

JAERI-M

8035

直接通電法による溶融燃料冷却材反応実験

($\text{ZrO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 系)

1979年1月

武田 常夫・平野 見明

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.

直接通電法による溶融燃料冷却材反応実験
($\text{ZrO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ 系)

日本原子力研究所東海研究所安全工学部

武田 常夫・平野 見明

(1978年12月13日受理)

PCM (出力-流量不整合) 関連実験の中で、FCI (溶融燃料-冷却材反応) 試験は炉内 PCM 実験の際に生ずる諸現象を予測するために必要とされる実験の一つである。FCI 実験に用いられる加熱方法は、直接通電加熱法であるが、この加熱法はペレット温度が約 1000°C 以上で有効である。したがって、直接通電加熱開始前には予熱が必要である。また、PCM および本 FCI 実験で用いる燃料体は典型的な軽水炉燃料であり周囲を冷却水で囲まれている。予熱に際して、冷却水を加熱することは望ましくない。そこで、 UO_2 と物理的および化学的性質が良く似ている ZrO_2 を用いた。特に、直接通電加熱に適した性質を持っており、この点でも UO_2 と類似している。本実験では、 ZrO_2 ペレットを用いて、予備加熱および直接通電加熱を併用し燃料溶融 (融点約 2500°C) を達成した。

溶融した燃料体は、冷却水と接触し圧力波を発生し、一部は微細化して小さな粒子となった。破損した燃料体は解体の後、写真撮影を行った。本レポートには、これらの写真のほか、測定された冷却水圧力変化、冷却水温度変化および微細化した燃料粒子の写真などが示されている。

Fuel Coolant Interaction Experiment by Direct Electrical Heating Method
(ZrO_2 - H_2O system)

Tsuneo TAKEDA and Kenmei HIRANO

Division of Reactor Safety
Tokai Research Establishment, JAERI
(Received December 13, 1978)

In the PCM (Power Cooling Mismatch) experiments, the FCI (Fuel Coolant Interaction) test is one of necessary tests in order to predict various phenomena that occur during PCM in the core. A direct electrical heating method is used for the FCI tests for fuel pellet temperature of over 1000°C . Therefore, preheating is required before initiating the direct electrical heating. The fuel pin used in the FCI tests is typical LWR fuel element, which is surrounded by coolant water. It is undesirable to heat up the coolant water during preheating of the fuel pin. Therefore, a zirconia (ZrO_2) pellet which is similar to a UO_2 pellet in physical and chemical properties is used. Electric property (electric conductivity) of ZrO_2 is particularly suitable for direct electrical heating as in the case of UO_2 . In this experiment, ZrO_2 pellet (melting point 2500°C) melting was achieved by use of both preheating and direct electrical heating. Temperature changes of coolant and fuel surface, as well as the pressure change of coolant water, were measured. The molten fuel interacted with the coolant and generated shock waves. A portion of this molten fuel fragmented into small particles during this interaction. The peak pressure of the observed shock wave was about 35 bars. The damaged fuel pin was photographed after disassembly. This report shows the measured coolant pressure changes and the coolant temperature changes, as well as photographs of damaged fuel pin and fuel fragments.

Keywords: Power Cooling Mismatch, Fuel Coolant Interaction, Direct Electrical Heating Method, Shock Wave, LWR Fuel Pin, Defect Fuel Pin, Fuel Pellet Melting, Fragmented Fuel Particles.

目 次

1. はじめに.....	1
2. 実験装置の概要.....	2
2.1 実験装置.....	2
2.2 試験体の構成.....	2
2.3 直接通電法.....	3
2.4 実験手順.....	4
3. 実験結果と考察.....	7
3.1 実験結果の概要.....	7
3.2 標準型試験体実験結果と考察.....	8
3.3 2重管型試験体実験結果と考察.....	8
4. 結 論.....	10
謝 辞.....	11
文 献.....	11

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of Experimental Facility	2
2.1 Experimental Facility	2
2.2 Structure of Test Piece	2
2.3 Direct Electrical Heating Method	3
2.4 Experimental Procedure	4
3. Experimental Results and Discussion	7
3.1 Outline of Experimental Results	7
3.2 Experimental Results of Standard Type Test Piece and Discussion	8
3.3 Experimental Results of Double Cladding Type Test Piece and Discussion	8
4. Conclusions	10
Acknowledgements	11
References	12

List of Table, Figures and Photographs

Table 1	Summary of Experimental Results	12
Fig. 1	Profile of Fuel-Coolant Interaction Test Facility ...	13
Fig. 2	Schematic Diagram of Test Section	14
Fig. 3	Structure of Test Piece	15
Fig. 4	Dimensions of Test Piece	16
Fig. 5	Electric Conductivity of ZrO_2 Pellet used in The Test Piece	17
Fig. 6	Schematic Procedure of Direct Electrical Heating	18
Fig. 7	Assembly of Test Piece	19
Fig. 8	Disassembly of Test Piece after Experiment	20
Fig. 9	Dimensions of Outer Tube in Double Cladding Test Piece.	20
Fig. 10	Experimental Results of Run 201-2	21
Fig. 11	Experimental Results of run 202-2	22
Fig. 12	Experimental Results of Run 204-3	23
Fig. 13	Experimental Results of Run 205-2	24
Fig. 14	Experimental Results of Run 208-2	25
Fig. 15	Experimental Results of Run 209-2	26
Fig. 16	Experimental Results of Run 210-2	27
Fig. 17	Experimental Results of Run 301-2	28
Fig. 18	Experimental Results of Run 302-2	29
Fig. 19	Experimental Results of Run 303-3	30
Fig. 20	Experimental Results of Run 304-3	31
Fig. 21	Experimental Results of Run 305-2	32
Fig. 22	Experimental Results of Run 306-2	33
Fig. 23	Experimental Results of Run 307-2	34
Fig. 24	Experimental Results of Run 308-3	35
Fig. 25	Sketches of Surface of Fuel Pin	36
Fig. 26	Sketches of Inner Surface of Outer Shell	41
Fig. 27	Drawing Method of Sketches in Fig. 25	43
Photo. 1	Test Piece of Run 201	44
Photo. 2	Test Piece of Run 202	44
Photo. 3	Test Piece of Run 204	45

Photo. 4	Test Piece of Run 204	45
Photo. 5	Test Piece of Run 208	46
Photo. 6	test Piece of Run 209	46
Photo. 7	Test Piece of Run 210	47
Photo. 8	Test Piece of Run 301	48
Photo. 9	Test Piece of Run 302	48
Photo. 10	Test Piece of Run 303	49
Photo. 11	Test Piece of Run 304	49
Photo. 12	Test Piece of Run 305	50
Photo. 13	Test Piece of Run 306	50
Photo. 14	Test Piece of Vun 307	51
Photo. 15	Test Piece of Run 308	51
Photo. 16	Fuel Pin of Run 202	52
Photo. 17	Fuel Pin of Run 204	53
Photo. 18	Fuel Pin of Run 205	54
Photo. 19	Fuel Pin of Run 208	54
Photo. 20	Fuel Pin of Run 209	55
Photo. 21	Fuel Pin of Run 210	56
Photo. 22	Fuel Pin of Run 301	57
Photo. 23	Fuel Pin of Run 302	58
Photo. 24	Fuel Pin of Run 303	59
Photo. 25	Fuel Pin of Run 304	60
Photo. 26	Fuel Pin of Run 205	61
Photo. 27	Fuel Pin of Run 306	62
Photo. 28	Fuel Pin of run 307	63
Photo. 29	Fuel Pin of Run 308	64
Photo. 30	Outer Shell of run 205	65
Photo. 31	Outer Shell of Run 209	65
Photo. 32	Outer Shell of Run 304	66
Photo. 33	Outer Shell of Run 306	66
Photo. 34	Outer Shell of Run 307	67
Photo. 35	Outer Shell of Run 308	67
Photo. 36	Fuel Pin of Run 201 (enlarged)	68
Photo. 37	Fuel Pin of Run 202 (enlarged)	68
Photo. 38	Fuel Pin of Run 204 (enlarged)	69
Photo. 39	Fuel Pin of Run 205 (enlarged)	69
Photo. 40	Fuel Pin of Run 207 (enlarged)	70

Photo. 41	Fuel Pin of Run 209 (enlarged)	70
Photo. 42	Fuel Pin of Run 210 (enlarged)	71
Photo. 43	Fuel Pin of Run 303 (enlarged)	72
Photo. 44	Fuel Pin of Run 304 (enlarged)	73
Photo. 45	Fuel Pin of Run 305 (enlarged)	74
Photo. 46	Fuel Pin of Run 306 (enlarged)	74
Photo. 47	Fuel Pin of Run 307 (enlarged)	75
Photo. 48	Fuel Pin of Run 308 (enlarged)	75
Photo. 49	Fragmented Fuel Particles of Run 202	76
Photo. 50	Fragmented Fuel Particles of Run 204	76
Photo. 51	Fragmented Fuel Particles of Run 205	77
Photo. 52	Fragmented Fuel Particles of Run 303	77
Photo. 53	Fragmented Fuel Particles of Run 209 (≤ 100 mesh) ..	78
Photo. 54	Fragmented Fuel Particles of Run 209 (60~100 mesh) ..	78
Photo. 55	Fragmented Fuel Particles of Run 209 (32~60 mesh) ..	79
Photo. 56	Fragmented Fuel Particles of Run 209 (> 32 mesh) ..	79
Photo. 57	Fragmented Fuel Particles of Run 304 (≤ 100 mesh) ..	80
Photo. 58	Fragmented Fuel Particles of Run 304 (60~100 mesh) ..	80
Photo. 59	Fragmented Fuel Particles of Run 304 (32~60 mesh) ..	81
Photo. 60	Fragmented Fuel Particles of Run 304 (> 32 mesh) ..	81
Photo. 61	Fragmented Fuel Particles of Run 305 (≤ 100 mesh) ..	82
Photo. 62	Fragmented Fuel Particles of Run 305 (60~100 mesh) ..	82
Photo. 63	Fragmented Fuel Particles of Run 305 (32~60 mesh) ..	83
Photo. 64	Fragmented Fuel Particles of Run 306 (> 32 mesh) ..	83
Photo. 65	Fragmented Fuel Particles of Run 306 (≤ 100 mesh) ..	84
Photo. 66	Fragmented Fuel Particles of Run 306 (60~100 mesh) ..	84
Photo. 67	Fragmented Fuel Particles of Run 306 (32~60 mesh) ..	85
Photo. 68	Fragmented Fuel Particles of Run 306 (> 32 mesh) ..	85
Photo. 69	Fragmented Fuel Particles of Run 306 (≤ 100 mesh) ..	86
Photo. 70	Fragmented Fuel Particles of Run 307 (60~100 mesh) ..	86
Photo. 71	Fragmented Fuel Particles of Run 307 (32~60 mesh) ..	87
Photo. 72	Fragmented Fuel Particles of Run 307 (> 32 mesh) ..	87
Photo. 73	Fragmented Fuel Particles of Run 307 (≤ 100 mesh) ..	88
Photo. 74	Fragmented Fuel Particles of Run 308 (60~100 mesh) ..	88
Photo. 75	Fragmented Fuel Particles of Run 308 (32~60 mesh) ..	89
Photo. 76	Fragmented Fuel Particles of Run 308 (> 32 mesh) ..	89

Photo. 77	Fragmented Fuel Particles of Run 209 (enlarged, >32 mesh) .	90
Photo. 78	Fragmented Fuel Particles of Run 304 (enlarged, >32 mesh) .	90
Photo. 79	Fragmented Fuel Particles of Run 305 (enlarged, >32 mesh) .	91
Photo. 80	Fragmented Fuel Particles of Run 306 (enlarged, >32 mesh) .	91
Photo. 81	Fragmented Fuel Particles of Run 307 (enlarged, >32 mesh) .	92
Photo. 82	Fragmented Fuel Particles of Run 308 (enlarged, >32 mesh) .	92
Photo. 83	Disassembled Fuel Pin of Run 301	93
Photo. 84	Disassembled Fuel Pin of Run 302	94

1. は じ め に

軽水炉安全性研究の中に、PCM (Power Cooling Mismatch : 出力冷却不整合) という項目がある。このPCMというのは、重大事故等にはおそらく至らないが、出力と冷却が不整な異常な状態のことであり、原因は様々なことが考えられる。このPCMについて、種々の分野からいろいろな研究が開始されつつある。これらの研究の進行につれて、最終的には炉内実験で検証することの必要性が指摘されている。炉内で実験を行うとしたらどのような問題があるかについても議論が重ねられてきたが、その中の一つに燃料溶融が起った場合どのような現象が起るかという問題がある。その中でも、特にどの位の圧力波が発生するかということである。溶融燃料と冷却材が接触したときに発生する圧力波については、高速炉の開発の一環として行なわれてきた。しかし、この場合は、 UO_2 や PuO_2 とナトリウム冷却材の相互作用であって、PCM条件下についてそのまま適用するわけにはいかない。また、NSRRの反応度印加 (RIA) 実験で行なわれている燃料破損の知見をそのまま適用するわけにもいかない。なぜなら、燃料内温度分布や発熱時間が異なるからである。PCM実験条件を模擬しようとする、燃料体の周囲は冷却水でなければならない。溶融金属と水との相互作用の実験では、得られる知見に限界がある。このようなことから、溶融燃料と冷却材反応実験については、試行的な実験は多少あるが、確立された実験技術や実験結果のまとめ方の方向付けすらないのが現状である。今回作成した試験装置および実験結果は、今までに比べてかなり軽水炉燃料におけるPCM条件を模擬することができたと考えている。これらの詳細を、報告する。

2. 実験装置の概要

2.1 実験装置の概要

熔融燃料-冷却材反応試験装置の概略を、Fig. 1 に示す。この試験装置は、大別して、次の5部から構成されている。第1は予熱および直接通電加熱に使用する電源部 (Fig. 1 の左側下部)、第2はこれらの電源を操作する操作部 (中央部)、第3は試験体を取付けるテスト部 (右側上部)、第4は得られたデータを記録する記録部 (左側上部)、そして前述テスト部をサポートするサポート部 (右側下部) である。電源部は、通電電流のコントロールが容易でかつ安価である交流アーク溶接機2台からなっており、加熱条件に合わせて8~100 A用と70~500 A用とを使いわけける方法をとった。交流電源とした理由は、使用する模擬燃料体ジルコニア (ZrO_2) の物性によっている。すなわち、ジルコニアは直流で長時間通電すると、それぞれの電極にジルコニウムと酸素とが分解して析出する性質があるからである。操作部には、前述の2台の溶接機を使い分け、かつ通電電流および電圧を読み取るためのパネルがある。さらに、安全のためNFBなどが付設されている。テスト部は、テストピースを取付けるための支持台、エアシリンダに接続されたピストン、冷却水供給のための配管、加熱電源用ターミナル、センサー取付用ターミナルなどから構成されている。また、データ記録部は、テスト部内各センサー (圧力1点、冷却水温度1点および燃料表面温度1点) からの信号を増巾するアンプとそれらを記録するための電磁オシログラフとから構成されている。そして、サポート部には、テストピース内排気用のポンプ・冷却水加圧用タンクとアルゴンガスボンベ、エアシリンダー用コンプレッサー、操作バルブ、圧力計などが取付けられている。

次に、テスト部およびサポート部の一部の詳細をFig. 2 に示す。主として、図の左半分がサポート部であり、右半分がテスト部である。サポート部のうち、上部 (図の左上) がテストピース内への給水加圧のための配管であり、下部 (図左下) が排水および脱気のための配管である。試験にあたっては、その都度テストピースの冷却水を入れる部分の脱気を行った後給水タンクより給水し、その後加圧タンクより約2気圧に冷却水を加圧する。この加圧は、アルゴンガスを用いて行う。

テストピースに通電をし、試験を終えた後、脱気ポンプを作動させ、ドレンタンクに冷却水を取除くか、または直接通電加熱によってテストピース内被覆管の破損が大きいときはテスト部内に冷却水が流出するから下部に設置されたコックを開け回収する。通常は、テスト部内に流出した冷却水を回収することが多い。

2.2 試験体の構成

前述のテスト部に、各試験ごとに取付けられる試験体の構成をFig. 3 に示す。この試験体は、各実験ごとに破損し、かつ解体を行うので、その都度新しいものと交換される。中央部に円筒中空 (パイプ状) のジルコニアペレットがあり、中心に予熱用のヒーターが挿入される。模擬燃

料体としてジルコニア (ZrO_2) を選択した理由および予熱ヒーターを使用した直接通電法については、次節で詳しく述べる。ペレットの外側には、ボロンナイトライドの絶縁体 (パイプ状) を経て、被覆管 (SUS 304) がある。そして、その外側に冷却水があり、外筒がある。ペレットおよび予熱ヒーターの上下には、タングステン製の電極がある。上部電極は、エアシリンダーのピストンに接続されており、電極とペレットおよび予熱ヒーターとの接触を保つようになっている。エアシリンダーの加圧空気系は約 1.5 気圧である。ペレット部右側には、圧力センサーが取付けられる。そして、左側下部には、脱気および給水系の配管が接続される。温度センサー (アルメルクロメル熱電対) は、ペレット外側に刻まれた溝に取付けられ、その外側より先に述べたボロンナイトライド絶縁体によってしっかりと固定される。この他にペレット中央部に相当する位置で圧力センサーと 90 度の位置 (紙表の手前と向う側) に合計 2 本の温度センサー (アルメルクロメル熱電対) が取付けられている。これら 3 本の温度センサーの零点補償および冷却水の温度コントロールは、本実験ではなされていない。実験開始前に冷却水がもれ出することは当然ないが、ペレットが溶融し、被覆管がこわれ、冷却水と接した時点で、Fig. 3 に示す J および K に相当する部分より水および水蒸気が噴出する。実験終了後、M に相当する部分よりテストピースが取りはずされるが、このときテストピース内に残った水や微細化した粒子等が回収される。次に、ペレットの大きさなどを、Fig. 4 に示す。ジルコニアペレットの大きさは、長さ 30 mm、直径 8 mm である。そして、予熱ヒーター用の穴は、直径 3 mm である。被覆管は、SUS 304 ステンレス鋼製であり、外径 10.7 mm、内径 10 mm である。予熱ヒーターは、外径 2.8 mm のパイプ状または棒状である。

2.3 直接通電法

直接通電法¹⁾とは、加熱対象物体そのものに電流を通じ発熱体として使用する加熱方法であり、溶融燃料-冷却材反応実験でよく用いられる方法である。加熱方法としては、この他に、冷却材近傍で電気炉等によって燃料ペレットや金属を溶融して落下させ、冷却材と接触させる方法などがある。¹⁾しかし、後者の方法では、冷却材と接するまでの間に、溶融した燃料または金属の表面状態 (主として熱的な意味で) が変化してしまう。また、滴状に落下するため、接触する表面積が大きくなる。これらの問題点が指摘されている。

今回の実験は、PCM²⁾関連実験の一つである。PCM 実験を炉内ループ等を用いて行うと仮定した場合、燃料体が溶融して破損する可能性もあり得る。もし、そのようなことが生じた場合、どのように破損し、そのときどの位の圧力波が発生するかを知るために、本実験が計画された。そのため、炉内で照射される軽水炉型燃料体とできるだけ同じ条件で実験を行うことが望まれる。このような観点から、上述の直接通電加熱法を用いることにした。また、模擬燃料体として、軽水炉に使用される UO_2 ペレットと物性的に酷似した ZrO_2 (ジルコニア) ペレットを用いることにした。ジルコニアは、 UO_2 と同様に直接通電法に適した電気的特性を有している。その他に、融点はおおよそ 2400 ~ 2500 °C であり、結晶構造、分子比熱、ペレットの理論密度との比、ペレット作成時の添加物、焼結剤、熱伝達特性、溶融後の水との化学的反応性などについても、 UO_2 と類似している。しかも、安価で様々の寸法のものが市販されており入手しやすい。直接通電法で、

重要な物性はその電気的特性である。Fig. 5 に本実験で用いたペレットの導電率変化を示す。ジルコニアペレットは、常温では絶縁体であるが、温度の上昇に伴ってその電気抵抗は減少し高温（約 1000℃以上）では良導体に徐々に変化してくる。この性質は、 UO_2 ペレットも同じである。したがって、約 1000℃以上では直接通電が可能となる。しかし、常温から約 1000℃までの間は、何らかの方法で予熱しなければならないことになる。

予熱の方法としては、被覆管ごとあるいはテストピースごと全体を高周波加熱炉等で加熱する方法など様々する方法がある。しかし、本実験では、ペレット中心部に穴をあけ予熱線を通しこの予熱線で加熱する方法を用いることにした。その理由は、2つある。第1は、前者のような予熱方法では被覆管の周囲を取囲んでいる冷却水をも一緒に加熱してしまい、冷却水の一部は直接通電開始前に沸騰し蒸気となってしまふと考えられるからである。第2の理由は、被覆管内温度分布の点にある。例えば、高周波加熱による方法を用いると周知のようにペレット中心より被覆管近傍の温度の方が高くなる。反応度事故時とは異なり、PCM時には、ペレット中心の方が温度が高くなると考えられるからである。これらの理由から予熱線による予熱方式をとることにした。Fig. 4 に示すように、予熱線は、ペレット直接通電用の電極に取付けられている。これは、予熱終了後直ちに直接通電に切換わるようにするためである。このことについては、後述する。

次に、このようにして作成されたテストピースが、予熱を経て直接通電に移れるであろうか。その過程を模式的に、Fig. 6 に示す。予熱開始時（図中1）には、電極とジルコニアペレットとは十分には接触していない。しかし、予熱線と電極は十分に接触している。そのため、予熱線を通じて電流が流れ予熱が始まる。予熱が進むと（図中2）、ジルコニアペレットは内側から加熱され、ペレット内側ほど温度が高くなる。そして、予熱線が融点を越えると切れて同時にみかけ長さは短くなる。上部電極は、前述したようにエアシリンダーによって下向きに押されているから今度はジルコニアペレットと十分に接触する。予熱線は、ジルコニアペレットを十分に（約1000℃以上に）加熱しかつ溶断後十分にみかけ長さが短くなるように設計されている。ペレット内側は約 1000℃以上になっているから、ペレットと電極の接触によって直接通電が開始される（図中4）。このとき、ペレット内側ほど温度が高いため、内側ほど良く電流が流れ、したがって内側ほどよく加熱される。このようにして、加熱が加速され、遂には、ペレット内側より溶融し始める。そして、溶融した量が十分でかつ被覆管が溶けると、溶融燃料は冷却水と接触し、反応する（図中5）。

このとき、実験結果からペレットの一部はもとの長さを保っていることおよび実験後の電極間の距離がジルコニアペレットだけを取付け、予熱線を取付けなかったときと有意の差はないことなどから、電極を加圧しているエアシリンダーの圧力によって溶融燃料を押出すようなことはなかったと考えている。また、予熱線は溶断直前から直後にかけて、一部が揮発してジルコニアペレットの内側に付着し、化合物をつくる可能性がある。そしてこの化合物は一般にペレットそのものより融点が低くかつ電流が通じやすいが、この化合物によるペレットの溶融の可能性については、ほとんどないと推察される。それは、直接通電には至らなかったが、予熱線が断線したテストピースを解体して内部を観測すると、ペレット内面がわずかに変色しているのみで、ペレット内部に侵透していないことによる。

2.4 実験手順

まず、加熱用電源がしゃ断されていることを確認する。その後、テストピースの組立にはいる。テストピース組立の手順を、Fig. 7 に示す。下部電極を支持台に固定し、ボロンナイトライド製下部絶縁管をはめる。予め圧力センサーを取付けた外筒をはめる。外筒を下部に移動し、外筒上部に下部電極上端があらわれるようにセットする。下部電極に予熱線を接続し、ジルコニアペレットをはめ込み、さらにその外側にボロンナイトライド製中間絶縁管をはめ込む。そしてペレット表面上の溝に、熱電対を挿入する。上部電極と予熱線を接続し、電極外側にボロンナイトライド製上部絶縁管をはめ込む。そして、外筒を上に向かって徐々に移動させ、所定の位置にセットする。最後に、脱気および給水管を接続する。この脱気および給水管と前述圧力センサーの取付けは、スウェージロックを用いて行われる。

主要部分の絶縁を確認した上で、冷却水を外筒内部へ満す作業に移る。まず、外筒内を十分に脱気する。このときに、スウェージロック部のもれのないことを確認する。次に、気泡の混入のないように徐々に冷却水を入れる。加圧タンク内にアルゴンガスを満し、冷却水を約2気圧に加圧し、その後サポート部とテストピースとの間をバルブでしゃ断する。テスト部上部のエアシリンダーを加圧して、上部電極を下方へ押さえる。その他に、記録部の調整やセンサー類の接続などを行う。

以上で、実験の準備を終了する。そして、通電を開始する。通電は、直接通電が開始されるまで30～60秒ステップで徐々に電流を増加していく。直接通電開始は、ペレット表面に取付けた熱電対の指示値の急上昇によって容易に知ることができる。しかし、電流を増加させていく途中で予熱線が断線し、直接通電に至らなかった場合もあった。直接通電が開始され、ペレットが溶融して冷却水と接触すると、一般に先に述べたように外筒上下の電極部近傍より水と蒸気が噴出する。この時点で、電流はもはや流れなくなる。そして、電源をしゃ断する。しばらく静置して冷却水が冷えてから、解体作業に移る。

給水管を取りはずし、流出した冷却水と微細化した燃料体の粒子を回収する。電極部ごと外筒を取りはずす。ジルコニアペレット部は溶融して電極部に固く付着しているため、電極部をテストピースより取除くことは容易にできない。テストピース解体の手順をFig. 8 に示す。図中1の部分パイプカッターで切りはなす。そして図中2の部分切断すると、外筒部を主とした部分と被覆管およびペレット部を主とした2つの部分に分割される。被覆管およびペレット部を主とした部分は、図中3の部分で切断（ファインカッター使用）される。また、外筒を主とした部分は、図中4の部分で切断した後、図中5および6の部分で切断される。このとき、外筒内に存在する微細化した燃料粒子を回収する。そして、外筒内面、被覆管およびペレット部などを観察する。

通電電流は、使用する予熱線に対して大きすぎても小さすぎても直接通電には至らない。通電電流の大小は、予熱速度の大小と関係する。予熱速度が小さすぎる場合、すなわち通電電流の小さい場合は、燃料ペレット部の温度はおおよそ1000℃以下のところで平衡に達しそれ以上の温度は得られず、直接通電には至らない。また、予熱速度が大きすぎる場合、すなわち通電電流の大きい場合には、ペレット内側の温度がおおよそ1000℃以上に上昇しないうちに予熱線の温度が融点以上に上昇し、断線してしまい、直接通電には至らない。このようなことから、予熱速度すなわち

通電電流値はある一定の範囲内でなければ直接通電をすることはできない。

上記の予熱条件に加えて、次のようなことも考慮しなくてはならない。直接通電を可能にするためには、ペレットの内側の温度が、上下の電極間で連続しておよそ 1000℃ 以上にならなくてはならない。テストピースのペレット部近傍の構造から、電極部に接している付近のペレットは、電極部から離れているペレットに比べ温度が低い。本試験装置には、予熱の進行につれて通電量をコントロールするような装置はない。そこで、次のような加熱手順を取ることにした。直接通電には至らないような小さい電流で約 20～40 秒通電を行う。その後、60～180 秒、場合によってはそれ以上の時間静置し、ペレット周辺の温度が上下の電極方向に均一になるようにする。その後、直接通電に至ると考えられる電流を通す。もし、直接通電に至らなかった場合は、上記のような手順を繰り返す。直接通電に至らないような電流で加熱することを予備加熱と呼ぶことにする。この予備加熱は、1 回以上行う。予備加熱は、直接通電可能な電流値より小さい電流で行うが、その電流値は大きすぎても小さすぎても不都合のようである。また、静置時間が長すぎると冷却水温度が上昇し、短かすぎるとペレット内側の温度が均一とならない。しかし、本報で示す実験の前に行った各種予備試験の実験結果から経験的に言って、予備加熱を行った方が直接通電を効率的に行えと考えられる。予備加熱を行わなかった場合には、直接通電可能な電流を流しても、主としてペレット内側と外側の温度差によりペレットが直接通電開始前にこなごなに割れてしまうことが多い。このことから、予備加熱は必要性であると考え、すべての実験時に予備通電を行った。

3. 実験結果と考察

3.1 実験結果の概要

直接通電によって試験した試験体（テストピース）は、合計15本である。実際にはこの他に、直接通電試験のための各種の条件を見いだしたりするために使用したものや、あるいは試験の途中で予熱線断線のために直接通電には至らなかった試験体がある。直接通電に至った試験体は、大別して3種類に分類することができる。第1は、Fig. 3に示したテストピースとパイプ状予熱線を組合せたものである。第2は、Fig. 9に示したパイプをFig. 3に示したテストピースの被覆管外側に取付け棒状予熱線を使用したものである。外側のパイプと被覆管とのギャップは2 mmであり冷却水で満される。この試験体は、実際の軽水炉燃料体のように隣接して他の燃料棒が存在する場合に、燃料溶融が起るとどうなるかを模擬するためのものである。第3は、Fig. 3に示したテストピースに棒状予熱線を使用した試験体である。これらの詳細については、次節以降で述べる。試験体番号は、上記3種の試験体に対してそれぞれ201～210, 301～302および303～308である。また、得られた温度および圧力のデータには、何回目の通電であるかを示す番号を実験番号の後に付けて記述した。例えば、204の実験の3回目の通電によるデータの場合は204-3である。各実験の諸元をTable 1に、得られた冷却水圧力変化・冷却水温度変化およびペレット表面温度変化をFig. 10から24に、そして試験体解体後の様子をPhoto. 1から15に示す。また、各部の拡大図をPhoto. 16から48に示す。そして、これらの写真から破損の様子をスケッチしてみた。それらをFig. 25および26に示す。これらのスケッチは、Photo. 1から48を見るときの参考資料であってあまり厳密には画かれていない。Fig. 25に示す被覆管外観のスケッチは、Fig. 27に示すように、被覆管表面に円筒状の紙をあてスケッチし展開したような形式で画かれている。Fig. 25のスケッチでは、線で囲まれた部分が変色した部分（かっ色）であり、その内側に線で囲まれ斜線をほどこしてない部分がさらに強く変色（濃かっ色ないし黒色）した部分を示している。また、斜線をほどこした部分は、溶融しあるいは穴のあいた個所である。RUN 204のように、ボロンナイトライド絶縁体が開口部より観察できるものもある。また、RUN 306で示すように、開口部が反対側にある他の開口部と通じてしまっている（AとA'、BとB'）ようなものもある。同図中の数値dは、開口部のおおよその深さを示す。Fig. 26では、線で囲まれた部分で斜線をほどこしてない部分は、変色（かっ色または黒色）した個所または薄い付着物の観察される個所である。また、⊗印を付した位置は熱電対の取付け位置を示す。斜線をほどこした部分は、溶融物が付着したままで取除くことのできないものを示し、tでそのおおよその厚さを示している。他の付着物はテストピース解体の途中で、外筒内面より容易に剥離してしまった。また、Photo. 49からPhoto. 82に、微細化した溶融燃料粒子の様子を示す。このうち、Run 209, 304, 305, 306, 307および308については、微細化した粒子の量が多いため、32 mesh 以上、32～60 mesh, 60～100 mesh および100 mesh 以下の4種に分け、Photo. 53から76に示す。これらのうち、32 mesh 以上の各Runの試料について、その形状を識別できるようにPhoto. 77から82にその一部

の拡大写真を示す。観測された粒子の形状は、球形のものもあり、またそうでないものもある。主として ZrO_2 ペレットが溶融したものであるが、一部には、被覆管のステンレス鋼 (SUS 304) が溶融したものもみられる。また、一部の粒子はこれら上述のものが溶融し混ざり合ったりしたものがみうけられる。このことは、32 mesh 以下 100 mesh 以上の粒子についても、ほぼ言える。しかし、100 mesh 以下の小さい粒子については、そのほとんど全部が ZrO_2 の溶融物のようである。先に述べた第2の型のテストピース (Photo. 8 および 9) の燃料体部を解体し、外側のパイプを取除いた。そのときの内側に挿入されていた燃料被覆管の様子を、Photo. 83 および 84 に示す。

また、実験結果の要約を Table 1 に示す。この表には、圧力波・微細化粒子量および生じた欠損孔の数などを収録してある。

3.2 標準型試験体実験の結果と考察

標準型試験体には、3.1 節で述べたようにパイプ状予熱線を用いたものと棒状予熱線を用いたものの2種類がある。それぞれ、Run 201～210 と 303～308 に対応している。これら2種類は、予熱線の形状と断面積が異なる。したがって、予備加熱の通電電流値が異なる。パイプ状予熱線の場合、その値はおおよそ 160 ないし 190 A であり、棒状予熱線の場合、230 ないし 270 A である。どちらの場合も印加電圧は、約 85 V である。予備加熱電流値が異なると、直接通電に移るときのペレットの温度 1000℃ 以上の部分の体積が異なる。このことは、直線通電後のペレット溶融量の変化につながる。Table 1 の実験結果からもわかるように、一般的に言って予備加熱電流が大きい場合には、ペレット溶融量も多く、発生する圧力波も大きい。また、生成するペレットの微細化粒子量も多い。圧力波が発生した後冷却水中へ出た粒子のもつ熱量が大きい場合には、数秒後から数秒間にわたって冷却水中に蒸気の発生が見られる場合がある。たとえば、Fig. 23 の Run 307 がそのよい例である。このような場合には、概して冷却水中へ噴出した粒子の量が多い。ペレット表面に取付けられた熱電対の指示値変化については、一般的に言ってあまり共通な点は見出せない。それは、熱電対の取付け位置があまり厳密ではないことと、ペレット溶融がペレットのどの位置で主として起るかが一定していないことによる。しかし、ペレット溶融時刻は、ほぼ共通して読み取ることができる (Fig. 10～24 の Tb)。燃料溶融までの所要時間は、通電電流値などとあまり相関関係がないようである。

発生した圧力波は、最大 10～20 気圧程度であり、先に述べた多量の水蒸気発生の方を含めても最大 35 気圧程度である。このときの冷却水の温度上昇は、数十度(℃)以下である。したがって、冷却水が沸点近傍の場合には、発生する圧力波は、上記の値より大きくなることも考えられる。圧力波の大小は、主として溶融し微細化した燃料の量に依存すると考えてよいようである。

3.3 2重管型試験体実験の結果と考察

2重管型試験体は、3.2 節で述べた標準型試験体の被覆管外側に Fig. 9 に示すパイプ (SUS 304 製) を取付けた試験体である。試験に際して、被覆管とパイプとの間は冷却水で満される。

この試験体は、3.1節でも述べたように隣接して他の燃料体が存在する場合に燃料溶融が起るとどのようなようになるかを模擬するためである。

実験結果を、Fig. 17, 18 および Photo. 8, 9, 22, 23, 83 および 84 に示す。Photo. 83 および 84 からわかるように、燃料溶融量は標準型試験体の場合よりも多い。また、外側のパイプとのギャップ（約 2 mm であり、冷却水流路に相当する）は、溶融した燃料体によりほぼ完全にふさがっている。外側に取り付けたパイプの変色は、Photo. 22 および 23 からわかるように外側表面にまで達しているが欠損孔を生ずるほどの破損には至っていない。発生した圧力波は、標準型試験体に比べて小さくはない。溶融した燃料は、外側パイプとの間に存在するのみであり、微細化して冷却水へ噴出した粒子痕跡はみられなかった。回収した冷却水は、無色透明であった。

4. 結 論

PCM実験を炉内で燃料溶融が起るまで行くと仮定した場合、次のようなことが予想される。燃料溶融は、かなり局所的に起り、燃料体全体が溶融する前に局所的破損が起る。しかも、溶融量がある程度以上少ない場合には、破損が燃料体全周に至ることはない。すなわち、燃料体が分断されることは、あまりないと考えられる。また、1本の燃料体を照射して実験を行う場合には、微細化した粒子の冷却水への噴出がかなりあると考えられる。粒子の大きさは、数mm以上の大きなものから100 mesh以下の細かいものまで広い範囲にわたる。照射キャプセルまたはループ構造物に付着した数mm以上の溶融物も、その後剥離する。バンドル照射で実験を行う場合で、中央の燃料体が溶融する場合には、溶融物によってその燃料体周囲の流路が閉塞される可能性が大きいであろう。しかも、微細化粒子量はかなり少ないであろう。そして周囲の燃料体が、大きく破損することはないとしても熱的に何らかの局所的影響を受けるであろう。発生する圧力波は、シングルピンおよびバンドル照射いずれの場合も燃料溶融あるいは破損の程度が同じであれば大きな差はない。そして、今回のような実験条件および溶融の場合は、大きくて30気圧以下であろう。溶融量が多く多量の蒸気発生があったとしても、せいぜい40気圧位であろう。いずれにせよ、燃料溶融後の燃料体破損の様子は、RIA時のそれとはかなり異なり、局所的であり、燃料体内側ほど物性的変化が大きいことが特徴的である。

溶融燃料-冷却材反応実験は、主として高速炉の開発に関連して実験が進められてきた。また、実験の困難さから、低融点金属（たとえば、錫、ハンダなど）を溶かして流込むなどの方法がとられてきた。今回の実験のように、冷却水が燃料体を取囲んだ状態での溶融燃料-冷却材反応実験は、NSRRやPRTRなどの炉内実験⁴⁾を除いておそらく始めてであろうと思われる。このため、実験に当っては解決しなければならない問題は多くあったし、本実験後も未解決の問題が多数残っているが、従来行われてきた実験に比べてはるかにPCM条件下に近い状態で実験を行うことができたと考えている。本研究は、本報告をもって終了するが、今後実験を行うとしたら、冷却水温度のコントロールを可能にすること、燃料溶融量をコントロールできるようにすること、 UO_2 ペレットを用いて実験を行うようにすること、そして金相的解析も考慮して試験体を設計することなどを考慮に入れる必要があるだろう。

謝 辞

本実験を開始するにあたって、動力炉核燃料開発事業団・大洗計算室水田浩氏に、ナトリウムと溶融燃料の反応試験の経験から多くの有益なご意見をいただきました。試験体の解体および写真撮影については、川崎了氏を始めとする安全工学部・燃料安全第3研究室の多くの方々にご協力をお願いしました。また、本稿をまとめるにあたって、米国NRC（原子力規制局）によりNUS社（Nuclear Utility Service）から派遣されたC.K. Lewe氏に英文を、そして内容について安全工学部長・能澤正雄氏、安全工学第2研究室岩村公道氏にご検討いただき有益なご意見をいただきました。これらの方々に、深く謝意を表します。なお、本試験装置の設計製作にあたって、宮尾特殊装置製作所・宮尾次郎氏の尽力のあったことを付記します。

文 献

- 1) "Third Specialist Meeting on Sodium/Fuel Interaction in Fast Reactors", PNC N251 (76-12) (1976).
- 2) T. Hoshi et al., "Review of Current Topics on Power Cooling Mismatch Experiments", JAERI-M 6927 (1977).
- 3) Reactivity Accident Laboratory et al., "Quarterly Progress Report on NSRR Experiments (5)", JAERI-M 7554 (1978).
- 4) M.D. Freshley, "UO₂-PuO₂-A Demonstrated Fuel for Plutonium Utilization in Thermal Reactors", Nucl. Tech. 141 (1973).

謝 辞

本実験を開始するにあたって、動力炉核燃料開発事業団・大洗計算室水田浩氏に、ナトリウムと溶融燃料の反応試験の経験から多くの有益なご意見をいただきました。試験体の解体および写真撮影については、川崎了氏を始めとする安全工学部・燃料安全第3研究室の多くの方々にご協力をお願いしました。また、本稿をまとめるにあたって、米国NRC（原子力規制局）によりNUS社（Nuclear Utility Service）から派遣されたC.K. Lewe氏に英文を、そして内容について安全工学部長・能澤正雄氏、安全工学第2研究室岩村公道氏にご検討いただき有益なご意見をいただきました。これらの方々に、深く謝意を表します。なお、本試験装置の設計製作にあたって、宮尾特殊装置製作所・宮尾次郎氏の尽力のあったことを付記します。

文 献

- 1) "Third Specialist Meeting on Sodium/Fuel Interaction in Fast Reactors", PNC N251 (76-12) (1976).
- 2) T. Hoshi et al., "Review of Current Topics on Power Cooling Mismatch Experiments", JAERI-M 6927 (1977).
- 3) Reactivity Accident Laboratory et al., "Quarterly Progress Report on NSRR Experiments (5)", JAERI-M 7554 (1978).
- 4) M.D. Freshley, "UO₂-PuO₂-A Demonstrated Fuel for Plutonium Utilization in Thermal Reactors", Nucl. Tech. 141 (1973).

Table 1 Summary of Experimental Results

Run Number	Type of Test Piece	Current (A)	Tb (sec)	Room Temp. (°C)	Press. of Water at Beginning (atm.)	Shock Wave (atm.)	*1	*2	*3
201-2	A	160	34.4	25.3	2	0	-	-	-
202-2	A	173	39.6	24.2	2	(-10)	-	+	0+3
204-2	A	187	25.7	23.6	2	(-10)	-	+	1+2
205-2	A	175	29.3	25.5	2	+1 (-7)	-	+	0+3
208-2	A	180	15.6	26.0	2	+1 (-1)	-	+	2+0
209-2	A	187	5.5	26.0	2	(-11)	+	++	1+1
210-2	A	190	12.9	23.5	2	0	+	-	0+1
301-2	B	164	19.9	24.5	2	+12	+	-	-
302-2	B	168	25.1	24.5	2	+31	++	-	-
303-3	C	240	26.2	24.5	2	+3 -3	-	++	2+1
304-3	C	255	21.6	24.5	2	+8 -5	+	+++	2+4
305-2	C	260	10.9	23.8	2	+2 -4	-	+++	1+3
306-3	C	238	20.1	23.8	2	+11 -4	-	+++	1+6
307-2	C	235	16.2	24.0	2	+9 -3	++	+++	1+4
308-3	C	268	12.2	24.0	2	+16 -3	++	++	1+7

A: Standard type test piece + Pipe type preheater
 B: Double cladding type test piece + Rod type preheater
 C: Standard type test piece + Rod type preheater
 Tb: Time from beginning to fuel melting

*1: Probability of steam explosion
 *2: Amount of fragmented particles
 *3: Number of defect hole (large + small)
 (): Slow leakage of coolant water

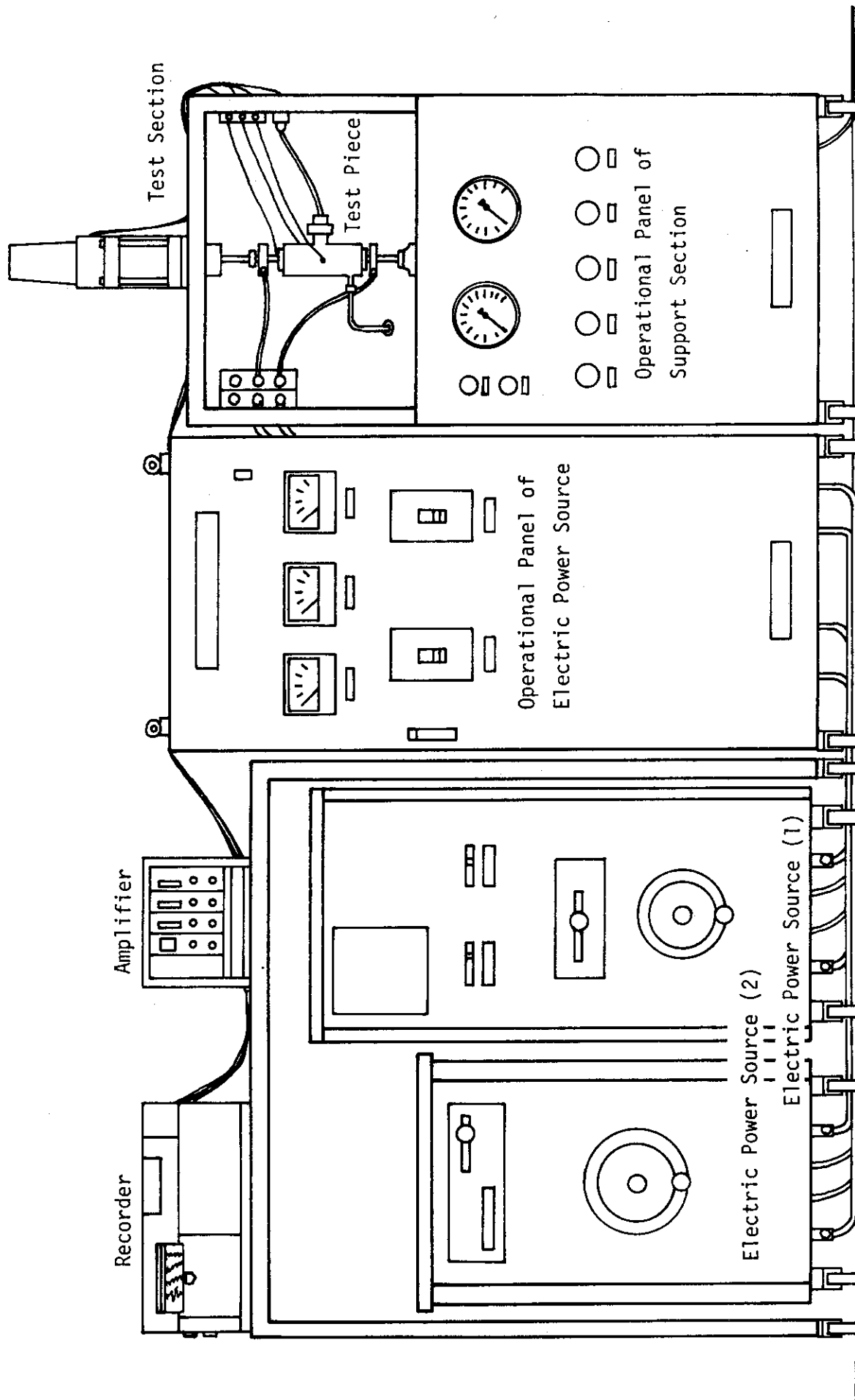


Fig. 1 Profile of Fuel-Coolant Interaction Test Facility

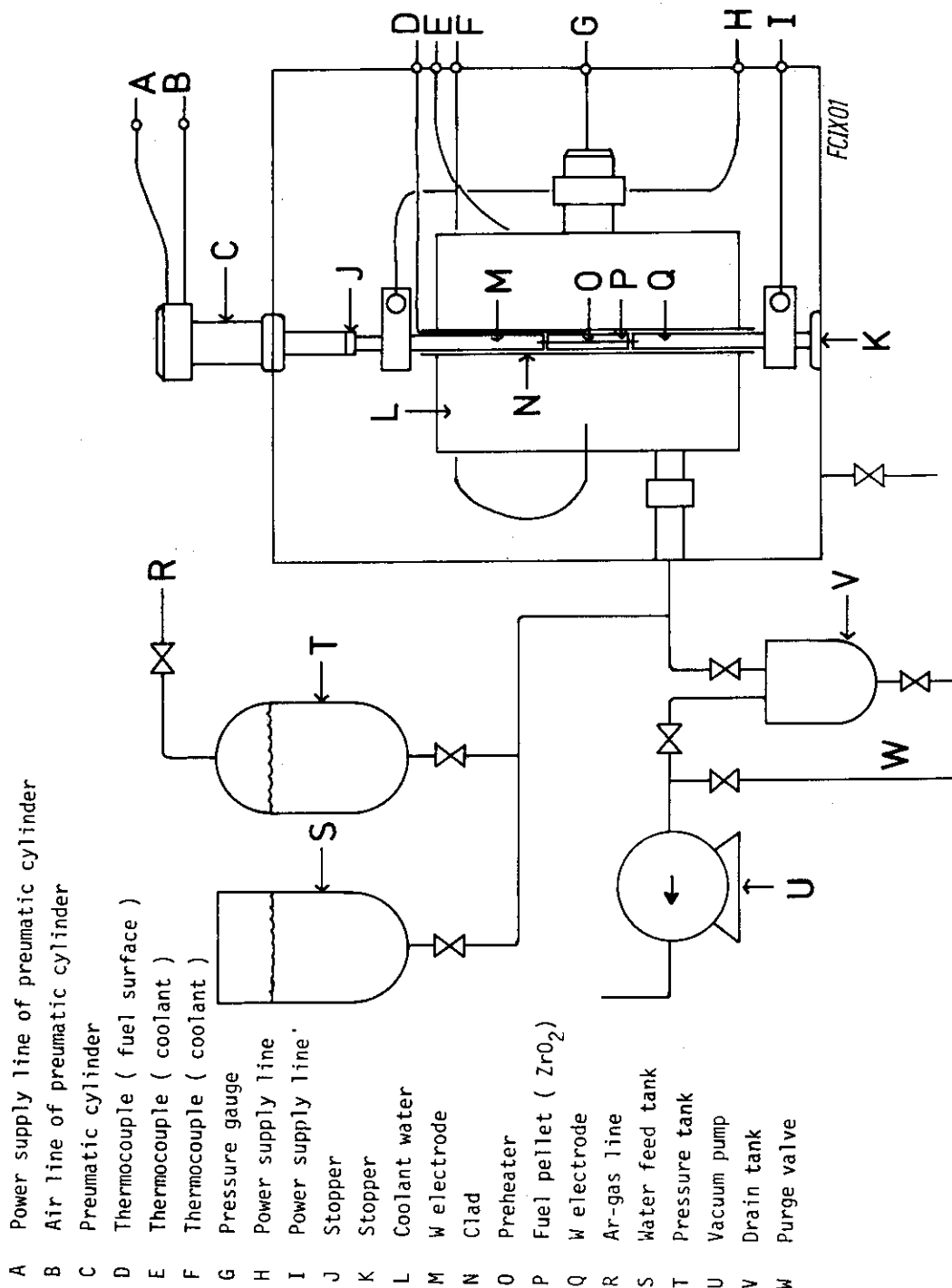


Fig. 2 Schematic Diagram of Test Section

- A Outer shell
- B Coolant water
- C BN electric insulator
- D Clad
- E Thermocouple (fuel surface)
- F BN electric insulator
- G Fuel pellet (ZrO_2)
- H Preheater
- I Thermocouple (coolant)
- J W electrode
- K W electrode
- L Pressure gauge
- M Water feed line

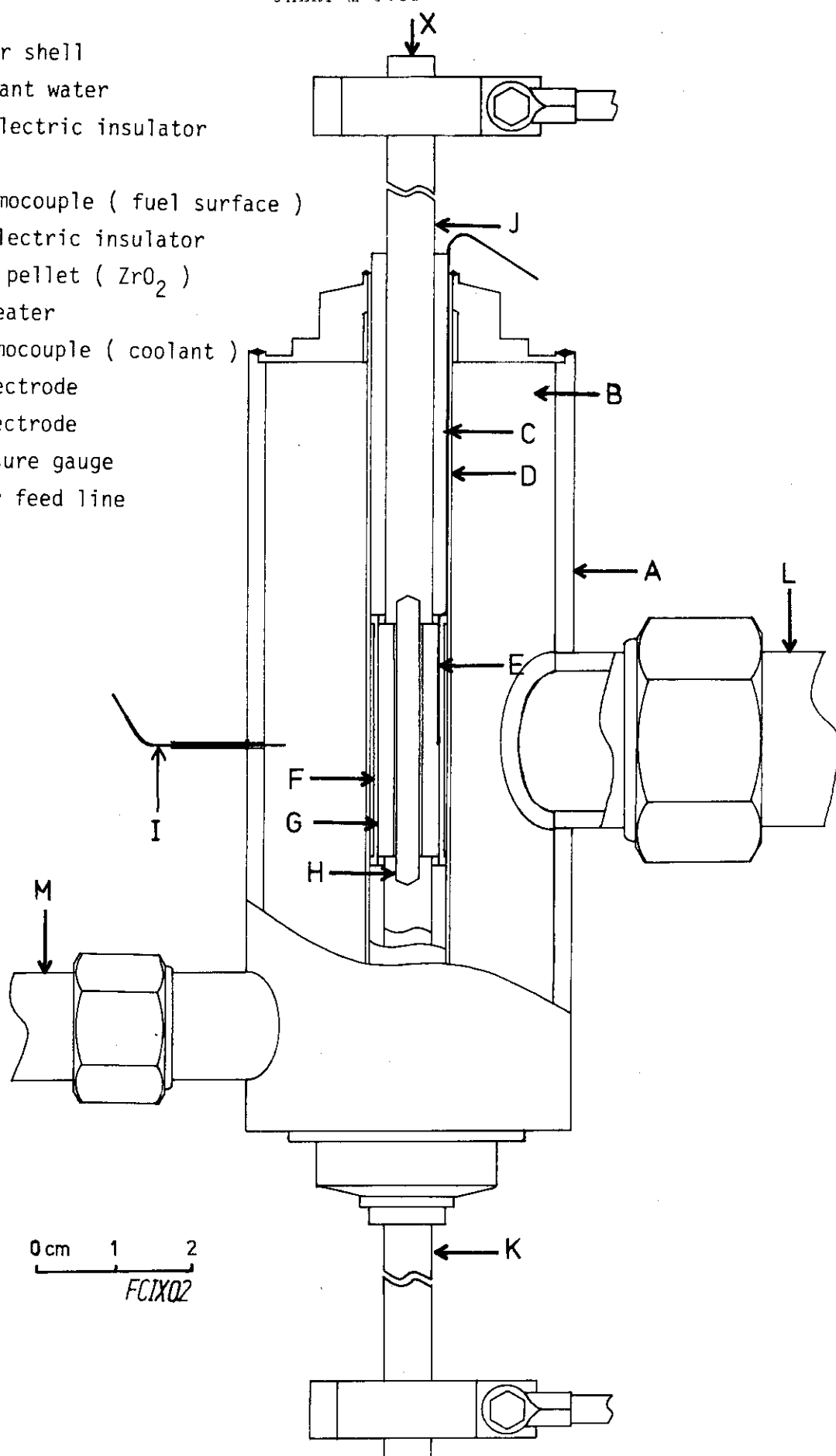


Fig. 3 Structure of Test Piece

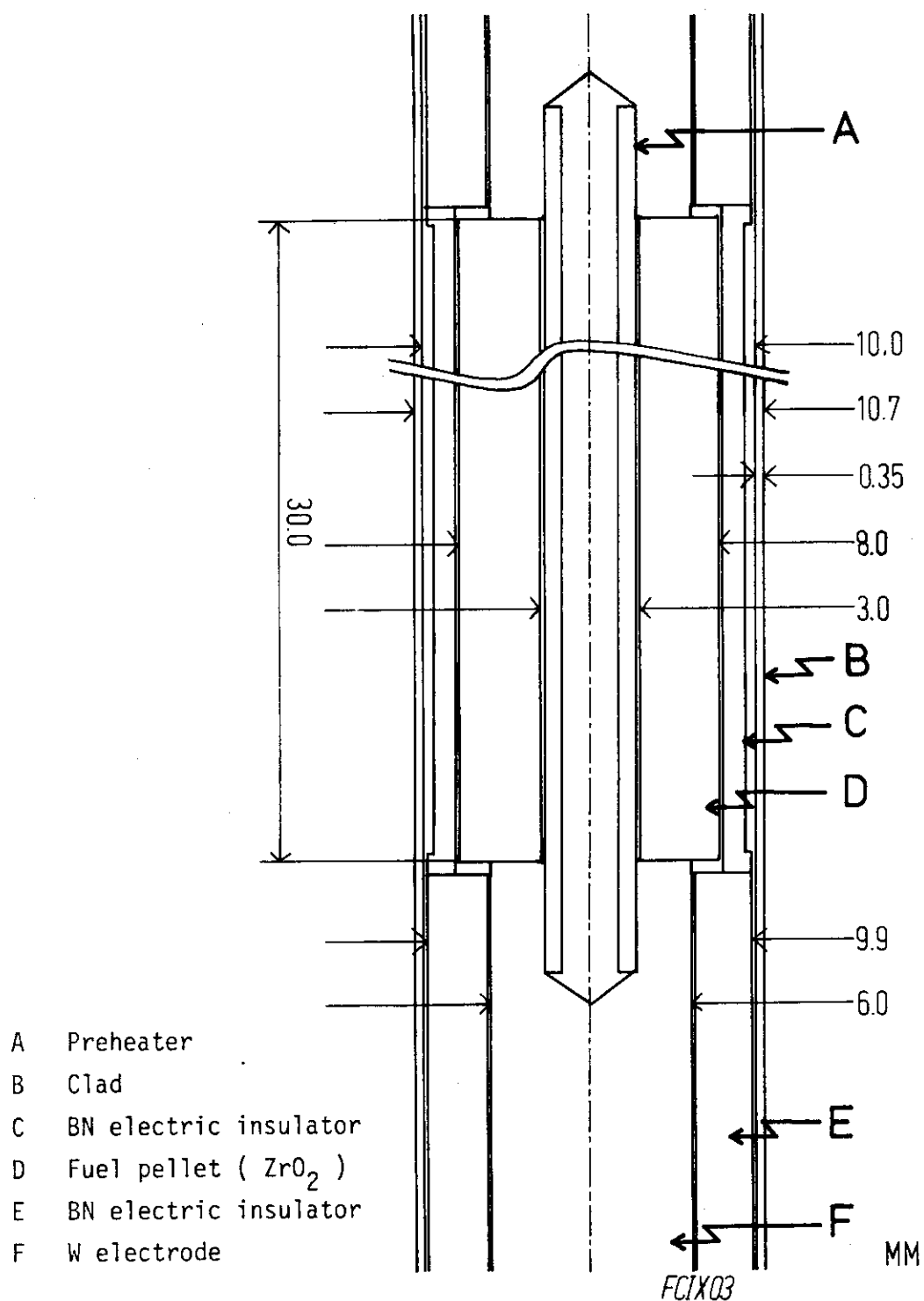


Fig. 4 Dimensions of Test Piece

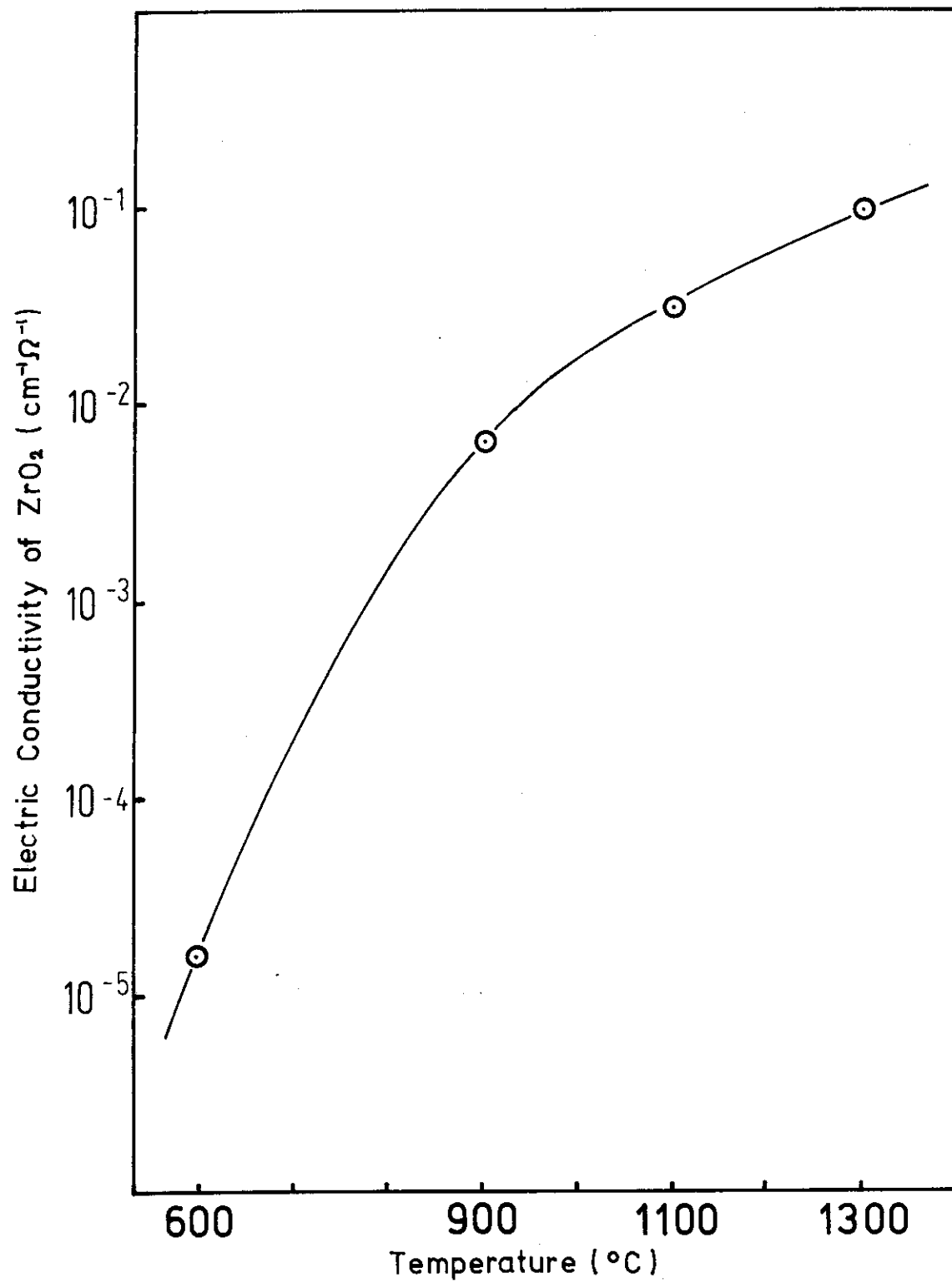


Fig. 5 Electric Conductivity of ZrO_2 Pellet used in the Test Piece

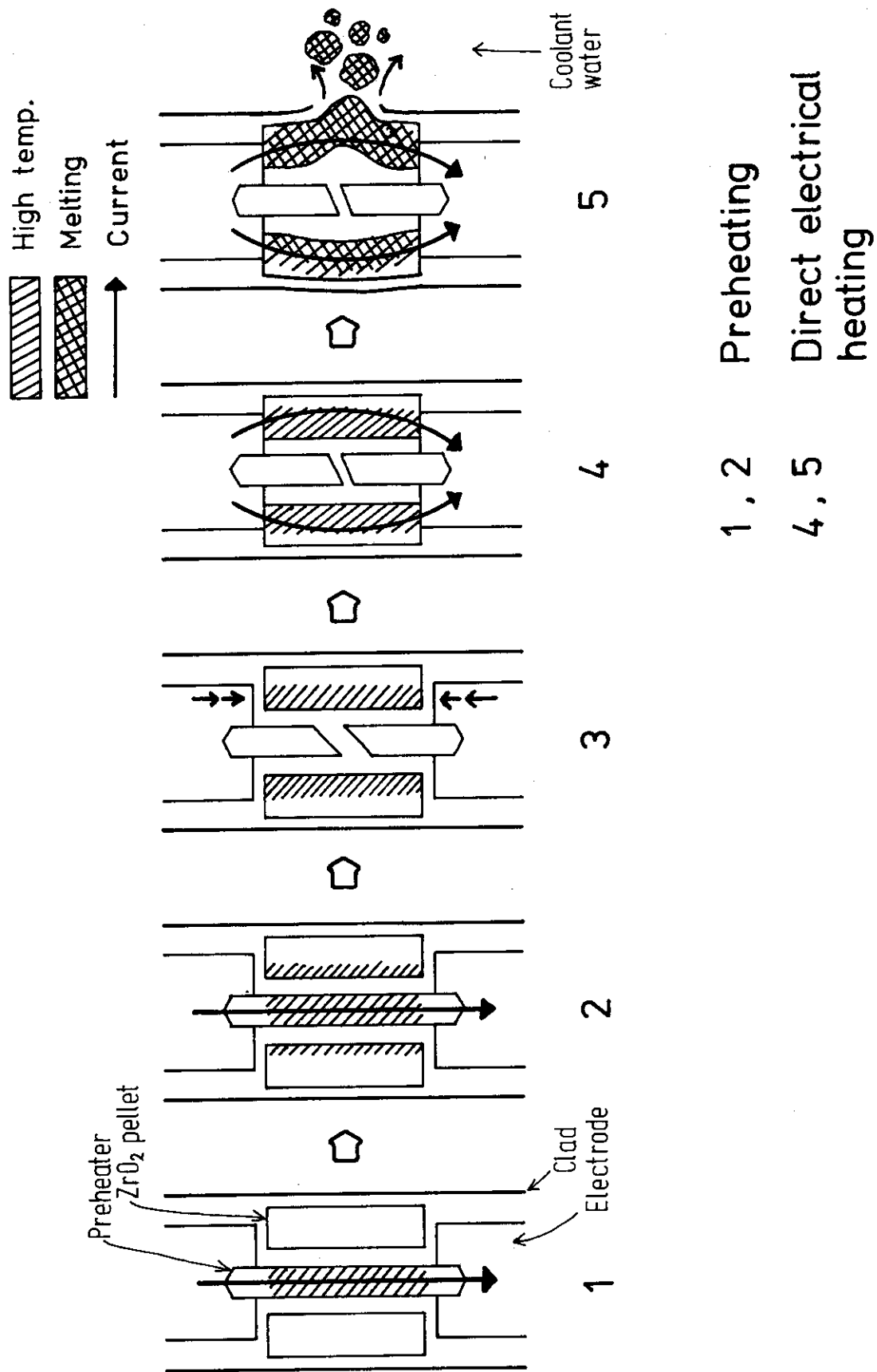


Fig. 6 Schematic Procedure of Direct Electrical Heating

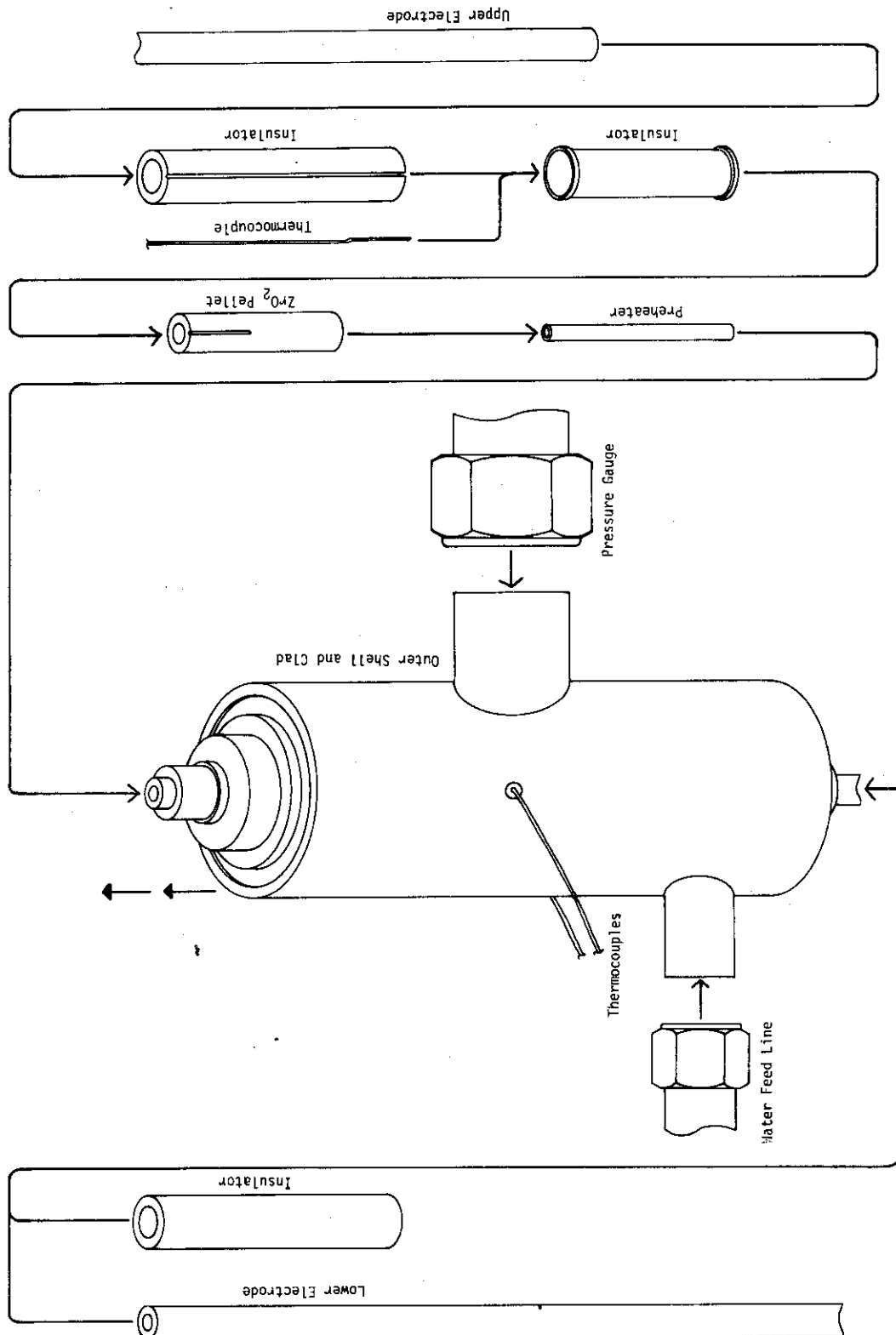


Fig. 7 Assembly of Test Piece

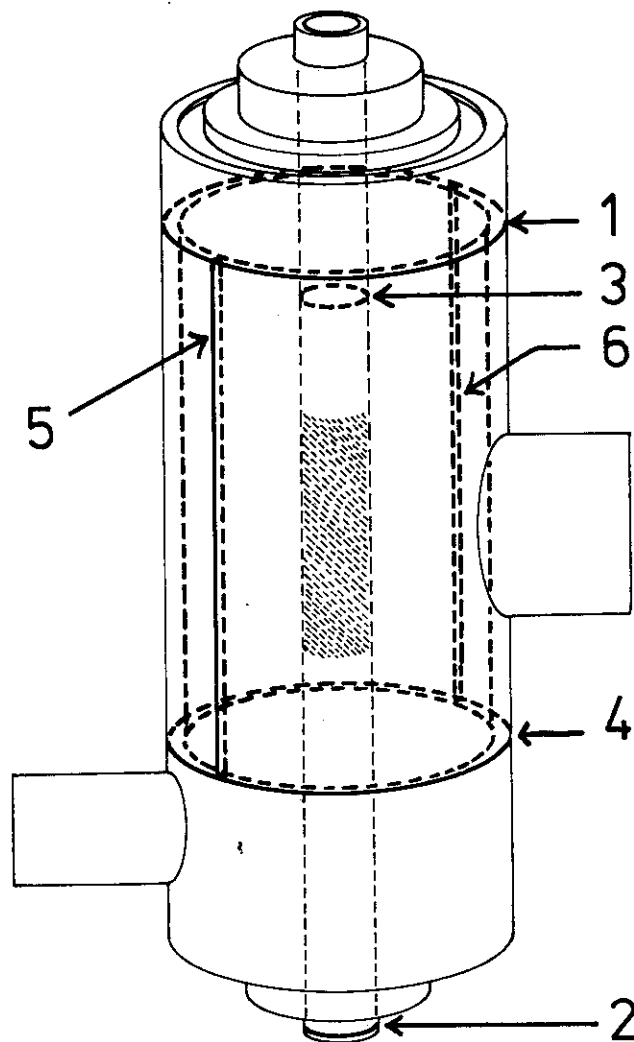


Fig. 8 Disassembly of Test Piece after Experiment

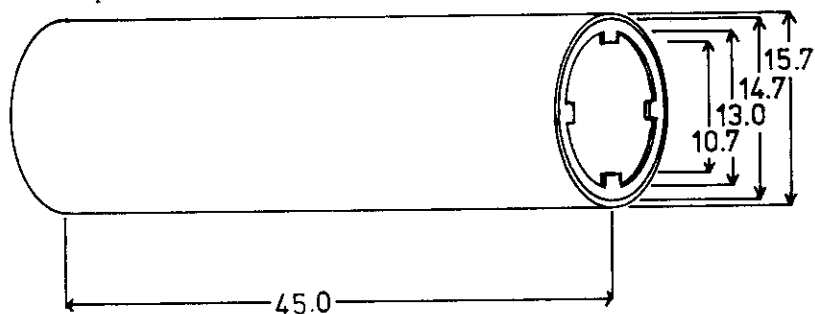


Fig. 9 Dimensions of Outer Tube in Double Cladding Test Piece

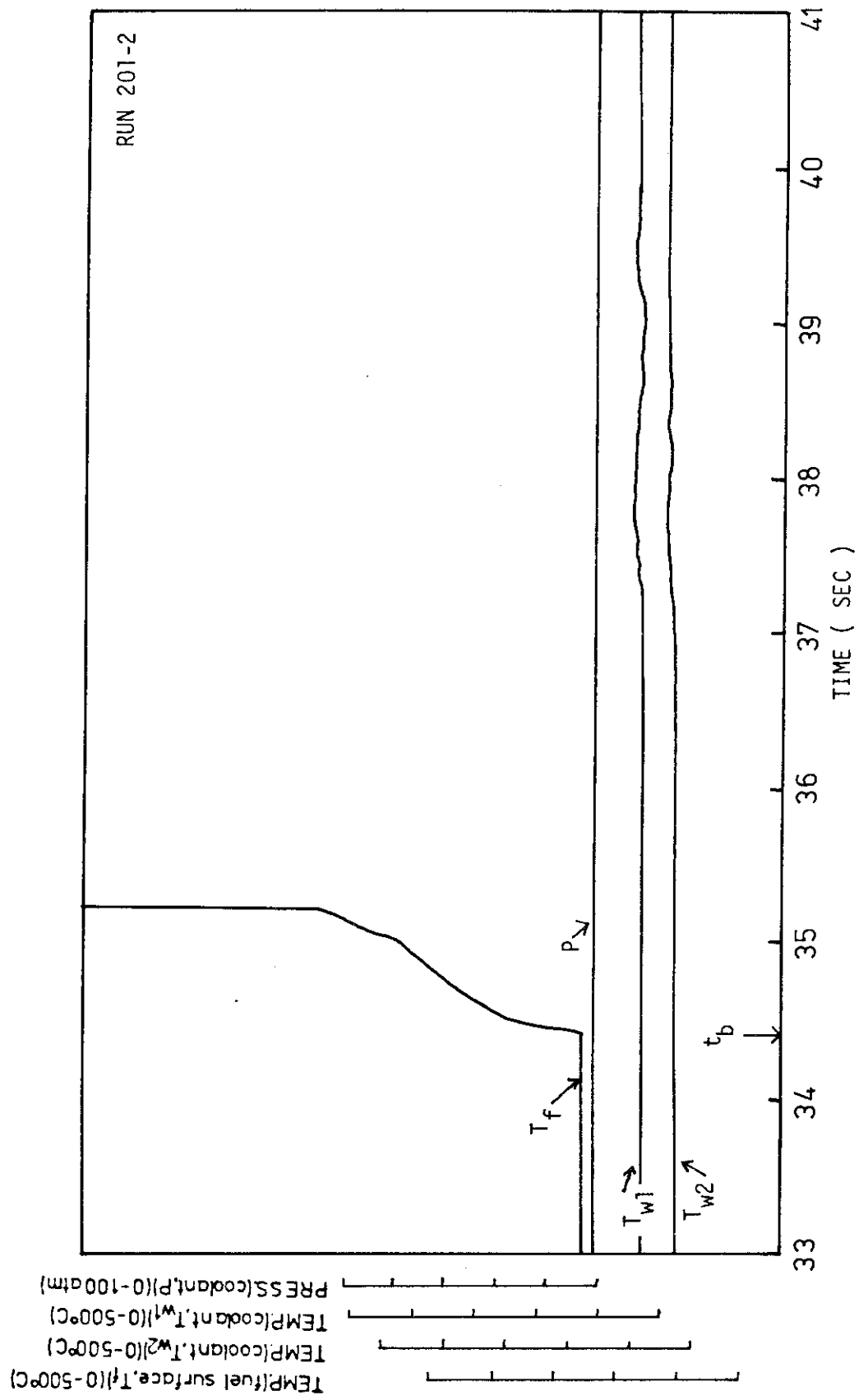


Fig.10 Experimental Results of Run 201-2

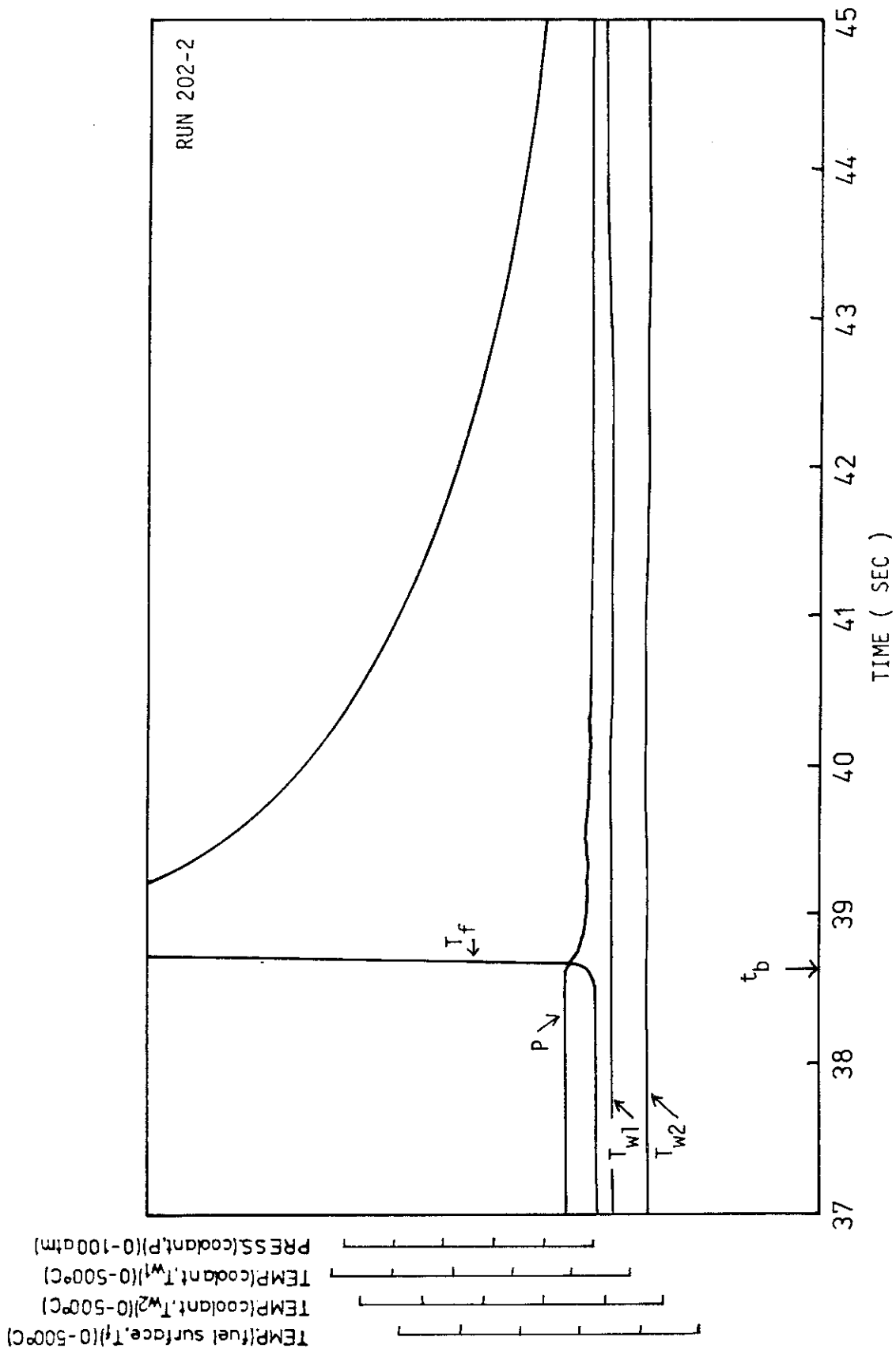


Fig.11 Experimental Results of Run 202-2

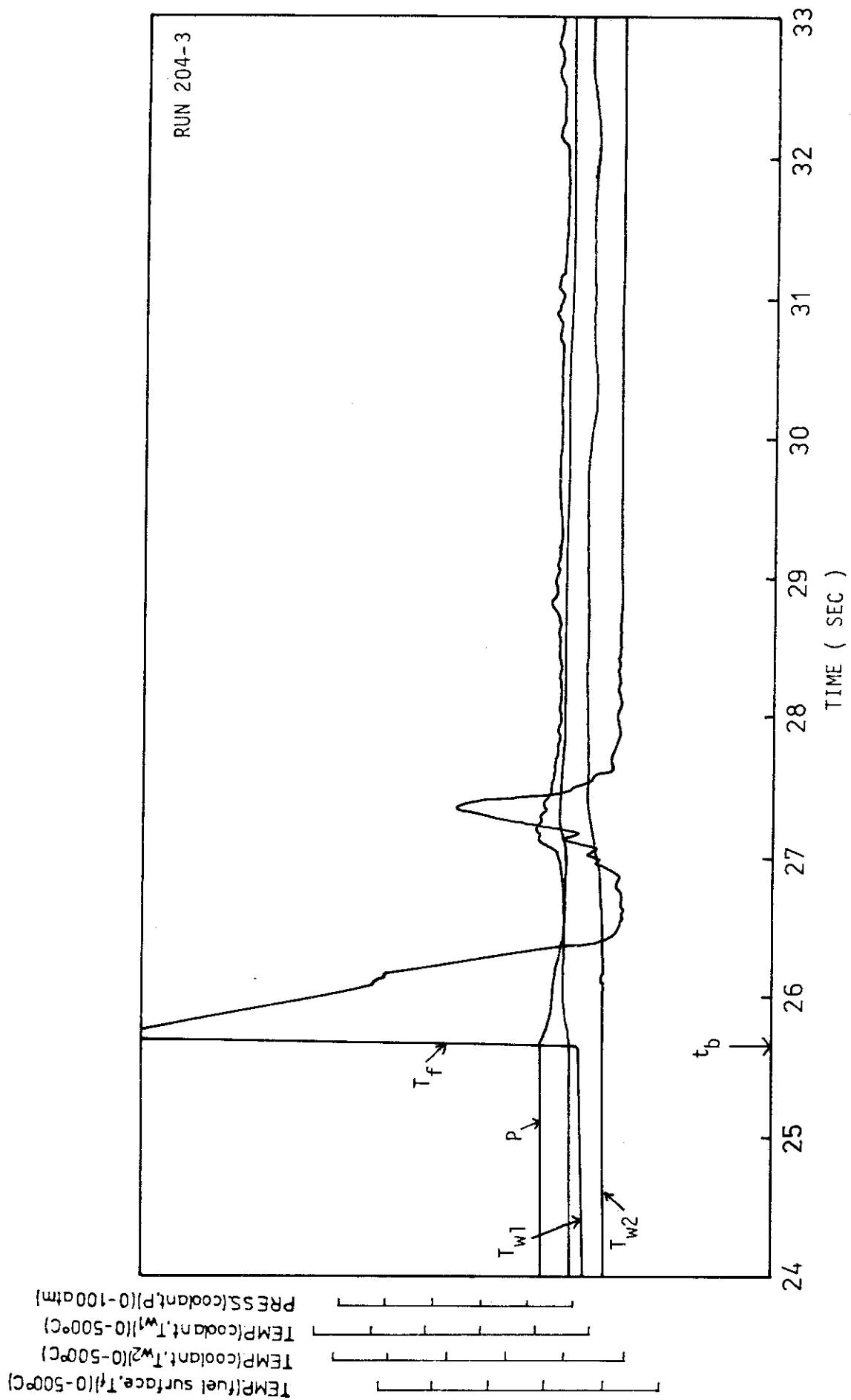


Fig.12 Experimental Results of Run 204-3

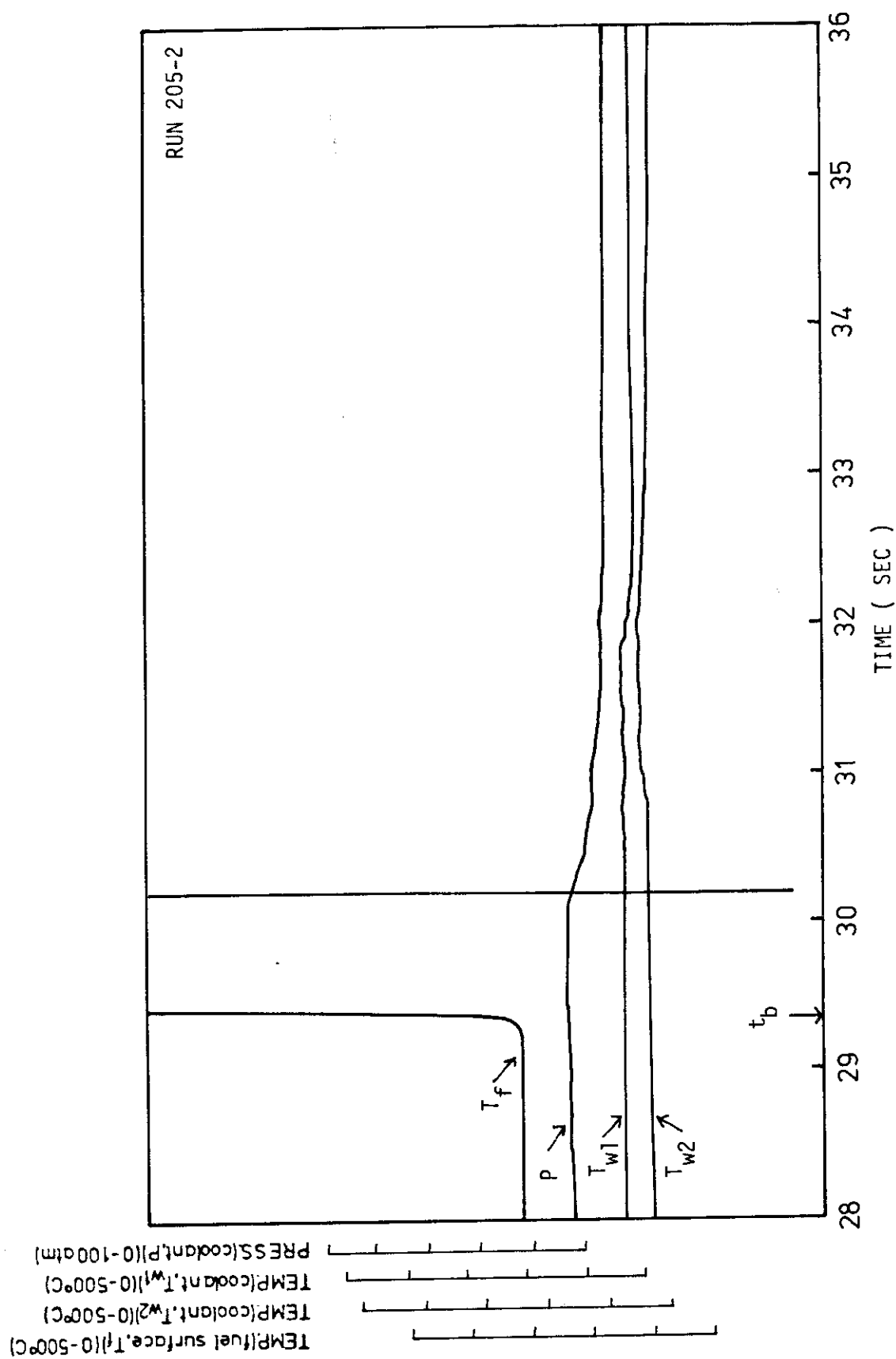


Fig.13 Experimental Results of Run 205-2

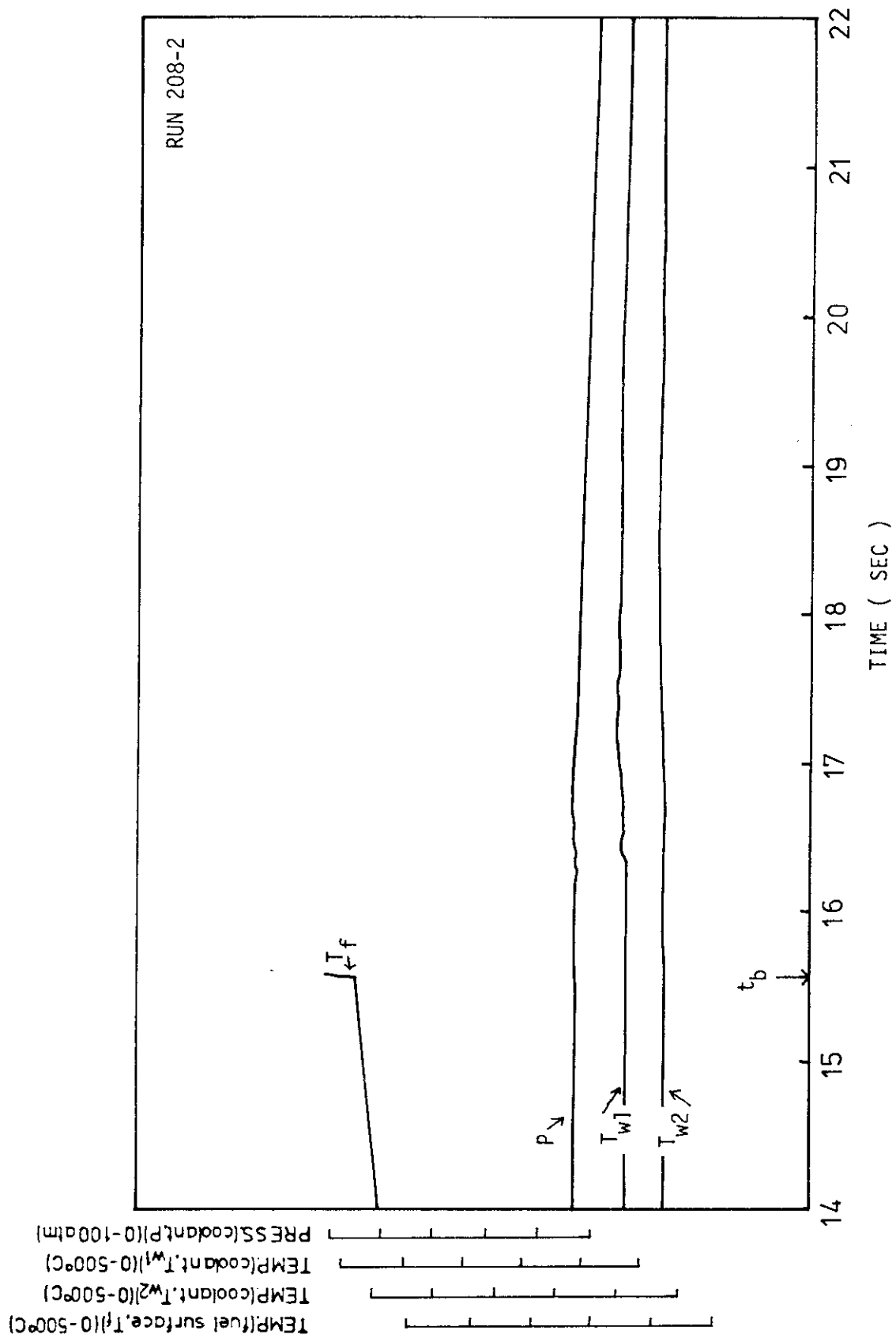


Fig.14 Experimental Results of Run 208-2

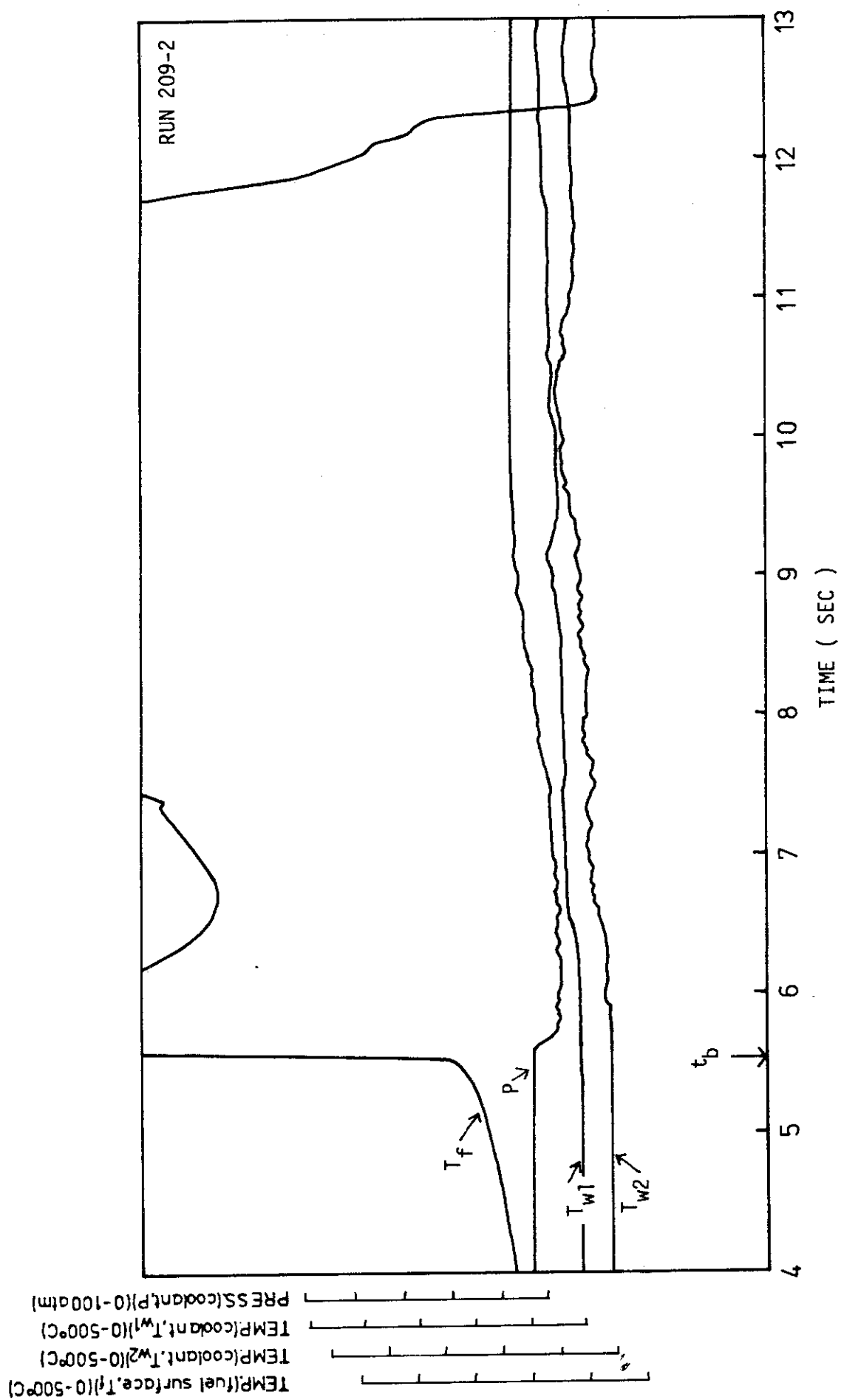


Fig.15 Experimental Results of Run 209-2

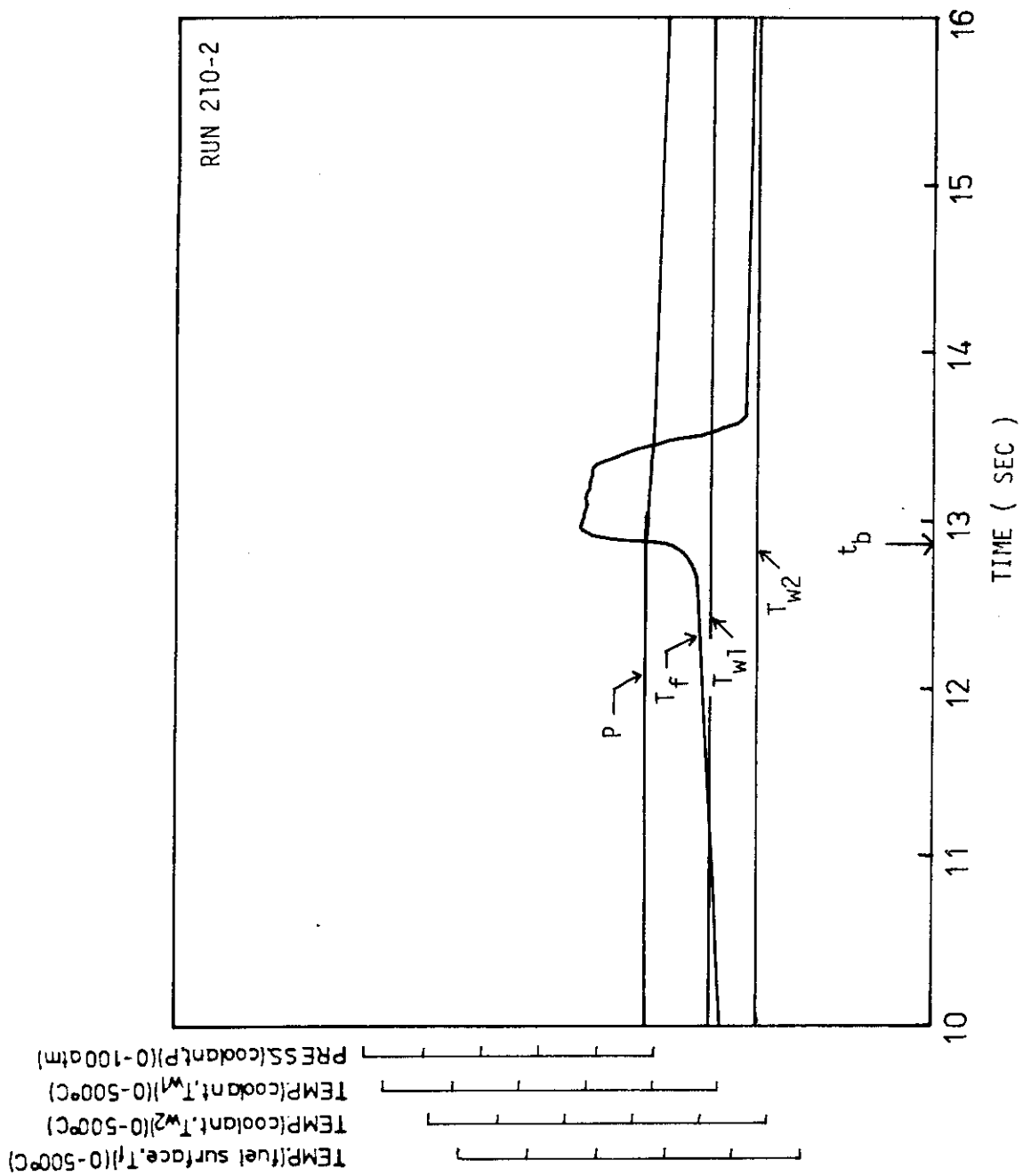
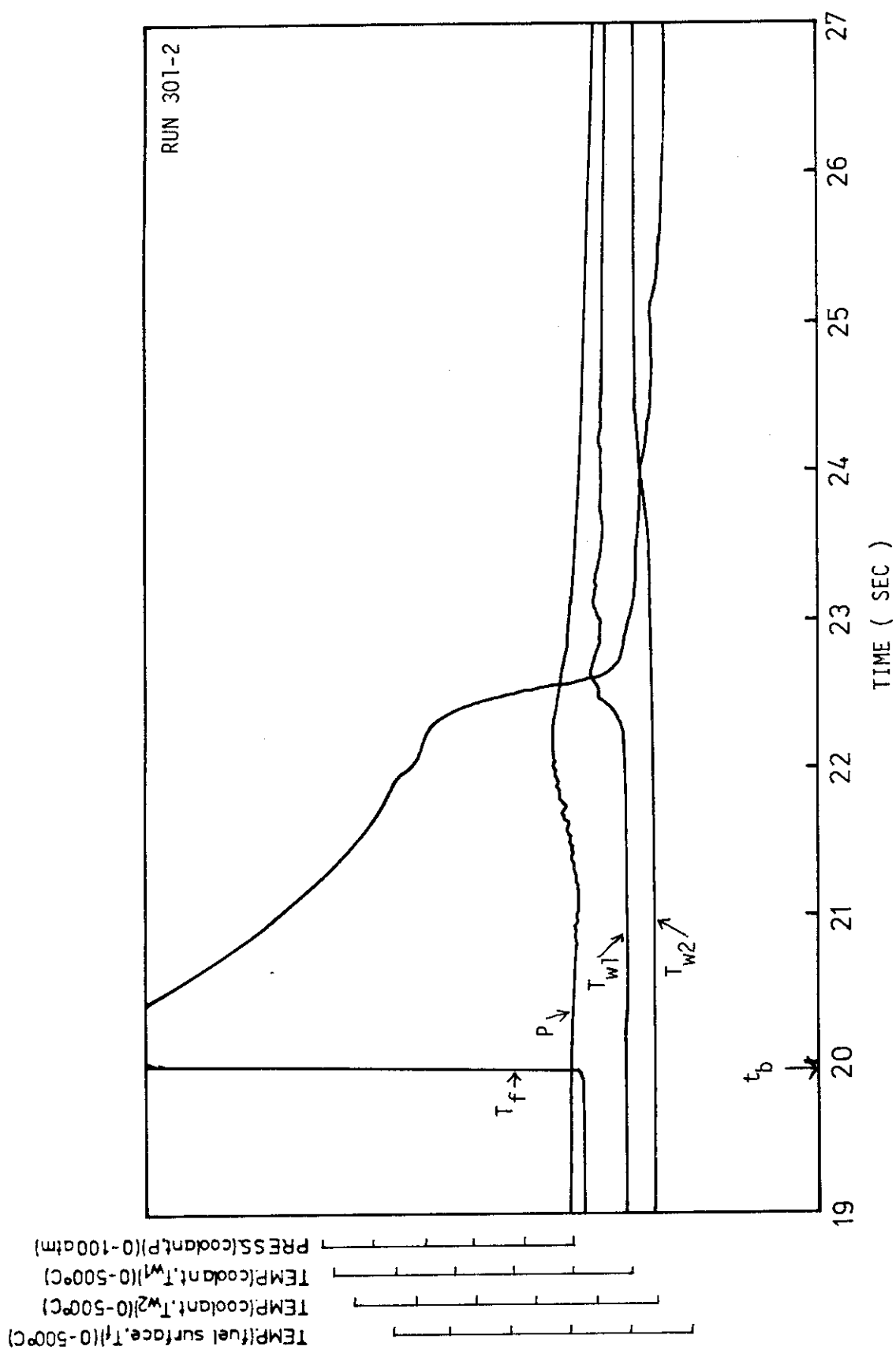


Fig.16 Experimental Results of Run 210-2



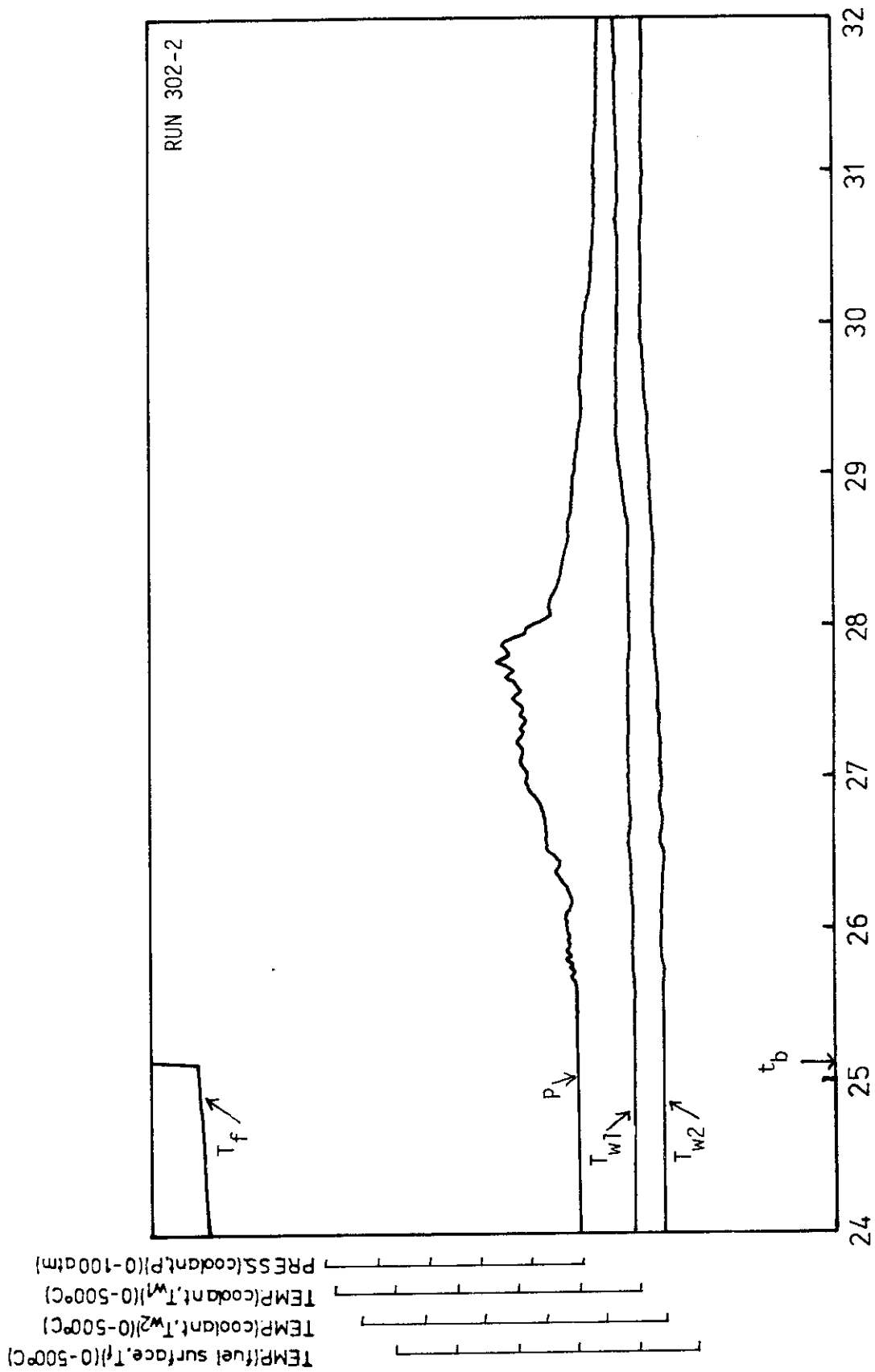


Fig.18 Experimental Results of Run 302-2

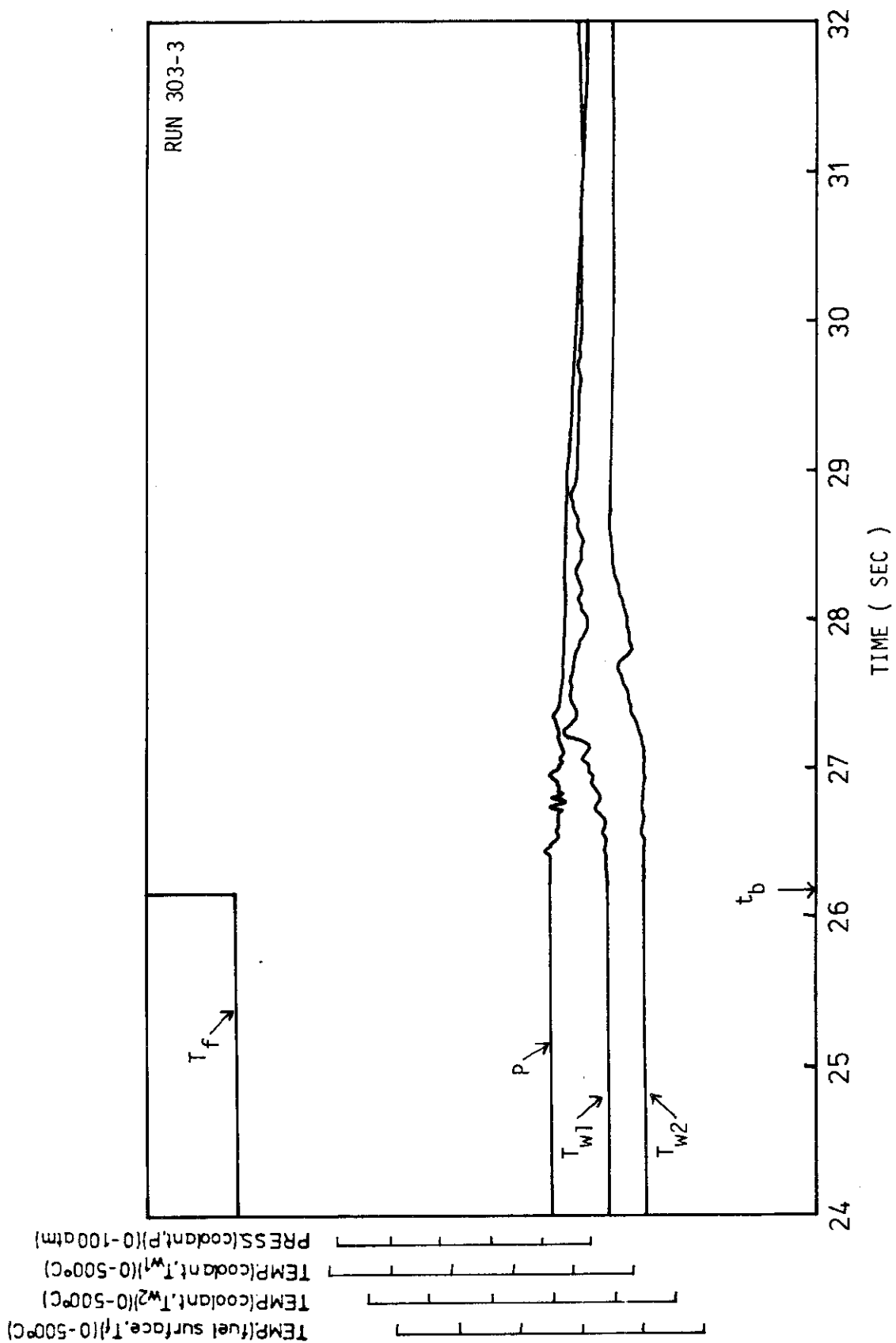


Fig.19 Experimental Results of Run 303-3

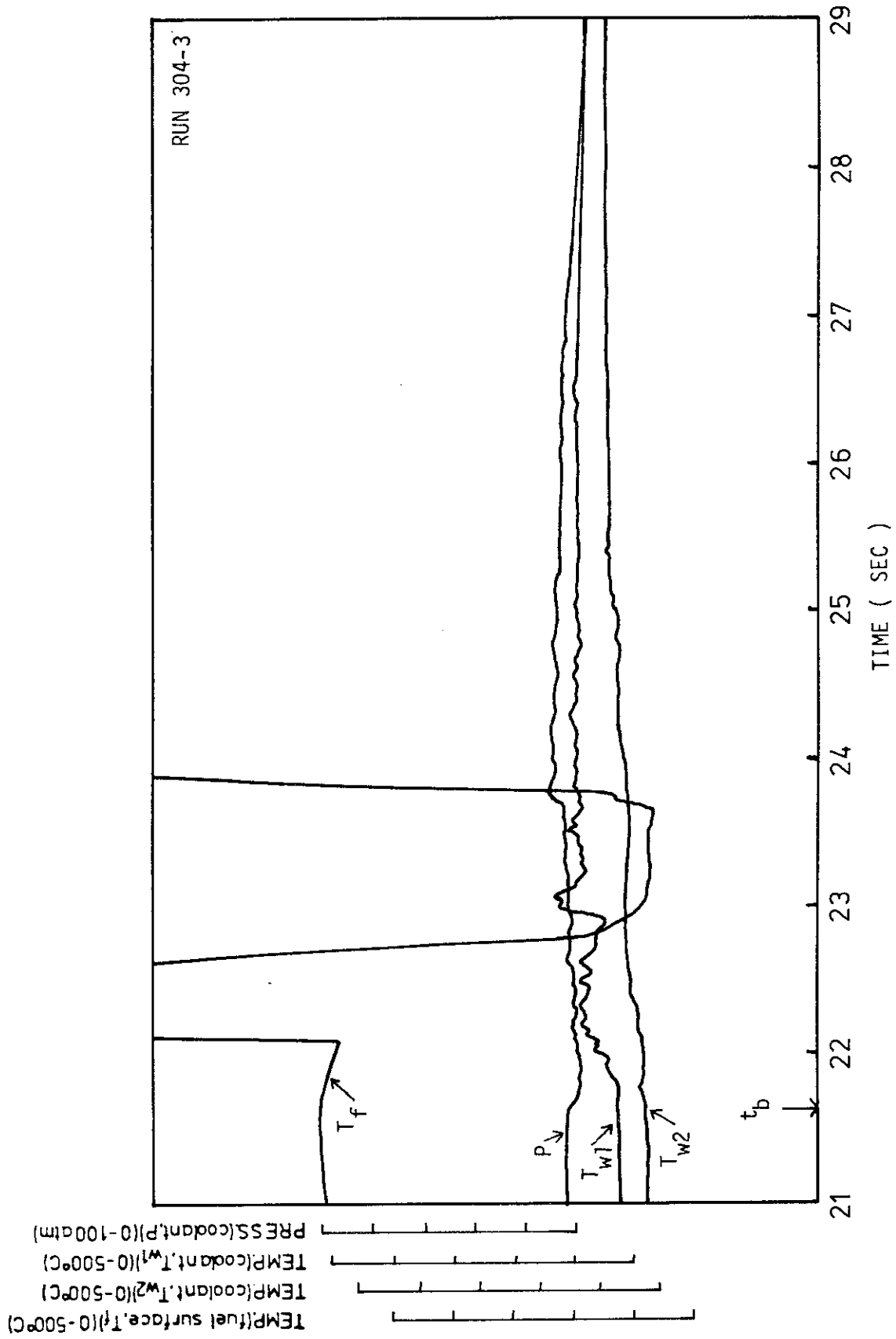


Fig.20 Experimental Results of Run 304-3

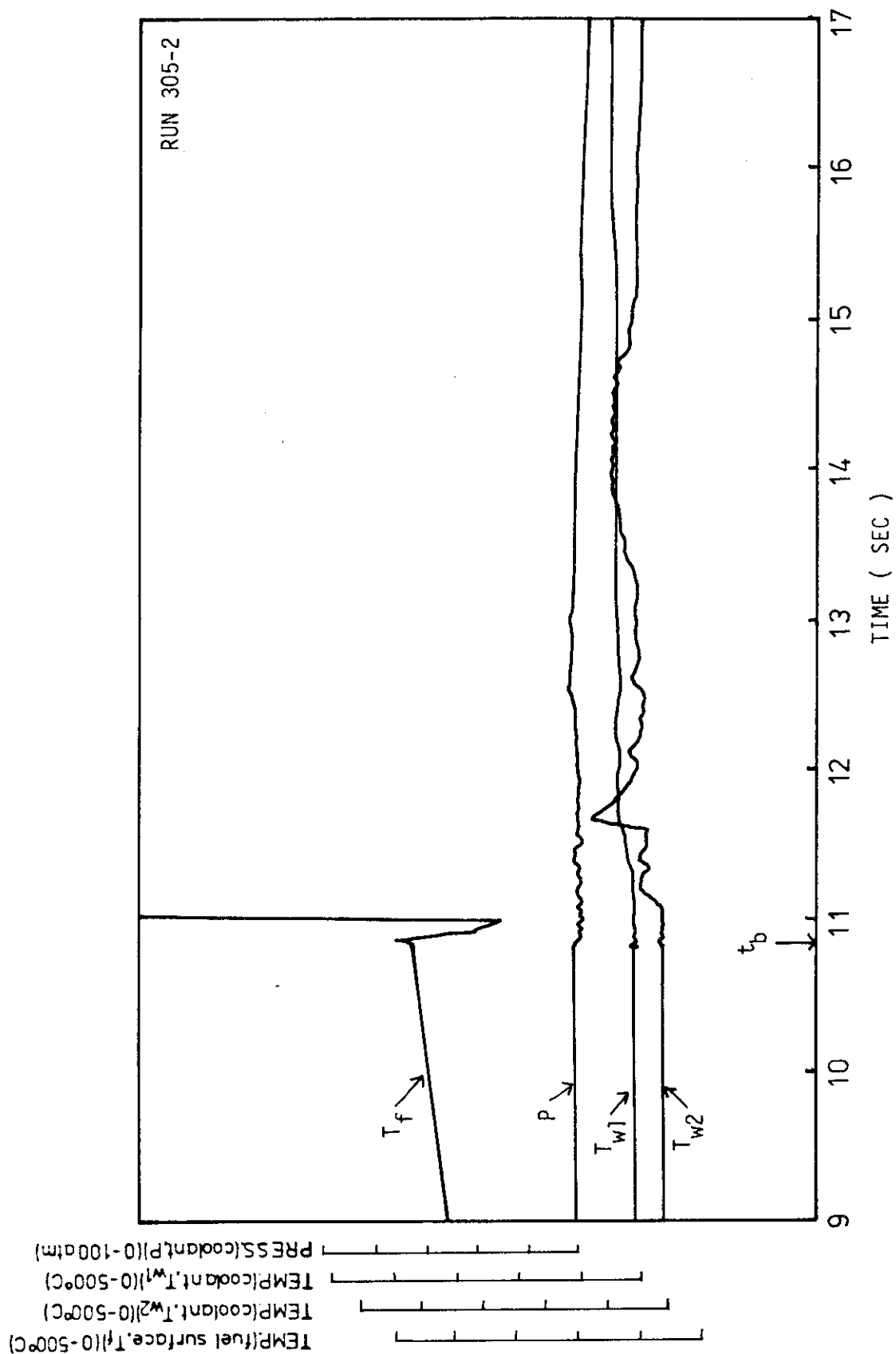


Fig.21 Experimental Results of Run 305-2

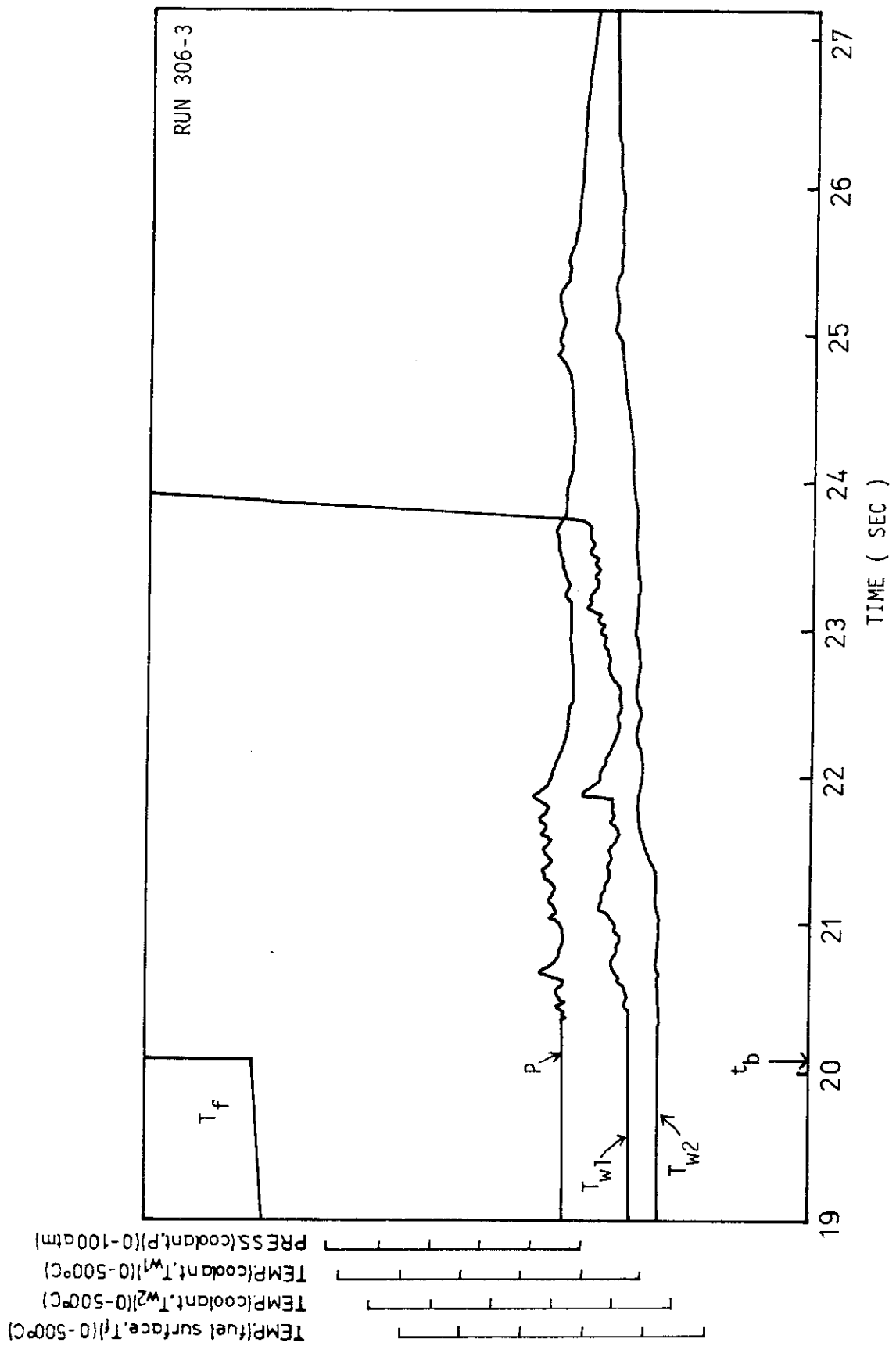


Fig.22 Experimental Results of Run 306-3

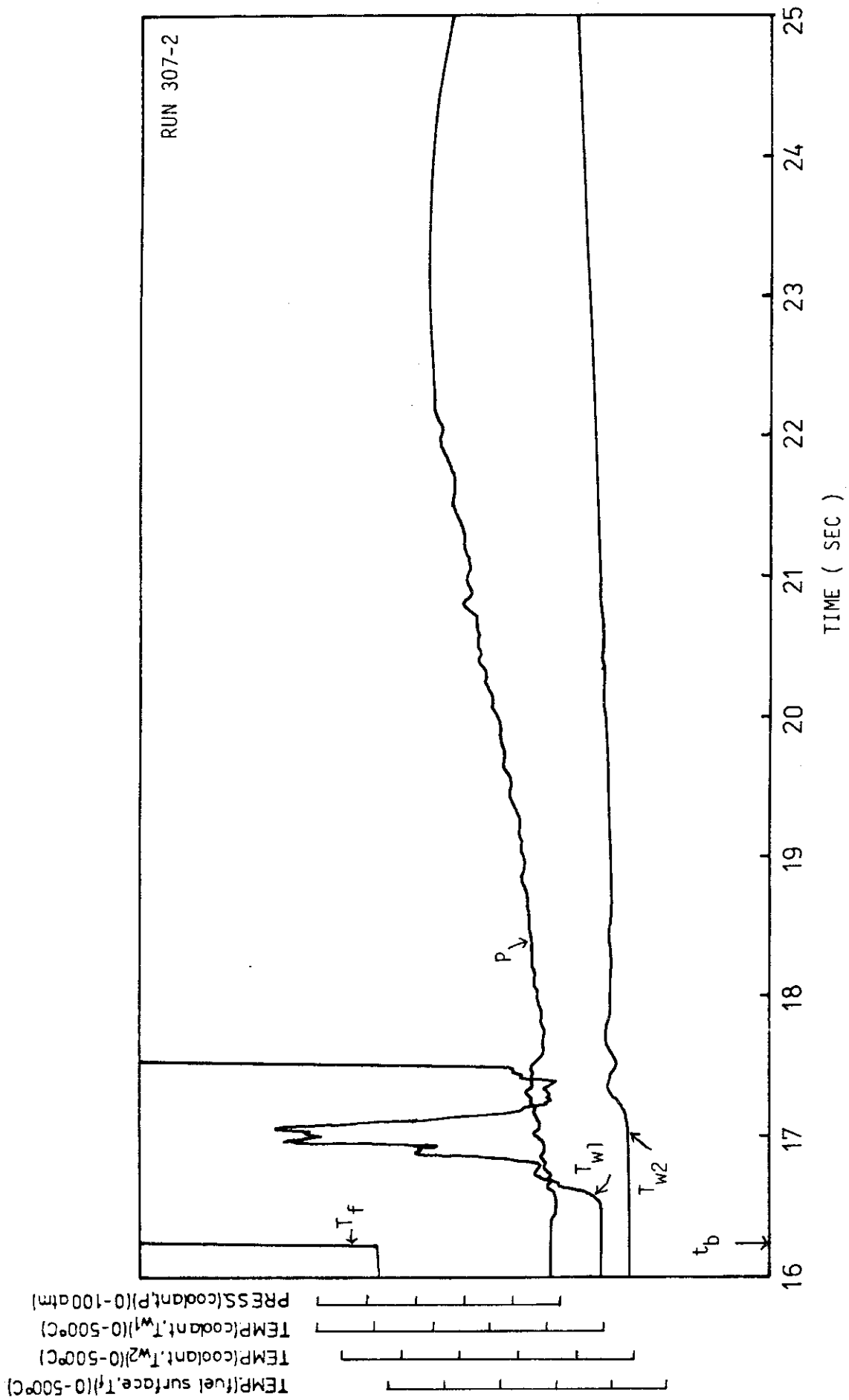


Fig.23 Experimental Results of Run 307-2

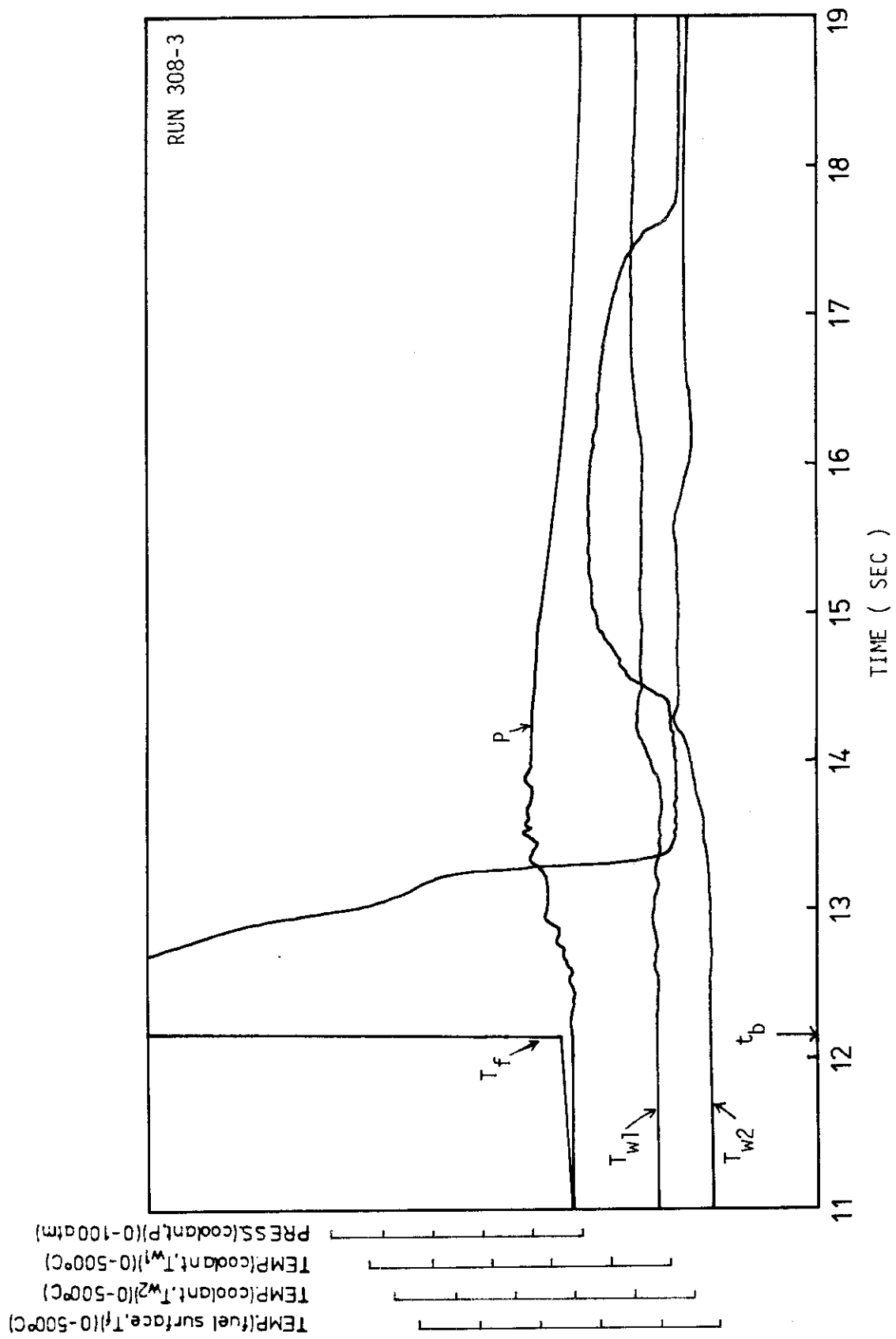


Fig.24 Experimental Results of Run 308-3

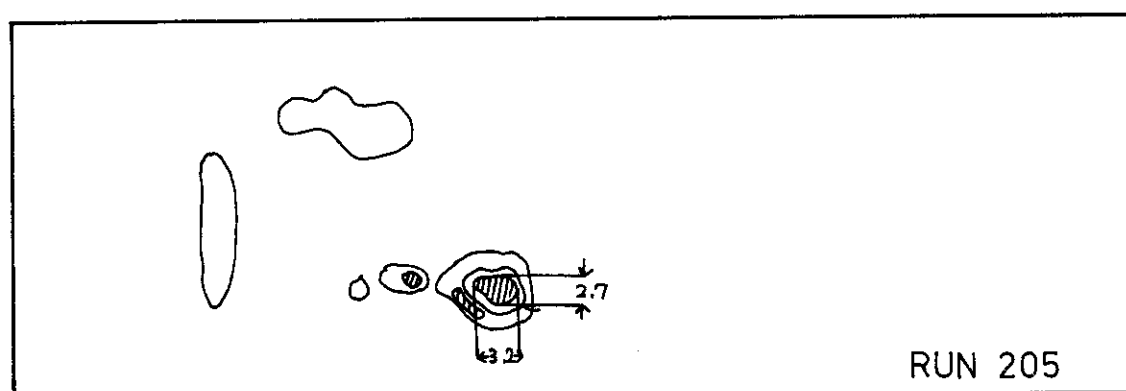
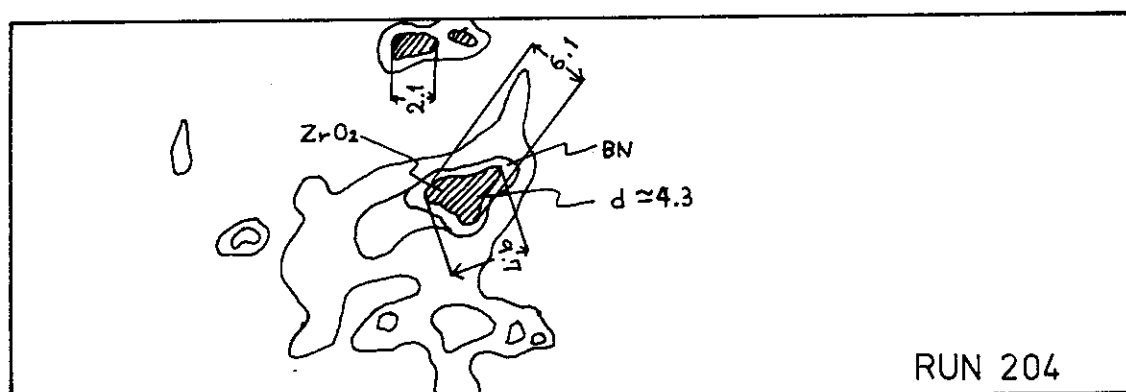
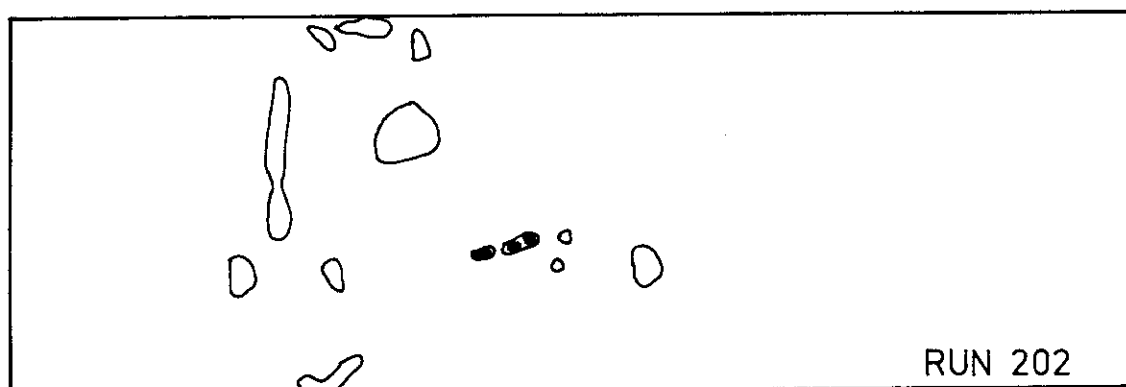
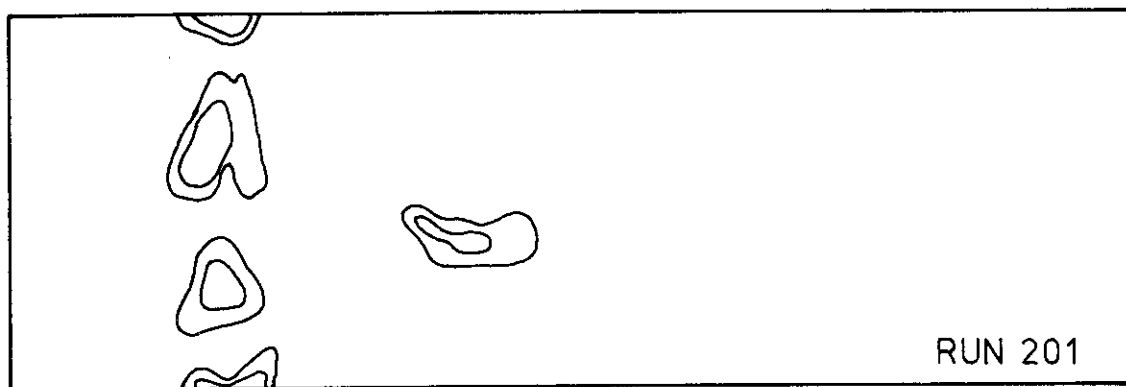


Fig.25 Sketches of Surface of Fuel Pin

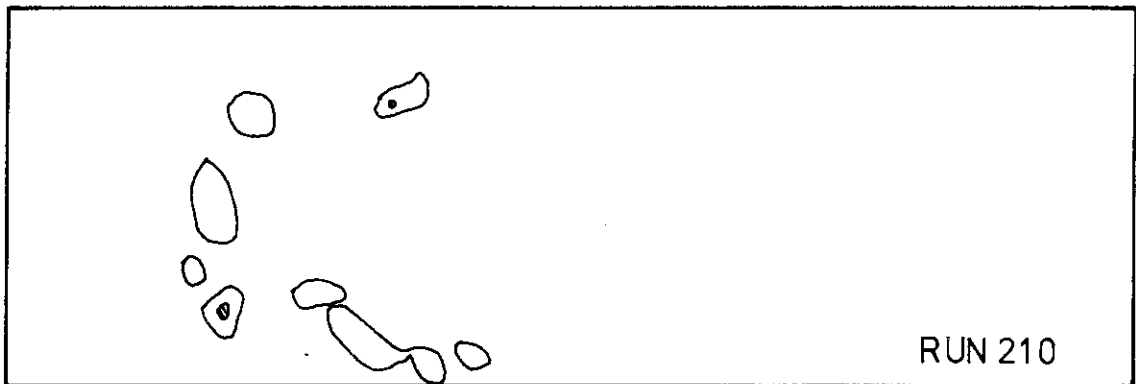
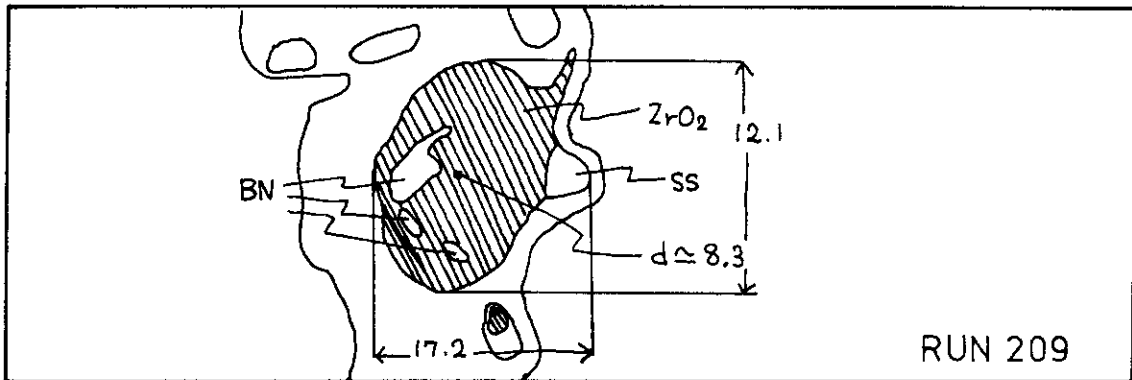
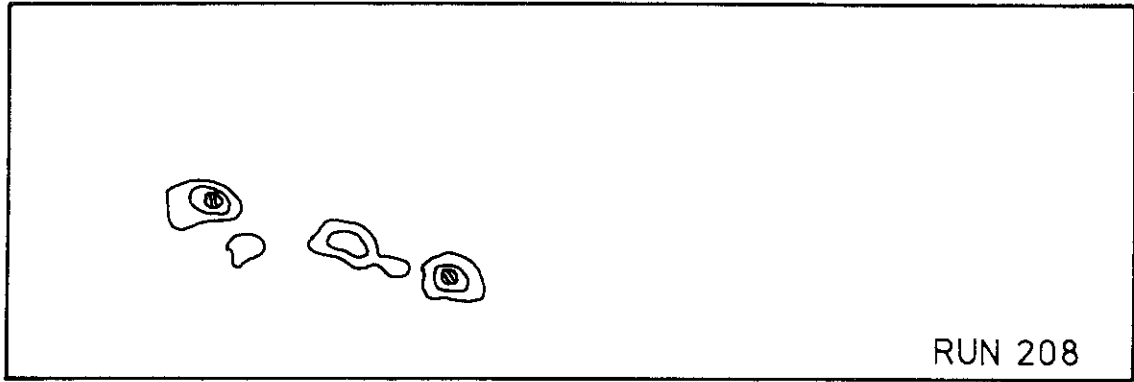
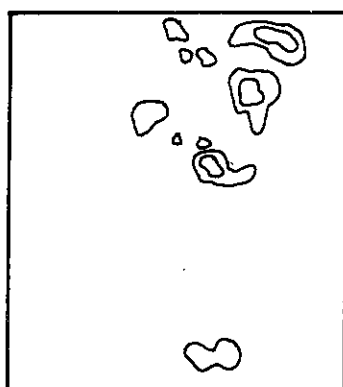
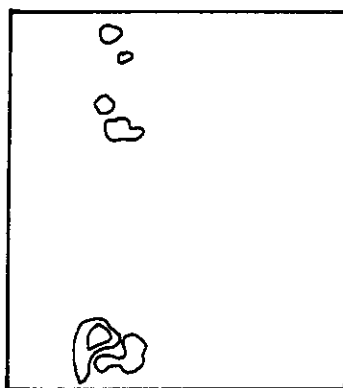


Fig.25 Sketches of Surface of Fuel Pin (continued.)



RUN 301



RUN 302

Fig.25 Sketches of Surface of Fuel Pin (continued.)

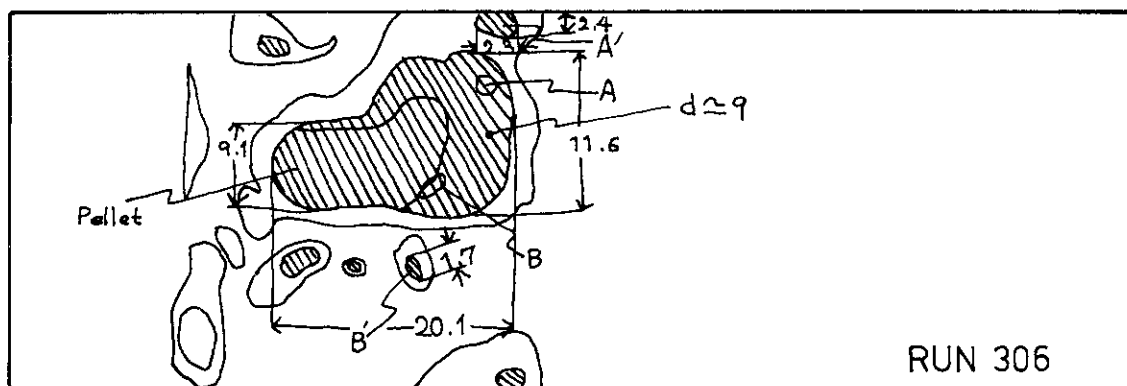
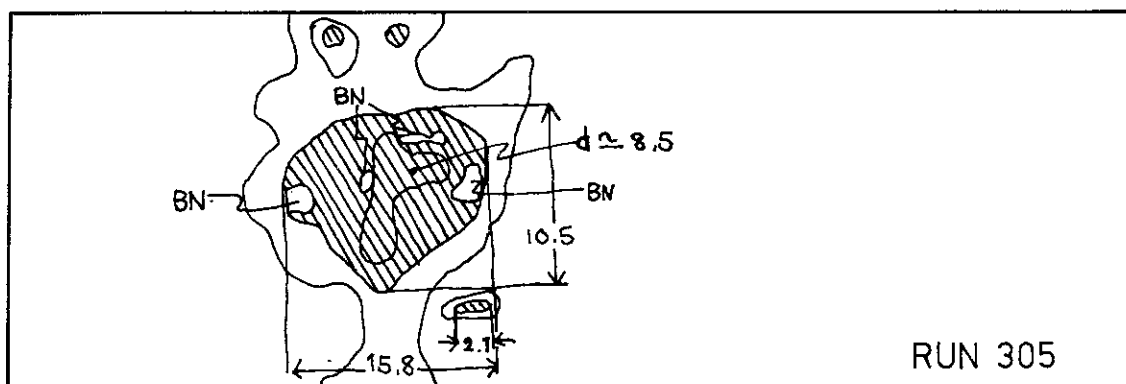
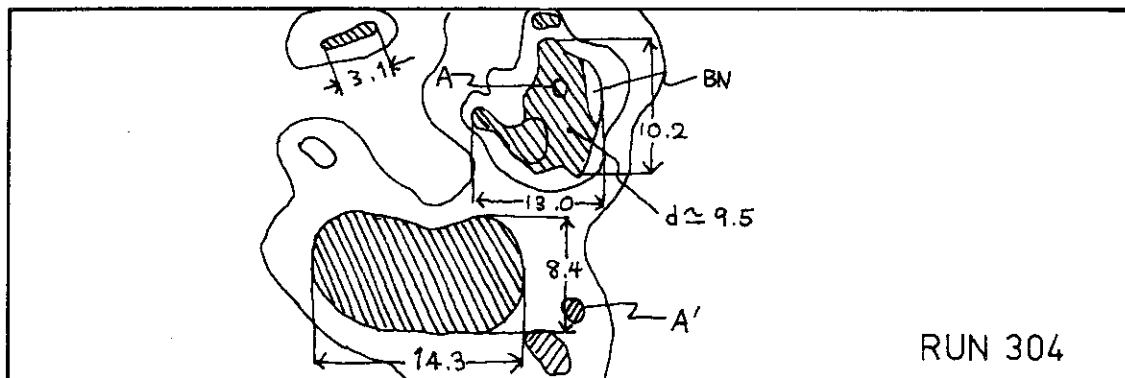
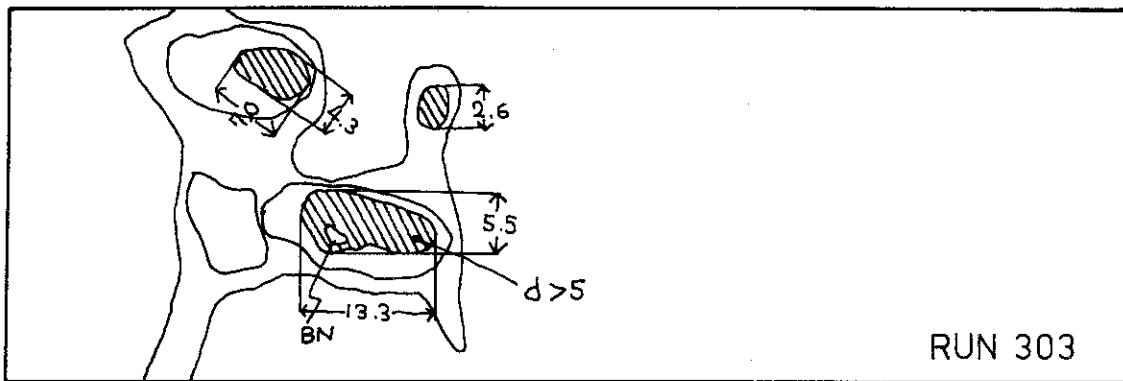


Fig.25 Sketches of Surface of Fuel Pin (continued.)

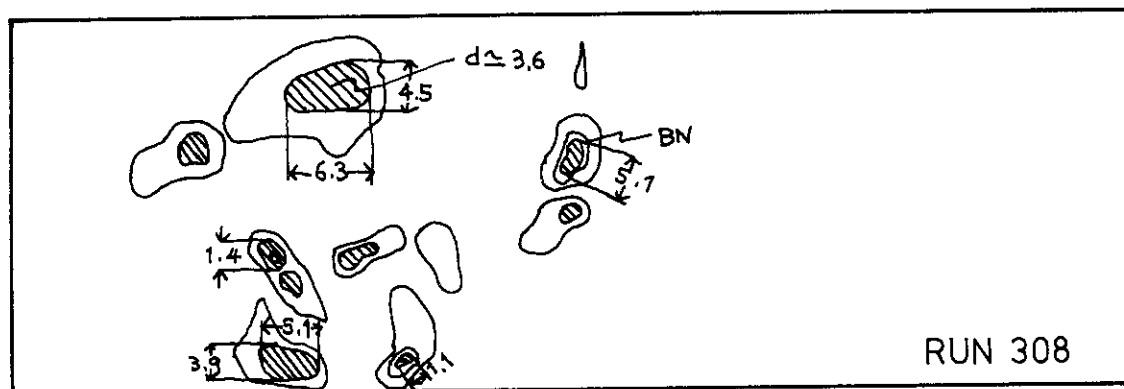
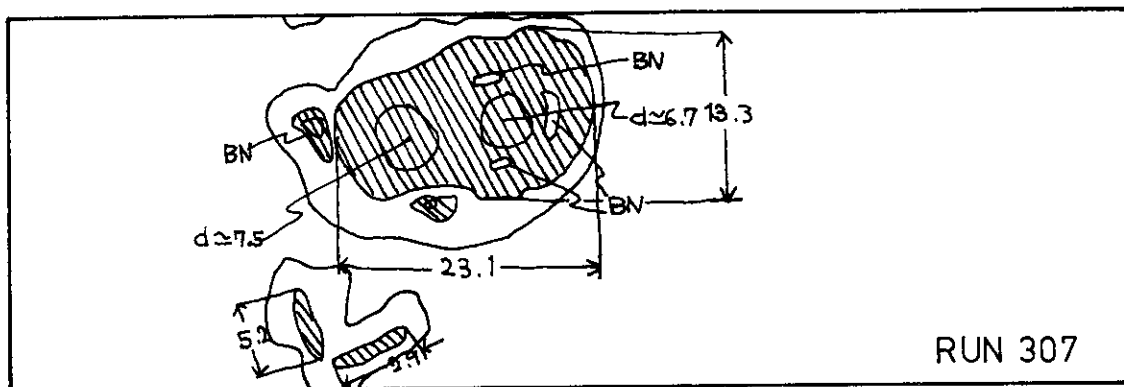


Fig.25 Sketches of Surface of Fuel Pin (continued.)

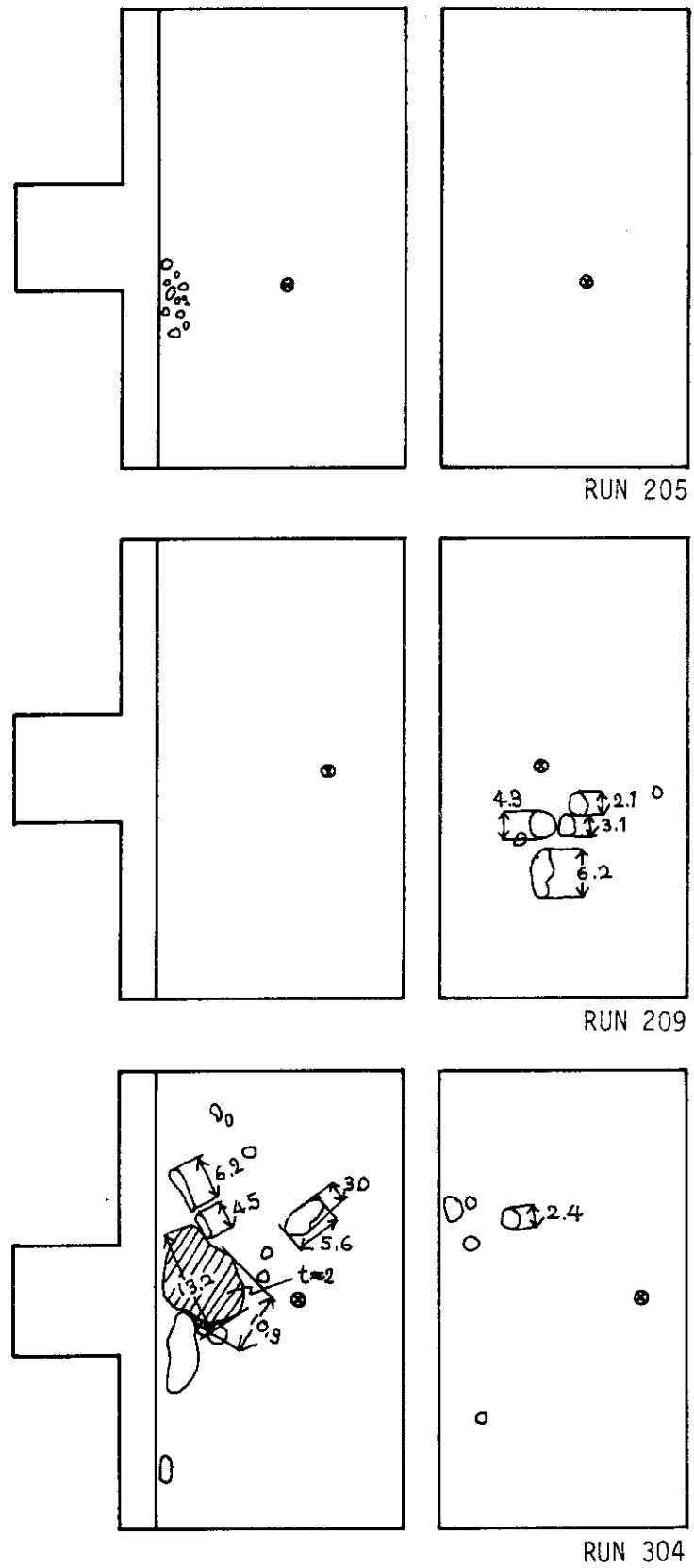


Fig.26 Sketches of Inner Surface of Outer Shell

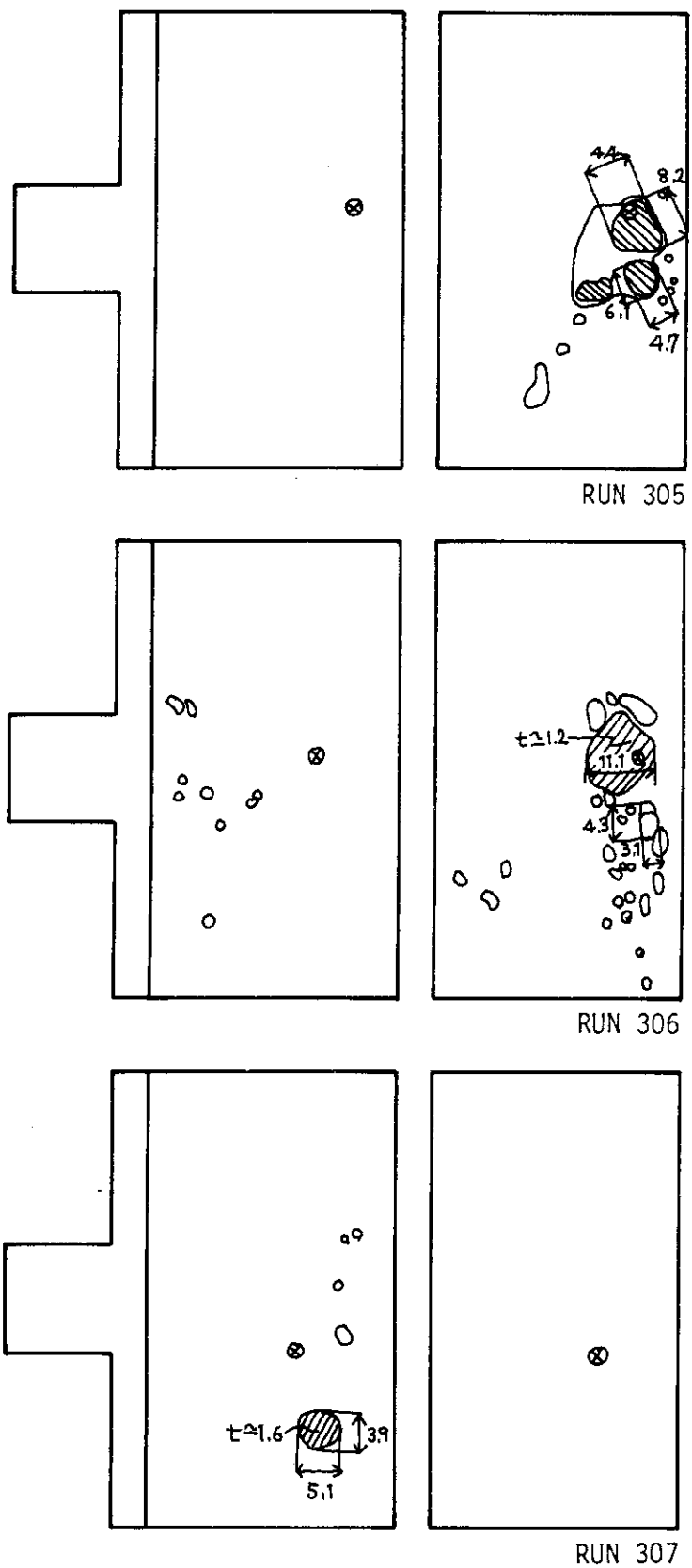


Fig.26 Sketches of Inner Surface of Outer Shell (continued.)

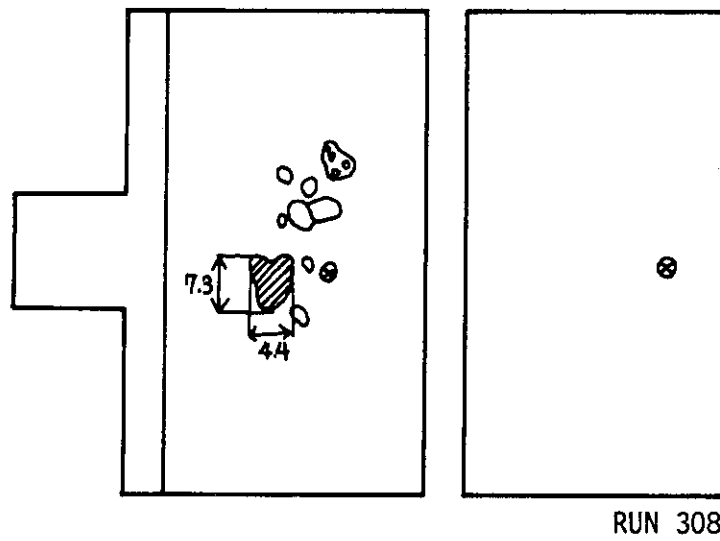


Fig.26 Sketches of Inner Surface of Outer Shell (continued.)

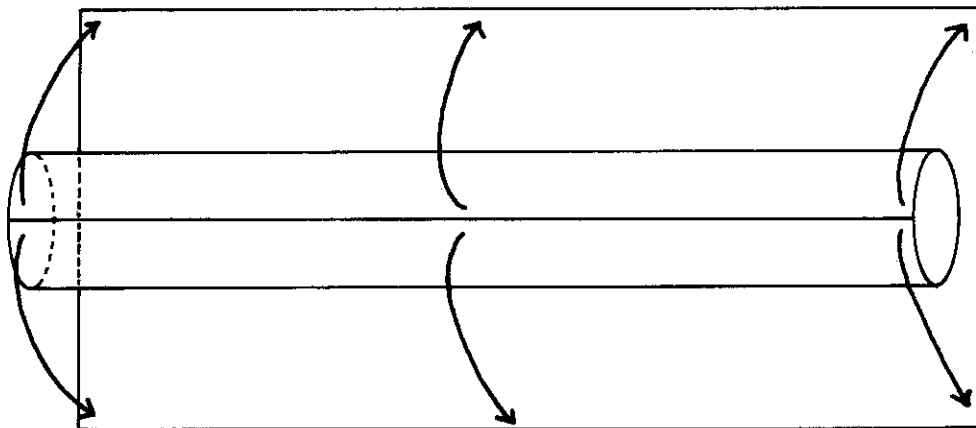


Fig.27 Drawing Method of Sketches in Fig.25

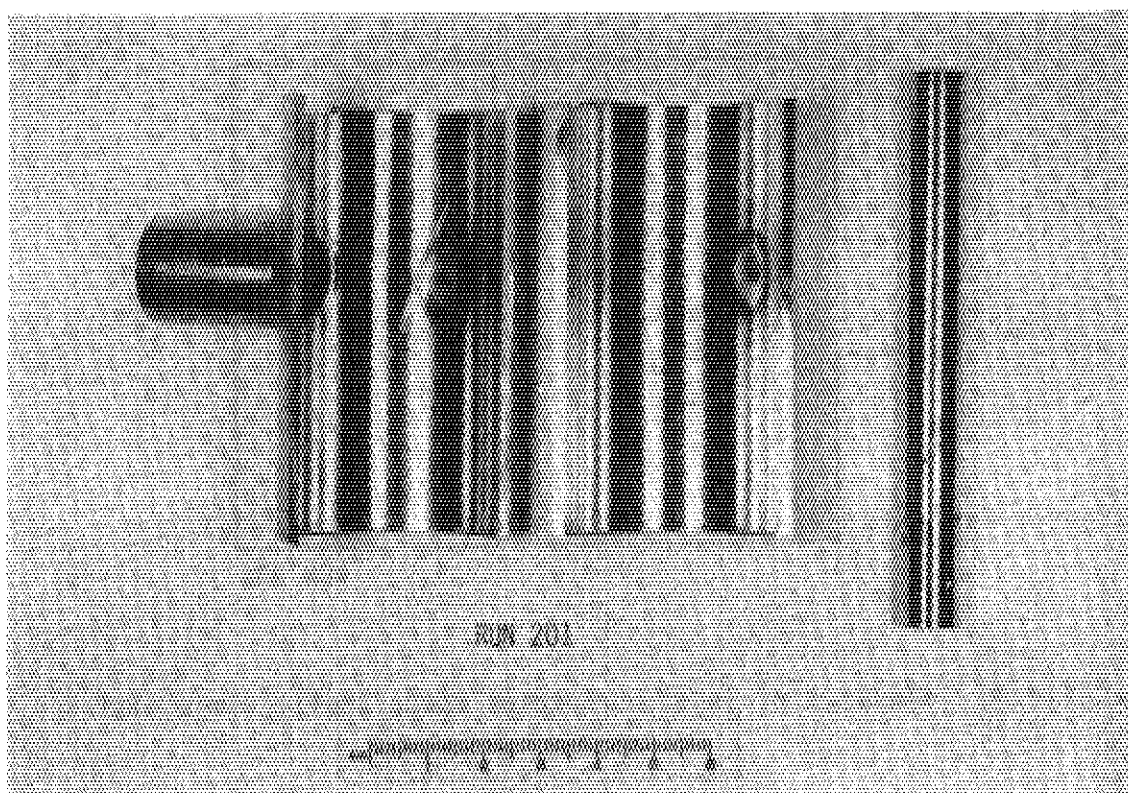


Photo. 1 Test Piece of Run 201

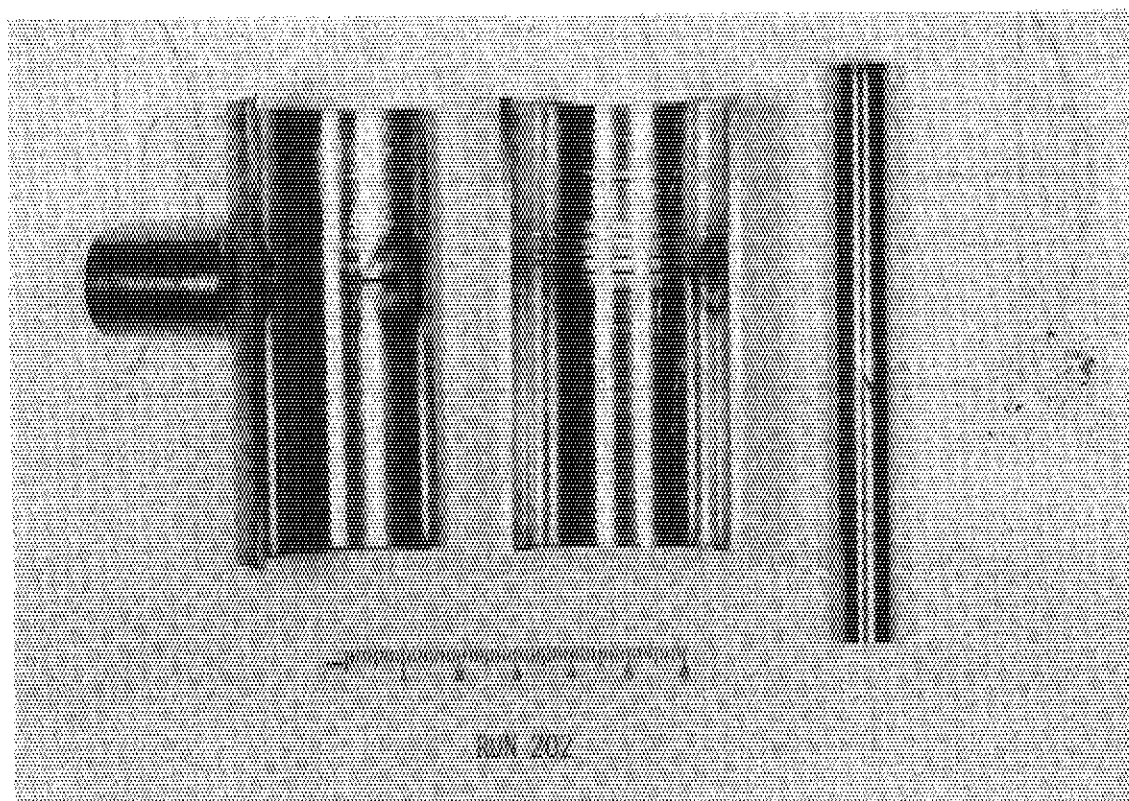


Photo. 2 Test Piece of Run 202

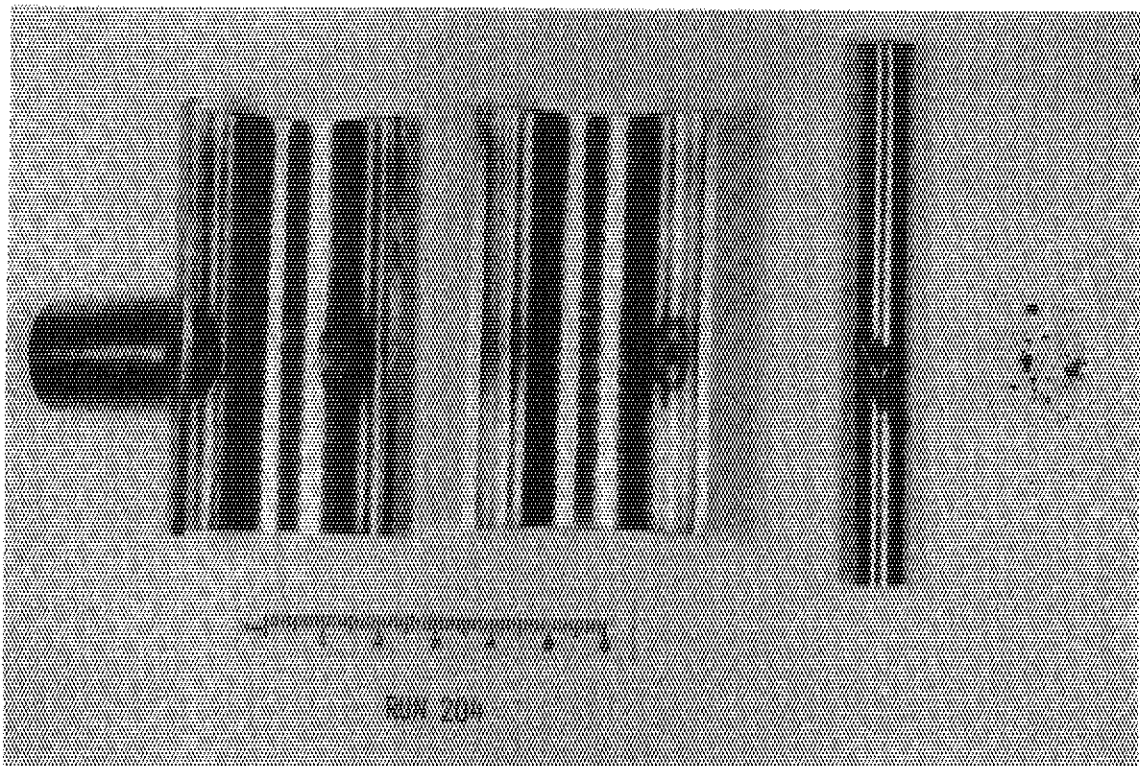


Photo. 3 Test Piece of Run 204

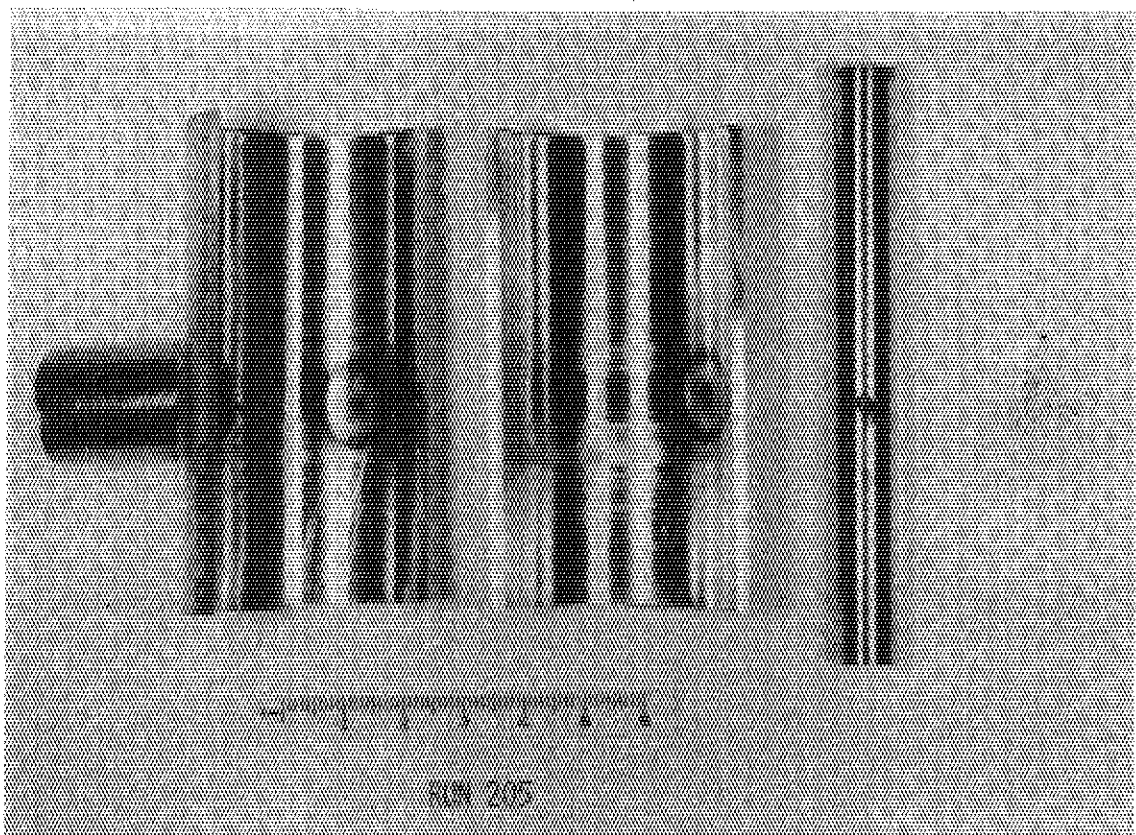


Photo. 4 Test Piece of Run 205

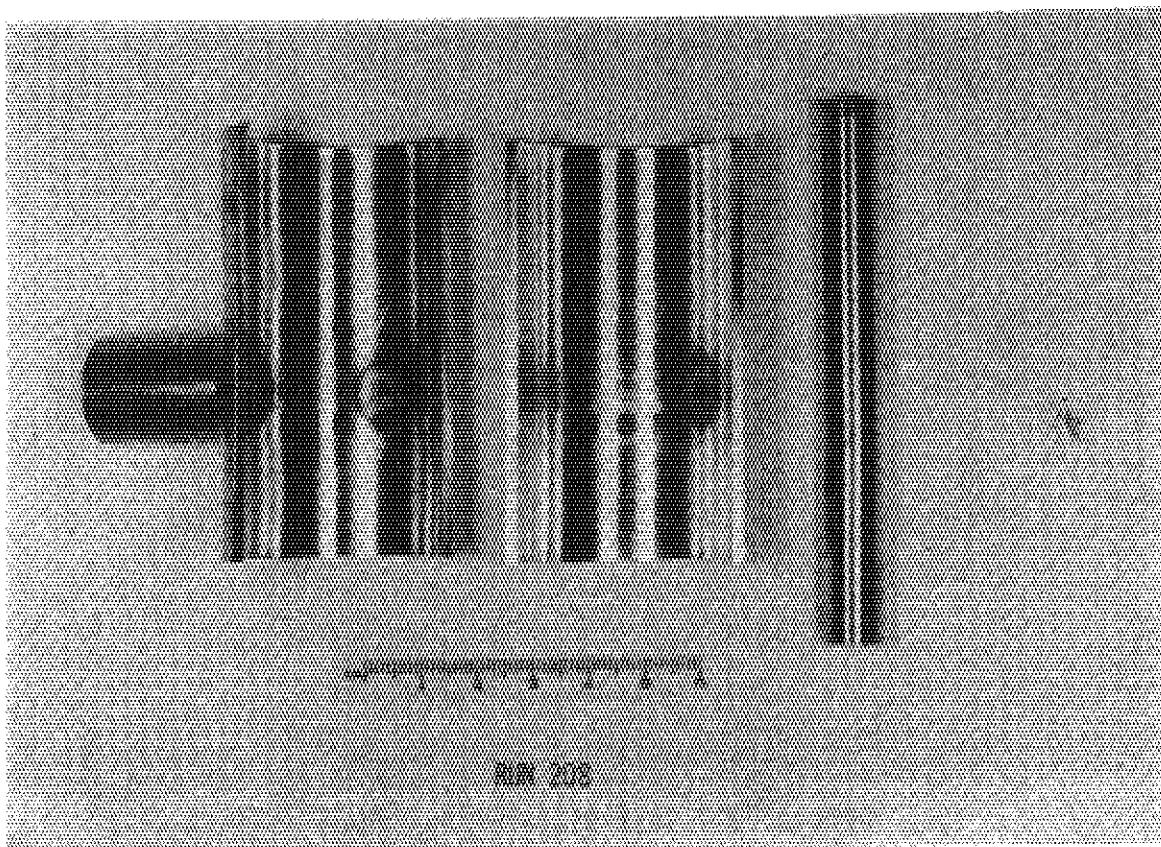


Photo. 5 Test Piece of Run 208

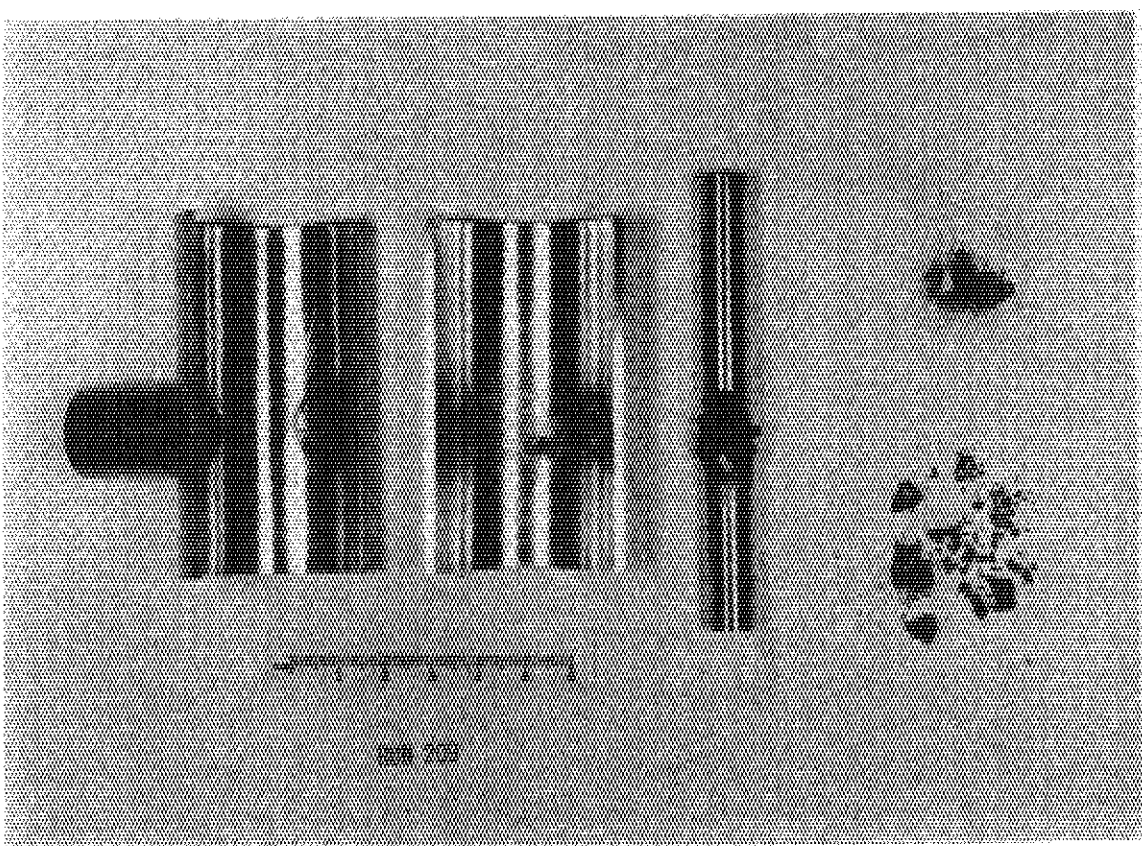


Photo. 6 Test Piece of Run 209

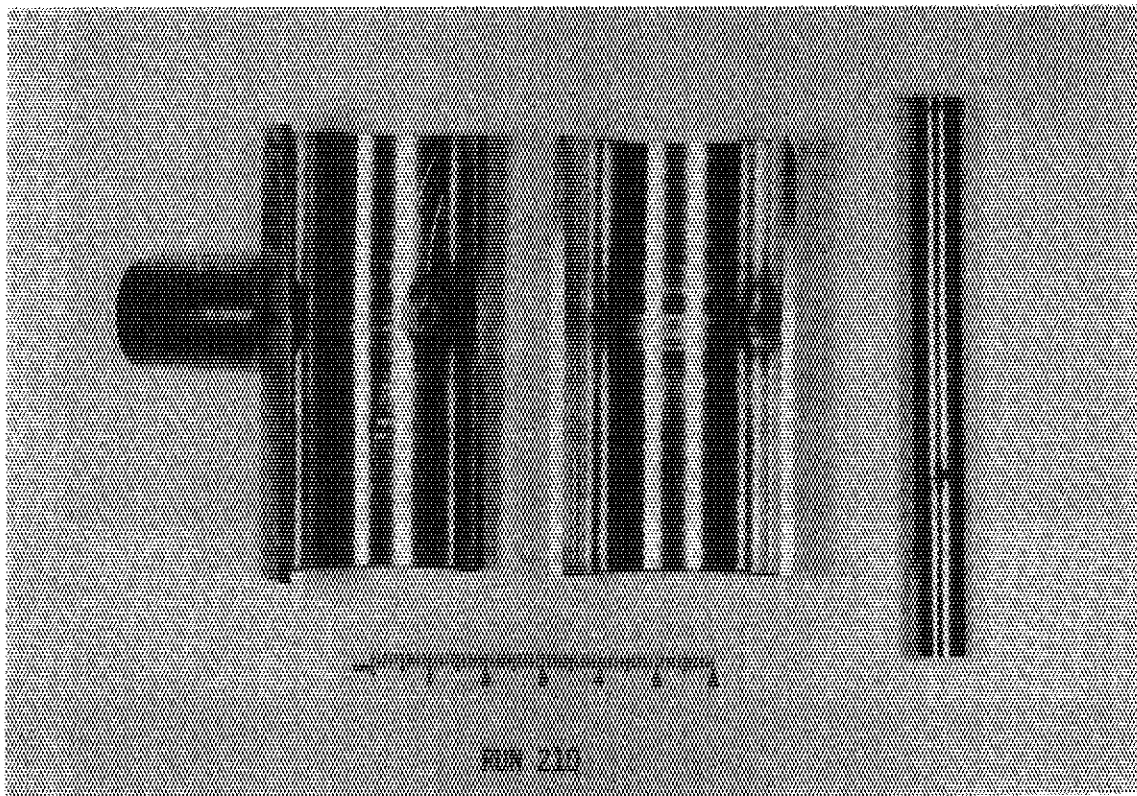


Photo. 7 Test Piece of Run 210

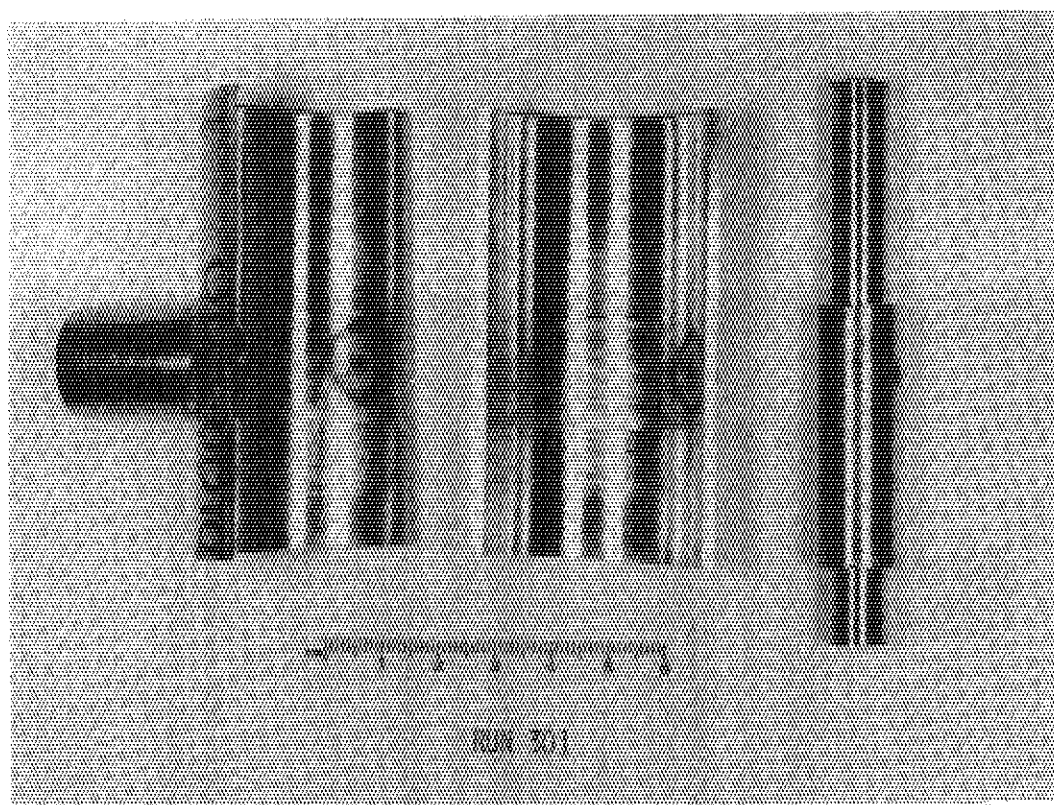


Photo. 8 Test Piece of Run 301

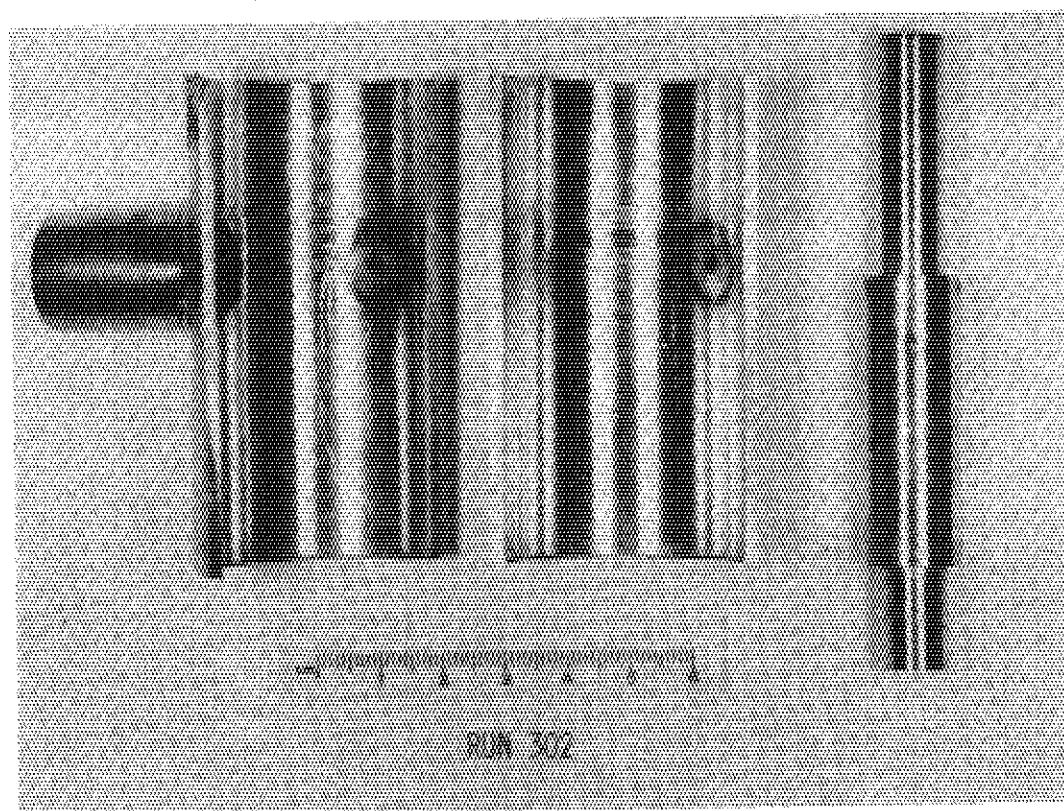


Photo. 9 Test Piece of Run 302

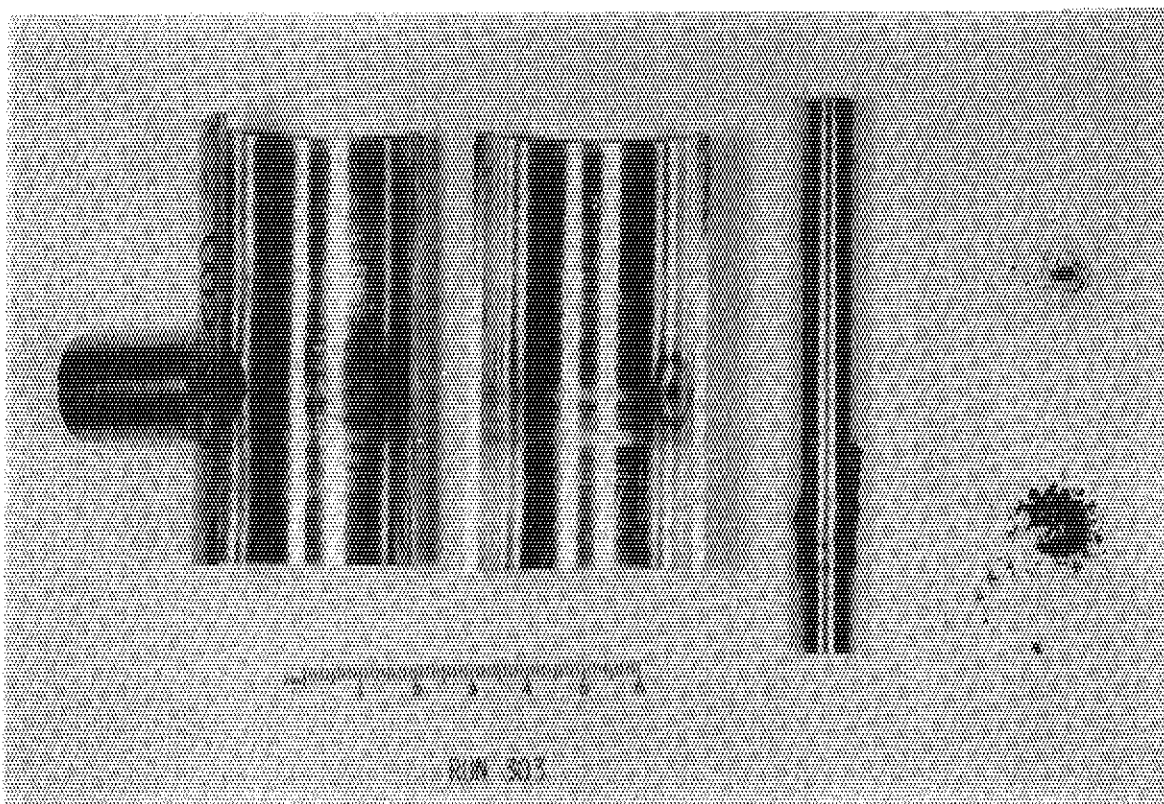


Photo.10 Test Piece of Run 303

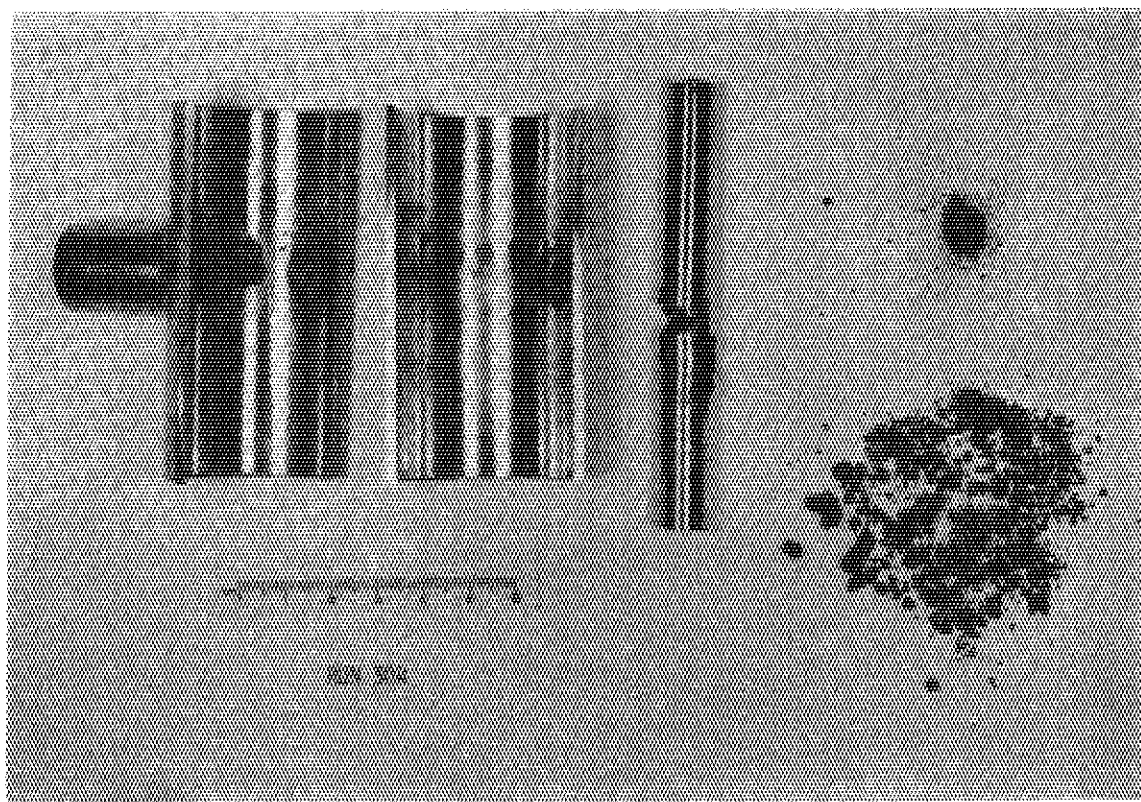


Photo.11 Test Piece of Run 304

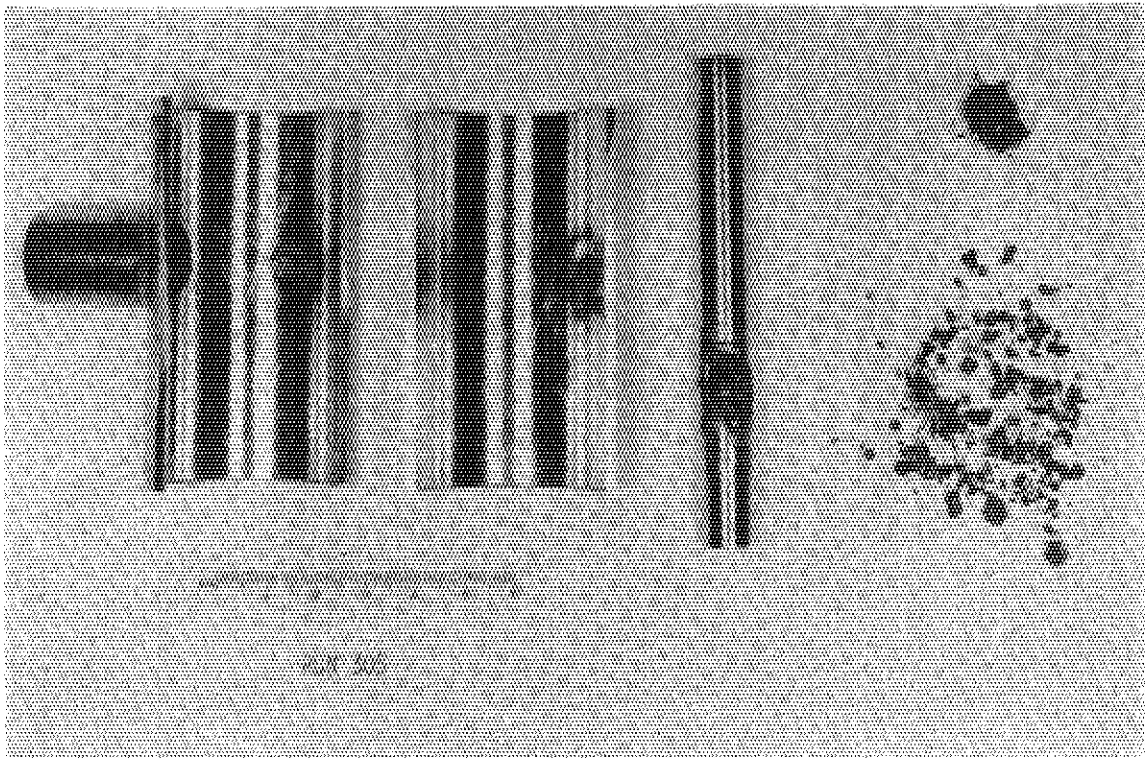


Photo.12 Test Piece of Run 305

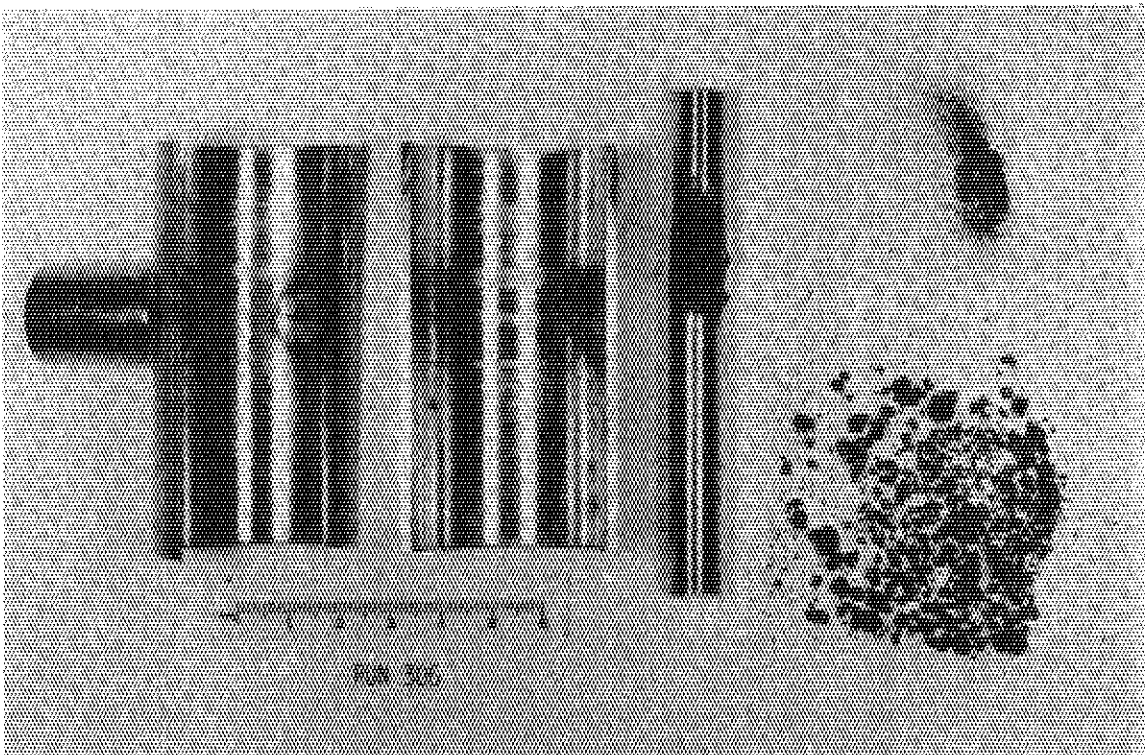


Photo.13 Test Piece of Run 306

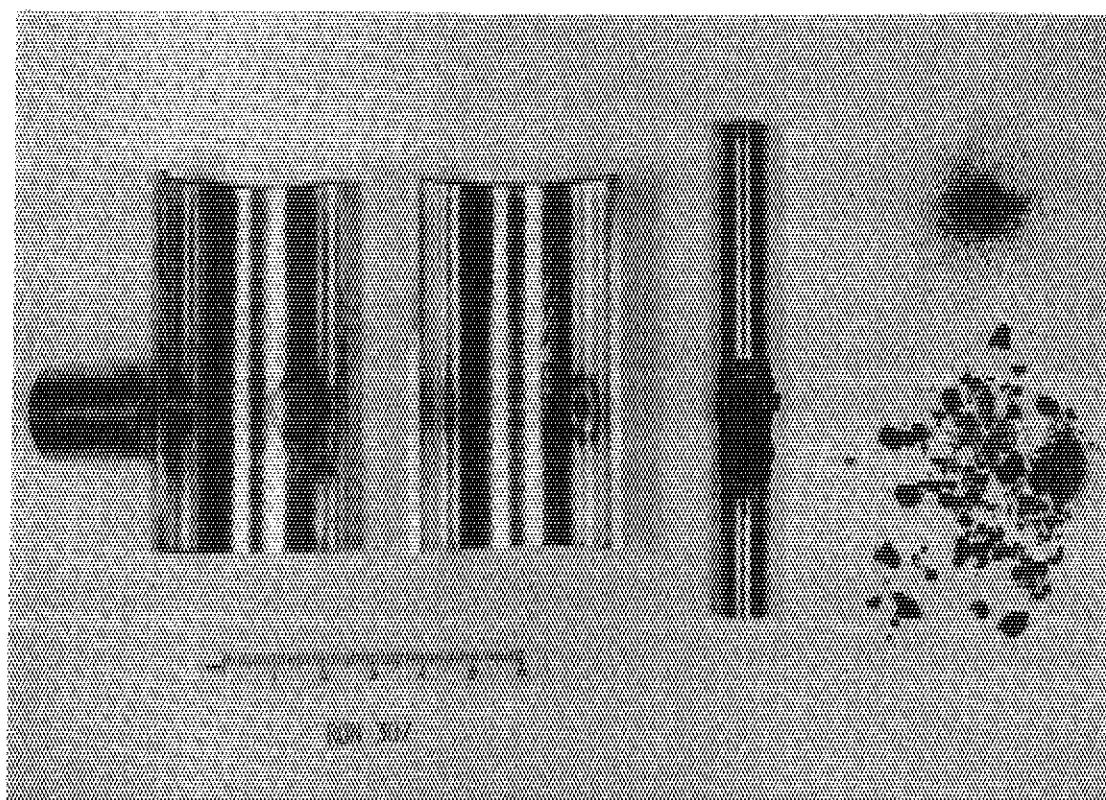


Photo.14 Test Piece of Run 307

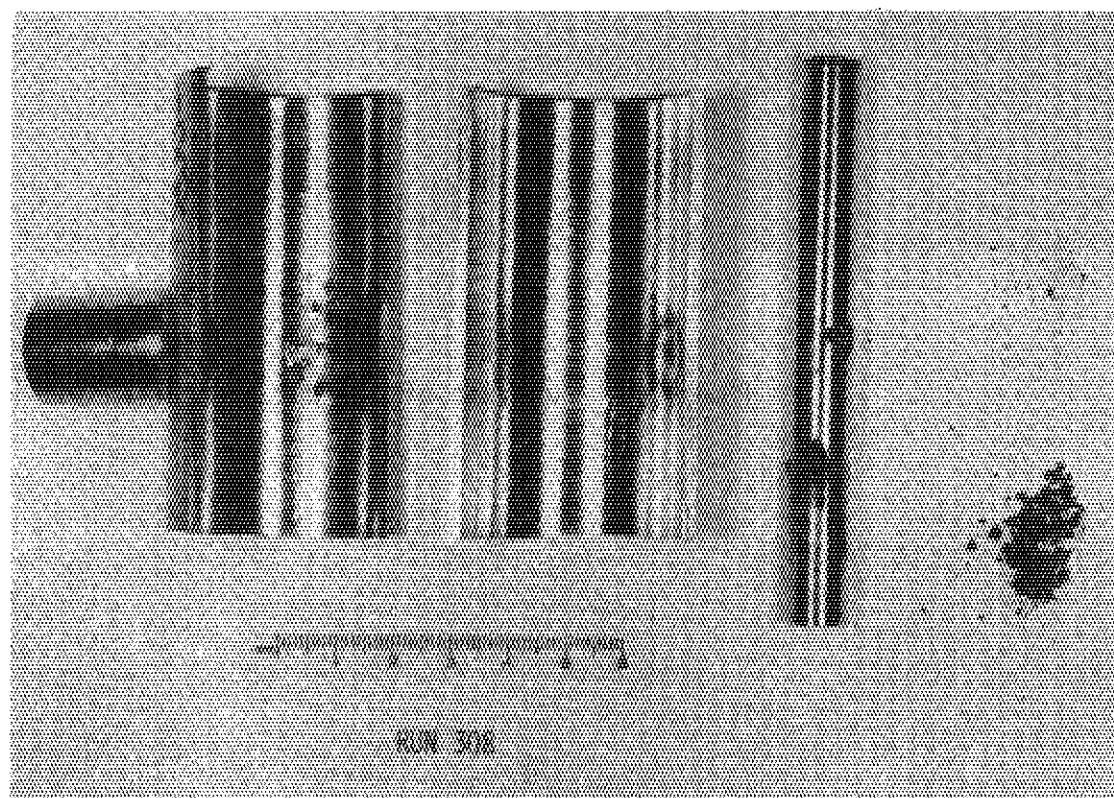


Photo.15 Test Piece of Run 308

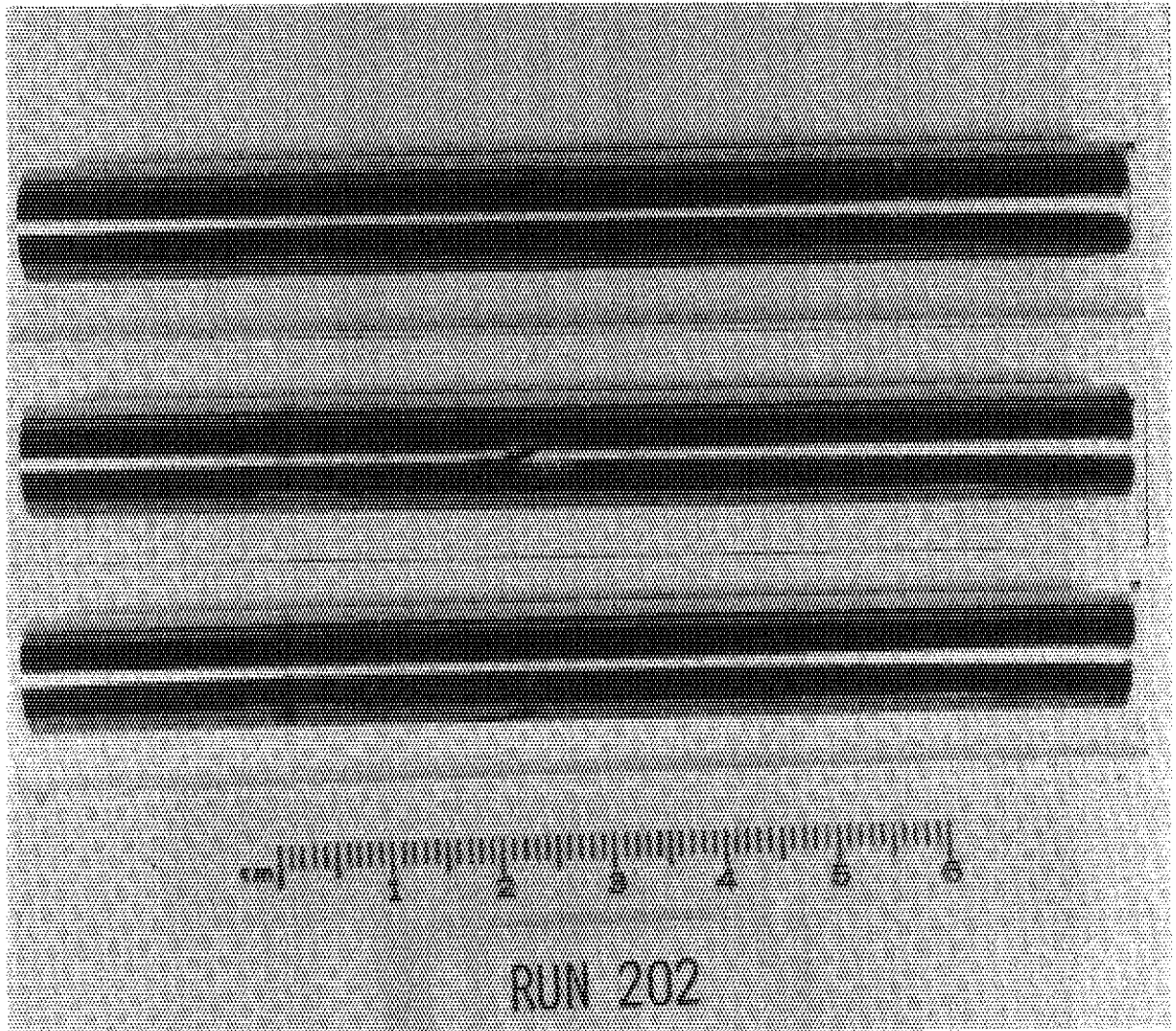


Photo 16 Fuel Pin of Run 202

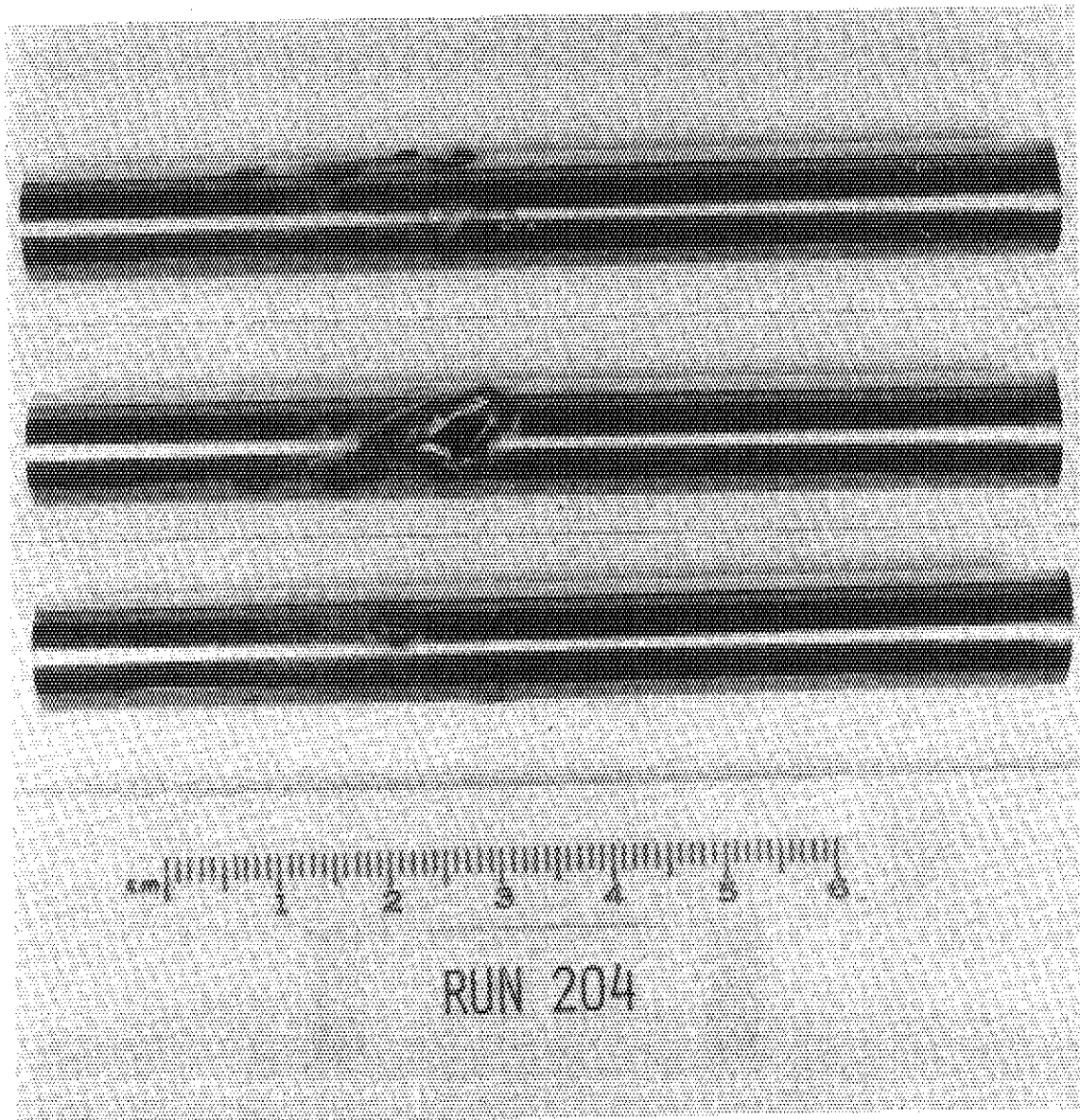


Photo.17 Fuel Pin of Run 204

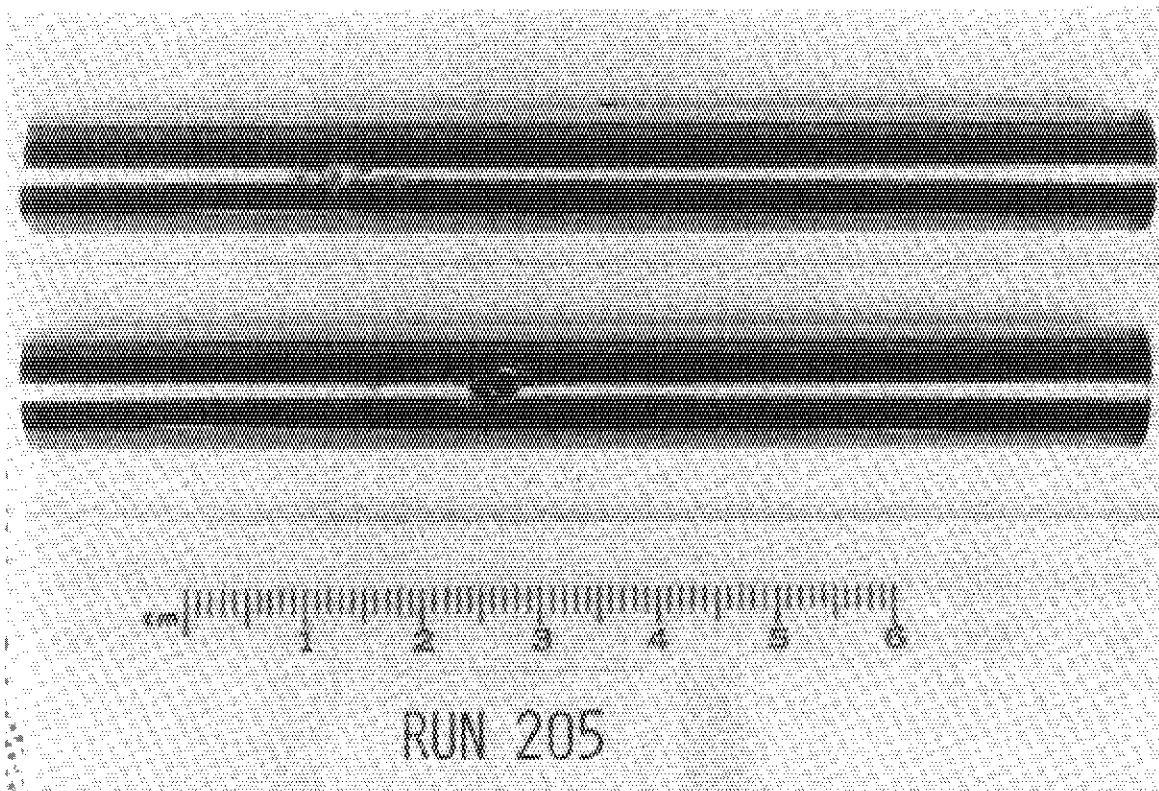


Photo.18 Fuel Pin of Run 205

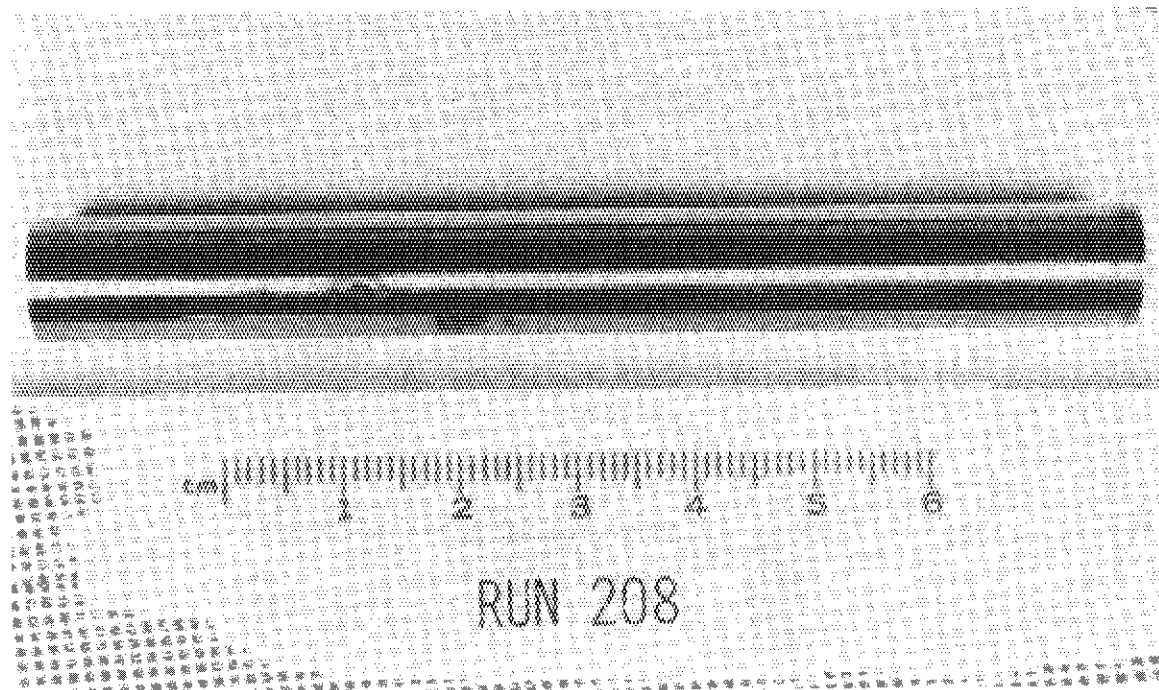


Photo.19 Fuel Pin of Run 208

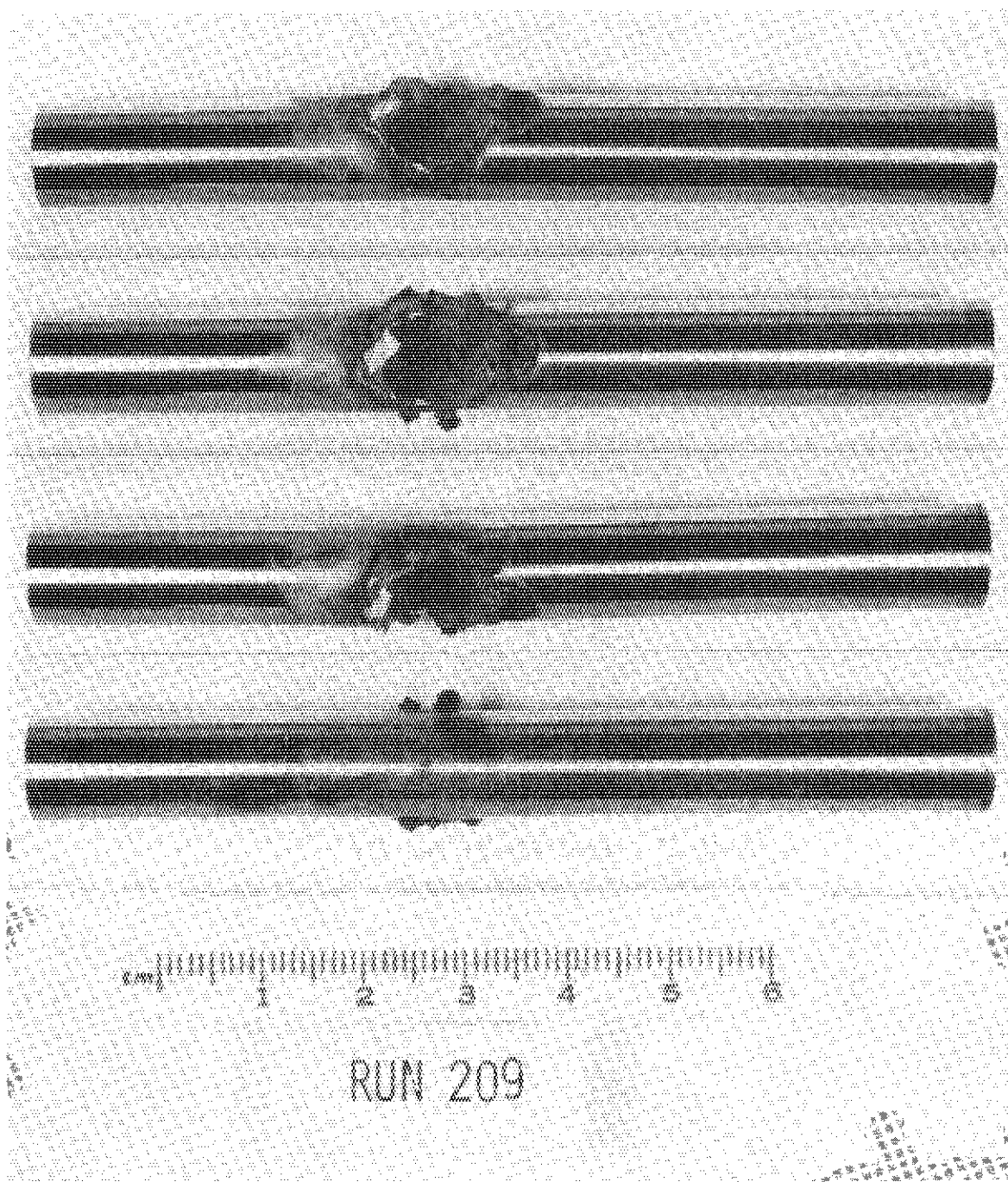


Photo.20 Fuel Pin of Run 209

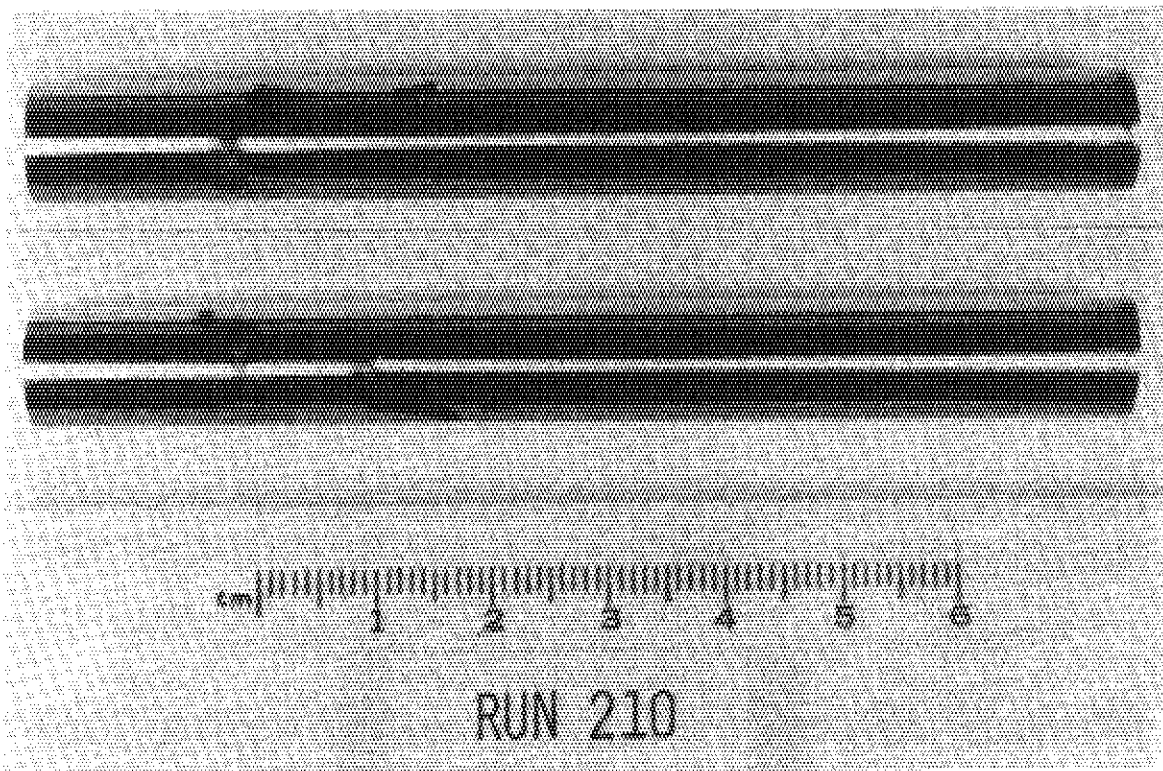


Photo.21 Fuel Pin of Run 210

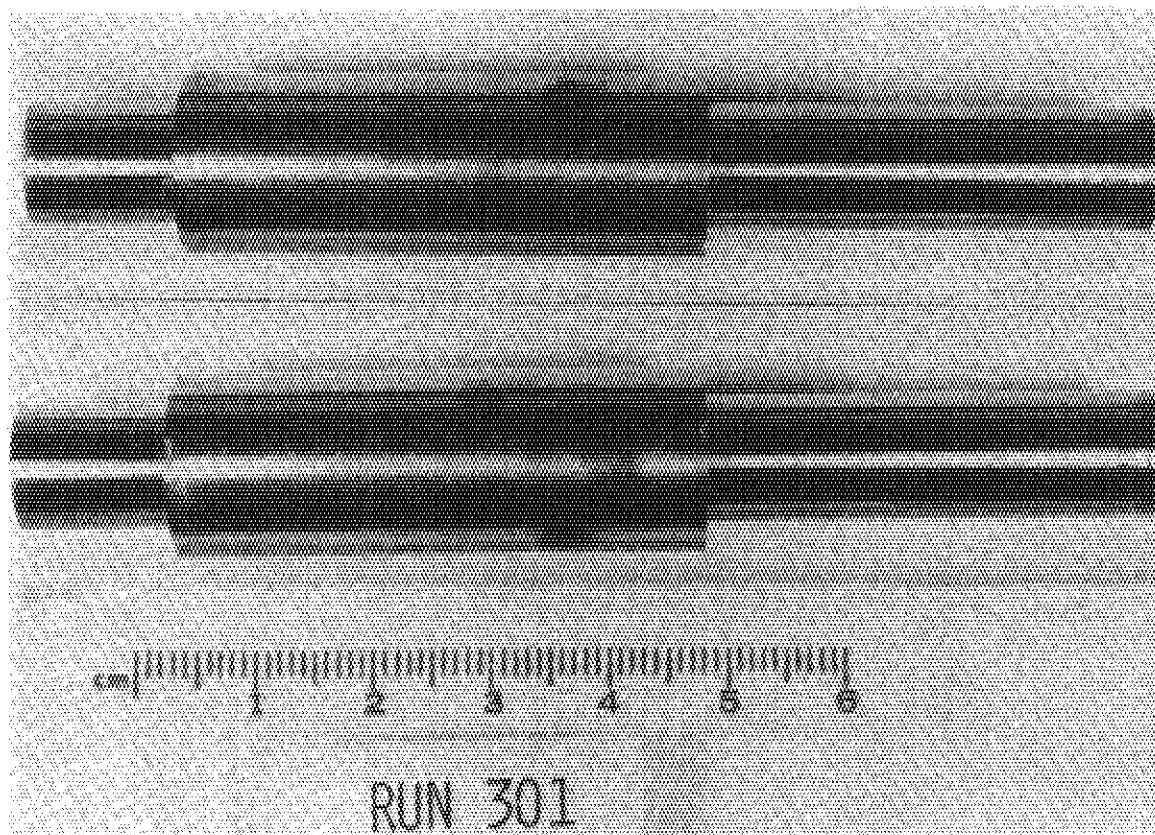


Photo.22 Fuel Pin of Run 301

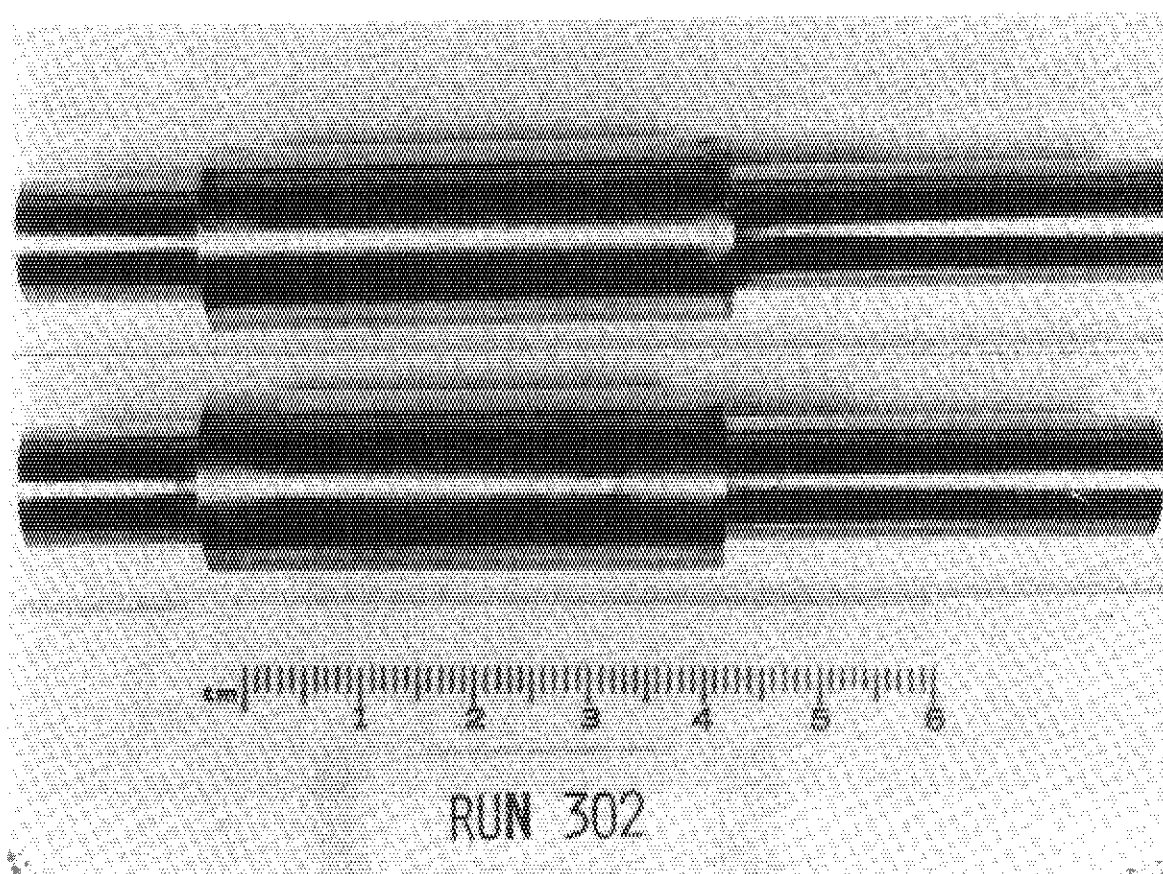


Photo.23 Fuel Pin of Run 302

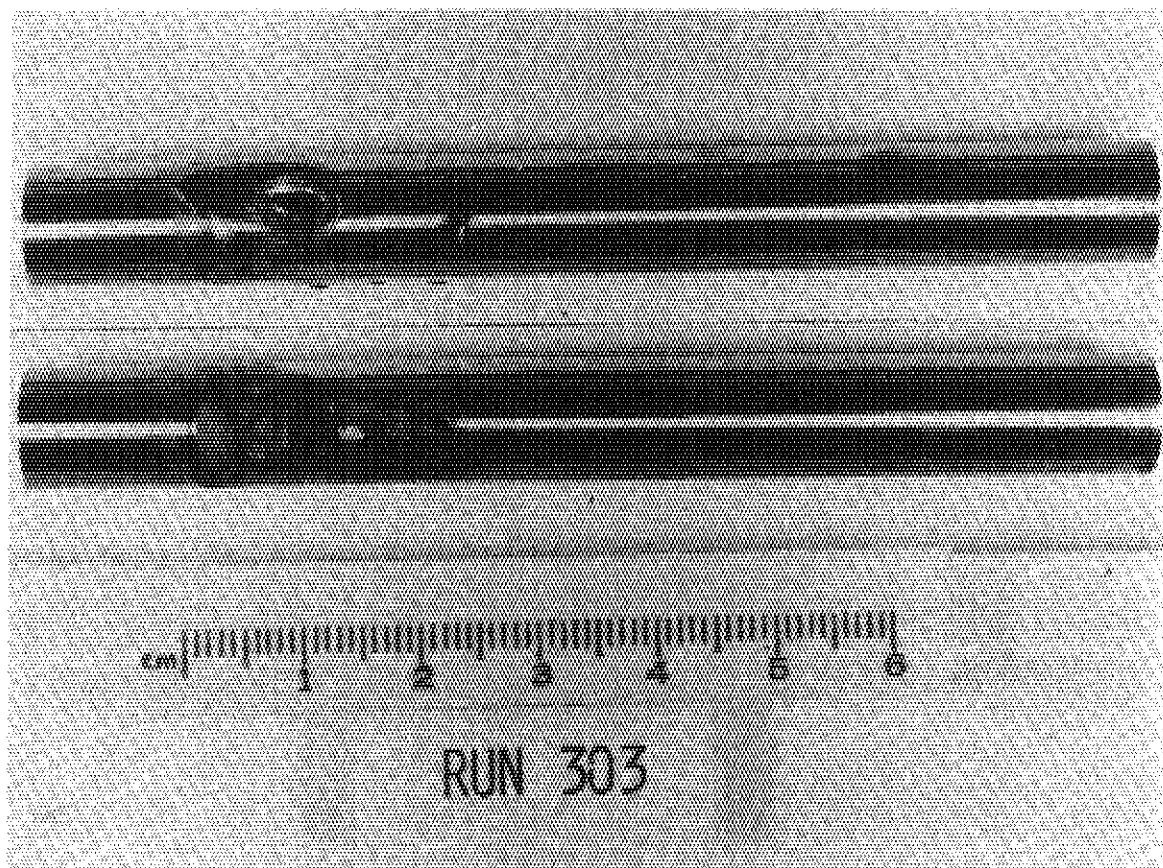


Photo.24 Fuel Pin of Run 303

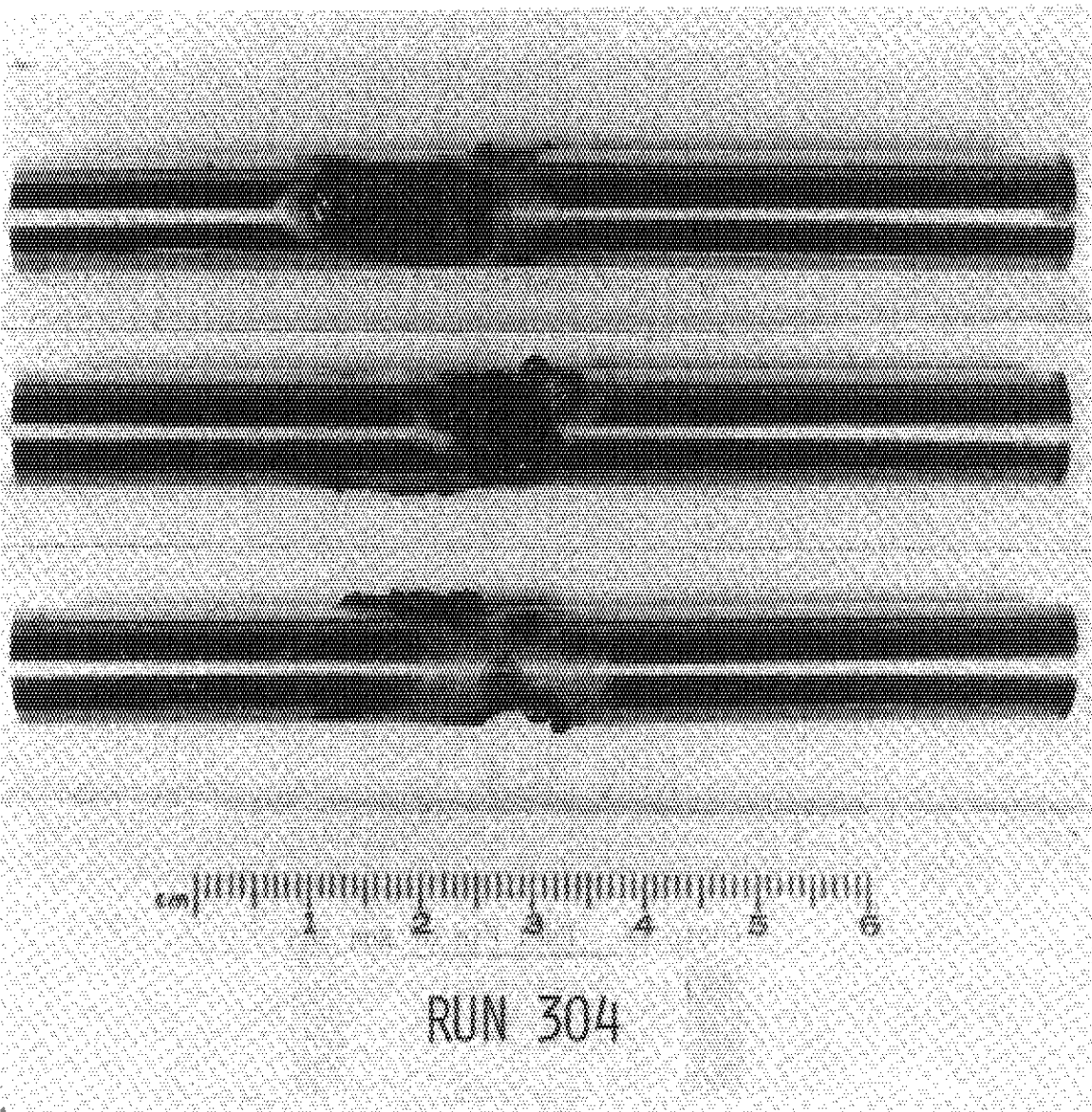


Photo.25 Fuel Pin of Run 304

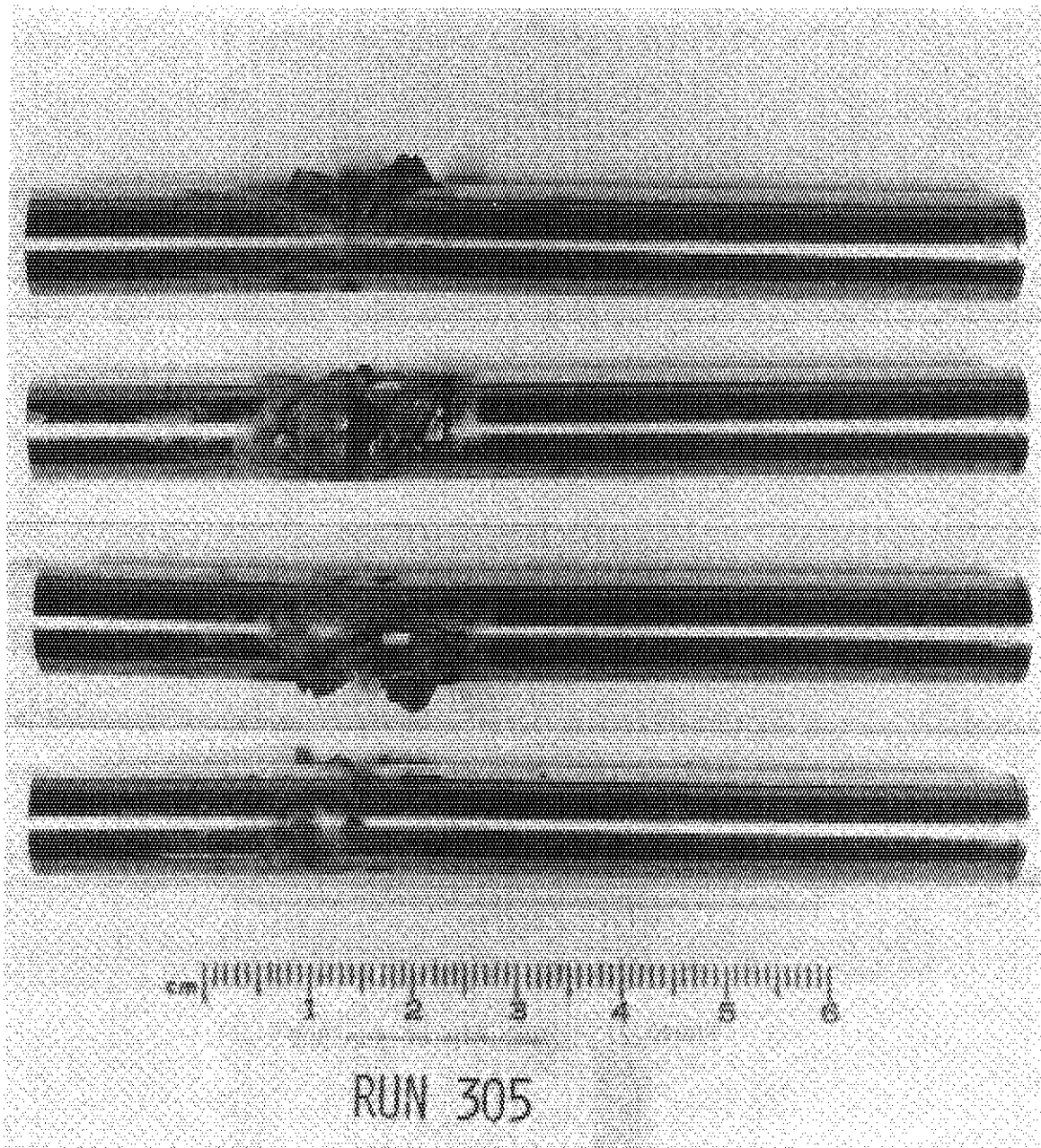


Photo.26 Fuel Pin of Run 305

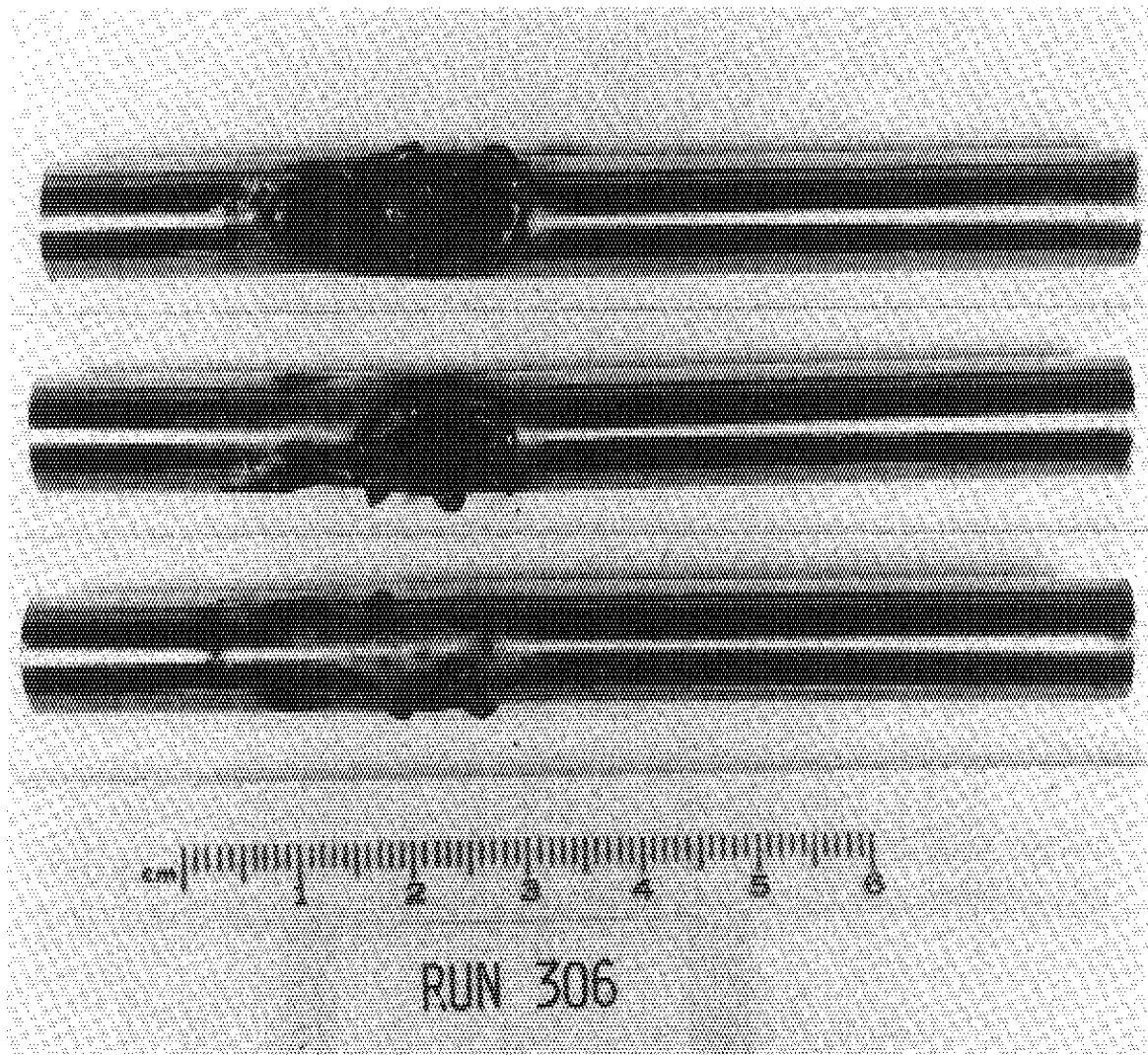


Photo.27 Fuel Pin of Run 306

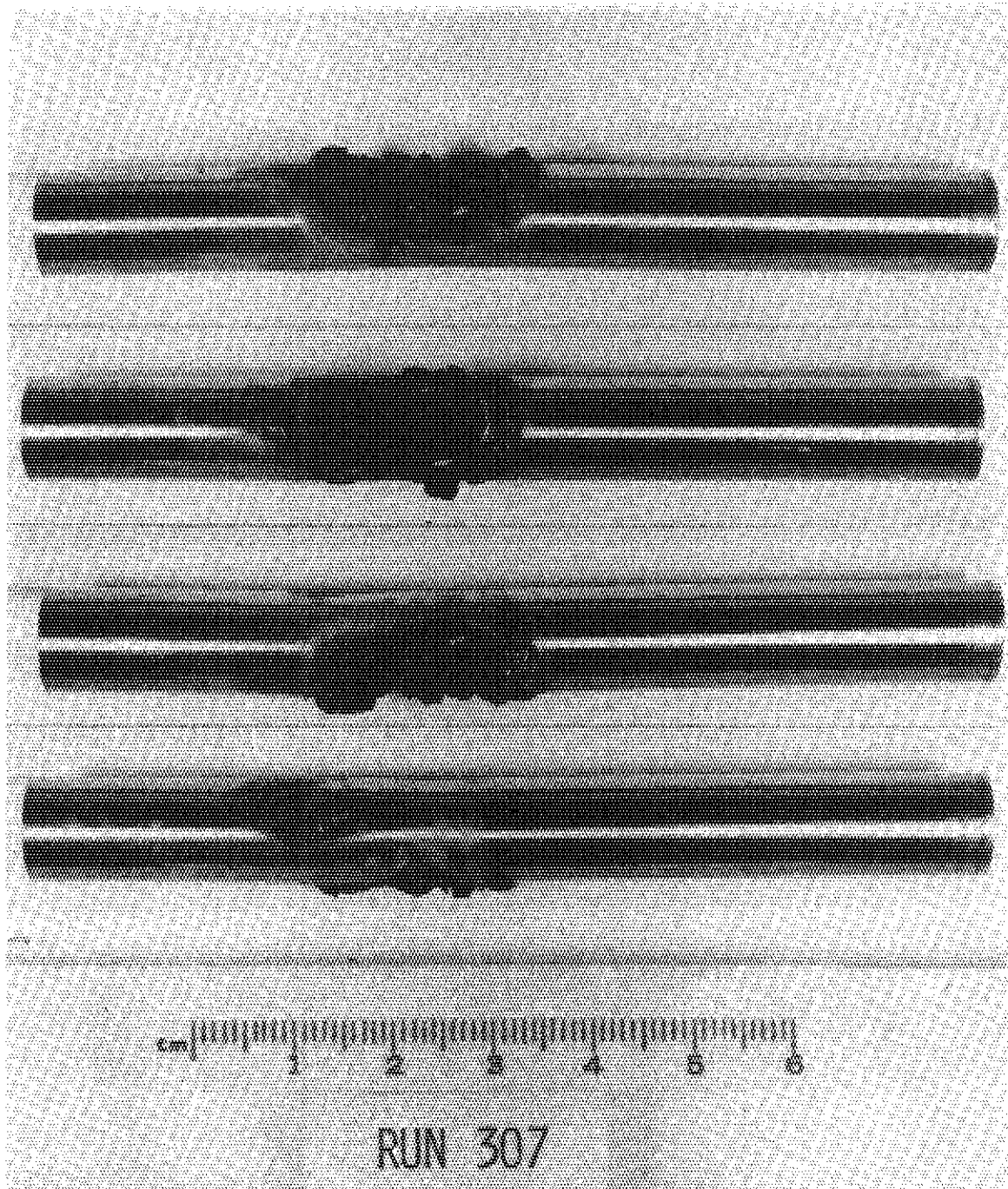


Photo.28 Fuel Pin of Run 307

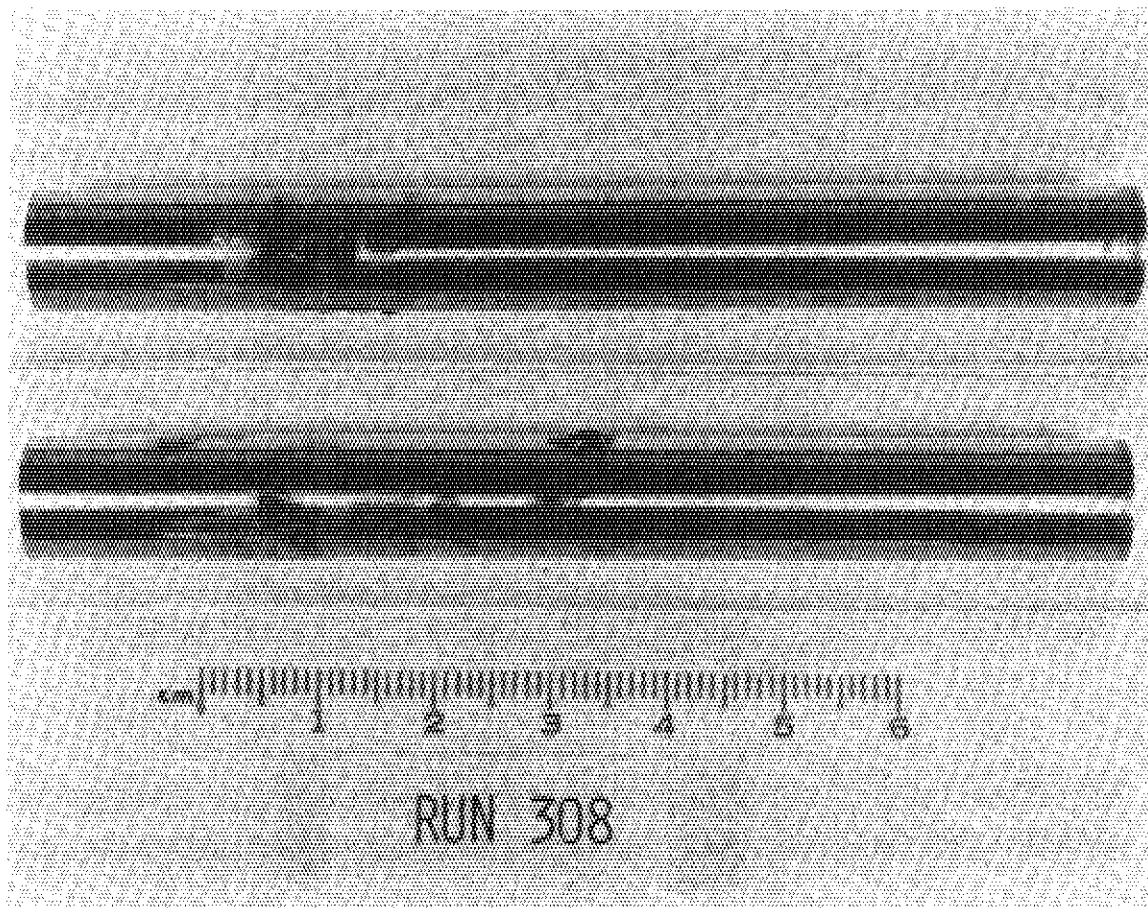


Photo.29 Fuel Pin of Run 308

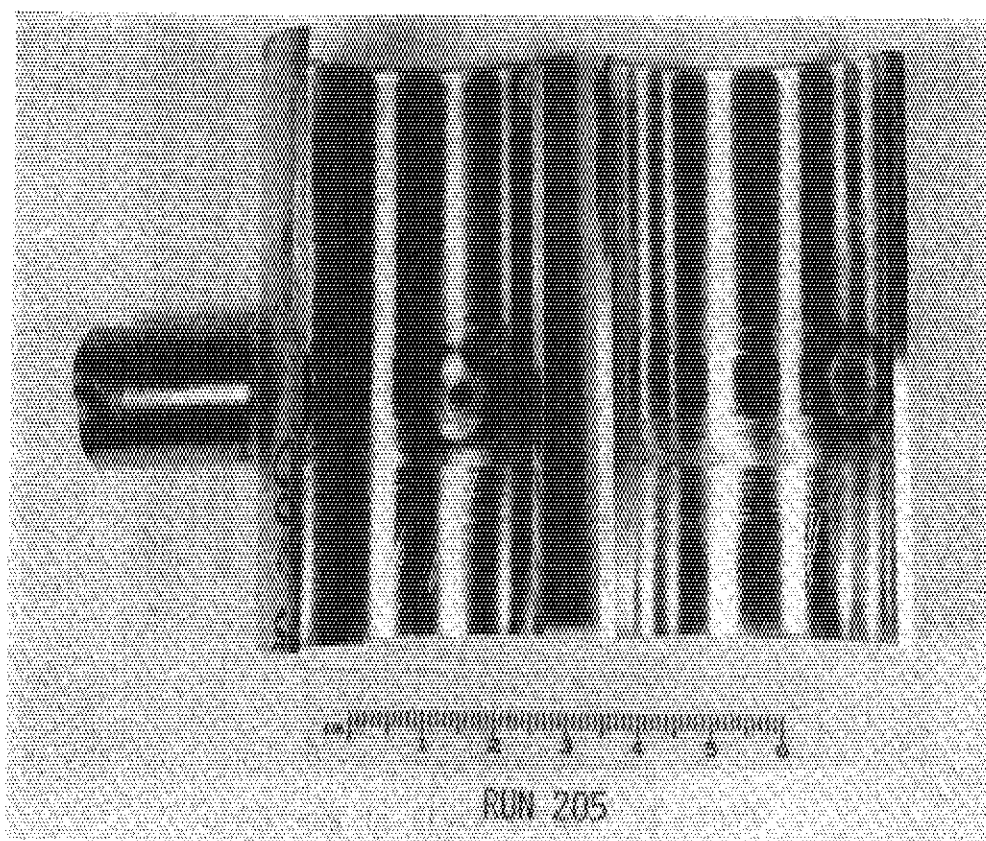


Photo.30 Outer Shell of Run 205

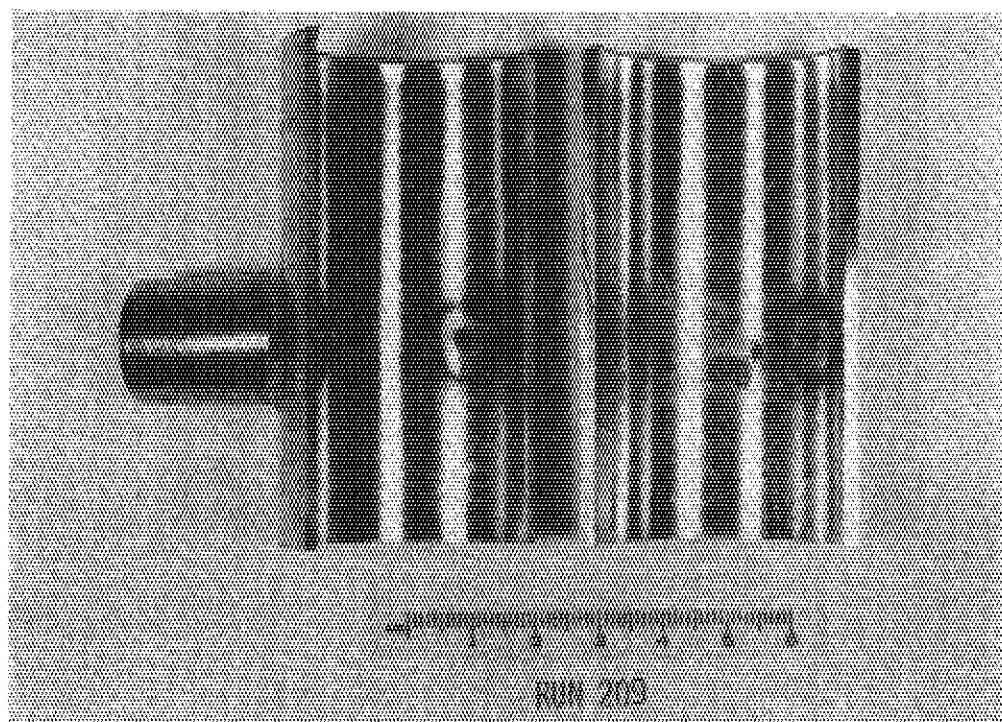


Photo.31 Outer Shell of Run 209

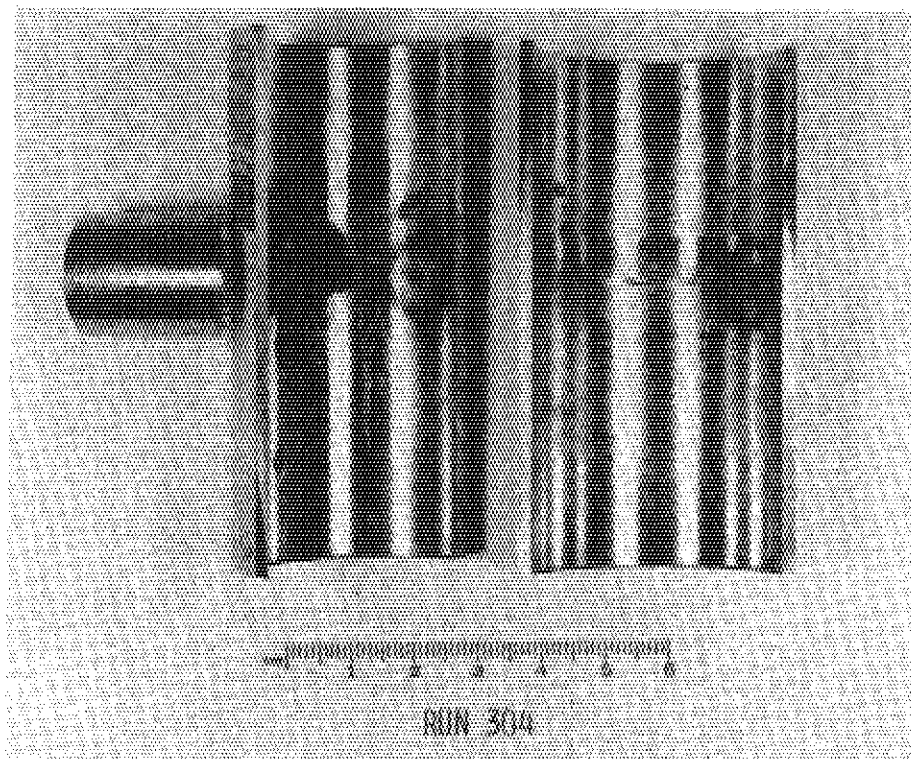


Photo.32 Outer Shell of Run 304

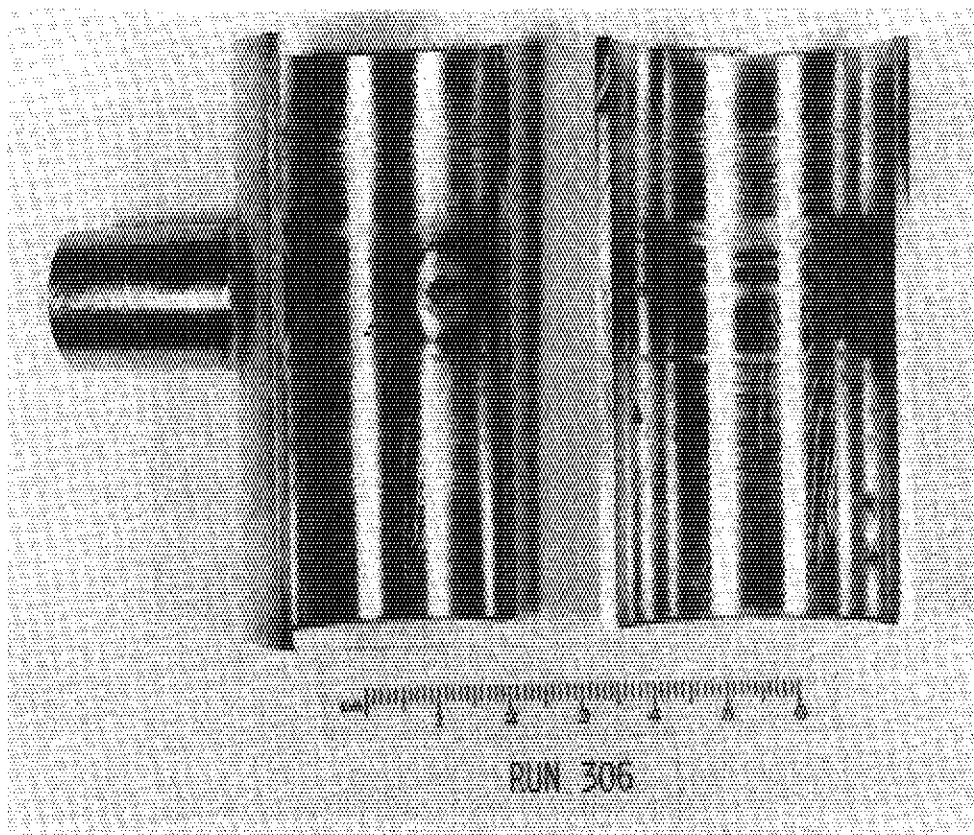


Photo.33 Outer Shell of Run 306

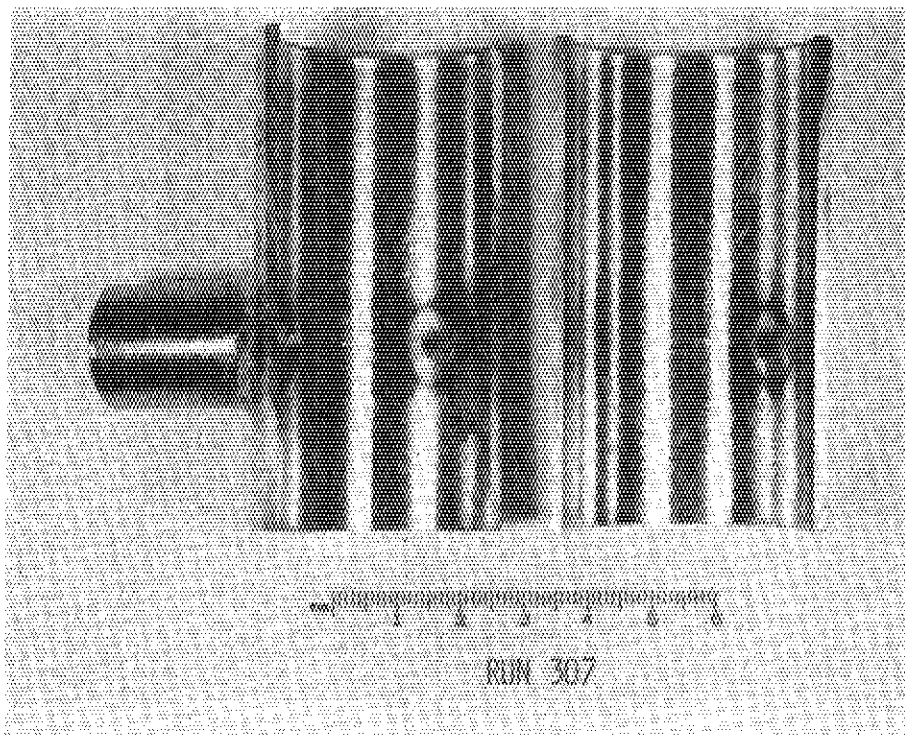


Photo.34 Outer Shell of Run 307

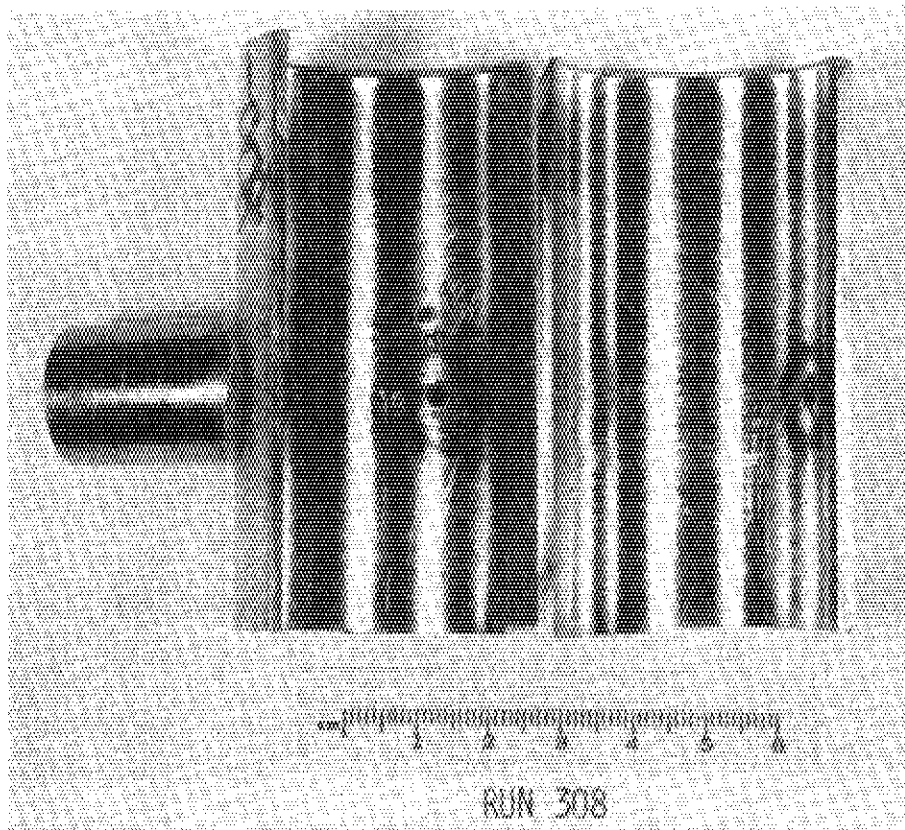


Photo.35 Outer Shell of Run 308

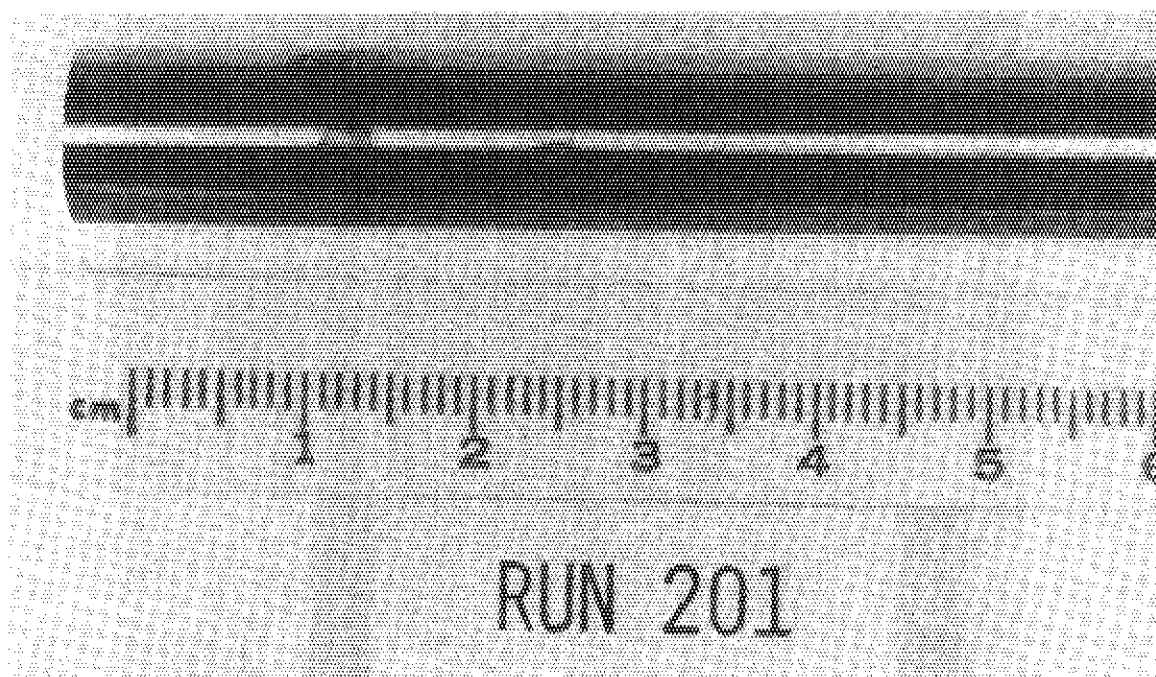


Photo.36 Fuel Pin of Run 201 (enlarged)

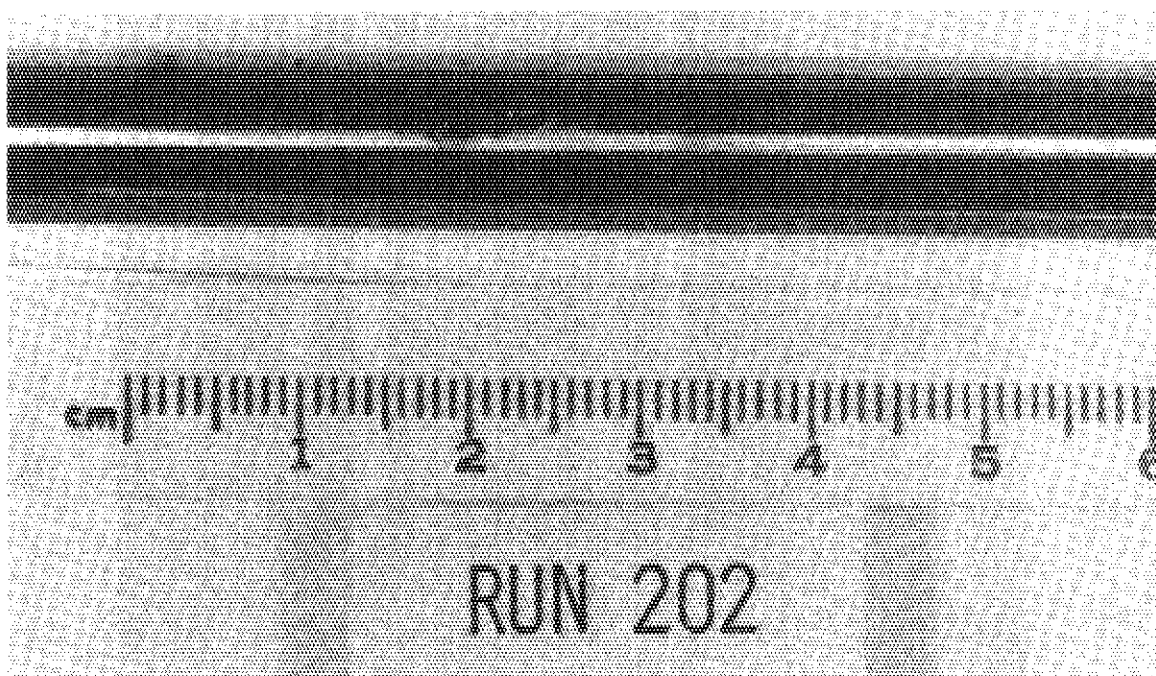


Photo.37 Fuel Pin of Run 202 (enlarged)

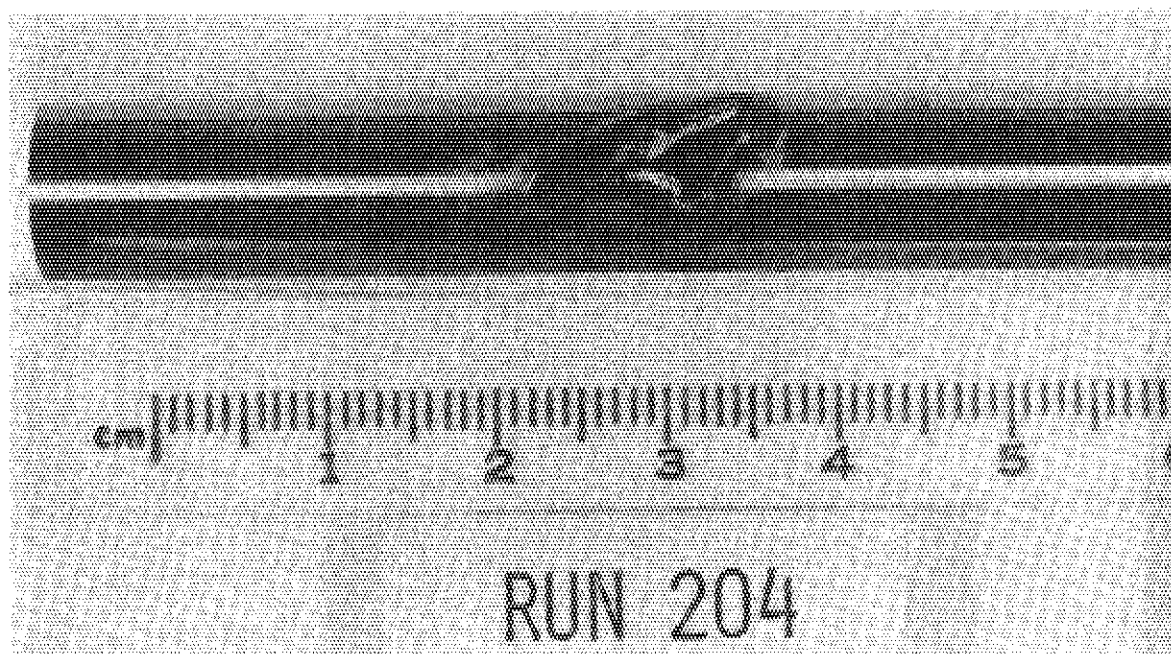


Photo.38 Fuel Pin of Run 204 (enlarged)

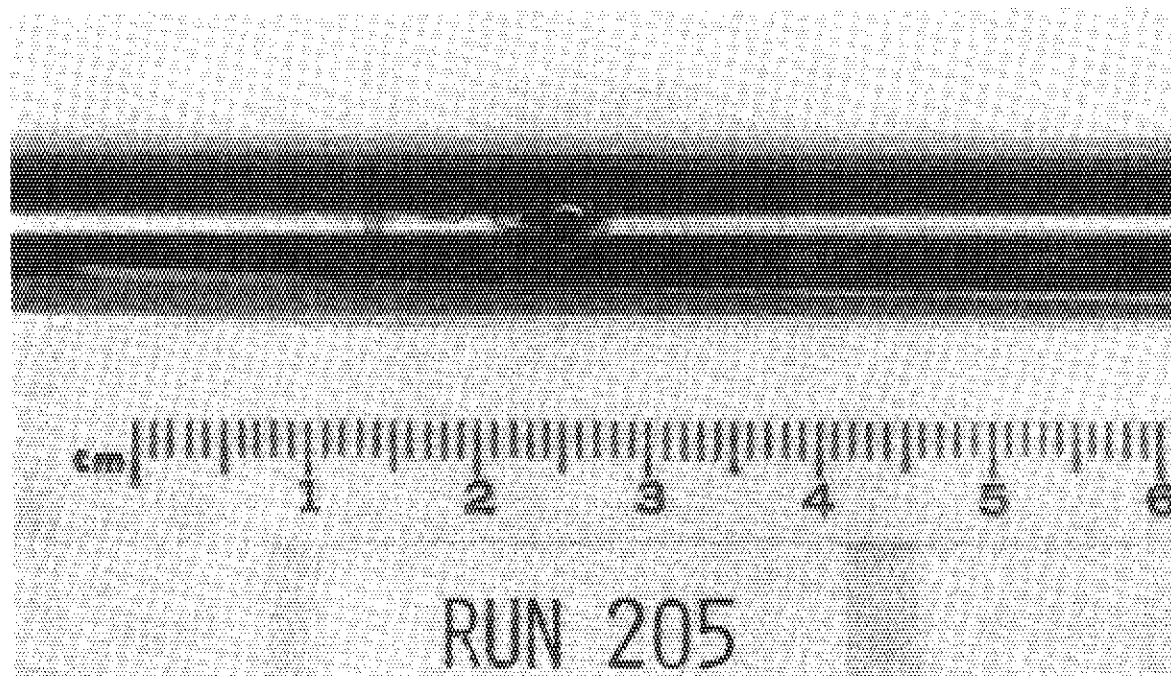


Photo.39 Fuel Pin of Run 205 (enlarged)

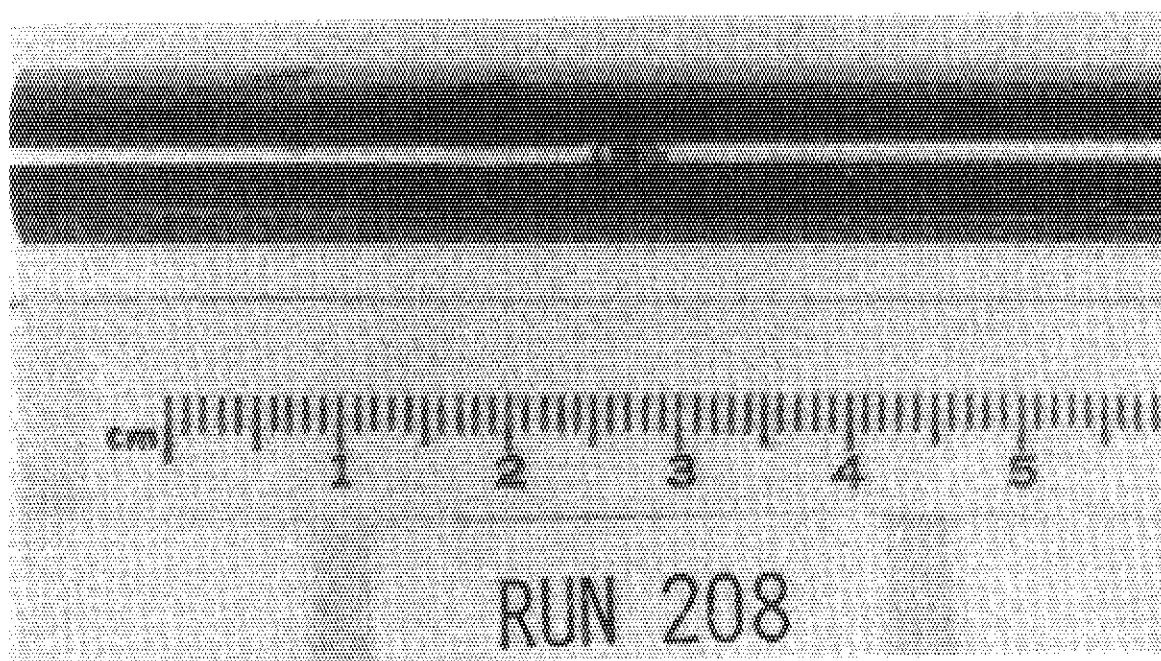


Photo.40 Fuel Pin of Run 208 (enlarged)

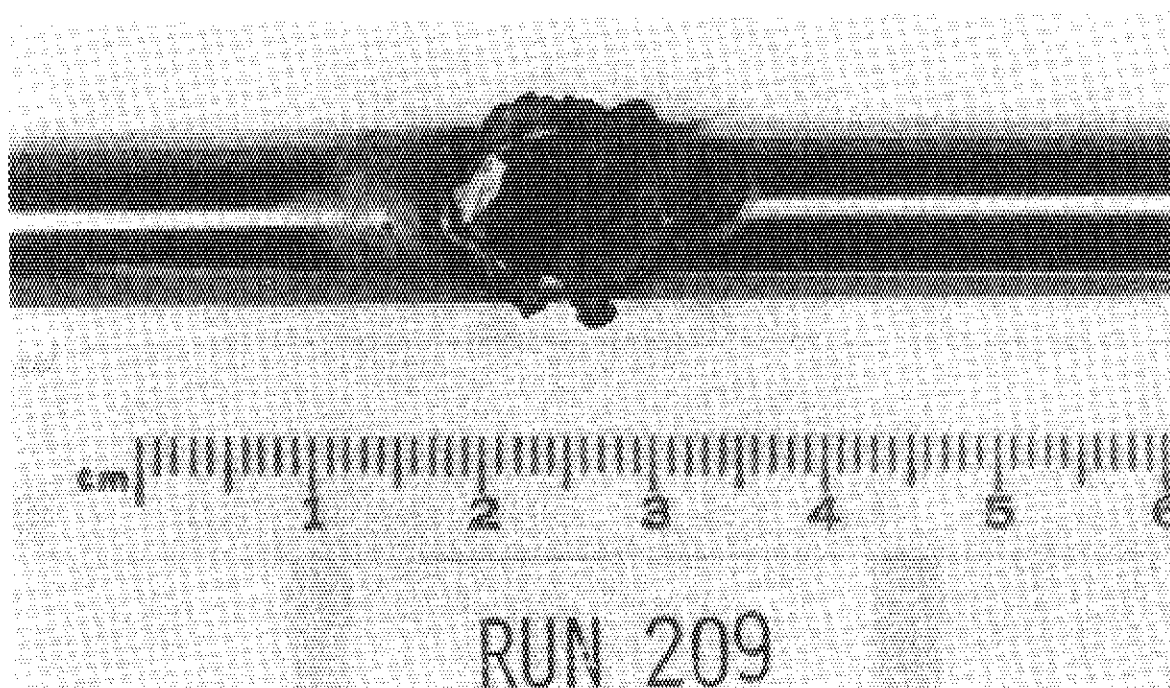


Photo.41 Fuel Pin of Run 209 (enlarged)

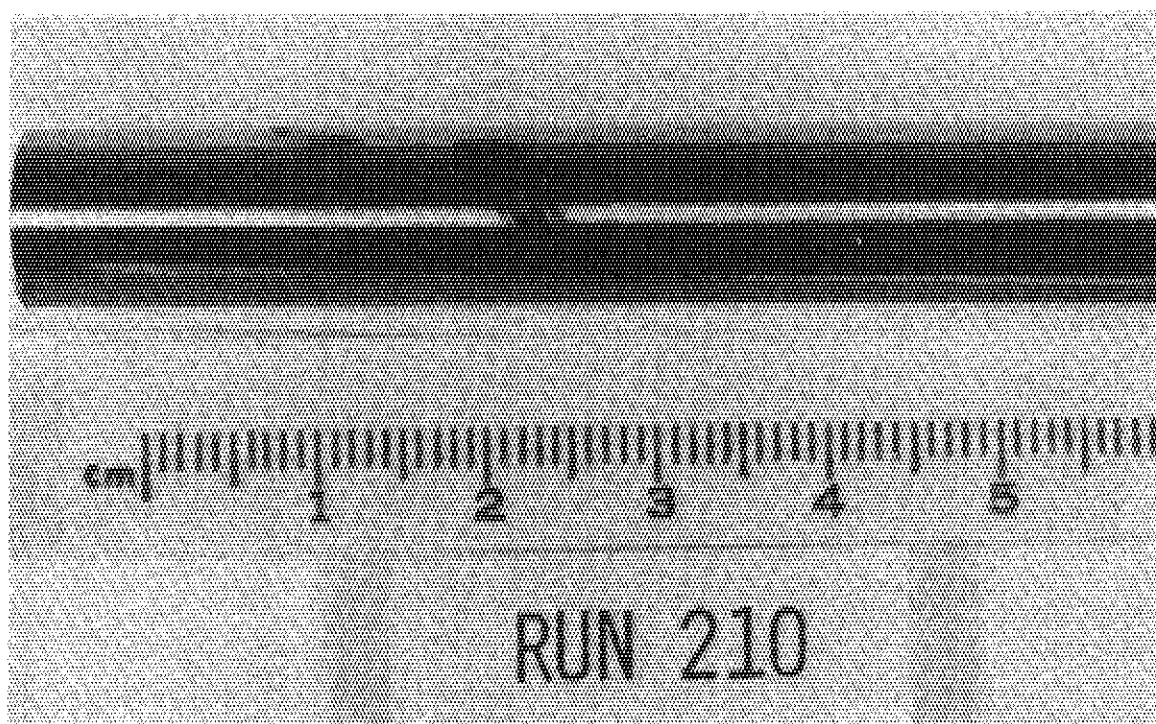


Photo.42 Fuel Pin of Run 210 (enlarged)

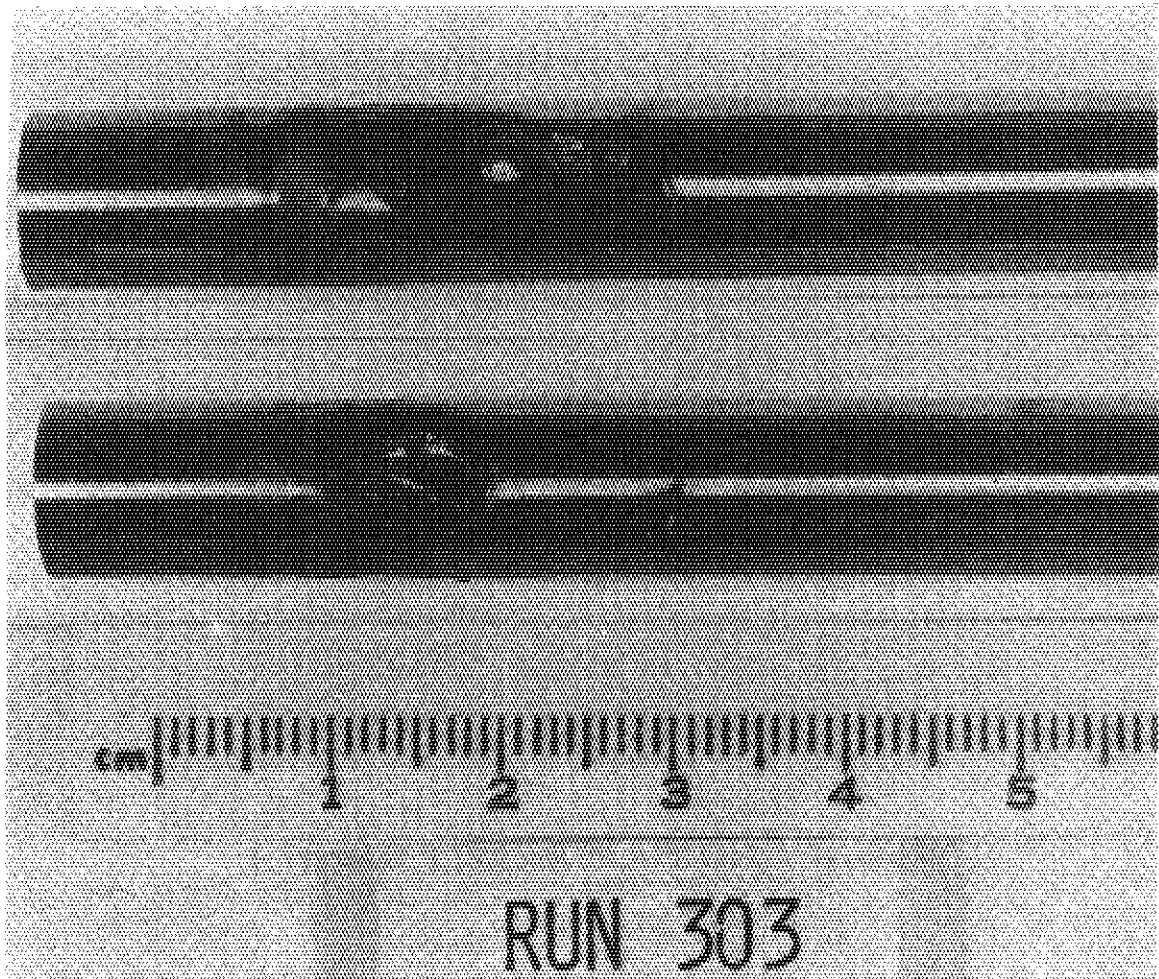


Photo.43 Fuel Pin of Run 303 (enlarged)

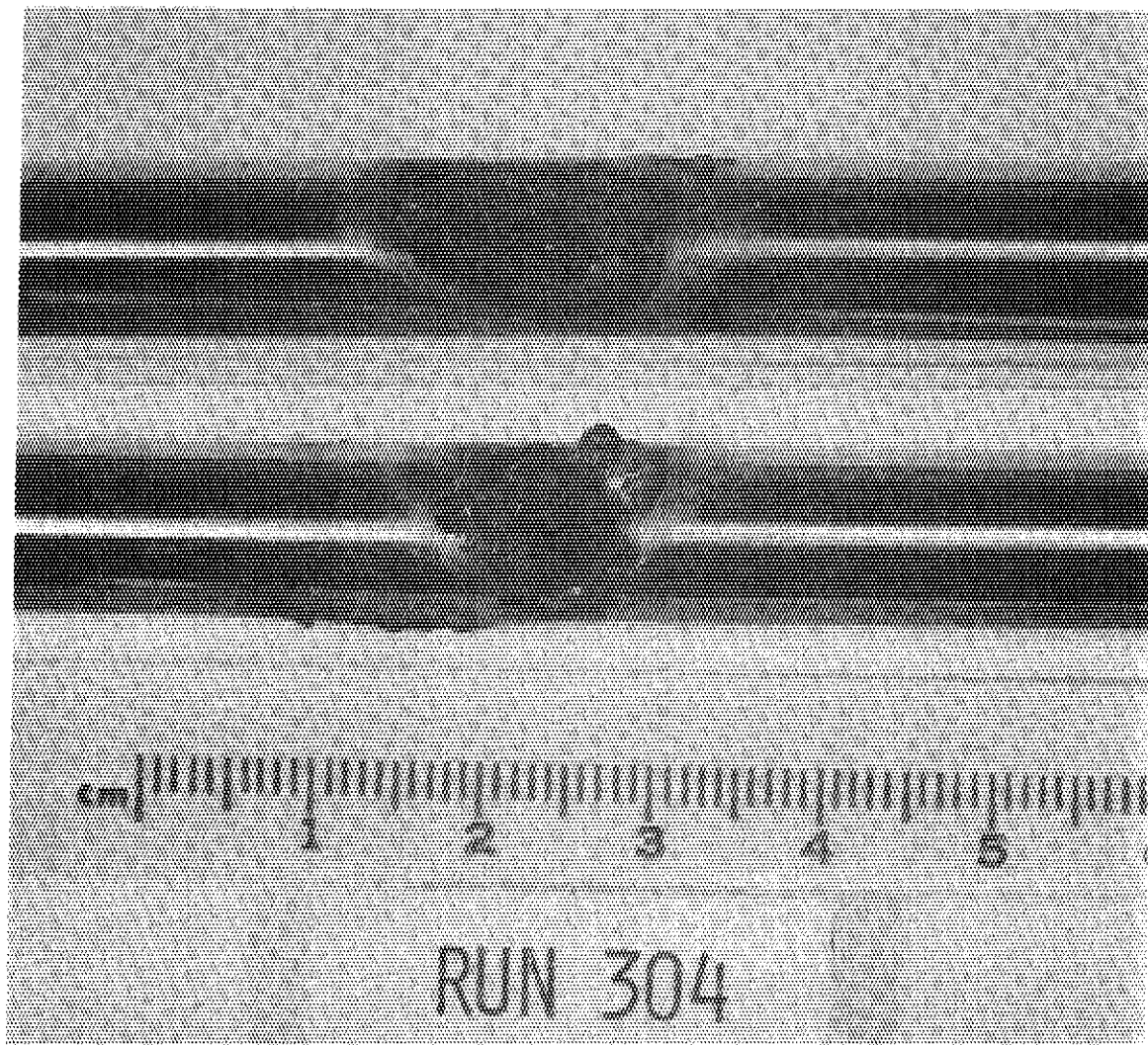


Photo.44 Fuel Pin of Run 304 (enlarged)

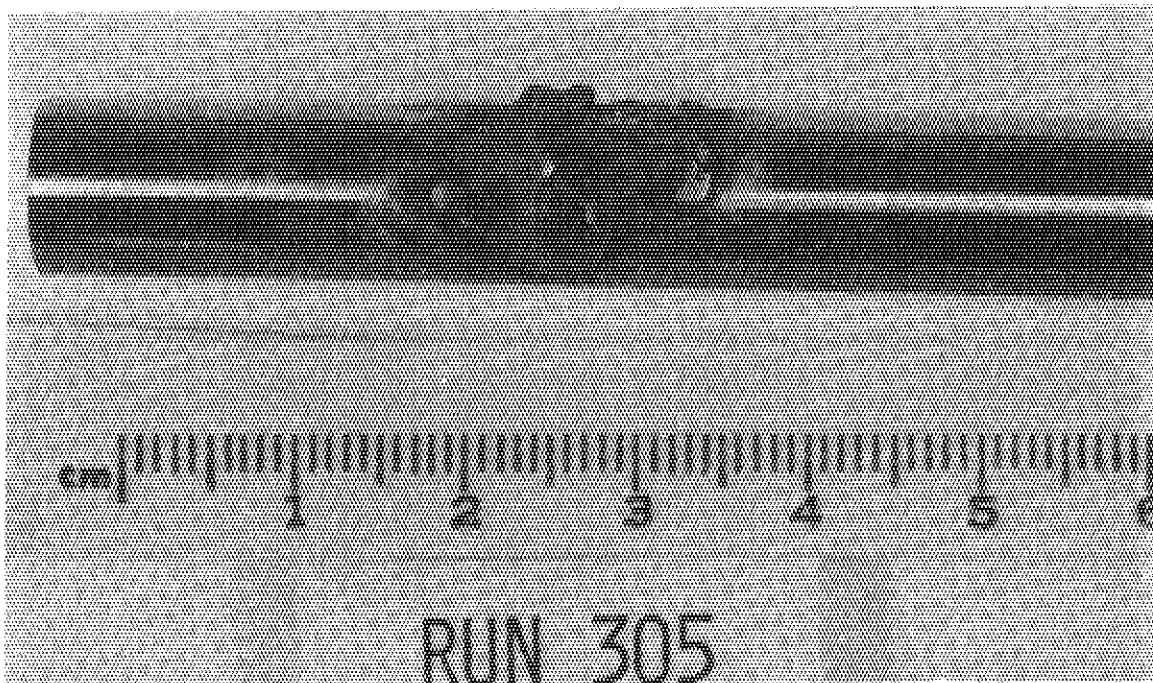


Photo.45 Fuel Pin of Run 305 (enlarged)

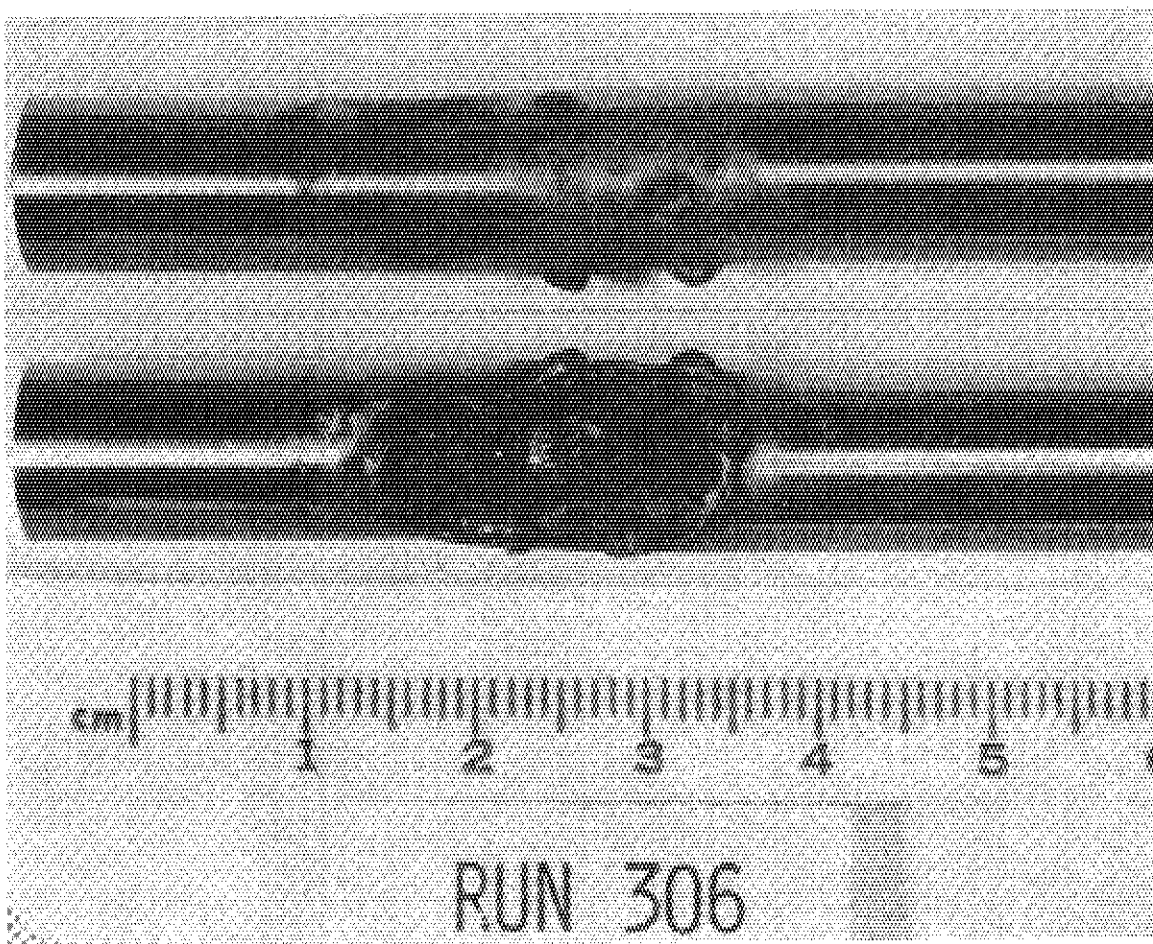


Photo.46 Fuel Pin of Run 306 (enlarged)

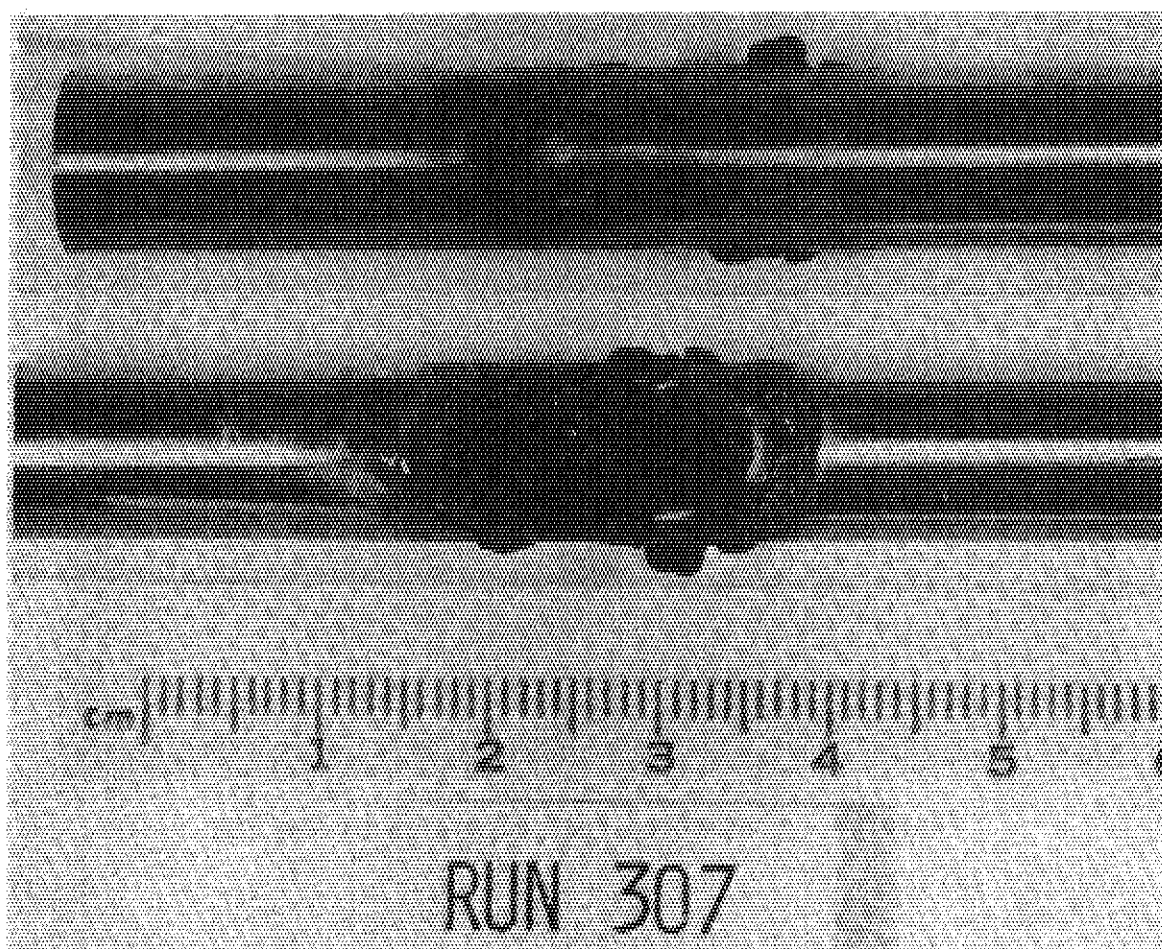


Photo.47 Fuel Pin of Run 307 (enlarged)

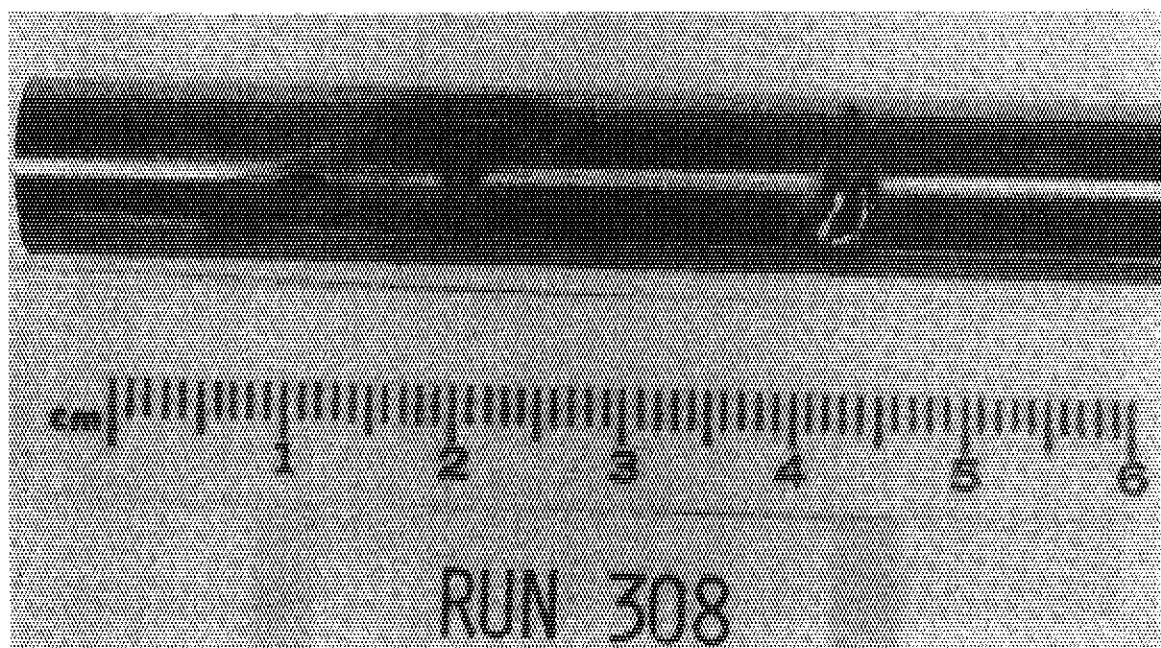


Photo.48 Fuel Pin of Run 308 (enlarged)

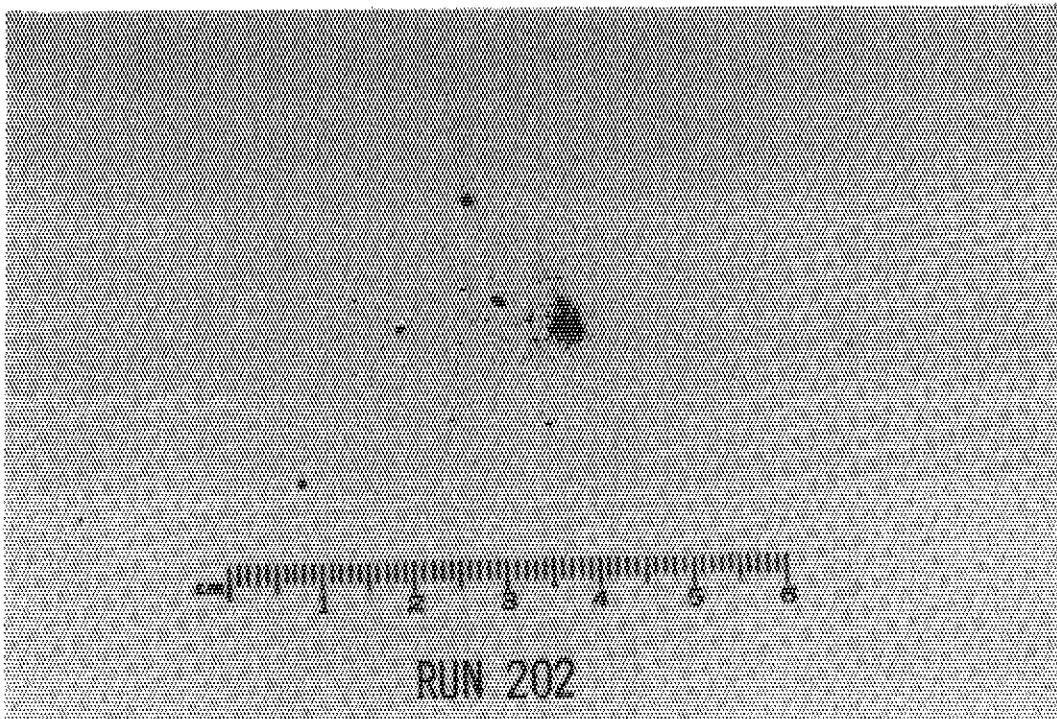


Photo.49 Fragmented Fuel Particles of Run 202

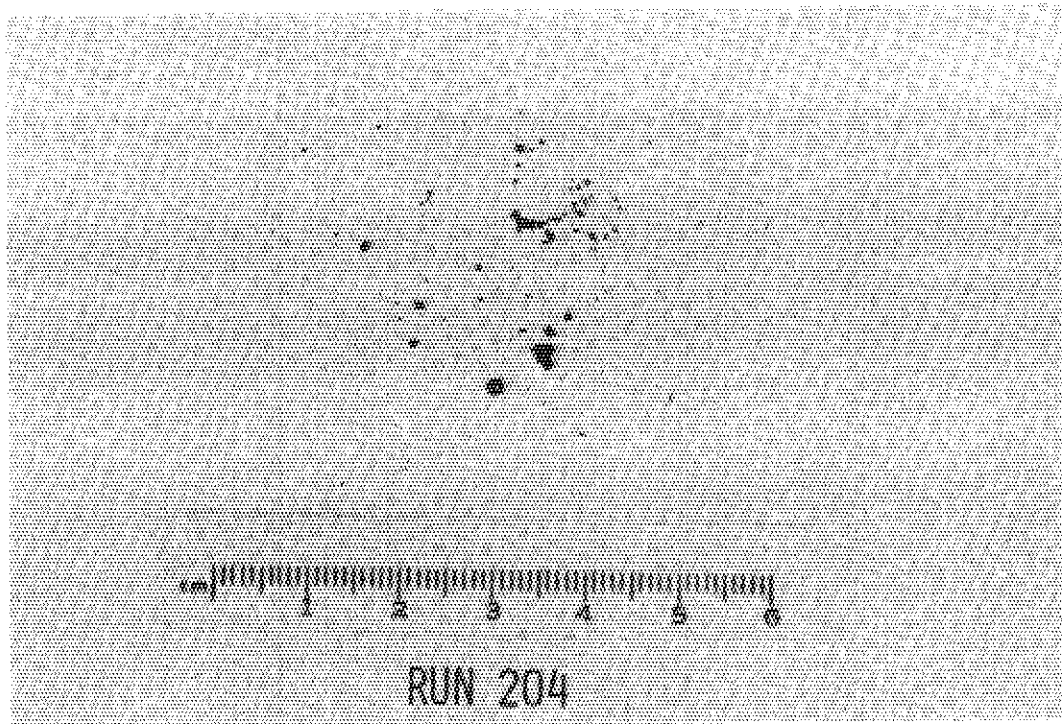


Photo.50 Fragmented Fuel Particles of Run 204

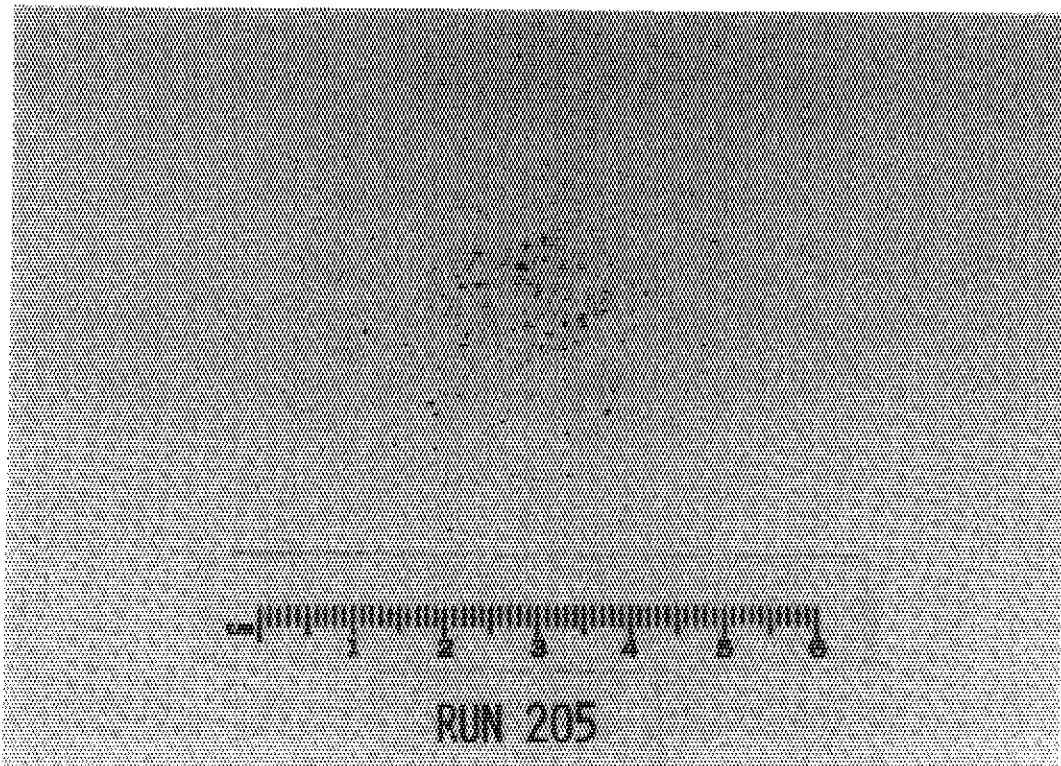


Photo.51 Fragmented Fuel Particles of Run 205

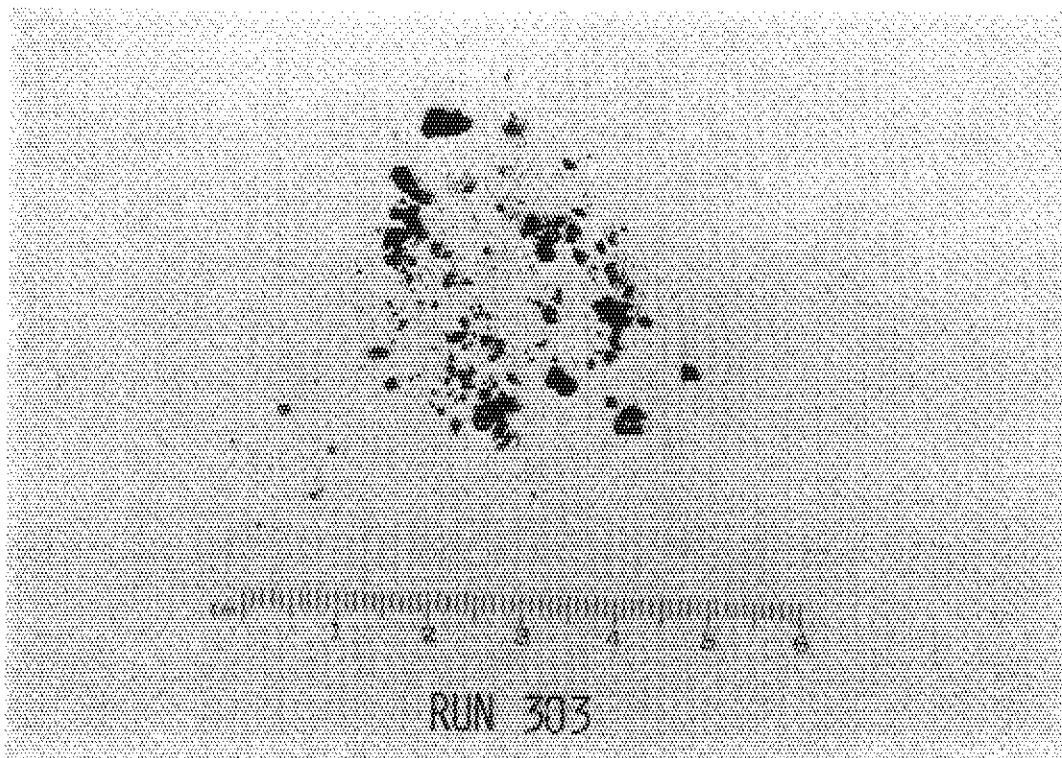


Photo.52 Fragmented Fuel Particles of Run 303

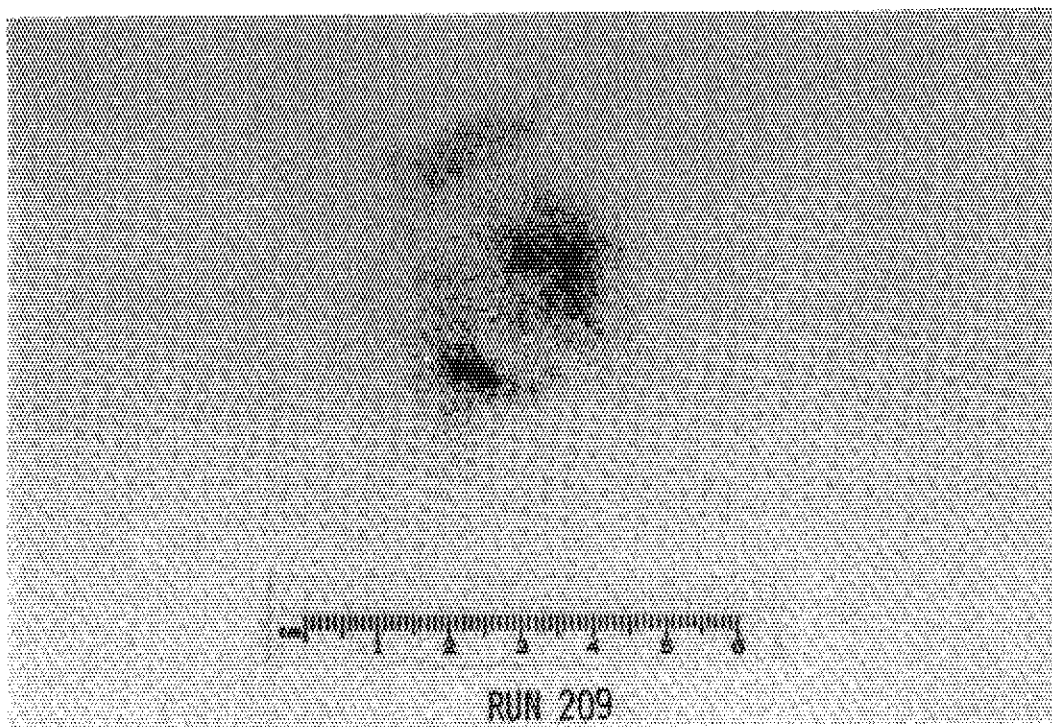


Photo.53 Fragmented Fuel Particles of Run 209 (≤ 100 mesh)

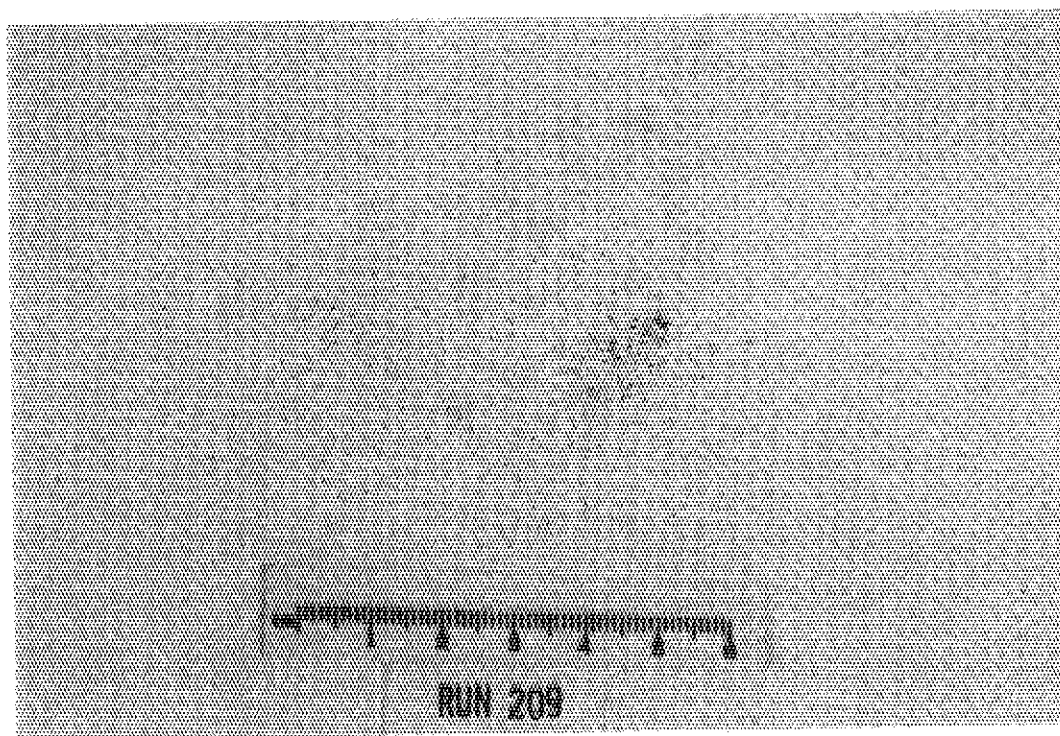


Photo.54 Fragmented Fuel Particles of Run 209 (60~100 mesh)

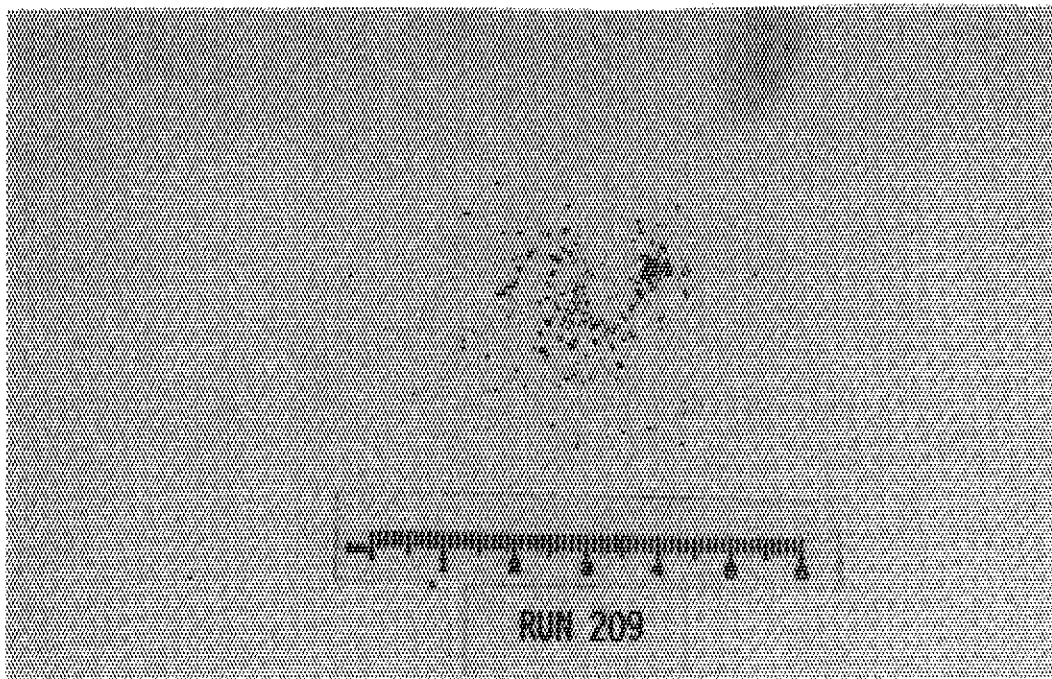


Photo.55 Fragmented Fuel Particles of Run 209 (32~60 mesh)

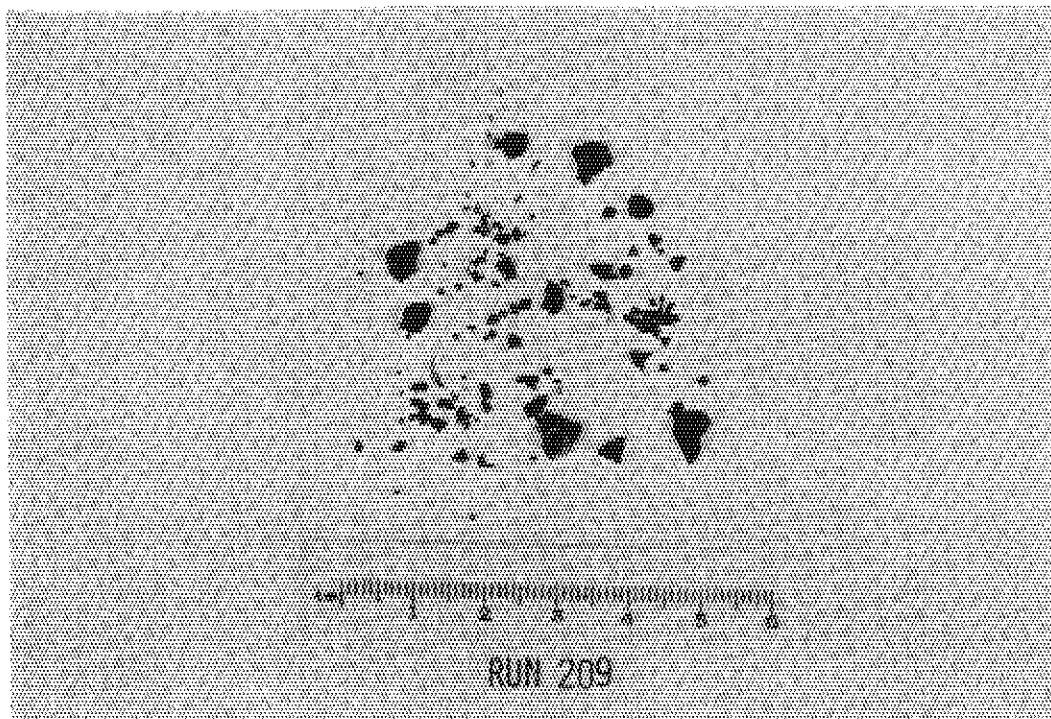


Photo.56 Fragmented Fuel Particles of Run 209 (> 32 mesh)

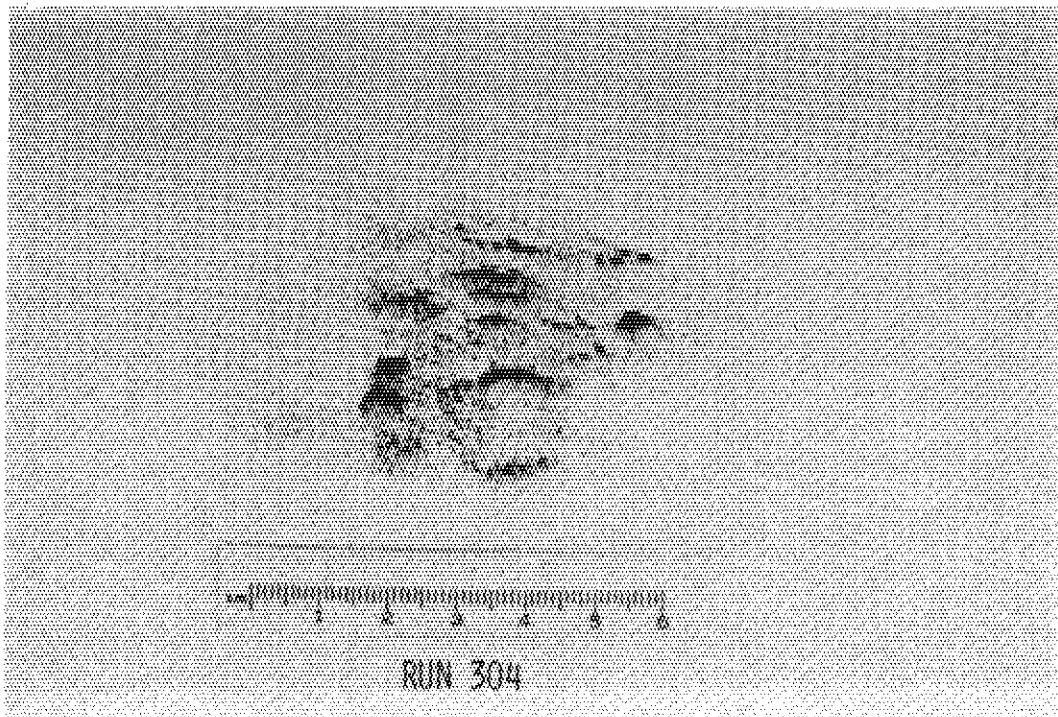


Photo.57 Fragmented Fuel Particles of Run 304 (≤ 100 mesh)

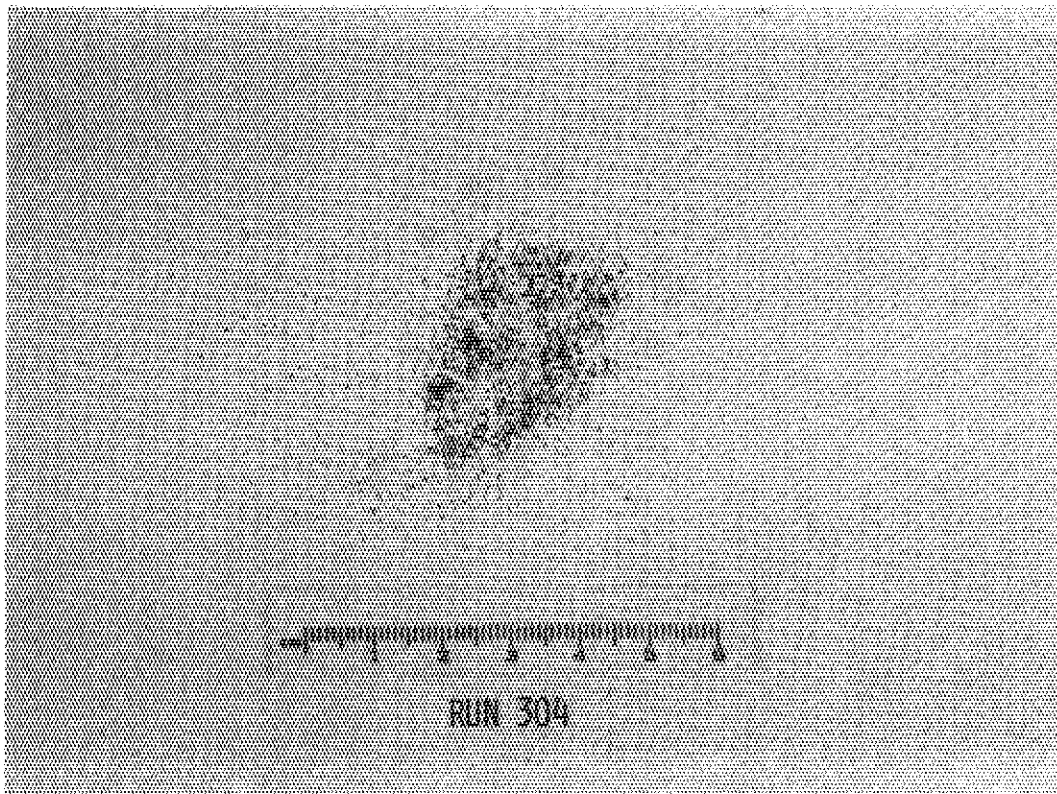


Photo.58 Fragmented Fuel Particles of Run 304 (60~100 mesh)

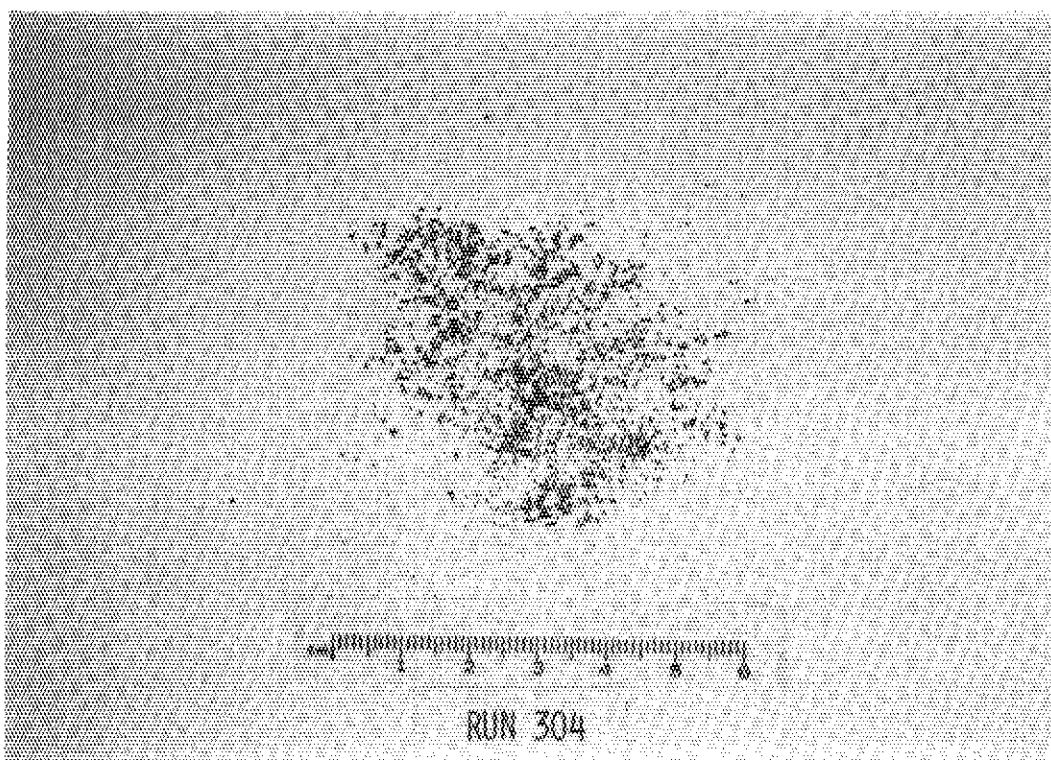


Photo.59 Fragmented Fuel Particles of Run 304 (32~60 mesh)

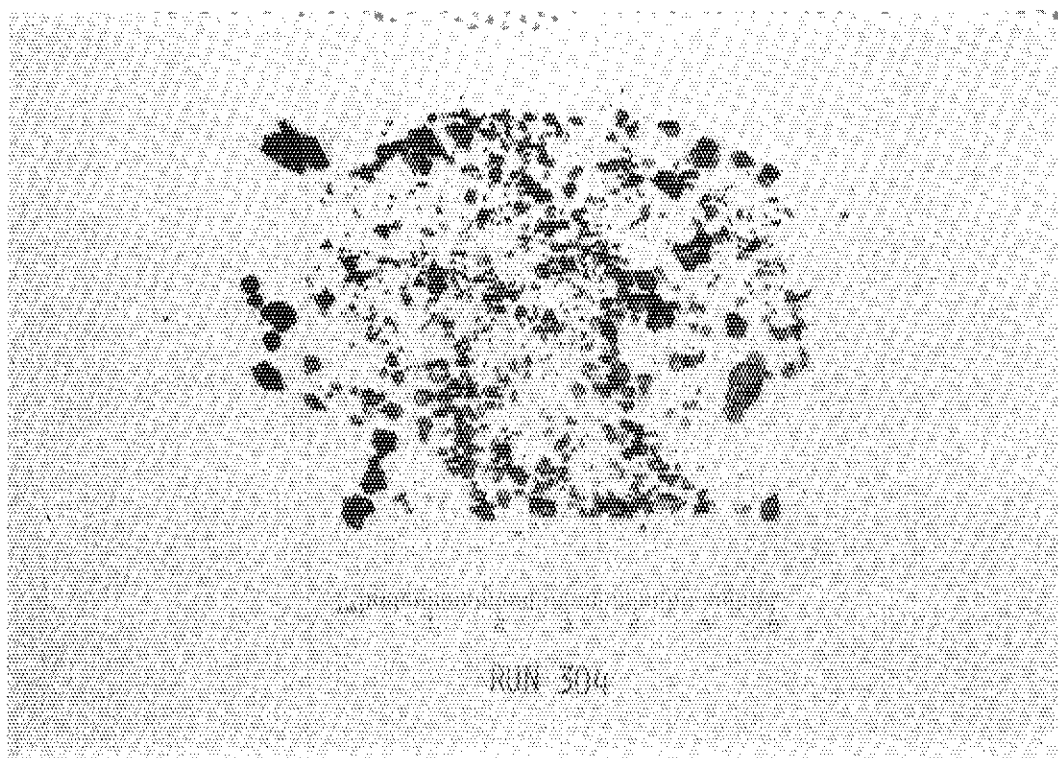


Photo.60 Fragmented Fuel Particles of Run 304 (> 32 mesh)

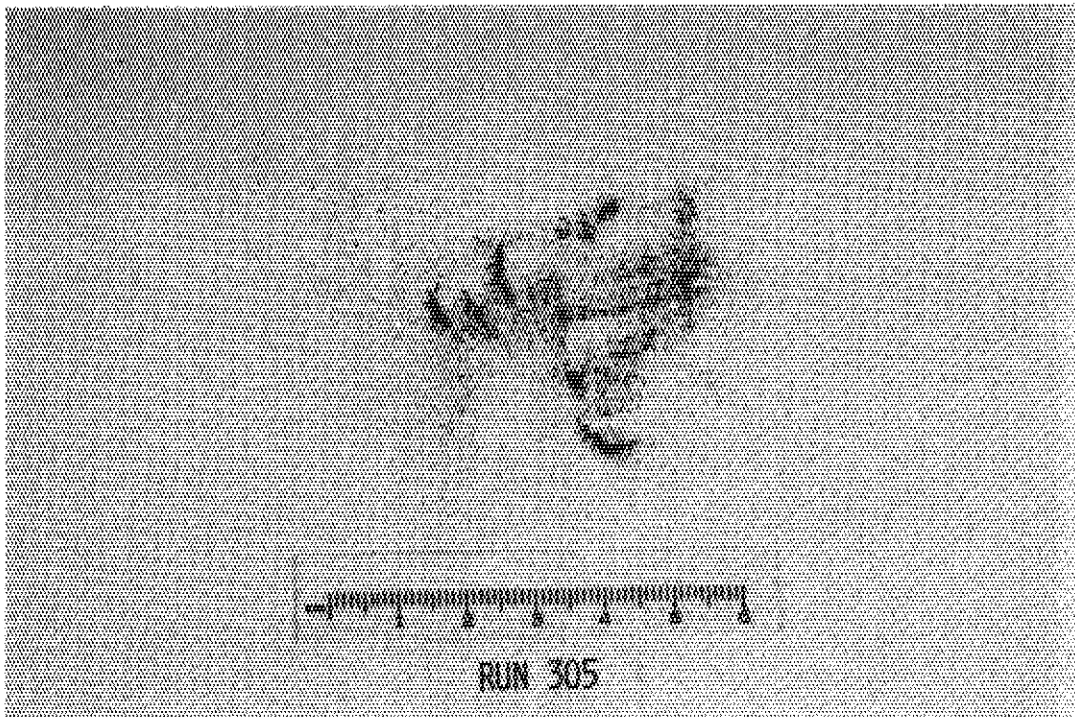


Photo.61 Fragmented Fuel Particles of Run 305 (≤ 100 mesh)

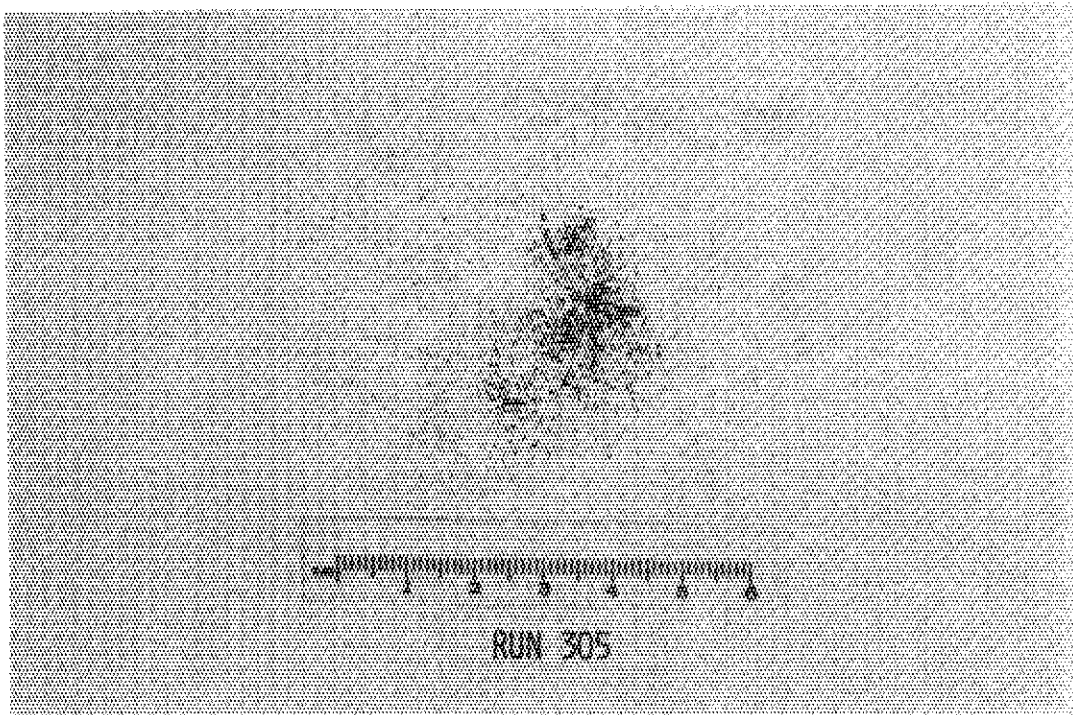


Photo.62 Fragmented Fuel Particles of Run 305 (60~100 mesh)

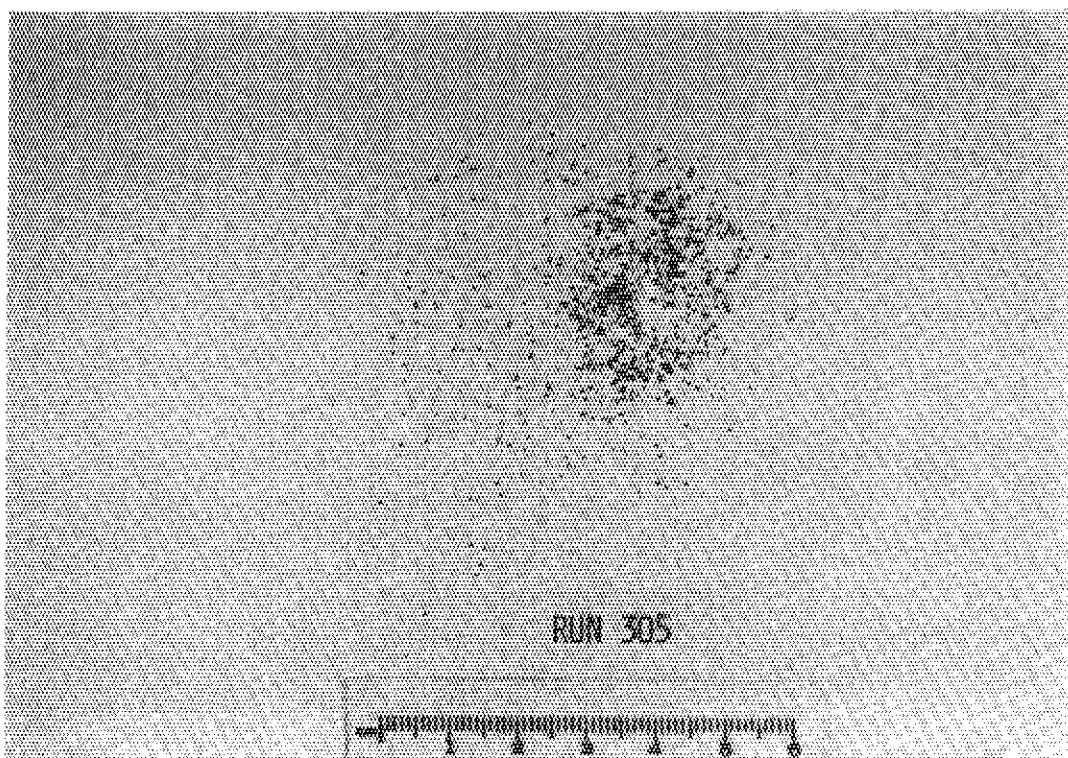


Photo.63 Fragmented Fuel Particles of Run 305 (32~ 60 mesh)

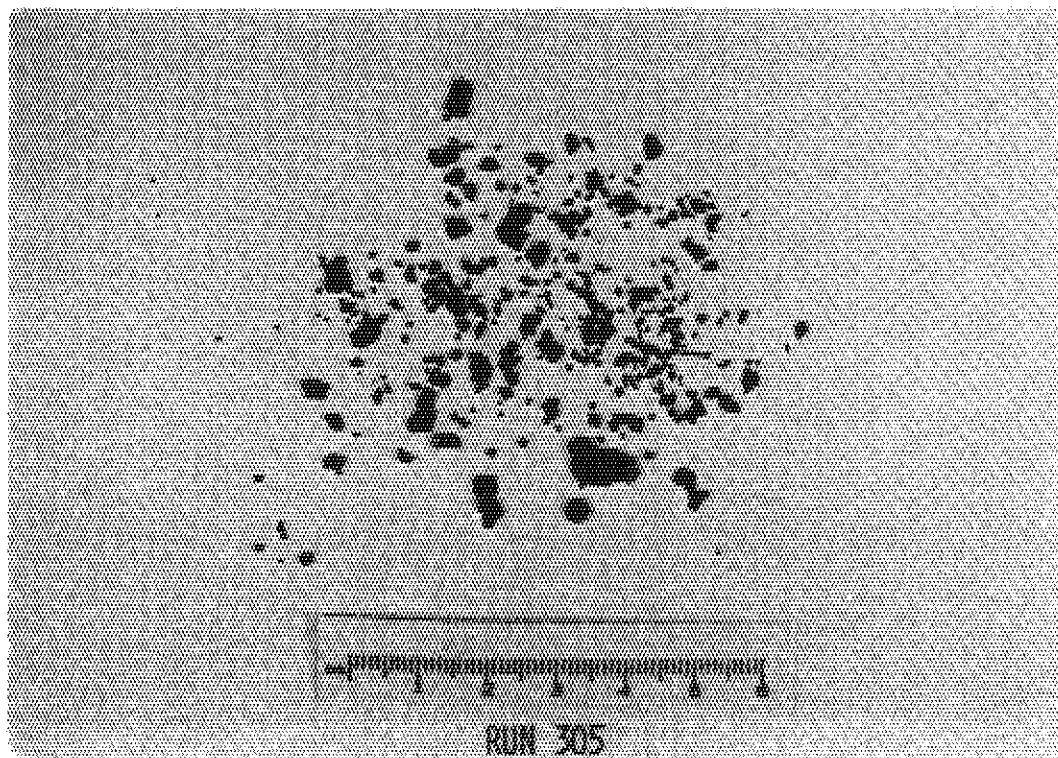


Photo.64 Fragmented Fuel Particles of Run 305 (> 32 mesh)

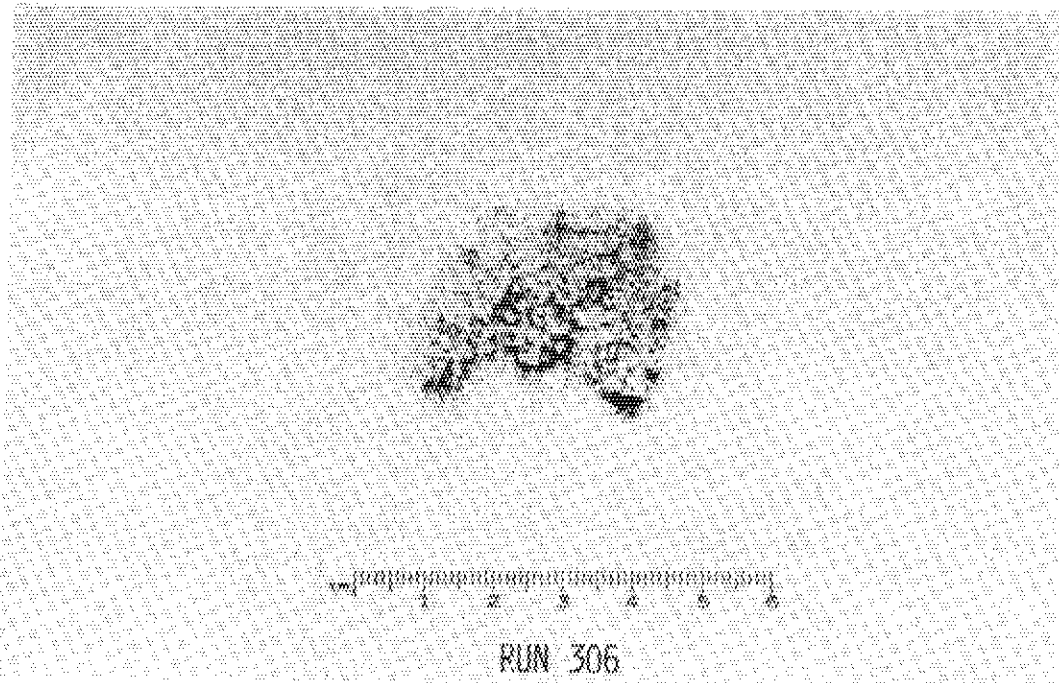


Photo.65 Fragmented Fuel Particles of Run 306 (≤ 100 mesh)

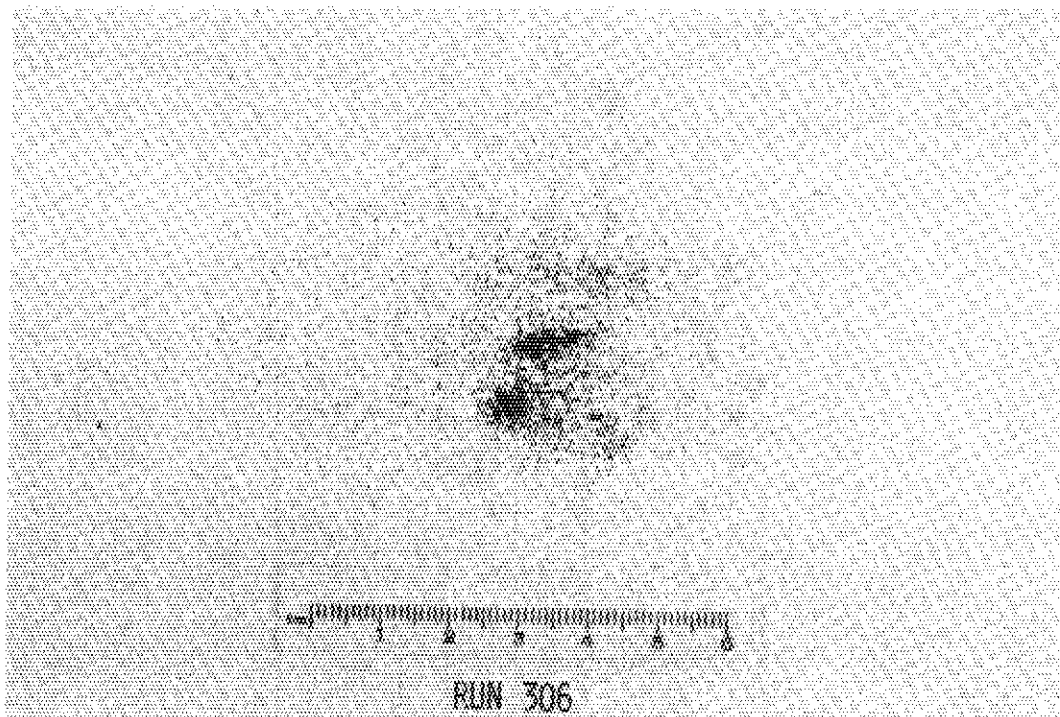


Photo.66 Fragmented Fuel Particles of Run 306 (60~100 mesh)

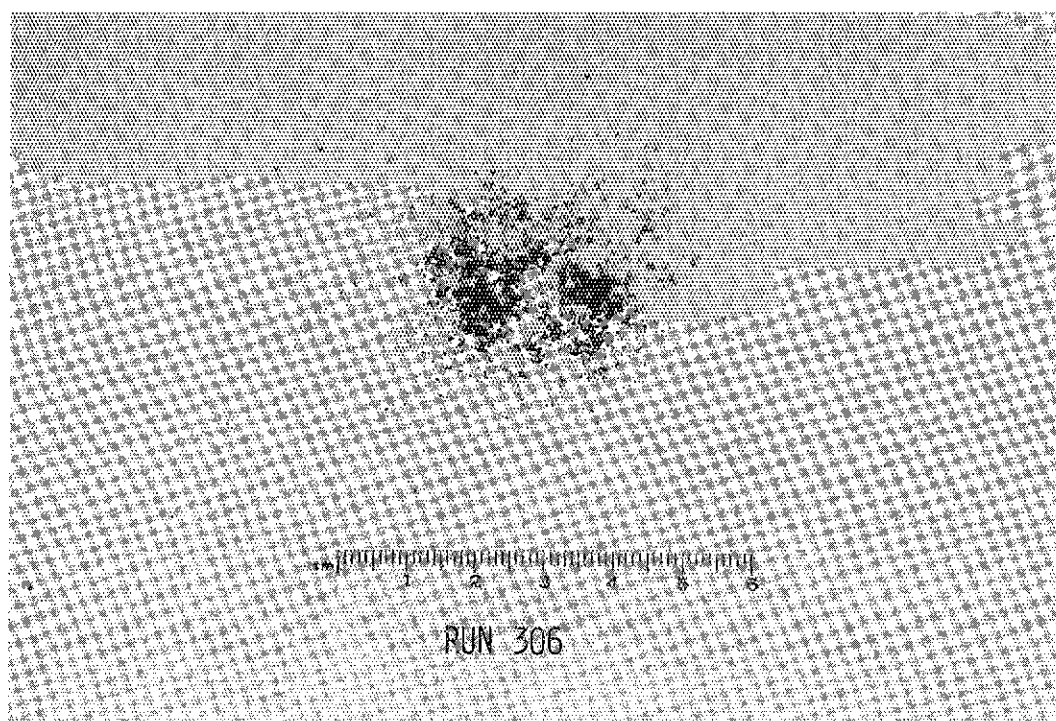


Photo.67 Fragmented Fuel Particles of Run 306 (32~ 60 mesh)

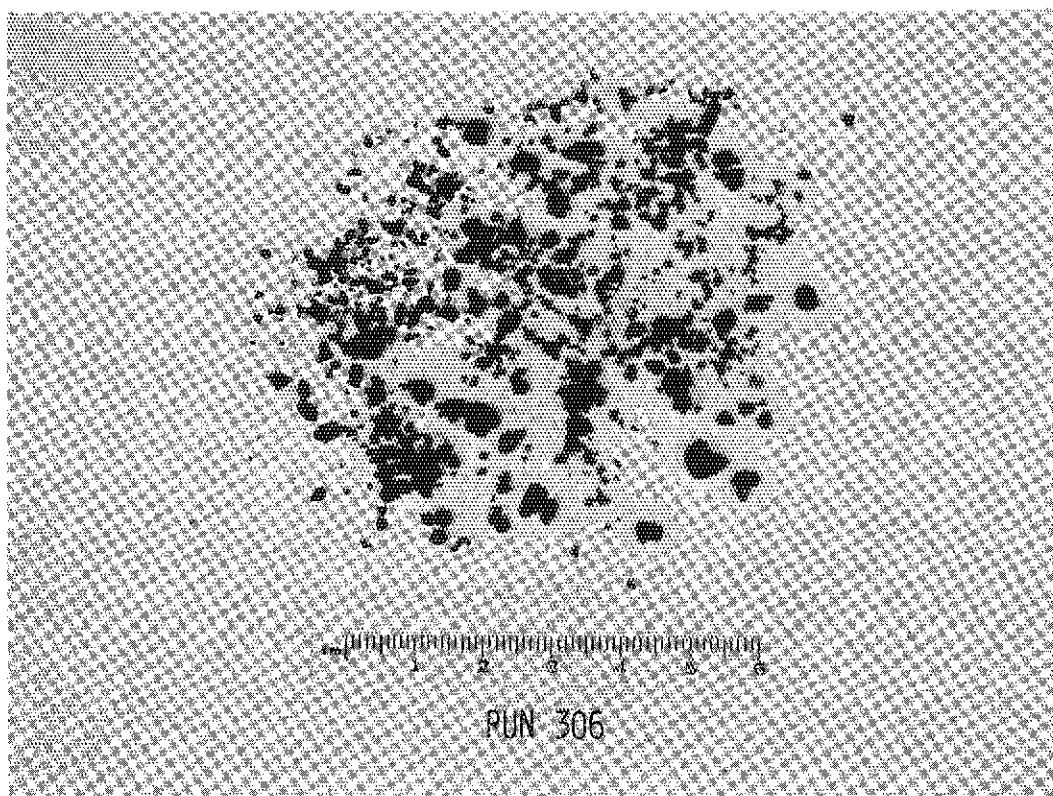


Photo.68 Fragmented Fuel Particles of Run 306 (> 32 mesh)

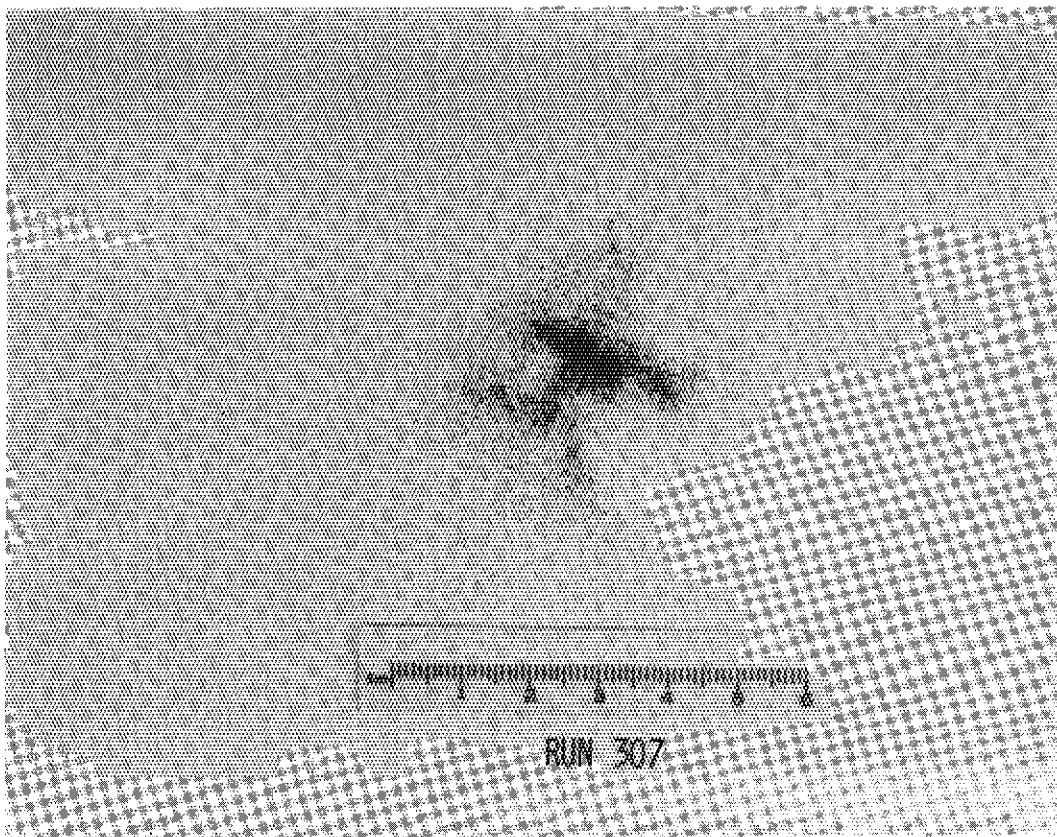


Photo.69 Fragmented Fuel Particles of Run 307 (≤ 100 mesh)

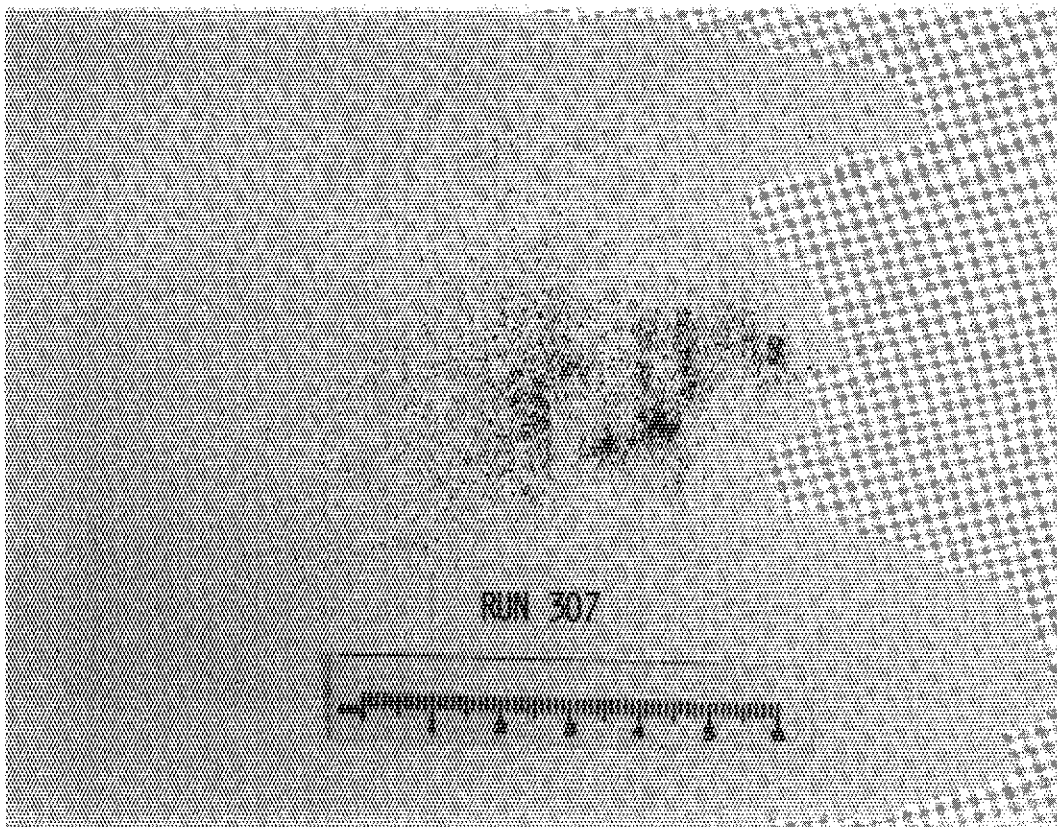


Photo.70 Fragmented Fuel Particles of Run 307 (60~100 mesh)

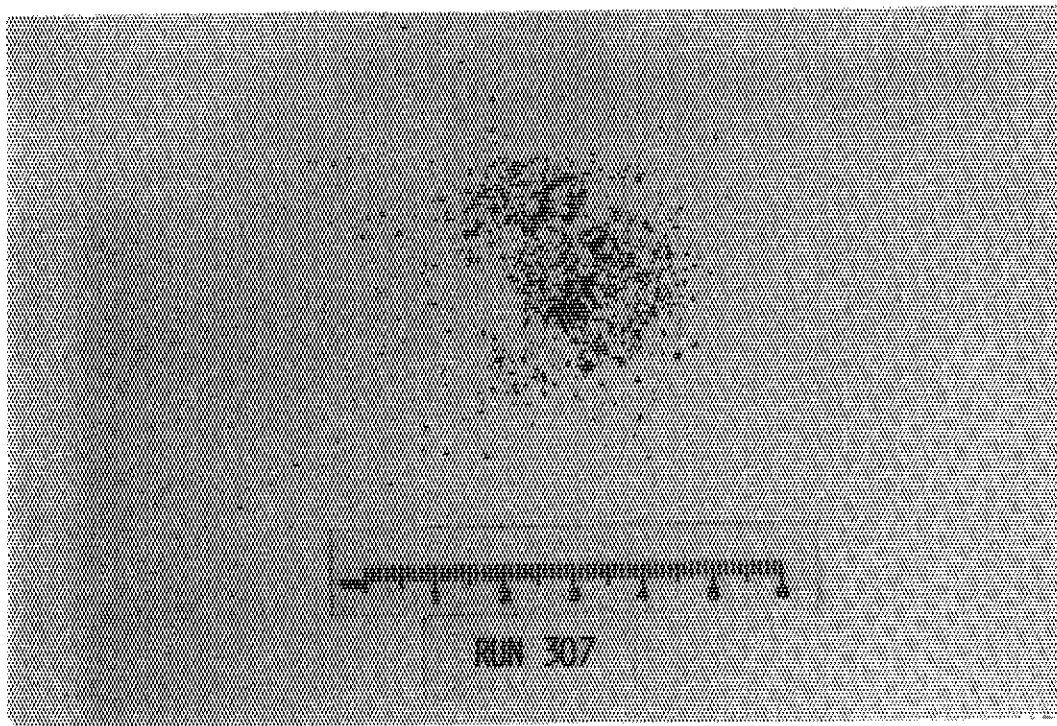


Photo.71 Fragmented Fuel Particles of Run 307 (32~ 60 mesh)

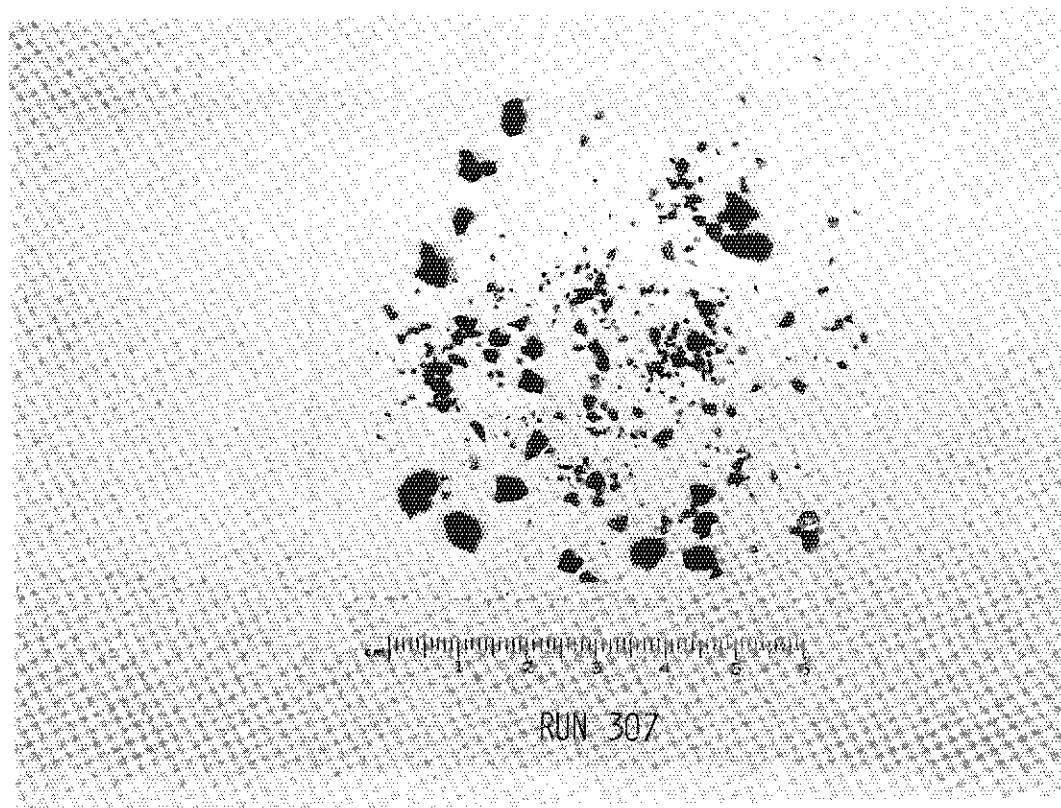


Photo.72 Fragmented Fuel Particles of Run 307 (> 32 mesh)

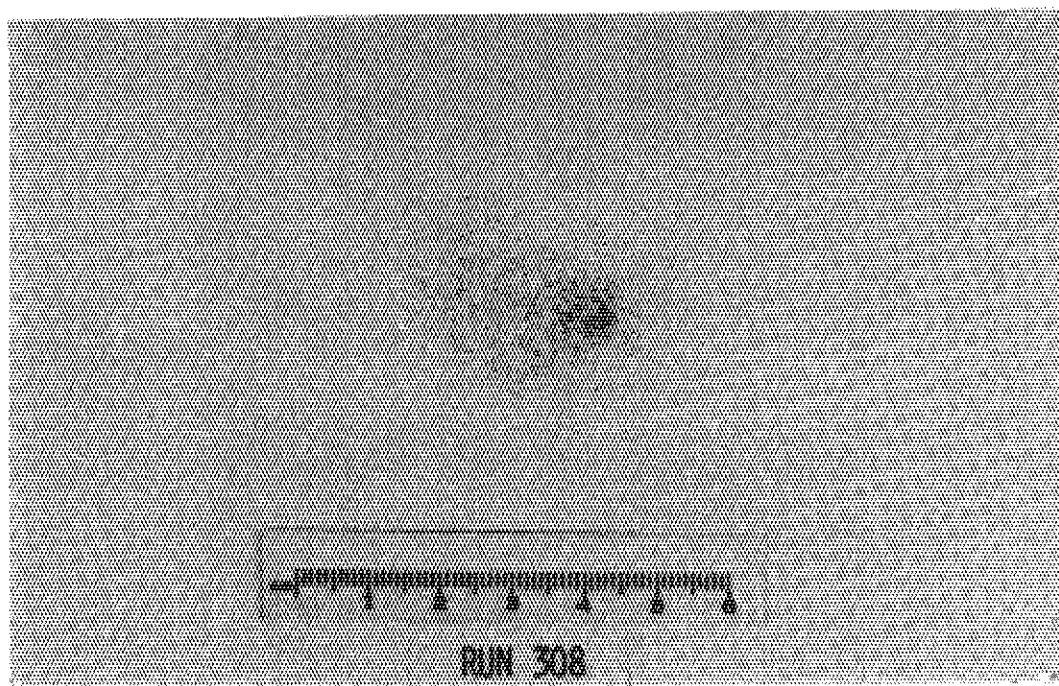


Photo.73 Fragmented Fuel Particles of Run 308 (≤ 100 mesh)

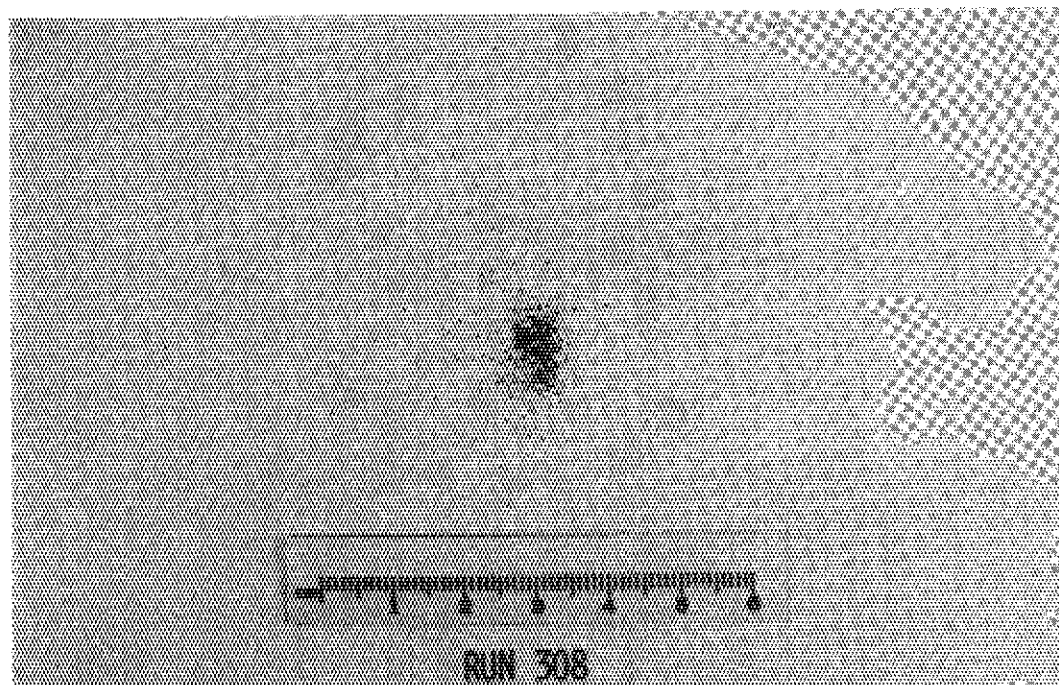


Photo.74 Fragmented Fuel Particles of Run 308 (60~100 mesh)

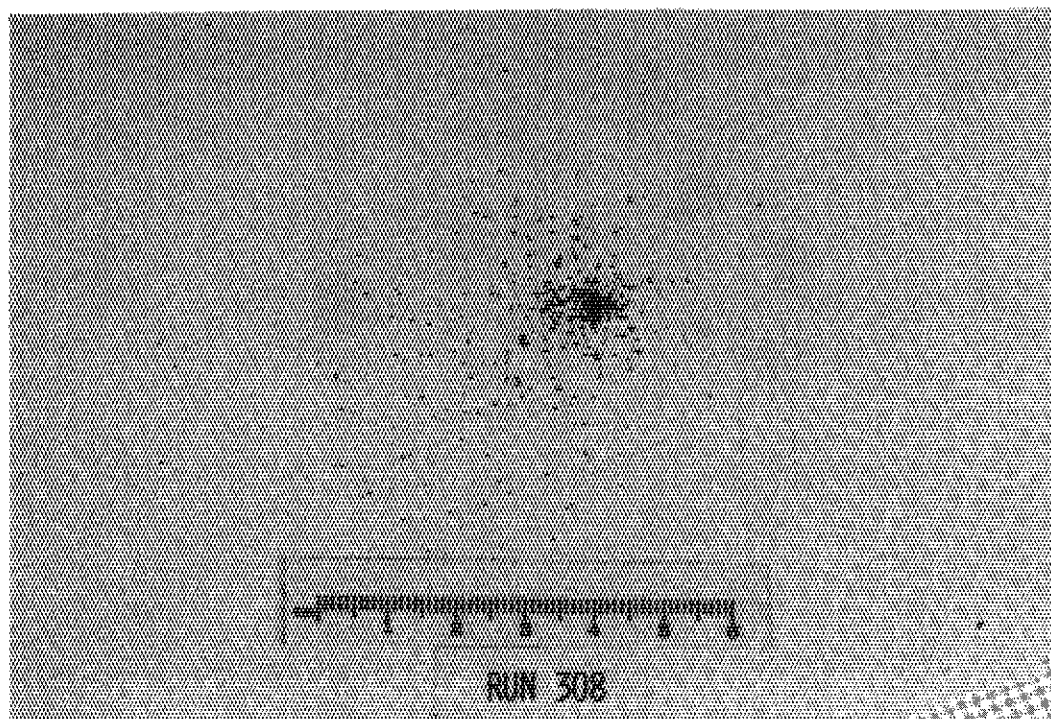


Photo.75 Fragmented Fuel Particles of Run 308 (32~ 60 mesh)

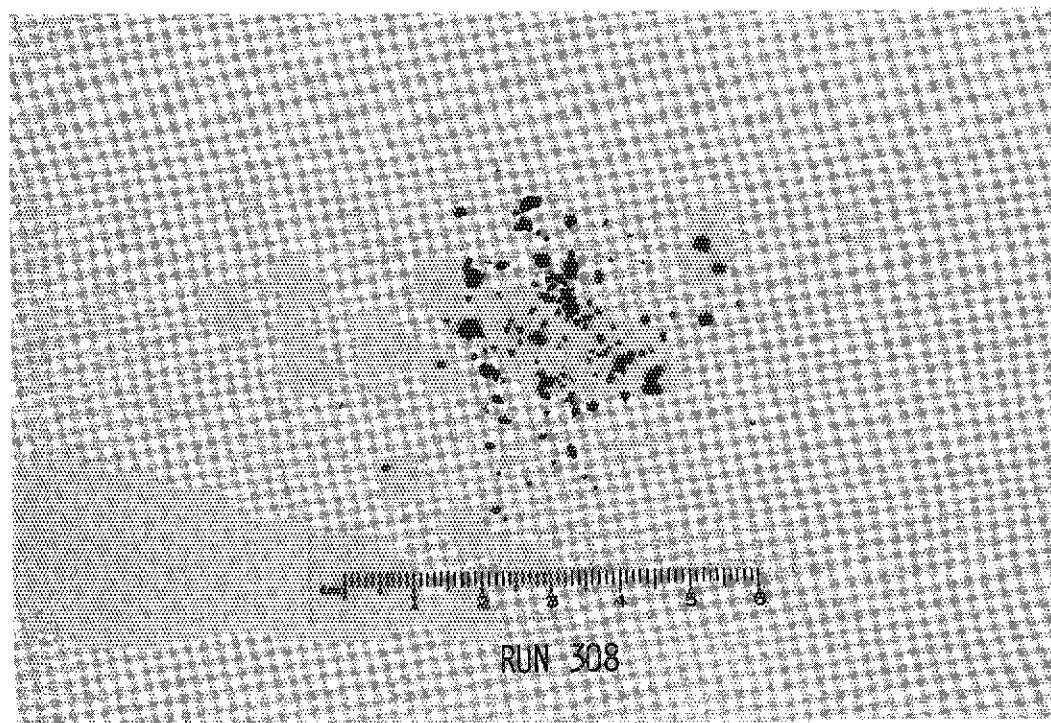


Photo.76 Fragmented Fuel Particles of Run 308 (>32 mesh)

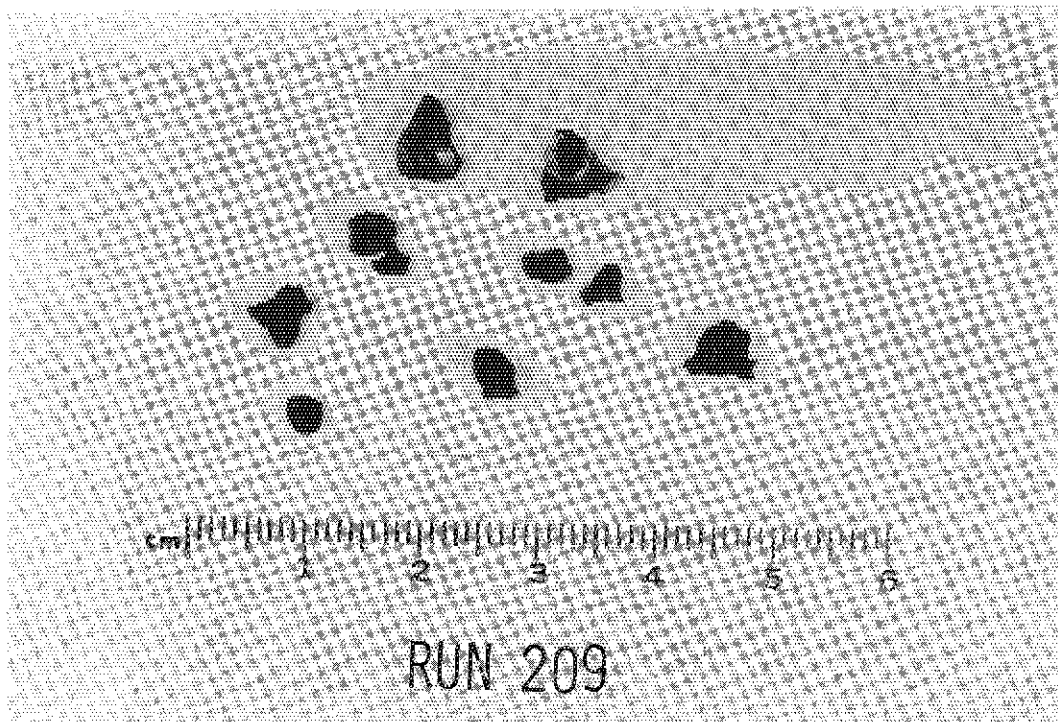


Photo.77 Fragmented Fuel Particles of Run 209 (enlarged, >32 mesh)

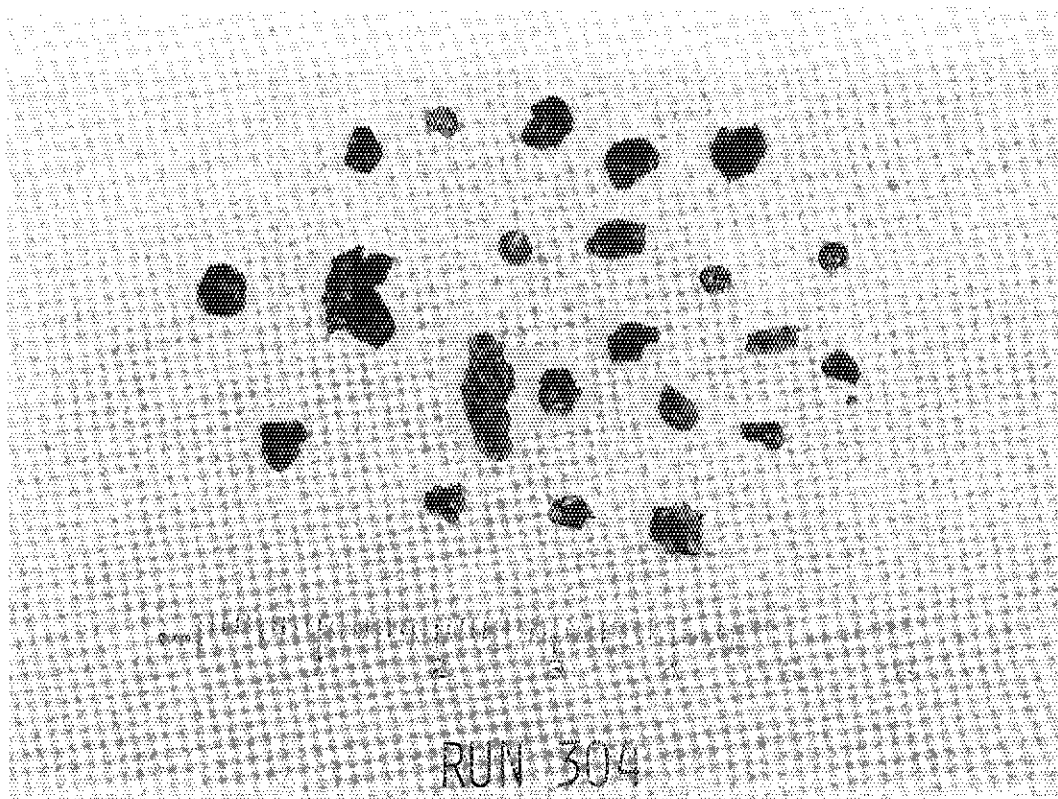


Photo.78 Fragmented Fuel Particles of Run 304 (enlarged, >32 mesh)

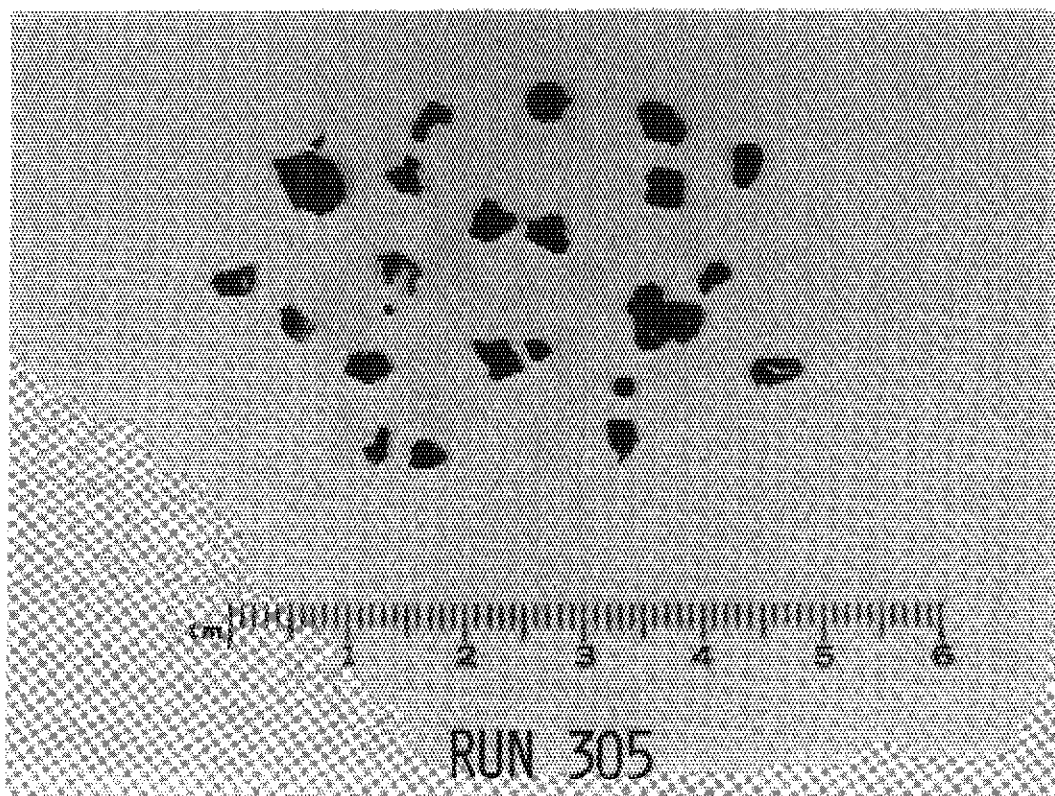


Photo.79 Fragmented Fuel Particles of Run 305 (enlarged, >32 mesh)

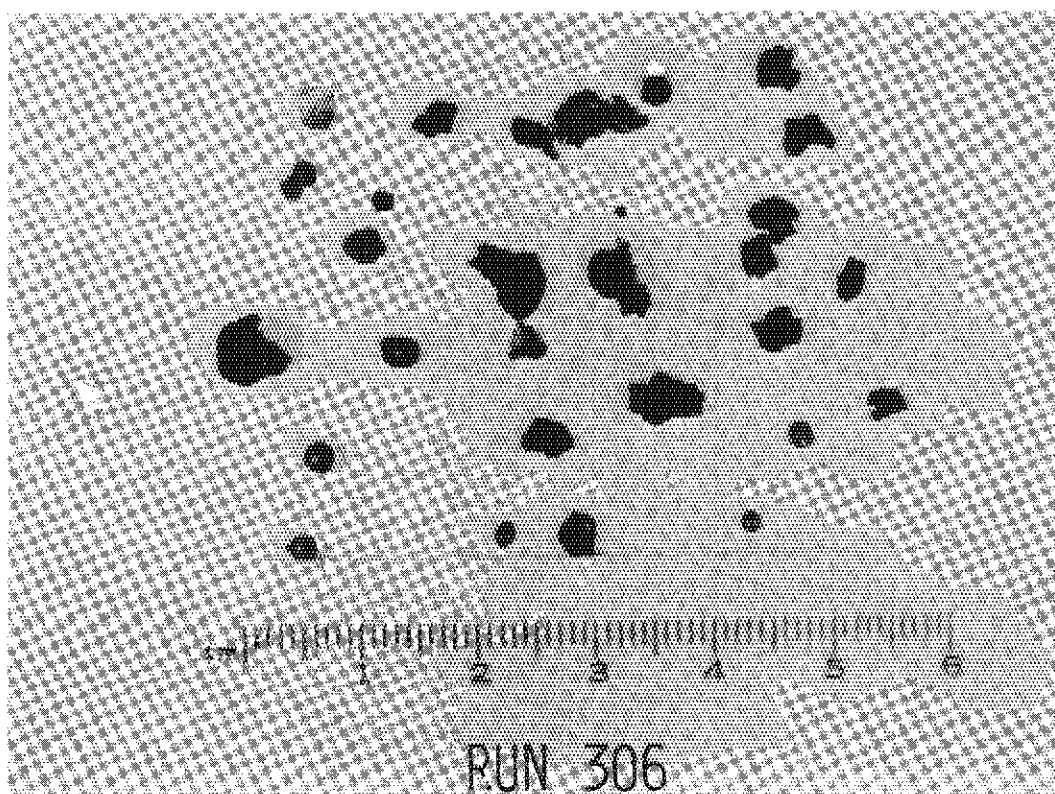


Photo.80 Fragmented Fuel Particles of Run 306 (enlarged, >32 mesh)

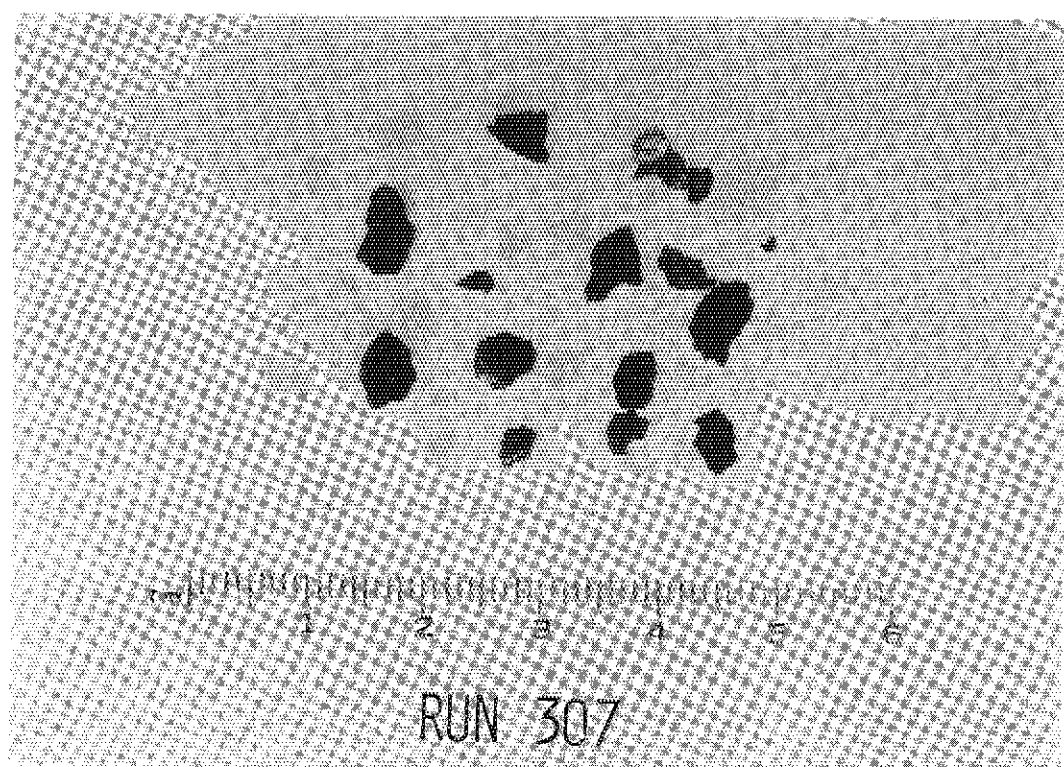


Photo.81 Fragmented Fuel Particles of Run 307 (enlarged, >32 mesh)

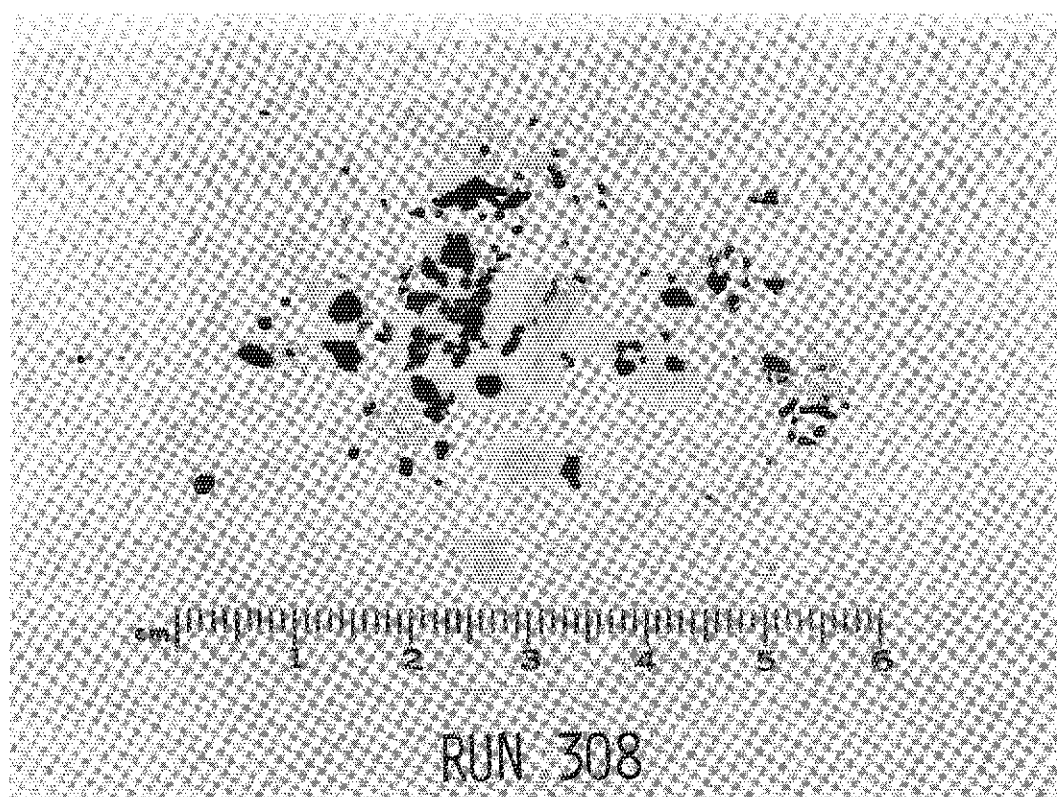


Photo.82 Fragmented Fuel Particles of Run 308 (enlarged, >32 mesh)

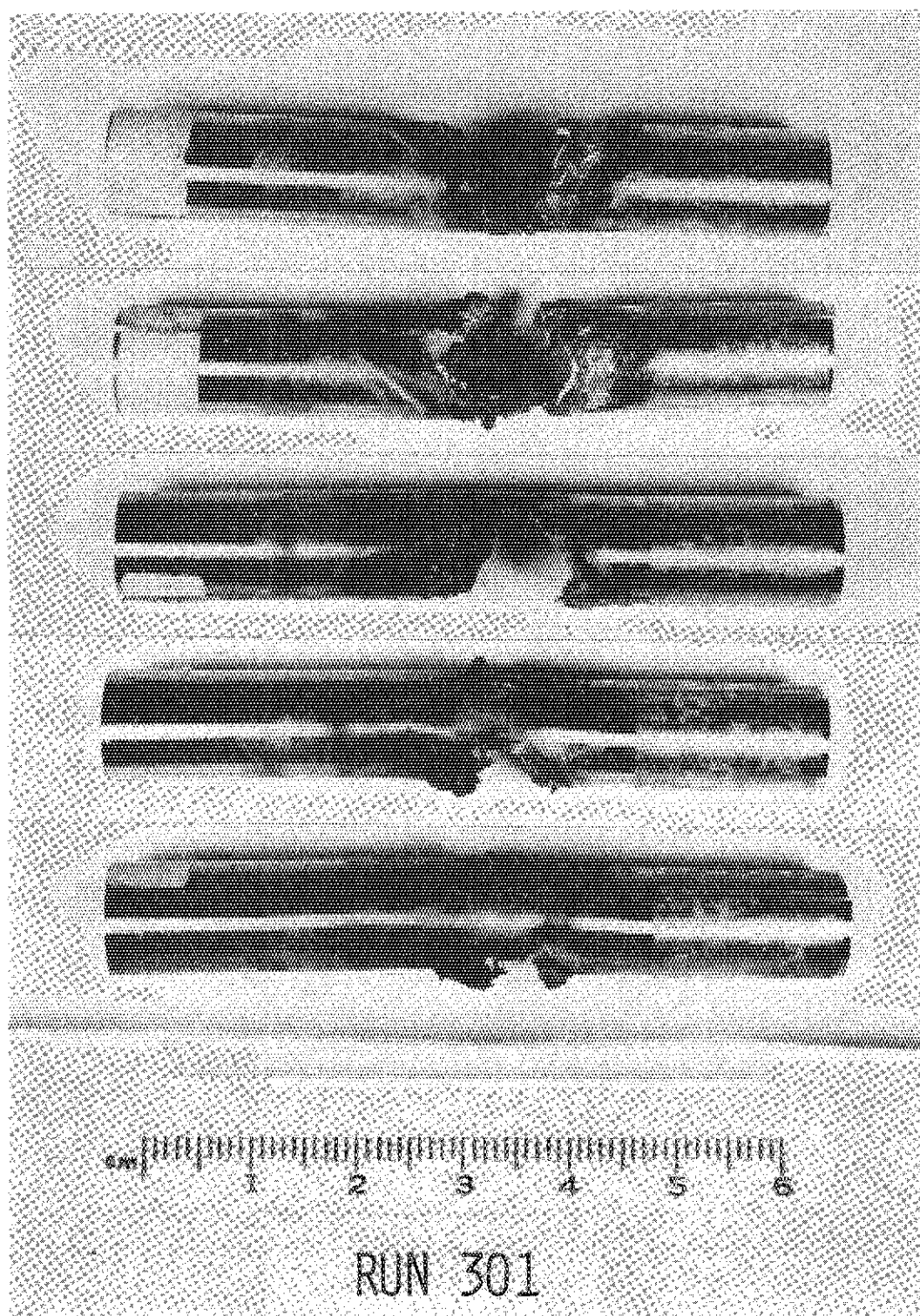


Photo.83 Disassembled Fuel Pin of Run 301

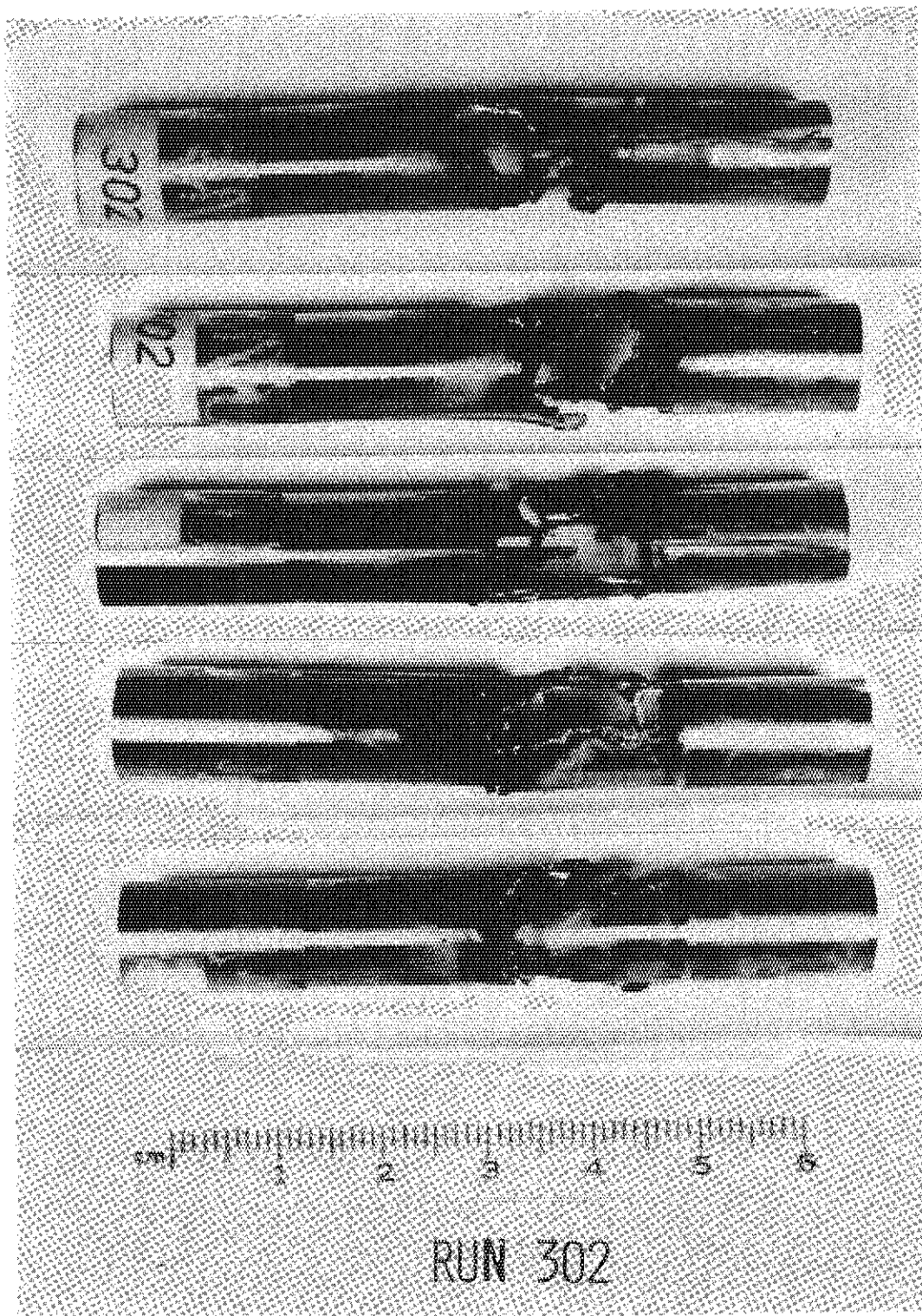


Photo.84 Disassembled Fuel Pin of Run 302