

JAERI-Tech
95-030



低濃縮板状燃料要素の解体検査

1995年6月

技術管理グループ

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

本レポートは、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、お申し越しください。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。

This report is issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1994

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 (株)高野高速印刷

低濃縮板状燃料要素の解体検査

日本原子力研究所東海研究所研究炉部
技術管理グループ※

(1995年4月3日受理)

研究炉部では、研究炉・試験炉の濃縮度低減化計画にもとづき、高濃縮ウラン燃料から、J R R-2 においては中濃縮ウラン燃料へ、J R R-4 においては低濃縮ウラン燃料に移行するため、それぞれ2体ずつの中・低濃縮ウラン・アルミナイド試験燃料要素を製作した。このうち、低濃縮ウラン燃料について1体は、照射特性の確認を重視してJ R R-2 炉心に装荷して加速照射を行った。他の1体は核・熱的特性の確認を重視してJ R R-4 炉心に装荷して照射を行った。

本報告は、低濃縮ウラン燃料のうちJ R R-2 炉心に装荷して加速照射を行い、昭和61年度から平成元年度にかけて実施した試験燃料要素の解体検査についてまとめたものである。照射後試験はホット試験室ホットラボ課において燃料要素及び燃料板の外観検査、寸法検査、燃料板のX線検査、ブリスタ検査、ガンマスキャンニング及び燃料板から試験片を採取して機械強度試験、金相試験等を行った。また、打抜き試料の絶対燃焼度測定は、当研究所分析センターで行った。各試験結果から異常は認められず、低濃縮ウラン・アルミナイド試験燃料要素の照射健全性が確認できた。なお、試験燃料要素の燃焼度は、計算燃焼度41.6%に対し実測平均燃焼度39.0%であった。

東海研究所：〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

※ 技術管理グループ

田畑俊夫（安全管理室）、佐藤 博（大洗研究所材料試験炉部）、近藤 眞、田山政徳、広瀬 彰、
竹口省三、古平恒夫

Disassemble Examination of Low Enriched UAlx-Al
Plate Fuel Element in JAERI

Technical Management Group*

Department of Research Reactor
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received April 3, 1995)

In the Department of Research Reactor, reduced enrichment works for research reactor of JRR-2 and JRR-4 have been carried out based on the RERTR program in JAERI. Two medium enriched uranium (MEU) test fuels were made for JRR-2 and two low enriched uranium (LEU) test fuels were made for JRR-4 to move from high enriched uranium (HEU) fuel to MEU fuels and to LEU fuels, respectively. Irradiation tests of these fuels were carried out each reactor. This report describes the results of disassemble examination for the irradiated JRR-4 LEU test fuel in JRR-2 core. The disassemble examination of this fuel was carried out from 1986 to 1989.

The post-irradiation examination including visual inspection, dimension measurements and metallography and so on were carried out at Hot Laboratory in JAERI and burn-up measurement of the sample taken from fuel plates was carried out at Analytical Chemistry Laboratory in JAERI.

The results of each examinations showed no indication of detrimental effects and confirmed satisfactory to use this kind of fuels as research reactors fuels. Furthermore, burn-up of examination fuel element was measured to be 39% as compared with calculated burn-up of 41.6%.

Keywords : Disassemble, Spent Fuel, PIE, γ -scanning, Burn-up, UAlx-Al.

Technical Management Group*

Toshio TABATA (Office of Safety and Control), Hiroshi SATO (Department of JMTR, Oarai Research Establishment), Makoto KONDO, Masanori TAYAMA, Akira HIROSE, Shouzo TAKEGUCHI and Tsuneo KODAIRA

目 次

1. 試験燃料要素の諸元及び照射履歴	1
2. 解体検査の概要	1
3. 燃料要素の非破壊検査	1
3.1 外観検査	1
3.2 寸法検査	2
3.3 ウォータギャップ外観検査	2
4. 燃料板の非破壊検査	3
4.1 燃料板の外観検査	3
4.2 燃料板のX線検査	3
4.3 燃料板の寸法検査	4
5. ブリスタ検査	4
5.1 ブリスタ試験	5
5.2 ブリスタ外観検査	5
5.3 燃料板の板厚測定	5
5.4 FPガス捕集	5
6. 機械強度試験	6
6.1 常温引張試験	6
6.2 ヤング率測定	6
6.3 硬度測定	6
7. 金相試験及び酸化膜等の厚さ測定	7
7.1 組織観察	7
7.2 酸化膜等の厚さ測定	8
7.3 EPMA観察	9
8. 燃焼度測定	10
8.1 測定項目と測定条件	10
8.2 測定結果	11
9. まとめ	13
謝 辞	15
参考文献	15

Contents

1. Specification and Irradiation History of Plate Fuel Element	1
2. Summary of Disassemble Examination	1
3. Non-destructive Test of Fuel Element	1
3.1 Visual Inspection	1
3.2 Dimension Measurements	2
3.3 Water Gap Visual Inspection	2
4. Non-destructive Test of Fuel Plates	3
4.1 Visual Inspection	3
4.2 X-ray Radiography	3
4.3 Dimension Measurements	4
5. Blister Inspection	4
5.1 Blister Test	5
5.2 Blister Visual Inspection	5
5.3 Thickness Measurements	5
5.4 F.P Gas Collection	5
6. Mechanical Strength Test	6
6.1 Tensile Test	6
6.2 Young's Modulus Measurements	6
6.3 Hardness Measurements	6
7. Metallography Test	7
7.1 Micrography	7
7.2 Oxide Thickness Measurements	8
7.3 Electron Probe Micro Analysis	9
8. Burn-up Measurements	10
8.1 Items and Conditions	10
8.2 Results	11
9. Conclusions	13
Acknowledgement	15
References	15

1. 試験燃料要素の諸元及び照射履歴

本燃料要素は、昭和59年に仏国CERCA社において製作されたMTR型のウラン密度 2.2g/cm^3 のアルミナイド分散型であり、燃料要素番号はCDE 01である。

燃料の仕様は、JRR-2炉心装荷のため燃料要素の外観形状についてはJRR-2に基づき、燃料板についてはJRR-4に基づいて製作された。燃料要素の構造及び寸法をFig. 1に、製作仕様をTable 1に示す。また、照射履歴及び炉心装荷位置をFig. 2に示す。本報告の中での燃料板とその方向性に関する呼称をFig. 3に示す。

2. 解体検査の概要

本解体検査に際しては、これまでに行った合金型燃料の解体検査¹⁾⁻⁵⁾の経験を生かすとともに、分散型燃料と合金型燃料の相違性を考慮した解体方法、試験検査項目及びその方法を十分検討して実施した。⁶⁾⁻¹¹⁾

原子炉から取り出された燃料要素は、使用済燃料貯槽内で SHIPPING 検査等の健全性確認検査を行い、約3ヶ月間の冷却後ホットラボに搬入した。ホットラボにおいては、燃料要素の非破壊検査を行ったのち、燃料要素の解体を実施した。解体に当たっては、燃料板に損傷を与えないように側板を切削する立フライス盤型の解体装置を用いて行った。燃料要素解体後、燃料板の非破壊検査を行い、更に各種の破壊検査を実施した。解体検査の流れをFig. 4に示す。

照射後試験では、合金型燃料の照射後試験項目にプリスタ試験、ヤング率測定、酸化膜の厚さ測定、SEM・XMA観察等の新たな試験検査を加えて実施した。燃料板と試験検査項目の組み合わせをTable 2に示す。この組み合わせは、合金型燃料の照射後試験の経験を基に燃焼度の幅を大きくするように考慮したものである。

3. 燃料要素の非破壊検査

燃料要素について有害な腐食及び変形等の異常の有無を確認するため、燃料要素の外観及び寸法検査を行った。また、燃料要素上下アダプタ切断後に、ウォータギャップ外観検査を実施した。

3.1 外観検査

高濃縮ウラン燃料要素が、炉心内での耐食性を増すために燃料要素表面にアロージン処理を施しているのに対して、本燃料要素は耐食性アルミニウム合金を使用していることから、脱脂→NaOH（エッチング）→水洗→HNO₃（中和）→水洗→乾燥処理と特殊な表面処理を行っていない。このため、外観検査では特に腐食の状況に注目して観察したほか、曲がり、ねじれ、構成部材の欠落、付着物等の有無について目視により観察を行った。

外観検査の結果、燃料要素の表面は全体的に明るい灰色のアルミニウム地金色であった。外側燃料板には、燃料芯材端に沿った変色及び下端部に若干の肌荒れが観察さ

1. 試験燃料要素の諸元及び照射履歴

本燃料要素は、昭和59年に仏国CERCA社において製作されたMTR型のウラン密度 2.2g/cm^3 のアルミナイド分散型であり、燃料要素番号はCDE 01である。

燃料の仕様は、JRR-2炉心装荷のため燃料要素の外観形状についてはJRR-2に基づき、燃料板についてはJRR-4に基づいて製作された。燃料要素の構造及び寸法をFig. 1に、製作仕様をTable 1に示す。また、照射履歴及び炉心装荷位置をFig. 2に示す。本報告の中での燃料板とその方向性に関する呼称をFig. 3に示す。

2. 解体検査の概要

本解体検査に際しては、これまでに行った合金型燃料の解体検査¹⁾⁻⁵⁾の経験を生かすとともに、分散型燃料と合金型燃料の相違性を考慮した解体方法、試験検査項目及びその方法を十分検討して実施した。⁶⁾⁻¹¹⁾

原子炉から取り出された燃料要素は、使用済燃料貯槽内でシッピング検査等の健全性確認検査を行い、約3ヶ月間の冷却後ホットラボに搬入した。ホットラボにおいては、燃料要素の非破壊検査を行ったのち、燃料要素の解体を実施した。解体に当たっては、燃料板に損傷を与えないように側板を切削する立フライス盤型の解体装置を用いて行った。燃料要素解体後、燃料板の非破壊検査を行い、更に各種の破壊検査を実施した。解体検査の流れをFig. 4に示す。

照射後試験では、合金型燃料の照射後試験項目にプリスタ試験、ヤング率測定、酸化膜の厚さ測定、SEM・XMA観察等の新たな試験検査を加えて実施した。燃料板と試験検査項目の組み合わせをTable 2に示す。この組み合わせは、合金型燃料の照射後試験の経験を基に燃焼度の幅を大きくするように考慮したものである。

3. 燃料要素の非破壊検査

燃料要素について有害な腐食及び変形等の異常の有無を確認するため、燃料要素の外観及び寸法検査を行った。また、燃料要素上下アダプタ切断後に、ウォータギャップ外観検査を実施した。

3.1 外観検査

高濃縮ウラン燃料要素が、炉心内での耐食性を増すために燃料要素表面にアロージン処理を施しているのに対して、本燃料要素は耐食性アルミニウム合金を使用していることから、脱脂→NaOH（エッチング）→水洗→HNO₃（中和）→水洗→乾燥処理と特殊な表面処理を行っていない。このため、外観検査では特に腐食の状況に注目して観察したほか、曲がり、ねじれ、構成部材の欠落、付着物等の有無について目視により観察を行った。

外観検査の結果、燃料要素の表面は全体的に明るい灰色のアルミニウム地金色であった。外側燃料板には、燃料芯材端に沿った変色及び下端部に若干の肌荒れが観察さ

1. 試験燃料要素の諸元及び照射履歴

本燃料要素は、昭和59年に仏国CERCA社において製作されたMTR型のウラン密度 2.2g/cm^3 のアルミナイド分散型であり、燃料要素番号はCDE 01である。

燃料の仕様は、JRR-2炉心装荷のため燃料要素の外観形状についてはJRR-2に基づき、燃料板についてはJRR-4に基づいて製作された。燃料要素の構造及び寸法をFig. 1に、製作仕様をTable 1に示す。また、照射履歴及び炉心装荷位置をFig. 2に示す。本報告の中での燃料板とその方向性に関する呼称をFig. 3に示す。

2. 解体検査の概要

本解体検査に際しては、これまでに行った合金型燃料の解体検査¹⁾⁻⁵⁾の経験を生かすとともに、分散型燃料と合金型燃料の相違性を考慮した解体方法、試験検査項目及びその方法を十分検討して実施した。⁶⁾⁻¹¹⁾

原子炉から取り出された燃料要素は、使用済燃料貯槽内でシッピング検査等の健全性確認検査を行い、約3ヶ月間の冷却後ホットラボに搬入した。ホットラボにおいては、燃料要素の非破壊検査を行ったのち、燃料要素の解体を実施した。解体に当たっては、燃料板に損傷を与えないように側板を切削する立フライス盤型の解体装置を用いて行った。燃料要素解体後、燃料板の非破壊検査を行い、更に各種の破壊検査を実施した。解体検査の流れをFig. 4に示す。

照射後試験では、合金型燃料の照射後試験項目にプリスタ試験、ヤング率測定、酸化膜の厚さ測定、SEM・XMA観察等の新たな試験検査を加えて実施した。燃料板と試験検査項目の組み合わせをTable 2に示す。この組み合わせは、合金型燃料の照射後試験の経験を基に燃焼度の幅を大きくするように考慮したものである。

3. 燃料要素の非破壊検査

燃料要素について有害な腐食及び変形等の異常の有無を確認するため、燃料要素の外観及び寸法検査を行った。また、燃料要素上下アダプタ切断後に、ウォータギャップ外観検査を実施した。

3.1 外観検査

高濃縮ウラン燃料要素が、炉心内での耐食性を増すために燃料要素表面にアロージン処理を施しているのに対して、本燃料要素は耐食性アルミニウム合金を使用していることから、脱脂→NaOH（エッチング）→水洗→HNO₃（中和）→水洗→乾燥処理と特殊な表面処理を行っていない。このため、外観検査では特に腐食の状況に注目して観察したほか、曲がり、ねじれ、構成部材の欠落、付着物等の有無について目視により観察を行った。

外観検査の結果、燃料要素の表面は全体的に明るい灰色のアルミニウム地金色であった。外側燃料板には、燃料芯材端に沿った変色及び下端部に若干の肌荒れが観察さ

れたが、燃料要素全体には有害な腐食、変形、付着物等は観察されなかった。また、目視により観察できる曲がり、ねじれの発生はなく、さらに、構成部材にも異常は認められなかった。燃料要素の外観写真をFig. 5 及びFig. 6 に示す。

3.2 寸法検査

燃料要素が照射中に受ける冷却水による圧力及び熱応力等による変形の有無を確認するため寸法検査を行った。寸法測定位置及び測定結果をFig. 7 に示す。

(1) 燃料要素の全長測定

燃料要素の全長は、燃料板凸面（記号A）及び側板面（記号B）の2箇所についてノギス（精度：1/20mm）を用いて測定した。全長の製作仕様値 $950 \pm 0.5\text{mm}$ 、製作値 949.68mm に対して、照射後の測定値は燃料板凸面で 950.0mm、側板面で 949.8mm であり、製作仕様値の範囲内であった。

(2) 燃料要素の断面（幅）寸法測定

燃料要素の断面寸法（記号C～F及び①～④）は、燃料要素下端から200, 400, 600, 750mm の位置についてダイヤルゲージ及び外径用ダイヤルゲージ（両者精度：1/100mm）を用いて測定した。幅の製作仕様値 $76.2 \pm 0.2\text{mm}$ 、製作値 76.15mm に対して、照射後の測定値は、76.19mm ～ 76.26mm の範囲であった。製作時の測定位置が明らかでないため照射後の値と対応比較はできないが、変化量は最大 +0.11mm の増加であった。

(3) 燃料板と側板端の間隙測定

燃料要素の両側板の端面を結ぶ線と燃料板凸面との最小間隙（記号I）をダイヤルゲージ（精度：1/100mm）を用いて14箇所測定した。製作仕様値 $0.2 \pm 0.1\text{mm}$ に対して、照射後の測定値は 0.05mm ～ 0.22mm の範囲であった。製作時の測定位置が明らかでないため照射後の値と対応比較はできないが、全体として燃料板の凸面側に僅かに膨らみが増加する傾向であった。

以上のように燃料要素の寸法測定では若干の寸法変化が認められたが、ほぼ製作仕様値の範囲内であり、変化量及び傾向はこれまでに実施した高濃縮ウラン燃料の場合と大差のないものであった。

3.3 ウォータギャップ外観検査

上下アダプタ切断除去後、双眼鏡等を用いて目視によりウォータギャップ外観検査を行った。

冷却水の入口側の燃料板下部端面及び出口側の燃料上端面ともに変形がなく、ロールスウェジ法による燃料板の側板への取り付け部にも緩みは観察されなかった。また、燃料板中央部については、各燃料板間とも検査用の白熱灯の光が均等に良く通っていたことから、燃料板に大きな変形や流路閉鎖が発生していないことが確認された。ウォータギャップ外観写真をFig. 8 に示す。

4. 燃料板の非破壊検査

照射中の燃料板の腐食、変形等を調べるため側板から燃料板を取り外し、外観検査、X線検査及び寸法検査を行った。

4.1 燃料板の外観検査

燃料板の外観検査は、各燃料板について双眼鏡等を用い、必要に応じてペリスコープを用いて目視により行った。

燃料板上端の燃料板番号の刻印は、16枚の燃料板とも明瞭に確認することができた。外観状態は、全燃料板の凹面及び凸面とも全体的に明るい灰色のアルミニウム地金色であり、燃料芯材端に沿って変色が観察された。また、燃料板下端コーム取り付け部から上方に冷却水流の痕跡が観察され、上端部ではやや白色を帯びた灰色の不規則な変色となっていた。

燃料板16枚中、燃料板上端側12箇所及び下端側5箇所の燃料芯材端に沿った位置に若干の肌荒れ及び燃料板No.1、No.6、No.7、No.9及びNo.10の凹面に直径約1mmの斑点が合計18点観察された。そのほか、孔食等の有害な腐食、ふくれ、クラック、変形等は観察されず、全体的に外観状態は良好であった。燃料板の外観写真、代表的な肌荒れ及び斑点の状態をFig. 9～Fig. 13に示す。

4.2 燃料板のX線検査

燃料板のX線検査は、全燃料板についてX線写真を撮影し、照射前のX線写真と燃料芯材部等の変化、異常の有無及び寸法変化等を比較検査した。また、照射後のX線写真観察では、外観検査において特徴的であった部分について詳細に検査した。X線写真撮影開始までの燃料要素の冷却期間が約半年と短かったことからガンマ線によるカブリが見られたが、撮影条件の確認等を行ったため検査を行う上で特に支障はなかった。

(1) 燃料芯材部等の観察

何れの燃料板も燃料芯材部は、照射前後において変化はなく、著しいボイド、クラック、ピンホール、介在物等を示す濃淡は観察されなかった。また、燃料芯材と被覆材とのボンディング部では、両者の密度差が大きいためボイド等の有無は判別できなかったが、燃料芯材端部の模様が照射前後で大きく変化しているような観察はされなかった。

外観検査において観察された斑点部分については、詳細観察を行った結果、介在物及びピンホールを示すような濃淡は観察されなかった。

(2) 燃料芯材部の寸法測定

各燃料板について照射前後のX線写真から燃料芯材部の長さ及び幅を直尺(JIS 1級)を用いて測定した。燃料芯材の長さは、製作仕様値 $600 \pm 10\text{mm}$ 、製作時の値 $594.5\text{mm} \sim 604.3\text{mm}$ に対して照射後の値は $594.8\text{mm} \sim 605.0\text{mm}$ であり、変化量は $-1.1\text{mm} \sim +1.4\text{mm}$ であった。また、燃料芯材幅は、製作仕様値の最小値が 58.9mm 、最大値が 63.8mm 、製作時の値 $61.3\text{mm} \sim 61.8\text{mm}$ に対して照射後の値が $61.0\text{mm} \sim 61.5\text{mm}$ であり、変化量

は $-0.4\text{mm} \sim +0.2\text{mm}$ であった。これら燃料芯材部の寸法変化は読み取り誤差を考慮した場合、測定誤差の範囲内であると考えられる。

以上のように燃料板のX線検査では、何れの燃料板にも照射による異常は認められなかったが、燃料板No.2の上端側及び燃料板No.3～No.15の下端側から約20～30mmの位置に約15mm幅程度のドックボーン傾向を示す淡部が観察された。また、燃料芯材部の寸法には照射による影響は認められなかった。ドックボーンを示す淡部のX線写真をFig.14に示す。

4.3 燃料板の寸法検査

燃料板の寸法測定は、照射によるスエリング等の影響を調べるため、各燃料板の全長、幅及び厚さについて行った。

(1) 燃料板の全長測定

燃料板の全長は、幅方向の中央1箇所をノギス（精度： $1/20\text{mm}$ ）を用いて測定した。燃料板の全長の製作仕様値 $625 \pm 1\text{mm}$ 、製作時の値が燃料板の湾曲加工前で $625.0\text{mm} \sim 625.2\text{mm}$ 、湾曲加工後で $625.0\text{mm} \sim 625.3\text{mm}$ に対して、照射後の測定値は $624.9\text{mm} \sim 625.3\text{mm}$ であり、変化量は $-0.20\text{mm} \sim +0.04\text{mm}$ であった。

(2) 燃料板の幅測定

燃料板の幅は、長手方向の中央1箇所をノギス（精度： $1/20\text{mm}$ ）を用いて測定した。燃料板の幅の製作仕様値は湾曲加工前で $71.4 \pm 0.05\text{mm}$ 、湾曲加工後の理論値で 71.05mm 、湾曲加工後で $70.88\text{mm} \sim 71.00\text{mm}$ に対して、照射後の測定値は $71.00\text{mm} \sim 71.10\text{mm}$ であり、変化量は $+0.05\text{mm} \sim +0.22\text{mm}$ であった。

(3) 燃料板の厚さ測定

燃料板の厚さは、幅方向中央及び幅方向の両端から10mm位置の3箇所について、燃料板上端から20mmピッチでスキャンし、各測定ライン31点及び製作時の寸法測定位置5点を測定した。測定は燃料板が湾曲していることから、測定子が燃料板に垂直に接触して厚さが測定できる専用の寸法測定機（精度： $1/100\text{mm}$ ）を使用した。スキャン測定の値は $1.65\text{mm} \sim 1.72\text{mm}$ であり、照射前後の板厚を比較すると燃料板No.5が最も変化していた。また、製作時の板厚と照射後の板厚の比較のために行った製作時寸法測定位置の測定値は、最小 1.68mm 、最大 1.74mm 、燃料板5点の平均 $1.69\text{mm} \sim 1.72\text{mm}$ であり、燃料板の厚さの製作仕様値 $1.65 \pm 0.05\text{mm}$ 、製作時の最小値 1.64mm 、最大値 1.69mm 、燃料板5点の平均値 $1.65\text{mm} \sim 1.68\text{mm}$ に対して、変化量は平均 $+0.02\text{mm} \sim +0.05\text{mm}$ であった。

以上のように燃料板の寸法検査では、全長、幅及び厚さともに若干の変化はあるものの、照射によるスエリング等大きな変化は認められなかった。

5. ブリスタ検査

燃料板の燃料芯材と被覆材との結合性を調べるため、燃料板の加熱試験を行い加熱後の燃料板の外観検査、板厚測定及びFPガス捕集を行った。

は $-0.4\text{mm} \sim +0.2\text{mm}$ であった。これら燃料芯材部の寸法変化は読み取り誤差を考慮した場合、測定誤差の範囲内であると考えられる。

以上のように燃料板のX線検査では、何れの燃料板にも照射による異常は認められなかったが、燃料板No.2の上端側及び燃料板No.3～No.15の下端側から約20～30mmの位置に約15mm幅程度のドックボーン傾向を示す淡部が観察された。また、燃料芯材部の寸法には照射による影響は認められなかった。ドックボーンを示す淡部のX線写真をFig.14に示す。

4.3 燃料板の寸法検査

燃料板の寸法測定は、照射によるスエリング等の影響を調べるため、各燃料板の全長、幅及び厚さについて行った。

(1) 燃料板の全長測定

燃料板の全長は、幅方向の中央1箇所をノギス（精度： $1/20\text{mm}$ ）を用いて測定した。燃料板の全長の製作仕様値 $625 \pm 1\text{mm}$ 、製作時の値が燃料板の湾曲加工前で $625.0\text{mm} \sim 625.2\text{mm}$ 、湾曲加工後で $625.0\text{mm} \sim 625.3\text{mm}$ に対して、照射後の測定値は $624.9\text{mm} \sim 625.3\text{mm}$ であり、変化量は $-0.20\text{mm} \sim +0.04\text{mm}$ であった。

(2) 燃料板の幅測定

燃料板の幅は、長手方向の中央1箇所をノギス（精度： $1/20\text{mm}$ ）を用いて測定した。燃料板の幅の製作仕様値は湾曲加工前で $71.4 \pm 0.05\text{mm}$ 、湾曲加工後の理論値で 71.05mm 、湾曲加工後で $70.88\text{mm} \sim 71.00\text{mm}$ に対して、照射後の測定値は $71.00\text{mm} \sim 71.10\text{mm}$ であり、変化量は $+0.05\text{mm} \sim +0.22\text{mm}$ であった。

(3) 燃料板の厚さ測定

燃料板の厚さは、幅方向中央及び幅方向の両端から10mm位置の3箇所について、燃料板上端から20mmピッチでスキャンし、各測定ライン31点及び製作時の寸法測定位置5点を測定した。測定は燃料板が湾曲していることから、測定子が燃料板に垂直に接触して厚さが測定できる専用の寸法測定機（精度： $1/100\text{mm}$ ）を使用した。スキャン測定の値は $1.65\text{mm} \sim 1.72\text{mm}$ であり、照射前後の板厚を比較すると燃料板No.5が最も変化していた。また、製作時の板厚と照射後の板厚の比較のために行った製作時寸法測定位置の測定値は、最小 1.68mm 、最大 1.74mm 、燃料板5点の平均 $1.69\text{mm} \sim 1.72\text{mm}$ であり、燃料板の厚さの製作仕様値 $1.65 \pm 0.05\text{mm}$ 、製作時の最小値 1.64mm 、最大値 1.69mm 、燃料板5点の平均値 $1.65\text{mm} \sim 1.68\text{mm}$ に対して、変化量は平均 $+0.02\text{mm} \sim +0.05\text{mm}$ であった。

以上のように燃料板の寸法検査では、全長、幅及び厚さともに若干の変化はあるものの、照射によるスエリング等大きな変化は認められなかった。

5. ブリスタ検査

燃料板の燃料芯材と被覆材との結合性を調べるため、燃料板の加熱試験を行い加熱後の燃料板の外観検査、板厚測定及びFPガス捕集を行った。

5.1 ブリスタ試験

ブリスタ試験を行った燃料板は、燃料板No.3及びNo.7の2枚である。燃料板の選定は、燃焼度の幅を大きく取るため、燃料要素の中で熱中性子束の比較的高い外側から3番目の燃料板と熱中性子束の比較的低い中央寄りの燃料板とした。燃焼度は、前者が42.8%、後者が37.3%であった。

加熱温度は、300℃から450℃までが50℃間隔、450℃から550℃までを25℃間隔の8ステップとした。各加熱温度は燃料表面で±1%に設定され、昇温時間30分及び温度保持時間は30分とした。この間、加熱炉内には乾燥空気のスweepガスを1気圧、1.5～1.7 ml/minの流量で通し、スweepガスはガス用電離箱でF Pガスの測定を行った。加熱試験状況をFig.15に、昇温加熱サイクルをFig.16に示す。また、F Pガス捕集フローチャートをFig.17に、ブリスタ試験装置の仕様をTable 3に示す。

5.2 ブリスタ外観検査

ブリスタ試験を行った燃料板2枚について、双眼鏡及びペリスコープを用いて外観を詳細に観察した。燃料板は、加熱温度300℃において薄く焼けた状態に変色し、若干の曲りが発生したが、ふくれ（ブリスタ）は観察されなかった。加熱温度350℃～525℃において燃料板は、温度上昇にともない表面の焼けた状態が増し、特に475℃からは燃料芯材部と被覆材縁との境界が明瞭に観察できるように変色したが、ふくれは観察されなかった。また、燃料板の外観検査時に観察された燃料板No.7凹面の斑点は、ブリスタ試験後には観察されなかった。加熱温度550℃後の外観写真をFig.18に示す。

5.3 燃料板の板厚測定

ブリスタ試験を行った燃料板2枚について、各加熱温度毎に燃料板の板厚測定を行った。測定位置及び測定方法は4.3(3)項の燃料板の厚さ測定と同様としたが、長手方向中央部については、燃料板の変形により専用の寸法測定機では測定できないため測定位置を燃料板幅方向端から10mmに変更し、肉厚測定用ダイヤルキャリパにより測定した。測定結果をTable 4に示す。加熱温度550℃終了後の板厚変化は、燃料板No.3の照射後の板厚が1.71mm～1.75mmであったのに対してブリスタ試験後の板厚は1.73mm～1.87mmであり、変化量は-0.02mm～+0.14mmであった。また、燃料板No.7の照射後の板厚が1.70mm～1.72mmであったのに対してブリスタ試験後の板厚は1.65mm～1.88mmであり、変化量は-0.05mm～+0.17mmであった。

変化量は増加傾向にあり、加熱温度の上昇とともに若干大きくなる傾向であった。

5.4 F Pガス捕集

燃料板加熱中のブリスタ発生によるF Pガス放出を検出するため、加熱炉内に流したスweepガスをガス用電離箱で測定した。測定方法は、燃料板を加熱炉に装荷後、速やかに乾燥空気のスweepガスを1.5～1.7 ml/minで流し、加熱炉の出口で活性炭繊維と石英ウールの2重フィルタを通した後、ケーブル外のガス用電離箱に導き測定した。測定後のガスは、ケーブル内に戻して排気した。測定結果は、何れの試験温度とも

スィープガス中のF Pガスは測定検出感度以下であり、加熱中の燃料板からF Pガスの放出はなく、被覆材の健全性は維持されていた。

6. 機械強度試験

燃料板の照射による機械的性質への影響を調べるため常温引張試験、ヤング率測定及び硬度測定試験を行った。試験開始に当たり、未照射燃料板（J R R - 4 模擬燃料板燃料芯材：劣化ウランによるU A ℓ x - A ℓ 、平板）から試料を採取し、照射前のデータを確認した。

6.1 常温引張試験

未照射燃料板からの試験片採取は、採取方法の違いによる引張試験への影響を考慮して機械加工及び打ち抜き加工により行った。採取した試験片の常温引張試験結果は、それぞれの引張強さが $11.35\text{kg/mm}^2 \sim 12.46\text{kg/mm}^2$ の範囲にあり、極めて良く一致した。未照射試験片の結果は、C E R C A社からの引張強さのデータ $10.8\text{kg/mm}^2 \sim 13.2\text{kg/mm}^2$ と良く一致しており、本試験結果の信頼性は極めて高いことが確認された。

試験を行った燃料板は、燃料板No.4、10及び14の3枚であり、試験片は打ち抜き加工によりそれぞれ3枚ずつ採取した。試験の結果、燃料板の引張強さは $9.27\text{kg/mm}^2 \sim 12.99\text{kg/mm}^2$ であり、未照射試験片とほぼ同じ結果であった。試験結果は、過去に行った照射済ウラン・アルミニウム合金型燃料板の引張試験結果にみられた燃焼度の増加にともなう引張強さの増加傾向はみられなかった。引張強さと燃焼度の関係をFig. 19に示す。また、0.2%耐力は、0.2%の均一伸びを生じる前に部分的な破断が開始し、その直後に最終破断に至ったため求めることができなかった。荷重-変位曲線の一例をFig. 20に示す。図から、最初に燃料芯材部の脆性破壊を示す荷重低下があらわれ、その後アルミニウム被覆材の延性破壊を示す荷重低下と同時に全面破壊に至る現象が見られた。伸びは0.2%～0.4%であり、未照射試験片の約1/3であった。試験結果をTable 5に示す。

6.2 ヤング率測定

試験に先立ち、前項同様に未照射試験片を採取しヤング率測定を行い、製作値及びC E R C A社からのデータと比較した。製作時の値 $7.087\text{kg/mm}^2 \sim 7.250\text{kg/mm}^2$ 及びC E R C A社データ $6.730\text{kg/mm}^2 \sim 7.138\text{kg/mm}^2$ に対して、未照射試験片のヤング率は $7.004\text{kg/mm}^2 \sim 7.749\text{kg/mm}^2$ であり、三者は良く一致した値を示した。

試験を行った燃料板は、No.6及びNo.11の2枚であり、試験片は打ち抜き加工によりそれぞれ3枚ずつ採取した。試験片のヤング率は $6.888\text{kg/mm}^2 \sim 7.527\text{kg/mm}^2$ であり、照射前後のヤング率は殆ど同じ値を示した。ヤング率測定結果をTable 6に示す。

6.3 硬度測定

硬度測定を行った照射済燃料板は、燃焼度の幅を大きくとるため燃料板No.2、No.5及びNo.9の3枚とした。また、各燃料板からの試験片採取についても燃料板の燃焼分

スィープガス中のF Pガスは測定検出感度以下であり、加熱中の燃料板からF Pガスの放出はなく、被覆材の健全性は維持されていた。

6. 機械強度試験

燃料板の照射による機械的性質への影響を調べるため常温引張試験、ヤング率測定及び硬度測定試験を行った。試験開始に当たり、未照射燃料板（J R R - 4 模擬燃料板燃料芯材：劣化ウランによるU A ℓ x - A ℓ 、平板）から試料を採取し、照射前のデータを確認した。

6.1 常温引張試験

未照射燃料板からの試験片採取は、採取方法の違いによる引張試験への影響を考慮して機械加工及び打ち抜き加工により行った。採取した試験片の常温引張試験結果は、それぞれの引張強さが $11.35\text{kg/mm}^2 \sim 12.46\text{kg/mm}^2$ の範囲にあり、極めて良く一致した。未照射試験片の結果は、C E R C A社からの引張強さのデータ $10.8\text{kg/mm}^2 \sim 13.2\text{kg/mm}^2$ と良く一致しており、本試験結果の信頼性は極めて高いことが確認された。

試験を行った燃料板は、燃料板No. 4、10及び14の3枚であり、試験片は打ち抜き加工によりそれぞれ3枚ずつ採取した。試験の結果、燃料板の引張強さは $9.27\text{kg/mm}^2 \sim 12.99\text{kg/mm}^2$ であり、未照射試験片とほぼ同じ結果であった。試験結果は、過去に行った照射済ウラン・アルミニウム合金型燃料板の引張試験結果にみられた燃焼度の増加にともなう引張強さの増加傾向はみられなかった。引張強さと燃焼度の関係をFig. 19に示す。また、0.2%耐力は、0.2%の均一伸びを生じる前に部分的な破断が開始し、その直後に最終破断に至ったため求めることができなかった。荷重-変位曲線の一例をFig. 20に示す。図から、最初に燃料芯材部の脆性破壊を示す荷重低下があらわれ、その後アルミニウム被覆材の延性破壊を示す荷重低下と同時に全面破壊に至る現象が見られた。伸びは0.2%～0.4%であり、未照射試験片の約1/3であった。試験結果をTable 5に示す。

6.2 ヤング率測定

試験に先立ち、前項同様に未照射試験片を採取しヤング率測定を行い、製作値及びC E R C A社からのデータと比較した。製作時の値 $7.087\text{kg/mm}^2 \sim 7.250\text{kg/mm}^2$ 及びC E R C A社データ $6.730\text{kg/mm}^2 \sim 7.138\text{kg/mm}^2$ に対して、未照射試験片のヤング率は $7.004\text{kg/mm}^2 \sim 7.749\text{kg/mm}^2$ であり、三者は良く一致した値を示した。

試験を行った燃料板は、No. 6及びNo. 11の2枚であり、試験片は打ち抜き加工によりそれぞれ3枚ずつ採取した。試験片のヤング率は $6.888\text{kg/mm}^2 \sim 7.527\text{kg/mm}^2$ であり、照射前後のヤング率は殆ど同じ値を示した。ヤング率測定結果をTable 6に示す。

6.3 硬度測定

硬度測定を行った照射済燃料板は、燃焼度の幅を大きくとるため燃料板No. 2、No. 5及びNo. 9の3枚とした。また、各燃料板からの試験片採取についても燃料板の燃焼分

布を考慮して、長手方向（圧延方向）から4個、圧延方向と直角方向から1個採取した。試験片採取位置及び試験片の燃焼度をFig. 21に示す。

燃料芯材部の硬度測定はU A ℓ x 部について行ったが、予想したようにバラツキが多かった。アルミニウム被覆材の硬度測定は、製作時の試験片の値が38.1～58.2で平均49.1、未照射試験片の値が51.0であり、照射済試験片の値は平均60.9～66.3であった。硬度測定の結果から、硬度は燃焼度の増加とともに増加する傾向が見られた。硬度測定結果をTable 7 に、被覆材の硬度と燃焼度の関係をFig. 22に示す。

7. 金相試験及び酸化膜等の厚さ測定

照射による燃料芯材の組織変化及び炉内滞在による被覆材アルミニウム（AG 3 NE）の表面酸化状態の程度を調べるため、燃料芯材の組織検査、酸化膜の厚さ測定及び燃料芯材並びに被覆材の厚さ測定を金相検査により行った。

金相試験を行った照射済燃料板は、硬度測定に供した試験片と同じ試験片であり、硬度測定に先立って金相試験を行った。

7.1 組織観察

未照射試験片の金相写真をFig. 23及びFig. 24に、また、燃料板No. 2、No. 5 及びNo. 9 の3枚から採取した試験片の代表的な金相写真をFig. 25からFig. 29に示す。Fig. 25の金相写真は、燃料板No. 2の試料片S₂で燃料板の圧延方向と平行な断面であり、実測燃焼度は試験片の中で最大の49.3%である。Fig. 26の金相写真は、燃料板No. 2の試料片S₂で燃料板の圧延方向と直角な断面の燃料芯材端部であり、実測燃焼度は47.2%である。Fig. 27の金相写真は、燃料板No. 9の試料片S₂で燃料板の圧延方向と平行な断面であり、実測燃焼度は試験片の中で最小の29.4%である。Fig. 28の金相写真は、燃焼度の違いによる組織変化を示したものであり、Fig. 29の金相写真は、被覆材表面の酸化膜である。

Fig. 23に示す未照射試験片の金相写真の20倍のマクロ写真及び100倍のミクロ写真から、燃料芯材と被覆材との結合性の良さ及びU A ℓ x がマトリックス材中に均一に分散している様子が観察できる。また、400倍のミクロ写真から、微細なボイドが万遍なく分布している様子及び燃料板の圧延によって発生したと考えられるU A ℓ x の割れとそれに伴うと考えられるボイドが観察される。さらに、ボイドがU A ℓ x とマトリックス材A ℓ との境界に沿って微細な幅で存在している様子が観察できる。

Fig. 24に示す酸化膜観察用の写真では燃料板表面に極めて薄い酸化膜が観察できる。

Fig. 25からFig. 27に示すように燃料板から採取した照射後試験片のマクロ写真及びミクロ写真においても燃料芯材と被覆材の結合性は良く、U A ℓ x もマトリックス材中に均一に分散している様子が観察できる。この状態は、照射前後において変化はない。また、Fig. 25とFig. 26の比較から圧延方向の違いによる差も見られない。照射後の金相写真では、微細なボイドとやや大きなボイドが観察でき、微細なボイドは燃焼度が低い程多く、燃焼度が増加するにつれて減少している。これとは逆に大きなボイドは、燃焼度の増加に伴いその大きさを増し、また、丸みを増している。U A ℓ x は

布を考慮して、長手方向（圧延方向）から4個、圧延方向と直角方向から1個採取した。試験片採取位置及び試験片の燃焼度をFig. 21に示す。

燃料芯材部の硬度測定はU A ℓ_x 部について行ったが、予想したようにバラツキが多かった。アルミニウム被覆材の硬度測定は、製作時の試験片の値が38.1～58.2で平均49.1、未照射試験片の値が51.0であり、照射済試験片の値は平均60.9～66.3であった。硬度測定の結果から、硬度は燃焼度の増加とともに増加する傾向が見られた。硬度測定結果をTable 7 に、被覆材の硬度と燃焼度の関係をFig. 22に示す。

7. 金相試験及び酸化膜等の厚さ測定

照射による燃料芯材の組織変化及び炉内滞在による被覆材アルミニウム（AG 3 NE）の表面酸化状態の程度を調べるため、燃料芯材の組織検査、酸化膜の厚さ測定及び燃料芯材並びに被覆材の厚さ測定を金相検査により行った。

金相試験を行った照射済燃料板は、硬度測定に供した試験片と同じ試験片であり、硬度測定に先立って金相試験を行った。

7.1 組織観察

未照射試験片の金相写真をFig. 23及びFig. 24に、また、燃料板No. 2、No. 5 及びNo. 9 の3枚から採取した試験片の代表的な金相写真をFig. 25からFig. 29に示す。Fig. 25の金相写真は、燃料板No. 2の試料片S₃で燃料板の圧延方向と平行な断面であり、実測燃焼度は試験片の中で最大の49.3%である。Fig. 26の金相写真は、燃料板No. 2の試料片S₃で燃料板の圧延方向と直角な断面の燃料芯材端部であり、実測燃焼度は47.2%である。Fig. 27の金相写真は、燃料板No. 9の試料片S₂で燃料板の圧延方向と平行な断面であり、実測燃焼度は試験片の中で最小の29.4%である。Fig. 28の金相写真は、燃焼度の違いによる組織変化を示したものであり、Fig. 29の金相写真は、被覆材表面の酸化膜である。

Fig. 23に示す未照射試験片の金相写真の20倍のマクロ写真及び100倍のミクロ写真から、燃料芯材と被覆材との結合性の良さ及びU A ℓ_x がマトリックス材中に均一に分散している様子が観察できる。また、400倍のミクロ写真から、微細なボイドが万遍なく分布している様子及び燃料板の圧延によって発生したと考えられるU A ℓ_x の割れとそれに伴うと考えられるボイドが観察される。さらに、ボイドがU A ℓ_x とマトリックス材A ℓとの境界に沿って微細な幅で存在している様子が観察できる。

Fig. 24に示す酸化膜観察用の写真では燃料板表面に極めて薄い酸化膜が観察できる。

Fig. 25からFig. 27に示すように燃料板から採取した照射後試験片のマクロ写真及びミクロ写真においても燃料芯材と被覆材の結合性は良く、U A ℓ_x もマトリックス材中に均一に分散している様子が観察できる。この状態は、照射前後において変化はない。また、Fig. 25とFig. 26の比較から圧延方向の違いによる差も見られない。照射後の金相写真では、微細なボイドとやや大きなボイドが観察でき、微細なボイドは燃焼度が低い程多く、燃焼度が増加するにつれて減少している。これとは逆に大きなボイドは、燃焼度の増加に伴いその大きさを増し、また、丸みを増している。U A ℓ_x は

燃焼度の増加につれて大きさを増していることが観察できる。Fig. 28に示すように、燃焼度の違いによる組織変化は、試験片中最も燃焼度が低い燃料板No. 9の試験片S₂（燃焼度29.4%）では、大きなボイドが存在するものの、燃料板圧延時のU A l_xの割れに伴うボイド及びU A l_xとマトリックス材A lとの境界にボイドが明瞭に存在している。燃料板No. 5の試験片S₄（燃焼度39.0%）では、U A l_xの割れに伴うボイドとU A l_xとマトリックス材A lとの境界のボイドの関係がかなり不明確となり、燃料板No. 2の試験片S₃（燃焼度49.3%）では、更にこの関係が不明確でボイドの形状も燃焼度の増加とともに細長いものから丸みを帯びたものへと変化している。割れによるボイドの消滅したU A l_x粒子は強く結合しあい1個のU A l_x粒子として成長し、燃焼に伴うU A l_x粒子の成長が観察される。

被覆材表面の酸化膜は、Fig. 29に示すように何れの試験片にも観察することができるが、詳細については次項で述べることとする。

7.2 酸化膜等の厚さ測定

各金相試験片について燃料板厚さ、被覆材厚さ、燃料芯材厚さ及び燃料表面の酸化膜厚さを測定し、また、燃料芯材部のボイド率を測定した。

(1) 測定方法

1) 燃料板厚さ測定

燃料板厚さは、エッチング前の試験片を40倍で観察し、試験片当り5ヵ所以上の板厚を測定して最小値、最大値及び平均値を求めた。

2) 被覆材厚さ測定

被覆材厚さは、エッチング前の試験片を40倍で観察し、最小値及び最大値を測定した。また、被覆材の面積を測定し、測定長さとの関係から平均値を求めた。

3) 燃料芯材厚さ測定

燃料芯材厚さは、エッチング前の試験片を40倍で観察し、最小値及び最大値を測定した。また、燃料板厚さ平均値と被覆材厚さ平均値（凸面＋凹面）との差から燃料芯材厚さの平均値を求めた。

4) 酸化膜厚さ測定

酸化膜の厚さは、エッチング前の試験片を400倍で観察し、最小値及び最大値を測定した。また、酸化膜の面積を測定し、測定長さとの関係から平均値を求めた。

5) ボイド率測定

ボイド率は、エッチング前の試験片を200倍で観察し、ボイドと燃料芯材との面積比から求めた。

(2) 測定結果

燃料板厚さ、被覆材厚さ、燃料芯材厚さ、燃料表面の酸化膜厚さ及び燃料芯材部のボイド率測定の結果をTable 8に示す。

1) 燃料板厚さ、被覆材厚さ、燃料芯材厚さ

燃料板厚さの製作仕様値は 1.65 ± 0.05 mmであり、製作値の平均値は燃料板No. 2が1.68mm、燃料板No. 5が1.66mm、燃料板No. 9が1.66mmであった。これに対して照射後

の測定値は、燃料板No. 2 が1.67mm、燃料板No. 5 が1.68mm、燃料板No. 9 が1.67mmであり、いずれも製作仕様値の範囲内であった。また、製作値と比較した場合の変化量は、 $-0.01\text{mm} \sim +0.02\text{mm}$ であった。

被覆材及び燃料芯材厚さの製作仕様値は、それぞれ0.38mm（最小厚さ0.25mm）及び $0.89 \pm 0.09\text{mm}$ である。照射後の測定値は、燃料板No. 2 の被覆材厚さが 0.36mm、燃料芯材厚さが 0.94mm、燃料板No. 5 の被覆材厚さが 0.39mm、燃料芯材厚さが 0.90mm、燃料板No. 9 の被覆材厚さが 0.38mm、燃料芯材厚さが 0.90mm であった。各燃料板の被覆材厚さは最小厚さ以上であり、燃料芯材厚さは製作仕様値の範囲内であった。

2) 酸化膜厚さ

燃料板表面の酸化膜の厚さは、燃料板No. 2 では最小値が $0.8\mu\text{m}$ 、最大値が $33.1\mu\text{m}$ 、平均 $12\mu\text{m}$ であった。燃料板No. 5 では最小値が $2.5\mu\text{m}$ 、最大値が $32.3\mu\text{m}$ 、平均 $11.9\mu\text{m}$ であった。燃料板No. 9 では最小値が $2.0\mu\text{m}$ 、最大値が $28.9\mu\text{m}$ 、平均 $10.8\mu\text{m}$ であった。これら試験片の平均の酸化膜厚さは、 $11.6\mu\text{m}$ であった。未照射試験片の酸化膜は、極めて薄く測定することはできなかった。燃焼度に対する酸化膜の変化をFig. 30に示す。燃焼度の増加とともに酸化膜も厚くなるように見えるが、バラツキが多く明瞭ではない。

3) 燃料芯材のボイド率

燃料芯材中のボイド率は、燃料板No. 2 で 2.6%から 5.4%、燃料板No. 5 で3.3 %から 4.6%、また、燃料板No. 9 で 2.5%から 4.5%の範囲であった。燃焼度に対するボイド率の変化をFig. 31に示す。バラツキが多く明瞭ではないが、燃焼度の増加とともにボイド率は増加する傾向であり、金相写真で観察された燃焼度の増加に伴うボイドの成長と良く一致している。

7.3 EPMA観察

EPMA観察は、照射後試験の一分野の開発を兼ねて実施したもので、装置は島津製作所製電子線マイクロアナライザーEPM-810Q型を種々改良し、遠隔操作によりホットセル内で取扱い可能としたものである。

観察の一例として、燃料板No. 6 のUAl₃部の気孔（ボイド）をFig. 32に示す。この写真は、ヤング率測定に供した後、引張り試験機により引張り切断した試料を撮ったものである。UAl₃中のボイドの集中化の様子が良く観察できる。また、金相試験に供した試料について、2次電子像（SE像）、吸収電子像（SC像）の観察及び点分析、線分析、面分析の定性分析を行った。2次電子像+線分析の結果をFig. 33に示す。この試料は、燃料板No. 2 試料片S₃であり、測定点AではUAl₃中のAlに比べてUの量が非常に多く、測定点BではUAl₃中のUの量がAlよりやや多い状態が観察された。また、測定点Cではマトリックス中にUが全く含まれていない状態が測定された。UAl₃粒子の線分析ではFP核種のZr及びMoが明確に検出されている。なお、UAl₃粒子中のUAl₃、UAl₄の状態は、分析に必要な比較試料がないことから測定できなかった。

以上の結果、EPMA観察は材料の照射挙動評価、FPの分析等の照射後試験の一

項目として期待することができる。

8. 燃 焼 度 測 定

燃料要素解体後の16枚の燃料板についてガンマスキャンニングを行い、さらに、燃料板打抜き試料の絶対燃焼度を求め、燃料板及び燃料要素の燃焼特性を調べた。

8.1 測定項目と測定条件

(1) 測定項目

燃料板及び燃料要素の燃焼特性（燃焼度及びその分布）を求めるため、以下の項目について測定を行った。

1) ガンマスキャンニング

① 長手方向ガンマ線強度分布

全燃料板について燃料板の長手方向3ヵ所のガンマ線強度分布を測定し、この結果から燃料板の平均計数率を求めた。長手方向のガンマ線強度分布の測定位置関係をFig. 34に示す。

② 幅方向ガンマ線強度分布

長手方向ガンマ線強度より求めた平均計数率の分布と比較するため、16枚の燃料板の中から燃料板No. 2 及びNo. 9 について幅方向のガンマ線強度分布を測定した。幅方向のガンマ線強度分布の測定位置関係をFig. 35に示す。

2) 定点測定

ガンマ線強度分布とスキャンガンマ線エネルギー範囲での個々の核分裂生成物核種の関連を調べるため、燃料板No. 2、No. 5 及びNo. 9 の長手方向の中央位置のスキャンニング線上の5ヵ所についてガンマ線スペクトルを測定した。定点測定の測定位置関係をFig. 36に示す。

3) 絶対燃焼度測定

ガンマスキャンニングで得たガンマ線強度と絶対燃焼度との関係（校正曲線）を求めるため、打抜き試料の絶対燃焼度を測定した。打抜き試料は直径1 mmで、燃料板No. 2 とNo. 9 の長手方向の中央位置のスキャンニング線上の5ヵ所合計10個を採取し、そのうちの6個について化学分析を行った。打抜き位置をFig. 37に示す。

(2) 測定条件

1) ガンマスキャンニング

ガンマスキャンニングはHPGe半導体検出器を用い、350～2345 keVのエネルギー範囲で測定した。検出器、コリメータ及び燃料板の位置関係をFig. 38に示す。

2) 定点測定

定点ガンマ線スペクトル測定は、HPGe半導体検出器及び4096ch波高分析器を使用して、燃料板No. 2 及びNo. 9 について行った。測定方法は、ガンマスキャンニングと同様にFig. 38に示す位置関係で行い、測定データの解析は中型計算機システム及びガンマ線スペクトル解析プログラムを使用して、F P核種の同定、相対強度（計数率）の算出を行った。

項目として期待することができる。

8. 燃 焼 度 測 定

燃料要素解体後の16枚の燃料板についてガンマスキャンニングを行い、さらに、燃料板打抜き試料の絶対燃焼度を求め、燃料板及び燃料要素の燃焼特性を調べた。

8.1 測定項目と測定条件

(1) 測定項目

燃料板及び燃料要素の燃焼特性（燃焼度及びその分布）を求めるため、以下の項目について測定を行った。

1) ガンマスキャンニング

① 長手方向ガンマ線強度分布

全燃料板について燃料板の長手方向3ヵ所のガンマ線強度分布を測定し、この結果から燃料板の平均計数率を求めた。長手方向のガンマ線強度分布の測定位置関係をFig. 34に示す。

② 幅方向ガンマ線強度分布

長手方向ガンマ線強度より求めた平均計数率の分布と比較するため、16枚の燃料板の中から燃料板No. 2 及びNo. 9 について幅方向のガンマ線強度分布を測定した。幅方向のガンマ線強度分布の測定位置関係をFig. 35に示す。

2) 定点測定

ガンマ線強度分布とスキャンガンマ線エネルギー範囲での個々の核分裂生成物核種の関連を調べるため、燃料板No. 2、No. 5 及びNo. 9 の長手方向の中央位置のスキャンニング線上の5ヵ所についてガンマ線スペクトルを測定した。定点測定の測定位置関係をFig. 36に示す。

3) 絶対燃焼度測定

ガンマスキャンニングで得たガンマ線強度と絶対燃焼度との関係（校正曲線）を求めるため、打抜き試料の絶対燃焼度を測定した。打抜き試料は直径1 mmで、燃料板No. 2 とNo. 9 の長手方向の中央位置のスキャンニング線上の5ヵ所合計10個を採取し、そのうちの6個について化学分析を行った。打抜き位置をFig. 37に示す。

(2) 測定条件

1) ガンマスキャンニング

ガンマスキャンニングはHPGe半導体検出器を用い、350～2345 keVのエネルギー範囲で測定した。検出器、コリメータ及び燃料板の位置関係をFig. 38に示す。

2) 定点測定

定点ガンマ線スペクトル測定は、HPGe半導体検出器及び4096ch波高分析器を使用して、燃料板No. 2 及びNo. 9 について行った。測定方法は、ガンマスキャンニングと同様にFig. 38に示す位置関係で行い、測定データの解析は中型計算機システム及びガンマ線スペクトル解析プログラムを使用して、F P核種の同定、相対強度（計数率）の算出を行った。

3) 絶対燃焼度測定

打抜き試料の燃焼度測定は、化学部分析センターに依頼して実施した。¹²⁾ 絶対燃焼度は、Uの量及び同位体比から求めた。Uの定量及び同位体比は、化学分析及び質量分析法を用いて測定し、同時に¹³⁷Csの定量、Puの定量及び同位体比の測定を行った。

8.2 測定結果

(1) ガンマ線強度分布

1) 長手方向ガンマ線強度分布

燃料板の長手方向ガンマスキャンニングにおいて、ウラン密度の低い外部燃料板2枚を除く内部燃料板14枚の何れにも燃料芯材端部の一端にドックボーンを示すピークが測定された。ドックボーンを示すピークは、燃料板No.2では燃料芯材上端側に測定され、その他の燃料板（No.3～No.15）では燃料芯材下端側に測定された。また、このピークは何れの燃料板においても燃料板端から20～30mmの位置にあり、その幅は約15mmとなっており、幅方向に3ヵ所測定した長手方向ガンマスキャンニングの何れにも観察された。ガンマスキャンニングの一例として燃料板No.12の測定結果をFig. 39に示す。

2) 幅方向ガンマ線強度分布

幅方向ガンマスキャンニングを実施した燃料板No.2は、燃料要素の外側から2番目に位置し、また、燃料板No.9は中央に位置する燃料板である。スキャンニングにより得られた分布は、何れも長手方向スキャンX-1側に高い傾向を示している。また、燃料板No.2の分布は曲率半径の大きな弧状を示し、燃料板No.9の分布は凹みの著しいものであった。この傾向は、過去に行った高濃縮ウラン燃料の照射後試験結果と同様の傾向を示しており、炉心内の熱中性子束の分布の高低によるものと考えられる。幅方向ガンマ線強度分布の一例をFig. 40に示す。

3) 燃料板のガンマ線平均計数率

測定した3本の長手方向ガンマ線強度分布から、Transverse Average法を用いて各燃料板の平均計数率 H_a を算出した。Transverse Average法は、次の手順により平均計数率 H_a を求める方法である。

① 3本の長手方向ガンマ線強度分布から、数点ないし10点程度の幅方向ガンマ線強度分布を描き、その平均計数率 T_a と、ある1本の長手方向分布と幅方向分布の交点の計数率 T_i との比 T_a/T_i を求める。

② 上述の、ある長手方向分布の平均計数率 L_a を求める。

③ 燃料板の平均計数率 H_a は、 $H_a = L_a \times T_a/T_i$ の関係から求める。

各燃料板の L_a 、 T_a/T_i 及び平均計数率 H_a をTable 9に、また、この結果を過去に実施した高濃縮ウラン燃料の検査結果と合わせてFig. 41に示す。これは、炉心半径方向における燃料要素の熱中性子分布を示すもので、燃料要素の外側と中央部で燃焼度の差が大きくなっており、前項の幅方向ガンマ線強度分布で述べた凹みの傾向と一致している。

(2) 絶対燃焼度測定

打抜き試料の絶対燃焼度測定を化学部分析センターで行い、各燃料板及び燃料要素の燃焼度を求めた。化学分析及び質量分析結果をTable 10に示す。

1) 打抜き試料の絶対燃焼度及び校正曲線

打抜き試料の絶対燃焼度は従来の手法と同様に、U同位体測定結果から次式を用いて行った。

$$\text{絶対燃焼度 } B_U = \frac{R_{6/5} - R_{6/5}^0}{R_{6/5} + \frac{\alpha}{1 + \alpha}} \times 100 \quad (\%)$$

ここで、

$R_{6/5}^0$: 照射前の ^{236}U と ^{235}U の原子数

$R_{6/5}$: 照射後の ^{236}U と ^{235}U の原子数

α : ^{235}U の核分裂断面積に対する捕獲断面積の比

$R_{6/5}^0$ は製作時の燃料芯材の濃度分析結果から、 7.0585×10^{-3} を、また、 α は 0.1798 を用いた。各試料の絶対燃焼度とガンマスキニングで得た打抜き位置の計数率をTable 11に示す。また、各燃料板及び燃料要素の平均燃焼度を求めるための校正曲線をFig. 42に示す。

2) 燃料板及び燃料要素の平均燃焼度

各燃料板において最も高い燃焼度 (51.9%) を示した燃料板は外側の燃料板No. 1 であり、最も低い燃焼度 (36.1%) を示した燃料板は燃料板No. 10であった。燃料板の平均計数率から求めた燃料板No. 2、No. 5 及びNo. 9 の燃焼度分布をFig. 43に、また、各燃料板及び燃料要素の燃焼度をTable 12に示す。

燃料要素の実測燃焼度は39.0%であり、計算燃焼度 41.6 % に対して 6.6% 下目にずれている。過去に行った高濃縮ウラン燃料の照射後試験においても実測燃焼度は、計算燃焼度に比べて燃焼度20%を境にして低燃焼側で高めになり、高燃焼側で低めになる傾向であり、本燃料要素の場合も同様の傾向を示している。実測燃焼度と計算燃焼度の関係を、高濃縮ウラン燃料の照射後試験結果と合せてFig. 44に示す。

3) ピーキングファクタ

過去に実施した高濃縮ウラン燃料の解体検査と同様の手法により、各燃料板のピーキング (Peaking, f_p) 及び燃料要素のピーキングファクタ (Peaking factor, F_p) を求めた。 f_p 及び F_p の定義は次のとおりである。

$$f_p = \frac{\text{燃料板における最大計数率}}{\text{燃料板の平均計数率}}$$

$$F_p = \frac{\text{燃料要素における最大計数率}}{\text{燃料要素の平均計数率}}$$

各燃料板ともに、計数率が最大の位置は長手方向中央部で幅方向の端 (長手方向 X-1 側) である。また、燃料要素の最大計数率の位置は燃料板No. 1 である。各燃料板の f_p は1.18~1.30の範囲内にあり燃料板No. 8 が最大であり、燃料要素の F_p

は1.35であった。これらの値を過去の解体検査の結果と合わせてTable 13に示す。結果を比較すると f_p 及び F_p とほぼ同一範囲内に収まっており、燃焼度の依存性が少ないことを示している。

9. まとめ

今回の検査結果をまとめると次のとおりとなる。

(1) 燃料要素の外観検査

燃料要素の表面は、全体的に明るい灰色のアルミニウム地金色であり、外側の燃料板では燃料芯材端に沿った変色及び下端部に若干の肌荒れが観察された。しかし、その状況は、過去に解体検査を行った燃料要素と大差なく、耐食性アルミニウムの使用によりアロージン処理の必要性がないことが確認された。

(2) 燃料要素の寸法検査

燃料要素の寸法は、いずれも製作仕様の寸法公差内であり、製作値に近い値となっており、低濃縮化及び燃焼度の増加による影響は認められなかった。

(3) ウォータギャップ外観検査

燃料要素上下アダプタ切断後のウォータギャップ外観検査では、異常は認められなかった。

(4) 燃料板の外観検査

燃料板表面は、全体的に明るい灰色のアルミニウム地金色であり、燃料芯材に沿って変色が観察された。燃料板上端部に若干の肌荒れと数枚の燃料板に直径1mmの斑点が観察されたが、ブリスタ試験の加熱後の外観検査では観察されていないことから付着物と考えられた。全体的に外観状態は良好であり、有害な腐食、ふくれ、クラック等は観察されなかった。燃料要素及び燃料板の外観検査の結果から構造材及び被覆材としての耐食性アルミニウム (AG3NE) の使用に問題はないと考えられる。

(5) 燃料板のX線検査

照射前後のX線写真に顕著な変化はなく、外観検査において観察された斑点部分についても詳細観察の結果、介在物及びピンホールを示すような濃淡は観察されなかった。

X線写真による燃料芯材部の寸法検査についても若干の変化はあるものの、製作値に近い値であり、照射による影響は認められなかった。なお、燃料板No.2の上端側及び燃料板No.3～No.15の下端側にドックボーン傾向を示す淡部が観察されたが、照射前のX線写真にも観察されたものであり、金相試験の結果からもドックボーンの状態は製作仕様の範囲であることが確認され、特に問題とはならない。

(6) 燃料板の寸法検査

燃料板の寸法検査では、全長、幅及び厚さともに若干の変化はあるものの、照射によるスエリング等大きな変化は認められなかった。

(7) ブリスタ検査

ブリスタ検査を行った2枚の燃料板は、温度上昇にともない表面の焼けた状態が増し、燃料芯材部と被覆材顔縁との境界が明瞭に観察できるように変色したが、ふくれは観察されなかった。また、加熱後に行った燃料板の板厚測定では、加熱温度の上昇にともな

は1.35であった。これらの値を過去の解体検査の結果と合わせてTable 13に示す。結果を比較すると f_p 及び F_p とほぼ同一範囲内に収まっており、燃焼度の依存性が少ないことを示している。

9. まとめ

今回の検査結果をまとめると次のとおりとなる。

(1) 燃料要素の外観検査

燃料要素の表面は、全体的に明るい灰色のアルミニウム地金色であり、外側の燃料板では燃料芯材端に沿った変色及び下端部に若干の肌荒れが観察された。しかし、その状況は、過去に解体検査を行った燃料要素と大差なく、耐食性アルミニウムの使用によりアロージン処理の必要性がないことが確認された。

(2) 燃料要素の寸法検査

燃料要素の寸法は、いずれも製作仕様の寸法公差内であり、製作値に近い値となっており、低濃縮化及び燃焼度の増加による影響は認められなかった。

(3) ウォータギャップ外観検査

燃料要素上下アダプタ切断後のウォータギャップ外観検査では、異常は認められなかった。

(4) 燃料板の外観検査

燃料板表面は、全体的に明るい灰色のアルミニウム地金色であり、燃料芯材に沿って変色が観察された。燃料板上端部に若干の肌荒れと数枚の燃料板に直径1mmの斑点が観察されたが、ブリスタ試験の加熱後の外観検査では観察されていないことから付着物と考えられた。全体的に外観状態は良好であり、有害な腐食、ふくれ、クラック等は観察されなかった。燃料要素及び燃料板の外観検査の結果から構造材及び被覆材としての耐食性アルミニウム (AG3NE) の使用に問題はないと考えられる。

(5) 燃料板のX線検査

照射前後のX線写真に顕著な変化はなく、外観検査において観察された斑点部分についても詳細観察の結果、介在物及びピンホールを示すような濃淡は観察されなかった。

X線写真による燃料芯材部の寸法検査についても若干の変化はあるものの、製作値に近い値であり、照射による影響は認められなかった。なお、燃料板No.2の上端側及び燃料板No.3～No.15の下端側にドックボーン傾向を示す淡部が観察されたが、照射前のX線写真にも観察されたものであり、金相試験の結果からもドックボーンの状態は製作仕様の範囲であることが確認され、特に問題とはならない。

(6) 燃料板の寸法検査

燃料板の寸法検査では、全長、幅及び厚さともに若干の変化はあるものの、照射によるスエリング等大きな変化は認められなかった。

(7) ブリスタ検査

ブリスタ検査を行った2枚の燃料板は、温度上昇にともない表面の焼けた状態が増し、燃料芯材部と被覆材縁との境界が明瞭に観察できるように変色したが、ふくれは観察されなかった。また、加熱後に行った燃料板の板厚測定では、加熱温度の上昇にともな

い若干の増加傾向が確認されたが、加熱中の燃料板からのF Pガス放出もなく、被覆材の健全性は維持されていた。

(8) 機械強度試験

燃料板から採取した試験片の引張り強度は未照射試験片とほぼ同じ値を示し、過去に行った合金型燃料板にみられた燃焼度の増加にともなう引張り強さの増加傾向はなかった。燃料芯材と被覆材の結合性は極めて良好であり、被覆材の硬度測定で燃焼度の増加にともなう硬度の増加傾向が確認されたが、伸びは未照射試験片の1/3程度の減少であることから被覆材の延性は保たれているものと考えられる。一方、新たに試験項目として加えたヤング率測定では、照射前後のヤング率は殆ど同じ値を示し、照射による影響は認められなかった。

(9) 金相試験

未照射試験片及び照射後試験片のマクロ写真では、燃料芯材と被覆材との結合が良く、U A l xがマトリックス材中に均一に分散している様子が観察され、照射による変化は観られない。ミクロ写真においては、微細なボイドとやや大きなボイドが観察でき、微細なボイドは燃焼度が低いほど多く、燃焼度の増加に伴い減少し、燃焼に伴うU A l x粒子の成長が観察された。初期に存在した小ボイドは燃焼とともに大きく成長するものと観察でき、このボイドはF Pガス溜りとなり、F Pガスによりボイドが成長するものと推定できる。極端なボイドの成長はスエリングに結びつくと考えられるが、今回程度の燃焼度では特に問題になることはないと考えられる。

被覆材厚さ及び燃料芯材厚さは製作仕様値の範囲内であり、燃料板表面の酸化膜は試験片平均で11.6 μm であった。酸化膜は燃焼度の増加とともに厚くなるように見えるが、バラツキが多く明瞭ではない。燃料芯材中のボイド率は、バラツキが多く明瞭ではないが燃焼度の増加とともに大きくなる傾向がみられ、金相写真で観察された燃焼度の増加に伴うボイドの成長と一致している。また、E P M A観察では、U A l x中のボイドの集中化の様子が良く観察でき、さらに、U A l x中のU、マトリックス材のA l、F P核種のZ r及びM oが明確に検出され、材料の照射挙動評価及びF Pの分析等照射後試験の一項目として期待できることが確認された。

(10) ガンマスキャンニング及び燃焼度測定

燃料板の長手方向ガンマスキャンニングでは、ウラン密度の低い外部燃料板を除く内部燃料板14枚に燃料芯材端部の一端にドックボーンを示すピークが確認されたが、金相試験の結果から製作仕様値の範囲であることが確認された。幅方向ガンマスキャンニングでは、中央部に凹みを持った強度分布を示し、過去に行った高濃縮ウラン燃料の照射後試験結果と同様の傾向が確認された。また、燃料板の平均計数率も炉心半径方向の熱中性子分布の影響で燃料要素の外側と中央部で燃焼度の差が大きくなっており、幅方向ガンマ線強度分布の凹みの傾向と一致している。

燃料要素の実測燃焼度は39.0%であり、計算燃焼度41.6%に対して6.6%下目にずれているが、高濃縮ウラン燃料の場合と同様の傾向を示している。また、燃料板及び燃料要素のピーキングファクタについても、過去の解体検査の結果と比較すると同一範囲内に収まっており、燃焼度の依存性が少ないことを示している。

以上のように、低濃縮試験燃料要素について実施した解体検査の結果は、燃料板の寸法に若干の変化がみられ、X線検査で燃料芯材端部にドックボーン傾向が確認されたが、これらは過去に行った高濃縮ウラン燃料の解体検査の結果と同様の傾向を示しており、照射による燃料芯材及び被覆材等の異常は認められなかった。また、構造材及び被覆材に使用した耐食性アルミニウム（AG3NE）は材料的に問題がなく、燃料芯材についても芯材中のボイドの有効性が確認された。これらのことから、低濃縮試験燃料要素として製作したウラン密度 2.2g/cm³のアルミナド分散型燃料要素の照射健全性は保たれていることが確認された。

謝 辞

本検査を実施するにあたり、打抜き試料の絶対燃焼度測定をお願いした、岡下元分析センタ室長（現財団法人核物質管理センタ）、鈴木敏夫氏（現放射線照射振興協会）、大貫守氏、郡司勝文氏ほか同室員の皆様に感謝の意を表します。

ホットラボにおける照射後試験をお願いした、足立元ホットラボ管理室長（現原子力船解役部長）、鈴木紘氏（現HTTR計画室）、松島秀夫氏（現放射線照射振興協会）、園部清美氏（現ホット試験室）、伊藤忠春氏ほか同室員の皆様に感謝の意を表します。

照射後試験結果、特に電子顕微鏡検査内容と評価について、貴重な御助言を頂きました渡辺齊氏（現原子燃料工業株式会社）に感謝の意を表します。

本報告書をまとめるにあたり、御指導、御助言を頂きました白井研究炉部長、大西研究炉部次長に深謝致します。

参考文献

- 1) 高柳弘, 島敬二郎, 山原武;"JRR-2 使用済燃料の解体検査 (I)", 私信
- 2) 高柳弘, 足立守, 松野見爾他;"JRR-2 使用済燃料の解体検査 (II)", 私信
- 3) 足立守, 内山順三, 佐藤博他;"JRR-2 使用済燃料の解体検査 (III)", 私信
- 4) 足立守, 近藤真, 内山順三他;"JRR-2 使用済燃料の解体検査 (IV)", 私信
- 5) 佐藤博, 近藤真, 内山順三他;"JRR-2 使用済燃料の解体検査 (V)", 私信
- 6) 研究炉管理部;"研究炉・ホットラボの運転と技術管理", JAERI-M 87-146 (1987)
- 7) 研究炉管理部;"研究炉・ホットラボの運転と技術管理", JAERI-M 88-211 (1988)
- 8) 研究炉管理部;"研究炉・ホットラボの運転と技術管理", JAERI-M 89-136 (1989)
- 9) 研究炉管理部;"研究炉・ホットラボの運転と技術管理", JAERI-M 90-166 (1990)
- 10) 佐藤博, 近藤真, 白井英次: 日本原子力学会, 平成元年度 年会
- 11) 近藤真, 佐藤博, 白井英次: 日本原子力学会, 平成元年度 年会
- 12) 鈴木敏夫, 大貫守, 園部保他;"研究炉・試験用原子炉燃料の燃焼率測定", 私信

以上のように、低濃縮試験燃料要素について実施した解体検査の結果は、燃料板の寸法に若干の変化がみられ、X線検査で燃料芯材端部にドックボーン傾向が確認されたが、これらは過去に行った高濃縮ウラン燃料の解体検査の結果と同様の傾向を示しており、照射による燃料芯材及び被覆材等の異常は認められなかった。また、構造材及び被覆材に使用した耐食性アルミニウム（AG3NE）は材料的に問題がなく、燃料芯材についても芯材中のボイドの有効性が確認された。これらのことから、低濃縮試験燃料要素として製作したウラン密度 2.2g/cm³のアルミナド分散型燃料要素の照射健全性は保たれていることが確認された。

謝 辞

本検査を実施するにあたり、打抜き試料の絶対燃焼度測定をお願いした、岡下元分析センタ室長（現財団法人核物質管理センタ）、鈴木敏夫氏（現放射線照射振興協会）、大貫守氏、郡司勝文氏ほか同室員の皆様に感謝の意を表します。

ホットラボにおける照射後試験をお願いした、足立元ホットラボ管理室長（現原子力船解役部長）、鈴木紘氏（現HTTR計画室）、松島秀夫氏（現放射線照射振興協会）、園部清美氏（現ホット試験室）、伊藤忠春氏ほか同室員の皆様に感謝の意を表します。

照射後試験結果、特に電子顕微鏡検査内容と評価について、貴重な御助言を頂きました渡辺齊氏（現原子燃料工業株式会社）に感謝の意を表します。

本報告書をまとめるにあたり、御指導、御助言を頂きました白井研究炉部長、大西研究炉部次長に深謝致します。

参考文献

- 1) 高柳弘, 島敬二郎, 山原武;"JRR-2 使用済燃料の解体検査 (I)", 私信
- 2) 高柳弘, 足立守, 松野見爾他;"JRR-2 使用済燃料の解体検査 (II)", 私信
- 3) 足立守, 内山順三, 佐藤博他;"JRR-2 使用済燃料の解体検査 (III)", 私信
- 4) 足立守, 近藤真, 内山順三他;"JRR-2 使用済燃料の解体検査 (IV)", 私信
- 5) 佐藤博, 近藤真, 内山順三他;"JRR-2 使用済燃料の解体検査 (V)", 私信
- 6) 研究炉管理部;"研究炉・ホットラボの運転と技術管理", JAERI-M 87-146 (1987)
- 7) 研究炉管理部;"研究炉・ホットラボの運転と技術管理", JAERI-M 88-211 (1988)
- 8) 研究炉管理部;"研究炉・ホットラボの運転と技術管理", JAERI-M 89-136 (1989)
- 9) 研究炉管理部;"研究炉・ホットラボの運転と技術管理", JAERI-M 90-166 (1990)
- 10) 佐藤博, 近藤真, 白井英次: 日本原子力学会, 平成元年度 年会
- 11) 近藤真, 佐藤博, 白井英次: 日本原子力学会, 平成元年度 年会
- 12) 鈴木敏夫, 大貫守, 園部保他;"研究炉・試験用原子炉燃料の燃焼率測定", 私信

以上のように、低濃縮試験燃料要素について実施した解体検査の結果は、燃料板の寸法に若干の変化がみられ、X線検査で燃料芯材端部にドックボーン傾向が確認されたが、これらは過去に行った高濃縮ウラン燃料の解体検査の結果と同様の傾向を示しており、照射による燃料芯材及び被覆材等の異常は認められなかった。また、構造材及び被覆材に使用した耐食性アルミニウム（AG3NE）は材料的に問題がなく、燃料芯材についても芯材中のボイドの有効性が確認された。これらのことから、低濃縮試験燃料要素として製作したウラン密度 2.2g/cm^3 のアルミナド分散型燃料要素の照射健全性は保たれていることが確認された。

謝 辞

本検査を実施するにあたり、打抜き試料の絶対燃焼度測定をお願いした、岡下元分析センタ室長（現財団法人核物質管理センタ）、鈴木敏夫氏（現放射線照射振興協会）、大貫守氏、郡司勝文氏ほか同室員の皆様に感謝の意を表します。

ホットラボにおける照射後試験をお願いした、足立元ホットラボ管理室長（現原子力船解役部長）、鈴木紘氏（現HTTR計画室）、松島秀夫氏（現放射線照射振興協会）、園部清美氏（現ホット試験室）、伊藤忠春氏ほか同室員の皆様に感謝の意を表します。

照射後試験結果、特に電子顕微鏡検査内容と評価について、貴重な御助言を頂きました渡辺齊氏（現原子燃料工業株式会社）に感謝の意を表します。

本報告書をまとめるにあたり、御指導、御助言を頂きました白井研究炉部長、大西研究炉部次長に深謝致します。

参考文献

- 1) 高柳弘, 島敬二郎, 山原武;"JRR-2 使用済燃料の解体検査 (I)", 私信
- 2) 高柳弘, 足立守, 松野見爾他;"JRR-2 使用済燃料の解体検査 (II)", 私信
- 3) 足立守, 内山順三, 佐藤博他;"JRR-2 使用済燃料の解体検査 (III)", 私信
- 4) 足立守, 近藤真, 内山順三他;"JRR-2 使用済燃料の解体検査 (IV)", 私信
- 5) 佐藤博, 近藤真, 内山順三他;"JRR-2 使用済燃料の解体検査 (V)", 私信
- 6) 研究炉管理部;"研究炉・ホットラボの運転と技術管理", JAERI-M 87-146 (1987)
- 7) 研究炉管理部;"研究炉・ホットラボの運転と技術管理", JAERI-M 88-211 (1988)
- 8) 研究炉管理部;"研究炉・ホットラボの運転と技術管理", JAERI-M 89-136 (1989)
- 9) 研究炉管理部;"研究炉・ホットラボの運転と技術管理", JAERI-M 90-166 (1990)
- 10) 佐藤博, 近藤真, 白井英次: 日本原子力学会, 平成元年度 年会
- 11) 近藤真, 佐藤博, 白井英次: 日本原子力学会, 平成元年度 年会
- 12) 鈴木敏夫, 大貫守, 園部保他;"研究炉・試験用原子炉燃料の燃焼率測定", 私信

1. Parallelism of side plate for total length shall be 0.25mm Max.
Location tolerances of side plates shall be 0.25 mm Max.
2. Edges shall be chamfered unless otherwise specified
3. General tolerance shall follow the drawing 1391-0599

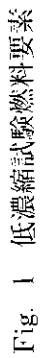


Table 1 低濃縮試験燃料要素の仕様

項 目	仕 様
濃 縮 度 (%)	19.75
燃 料 要 素 形 状	MTR 型
燃 料 板 枚 数	16(内板14, 外板2)
燃 料 芯 材	U A ℓ x - A ℓ 分散
U 含 有 量 (g)	1,028
²³⁵ U 含 有 量 (g)	203
芯 材 厚 さ (mm)	0.89
被 覆 材 厚 さ (mm)	0.38
流 路 厚 さ (mm)	2.95
芯 材 ウ ラ ン 密 度 (g/cm ³)	2.2
芯 材 ウ ラ ン 重 量 比 (w/o)	49
外 形 (mm)	76.2×76.2×950
芯 材 長 さ (mm)	600
芯 材 幅 (mm)	61.4
燃 料 板 厚 さ (mm)	1.65
燃 料 板 長 さ (mm)	内板 625, 外板 725
燃 料 板 幅 (mm)	71.4
ア ル ミ ニ ウ ム 地 金	ア ル ミ ニ ウ ム A5NE
ウ ラ ン ・ ア ル ミ ニ ウ ム 合 金	U A ℓ ₃ ・ U A ℓ ₄
ア ル ミ ニ ウ ム 粉 末	ア ル ミ ニ ウ ム A5NE
被 覆 材 ・ 額 縁 材	ア ル ミ ニ ウ ム 合 金 AG3NE
側 板	"
上 部 ア ダ プ タ	"
下 部 ア ダ プ タ	"
コ ー ム	"
コ ー ム ピ ン	"
溶 接 棒	"

燃 料 要 素 番 号		C D E 0 1
照射前	ウ ラ ン 量 (g)	1,032.43
	ウラン-235 量 (g)	203.91
	燃 焼 度 (%)	19.75
照射後	ウ ラ ン 量 (g)	957.97
	ウラン-235 量 (g)	119.14
	プルトニウム量 (g)	2.64
装 荷 日		・ 59.9.12
取 出 し 日		・ 61.5.13
照射サイクル数		21
積 算 出 力		1,553
計 算 燃 焼 度 (%)		41.6
炉 心 装 荷 位 置		1 C

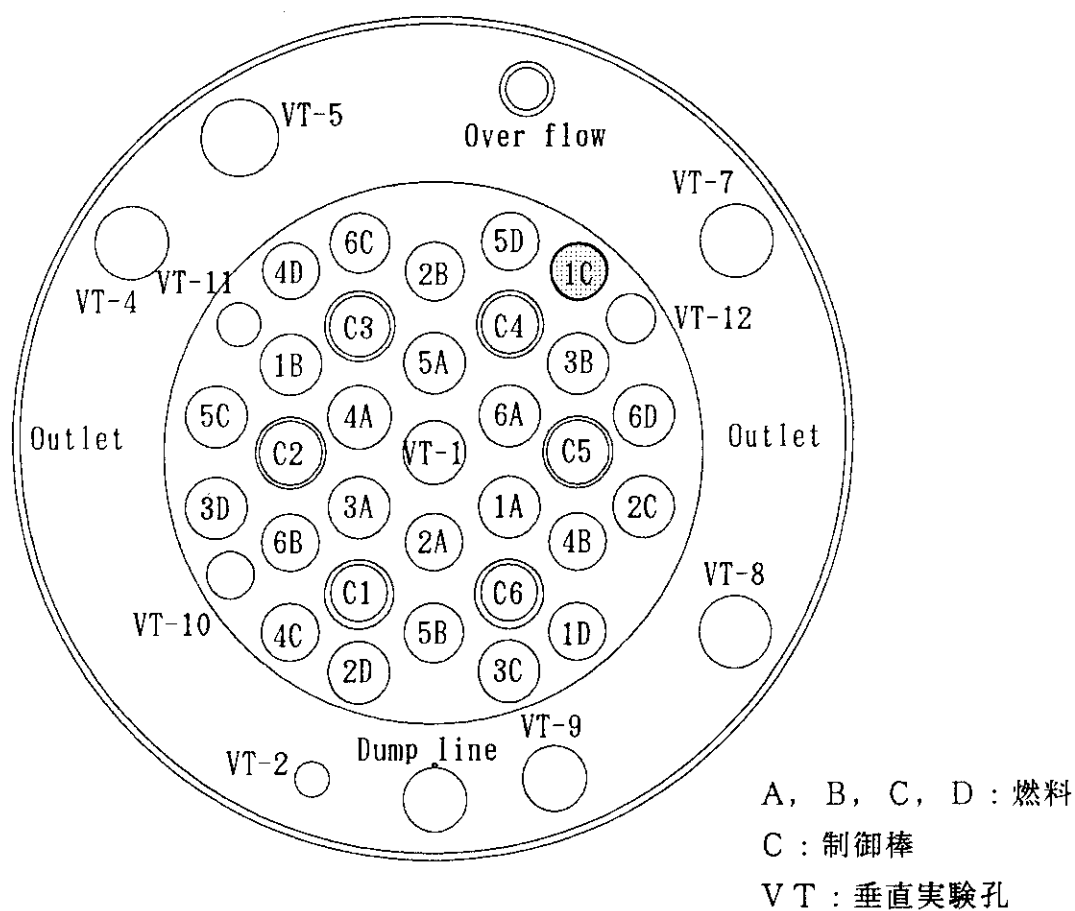


Fig. 2 低濃縮試験燃料要素の照射履歴及び炉心装荷位置

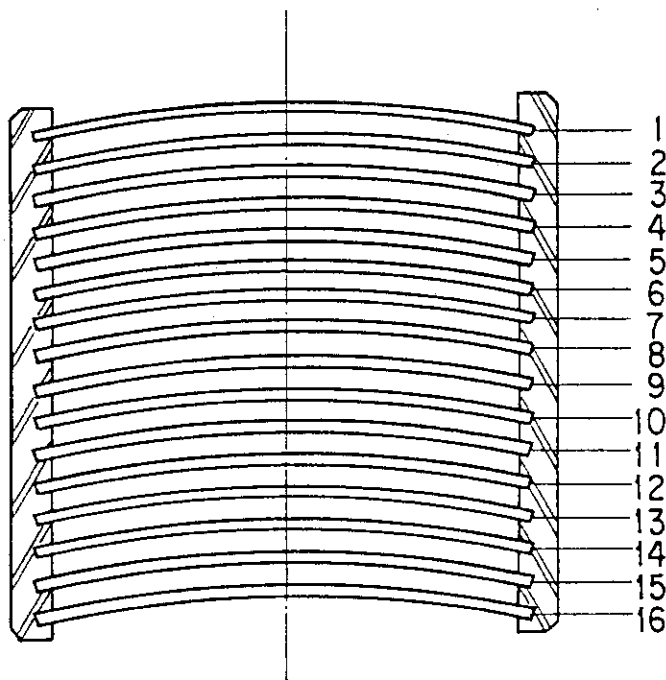
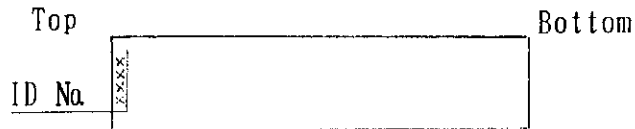
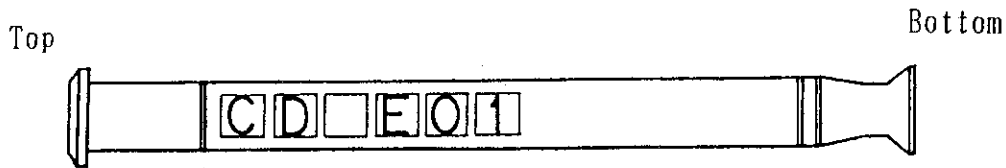


Plate No.	ID No.
1	34Y2E010
2	33Y1I101
3	33Y1I103
4	33Y1I104
5	33Y1I106
6	33Y1I108
7	34Y1I110
8	34Y2I113
9	34Y2I117
10	34Y2I118
11	34Y2I120
12	34Y3I123
13	34Y3I124
14	34Y3I125
15	34Y3I126
16	34Y2E008

1. 燃料板は原則として I D No. で管理し、燃料板外観検査終了後は呼称番号 (Plate No.) で管理する。
2. 燃料板 No. 1 及び No. 16 は、上部アダプタ切断により I D No. が切除されるので、凸面 Top 側に呼称番号を付ける。

Fig. 3 低濃縮試験燃料要素の燃料板呼称詳細

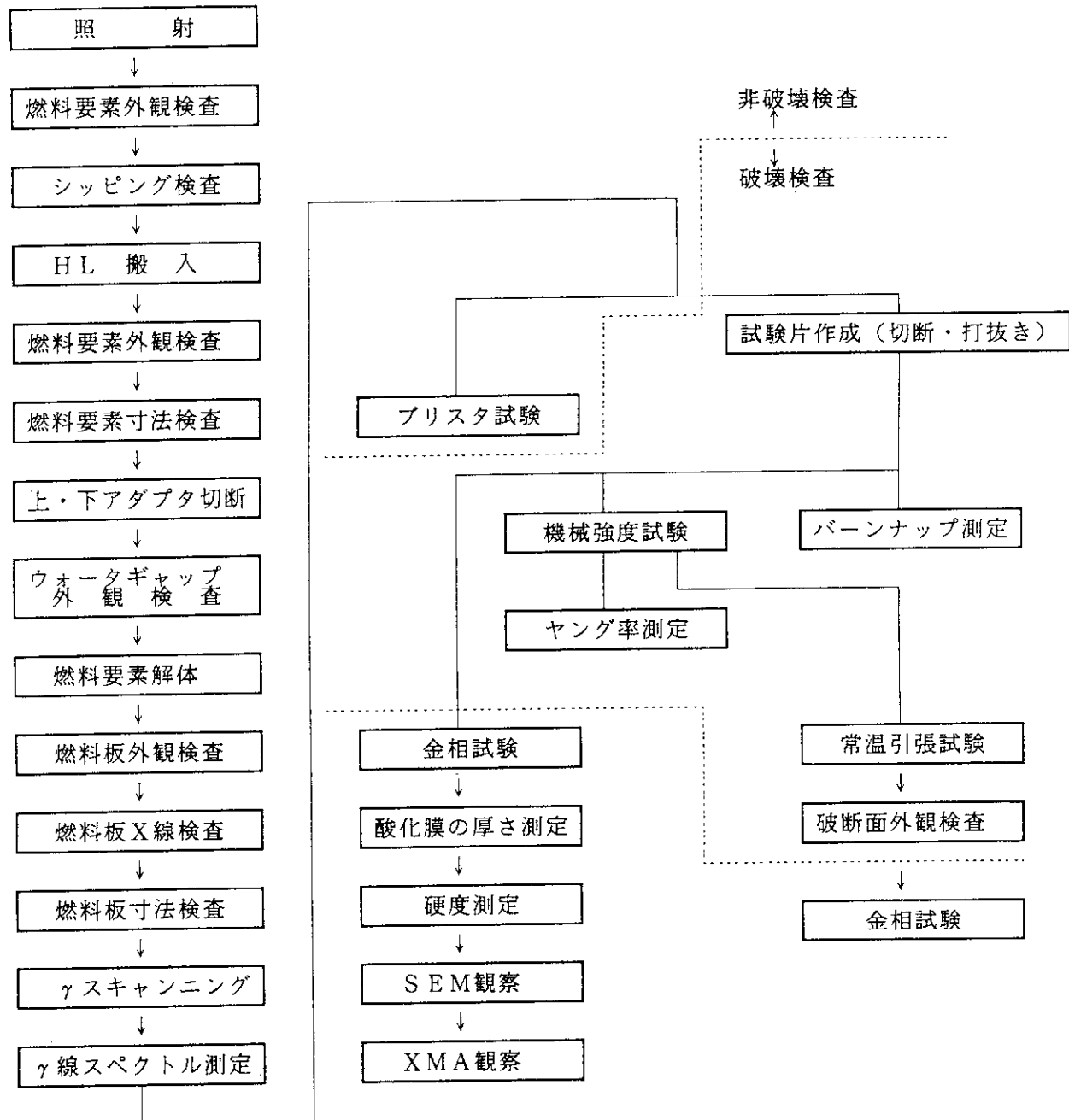


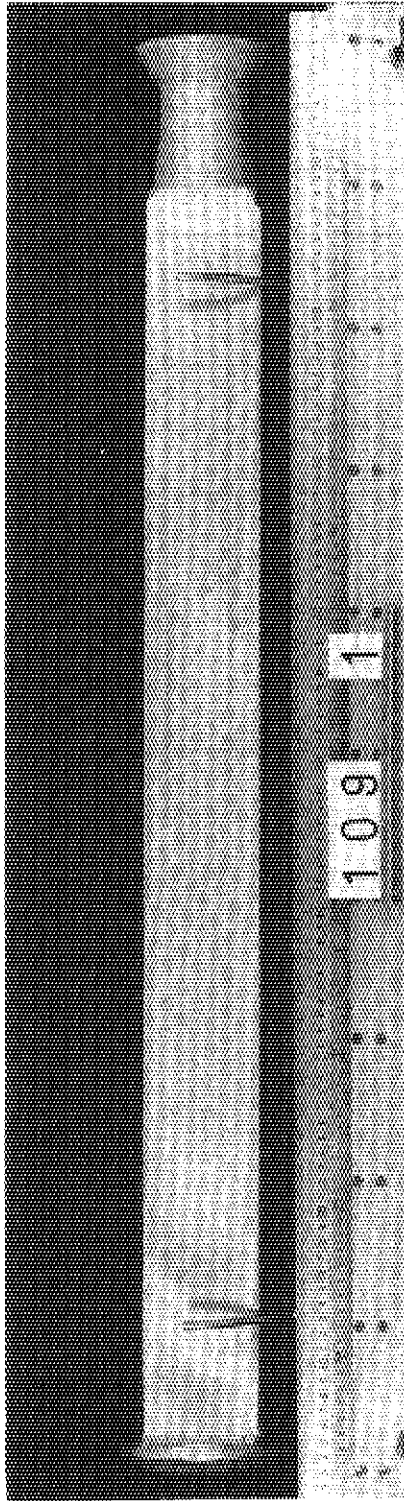
Fig. 4 照射後試験の流れ

Table 2 低濃縮試験燃料要素の燃料板の照射後試験

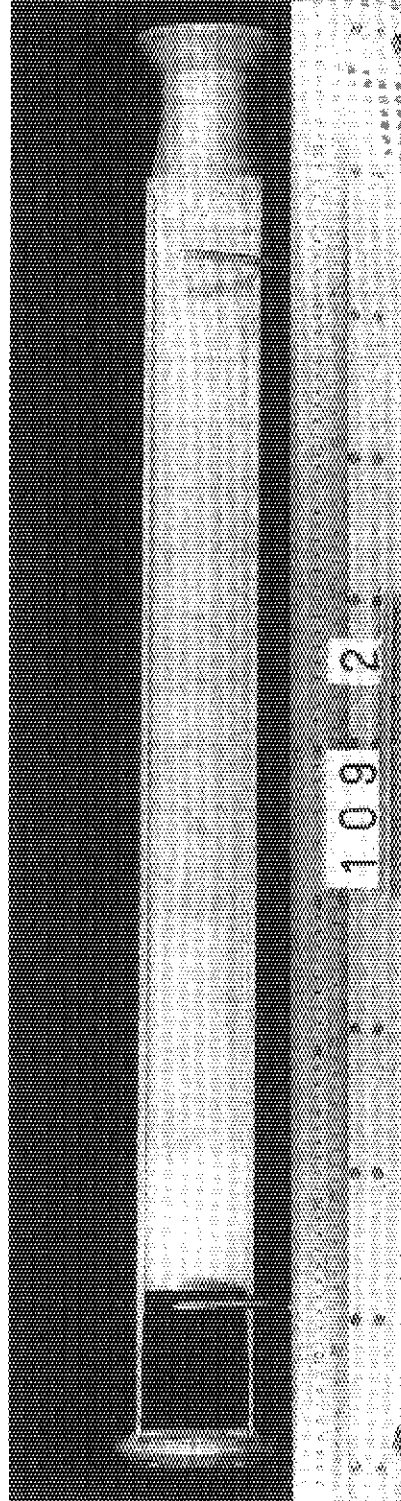
燃料板番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
外 観	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
X 線	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
寸 法	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
γ スキャン	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
金 相		○	●		○				○			●				
B. U		○							○							
引張り				○						○				○		
ヤング率						○					○					
硬 度		○			○				○							
S E M		○			○	○			○							
X M A		○			○	○			○							
ブリスタ			○				○									

●：ブリスタ試験の結果及び燃料芯材端部のドックボーン状態確認のため追加試験を行った燃料板を示す。

Bottom



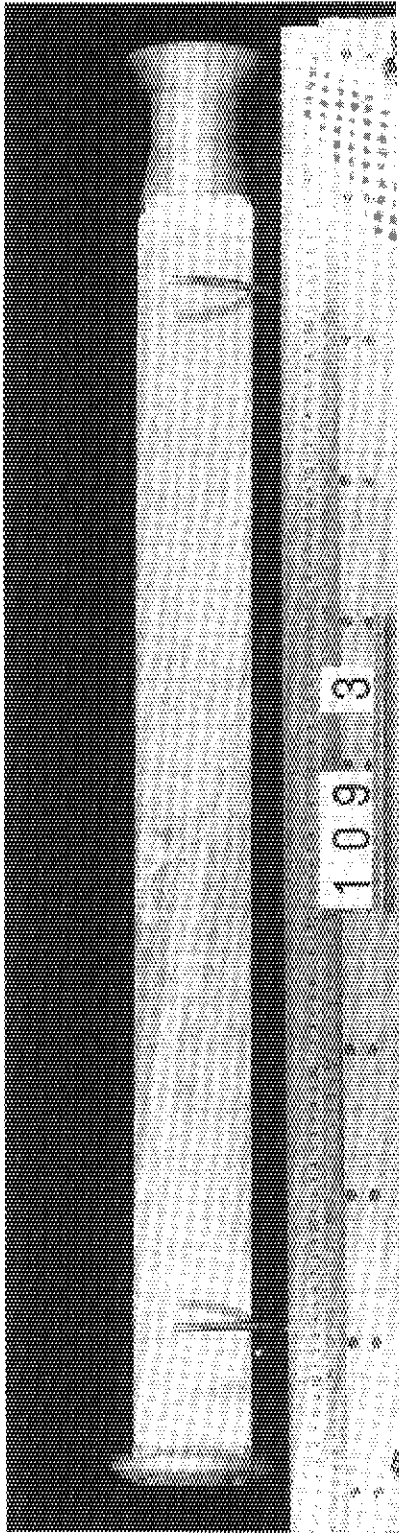
Top



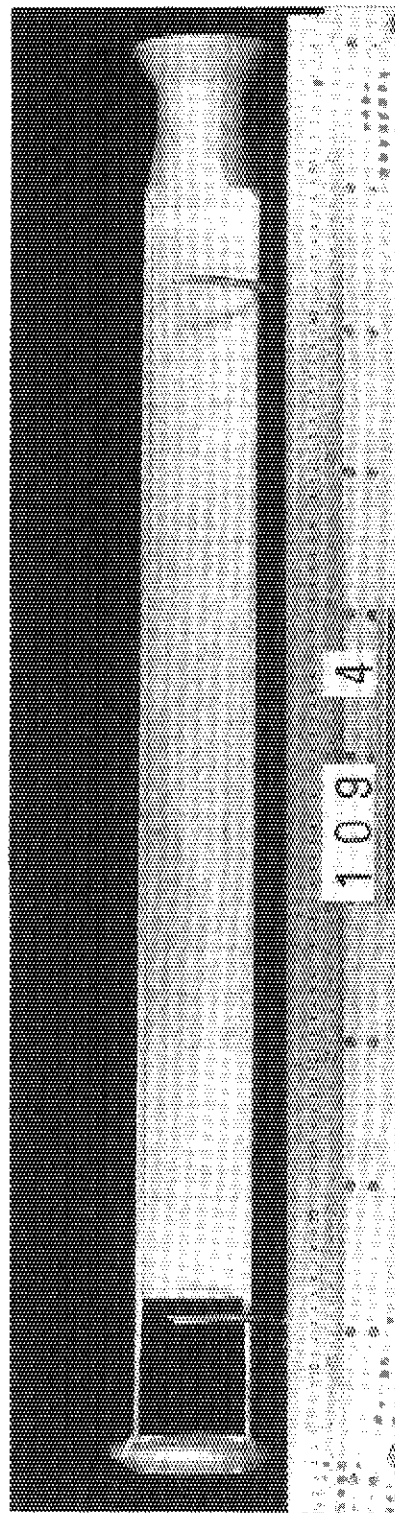
燃料板No. 1 凸面

Fig. 5 燃料要素の外観写真

Top

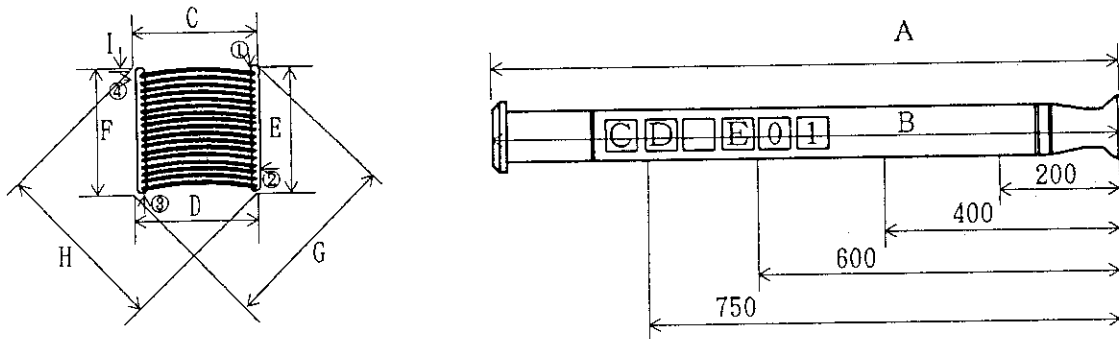


Bottom



燃料板No.16凹面

Fig. 6 燃料要素の外観写真



(単位 : mm)

測定位置	製作値 *	測定値	変化量
A	949.68	950.00	+0.32
B		949.83	+0.15

(単位 : mm)

測定位置	製作値 *	測定値					変化量
		200	400	600	750	平均値	
C	76.15	76.26	76.22	76.24	76.22	76.24	0.09
D	76.15	76.19	76.24	76.20	76.22	76.21	0.06
E	76.15	76.19	76.22	76.23	76.19	76.21	0.06
F	76.15	76.21	76.22	76.23	76.27	76.23	0.08
G	106.1	106.29	106.27	106.20	106.18	106.24	
H	~106.2	106.09	106.16	106.19	106.17	106.15	
①	—	76.22	76.21	76.22	76.23	—	0.02 * ¹
②	—	76.16	76.22	76.20	76.18	—	0.06 * ¹
③	—	76.19	76.21	76.22	76.22	—	0.03 * ¹
④	—	76.21	76.25	76.23	76.25	—	0.04 * ¹

①～④については、定盤上で燃料要素のねじれ、たわみ等の測定を行ったものである。

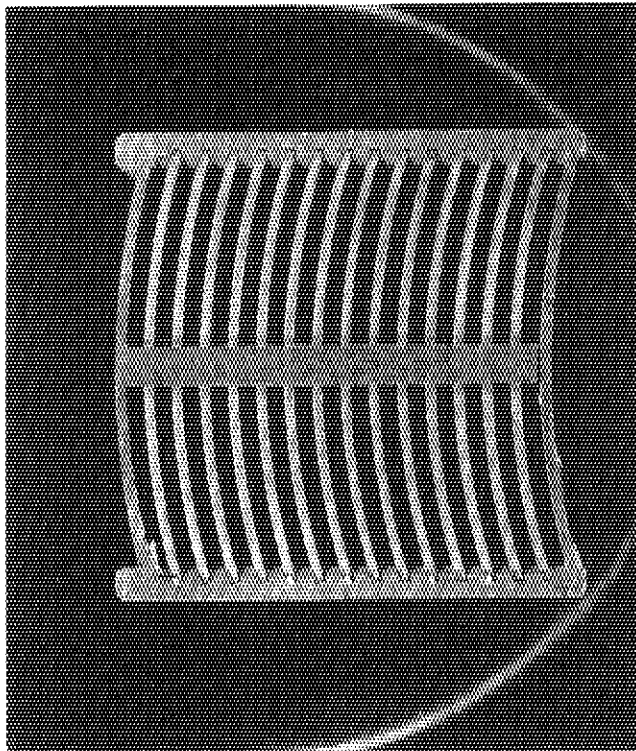
(単位 : mm)

測定位置	製作値 *	測定値						
		50	100	150	200	250	300	350
I	0.12 0.22	0.22	0.13	0.11	0.12	0.13	0.11	0.08
		400	450	500	550	600	650	700
		0.07	0.05	0.05	0.07	0.07	0.15	0.10

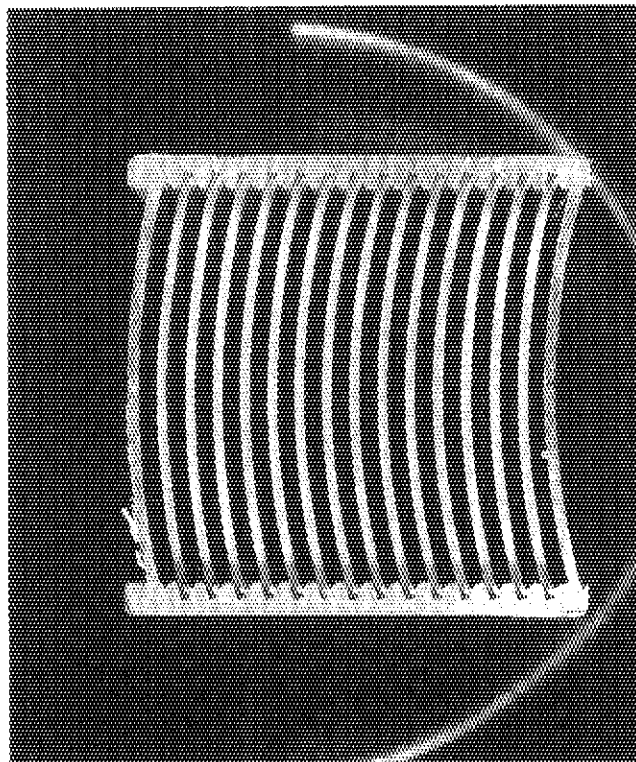
* : 製作値は原研立会値であり、立会いのないものについては CERCA社の測定値を採用した。

*¹ : 変化量は、最大値－最小値を示す。

Fig. 7 燃料要素の寸法測定結果



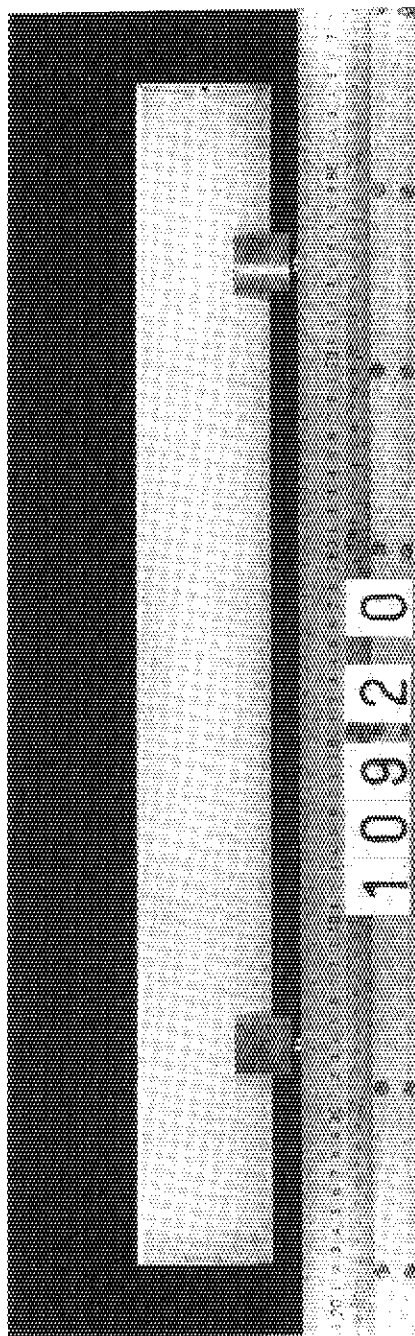
下部（冷却水入口側）



上部（冷却水出口側）

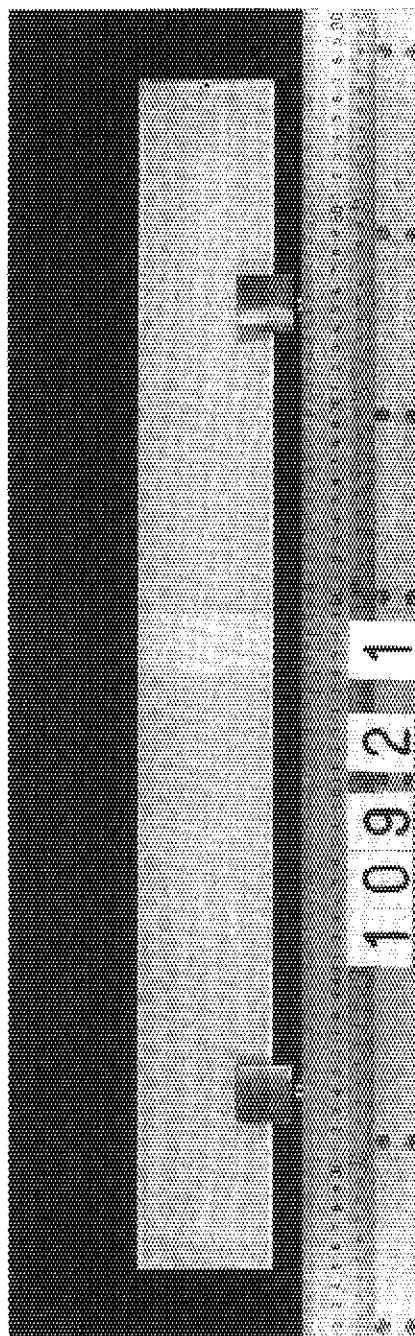
Fig. 8 ウォータギャップ外観写真

Bottom



凸面

Top



凹面

Fig. 9 燃料板No. 2 の外観写真

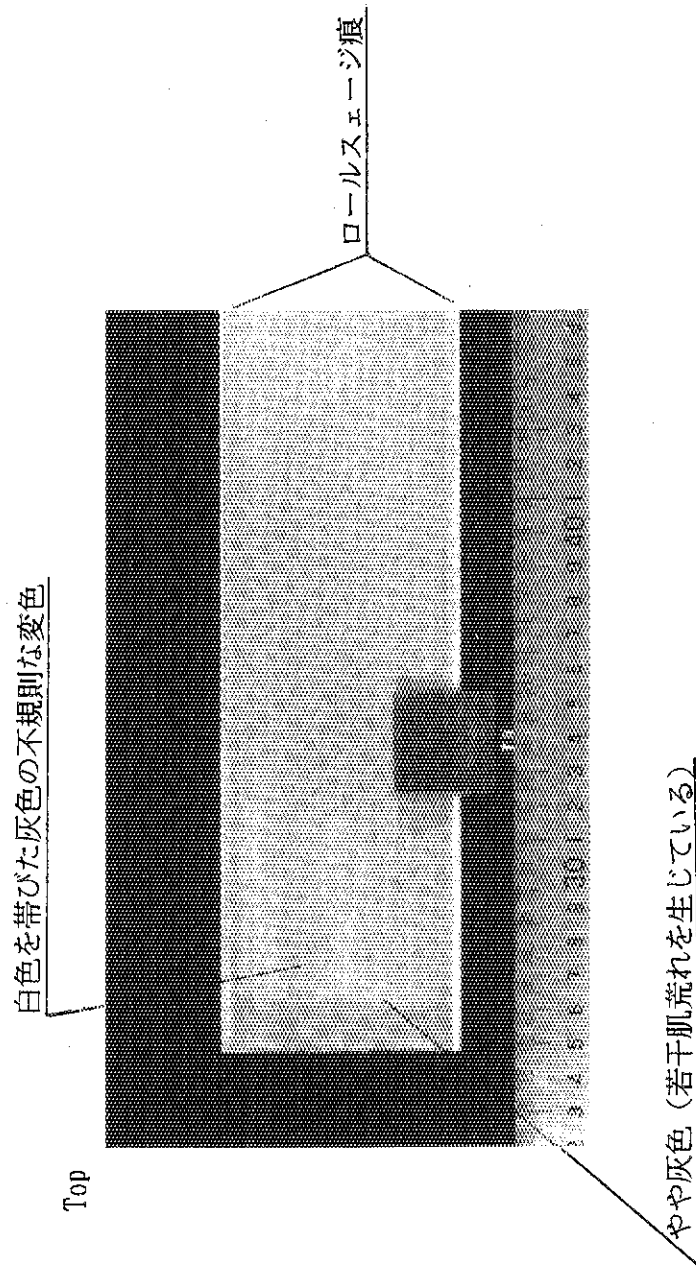
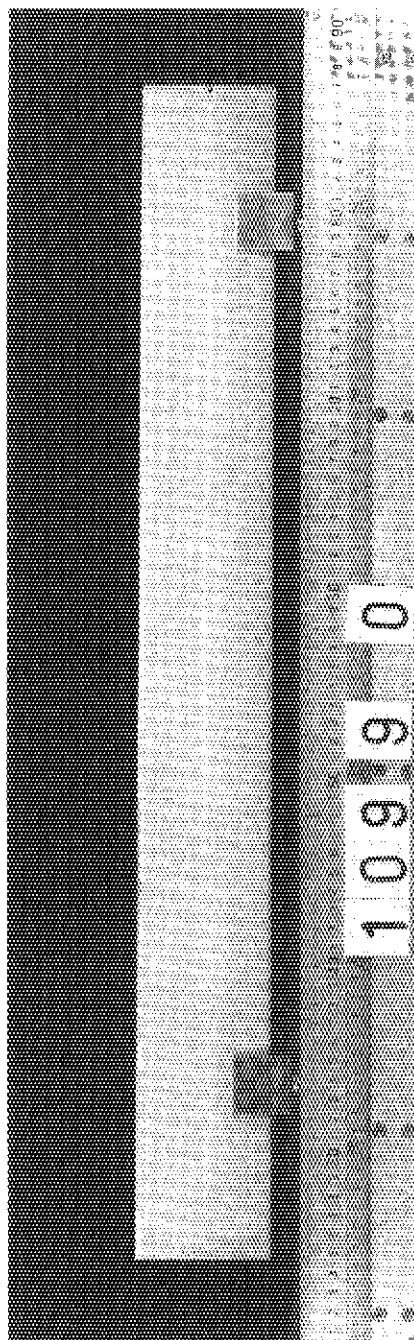


Fig. 10 燃料板No. 2 凹面上側の拡大写真

Top



凸面

凹面

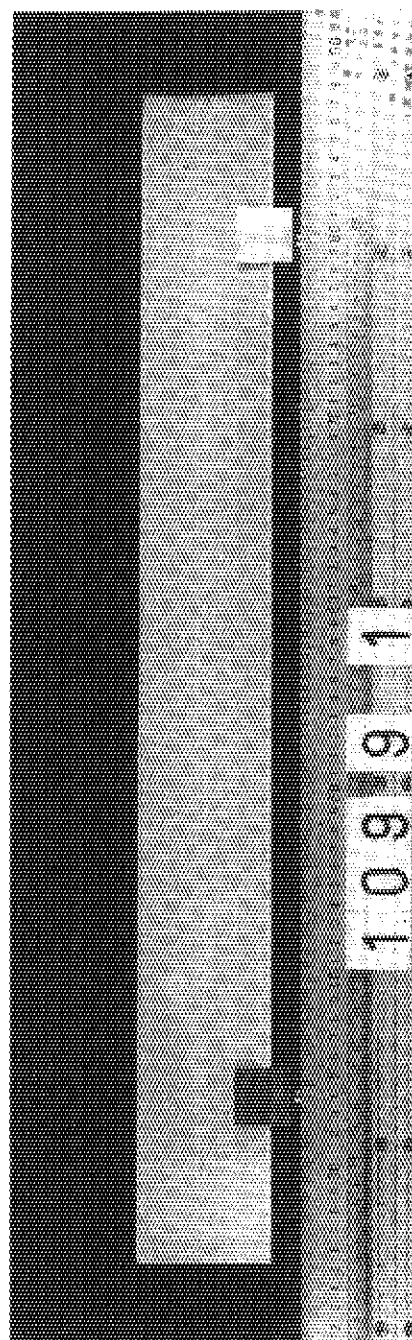
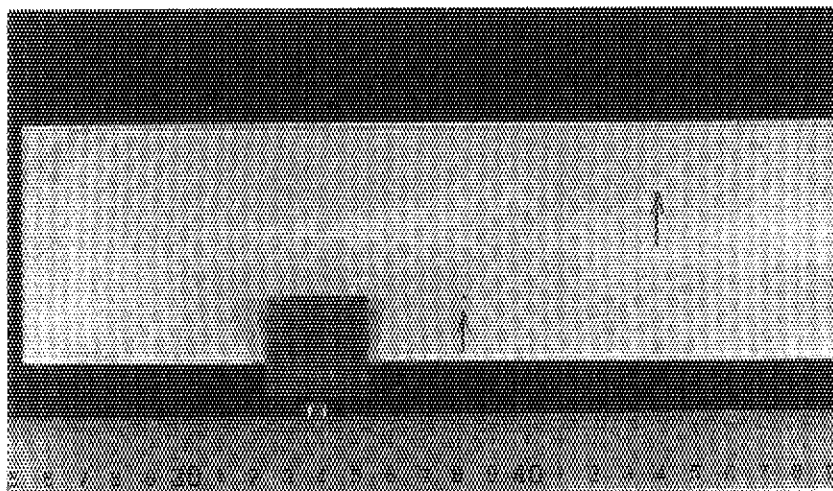
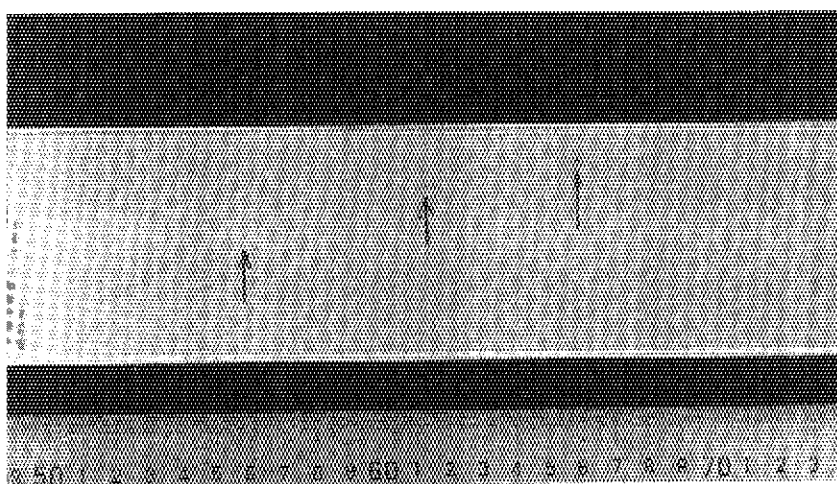


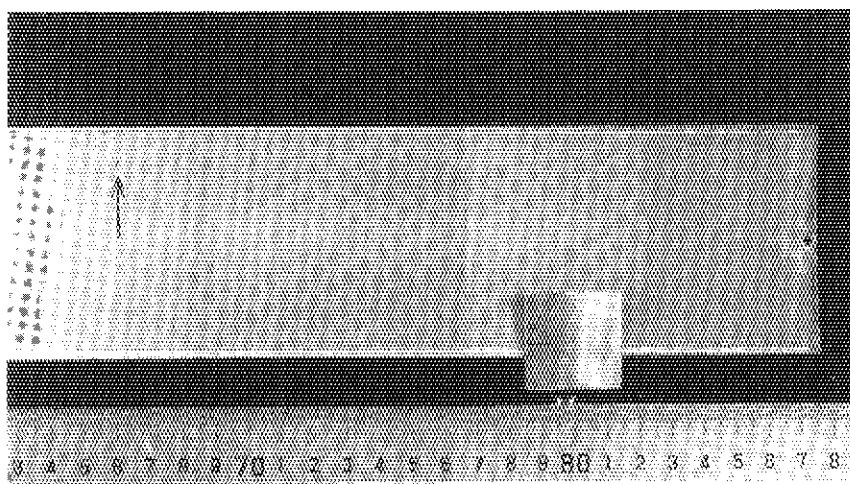
Fig. 11 燃料板No. 9の外観写真



上部拡大



中央部拡大

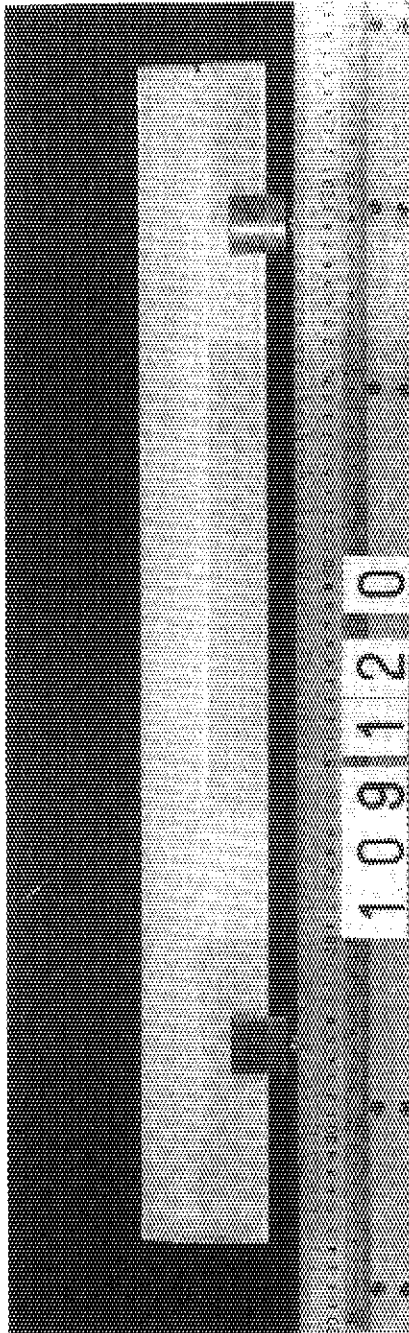


下部拡大

矢印が斑点を示す

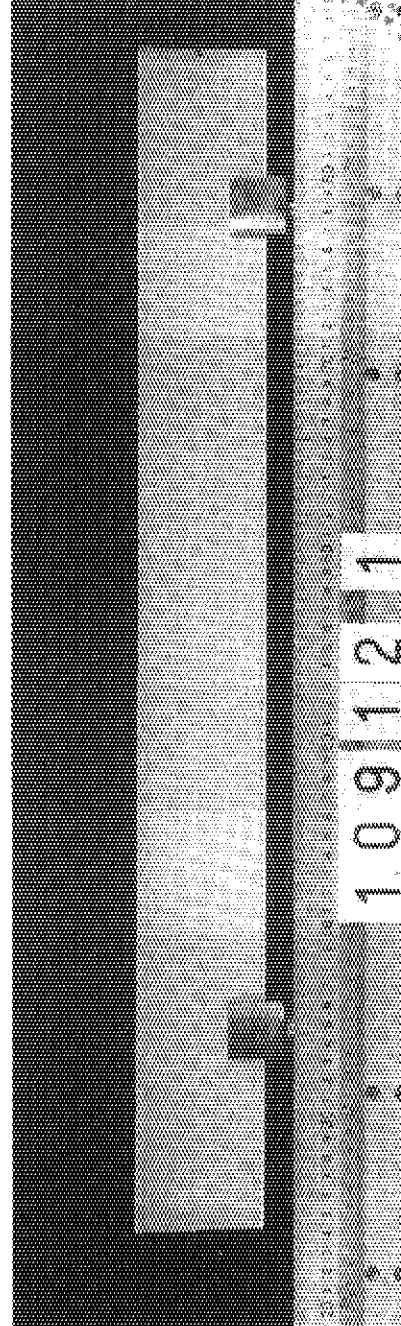
Fig. 12 燃料板No. 9 凹面の拡大写真

Bottom



凸面

Top



凹面

Fig. 13 燃料板No. 120の外観写真

123

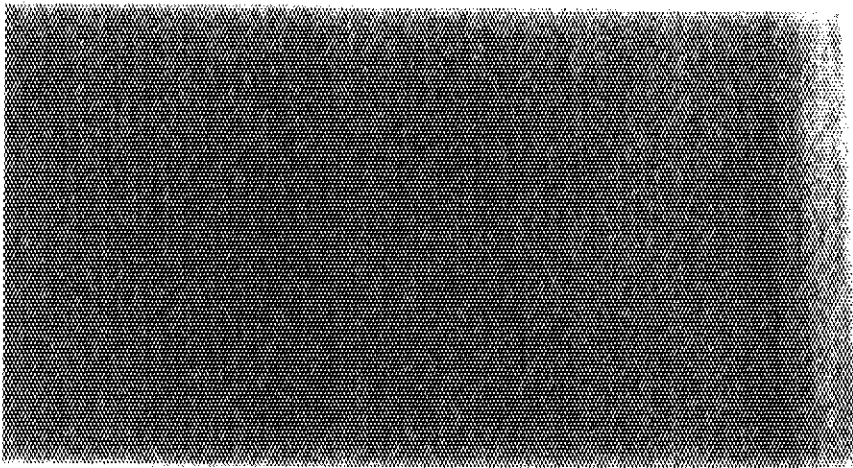
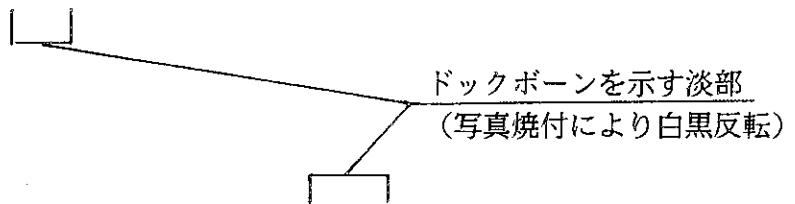
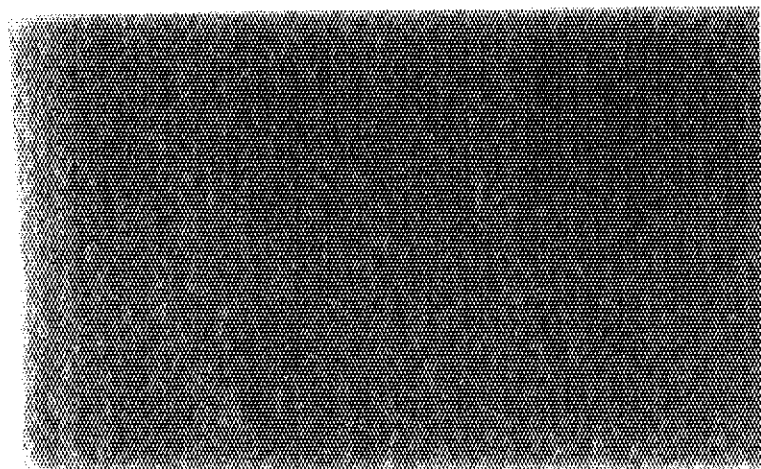


Fig. 14 燃料板No. 12のX線写真 (照射後)

Table 3 ブリスタ試験装置の概略仕様

(1) 電気炉

- ① 形 式 : 横型 管状炉
- ② 発 熱 体 : カンタル A 1 3 回路分割巻
- ③ 温 度 範 囲 : 300 ~ 700℃ (常用 300~550 ℃)
- ④ 温 度 精 度 : ± 1 %以内 (常用温度)
- ⑤ 温 度 制 御 : 3ゾーン P.I.D 制御
- ⑥ 昇 温 時 間 : 3 0 分
- ⑦ ヒ ー タ 定 格 : A C 2 0 0 V 3 相 2 0 A

(2) ガス捕集装置

- ① スイープガス : 乾燥空気 流量 1.5~1.7 ℓ/min
- ② 電 離 箱 : ガス用、内容積 1.5ℓ 大倉電気 1-40501型
- ③ エレクトロメータ : 振動容量型、タケダ理研 TR-8411型
- ④ 記 録 計 : Y.E.W 3056型
- ⑤ ミニポンプ : 柴田科学 MP-2 型
- ⑥ フローメータ : 柴田科学 TM-320 型 0~2.0 ℓ/min

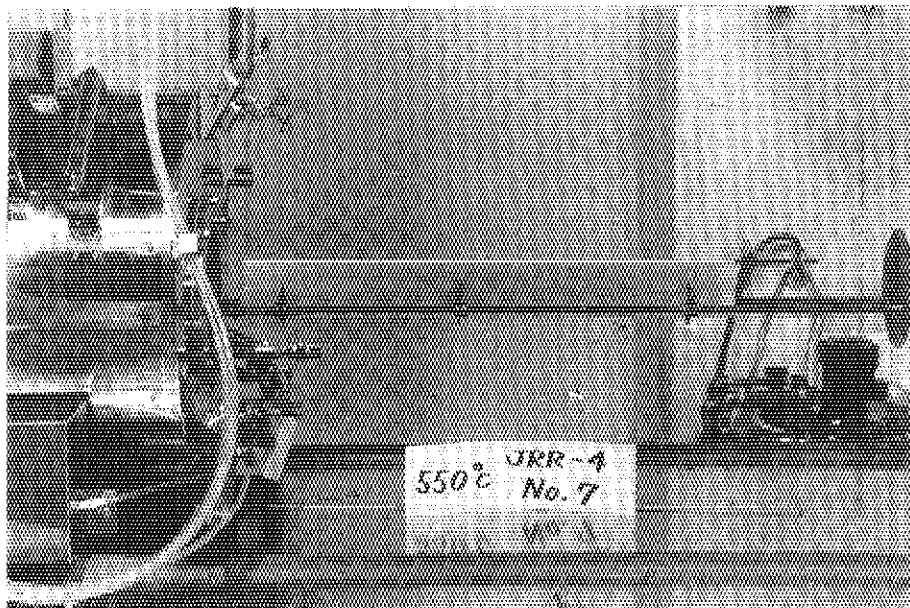


Fig. 15 ブリスタ試験状況

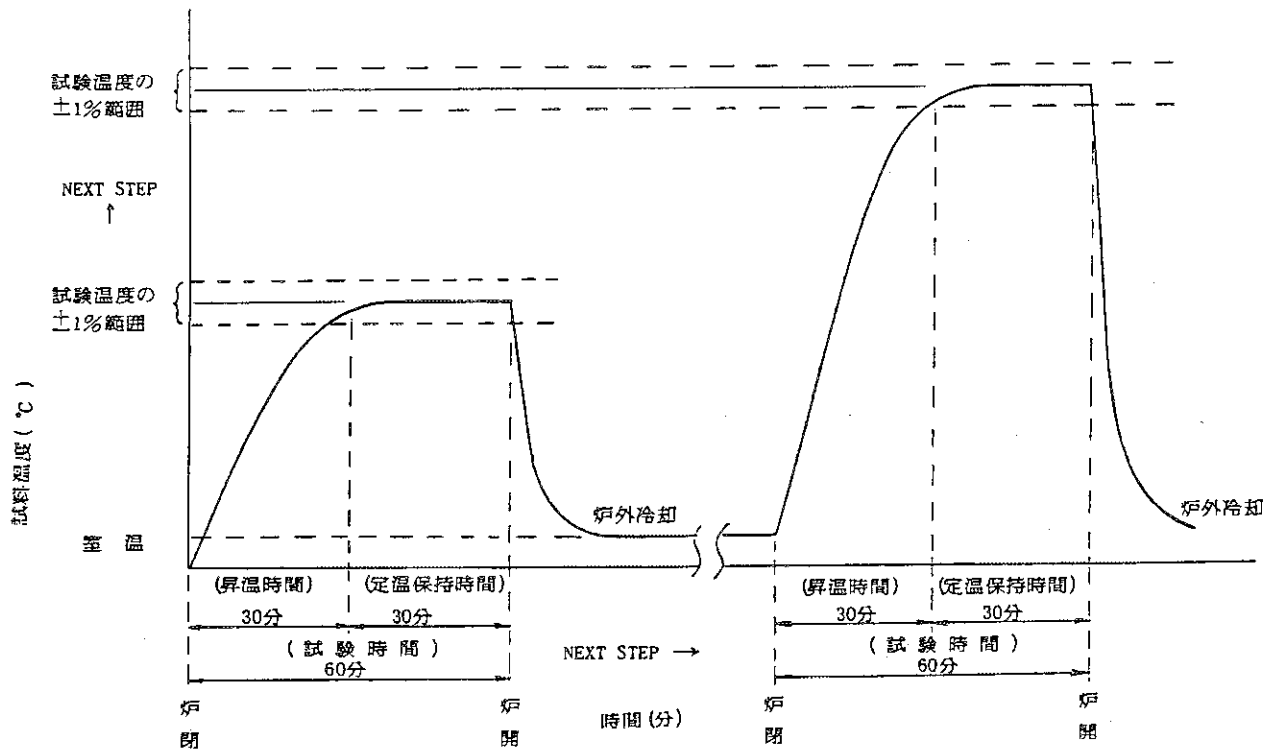


Fig. 16 プリスタ試験昇温加熱サイクル

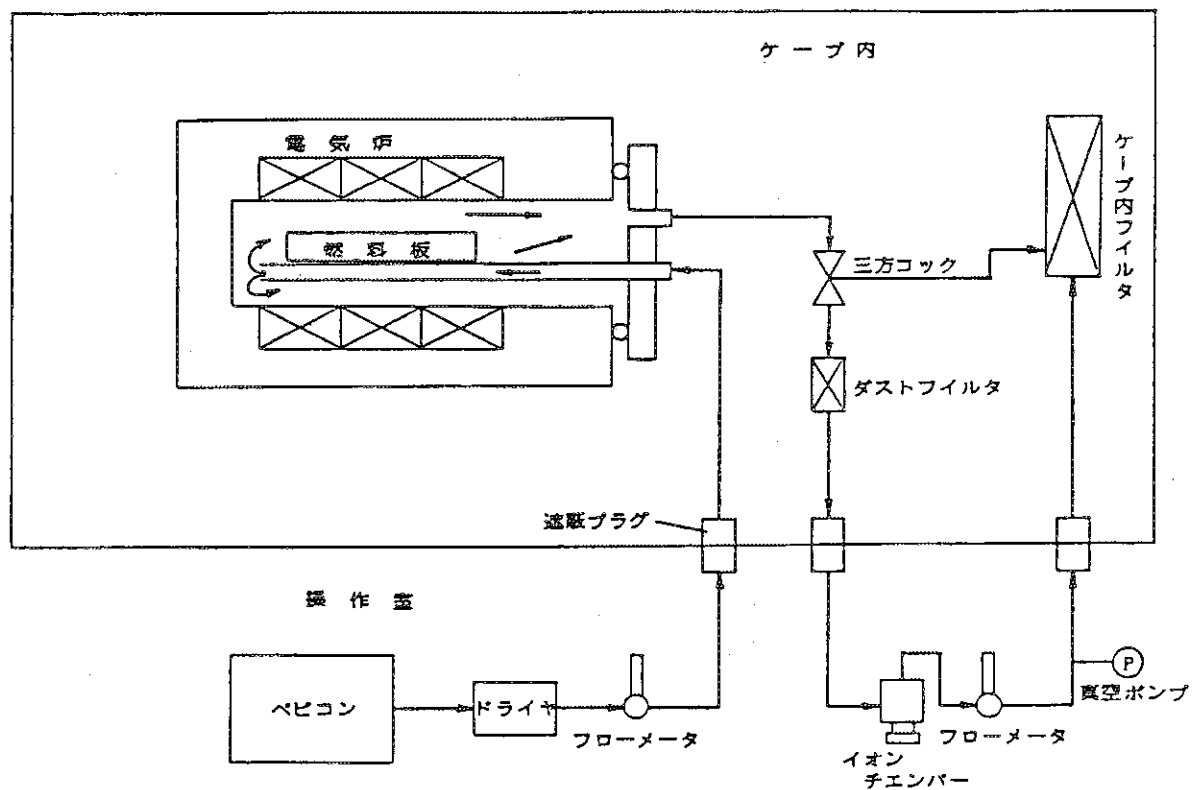


Fig. 17 F Pガス補修フローチャート

Bottom

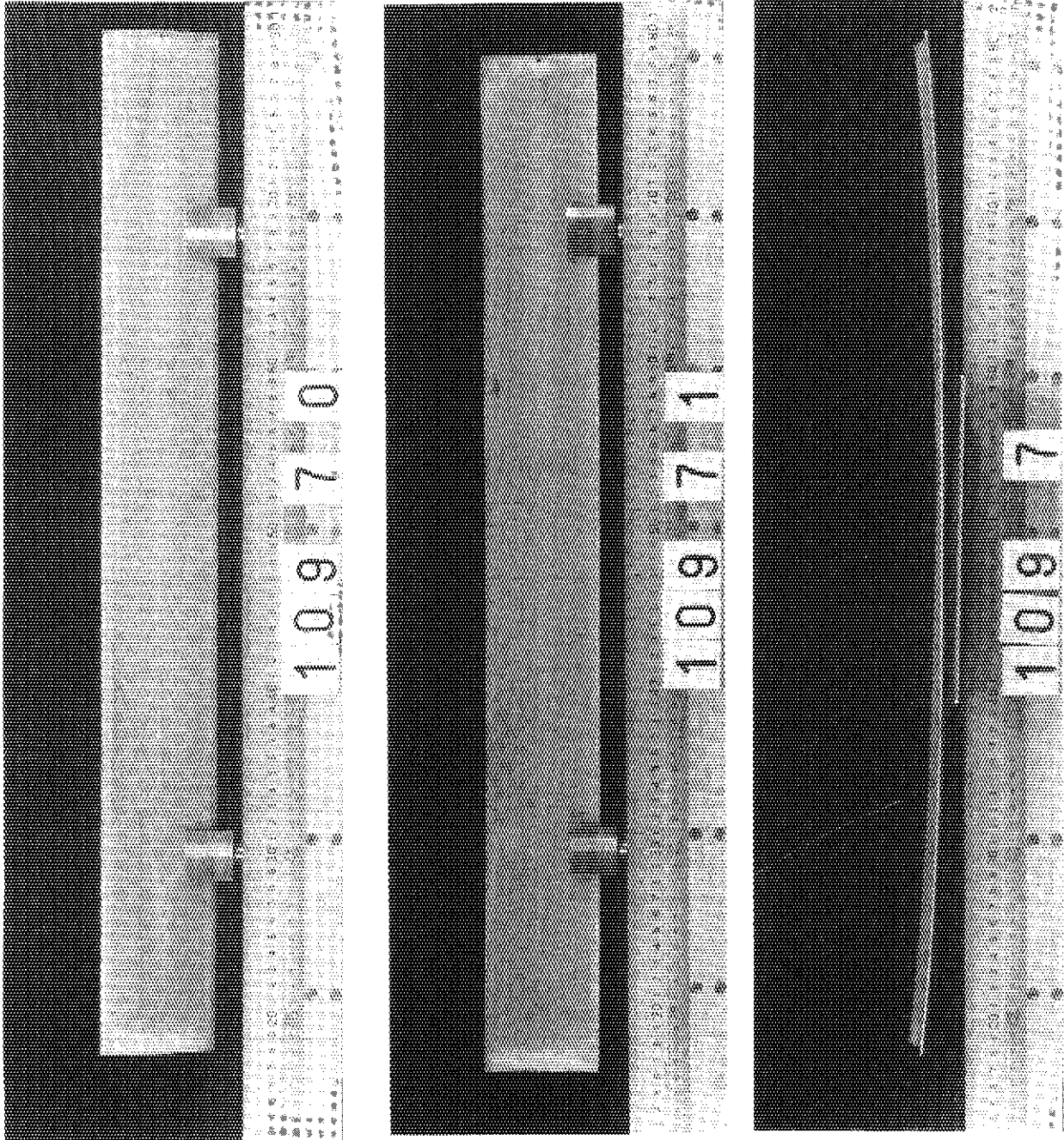


Fig. 18 燃料板No. 7 のブリストタ後の外観写真 (550°C)

Top

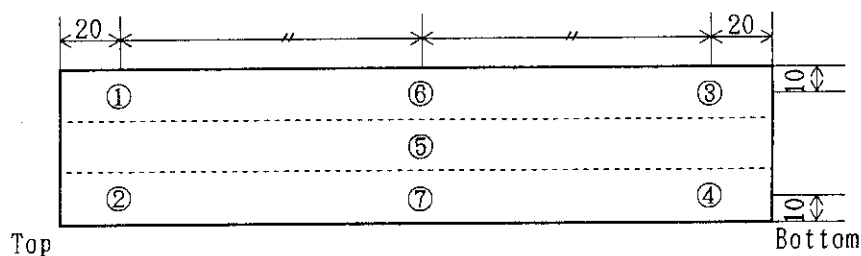
Table 4 プリスタ試験における燃料板板厚測定結果

(単位: mm)

燃料板 番 号	測定点	製作値	照射後 板 厚	加 熱 温 度 (°C)						最 終 変化量
				350	450	475	500	525	550	
No. 3	①	1.67	1.71	1.71	1.76	1.76	1.76	1.76	1.75	+0.04
	②	1.67	1.72	1.71	1.75	1.73	1.73	1.80	1.75	+0.03
	③	1.68	1.72	1.73	1.84	1.77	1.86	1.83	1.74	+0.02
	④	1.68	1.73	1.72	1.82	1.72	1.76	(2.00)	(1.87)	+0.14
	⑤	1.69	1.73	—	—	—	—	—	—	—
	⑥	—	1.72	1.69	1.70	1.72	1.70	1.73	1.73	+0.01
	⑦	—	1.75	1.69	1.71	1.73	1.71	1.73	1.73	-0.02
No. 7	①	1.67	1.70	1.70	1.79	1.77	1.77	1.76	1.65	-0.05
	②	1.67	1.71	1.70	1.73	1.73	1.78	1.76	1.73	+0.02
	③	1.68	1.71	1.72	1.86	1.80	1.85	1.82	1.88	+0.17
	④	1.68	1.72	1.72	1.81	1.74	1.83	1.79	1.79	+0.07
	⑤	1.68	1.72	—	—	—	—	—	—	—
	⑥	—	1.70	1.68	1.73	1.74	1.77	1.73	1.74	+0.04
	⑦	—	1.72	1.69	1.72	1.73	1.75	1.72	1.75	+0.03

1. 測定位置は、下図による。
2. 最終変化量は、550°C測定値－照射後板厚で示す。
3. 製作値は、湾曲前の測定値を示す。
4. 測定点⑤は、加熱による変形のため測定不可能であり、肉厚測定用ダイヤルキャリパにより⑥、⑦の測定を行った。
5. 燃料板No. 3の測定点④(525 °C, 550°C)は、燃料板の変形により測定点が額縁部に移動している。

板厚測定位置図



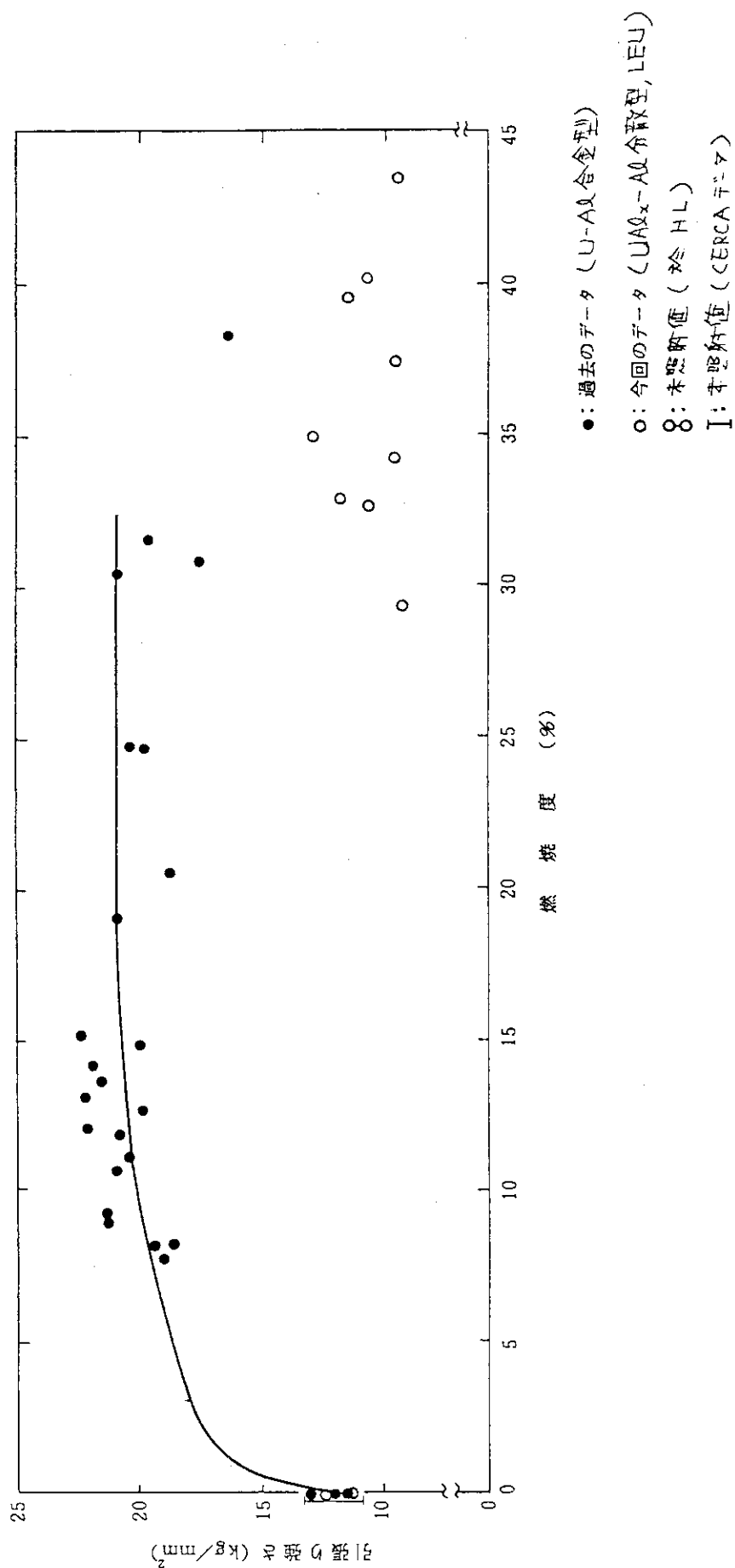


Fig. 19 燃焼度による引張り強さの変化

試料 No.	109
試験年月日	62年 5月 15日
試料番号	7
試験温度	R.T (21) (°C)
引張(圧縮)速度	0.5 (mm/min)
Load(荷重) F-S	50.0 (kg/20cm)
Def.(変位) F-S	2.5 (mm/20cm)
破断位置(S)	A B C

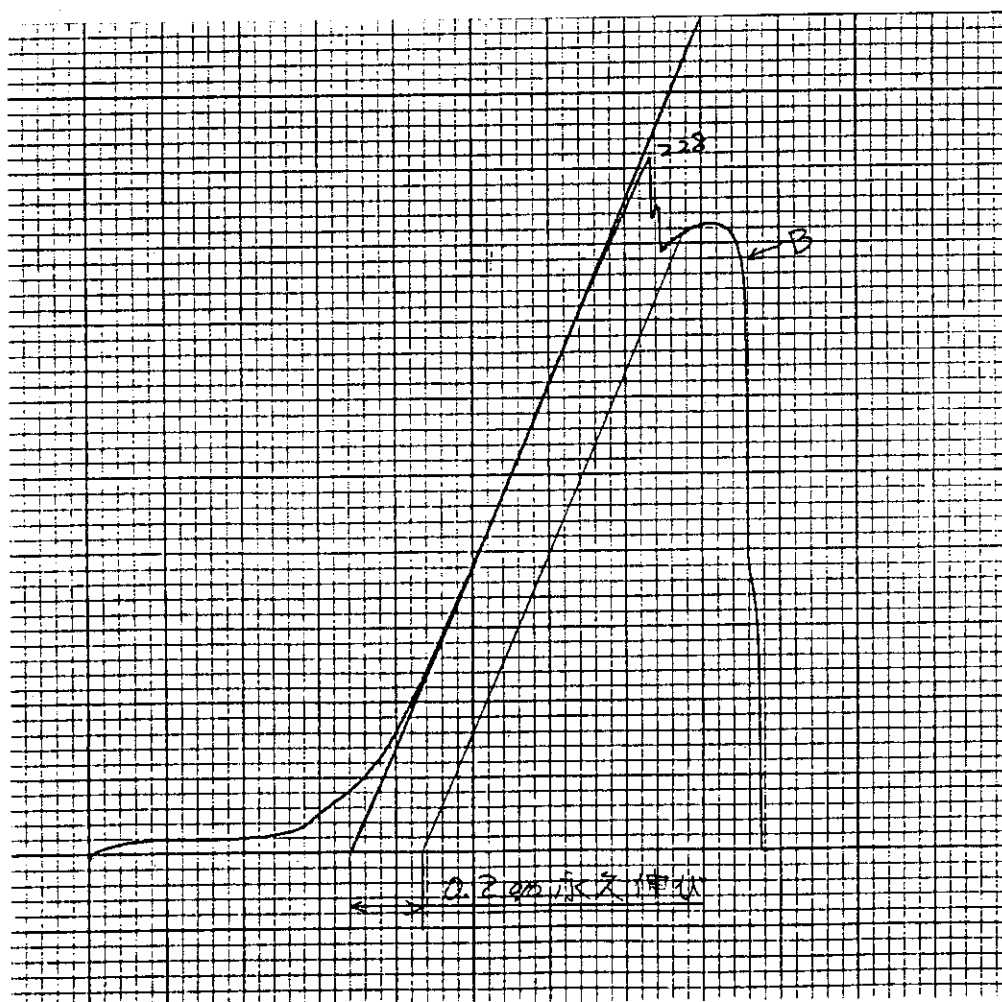


Fig. 20 燃料板No. 14 (試験片 A) の荷重-変位曲線

Table 5 引張試験結果

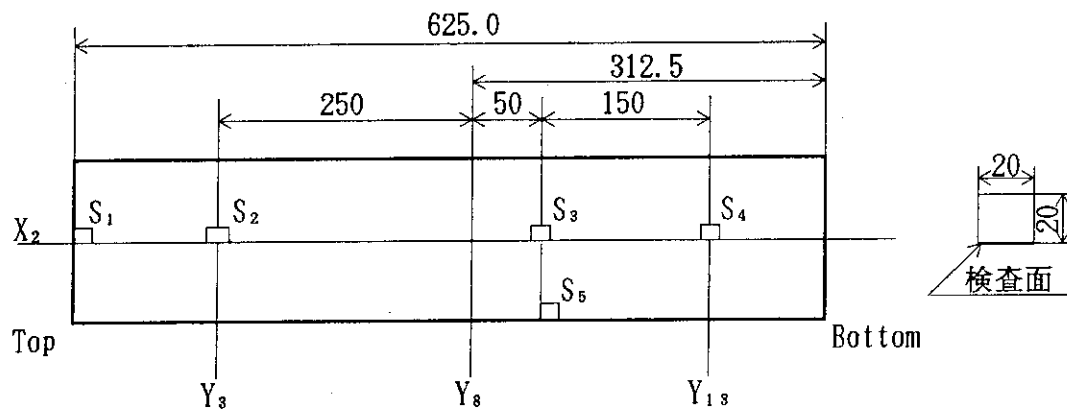
試験片番号		燃焼度 ¹⁾ (%)	引張強さ (kg/mm ²)	0.2%耐力 (kg/mm ²)	伸 び (%)	破断位置 ²⁾	備考	
未 照 射	1	0	12.46	9.50	1.1	C	機械加工	
	2	0	11.59	8.58	1.2	C	〃	
	3	0	11.68	9.12	1.2	B	〃	
	6－4	0	11.54	10.04	0.9	C	打抜加工	
	6－5	0	11.44	10.08	0.9	C	〃	
	6－6	0	11.35	9.60	0.9	C	〃	
照 射 後	燃料板No.4	A	34.1	9.72	—	0.4	C	〃
		B	43.4	9.52	—	0.3	C	〃
		C	40.2	10.73	—	0.2	C	〃
	燃料板No.10	A	29.3	9.27	—	0.4	C	〃
		B	37.3	9.69	—	0.3	C	〃
		C	34.9	12.99	—	0.4	B	〃
	燃料板No.14	A	32.6	10.60	—	0.4	C	〃
		B	39.5	11.49	—	0.3	B	〃
		C	32.8	11.84	—	0.4	C	〃

¹⁾ : 燃焼度は、試験片平均実測燃焼度である。²⁾ : 破断点は、JIS Z 2241による。

Table 6 ヤング率測定結果

試験片番号		燃焼度 ¹⁾ (%)	断面積 (mm ²)	応力 (kg/mm ²)	歪	ヤング率 (kg/mm ²)	備考
未 照 射	4	0	20.625	1.2	0.000164	7,317.1	機械加工
	5	0	"	1.9	0.000264	7,197.0	"
	6	0	"	1.9	0.000264	7,197.0	"
	5-1	0	"	2.1	0.000271	7,749.1	打抜加工
	5-2	0	"	1.8	0.000257	7,003.9	"
	5-3	0	"	2.2	0.000294	7,483.0	"
照 射 後	燃料板No.6	A	31.6	21.500	2.1	0.000279	7,526.9
		B	40.5	21.625	3.5	0.000500	7,000.0
		C	37.2	21.500	3.0	0.000414	7,246.4
	燃料板No.11	A	30.1	21.250	2.9	0.000421	6,888.4
		B	37.2	21.250	2.8	0.000400	7,000.0
		C	35.1	21.250	1.4	0.000193	7,253.9

¹⁾ : 燃焼度は、試験片平均実測燃焼度である。



単位:mm

試験片番号		燃焼度 (%)	試験片番号		燃焼度 (%)
No. 2	S ₁	37.7	No. 9	S ₁	32.2
	S ₂	39.9		S ₂	29.4
	S ₃	49.3		S ₃	37.5
	S ₄	45.0		S ₄	35.7
	S ₅	47.2		S ₅	39.8
No. 5	S ₁	36.7			
	S ₂	32.7			
	S ₃	41.6			
	S ₄	39.0			
	S ₅	42.6			

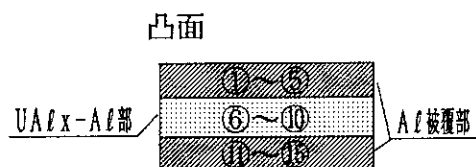
Fig. 21 金相試験片採取位置及び試験片の燃焼度

Table 7 被覆材 (AG3NE) の硬度測定結果 (H_v)

燃料板番号		燃焼度 (%)	燃料芯材部 ⑥～⑩平均	Aℓ被覆部		
				①～⑤平均	⑪～⑮平均	平均
—		0	94.4	51.1	50.8	51.0
No. 2	S ₁	37.7	171.0	62.4	60.8	61.6
	S ₂	39.9	156.6	62.3	63.0	62.7
	S ₃	49.3	189.5	65.7	66.8	66.3
	S ₄	45.0	255.2	64.5	62.4	63.5
	S ₅	47.2	173.3	66.7	65.5	66.1
No. 5	S ₁	36.7	253.8	62.7	62.2	62.5
	S ₂	32.7	241.2	63.1	62.9	63.0
	S ₃	41.6	226.3	64.8	64.9	64.9
	S ₄	39.0	218.1	62.8	62.9	62.9
	S ₅	42.6	141.5	64.0	64.0	64.0
No. 9	S ₁	32.2	181.9	61.3	60.5	60.9
	S ₂	29.4	212.1	62.1	61.1	61.6
	S ₃	37.5	159.6	64.2	63.4	63.8
	S ₄	35.7	233.9	62.8	61.4	62.1
	S ₅	39.8	270.3	65.3	64.2	64.8

H_v : ビッカース硬度

燃焼度 : 実測値



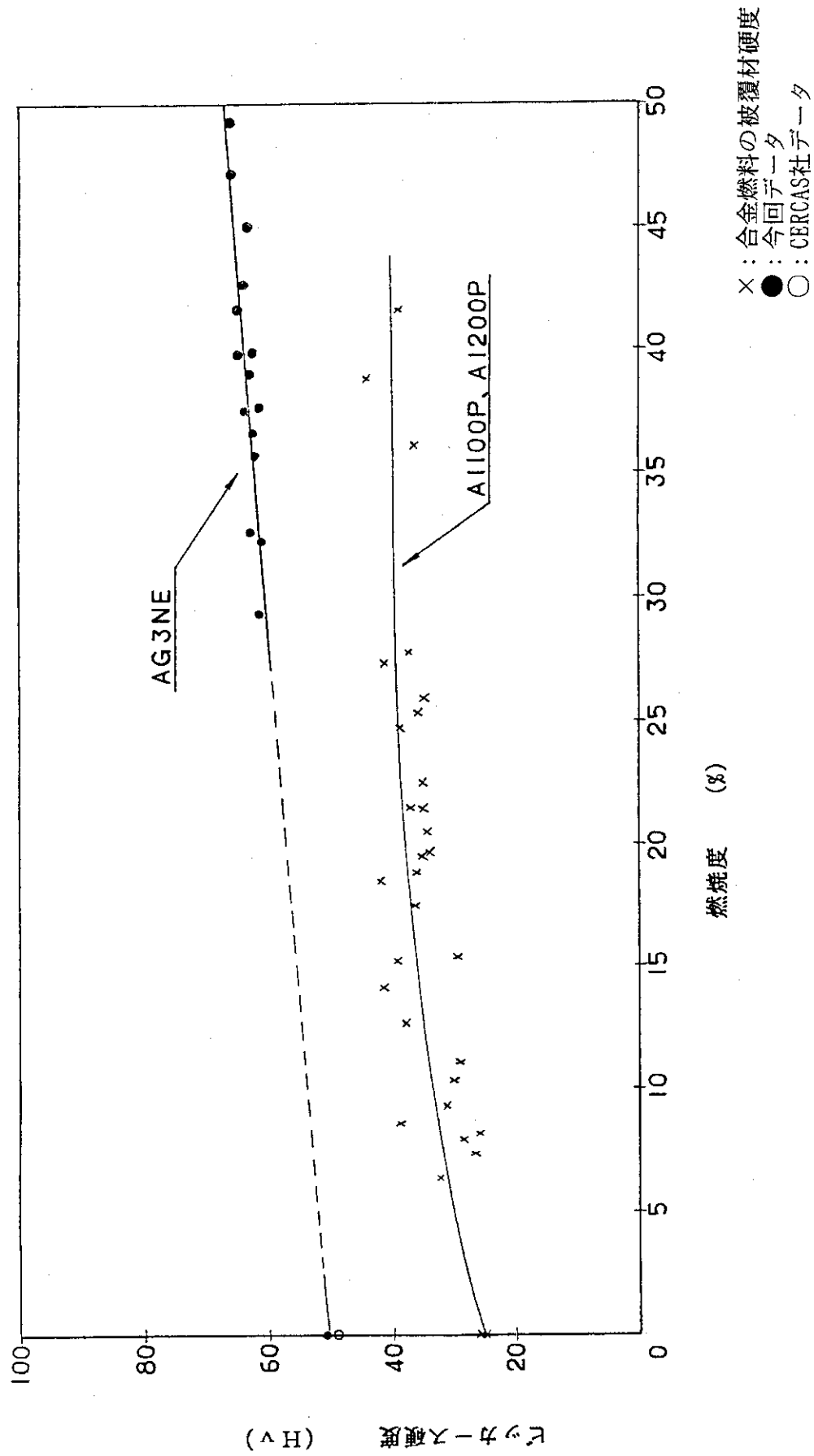


Fig. 22 燃焼度による被覆材 (AG3NE) の硬度変化

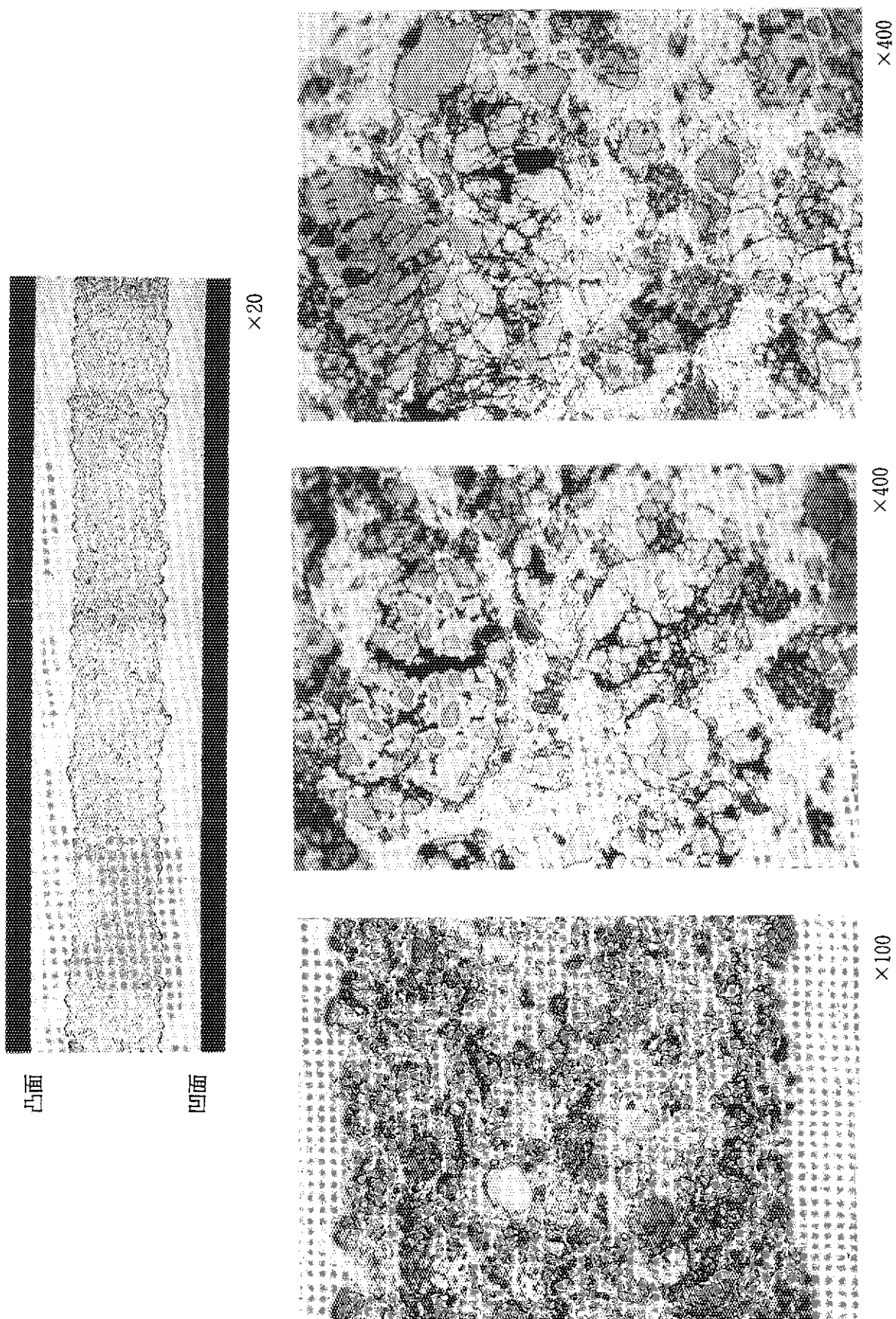


Fig. 23 未照射試験片の金相写真

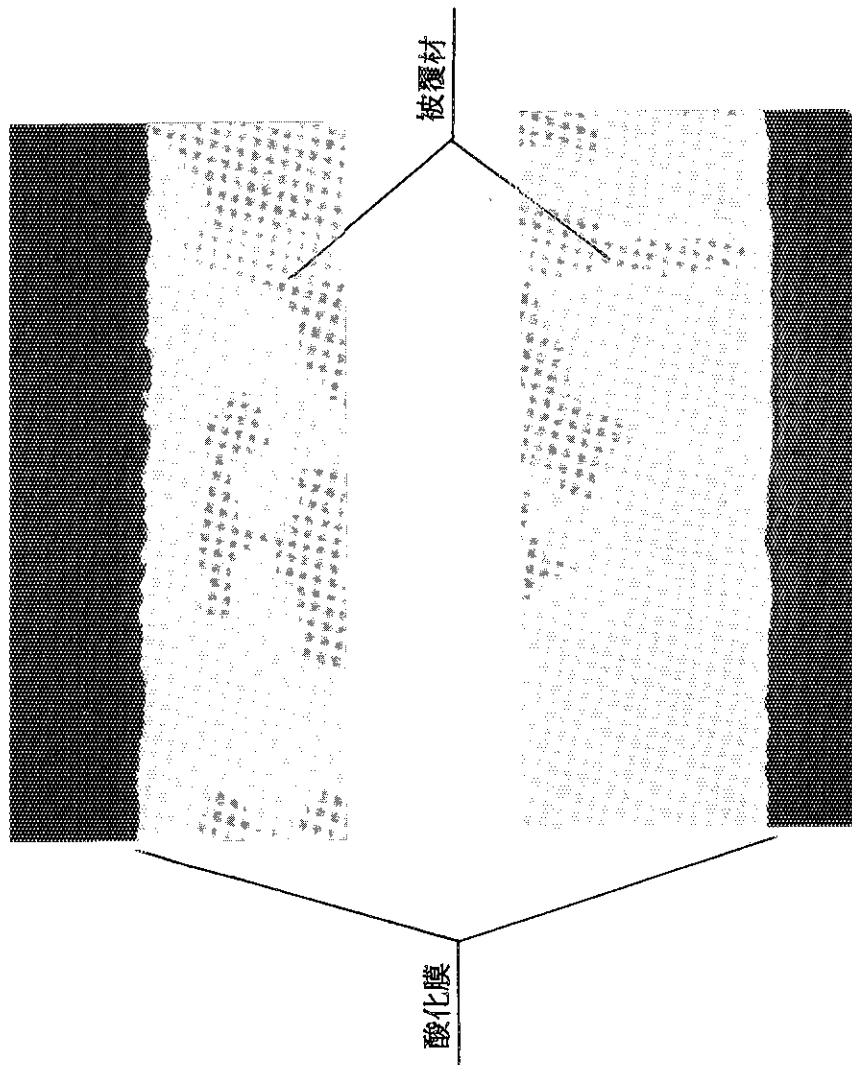


Fig. 24 未照射試験片の被覆材表面の酸化膜

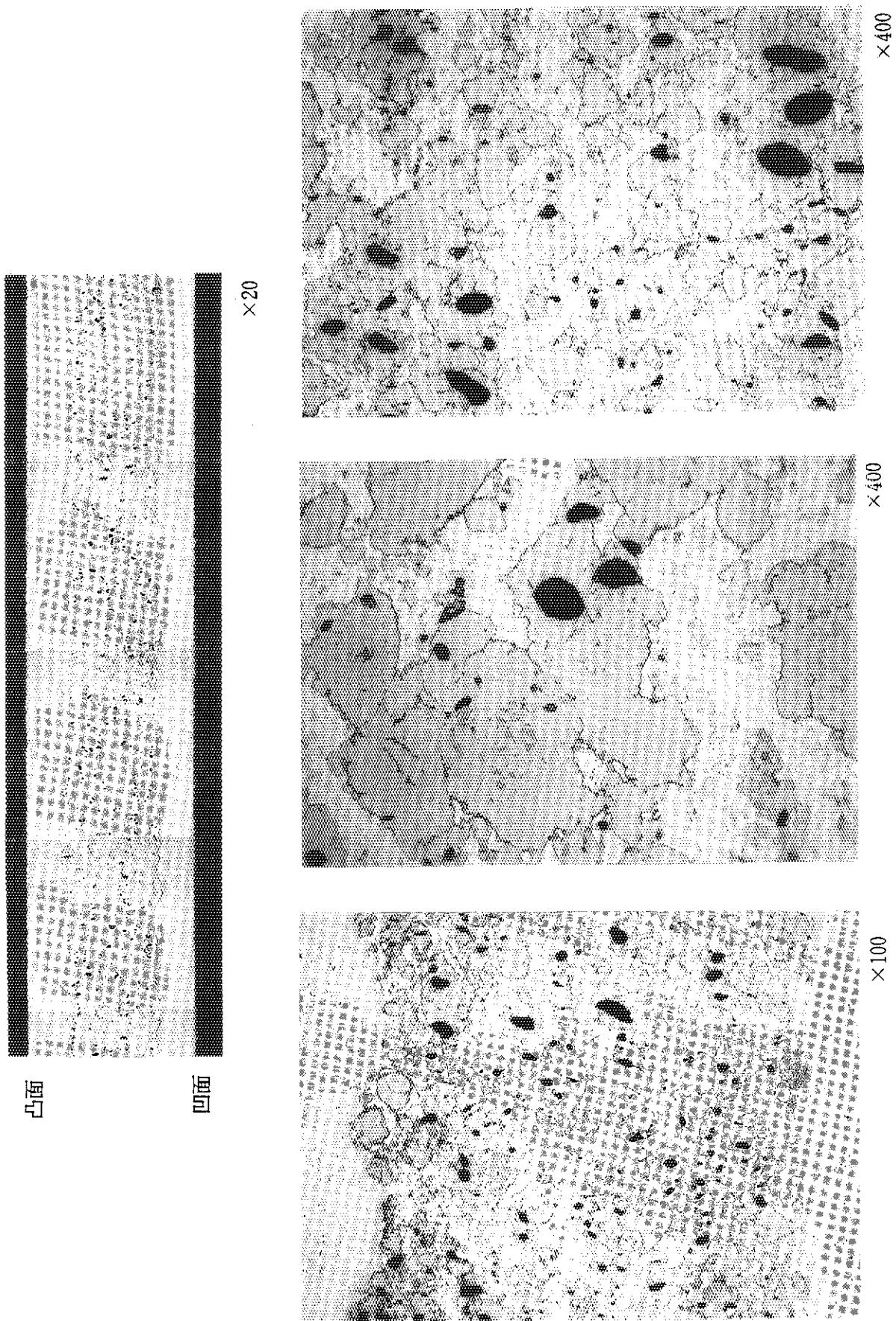


Fig. 25 燃料板No. 2 試験片 S₃ の金相写真 (燃焼度: 49.3%)

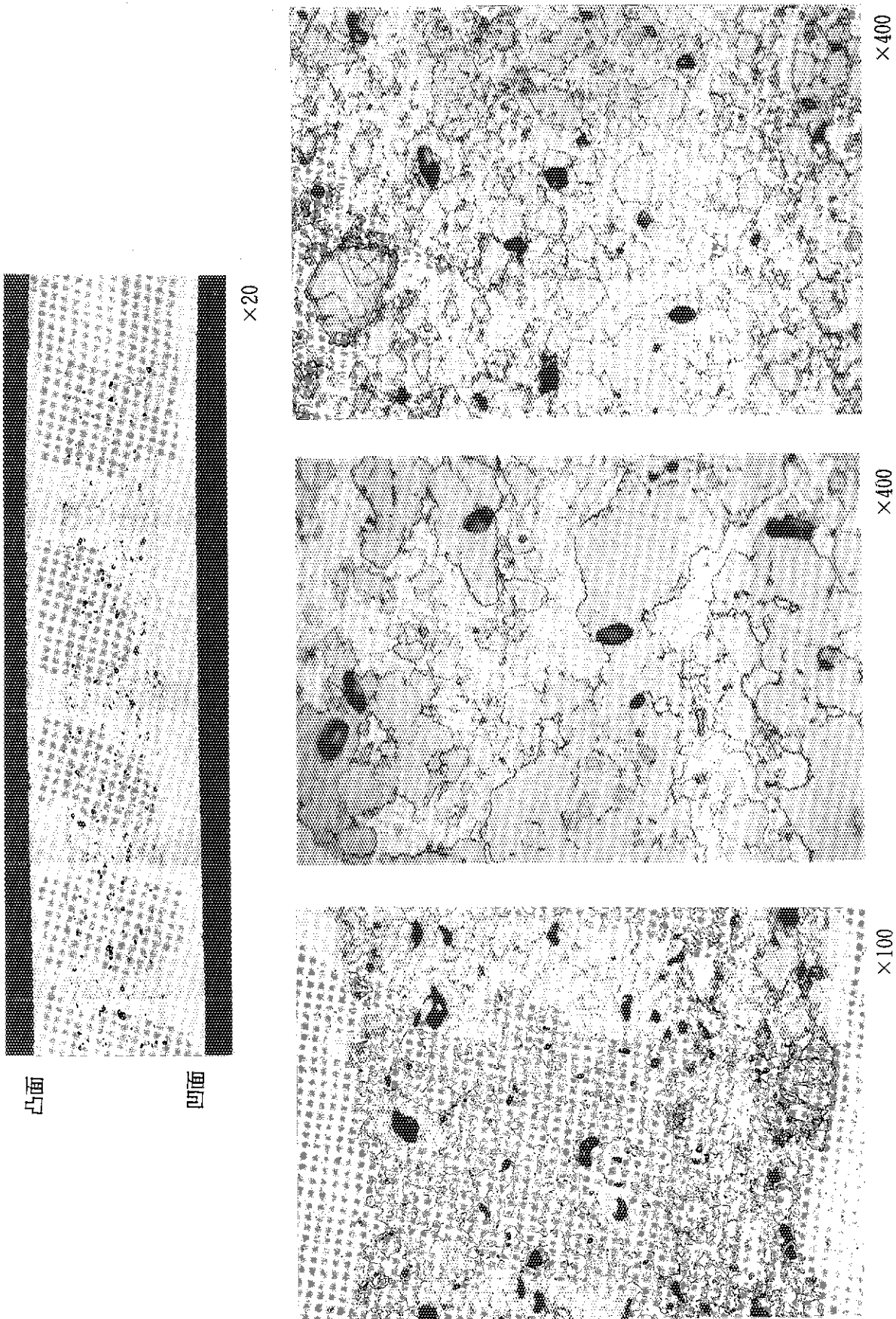


Fig. 26 燃料板No. 2 試験片S₅の金相写真 (燃焼度: 47.2%)

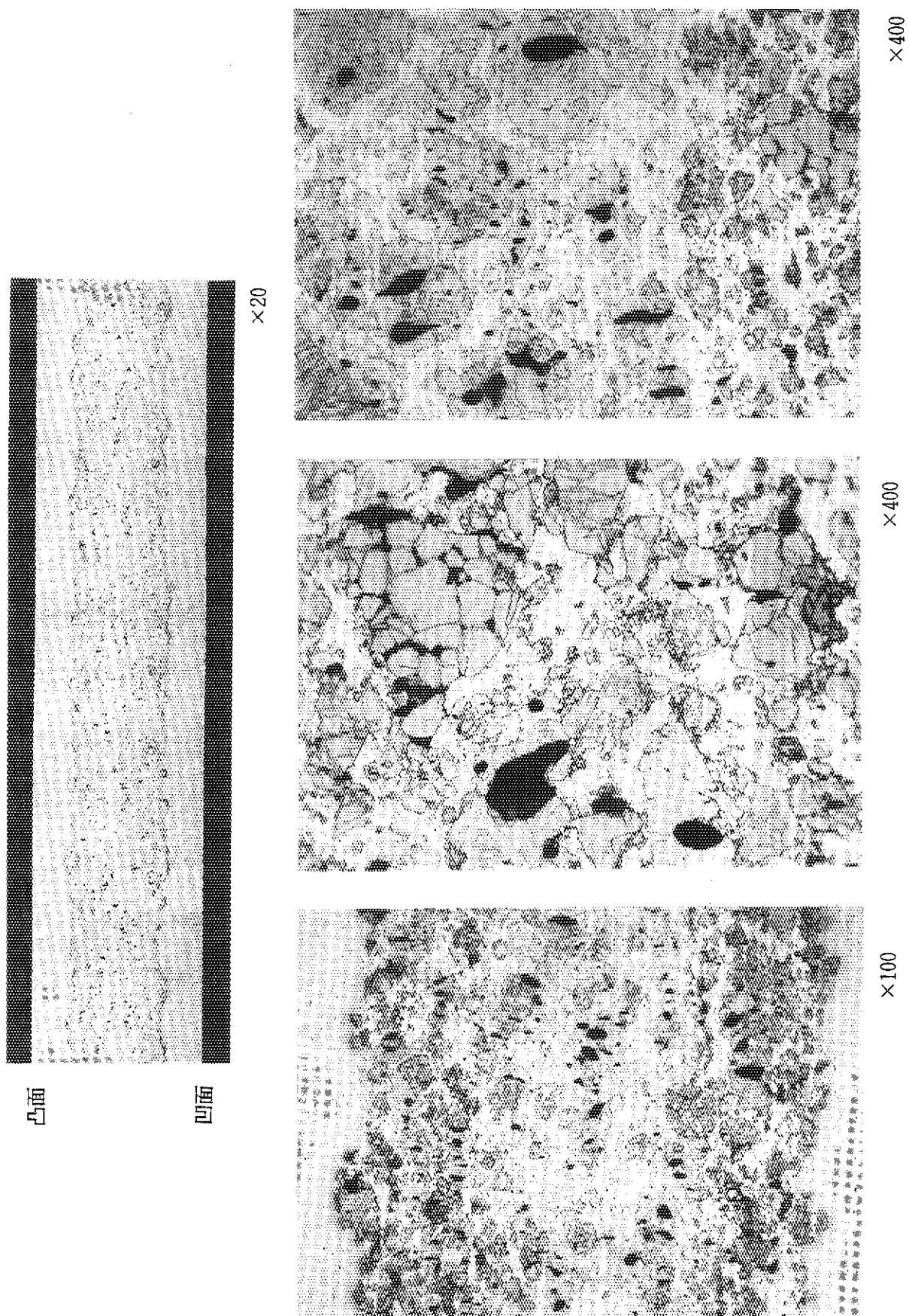
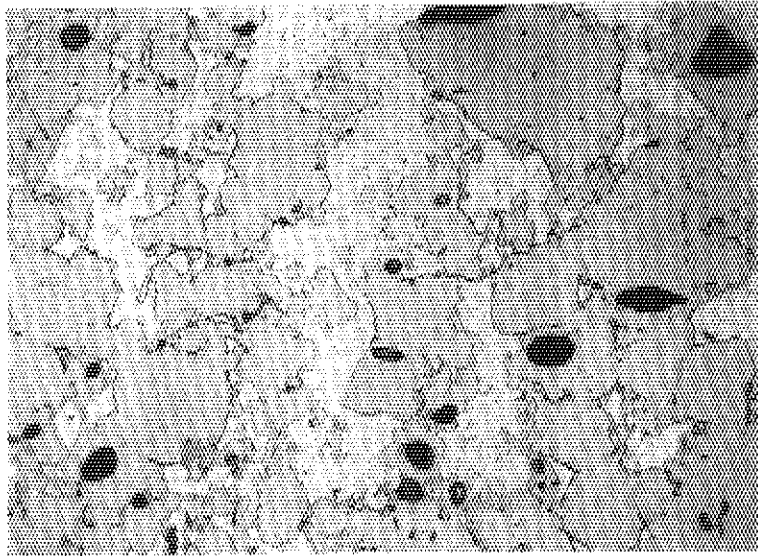
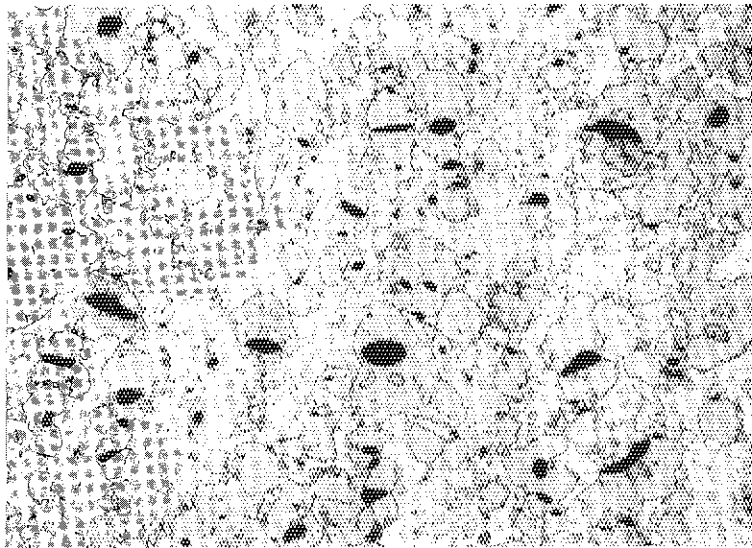


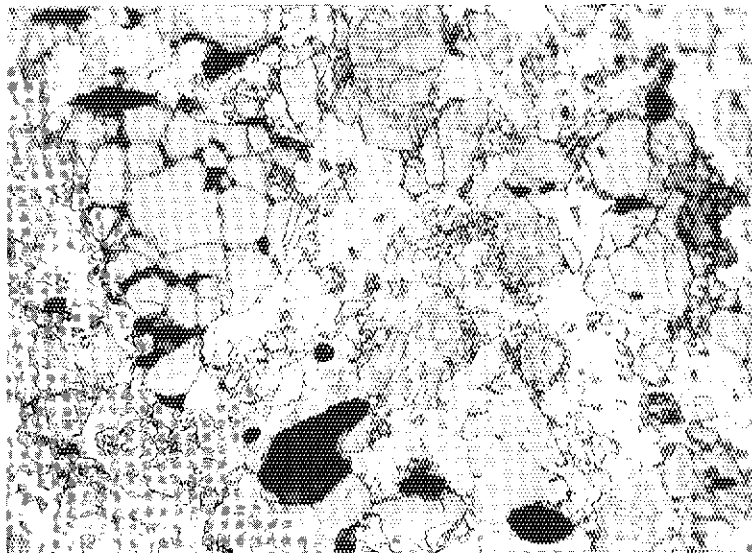
Fig. 27 燃料板No. 9 試験片 S₂ の金相写真 (燃焼度 : 29.4%)



燃料板No. 2 試験片 S₃ Bup : 49.3%



燃料板No. 5 試験片 S₄ Bup : 39.0%



燃料板No. 9 試験片 S₂ Bup : 29.4%

×400

Fig. 28 燃焼度の違いによる組織変化

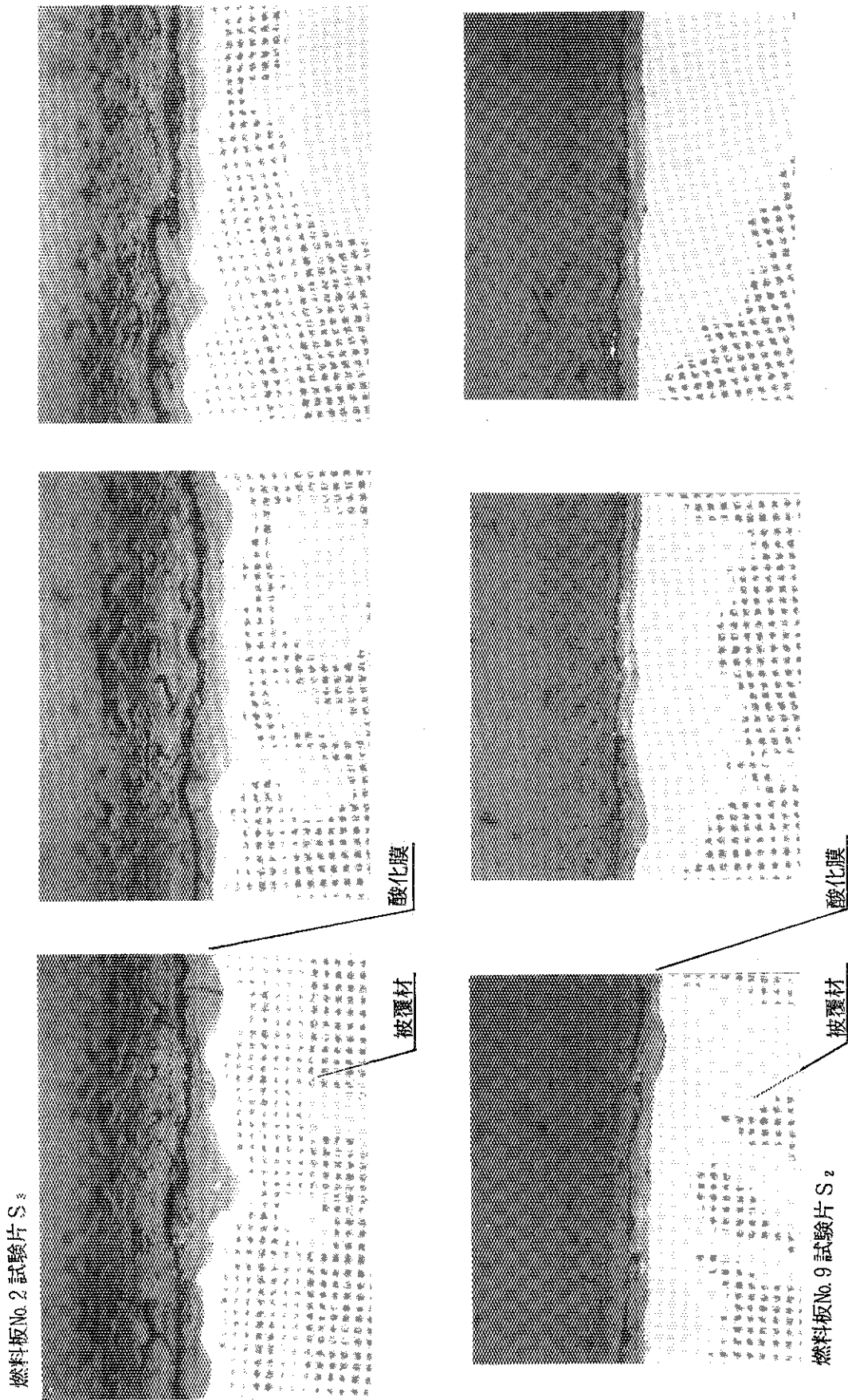


Fig. 29 被覆材表面の酸化膜

Table 8 顕微鏡検査による寸法及びボイド率測定結果

試料片		試料片 燃焼度 (%)	被覆材, 芯材, 板厚寸法 (mm)				酸化膜寸法 (μm)		燃料芯材 ボイド率 (%)	備 考
			被 覆 材		芯 材	板 厚	被 覆 材			
燃料No.	採取位置		(凸面)	(凹面)			(凸面)	(凹面)		
未照射試料		0	0.42	0.39	0.86	1.67				
2	S 1	37.7	0.36	0.36	0.96	1.68	8.2	9.4	3.5	
	S 2	39.9	0.35	0.38	0.95	1.68	11.7	14.7	4.5	
	S 3	49.3	0.37	0.36	0.92	1.65	12.0	6.2*	5.4	
	S 4	45.0	0.35	0.38	0.92	1.65	11.6	11.2	4.1	
	S 5	47.2	0.31	0.37	0.96	1.68	13.1	12.7	2.6	
5	S 1	36.7	0.35	0.41	0.92	1.68	9.3	11.5	3.3	
	S 2	32.7	0.39	0.38	0.91	1.68	12.7	11.4	4.6	
	S 3	41.6	0.40	0.39	0.89	1.68	12.5	12.0	3.7	
	S 4	39.0	0.39	0.39	0.90	1.68	11.6	12.2	4.5	
	S 5	42.6	0.39	0.39	0.89	1.67	11.1	12.4	3.9	
9	S 1	32.2	0.38	0.42	0.85	1.65	11.3	9.9	2.7	
	S 2	29.4	0.39	0.38	0.90	1.67	9.2	11.4	2.5	
	S 3	37.5	0.39	0.37	0.92	1.68	10.6	13.4	3.3	
	S 4	35.7	0.40	0.37	0.90	1.67	12.6	9.5	2.6	
	S 5	39.8	0.36	0.38	0.93	1.67	12.3	9.8	4.5	

注) 各寸法の数値は平均値を示す (燃料芯材ボイド率を除く)。

* Handling中に脱落したものと考えられるため参考値とする。

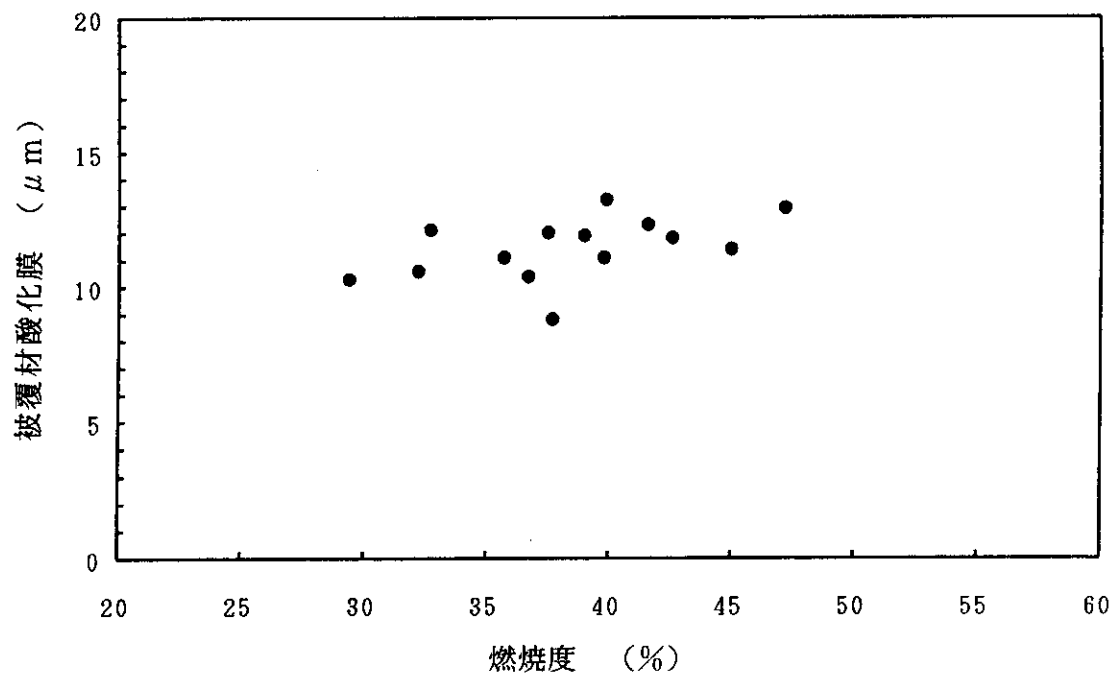


Fig. 30 燃焼度と酸化膜厚さの関係

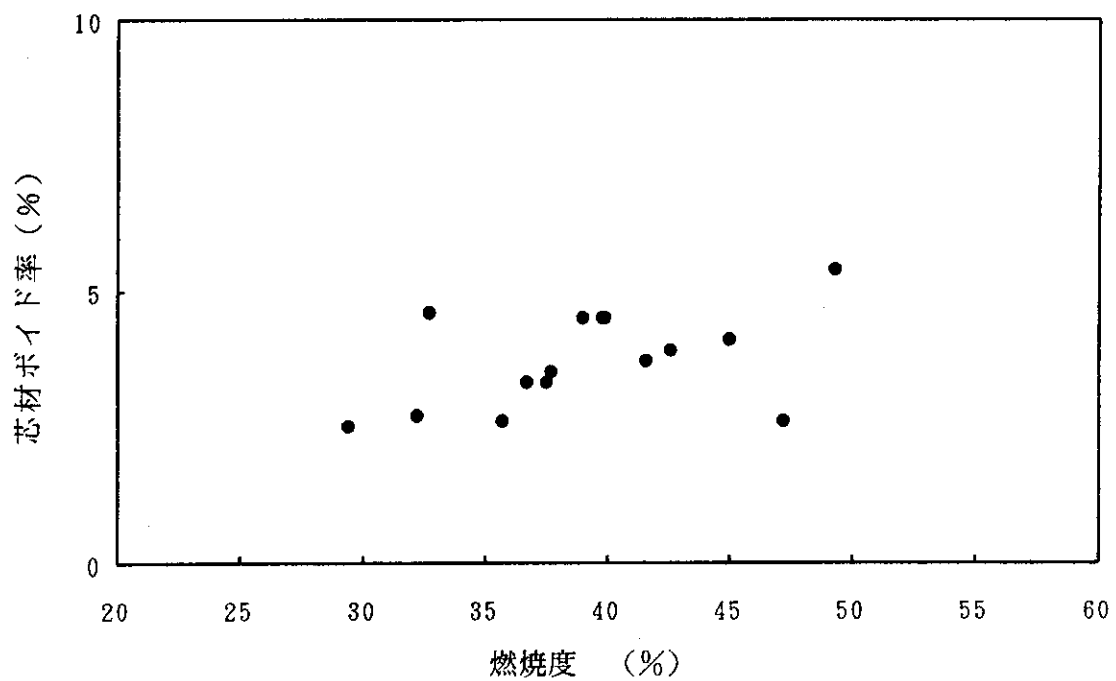
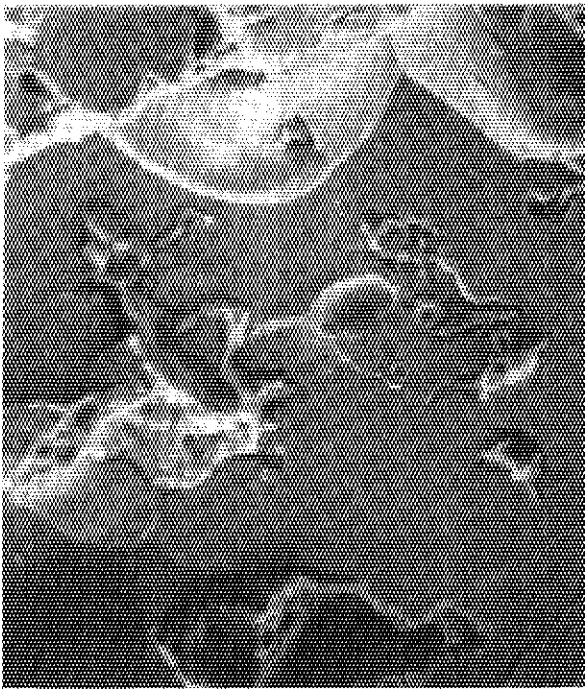
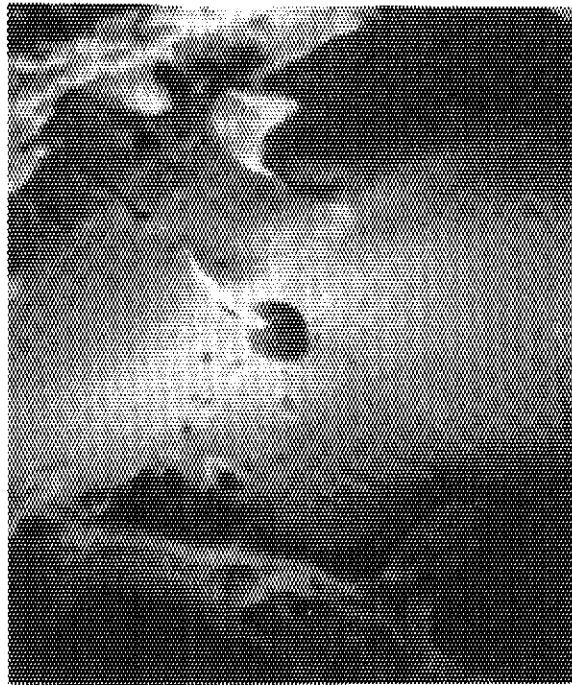


Fig. 31 燃焼度と燃料芯材のボイド率の変化



×900



×1800

Fig. 32 燃料板No. 6の電子顕微鏡写真 Bup : 40.5%

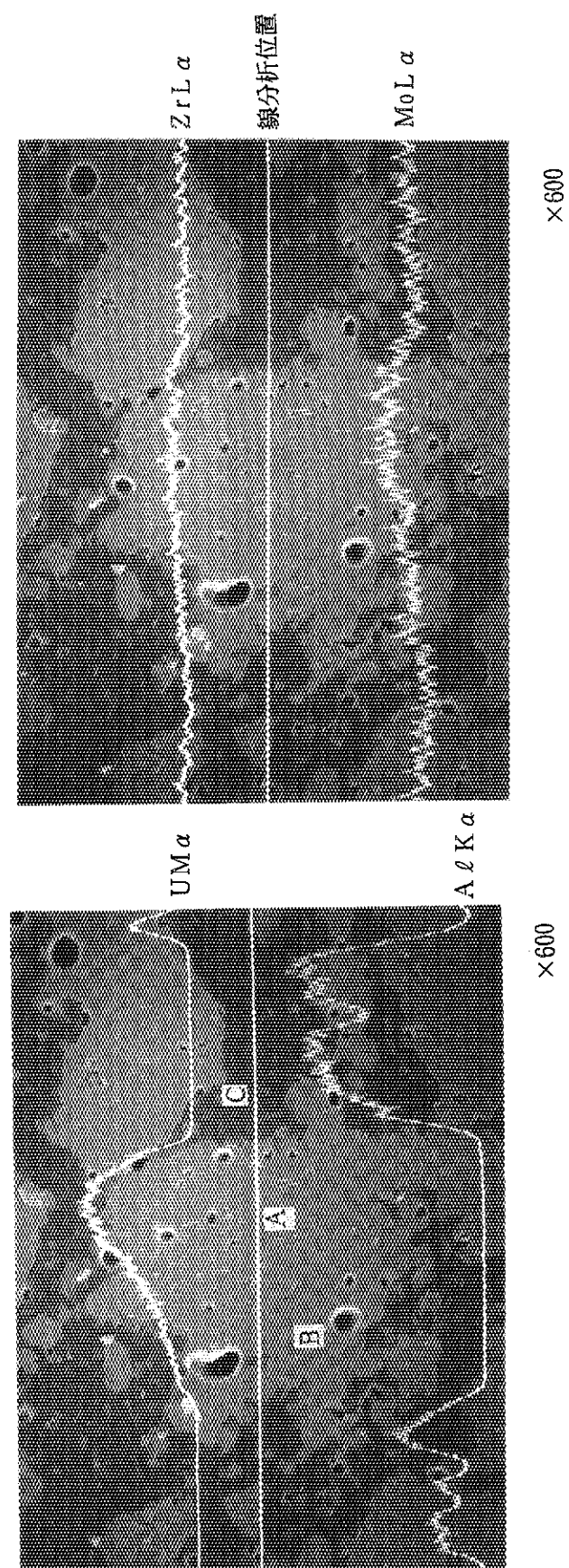
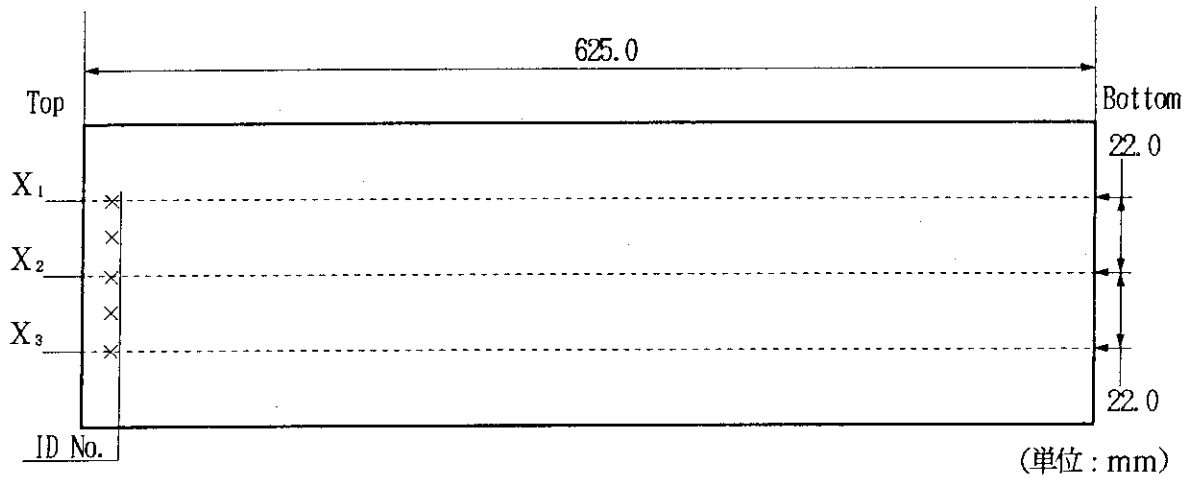
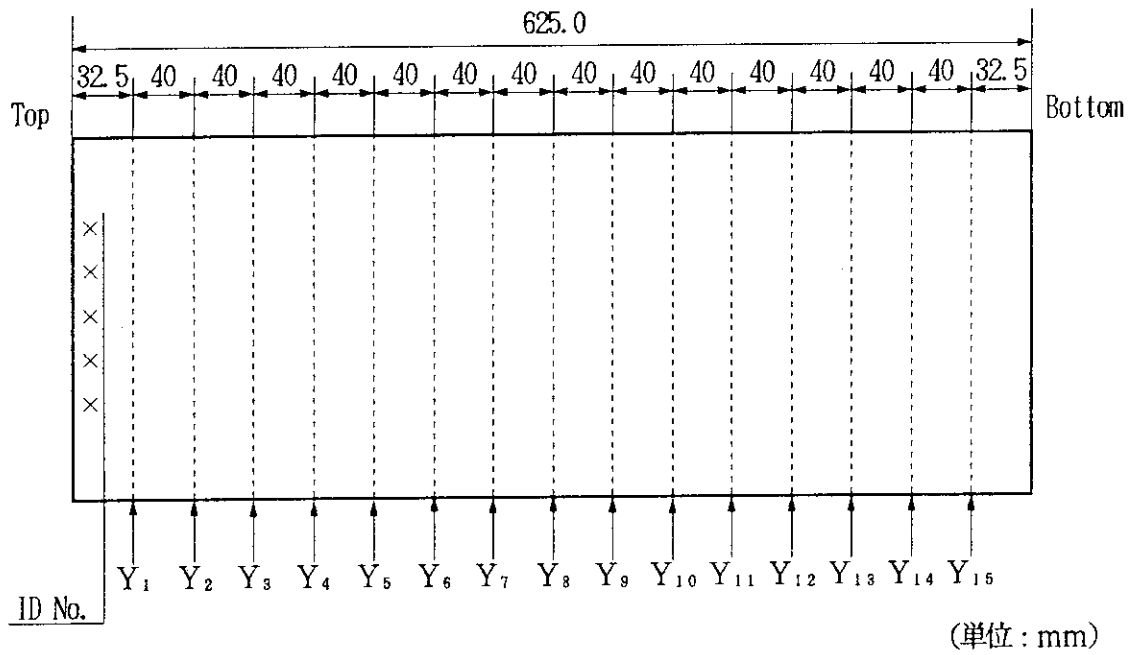


Fig. 33 燃料板No. 2 試験片 S₃ の電子顕微鏡写真 (2 次電子像 + 線分析) Bup : 49.3%



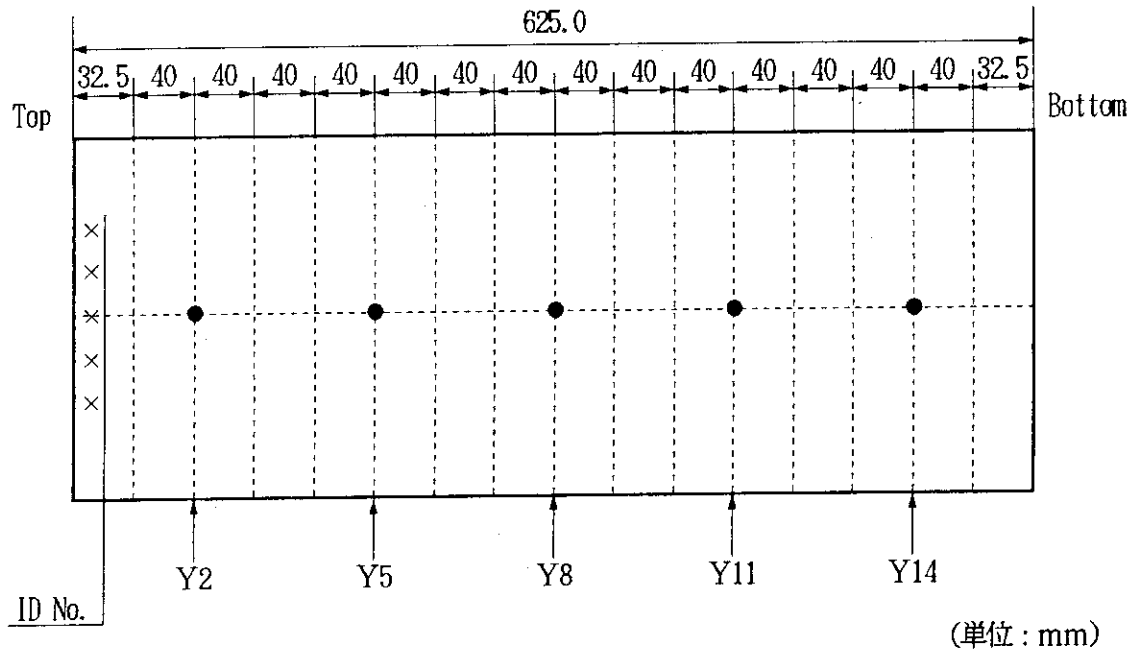
X_1, X_2, X_3 : 長手方向スキャン位置

Fig. 34 長手方向ガンマ線強度測定位置



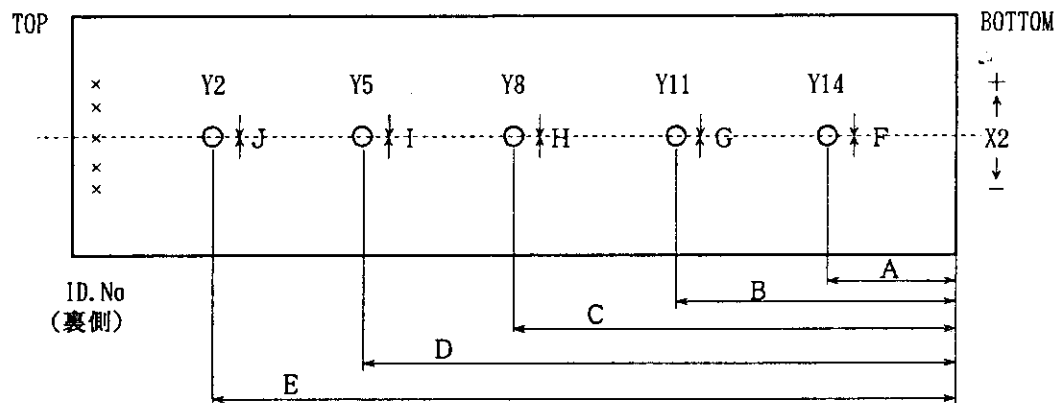
$Y_1 \sim Y_{15}$: 幅方向スキャン位置

Fig. 35 幅方向ガンマ線強度測定位置



●印: 定点ガンマ線スペクトル測定位置

Fig. 36 定点ガンマ線スペクトル測定位置



打抜き試料の大きさは、直径 1 mm である。

単位: mm

Plate No.	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
No. 2	72.5	196.2	312.6	432.2	554.2	0	0	0	0	0
No. 9	72.0	192.6	312.6	433.7	553.2	+0.5	0	0	0	0

注) F ~ J は中心位置 (X2) からのズレを示す。

Fig. 37 燃焼度測定用試料の打抜き位置

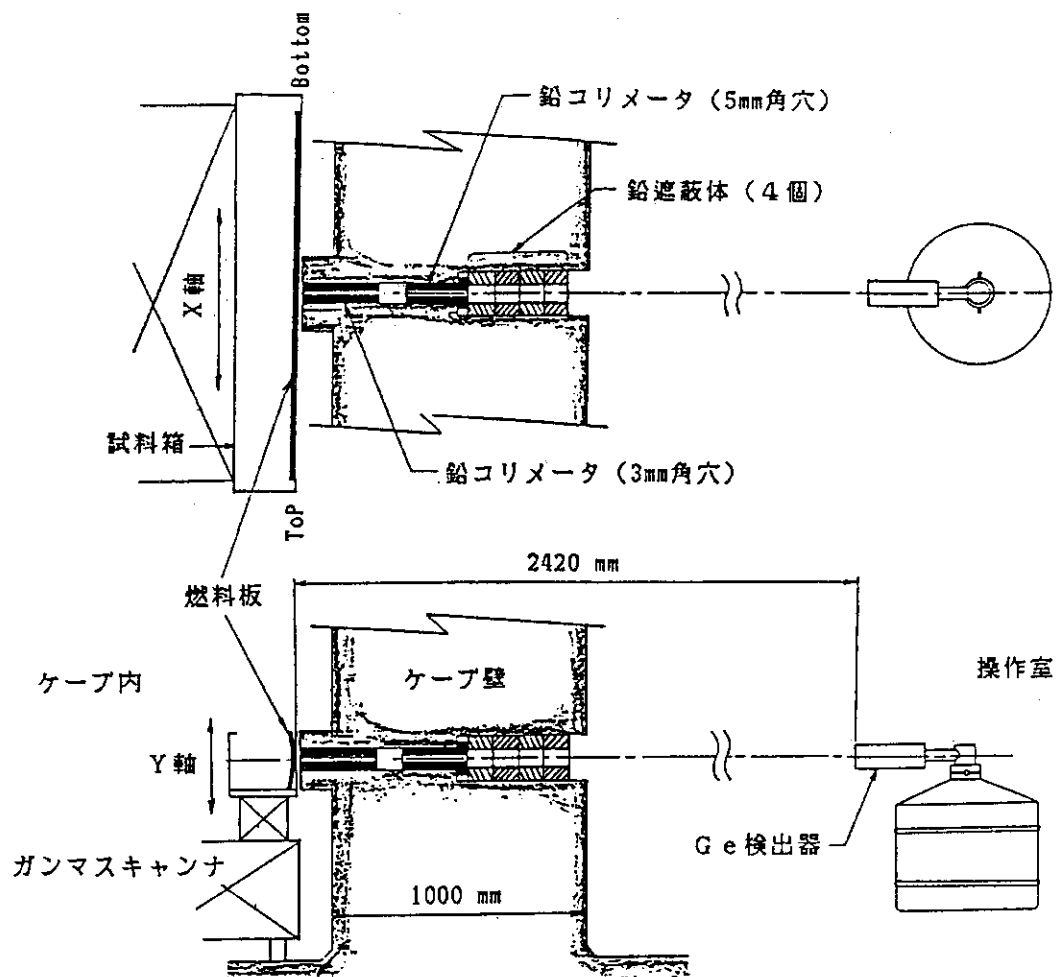


Fig. 38 ガンマスキャンニング及び定点ガンマ線スペクトル測定方法

測定年月日 : 86/11/14、19:44:49
 試料名 : CDE01、33Y11101 (No. 2)
 スキャン位置 : X 2
 スキャン速度 : 10.13 (mm/min)
 エネルギー範囲 : 350 ~ 2345 (keV)
 レポートメータ : Range 1×10^4 (cps)、T-C 0.3 (Sec)
 チューンメータ : Range 5×10^3 (cps)、Speed 10.13 (mm/min)
 コリメータ : 3X3 (mm)
 測定距離 : 2420 (mm)
 総計数 : 10358599 (Counts/3939Sec)

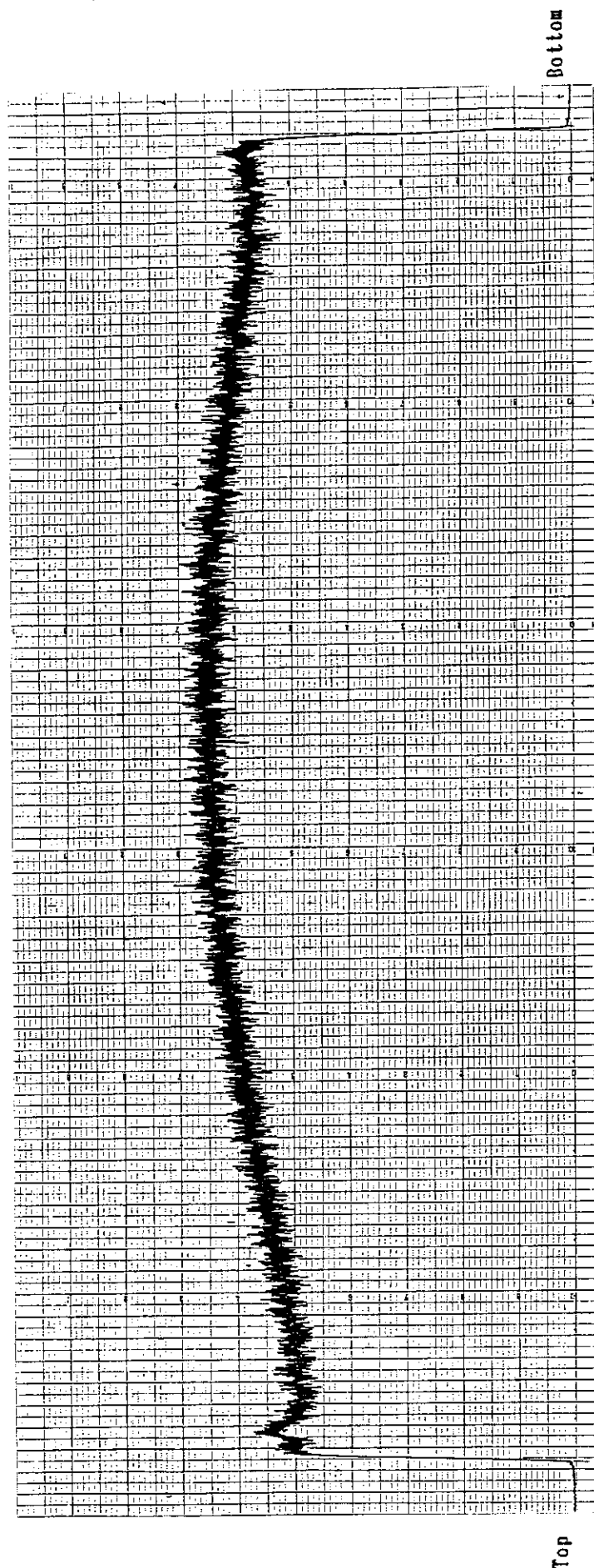
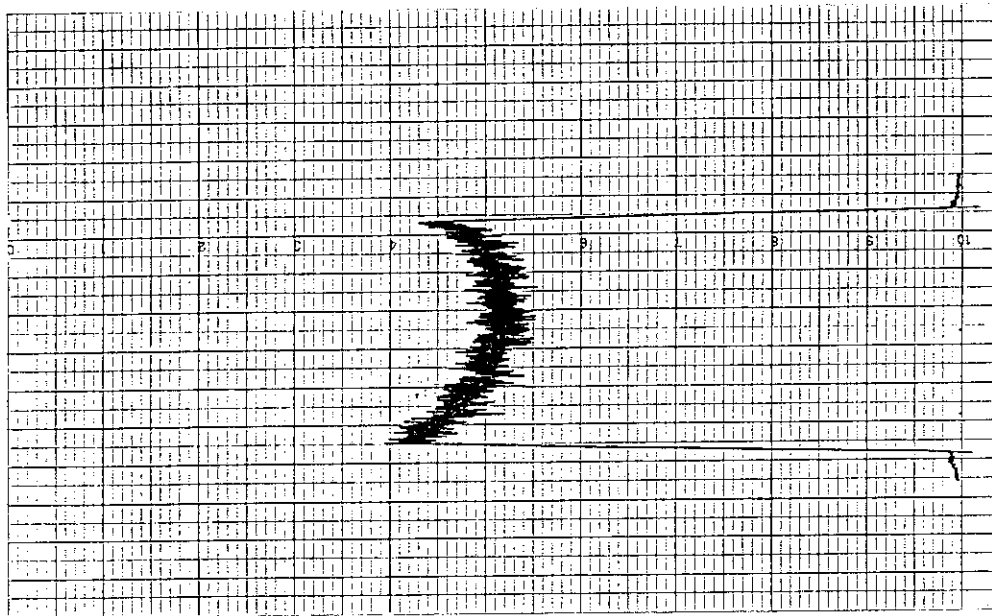


Fig. 39 長手方向ガンマ線強度分布

測定年月日 : 85/11/19, 23:23:55
 試験機 : C601, 34V2117 (No. 9)
 スキャン位置 : Y 9
 スキャン速度 : 9.09 (mm/min)
 エネルギー範囲 : 350 ~ 2315 (keV)
 レートメーター : Range 1X10⁴(cps), T-C 0.3 (Sec)
 チャーメーター : Range 5X10³(cps), Speed 0.81(mm/min)
 コリメーター : 3X3 (mm)
 測定距離 : 2420 (mm)
 総計数値 : 930406 (Counts/485Sec)



測定年月日 : 85/11/18, 23:09:05
 試験機 : C601, 33V1101 (No. 2)
 スキャン位置 : Y 9
 スキャン速度 : 9.09 (mm/min)
 エネルギー範囲 : 350 ~ 2315 (keV)
 レートメーター : Range 1X10⁴(cps), T-C 0.3 (Sec)
 チャーメーター : Range 5X10³(cps), Speed 0.81(mm/min)
 コリメーター : 3X3 (mm)
 測定距離 : 2420 (mm)
 総計数値 : 1195140 (Counts/485Sec)

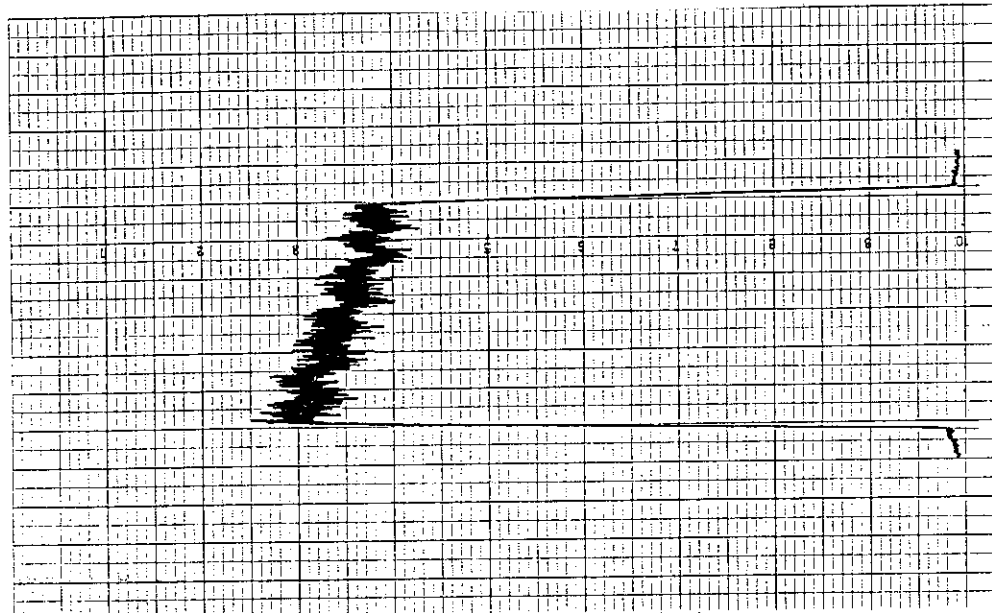


Fig. 40 幅方向ガンマ線強度分布

Table 9 燃料板の平均計数率 (Ha)

燃料板番号	スキャン面積 S (cm ²)	スキャン長さ L (cm)	計数率 ¹⁾ $L a$ (cps)	T_a/T_1	燃料板平均計数率 H_a (cps)
1	312.1	60.10	1063.7	1.0084	1072.6(3416.2) ²⁾
2	880.3	59.75	2946.6	1.0146	2989.6
3	810.1	59.80	2774.9	1.0236	2840.4
4	770.5	60.15	2623.8	1.0310	2705.1
5	738.9	60.30	2529.7	1.0376	2624.8
6	711.5	59.60	2464.7	1.0465	2579.3
7	692.3	60.00	2382.1	1.0492	2499.3
8	672.9	60.05	2331.4	1.0562	2462.4
9	661.0	60.20	2284.6	1.0627	2427.8
10	652.8	59.95	2283.2	1.0615	2423.6
11	653.0	59.70	2293.4	1.0637	2439.5
12	657.9	60.15	2293.3	1.0634	2438.7
13	671.1	60.35	2349.6	1.0533	2474.8
14	689.4	59.70	2439.8	1.0495	2560.5
15	718.9	59.85	2538.1	1.0400	2639.6
16	249.4	60.15	882.8	1.0389	917.1(2934.3) ²⁾

¹⁾ 測定日による減衰を補正した値

²⁾ ウラン量により補正した値

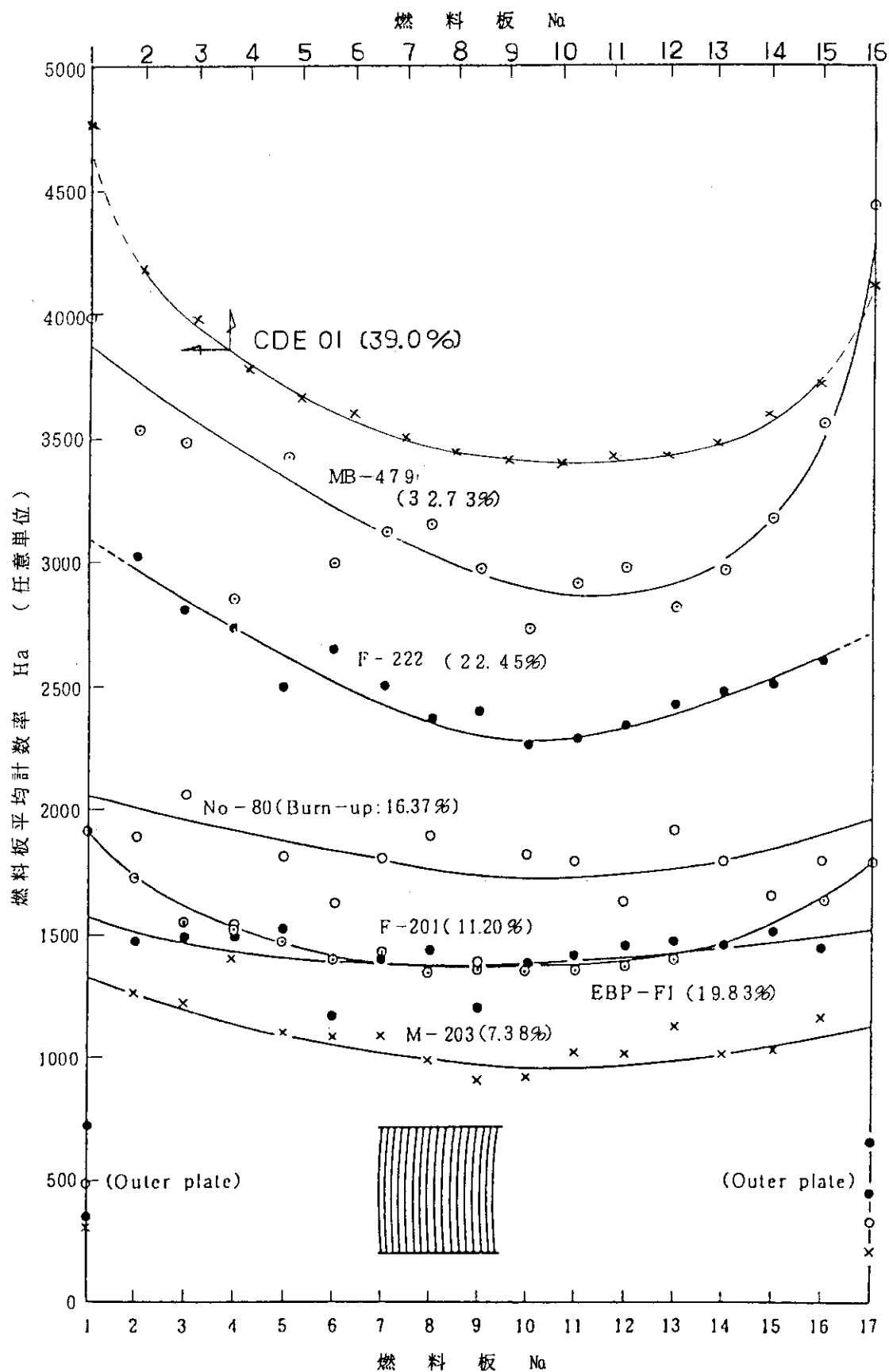


Fig. 41 燃料板におけるガンマ線平均計数率の分布

Table 10 低濃縮試験燃料の燃焼率測定結果

I D. No.		8 7 E 0 1	8 7 E 0 2	8 7 E 0 3	8 7 E 0 4	8 7 E 0 5	8 7 E 0 6
Sample No.		2-A	2-B	2-C	9-C	9-D	9-E
Isotopic Composition (atom %)	U-234	0.108	0.105	0.101	0.108	0.109	0.109
	U-235	12.328	11.579	11.521	13.919	14.530	15.361
	U-236	1.615	1.782	1.796	1.354	1.218	1.062
	U-238	85.948	86.534	86.583	84.619	84.143	83.468
Isotopic Composition (atom %)	Pu-238 *	0.411	0.558	0.577	0.386	0.312	0.217
	Pu-239	81.667	78.948	78.676	84.032	85.792	88.278
	Pu-240	13.931	15.052	15.137	12.005	10.963	9.541
	Pu-241	3.608	4.837	4.976	3.301	2.735	1.854
	Pu-242	0.383	0.605	0.634	0.276	0.197	0.110
Atomic Ratio Pu/U ($\times 10^{-3}$)		4.959	5.991	6.180	4.279	3.874	3.030
Burn up **	FIMA (%)	7.39	8.02	8.14	5.92	5.34	4.64
	U-235 (%) ***	43.1	46.9	47.3	34.7	31.3	26.8

As of 4/25/1986

* : α 線スペクトロメトリー及びMassスペクトロメトリーによる。** : ^{137}Cs 法による。 ^{137}Cs の核分裂収率:0.06186 (Ridernの235T値を採用した:B. F. Rider, NEDO-12154-1(C)(1984))。

*** : 燃料中のU-235 が消費した割合 (%)。

Table 11 打抜き試料の絶対燃焼度と計数率

試料番号	絶対燃焼度 (%)	ガンマスキニングによる計数率 (cps)
2-A	44.3	2,880
2-B	47.9	3,160
2-C	48.3	3,220
9-C	36.1	2,445
9-D	32.5	2,205
9-E	28.0	1,904

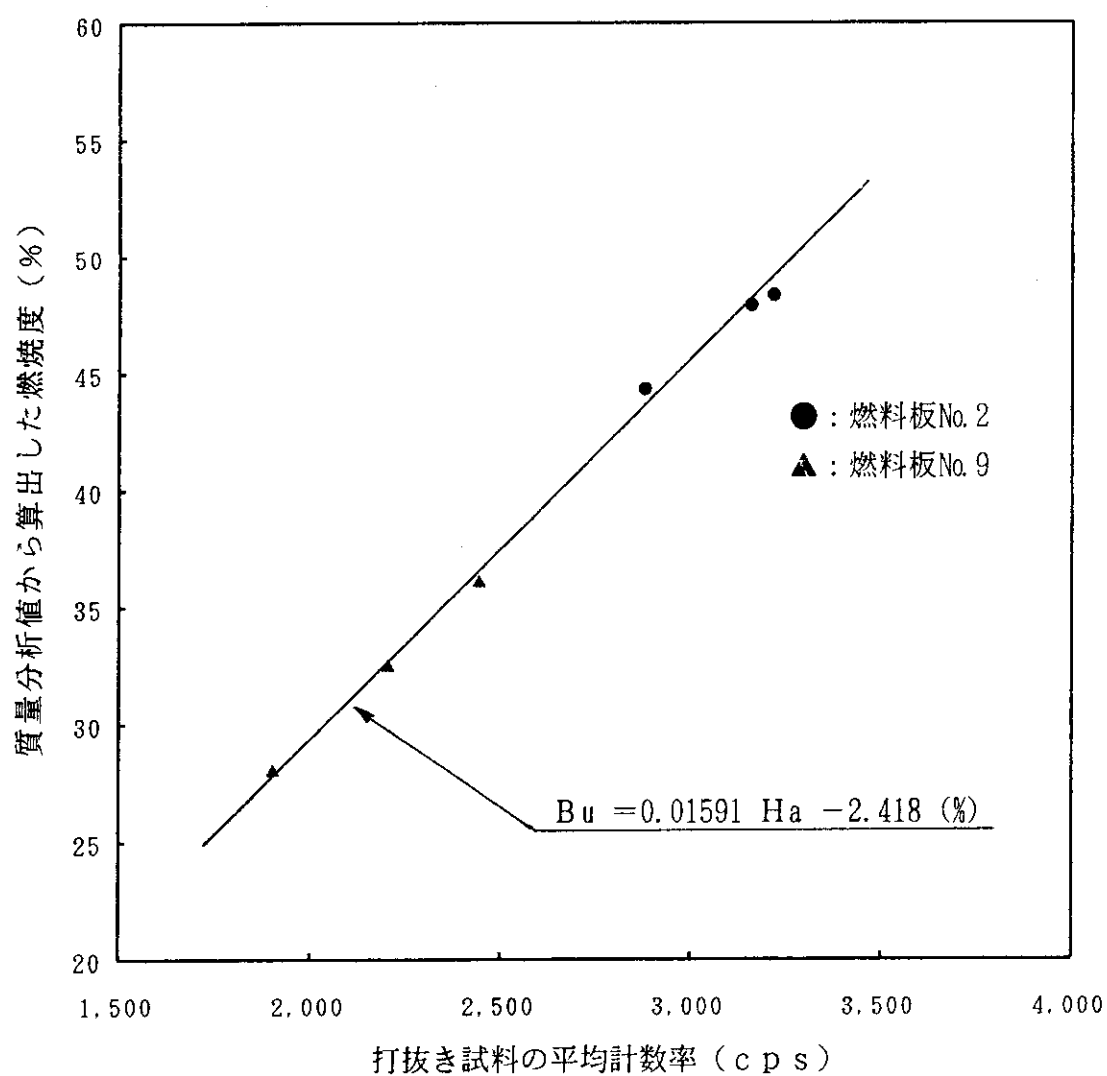


Fig. 42 燃焼度校正グラフ

CDE 01

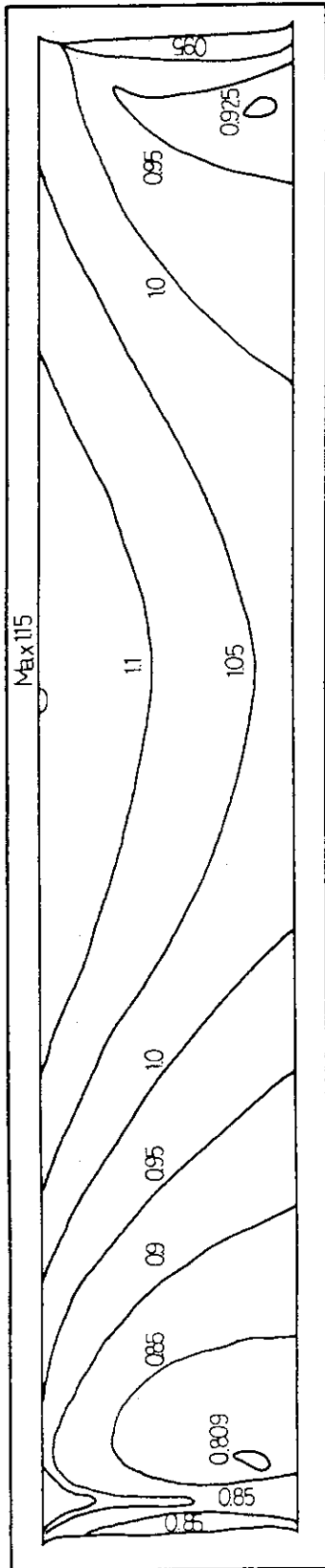


PLATE No.=2 Bup = 451%

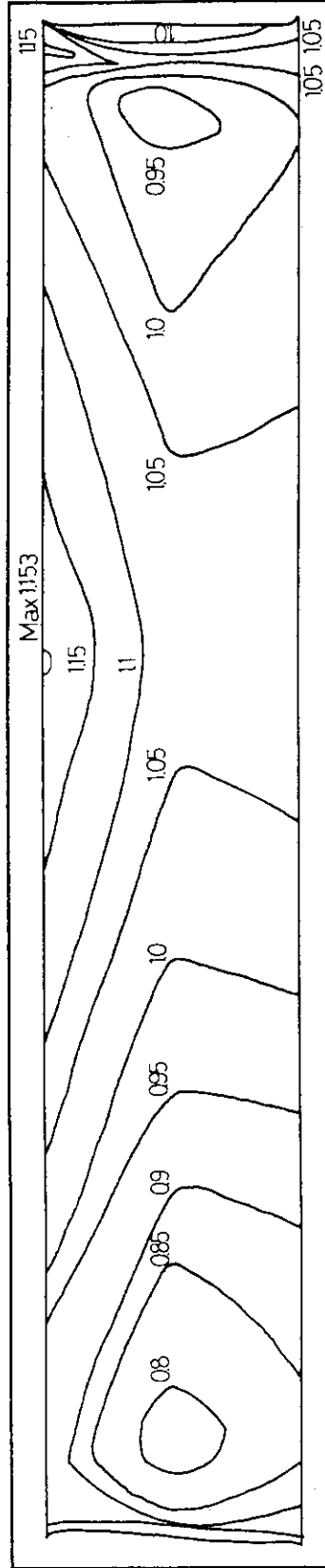


PLATE No.=5 Bup = 393%

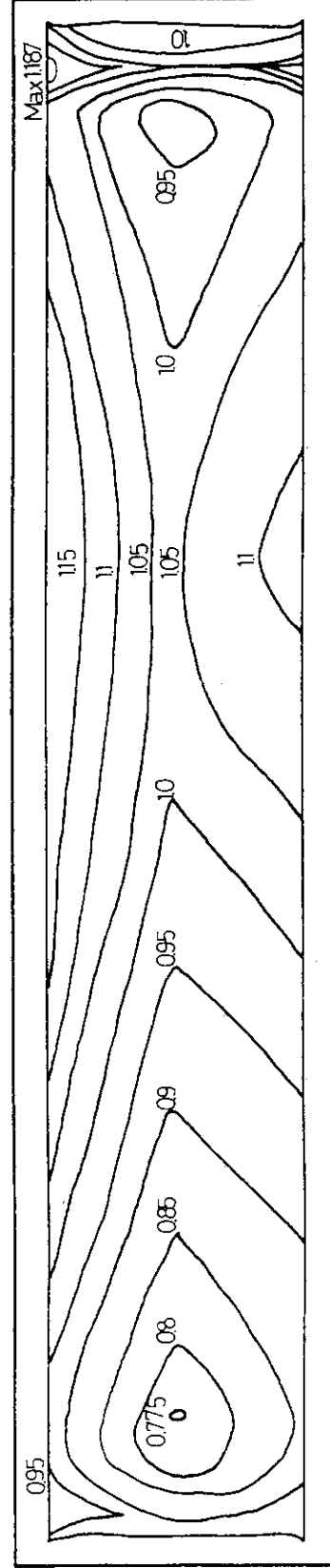


PLATE No.=9 Bup = 36.2%

Fig. 43 燃料板のガンマ線強度分布

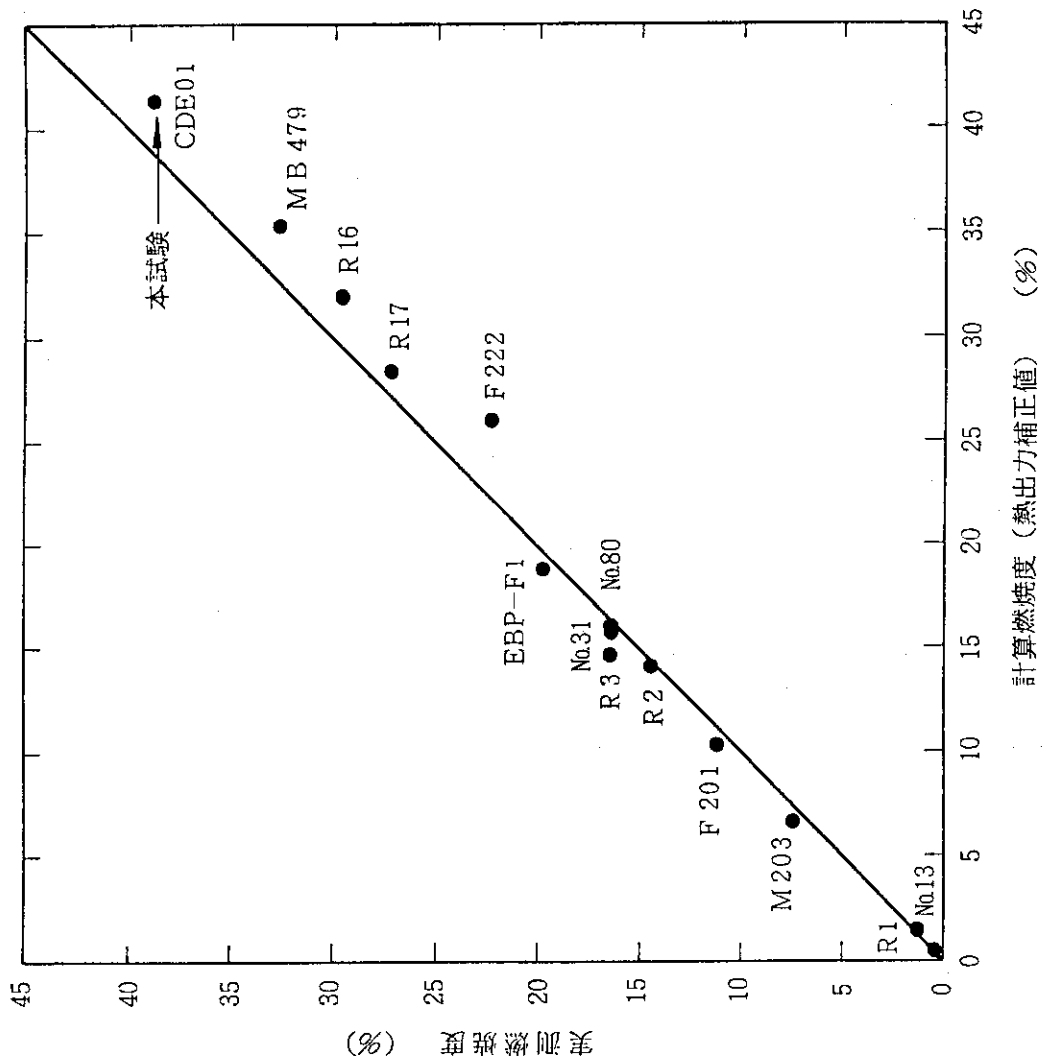


Fig. 44 計算燃焼度と実測燃焼度の関係

Table 12 燃料板及び燃料要素の平均燃焼度

燃料板 No	燃 焼 率 (%)
1	51.9
2	45.1
3	42.8
4	40.6
5	39.3
6	38.6
7	37.3
8	36.8
9	36.2
10	36.1
11	36.4
12	36.4
13	37.0
14	38.3
15	39.6
16	44.3
燃料要素	39.0

Table 13 JRR-2 使用済燃料のピーキングファクタの比較

燃料要素	計算燃焼度 (%)	燃料板のピーキングファクタ (fp)	燃料要素のピーキングファクタ (Fp)
No.13	0.498	1.06~1.57	1.57
No.31	15.8	1.17~1.36	1.53
No.80	16.0	1.20~1.59	1.76
F-201	10.42	1.23~1.55	1.62
M-203	6.68	1.15~1.55	1.75
F-222	26.15	1.34~1.63	1.80
EBP-F1	18.94	1.13~1.59	1.56
MB-479	35.47	1.13~1.50	1.59
CDE01	41.57	1.18~1.30	1.35