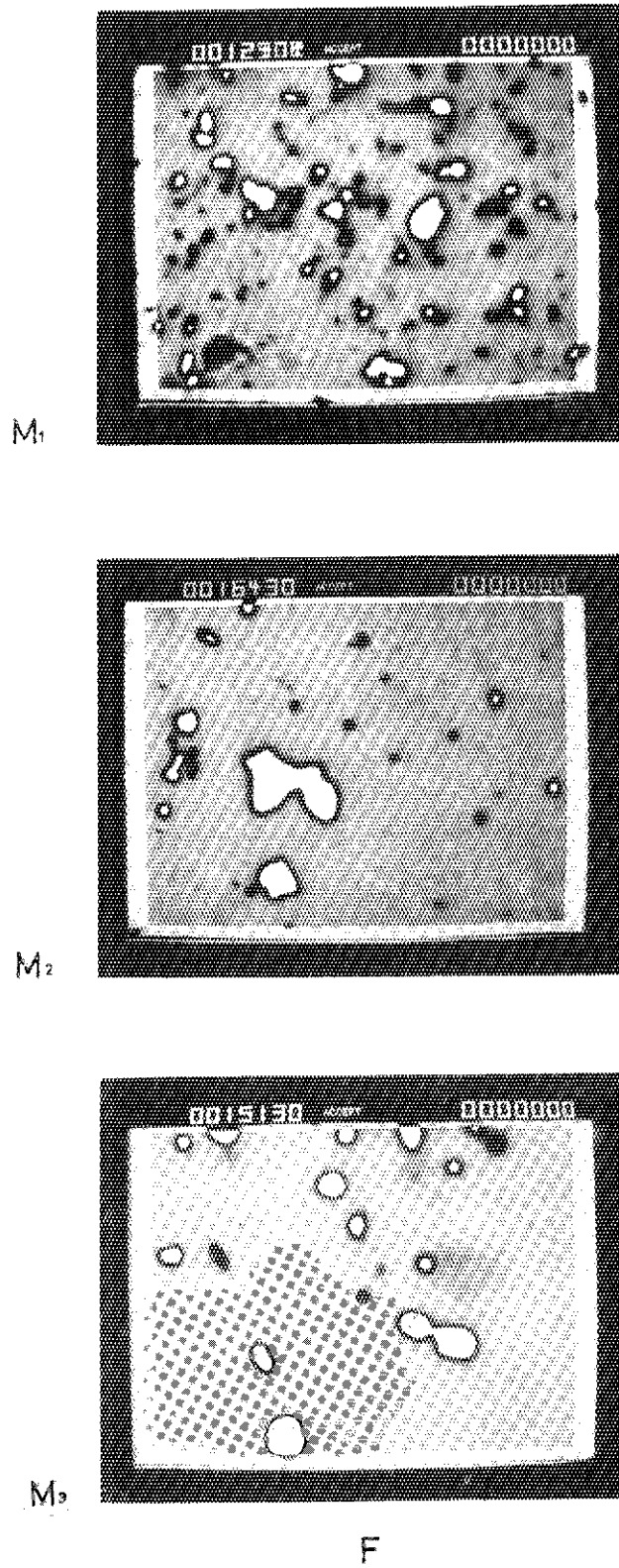


Fig. 29 Identical Specimen Variated its Magnification
(Postirradiated F sample, $M_1 = 50$, $M_2 = 200$, $M_3 = 800$)

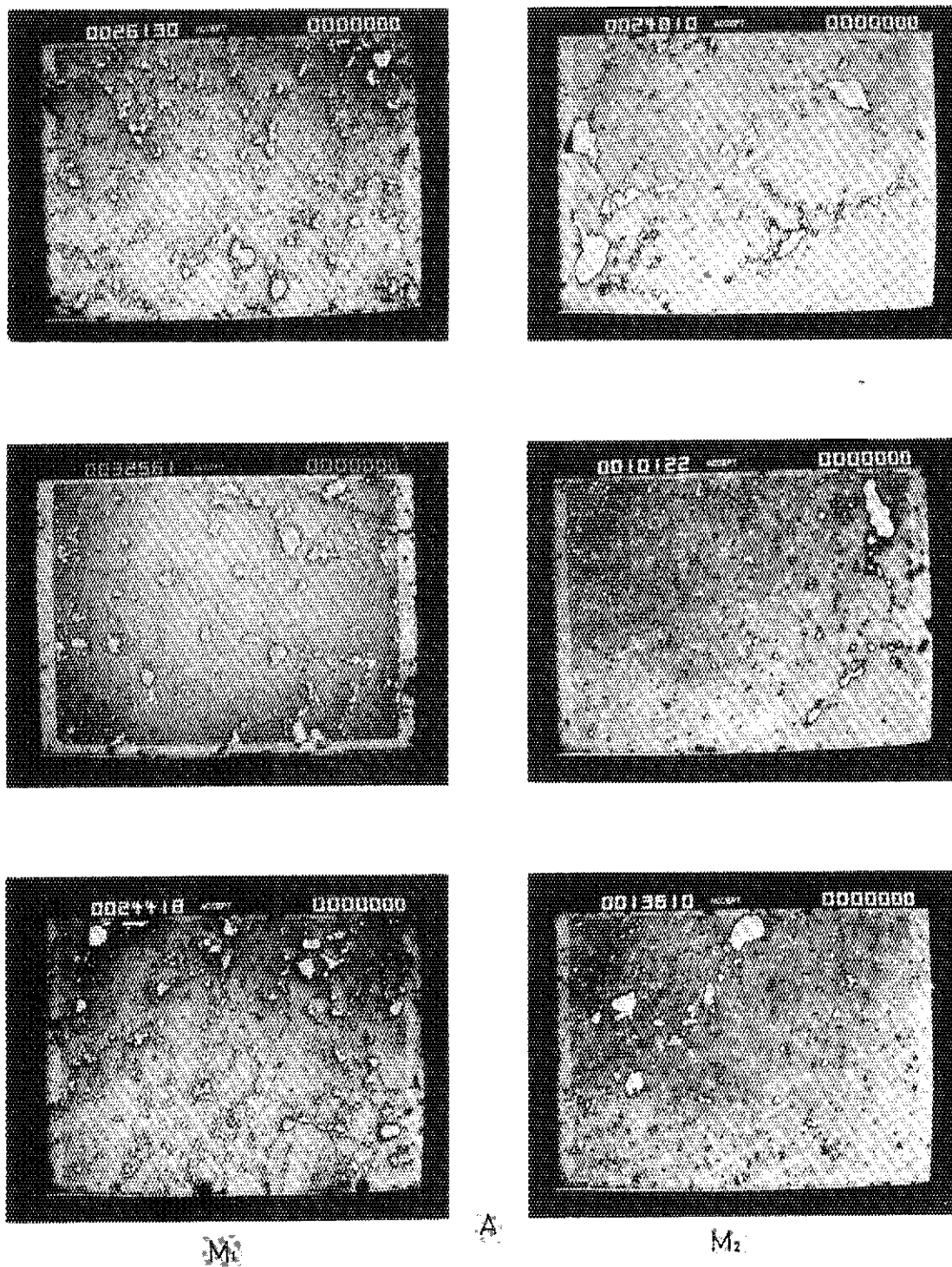
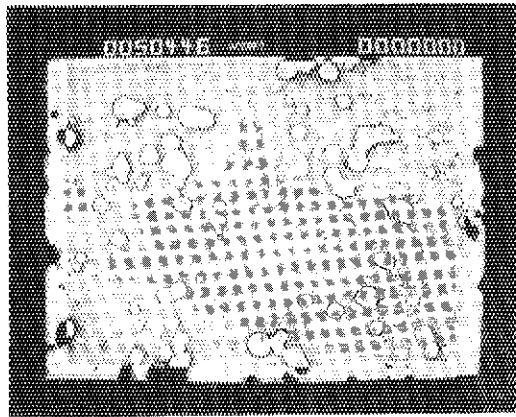
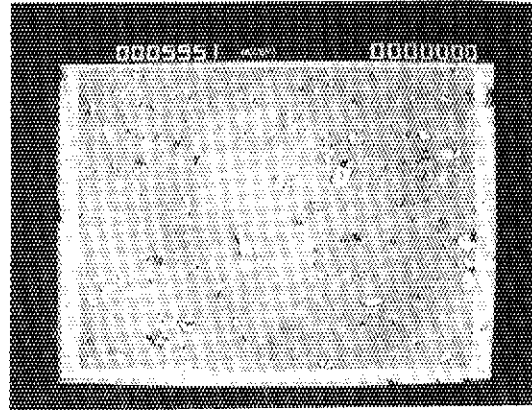


Fig. 30 Pore Size Distribution of Preirradiated UO_2 Pellet is measuring by means of QTM Image Analyzer for a Sample A.

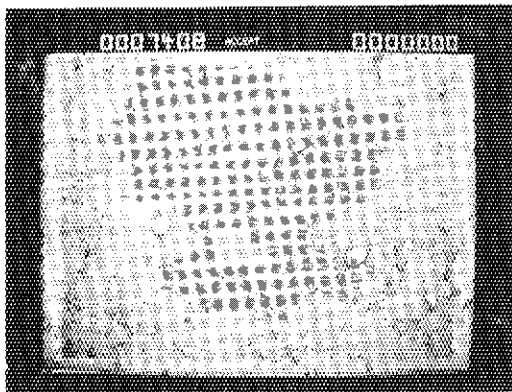


M₁

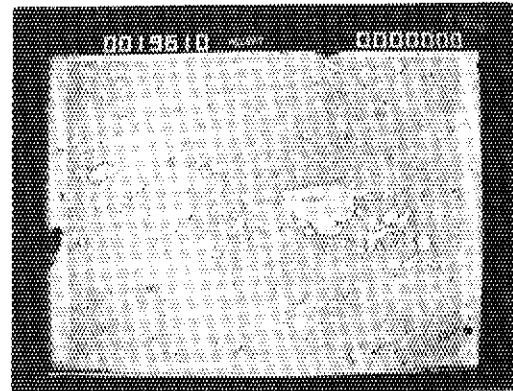


M₂

B



M₁



M₂

C

Fig. 31 Identical with Fig. 30 but both for Samples B and C

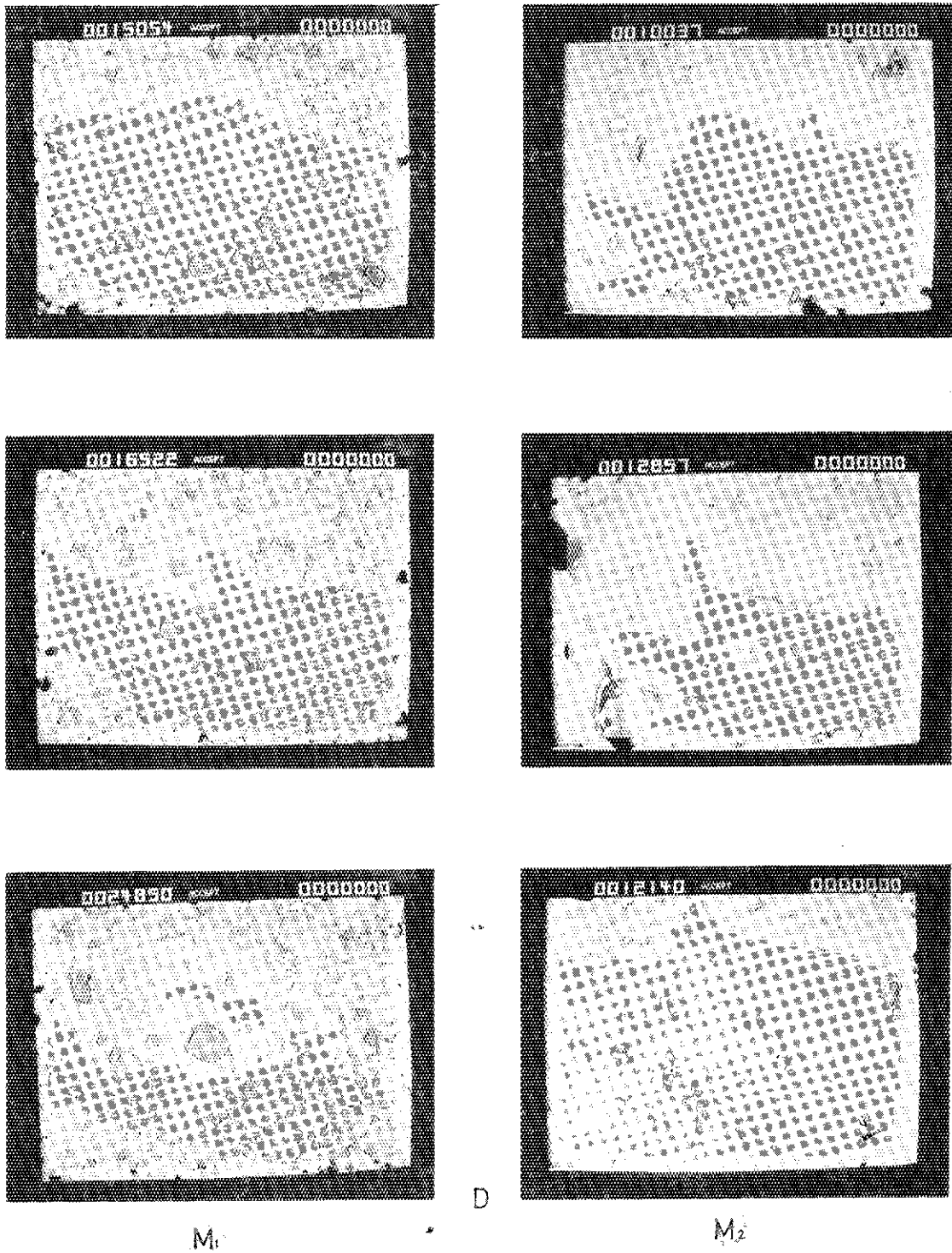
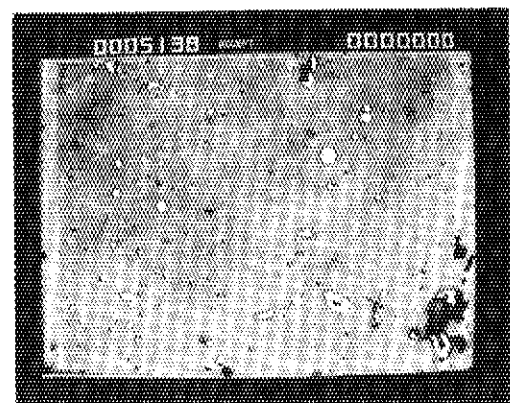
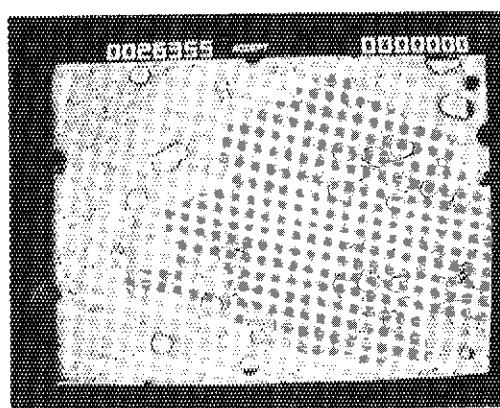
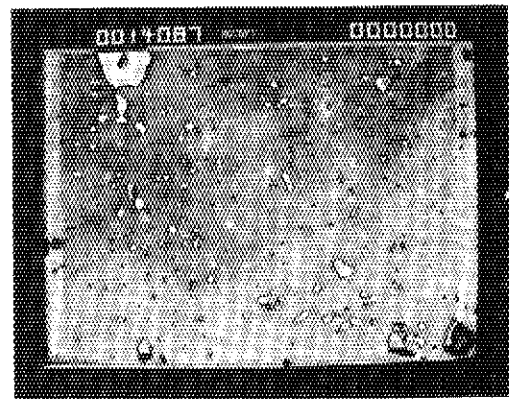
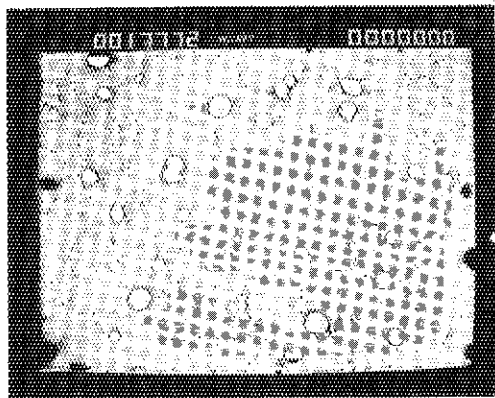
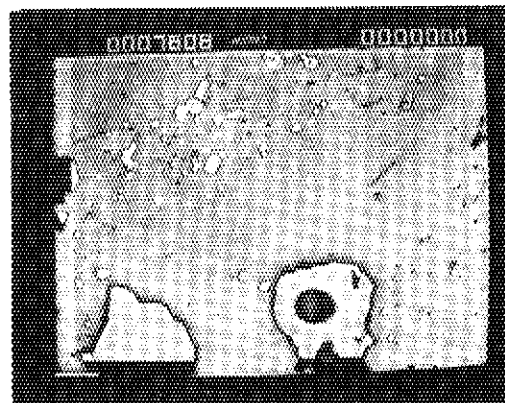
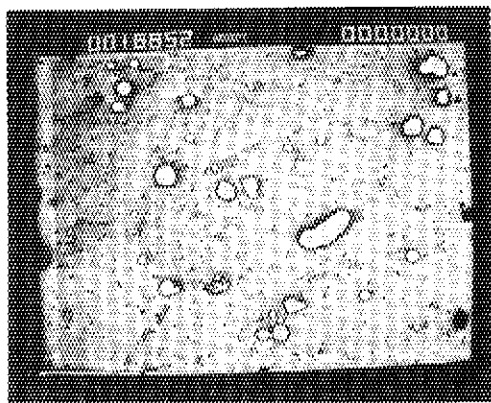


Fig. 32 Identical with Fig. 30 but for Sample D



M₁

E

M₂

Fig. 33 Identical with Fig. 30 but for Sample E

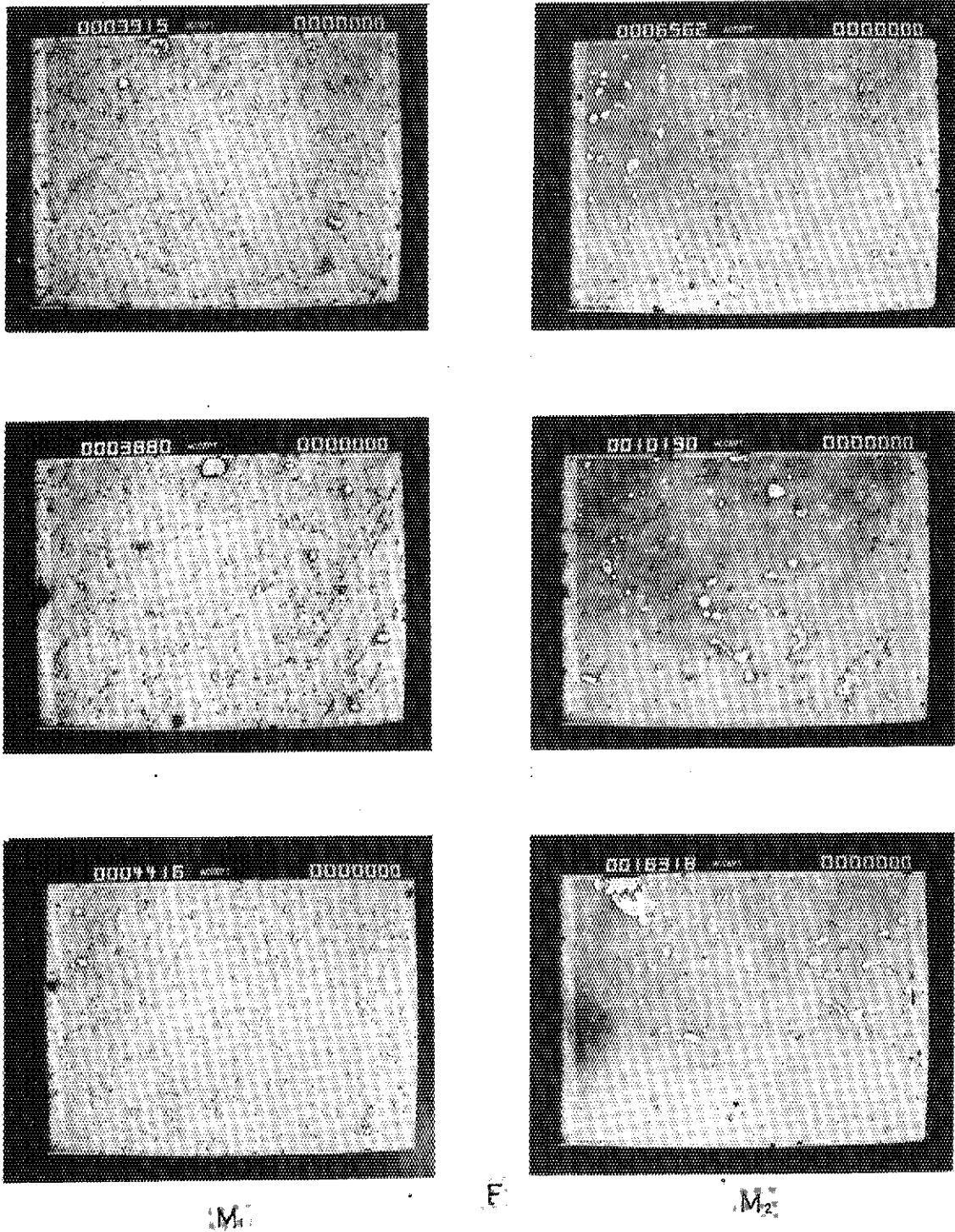
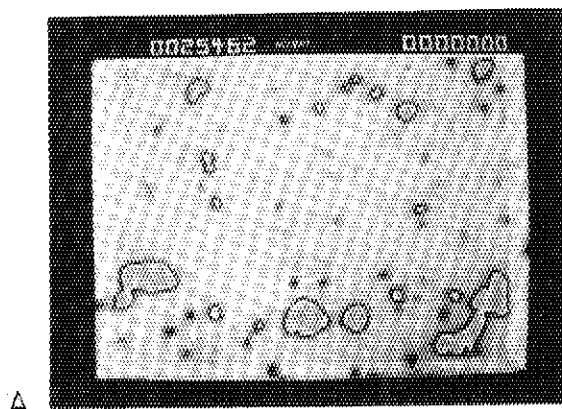
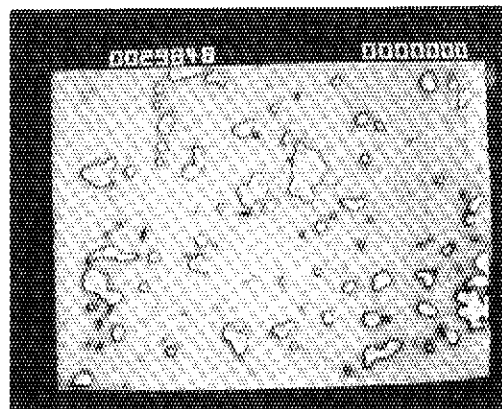


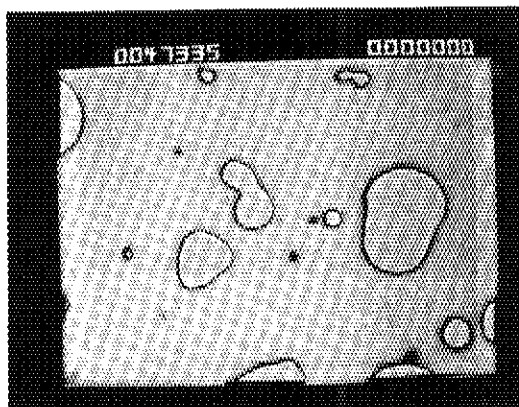
Fig. 34 Identical with Fig. 30 but for Sample F



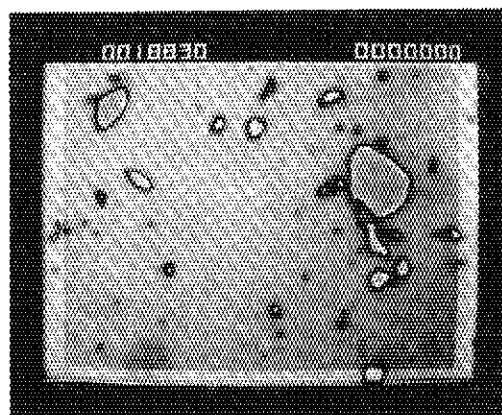
A



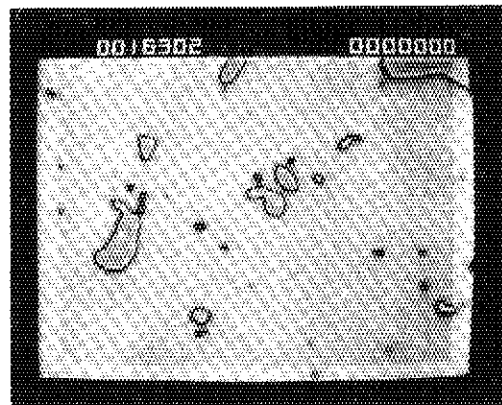
C



B



D



E

Fig. 35 Pore Size Distribution of Postirradiated UO_2 Pellet is measuring by means of QTM Image Analyzer both for Sample A and B.

Fig. 36 Identical with Fig. 35 but Samples are C, D, and E.

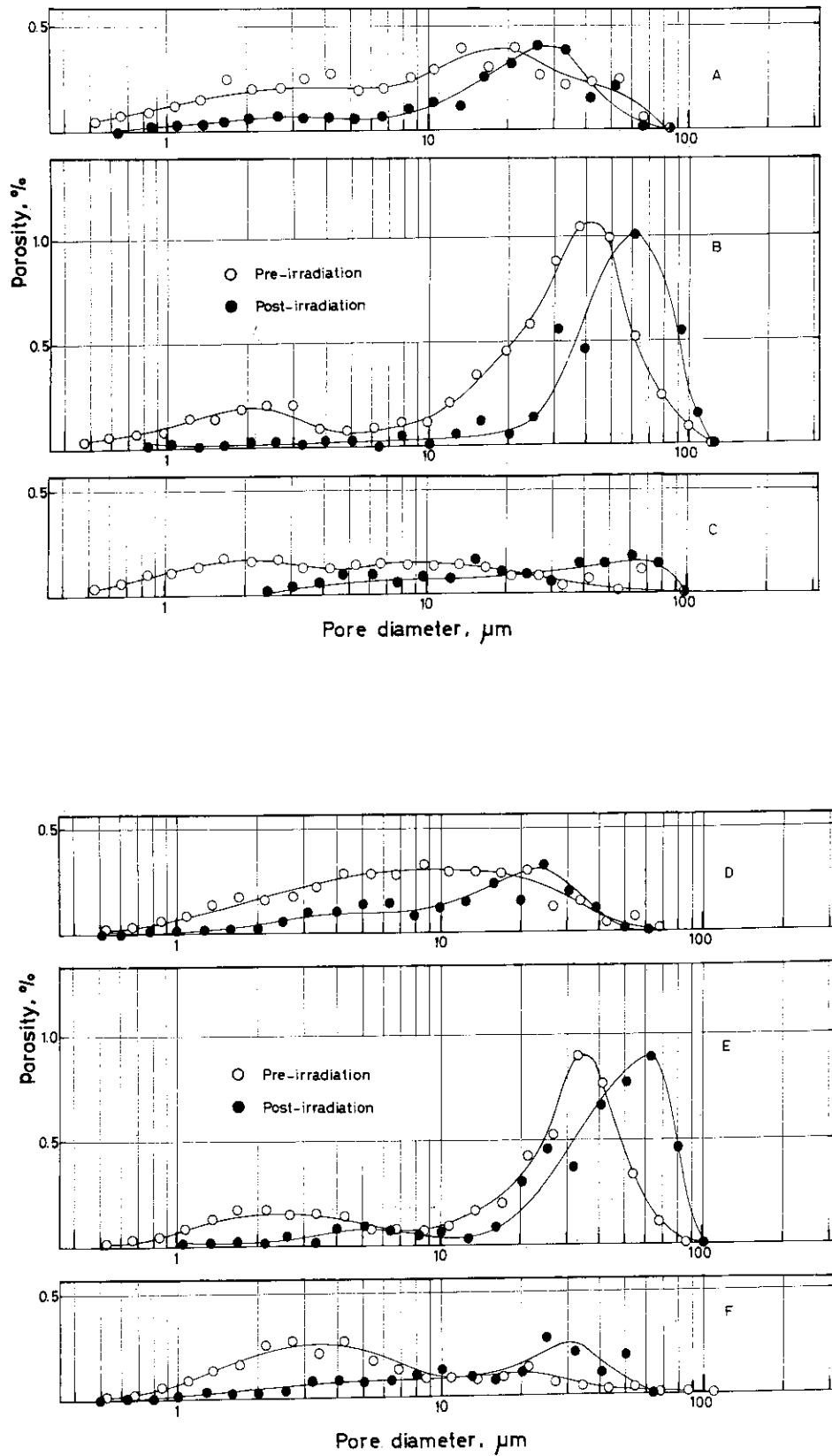
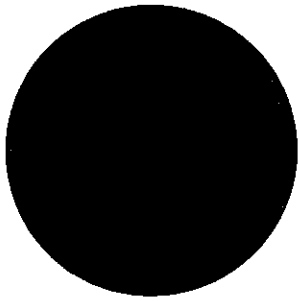
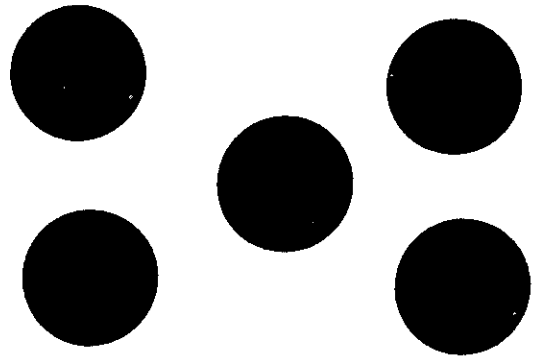


Fig. 37 Pore Volume (Porosity) as function of a Pore Diameter. (Pore Size Distribution) Samples are taken out from A to F.



D=38.5 mm
S=1164.2 mm²
l=121.0 mm



D=18.0 mm
S=254.5 mm²
l=56.5 mm

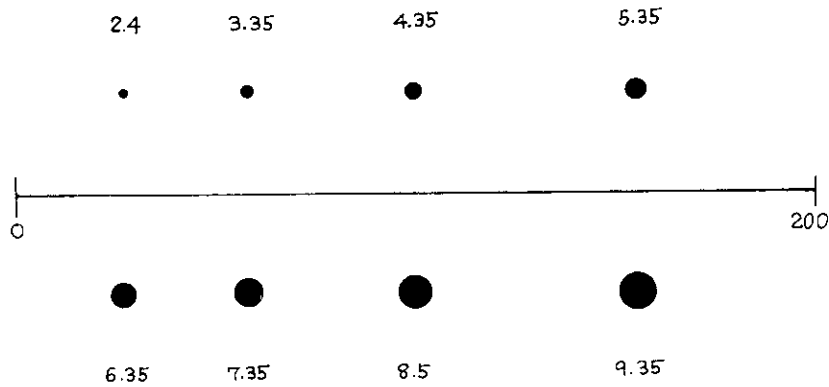


Fig. 38 Standard Charts for deciding an Optimum Light Concentration Level Constructed Circles and Lines.