

JAERI-M
7796

NSRR実験における燃料中心温度測定

1978年8月

星 蔦雄・岩村 公道・柳原 敏
折田 義彦・細川 隆徳*

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

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、お申しこしてください。

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.

Fuel Centerline Temperature Measurements
in NSRR Experiment

Tsutao HOSHI, Takamichi IWAMURA, Satoshi YANAGIHARA,
Yoshihiko ORITA⁺, Takanori HOSOKAWA.*

Division of Reactor Safety,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received July 12, 1978)

The fuel centerline temperatures of NSRR standard fuel rods in pulse irradiations were measured with W-5% Re/W-26% Re thermocouples inserted in a centerline hole of the fuel pellets. Three different fuel rods were individually subjected to repeated energy deposition (4-6 times) in 36-242 cal/g.UO₂.

The maximum fuel temperatures under the same irradiation conditions were same; there was no significant effect of the irradiation repetition. The behavior of fuel temperature during cooling was governed by the cladding surface heat transfer coefficient. Beyond DNB, the behavior of cladding surface temperature was influenced by the irradiation repetition. However, the threshold of fuel failure was not influenced by the irradiation repetition.

Keywords : RIA, NSRR, DNB, Fuel Temperature, Repeated Irradiation,
Fuel Deformation, Film Boiling, Quenching, Reactor Safety.

+) Division of Power Reactor Projects, JAERI

*) Hitachi Ltd.

NSRR実験における燃料中心温度測定

日本原子力研究所東海研究所安全工学部

星 葛雄・岩村 公道・柳原 敏

折田 義彦⁺・細川 隆徳^{*}

(1978年7月12日受理)

NSRR標準型試験燃料の中心孔にW-5%Re/W-26%Re熱電対を挿入し、パルス照射時の燃料中心温度挙動を測定した。実験は3燃料体について、36~242 cal/g・UO₂の発熱量範囲内で、それぞれ4~6回繰り返し照射を行った。

実験の結果、燃料中心温度測定の再現性は良好で、冷却過程では燃料中心温度挙動は、被覆管表面熱伝達率に支配されることが確認された。繰り返し照射の影響については、燃料中心温度挙動は照射履歴の影響は少ないが、被覆管表面温度挙動は、DNBを越えると、繰り返し照射の影響をかなり受けることがわかった。また、繰り返し照射が破損しきい値におよぼす影響は、今回の実験に関する限り小さかった。

+) 動力炉開発・安全性研究管理部

*) 日立製作所日立研究所

目 次

1. 緒 言	1
2. 実験方法	2
2.1 試験燃料棒および中心温度測定用熱電対	2
2.2 照射カプセル	2
2.3 計測系	2
2.4 照射方法	2
3. 照射条件および実験結果	7
3.1 照射条件	7
3.2 実験結果	7
3.2.1 概 要	7
3.2.2 Test No 205-1 の実験結果	7
3.2.3 Test No 205-2 の実験結果	7
3.2.4 Test No 205-5 の実験結果	8
4. 考 察	15
4.1 燃料中心温度挙動	15
4.1.1 熱電対時定数の補正	15
4.1.2 被覆管表面熱伝達率変化が燃料中心温度挙動に与える影響	16
4.2 繰り返し照射の影響	16
4.2.1 燃料中心温度挙動に対する繰り返し照射の影響	16
4.2.2 被覆管表面温度挙動に対する繰り返し照射の影響	16
4.2.3 被覆管変形に対する繰り返し照射の影響	17
4.2.4 繰り返し照射による破損しきい値の変化	18
5. 結 言	30
謝 辞	30
参考文献	30
付録 実験データ	31
A 1 Test No 205-1	32
A 2 Test No 205-2	45
A 3 Test No 205-5	61

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental Method	2
2.1 Test fuel rod and fuel centerline temperature thermocouple	2
2.2 Irradiation capsule	2
2.3 Measurement system	2
2.4 Irradiation method	2
3. Irradiation Conditions and Experimental Results	7
3.1 Irradiation conditions	7
3.2 Experimental results	7
3.2.1 General discription	7
3.2.2 Results of Test No. 205-1	7
3.2.3 Results of Test No. 205-2	7
3.2.4 Results of Test No. 205-5	8
4. Discussion	15
4.1 Behavior of fuel centerline temperature	15
4.1.1 Correction of thermocouple time constant	15
4.1.2 Effects of cladding surface heat transfer coefficient on the behavior of fuel centerline temperature	16
4.2 Effects of irradiation repetition	16
4.2.1 Effects of irradiation repetition on the behavior of fuel centerline temperature	16
4.2.2 Effects of irradiation repetition on the behavior of cladding surface temperature	16
4.2.3 Effects of irradiation repetition on cladding deformation	17
4.2.4 Effects of irradiation repetition on fuel failure threshold	18
5. Conclusions	30
Acknowledgments	30
References	30
Appendix Experimental Data	31
Test No. 205-1	32
Test No. 205-2	45
Test No. 205-5	61

1. 緒 言

過渡時における燃料挙動解析コードの検証やギャップコンダクタンス、被覆-冷却材熱伝達係数の評価のために、燃料中心温度過渡挙動のデータが望まれる。本実験は、NSRR実験の標準型試験燃料に燃料中心温度測定用熱電対(W-5%Re/W-26%Re)を取り付け、その作動状態を試験すると共に、解析コードと照合するためのデータを得ることを主目的とした。また、同一燃料を繰り返し照射し、ペレットの割れや被覆管の変形などの照射履歴が燃料中心温度や被覆管表面温度の過渡挙動にいかに関与するかも評価した。

本実験は現在まで、Test № 205-1, 205-2, 205-5の3体の燃料棒について、それぞれ6, 4, 5回の繰り返し照射を実施した。各実験ごとの繰り返し照射発熱量とその発熱量を選定した理由をTable 1.1に示す。

本実験シリーズの初期計画においては、205-1~6の6ケースの実験を予定していたが、以上3ケースのデータを検討した結果、ほぼ所定の目的は達せられたと考えられるので、本報では各実験の過渡記録と照射後検査結果を報告する。なお、残りのTest № 205-3, 205-4, 205-6の実験は、今後解析を進めていく上で必要が生じた場合には引き続き実施する予定である。

Table 1.1 Objectives of Test № 205 Series

Test №	Energy Deposition (cal/g·UO ₂)	Objectives
205-1	36, 36, 70, 150, 209, 231	DNBを越えない十分低い発熱条件から、段階的に発熱量を上昇させ、各発熱量における燃料中心温度挙動のデータを得る。
205-2	151, 154, 155, 234	205-1で初めてDNBを越えた約150cal/g·UO ₂ の発熱量で3回繰り返し照射を行い。燃料中心温度と被覆管表面温度挙動の再現性や照射履歴の影響を調べる。また、205-1は231cal/g·UO ₂ の最終発熱量で破損したので、最後にほぼ同じ発熱量を与え、破損の有無を調べる。
205-5	147, 177, 208, 228 242	1回目に約150cal/g·UO ₂ の発熱量を与え、前2回の同一発熱量の場合と比較する。さらに段階的に発熱量を上昇し、DNBを越えた繰り返し照射の影響を調べ、205-1よりも膜沸騰継続時間を長くして破損の有無を調べる。

2. 実験方法

2.1 試験燃料棒および中心温度測定用熱電対

本実験で使用した燃料棒は、基本的にはNSRR実験の標準型試験燃料棒と同一仕様のもので、燃料スタックの上部側ペレットに熱電対挿入用の孔を設け、W-5%Re/W-26%Re熱電対(Taシース)を挿入したものである。Fig. 2.1に燃料棒の構造図を、Table 2.1に燃料棒の仕様を、Table 2.2に中心温度測定用熱電対の仕様を示す。

2.2 照射カプセル

照射カプセルは、SUS製大気圧水カプセル(I型)を使用した。Fig. 2.2にカプセルの構造と燃料の支持状態を示す。

2.3 計測系

実験に当っては、燃料中心温度計の他に、燃料挙動測定系として被覆表面温度測定用熱電対を取り付けた。使用した熱電対は、線径0.2mmφのPt/Pt-13%RhおよびPt-20%Rh/Pt-40%Rh熱電対素線で、取り付け方法は、素線をZry被覆管にスポット溶接した。Fig. 2.3に各実験ごとの被覆管表面温度測定用熱電対取り付け位置と熱電対の種類を示し、Table 2.3に熱電対の仕様を示す。また、発熱特性の測定のため、炉心のパルス出力と積分出力を測定した。

データ集録系のブロック図をFig. 2.4に示す。図に示すように、検出器信号は必要に応じて直流増巾器で増巾し、一旦磁気テープレコーダーに集録し、これを再生した。

2.4 照射方法

パルス照射は、試験燃料の発熱量を $4.36 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2 / \text{MW-S}$ (FPの分析結果により評価した値⁽⁷⁾)とし、予定した発熱量を与える大きさのパルス出力を照射した。パルス出力の大きさは投入反応度量に比例するので、パルス照射の方法はあらかじめ所定の位置に設定しておいたトランジェント棒を未臨界状態から急速に引き抜くことにより行った。

なお繰り返し照射の場合は、試験燃料の温度が十分下がるように、各パルス照射の間に30分以上の冷却期間をおいた。

Table 2.1 Test Fuel Design Summary

Element	
Overall length	234.5mm
Active fuel length	135mm
Weight of fuel pellets	91.7g
Number of pellets	14
Centerhole diameter for T.C.	2m
Plenum gas	He 1atm
Pellets	
Diameter	9.29mm
Length	10mm
Density	95% T.C.
Enrichment	10%
Shape	Chamfered
Cladding	
Material	Zircaloy-4
Wall thickness	0.62mm
Outer diameter	10.72mm
Pellet-cladding gap	0.095mm

Table 2.2 Fuel Centerline Thermocouple Specification

Thermocouple	W-5%Re / W-26%Re
Sheath	Tantalum
Insulator	BeO
Fuel centerhole diameter	2.0mm
Sheath diameter	1.6mm
Thermocouple diameter	0.25mm

Table 2.3 Cladding Surface Thermocouple Specification

Thermocouple Type	diameter (mm)	Nominal Range (°C)	Thermo E.M.F. at 1000°C(mV)
Pt-20%Rh / Pt-40%Rh	0.2	1,800	2.50
Pt / Pt-13%Rh	0.2	1,400	10.47

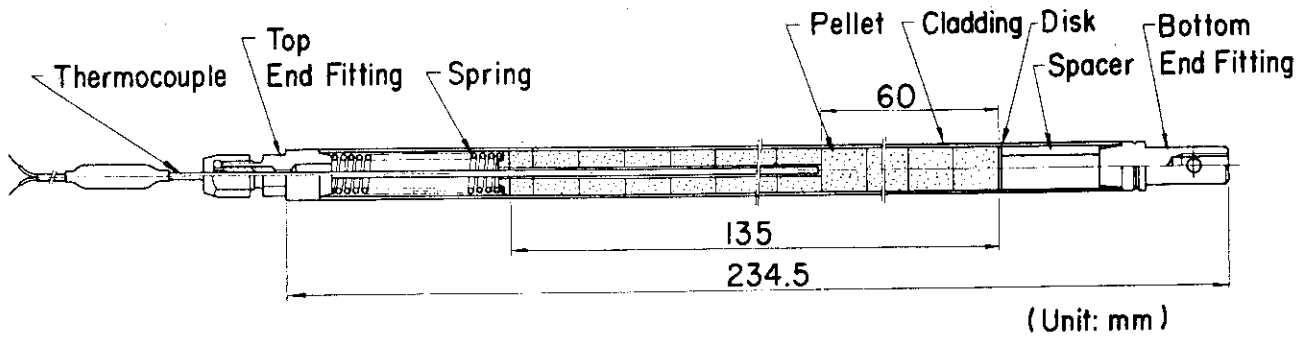


Fig. 2.1 Fuel element for Centerline Temperature Measurement

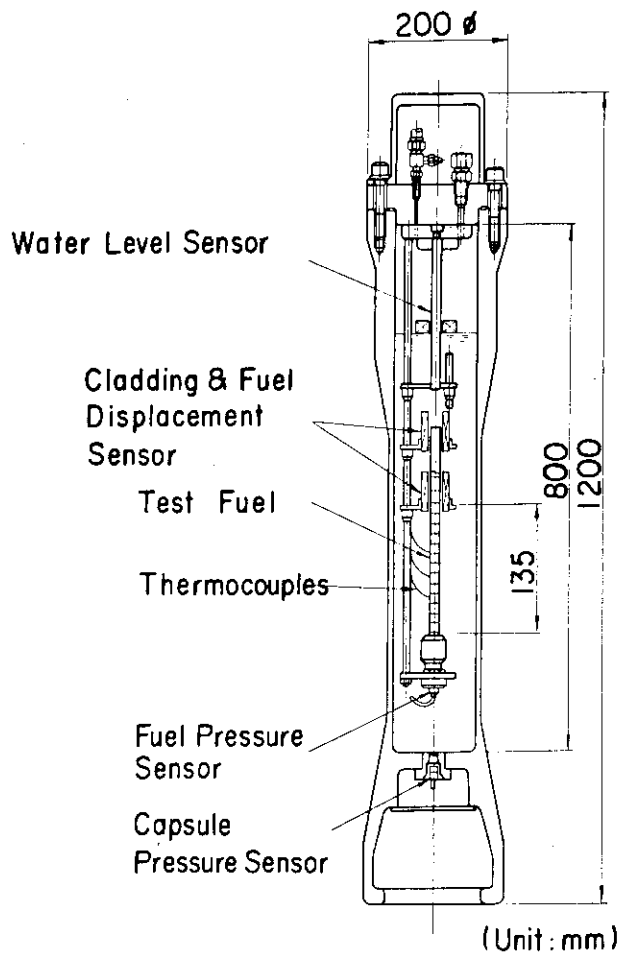


Fig. 2.2 Standard Water Capsule

Symbol	Thermocouple Type	Nominal Range(°C)
	Pt -20%Rh/Pt-40%Rh	1.800
	Pt/Pt - 13% Rh	1.400

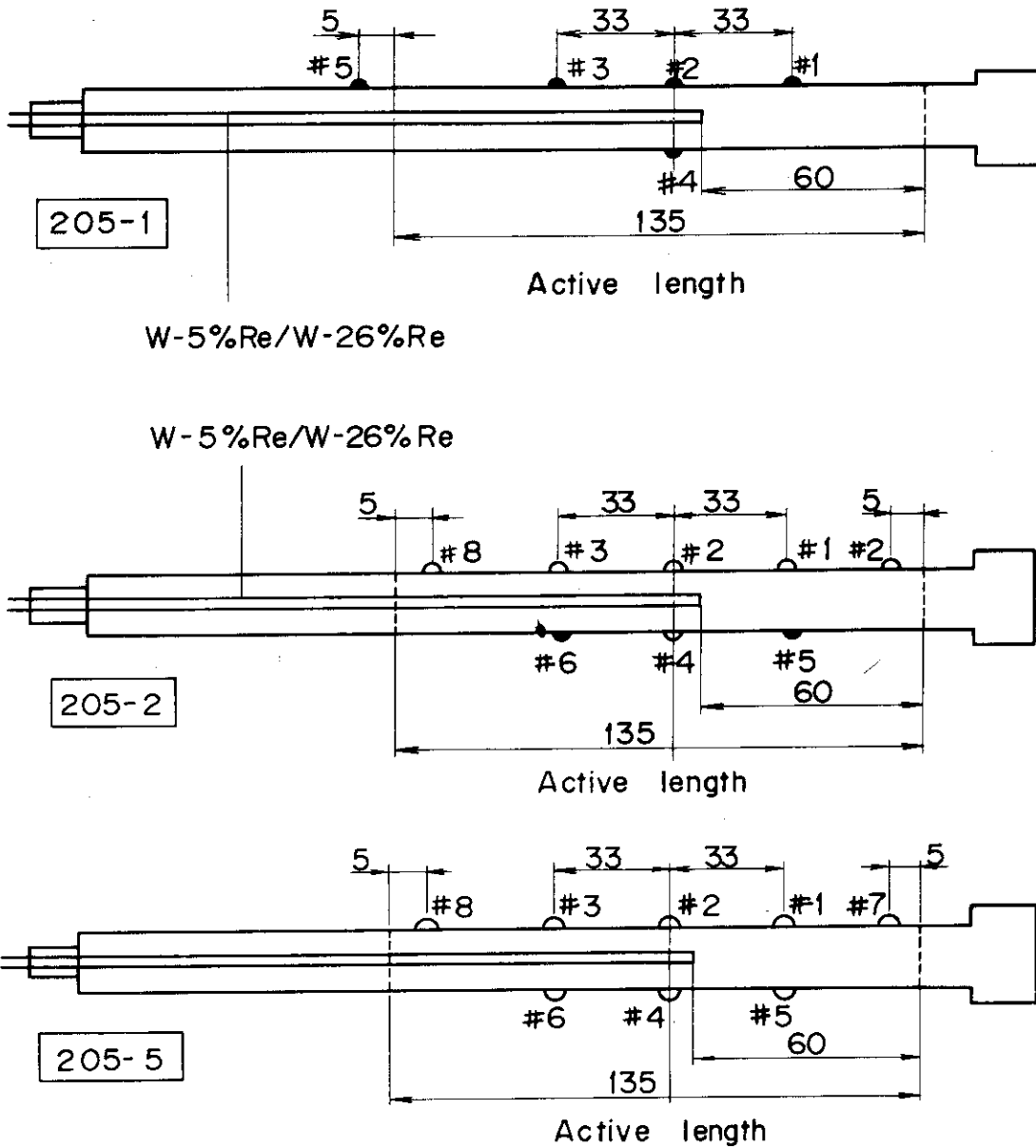


Fig.2.3 Locations and Types of Cladding Surface Temperature Thermocouples

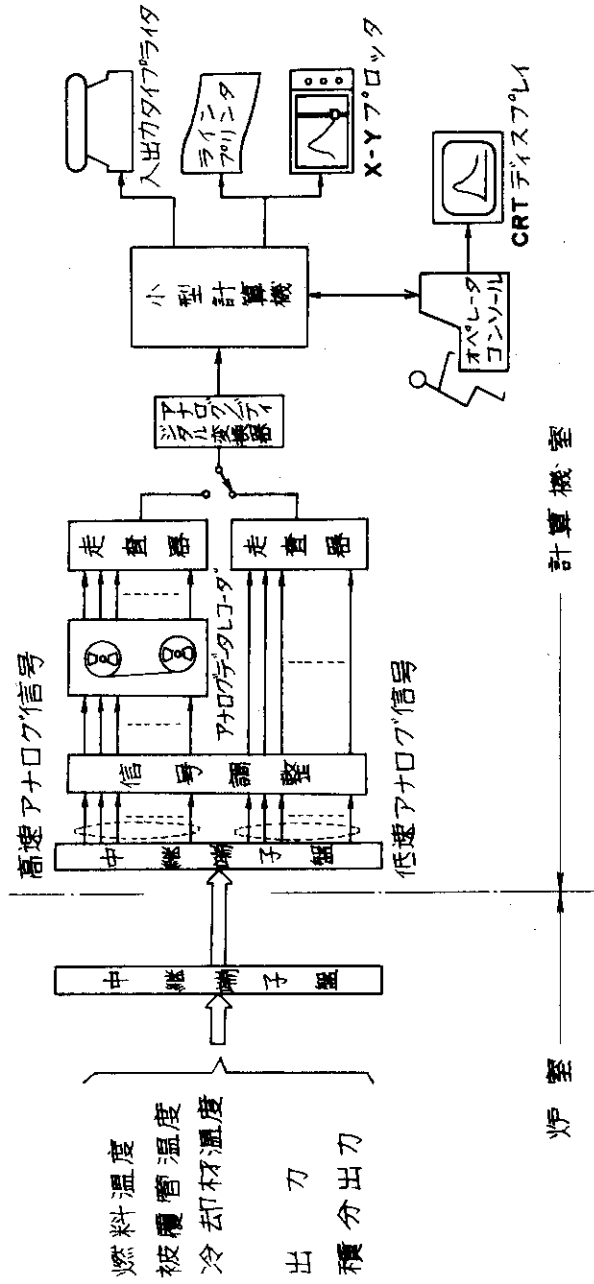


Fig. 2.4 Flow chart of Data processing system in NSRR experiment

3. 照射条件および実験結果

3.1 照射条件

Table 3.1 に、Test NO. 205-1, 205-2, 205-5. の各実験の照射時刻、制御棒位置、投入反応度、炉周期、発熱量等の照射条件一覧表を示す。

3.2 実験結果

3.2.1 概要

(1) 過渡挙動

Table 3.2~3.4 に、各パルス照射における燃料中心温度および被覆管表面温度の最高値を示す。また、各照射ごとの過渡記録は付録にまとめて載せる。

(2) 照射後試験結果

Fig. 3.1, 3.2 に、照射後の外見写真、NRG撮影結果をそれぞれ示す。また、Fig. 3.3 に照射後の寸法検査結果を、Fig. 3.4, 3.5, 3.6 に Test NO 205-1, 205-2, 205-5. のプロファイルメーターによる被覆管外径の測定結果を示す。

3.2.2 Test NO 205-1の実験結果

Table 3.2 および付録の過渡記録に見られるように、 $36.36.70 \text{ cal/g.UO}_2$ の発熱量を与えた1~3回の照射時では被覆表面はDNBを越えず、4回目の 148 cal/g.UO_2 の照射においてはじめて全熱電対がDNBを越え1~2秒でクエンチした。5回目(209 cal/g.UO_2) 6回目(231 cal/g.UO_2)の照射では11秒程度膜沸騰が継続した。燃料中心温度挙動を見ると、DNBを越えない場合(1~3回目)、およびDNBを越えても直ちにクエンチした場合(4回目)には、パルス照射後約1.5秒でピークに達してから直ちに急速に低下しているが、5, 6回目の照射時の膜沸騰継続中はゆるやかに低下し、被覆表面のクエンチ後約1秒程度経過してから急速に低下している。

照射後検査によれば、#2熱電対取付部において周方向の貫通クラックが入っていた。また、被覆管表面には激しい酸化物剝離があった。プロファイルメーター測定結果より外径の平均変形量は0.96%、最大変形量は1.9%であった。

3.2.3 Test NO 205-2の実験結果

本実験では、約 150 cal/g.UO_2 の発熱量で3回照射し、4回目に 234 cal/g.UO_2 で照射した。被覆表面温度計の計測結果によれば、1回目には全熱電対がDNBを越えたが、2回目は越えず、3回目の照射でも#7以外はDNBを越えなかった。4回目の照射ではDNBを越え、約12秒間膜沸騰が継続した。

照射後検査によれば、酸化物剝離は 205-1 と同様だが、破損は生じなかった。また、外径平均変形量は 1.5 %、最大変形量は 2.8 %であった。

なお、本実験では、Pt/Pt-13%Rh と Pt-20%Rh/Pt-40%Rh の 2 種類の熱電対を取り付け、その特性を比較した。これは、今迄の実験で、Pt-20%Rh/Pt-40%Rh の熱電対はクエンチ時に大きなマイナス信号を発生するなど不適切な信号が得られていたので、これを確認するために行なったものである。実験の結果、Pt-20%Rh/Pt-40%Rh の信号には、クエンチ時にマイナスの信号の発生が認められた。クエンチまでの信号は正しい指示を示していると考えられるが、マイナス信号の発生の原因の検討が必要である。

3.2.4 Test NO 205-5 の実験結果

本実験は、PBF 実験で予定している RIA スコーピング実験と同様の照射条件で実施したもので、5 回のくり返し照射を行なった。発熱量は 147, 177, 208, 228, 242 cal/g. UO_2 であり、いずれも DNB を越えた。膜沸騰時間の総計は 32.0 秒であり 3 例中最も長かったが、破損には至らず酸化物の剝離が生じたのみであった。

被覆管表面温度挙動で特異な点は、1 回目 (147 cal/g. UO_2) よりも 2 回目 (177 cal/g. UO_2) の方が発熱量が高いにもかかわらず、最高温度はむしろ低くなり (#1, #2 以外)、クエンチ時間も早くなる傾向にあったこと、4 回目 (228 cal/g. UO_2) よりも高い発熱量を与えた 5 回目 (242 cal/g. UO_2) の方が、むしろ膜沸騰継続時間が短くなっていることである。燃料中心温度挙動は、Test NO 205-1, 205-2 と同様であった。

照射後検査の結果、変形量は前の 2 例よりも大きく、外径の平均変形量は 1.1 %、最大変形量は 3.0 %、中央部の曲りは約 1mm であった。

Table 3.1 Summary of Test Conditions for Test No. 205-1, 205-2, 205-5

Test No.	Date and Time of Irradiation	Rod Position				Water Temperature (°C)	Reactivity (β)	Period (msec)	Core Energy Release (MW-sec)	Estimated Energy Deposition (cal/g-UO ₂)	Maximum Cladding Surface Temperature (°C)
		Bank	TA	TB	TC						
205-1-1	10/14/77 11:43	451	365	up	up	26.8	1.2	20.62	8.15	36	128
205-1-2	" 14:28	451	365	up	up	26.9	1.2	20.62	8.2	36	143
205-1-3	" 15:20	464	190	up	up	27.0	1.38	10.98	16.0	70	226
205-1-4	" 16:21	508	565	down	up	27.0	2.04	4.00	34.5	150	1051
205-1-5	" 17:30	540	370	down	up	27.0	2.5	2.77	48.0	209	1430
205-1-6	" 18:33	550	285	down	up	27.1	2.65	2.52	52.9	231	1450
205-2-1	11/4/77 15:18	509	565	down	up	27.0	2.04	4.00	34.7	151	1458
205-2-2	" 15:54	509	565	down	up	27.0	2.04	4.00	35.2	154	194
205-2-3	" 16:27	509	565	down	up	27.0	2.04	4.00	35.6	155	804
205-2-4	" 17:07	551	180	down	up	27.2	2.65	2.52	53.7	234	1636
205-5-1	12/14/77 11:36	507	565	down	up	22.8	2.04	4.00	33.7	147	820
205-5-2	" 13:56	523	475	down	up	23.0	2.28	3.25	40.6	177	1081
205-5-3	" 14:46	540	370	down	up	23.0	2.5	2.77	47.7	208	1280
205-5-4	" 15:36	553	250	down	up	23.0	2.7	2.44	52.3	228	1308
205-5-5	" 16:44	557	down	down	up	23.1	2.9	2.19	54.6	242	1413

Table 3.2 Summary of Experimental Results
(Test NO. 205-1)

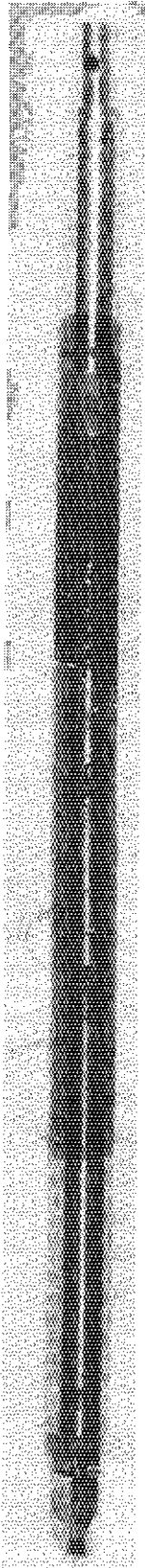
No.	Energy Deposition (cal/g.UO ₂)	Maximum Fuel Centerline Temperature (°C)	Maximum Cladding Surface Temperature (°C)				
			#1	#2	#3	#4	#5
205-1-1	36	400	92	122	128	100	70
205-1-2	36	300	133	129	116	143	-
205-1-3	70	800	-	166	226	100	48
205-1-4	148	1,640	802	1,040	893	1,051	74
205-1-5	209	2,170	1,333	1,463	1,356	1,430	110
205-1-6	231	2,280	1,340	1,490	1,360	1,450	-

Table 3.3 Summary of Experimental Results (Test NO. 205-2)

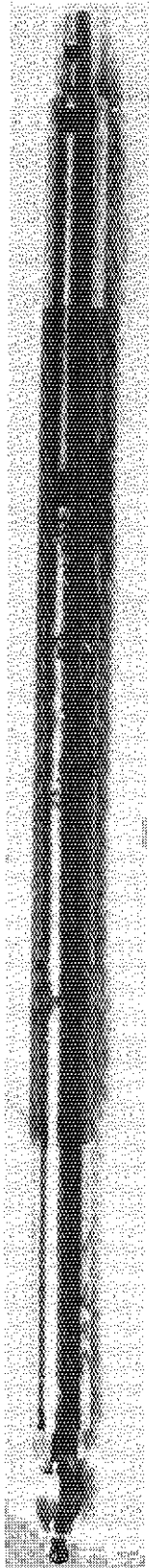
No.	Energy Deposition (cal/g.UO ₂)	Maximum Fuel Centerline Temperature (°C)	Maximum Cladding Surface Temperature (°C)							
			#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
205-2-1	151	1,604	783	733	533	725	967	1,150	500	567
205-2-2	154	1,630	166	133	103	122	150	194	217	120
205-2-3	155	1,649	190	167	133	162	132	112	725	133
205-2-4	234	2,258	1,500	1,450	1,400	1,368	1,433	1,433	1,267	1,435

Table 3.4 Summary of Experimental Results (Test NO. 205-5)

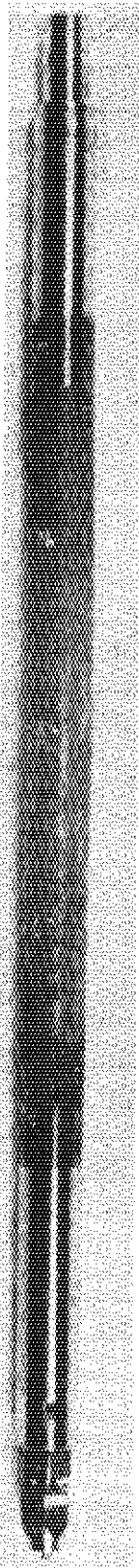
No.	Energy Deposition (cal/g.UO ₂)	Maximum Fuel Centerline Temperature (°C)	Maximum Cladding Surface Temperature (°C)							
			#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
205-5-1	147	1,633	617	590	648	820	800	733	550	650
205-5-2	177	1,925	1,081	767	333	793	713	197	783	437
205-5-3	208	2,158	1,250	1,250	1,225	1,280	1,270	1,265	1,137	1,223
205-5-4	228	2,246	1,250	1,298	1,300	1,260	1,283	1,267	1,308	1,267
205-5-5	242	2,260	1,408	1,380	1,353	1,300	1,413	1,328	1,088	1,208



Test No. 205-1



Test No. 205-2



Test No. 205-5

Fig. 3.1 Post test photographs

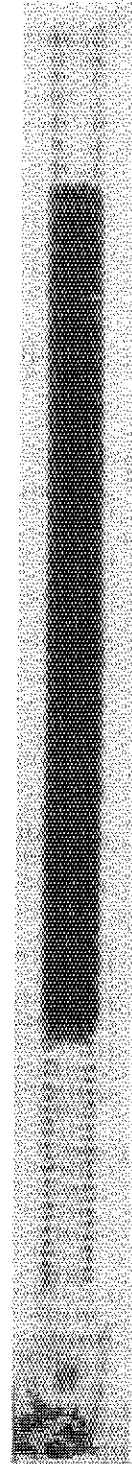
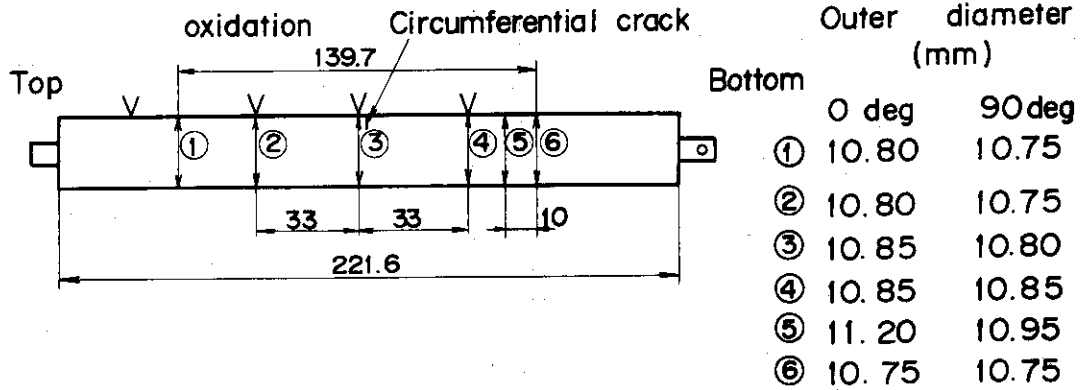
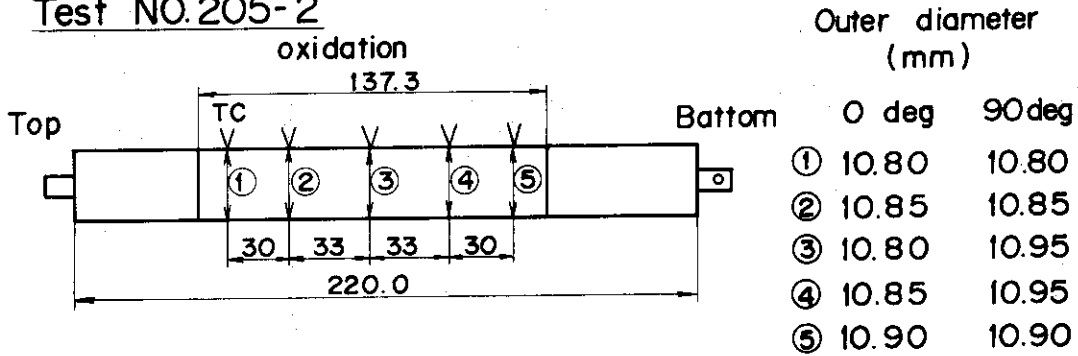


Fig. 3.2 NRG photograph of Test No. 205-2 fuel rod

Test NO.205-1



Test NO.205-2



Test NO.205-5

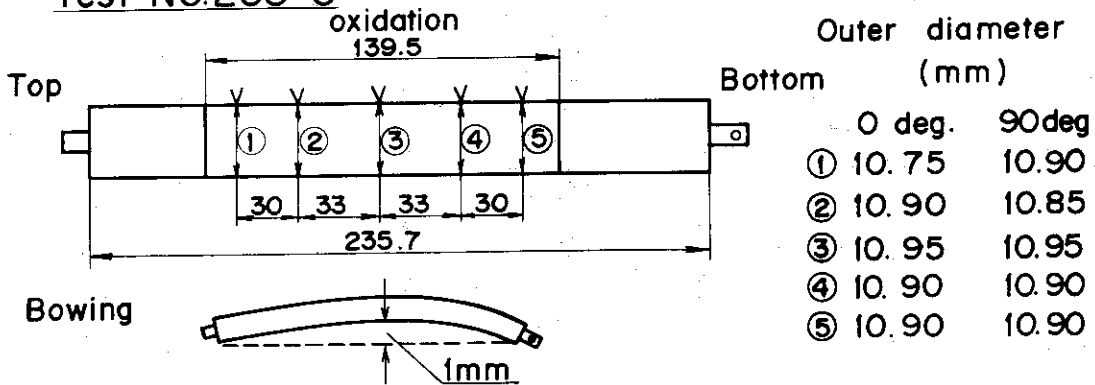


Fig.3.3 Post Irradiation Appearance and Results of Dimensional Measurements

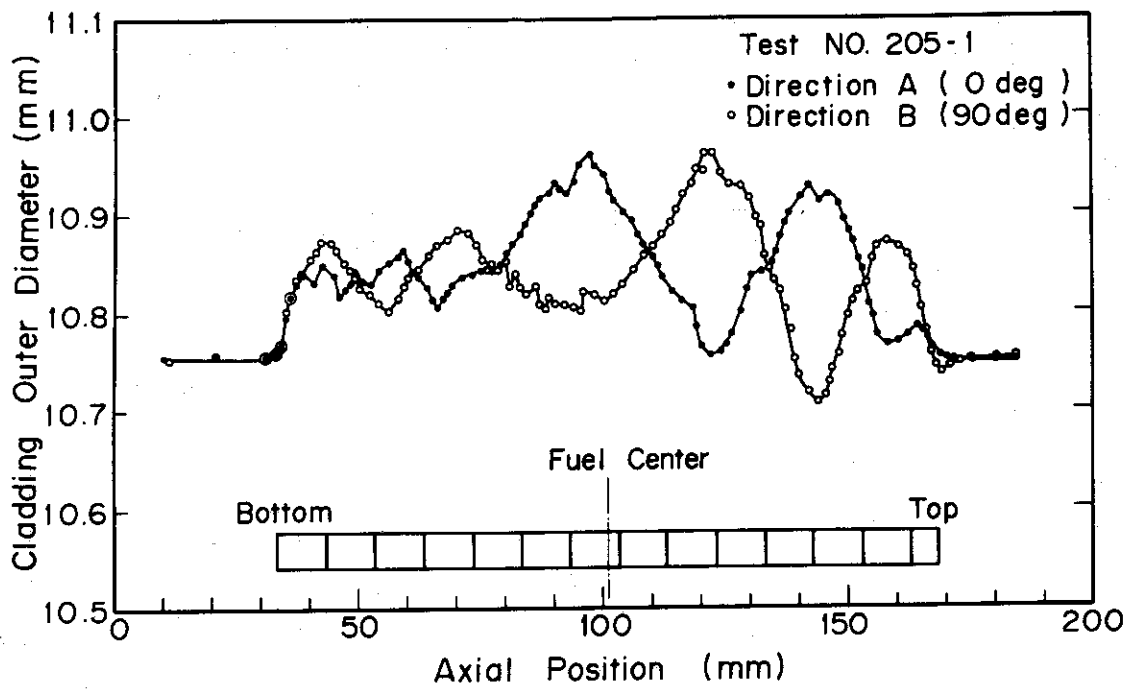


Fig.3.4 Results of the Profilometer Measurements in Test NO.205-1

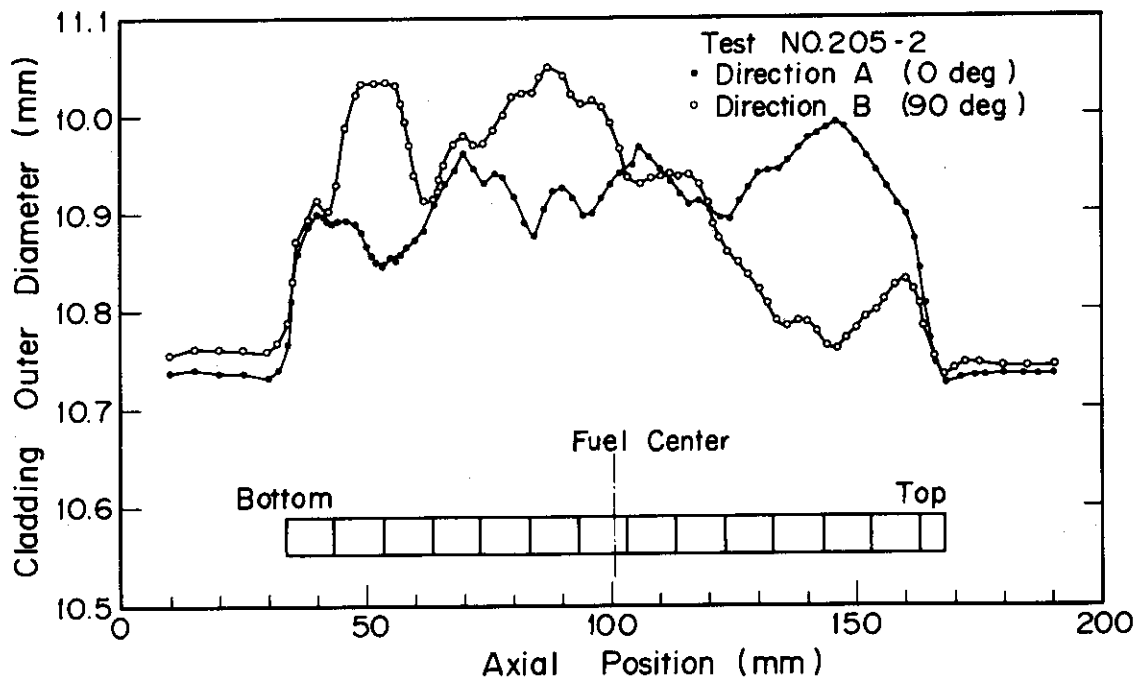


Fig.3.5 Results of the Profilometer Measurements in Test NO.205-2

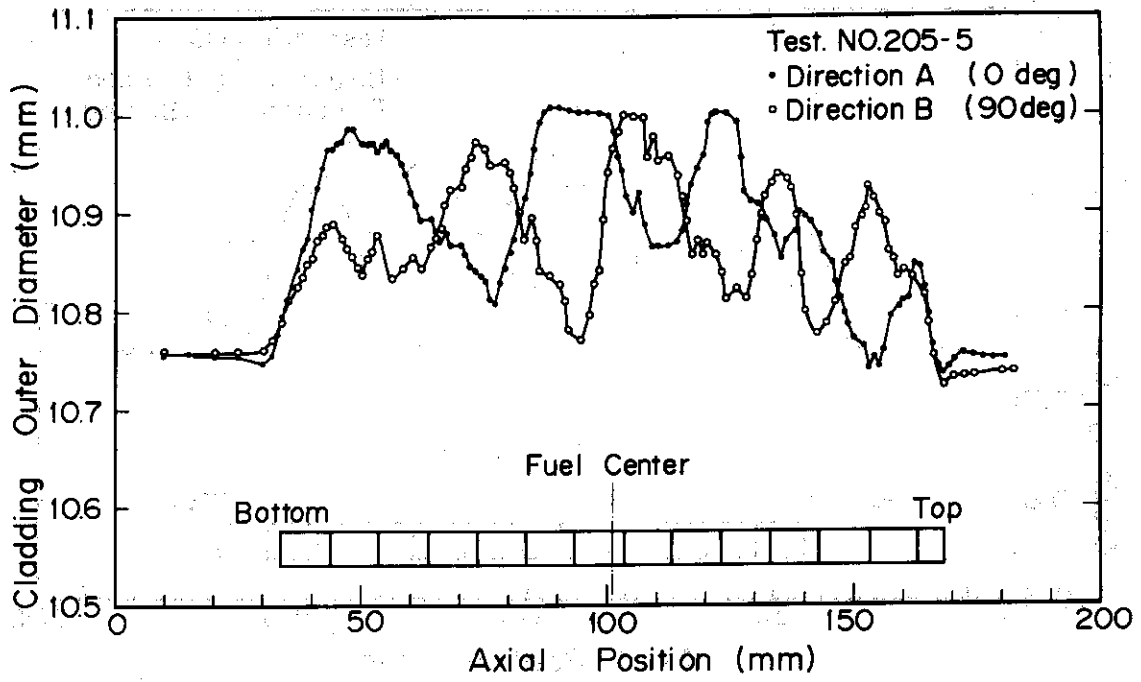


Fig. 3.6 Results of the Profilometer Measurements in Test NO.205-5

4. 考 察

4.1 燃料中心温度挙動

4.1.1 熱電対時定数の補正

燃料中心温度測定に際し注意すべき点は、熱電対の太さや取り付け上の制約から、実際の燃料温度変化と熱電対の応答との間には、かなりの時間遅れが生じることである。従って、燃料中心温度の過渡変化を正しく評価するためには、この時間遅れを補正する必要がある。

今、熱電対応答が一次遅れで近似できると仮定して、その時定数を τ 、燃料中心温度の真の値を $T_f(t)$ 、実測値を $T_m(t)$ とすると、次式が成立する。

$$\frac{dT_m(t)}{dt} = \frac{T_f(t) - T_m(t)}{\tau} \quad (1)$$

従って、時定数 τ が求めれば、 $T_m(t)$ は既知なので、(1)式より $T_f(t)$ を求めることができる。

ところで、星ら⁽¹⁾は、シース表面熱伝達率とシース径をパラメータとして熱電対時定数を求め、Fig. 4.1 に示すような結果を得ている。本実験における中心温度測定用熱電対シースと燃料との間の熱伝達率の値は、燃料内挿入孔が直径2 mm、シース径が1.6 mm という形状から考えると、燃料のペレットクラッド間のギャップコンダクタンスの値と同じオーダーであると予想される。今、ギャップ平均温度約1700°C、ギャップ巾約0.1 mm*と仮定して、Ross and Stoute モデルによりギャップ熱伝達率を計算すれば約7300 kcal/hrm²°C(約1500 Btu/hrft²°F)程度となる。従って、表面熱伝達率としても約7300 kcal/hrm²°C程度と仮定すれば、Fig. 4.1 より熱電対時定数は約0.3秒程度と見つめられる。

従って、ここでは熱電対時定数を0.3秒として、集録したアナログデータを直接(1)式の回路を構成したアナログ計算機に入力し、 $T_f(t)$ の過渡挙動を求めた。

計算結果のうち、DNBを越えない場合(Test No. 205-2-2)と越えた場合(Test No. 205-2-4)について、燃料中心温度の測定値と上述の方法による補正結果をそれぞれFig. 4.2, 4.3に示す。両図には、温度の立ち上り部分と、冷却の様子を明らかにするため、それぞれ0~5秒と0~30秒の場合について図示した。

Fig. 4.2, 4.3 の時定数補正結果を実測値と比較すると、以下のような特徴が見られる。

- (i) パルス照射時の温度の立ち上りはかなり急激である。
- (ii) パルス照射直後の急激な温度上昇後、最高値の約61%(205-2-2)~76%(205-2-4)の温度において上昇が一旦停止し、再びゆるやかに上昇して最高値に至る。
- (iii) 最高温度そのものは測定値とあまり変らない。
- (iv) 冷却過程においては、測定値よりもかなり早く温度が低下する。

* ギャップ巾公称値は0.2 mmであるが、熱電対先端が挿入孔の下端に接触していることや偏心などを考慮すれば、実効的なギャップ巾はかなり小さくなるはずであり、ここでは0.1 mmと仮定した。なお、Fig. 4.1 に見られるように、熱電対時定数はギャップ熱伝達率評価値にそれほど強く依存しない。

上記のうち、燃料温度（燃料ペレット中心温度）の上昇が、パルス照射直後一旦停止し、再び上昇する理由は、パルス照射によるペレットの加熱時間は極めて短いためにペレット内の熱の移動は小さく、まずペレット温度は発熱分布に従って断熱的に上昇し、その後発熱分布が Fig. 4.4 に示すようにペレット外周部の方が高いため、時間経過とともに中心部の方へ一時熱が流入して温度が上昇することによる。Fig. 4.5 は燃料挙動解析コード MACDRAN による燃料中心温度挙動の解析例であり、実測値と同様に急激な温度上昇後ゆるやかな再温度上昇が示されている。

以上の補正結果より、最高温度の比較に関する議論には測定値をそのまま使用してもよいが、計算コードとの照合やギャップコンダクタンスの過渡挙動計算等には、熱電対時定数の補正が必要である。

4.1.2 被覆管表面熱伝達率変化が燃料中心温度挙動に与える影響

燃料温度は、ペレット内部の発熱量と、発生した熱がペレット表面からギャップおよび被覆管を介し冷却材に流出する間の除熱条件により決定される。

Fig. 4.2, 4.3 に見られるように、被覆表面が DNB を越えない場合 (Fig. 4.2) には、燃料中心温度はパルス後 1.3 秒でピークに達してから直ちに低下しているが、DNB を越えた場合 (Fig. 4.3) には、最高温度到達後ゆるやかに低下し、被覆表面がクエンチすると、燃料中心温度は急速に低下する。

これは、DNB を越えると被覆管の冷却は膜沸騰熱伝達による冷却となるため冷却能力が低下するが、クエンチ後は DNB を越えなかった場合と同様に核沸騰熱伝達による冷却となるため、燃料温度が急速に低下することによる。

この結果より、燃料温度の変化は被覆表面の冷却条件に大きく左右されることがわかる。

4.2 繰り返し照射の影響

4.2.1 燃料中心温度挙動に対する繰り返し照射の影響

Test No. 205-1, 205-2, 205-5 の照射ごとの燃料中心温度最高値と発熱量の関係を図 4.6 に示す。同図より、同一発熱量における燃料中心温度最高値は各実験間で良く一致していることがわかる。

Fig. 4.7 は、約 $150 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ で 3 回照射した Test No. 205-2-1, 2, 3 の燃料中心温度過渡記録の比較を示す図である。同図より、同一発熱量でも DNB をわずかに越えた 1 回目の照射 (205-2-1) では、立ち上りと冷却の速度にわずかの差が認められるが、2 および 3 回目の温度挙動はほぼ一致していることがわかる。

4.2.2 被覆管表面温度挙動に対する繰り返し照射の影響

Fig. 4.8 に、Test No. 205-2 において約 $150 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ の発熱量で 3 回繰り返し照射した場合の被覆管表面温度挙動の比較を示す。

同図に見られるように、 $150 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ の 1 回目の照射時には、全熱電対が DNB を越え

て約1秒程度でクエンチしているが、2回目では全熱電対がDNBを越えず、3回目の照射では、発熱部下端より5mmの熱電対(#7)のみがDNBを越えたが、その他の位置ではDNBを越えなかった。

また、Fig. 4.9にTest No. 205-5-4と205-5-5の被覆管表面温度挙動の比較を示す。5回目の照射は $242 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ で、4回目の $228 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ よりも6%高い発熱量を与えたものである。同図から被覆表面最高温度は#7、#8以外は高くなっているにもかかわらず、#5以外のすべての熱電対は膜沸騰継続時間が1~5秒程度短くなっていることがわかり、繰り返し照射の影響が認められる。

DNBを超えた場合の繰り返し照射の影響は、1976年5月に実施されたTest No. 209-1⁽³⁾でも認められている。この実験は、約 $180 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ の発熱量で5回繰り返し照射を行ったもので、Fig. 4.10に示すように1~3回目はパルス照射ごとに膜沸騰継続時間が段階的に短くなり、3~5回目にはそれほど変化が見られないという結果が得られている。

一方、DNBを越えない発熱量で3回照射した後、約 $150 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ の発熱量を与えたTest No. 205-1-4では、全熱電対がDNBを越えて1~2秒でクエンチし、この時の挙動は繰り返し照射を行わない第1回照射時の同一発熱量の照射結果(例えばTest No. 205-2-1)とよく一致している。

以上の各実験結果より、DNBを越えない発熱量の範囲内では、被覆管表面温度挙動には繰り返し照射による影響は認められないが、一度DNBを越えると、次回以後の照射時の被覆管表面温度挙動はその影響を受けることが明らかになった。

標準燃料の場合、DNBが発生する約 $150 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ の発熱量では、ペレットの熱膨張によりペレットと被覆管が接触する。従って、DNBを越えた燃料で被覆管表面温度の上昇が小さくなる理由としては、一度燃料が照射されると、ペレットと被覆管のギャップが増加し、広幅ギャップ燃料に見られるように⁽⁴⁾ DNBが生じにくくなるためと考えられるが、今後検討を要するところである。

4.2.3 被覆管変形に対する繰り返し照射の影響

Fig. 3.4, 3.5, 3.6に示すように、プロファイルメーターによる照射後外径測定の結果、各燃料体ともかなり不均一な変形をしていることがわかる。このような不均一な変形は単一照射である標準燃料実験結果でも認められている。繰り返し照射時と、標準燃料の単一照射時における平均および最大変形量と発熱量の関係⁽⁶⁾とを比較した結果をFig. 4.11に示す。ここで、平均変形量とは発熱部全長における直角二方向の外径測定の平均値を初期の被覆管外径で除した値であり、最大変形量とは測定された外径の最大値を初期の被覆管外径で除した値である。同図より、繰り返し照射を経験した燃料棒では、平均変形量、最大変形量共に、各最終発熱量に対応する単一照射の場合よりも一般に大きくなっている傾向にある。特に、約 $150 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ の発熱量で3回繰り返し照射してから最後に $234 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ の発熱量で照射したTest No. 205-2において、平均および最大変形量がそれぞれ1.5%、2.8%と単一照射の場合よりもかなり大きくなっている。

NSRR標準燃料においては、ペレットと被覆管が接触する発熱量は約 $150 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ で

あり、同発熱量では冷却後に元に戻ると評価されている⁽⁵⁾。しかし、Test No. 205-2 の変形量が大きかったことは、約150 cal/g・UO₂の発熱量においても、ペレットの割れ等による繰り返し照射の影響が出ていると考えられるので、繰り返し照射時のペレットと被覆管の相互作用に関してはさらに検討を要する。

4.2.4 繰り返し照射による破損しきい値の変化

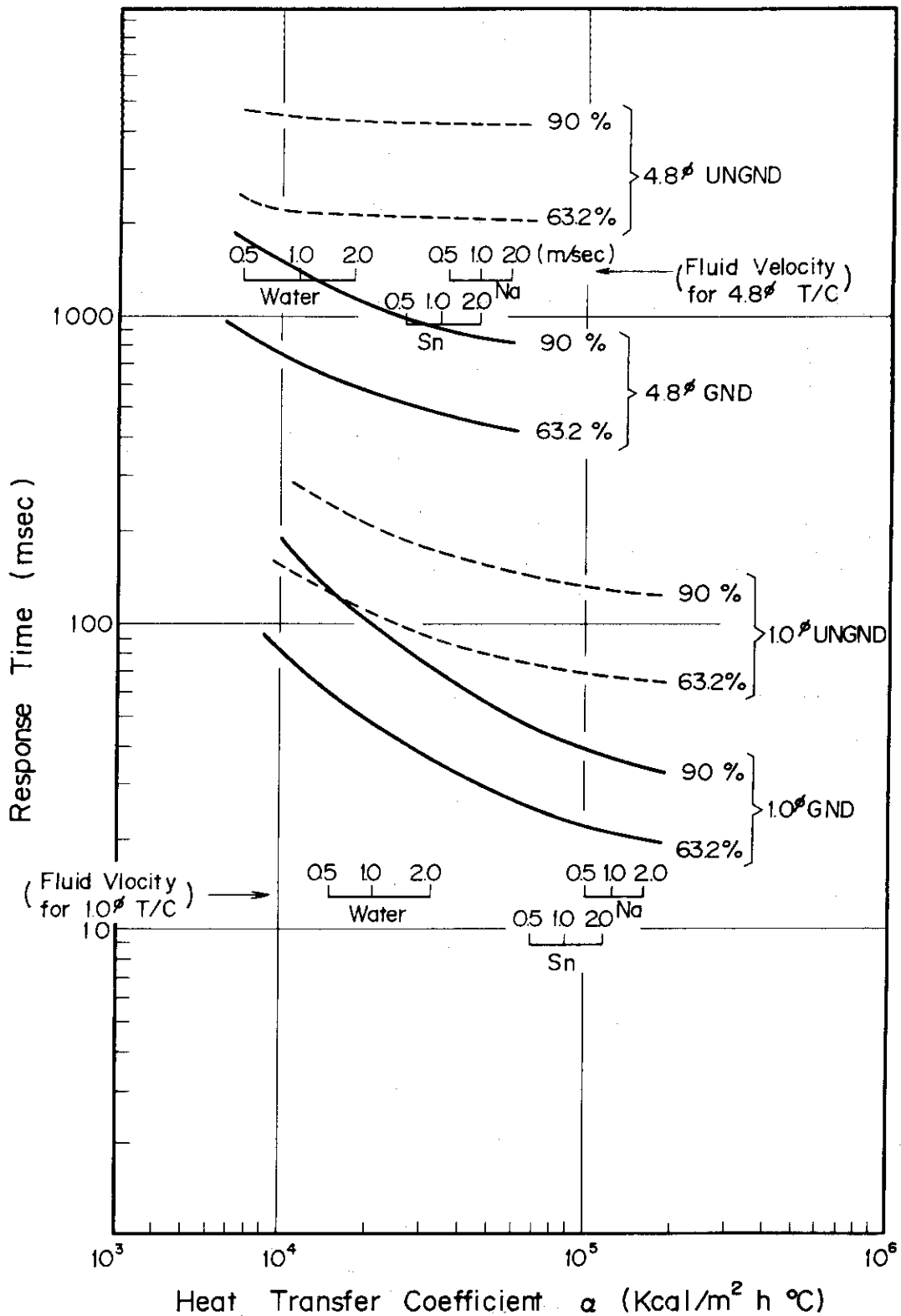
繰り返し照射を行った燃料中心温度測定実験について、各照射ごとの膜沸騰継続時間とその総計ならびに照射後燃料外観状況を整理比較した表をTable 4.1に示す。同表より、膜沸騰継続時間の総計が32.0秒と最も長く、最終発熱量もやや高めであるTest No. 205-5が破損せず、23.6秒の膜沸騰を経験したTest No. 205-1の方が破損したことがわかる。

破損しなかった燃料は、表面の酸化状態は標準燃料のそれよりも激しいが、特に破損に至るような欠陥は認められず、破損しきい値が標準燃料の場合よりも極端に下るような傾向は認められない。また、本実験と同様の繰り返し照射は、燃料のび測定実験でも実施されているが⁽⁸⁾、同実験でも燃料破損は認められていない。このことから、燃料破損しきい値に与える繰り返し照射の影響は小さいと言える。

Table 4.1 Comparison of Total Time in DNB

Test No.			Irradiation No.						Total time in DNB (sec)		Failure
			1	2	3	4	5	6	#2(up), #4(down)	Average	
205-1	E.D.(cal/g·UO ₂)		36	36	70	148	209	231			
	Time in	# 2	0.0	0.0	0.0	0.8	1.18	1.10	23.6		YES
	DNB(sec)	# 4	0.0	0.0	0.0	1.6	1.12	1.08	23.6		
205-2	E.D.(cal/g·UO ₂)		151	154	155	234					
	Time in	# 2	0.5	0.0	0.0	1.11			11.6		NO
	DNB(sec)	# 4	0.5	0.0	0.0	1.23			12.8		
205-5	E.D.(cal/g·UO ₂)		147	177	208	228	242				
	Time in	# 2	0.6	1.6	9.4	10.8	9.8		32.2		NO
	DNB(sec)	# 4	1.5	0.8	9.6	11.0	8.9		31.8		

E. D. = Energy Deposition



Heat Transfer Coefficient α (Kcal/m² h °C)
 Fig.4.1 Thermocouple Response Time vs. Heat Transfer Coefficient

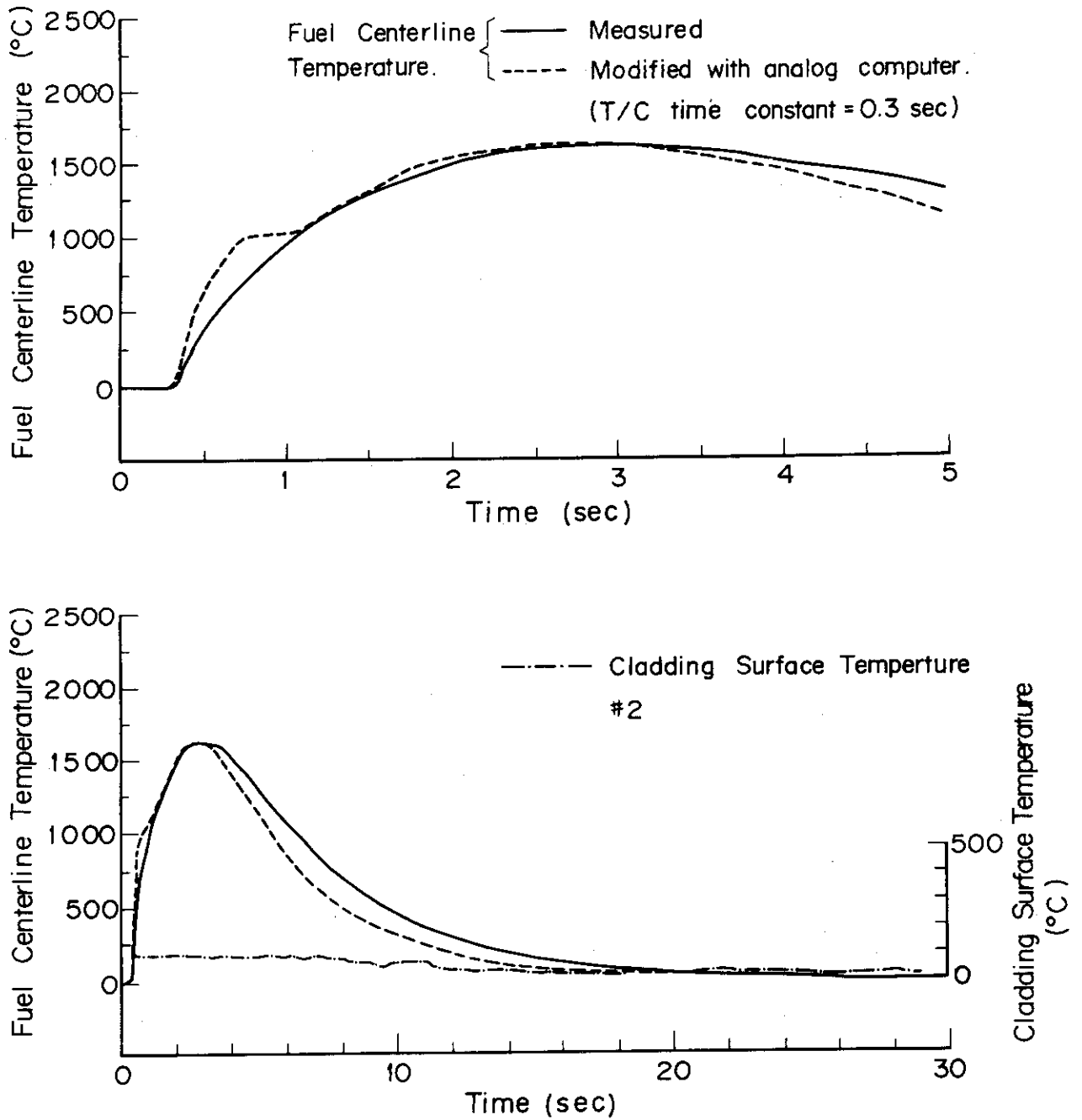


Fig.4.2 Comparison of measured and modified fuel centerline temperature (Test NO.205-2-2, without DNB)

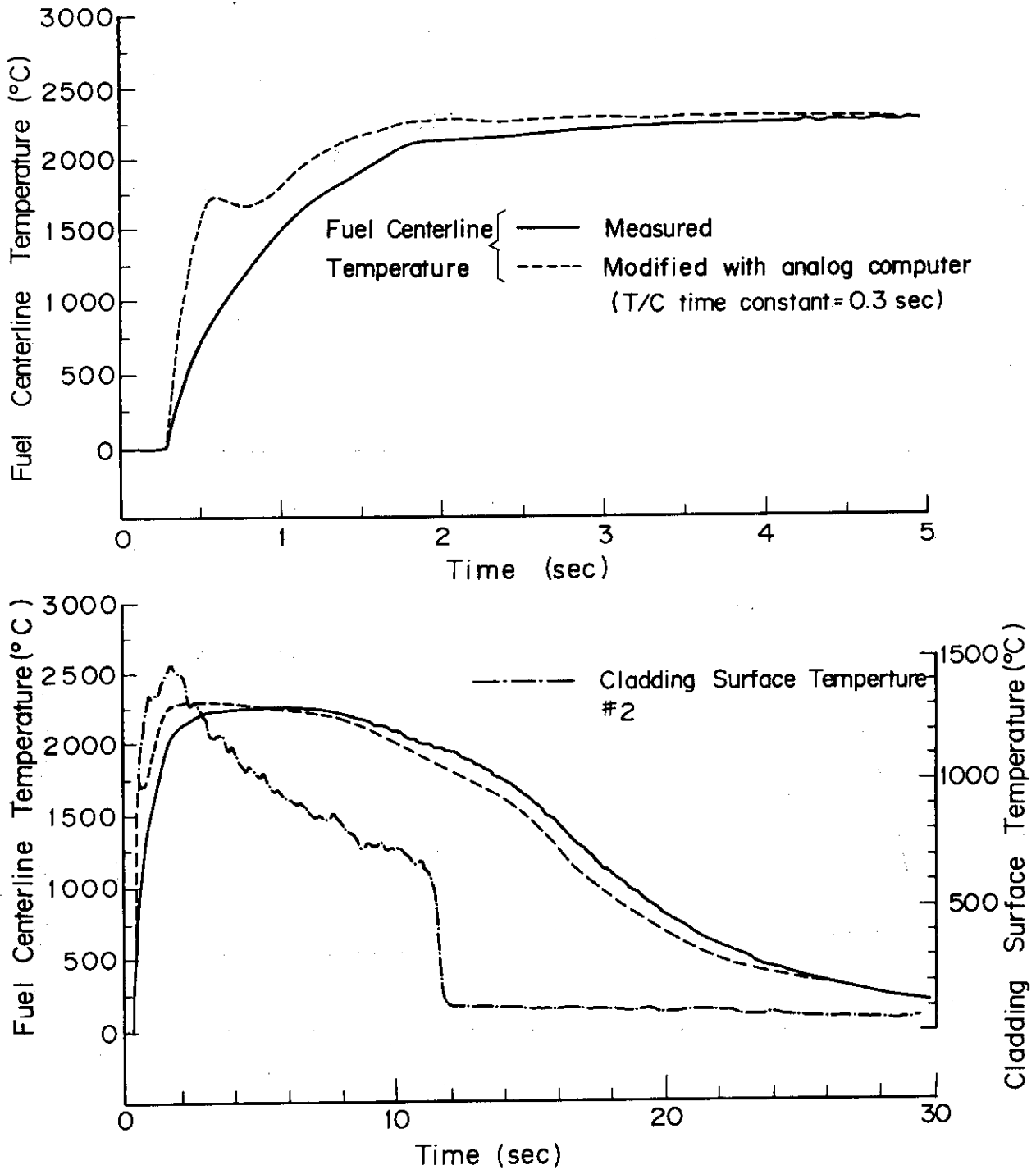


Fig. 4.3 Comparison of measured and modified fuel centerline temperature (Test NO.205-2-4. with DNB)

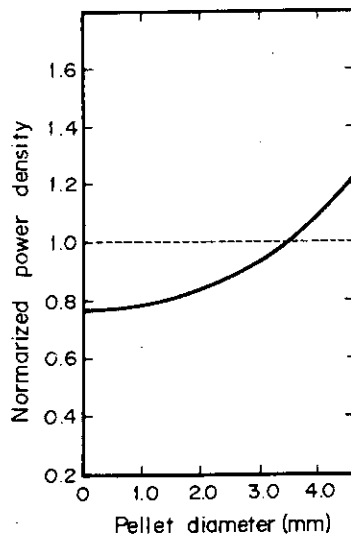


Fig.4.4 Power density distribution in NSRR standard fuel

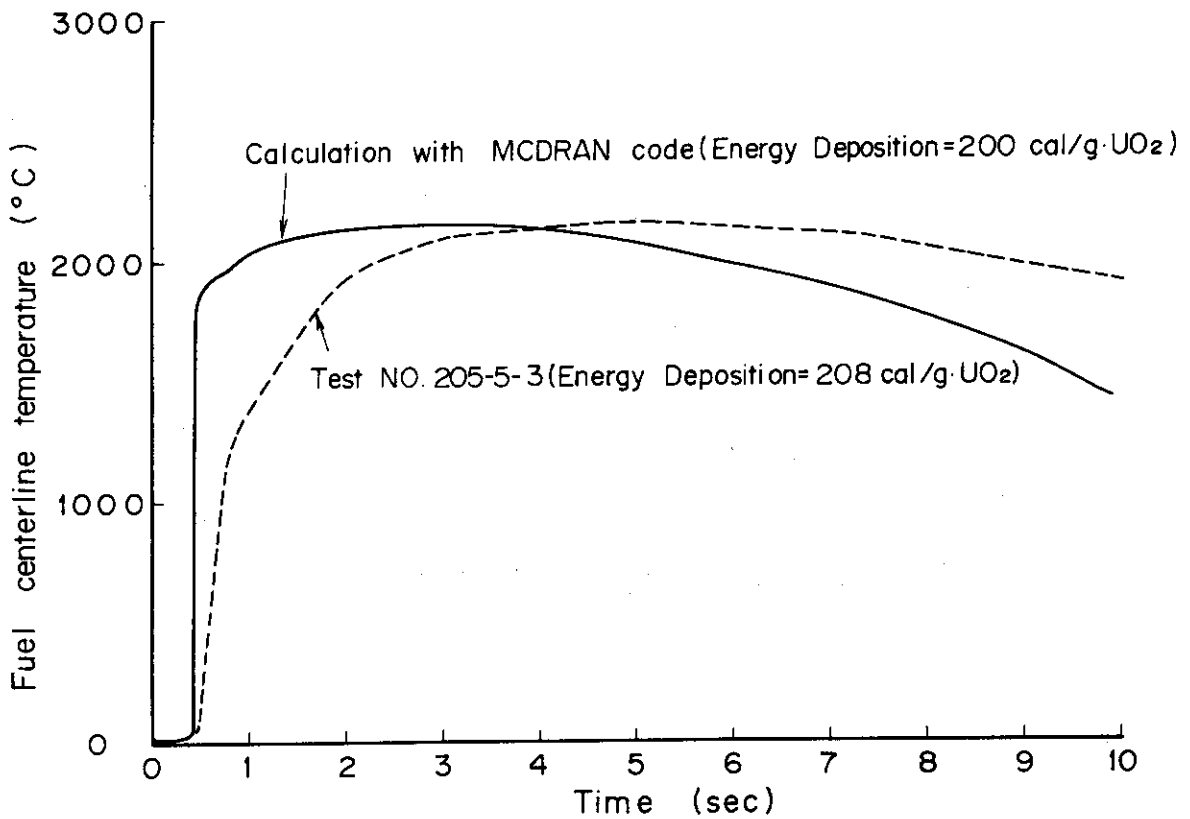


Fig.4.5 Calculation of fuel centerline temperature in NSRR standard fuel with MCDRAN.

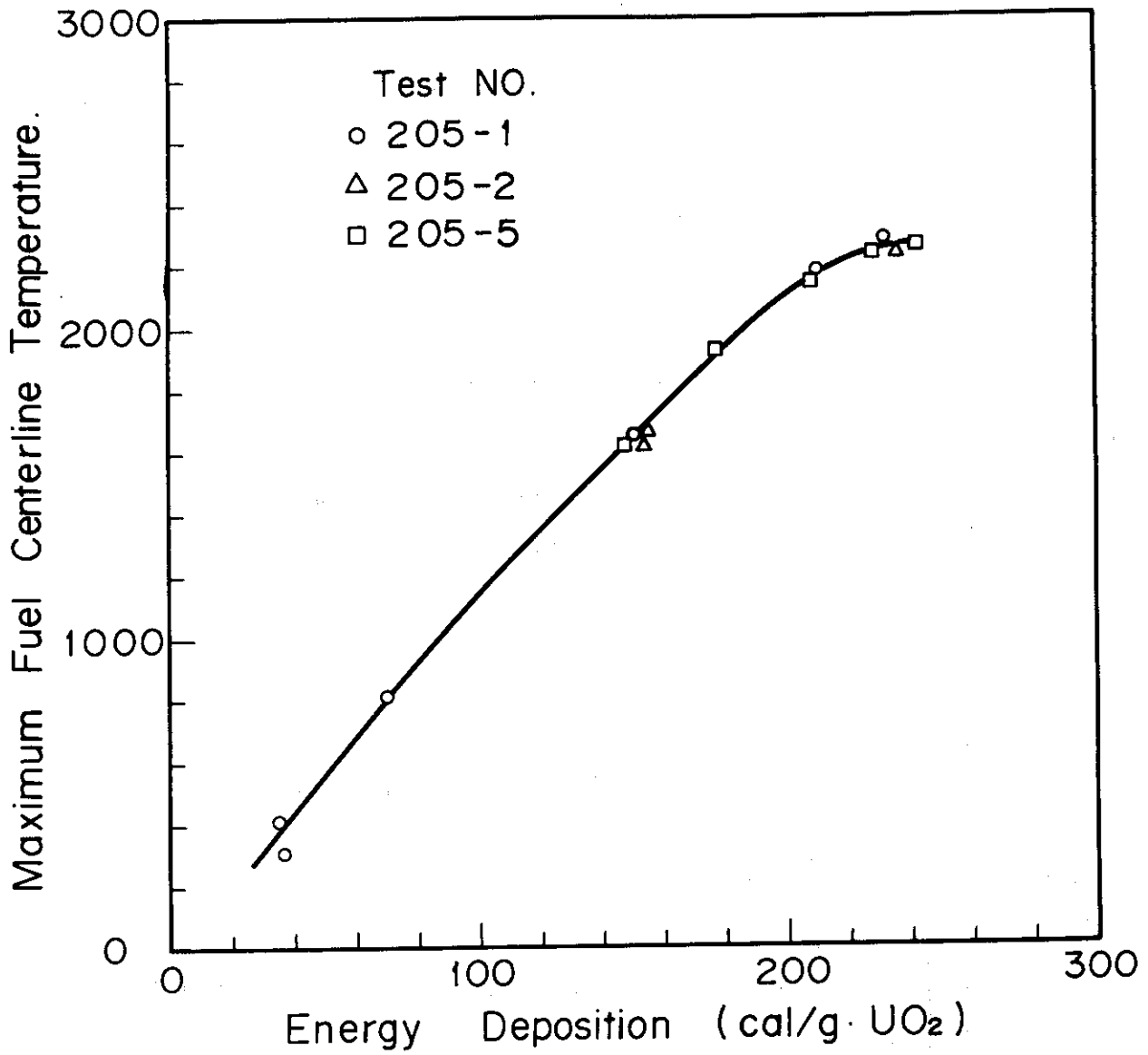


Fig.4.6 Maximum Fuel Centerline Temperature vs. Energy Deposition

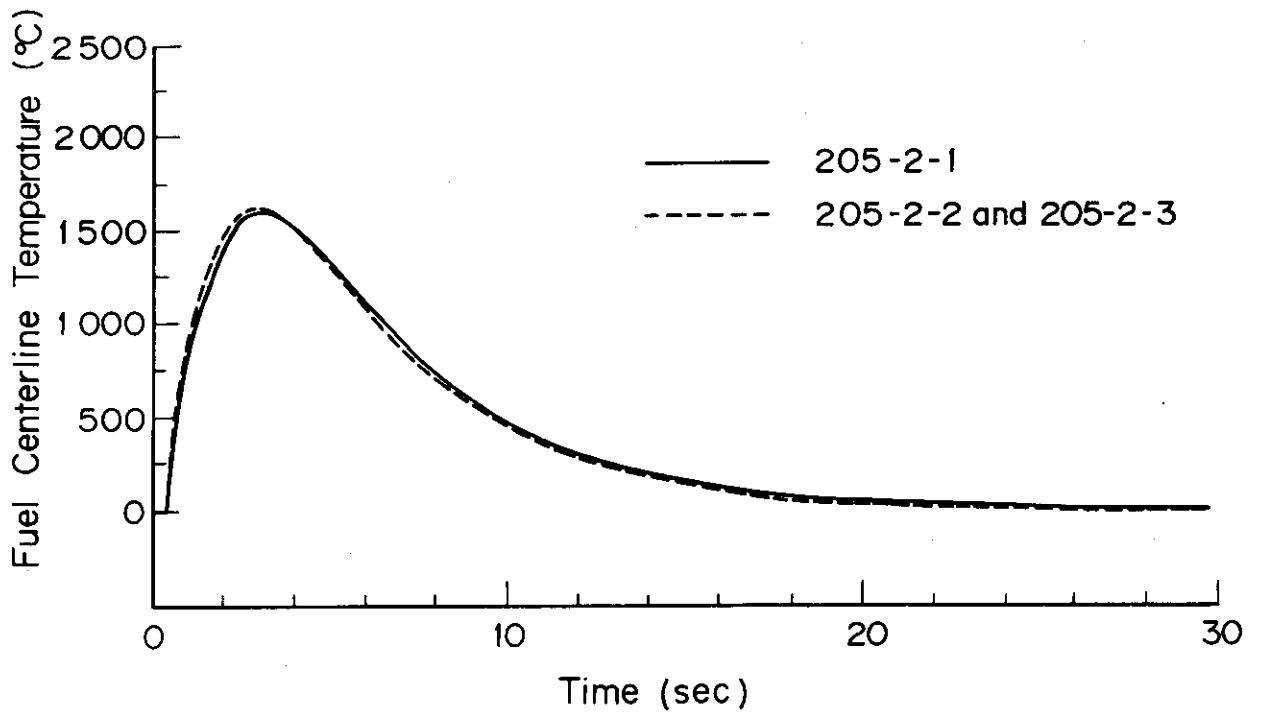
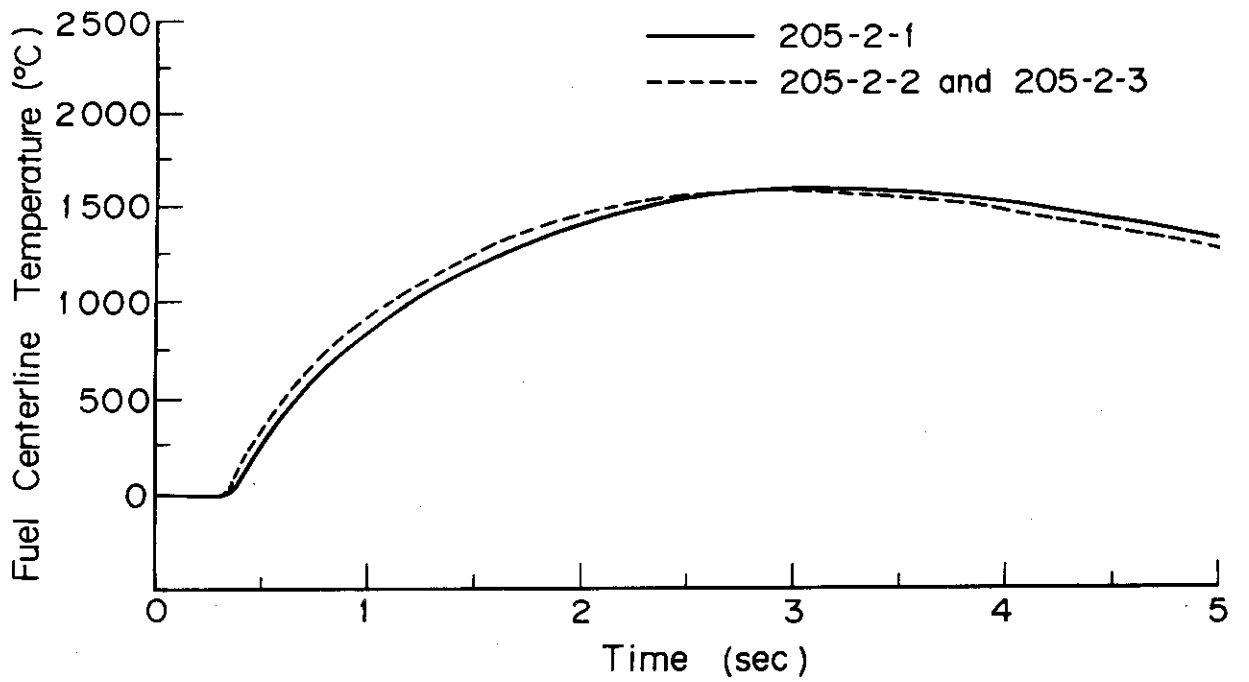


Fig.4.7 Effect of Repeated Irradiation on the Fuel Centerline Temperature

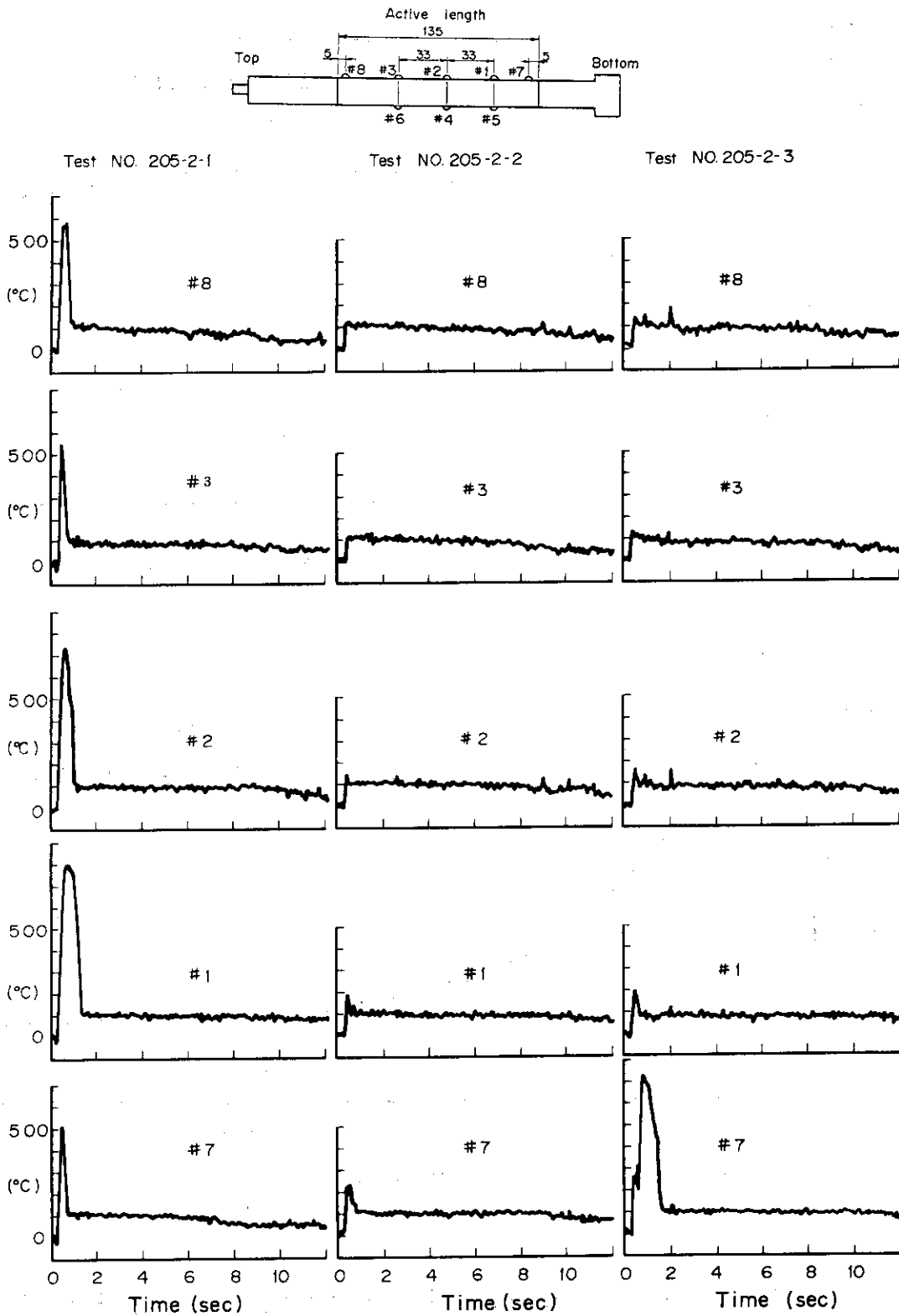


Fig.4.8 Effect of Repeated Irradiation on the Cladding Surface Temperature

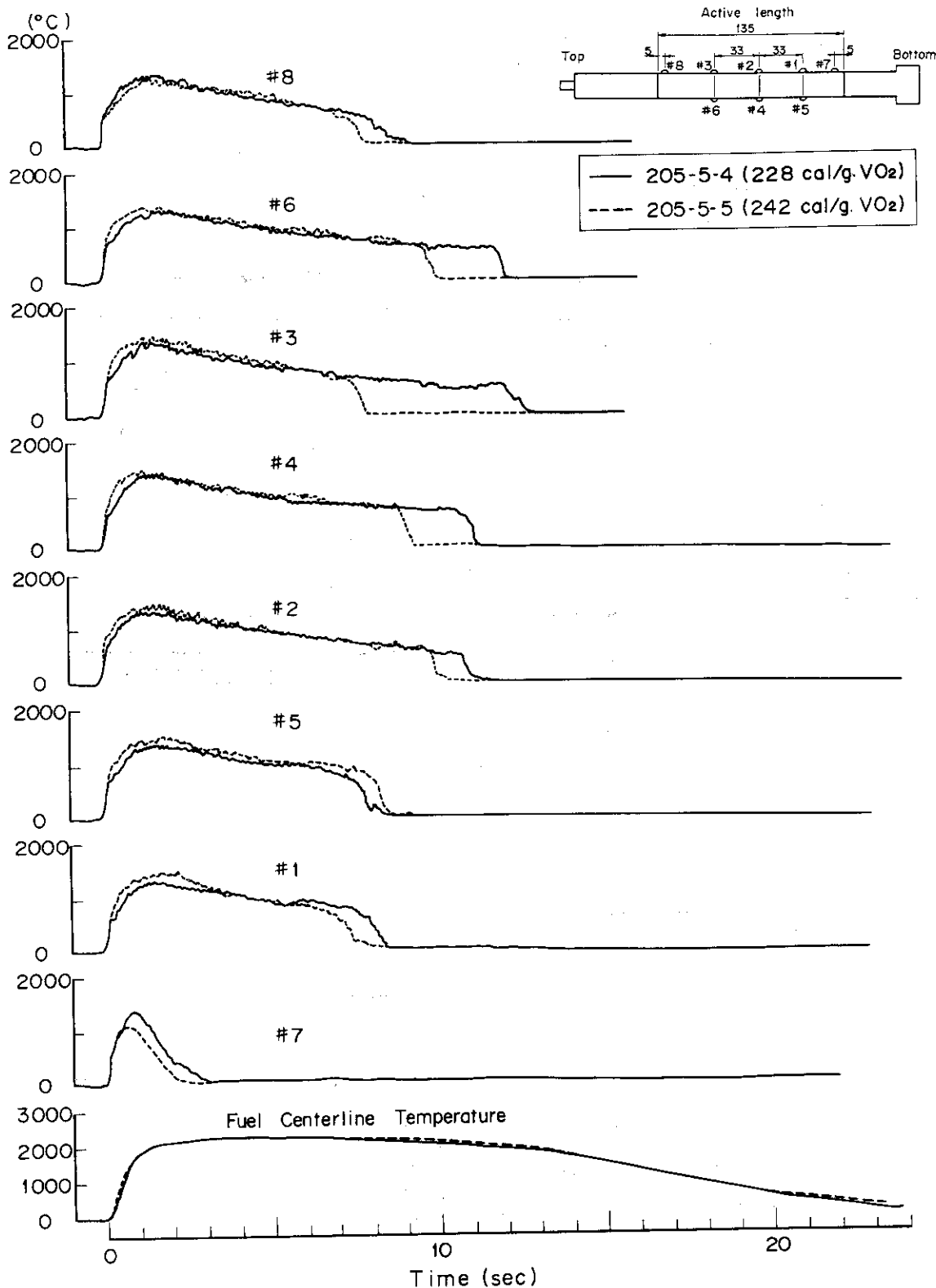


Fig. 4.9 Effect of Repeated Irradiation on the Cladding Surface Temperature (Test 205-5-4 and 205-5-5)

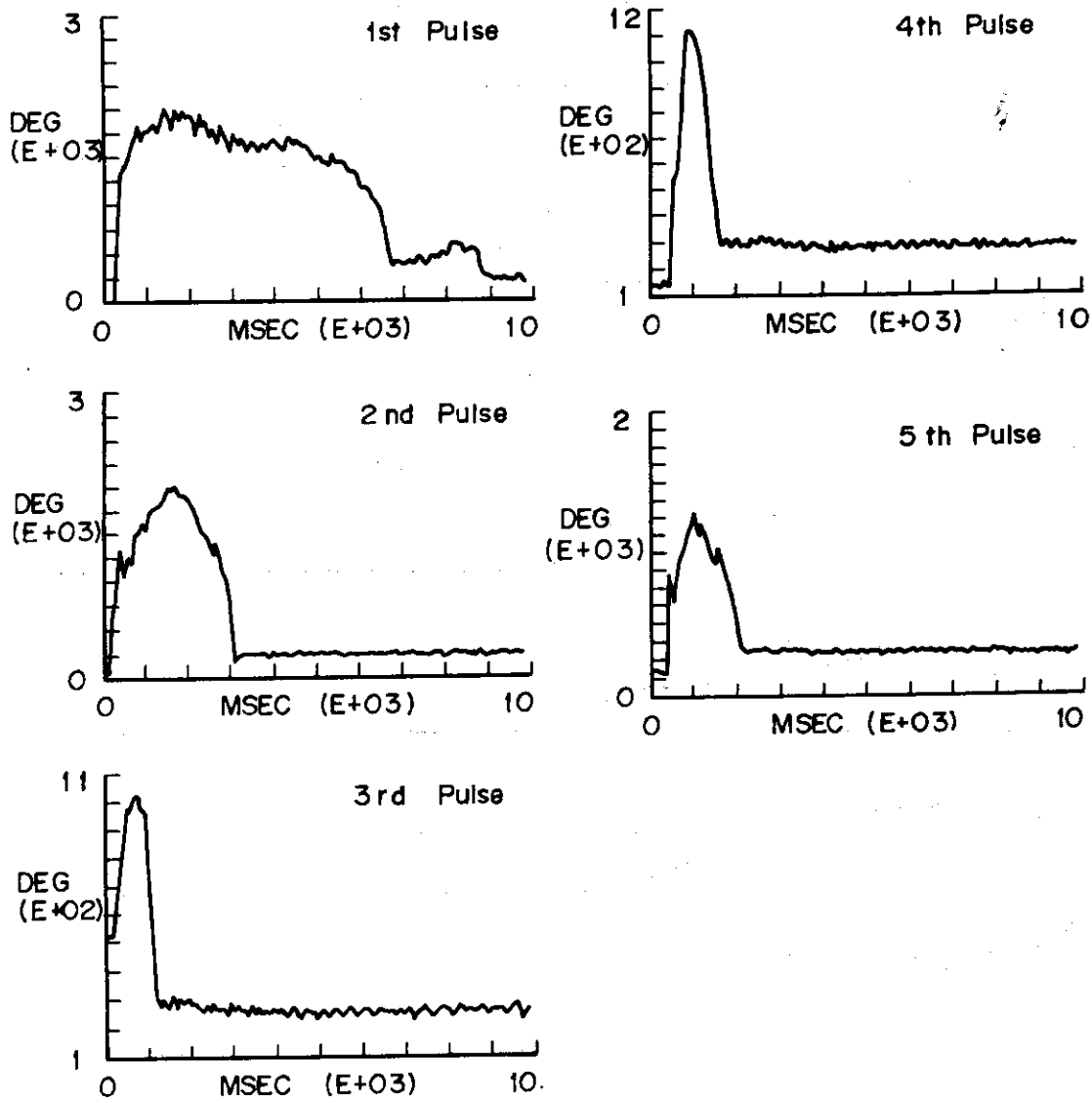


Fig.4.10 Changes of cladding surface temperature response at the center of active region through 5 time irradiations (2.23 pulse)

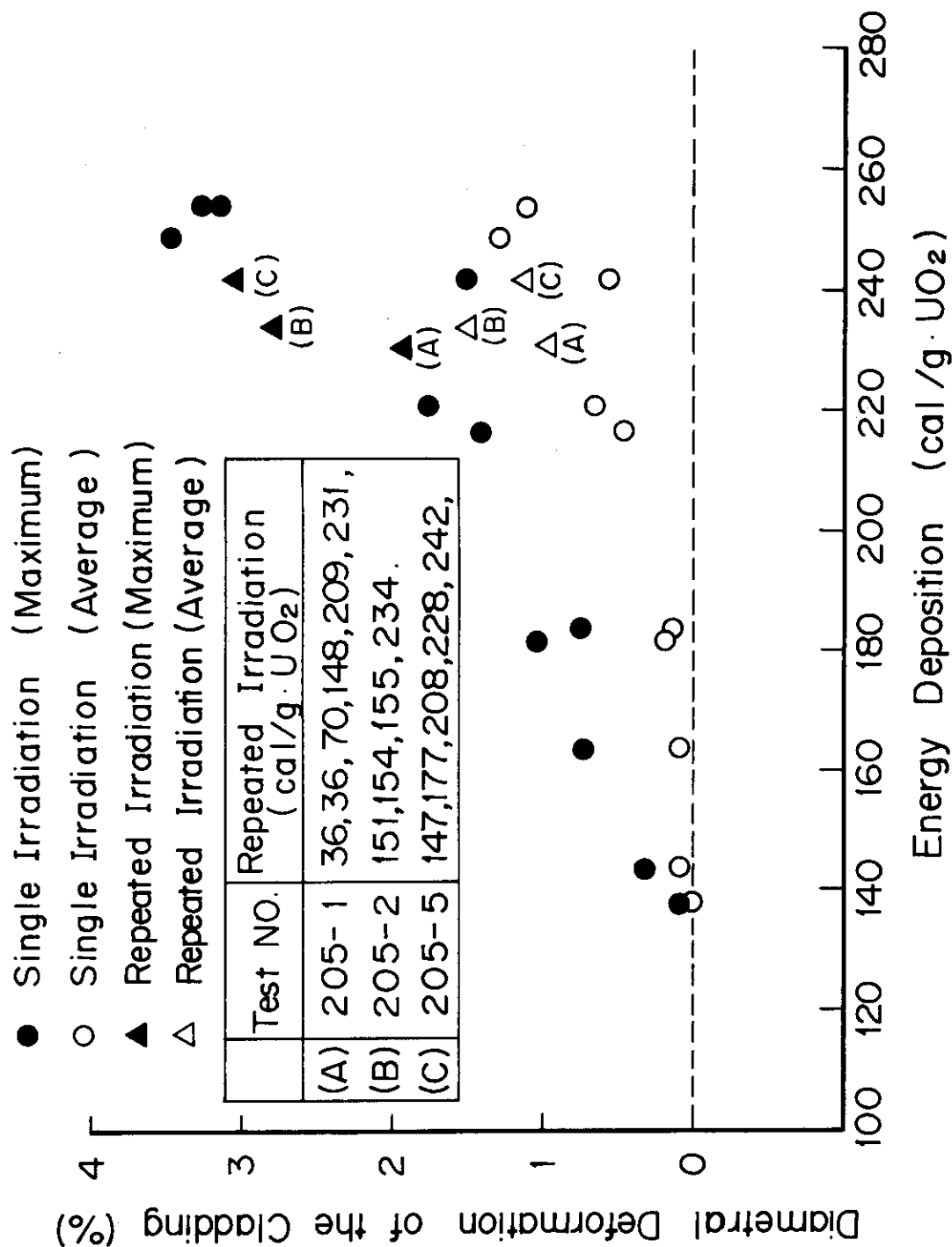


Fig.4.11 Effect of repeated irradiation on diametral deformation of the standard test fuel cladding

5. 結 言

本実験の結果、燃料中心温度測定用熱電対の作動は良好で、信頼できるデータ取得が可能であることが確認された。

熱電対の応答時定数による補正を行った結果、従来計算で得られた燃料中心温度挙動と類似の挙動を示した。また、冷却過程における燃料温度挙動は被覆管表面熱伝達率に支配されることが確認でき、解析コードの検証に有用なデータが取得できた。

燃料中心温度測定の再現性は良好で、照射履歴の影響は少ないことがわかった。一方、被覆管表面温度挙動や変形量は、DNBを越える発熱量での繰り返し照射の影響をかなり受けることがわかった。

繰り返し照射が破損しきい値におよぼす影響については明確な断定はできないが、その影響は少ないと考えられる。

今後、本実験の結果をもとに、燃料温度挙動解析モデルの検証と、ギャップコンダクタンスおよび被覆管表面熱伝達率等の評価を行う予定である。

謝 辞

本実験を遂行し結果をまとめるにあたり、有意義な討論と助言をいただいた石川迪夫反応度安全研究室長他、同研究室員の方々、および実験を担当していただいたNSRR管理室の方々に感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 星蔦雄, 中本香一郎“熱電対の応答特性の研究”, N241 71-56, 昭和46年12月
- (2) P.E. MacDonald, L.B. Thompson “MATPRO A Handbook of Materials Properties for Use in the Analysis of Light Water Reactor Fuel Rod Behavior”, ANCR-1263, 1976
- (3) “NSRR実験プログレスレポート・2”, JAERI-M 6790, 1976年11月
- (4) “NSRR実験プログレスレポート・1”, JAERI-M 6635, 1976年7月
- (5) 塩沢周策“NSRR実験における標準燃料の振舞いに関する一考察”, JAERI-M 7267, 1977年9月
- (6) “NSRR実験プログレスレポート・4”, JAERI-M 7304, 1977年10月
- (7) 大西信秋他“NSRR実験における試験燃料の発熱量の評価”, JAERI-M 7539, 1978年2月
- (8) 星蔦雄他“燃料のび測定実験”近刊予定

5. 結 言

本実験の結果、燃料中心温度測定用熱電対の作動は良好で、信頼できるデータ取得が可能ながことが確認された。

熱電対の応答時定数による補正を行った結果、従来計算で得られた燃料中心温度挙動と類似の挙動を示した。また、冷却過程における燃料温度挙動は被覆管表面熱伝達率に支配されることが確認でき、解析コードの検証に有用なデータが取得できた。

燃料中心温度測定の再現性は良好で、照射履歴の影響は少ないことがわかった。一方、被覆管表面温度挙動や変形量は、DNBを越える発熱量での繰り返し照射の影響をかなり受けることがわかった。

繰り返し照射が破損しきい値におよぼす影響については明確な断定はできないが、その影響は少いと考えられる。

今後、本実験の結果をもとに、燃料温度挙動解析モデルの検証と、ギャップコンダクタンスおよび被覆管表面熱伝達率等の評価を行う予定である。

謝 辞

本実験を遂行し結果をまとめるにあたり、有意義な討論と助言をいただいた石川迪夫反応度安全研究室長他、同研究室員の方々、および実験を担当していただいたNSRR管理室の方々に感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 星 蔭雄, 中本香一郎 “熱電対の応答特性の研究”, N241 71-56, 昭和46年12月
- (2) P.E. MacDonald, L.B. Thompson “MATPRO A Handbook of Materials Properties for Use in the Analysis of Light Water Reactor Fuel Rod Behavior”, ANCR-1263, 1976
- (3) “NSRR実験プログレスレポート・2”, JAERI-M 6790, 1976年11月
- (4) “NSRR実験プログレスレポート・1”, JAERI-M 6635, 1976年7月
- (5) 塩沢周策 “NSRR実験における標準燃料の振舞いに関する一考察”, JAERI-M 7267, 1977年9月
- (6) “NSRR実験プログレスレポート・4”, JAERI-M 7304, 1977年10月
- (7) 大西信秋他 “NSRR実験における試験燃料の発熱量の評価”, JAERI-M 7539, 1978年2月
- (8) 星蔭雄他 “燃料のび測定実験” 近刊予定

5. 結 言

本実験の結果、燃料中心温度測定用熱電対の作動は良好で、信頼できるデータ取得が可能ながことが確認された。

熱電対の応答時定数による補正を行った結果、従来計算で得られた燃料中心温度挙動と類似の挙動を示した。また、冷却過程における燃料温度挙動は被覆管表面熱伝達率に支配されることが確認でき、解析コードの検証に有用なデータが取得できた。

燃料中心温度測定の再現性は良好で、照射履歴の影響は少ないことがわかった。一方、被覆管表面温度挙動や変形量は、DNBを越える発熱量での繰り返し照射の影響をかなり受けることがわかった。

繰り返し照射が破損しきい値におよぼす影響については明確な断定はできないが、その影響は少いと考えられる。

今後、本実験の結果をもとに、燃料温度挙動解析モデルの検証と、ギャップコンダクタンスおよび被覆管表面熱伝達率等の評価を行う予定である。

謝 辞

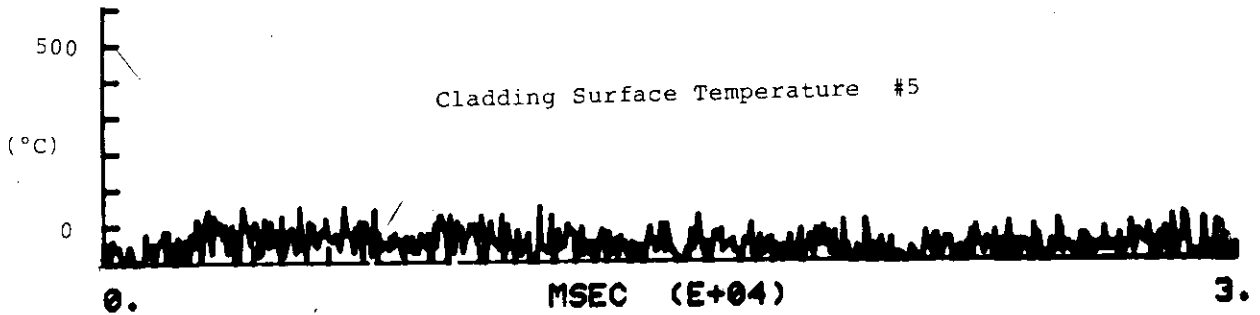
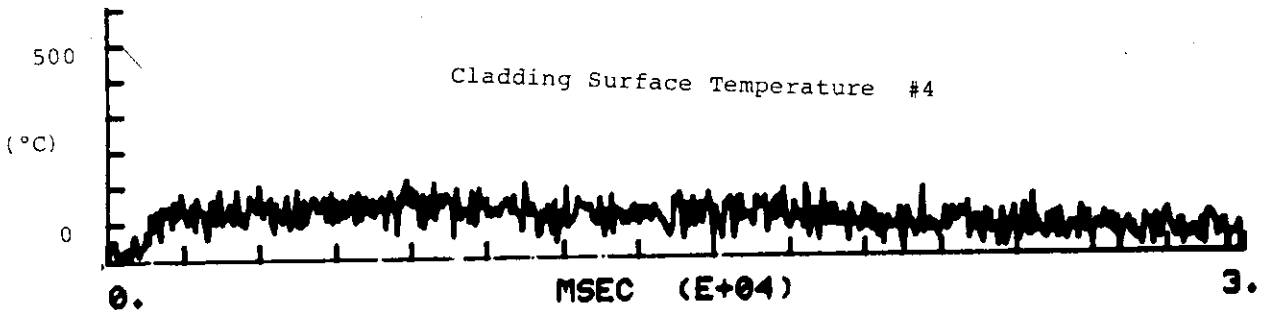
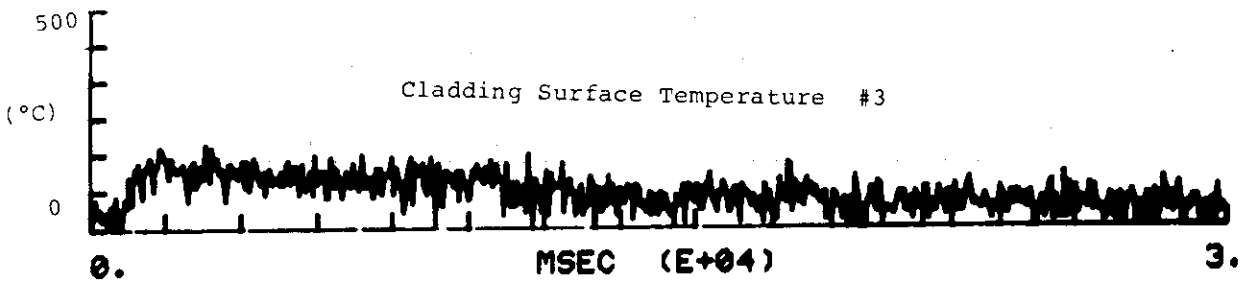
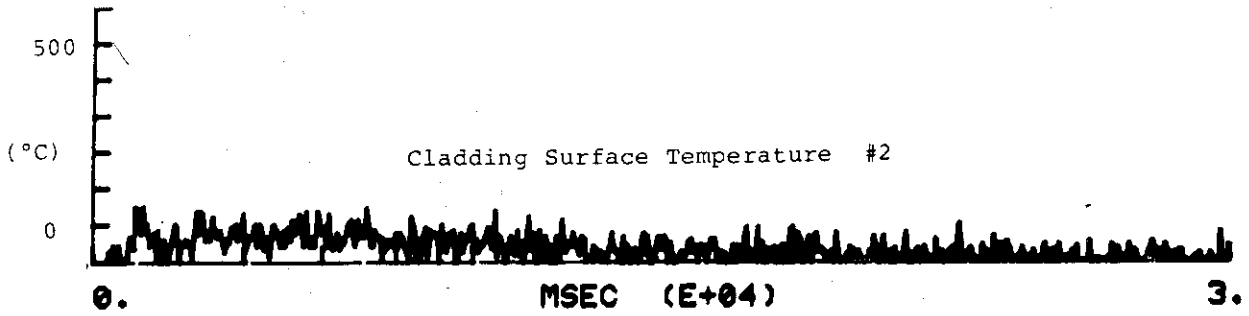
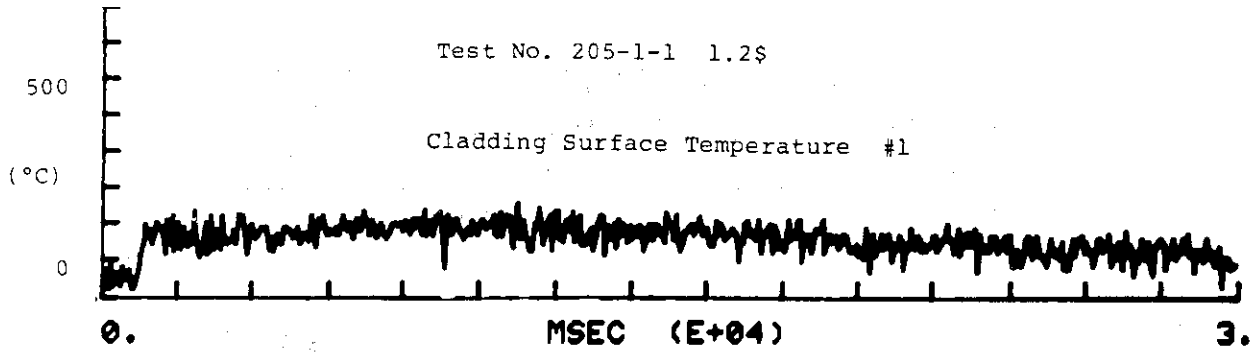
本実験を遂行し結果をまとめるにあたり、有意義な討論と助言をいただいた石川迪夫反応度安全研究室長他、同研究室員の方々、および実験を担当していただいたNSRR管理室の方々に感謝いたします。

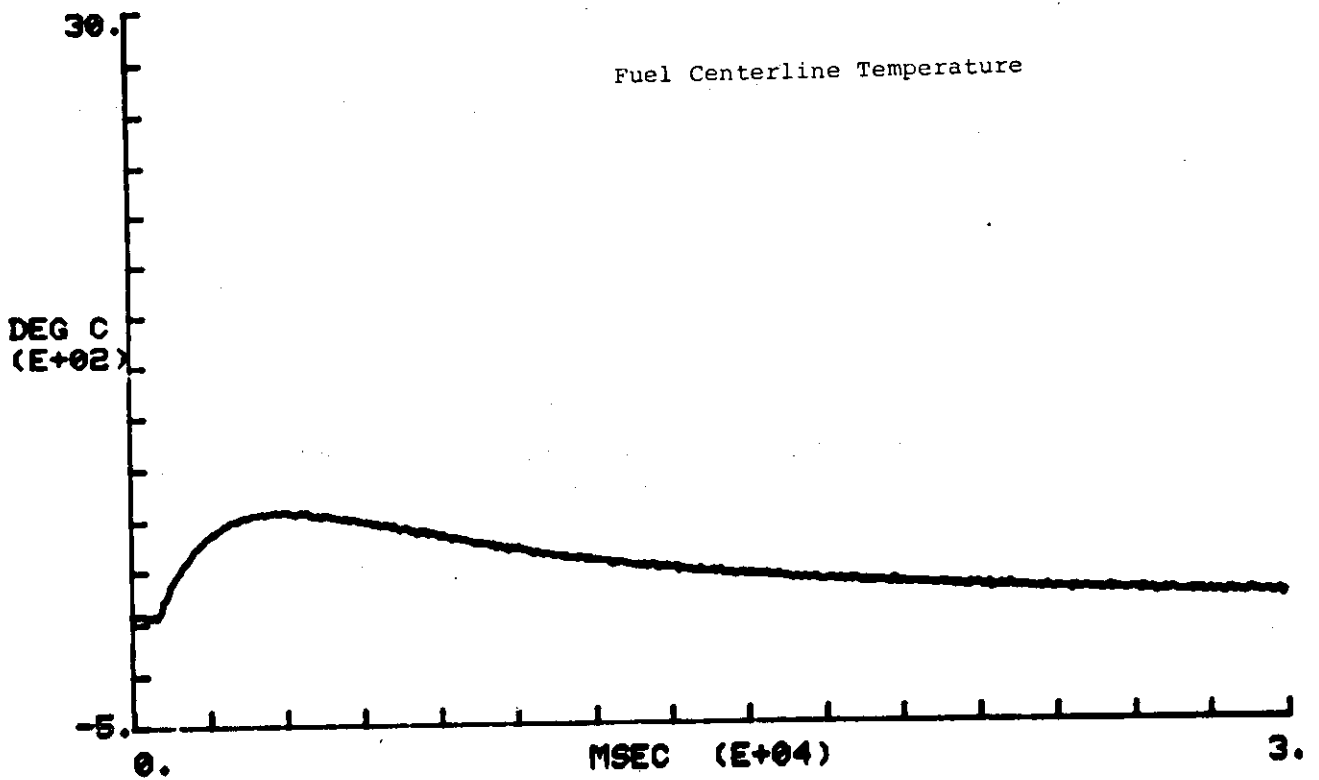
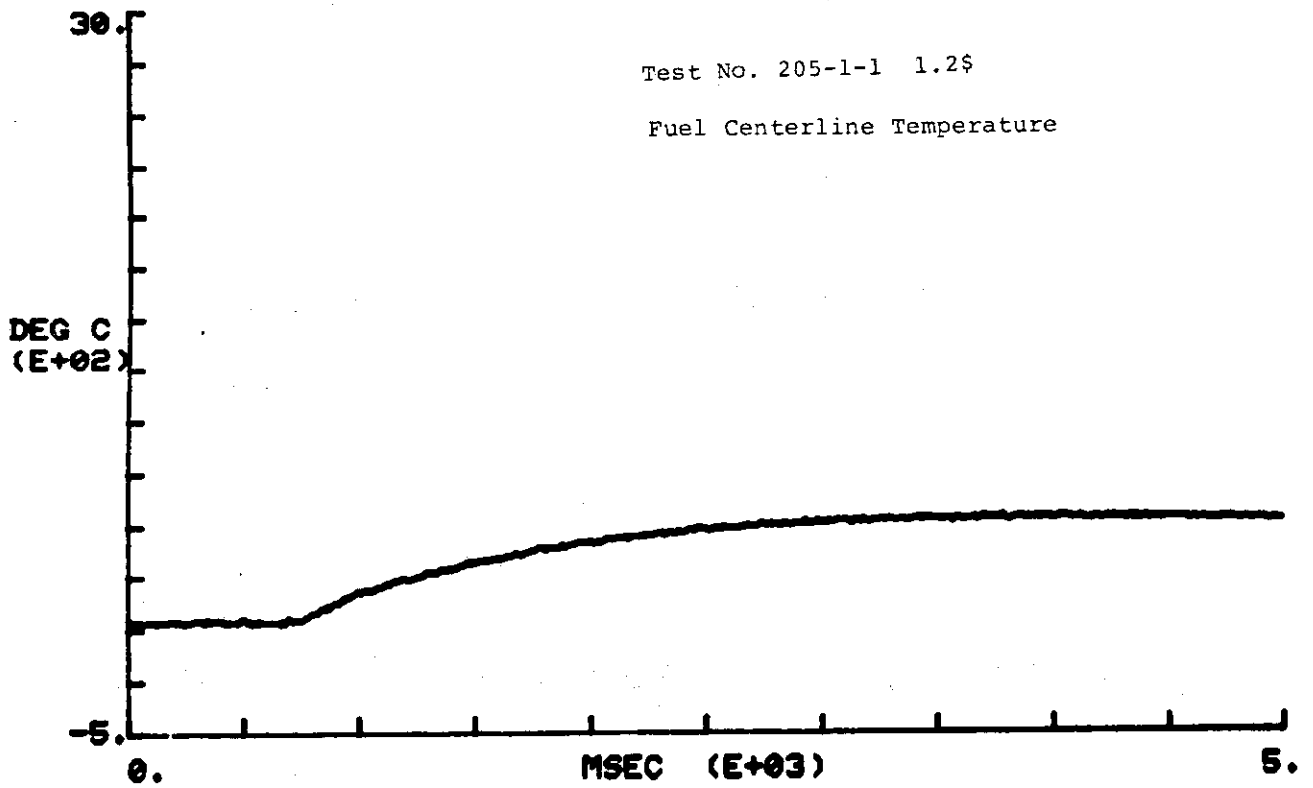
参 考 文 献

- (1) 星蔦雄, 中本香一郎 “熱電対の応答特性の研究”, N241 71-56, 昭和46年12月
- (2) P.E. MacDonald, L.B. Thompson “MATPRO A Handbook of Materials Properties for Use in the Analysis of Light Water Reactor Fuel Rod Behavior”, ANCR-1263, 1976
- (3) “NSRR実験プログレスレポート・2”, JAERI-M 6790, 1976年11月
- (4) “NSRR実験プログレスレポート・1”, JAERI-M 6635, 1976年7月
- (5) 塩沢周策 “NSRR実験における標準燃料の振舞いに関する一考察”, JAERI-M 7267, 1977年9月
- (6) “NSRR実験プログレスレポート・4”, JAERI-M 7304, 1977年10月
- (7) 大西信秋他 “NSRR実験における試験燃料の発熱量の評価”, JAERI-M 7539, 1978年2月
- (8) 星蔦雄他 “燃料のび測定実験” 近刊予定

付録 実験データ

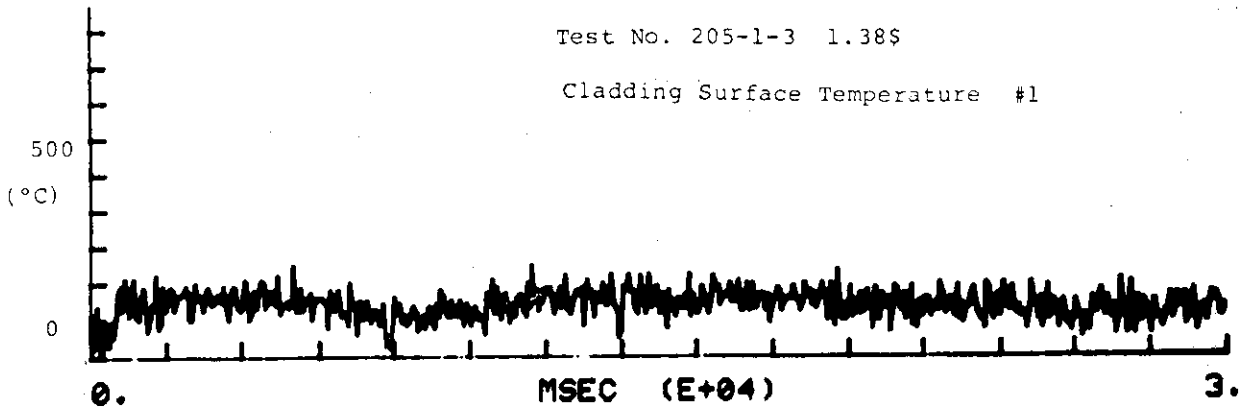
Run No	Reactivity (%)	Energy Deposition (cal/g·UO ₂)	Data page
205-1-1	1.2	36	32
-2	1.2	36	—
-3	1.38	70	34
-4	2.04	148	36
-5	2.5	209	39
-6	2.65	231	42
205-2-1	2.04	151	45
-2	2.04	154	50
-3	2.04	155	53
-4	2.65	234	56
205-5-1	2.04	147	61
-2	2.28	177	66
-3	2.5	208	71
4	2.7	228	76
-5	2.9	242	81



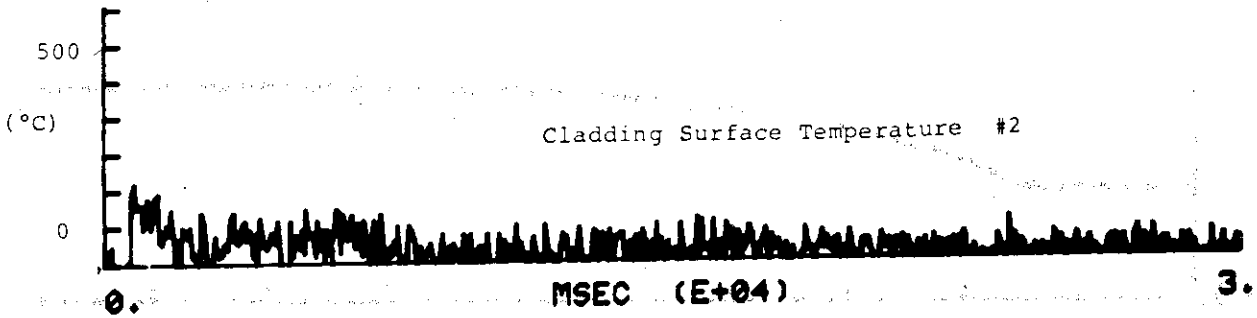


Test No. 205-1-3 1.38\$

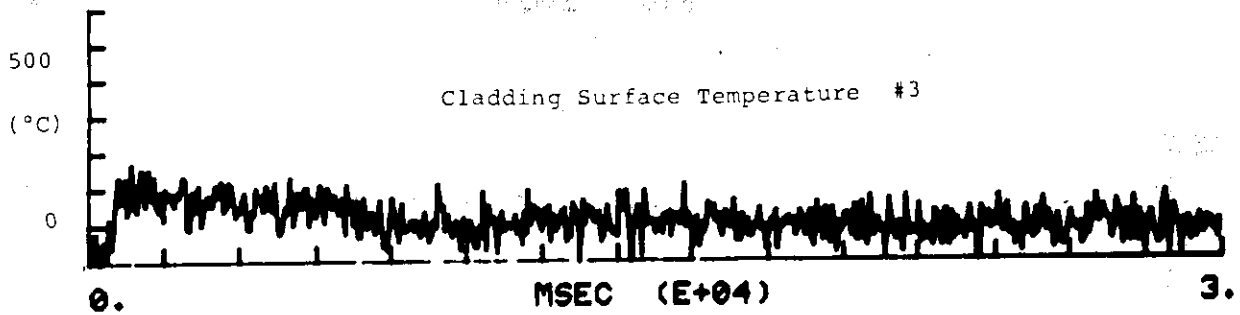
Cladding Surface Temperature #1



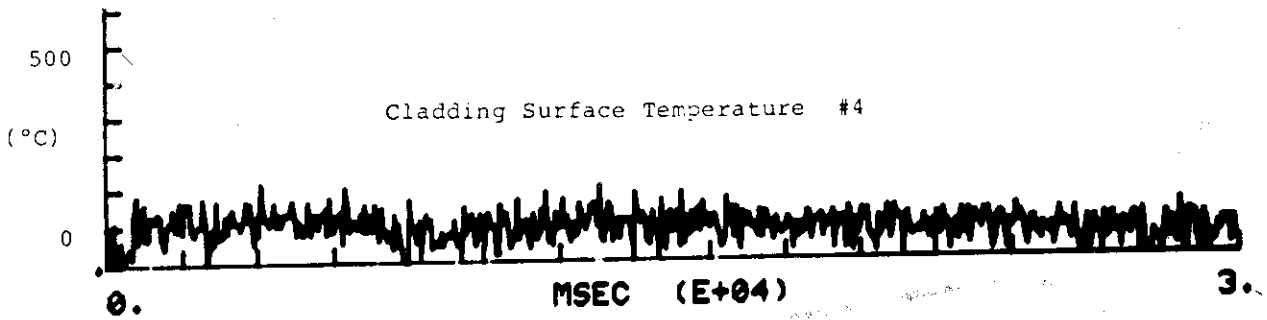
Cladding Surface Temperature #2



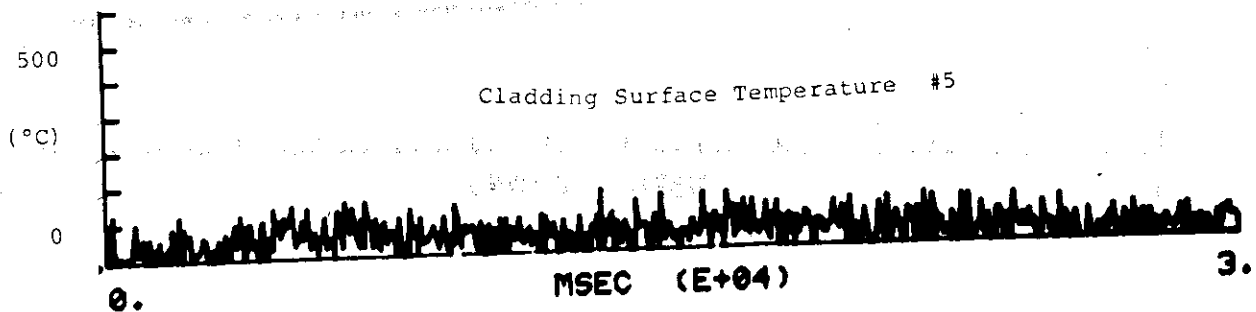
Cladding Surface Temperature #3

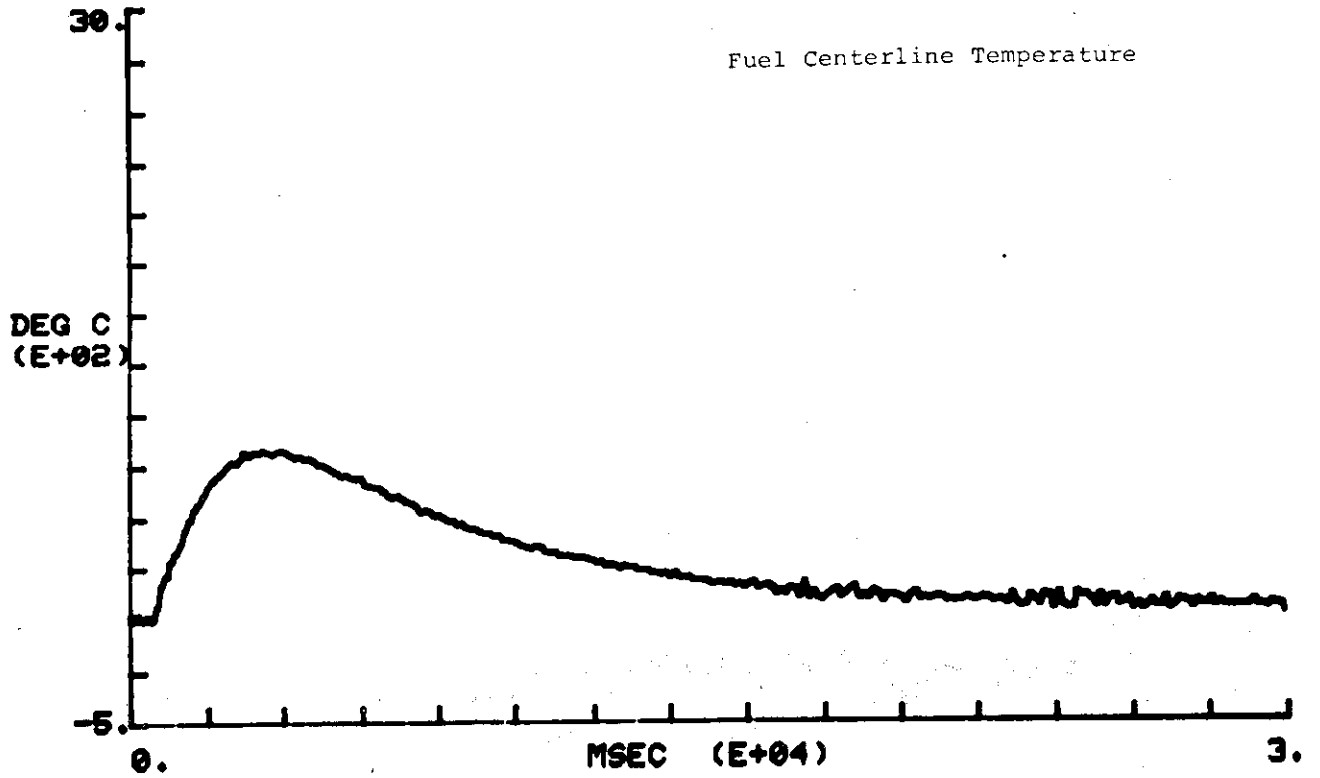
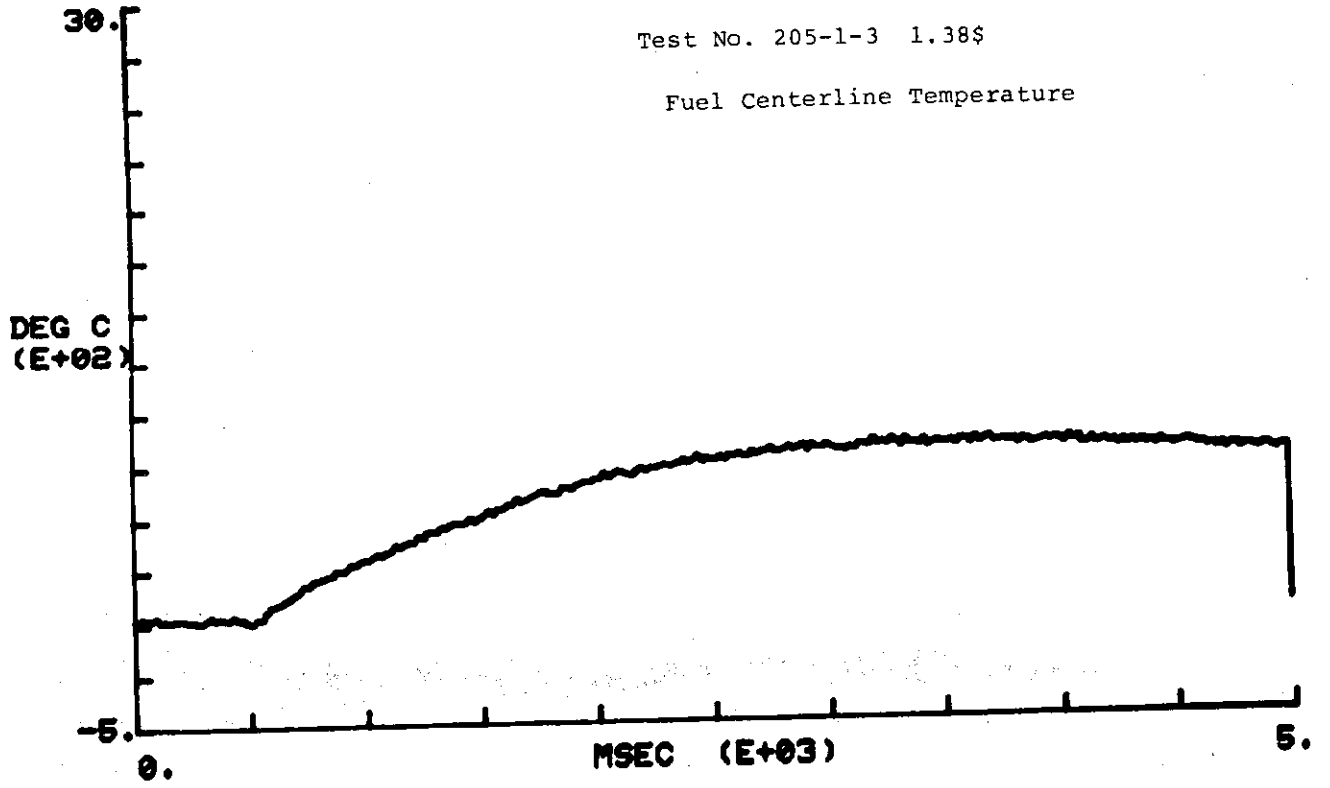


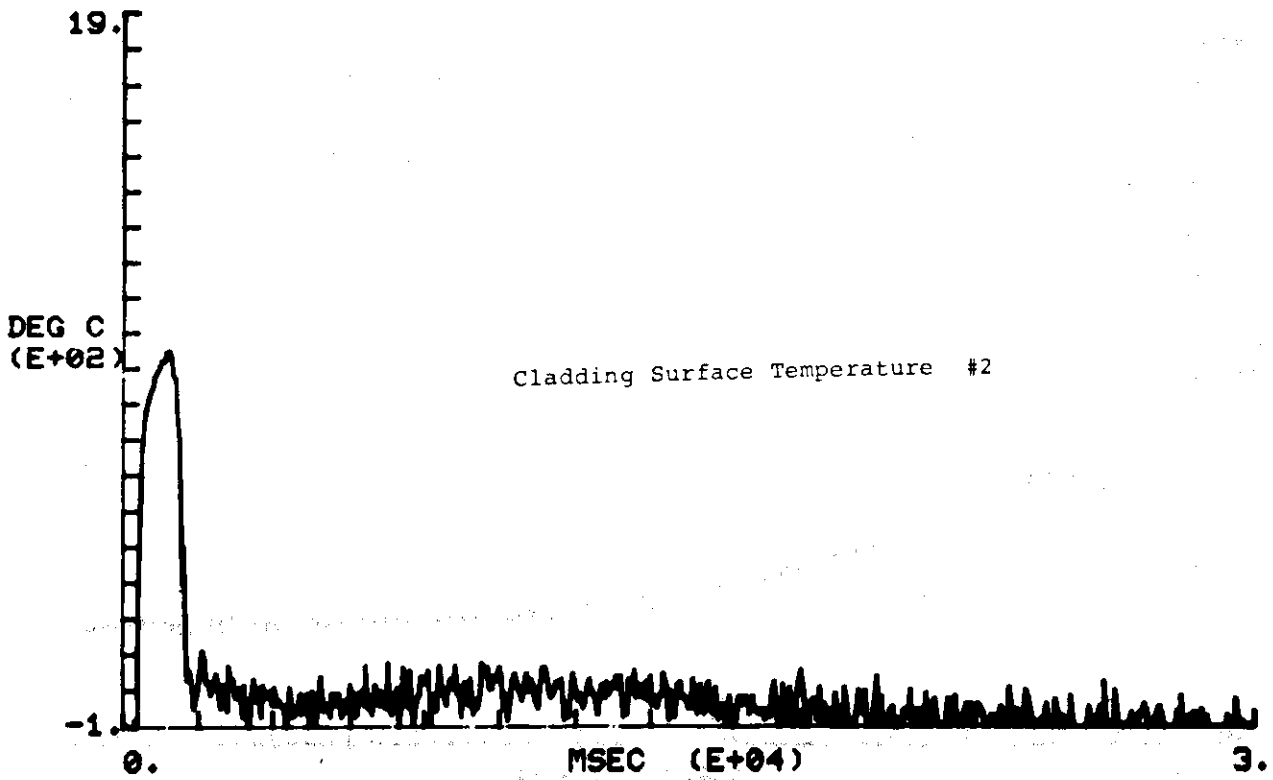
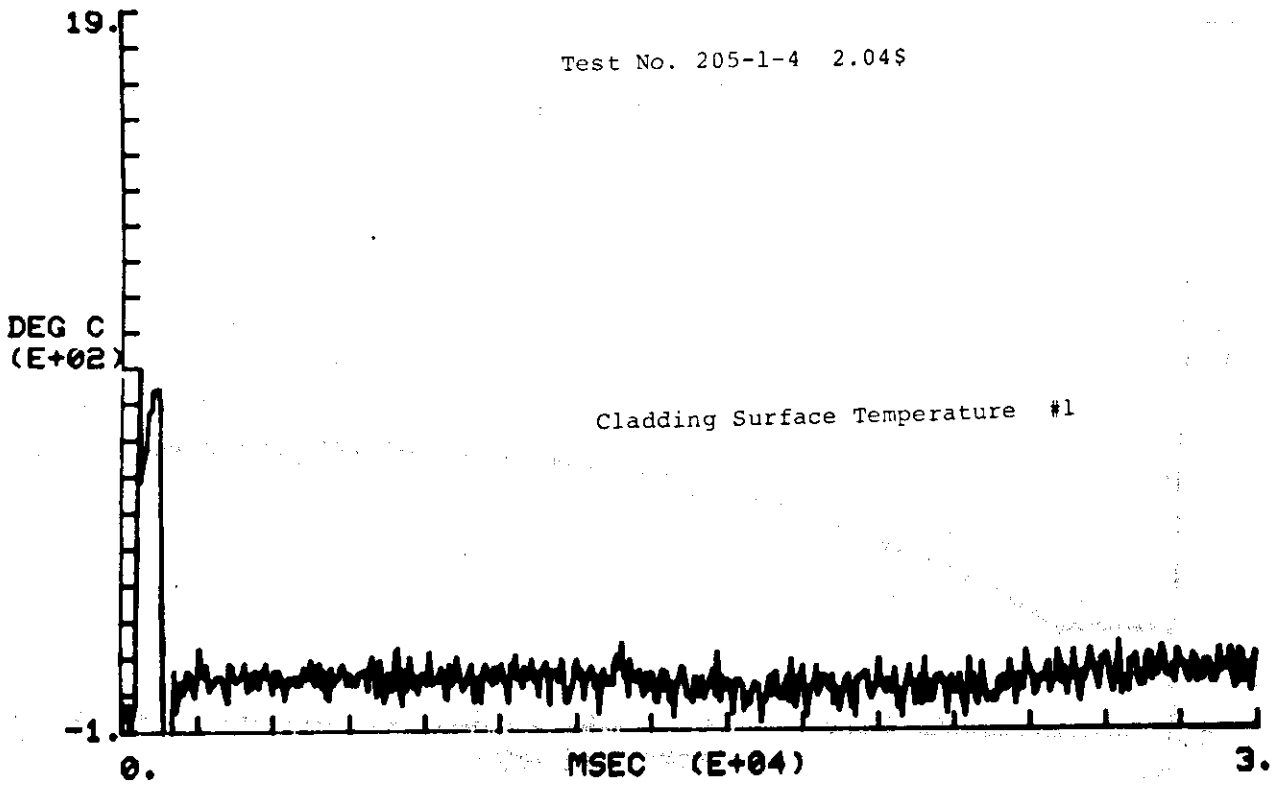
Cladding Surface Temperature #4



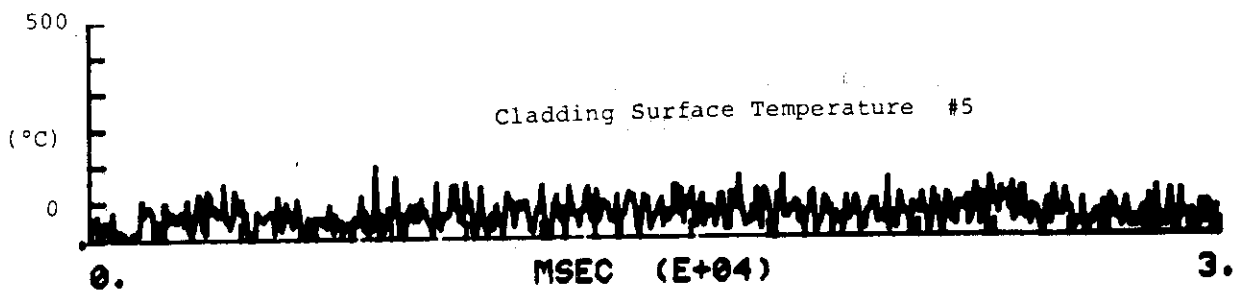
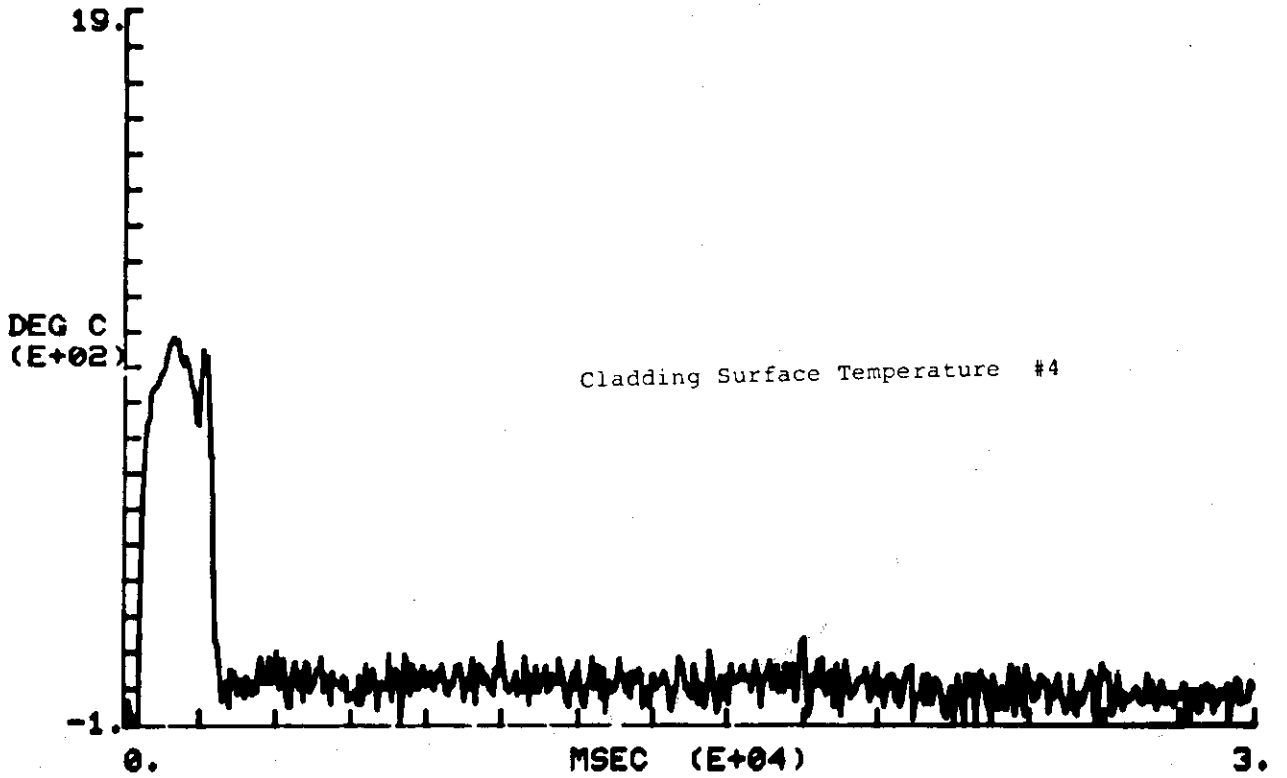
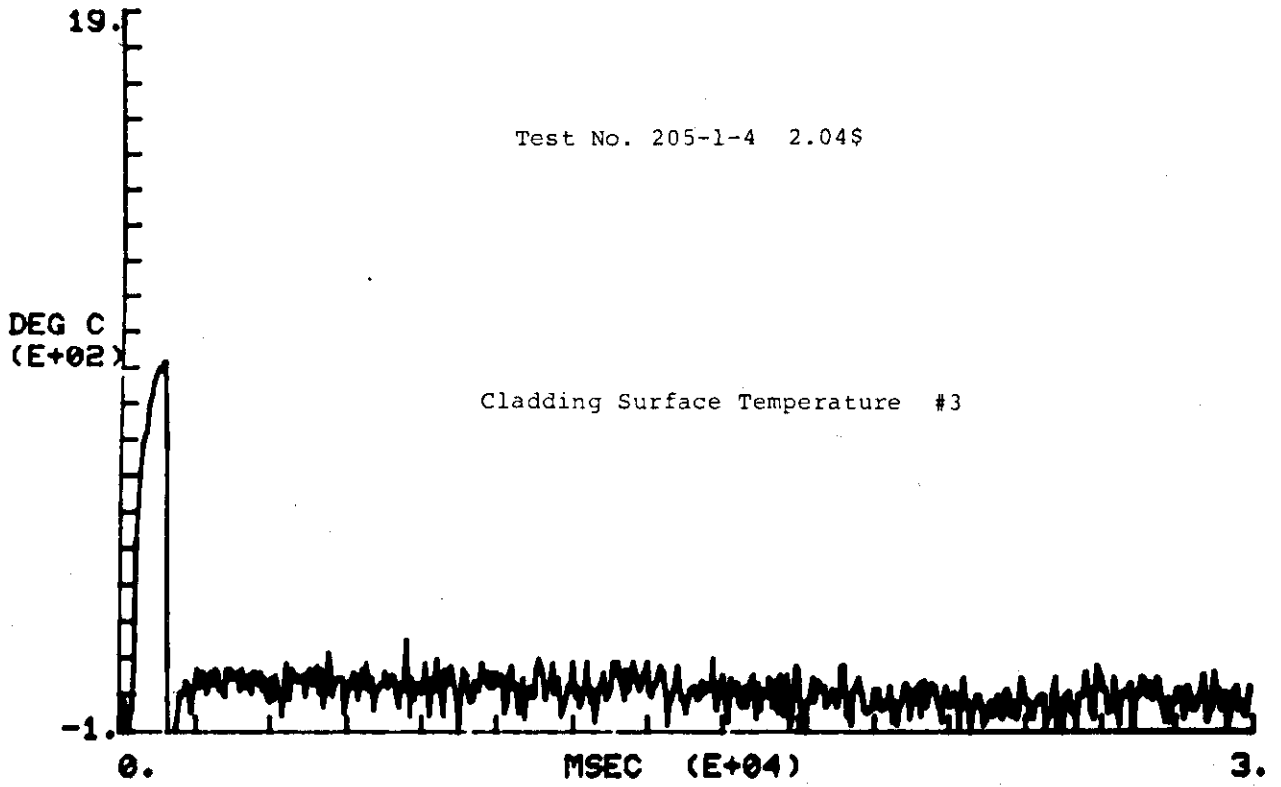
Cladding Surface Temperature #5

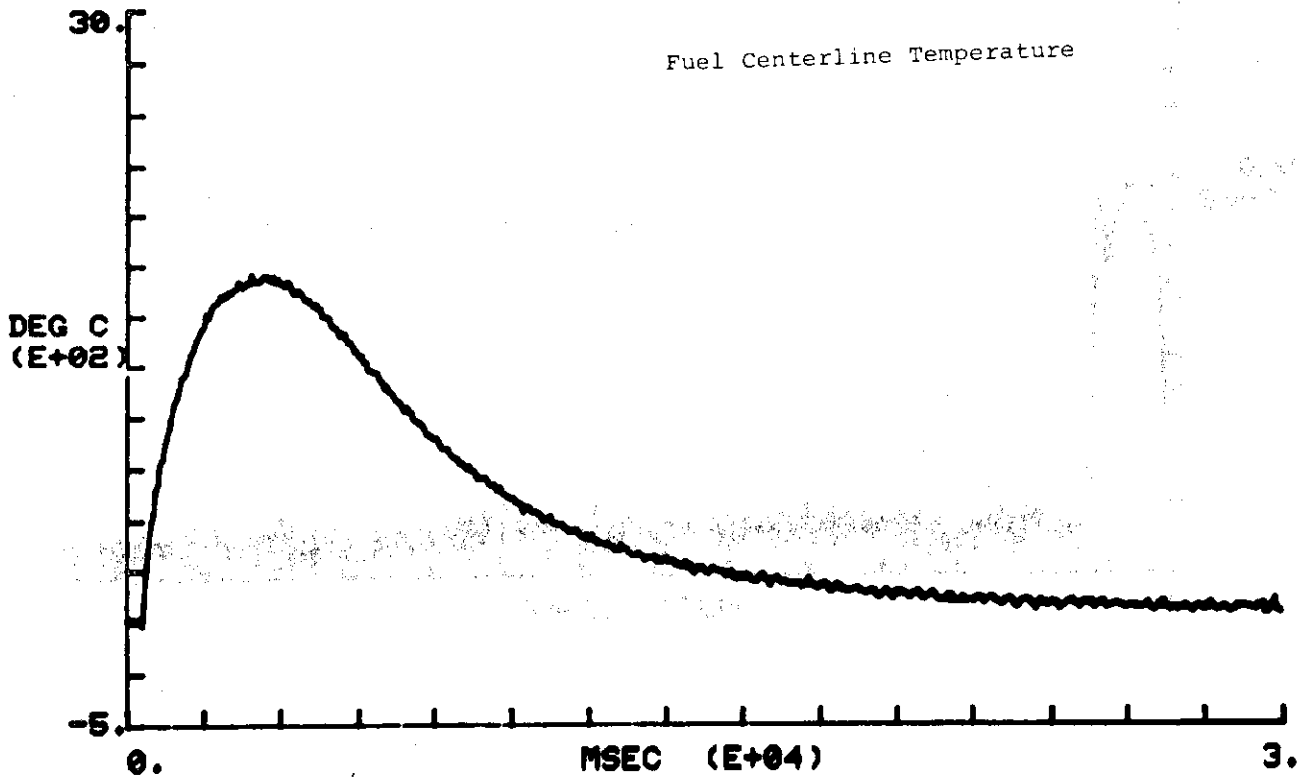
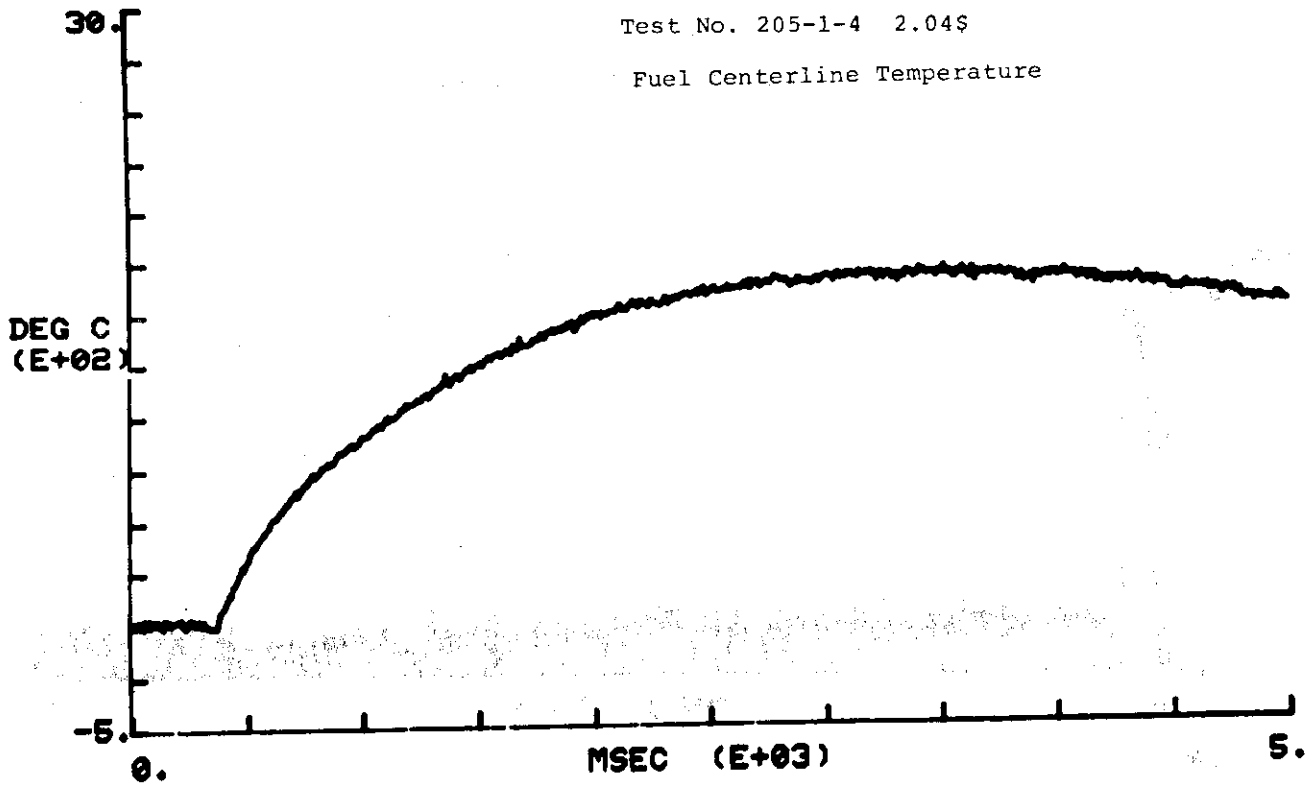


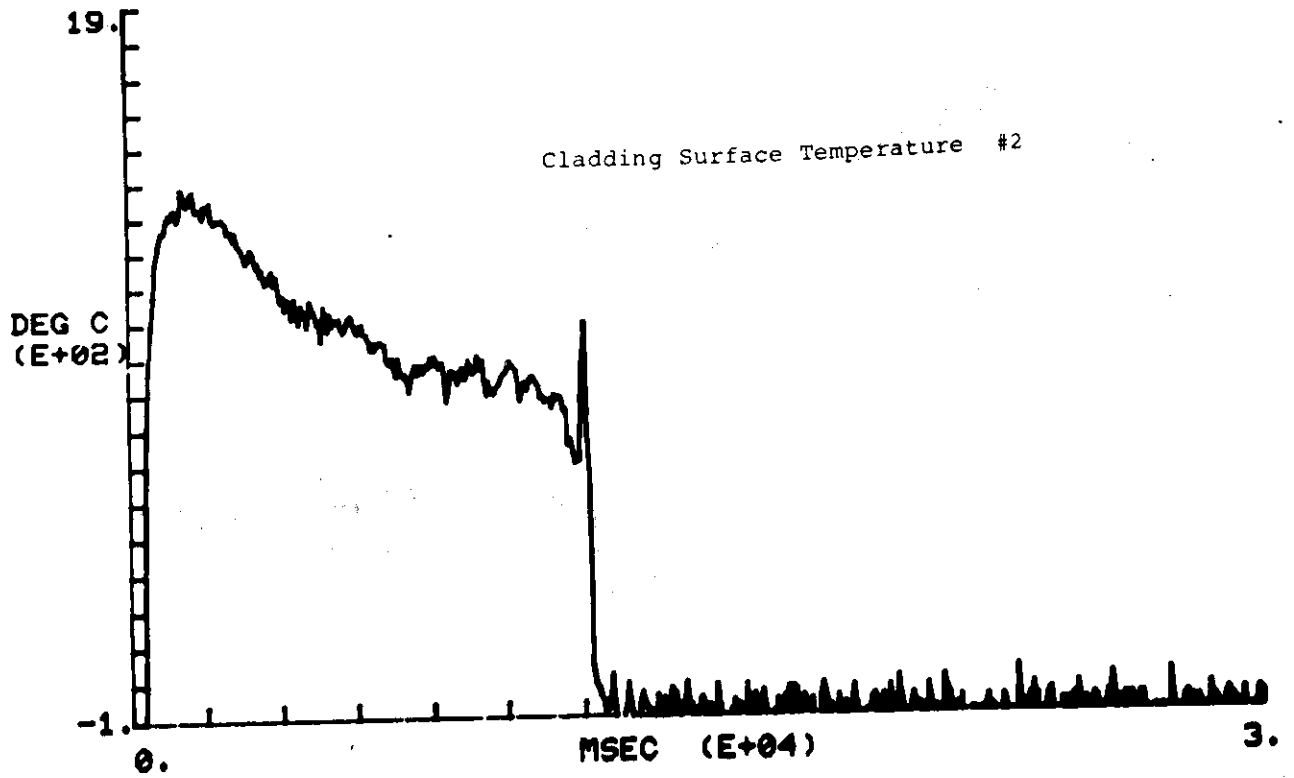
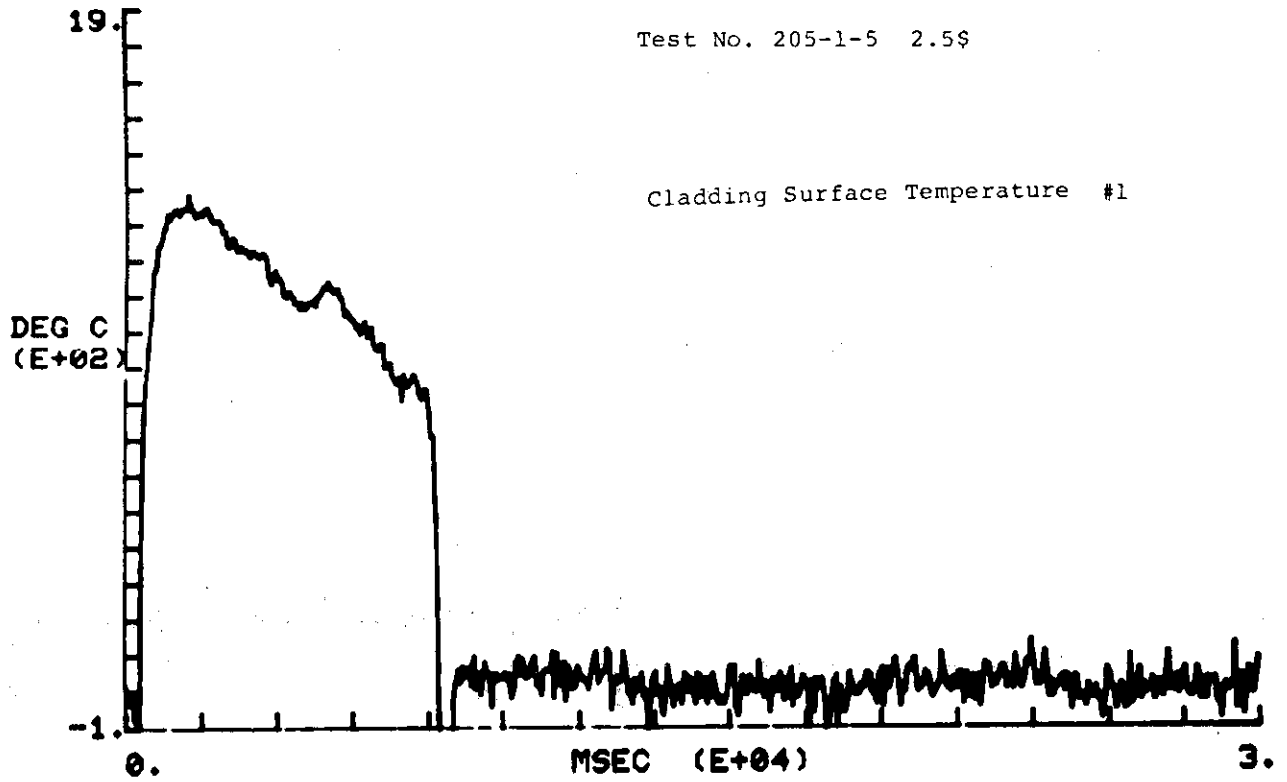


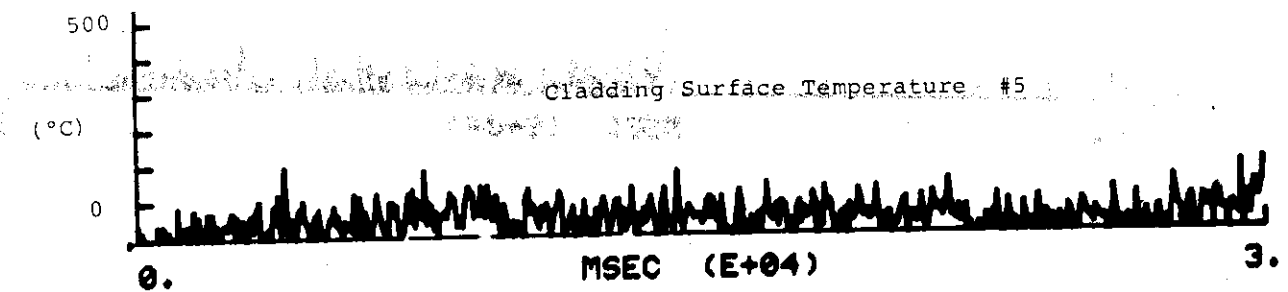
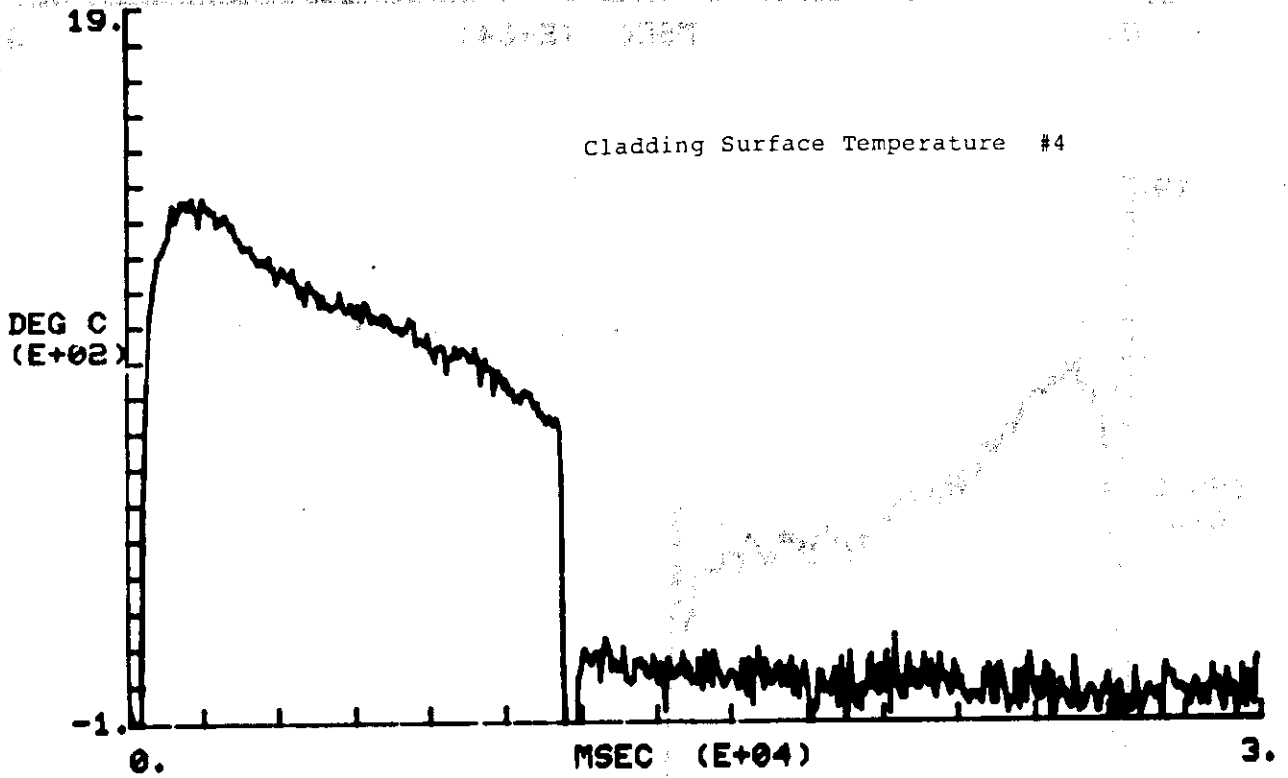
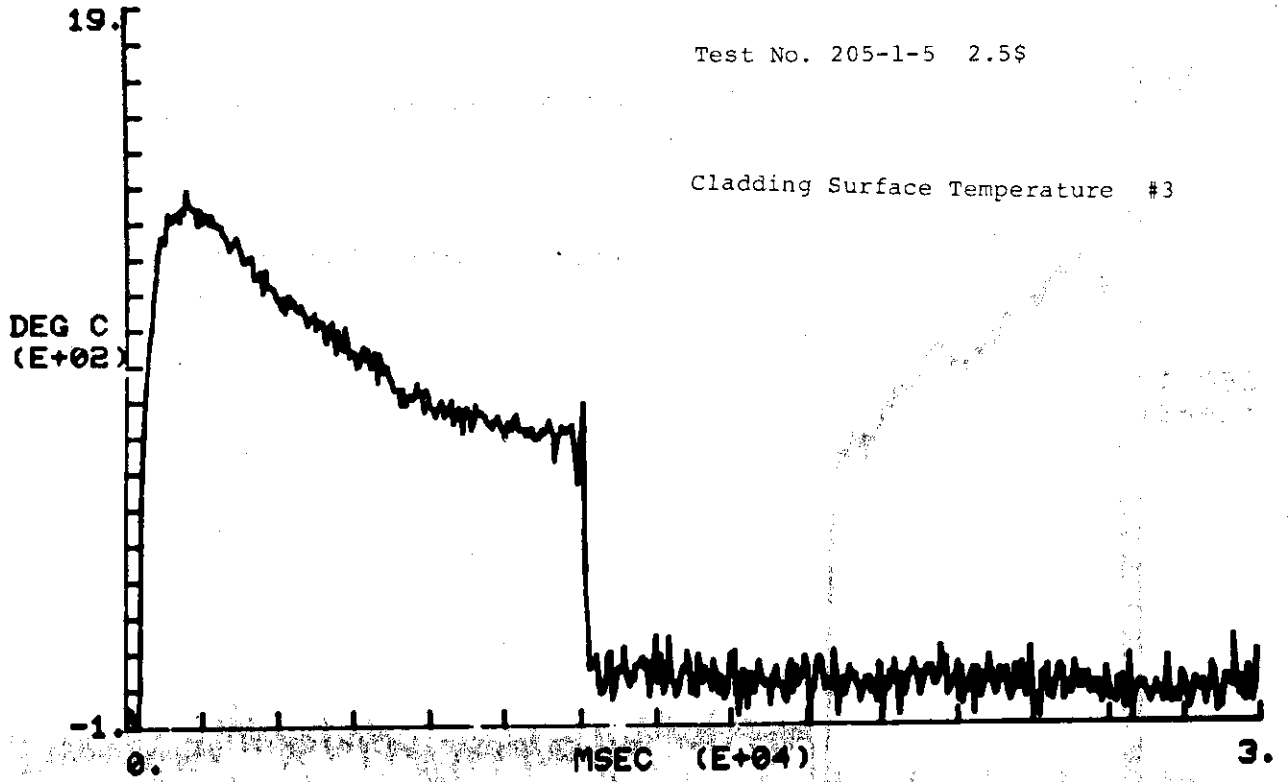


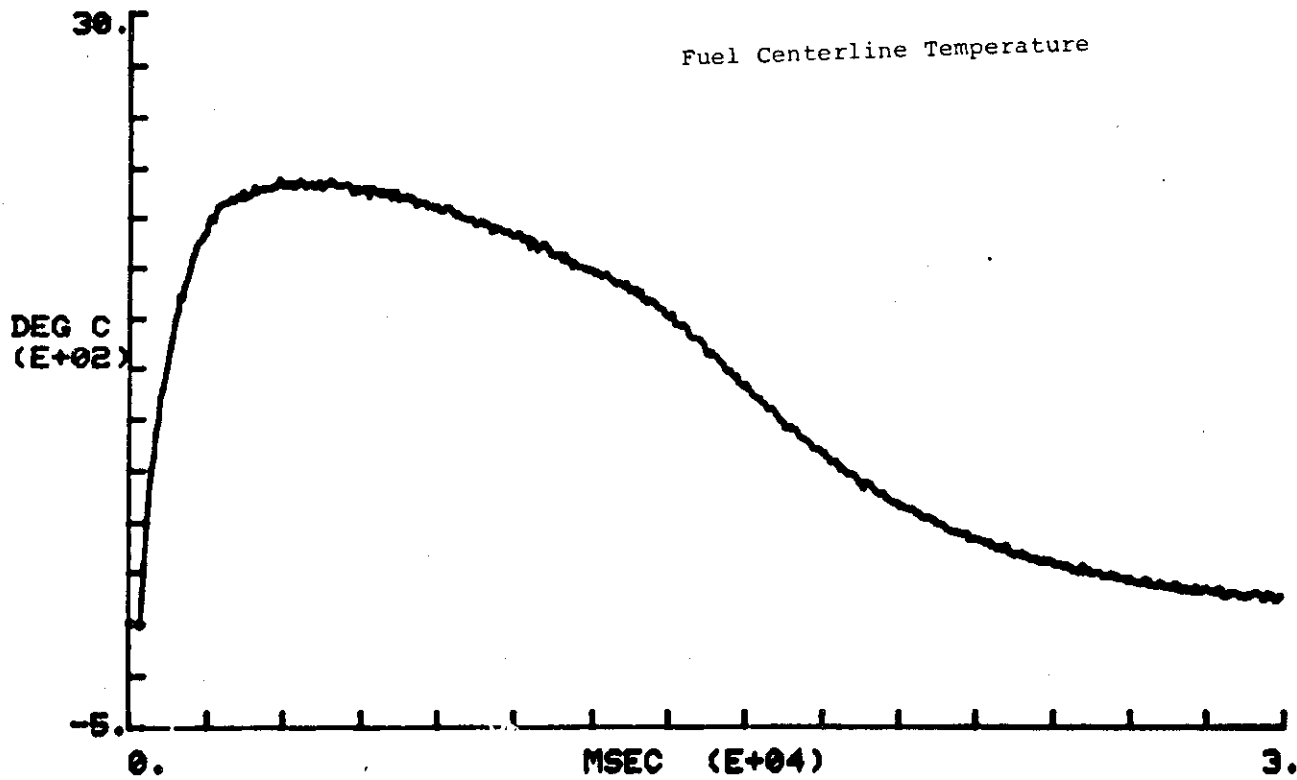
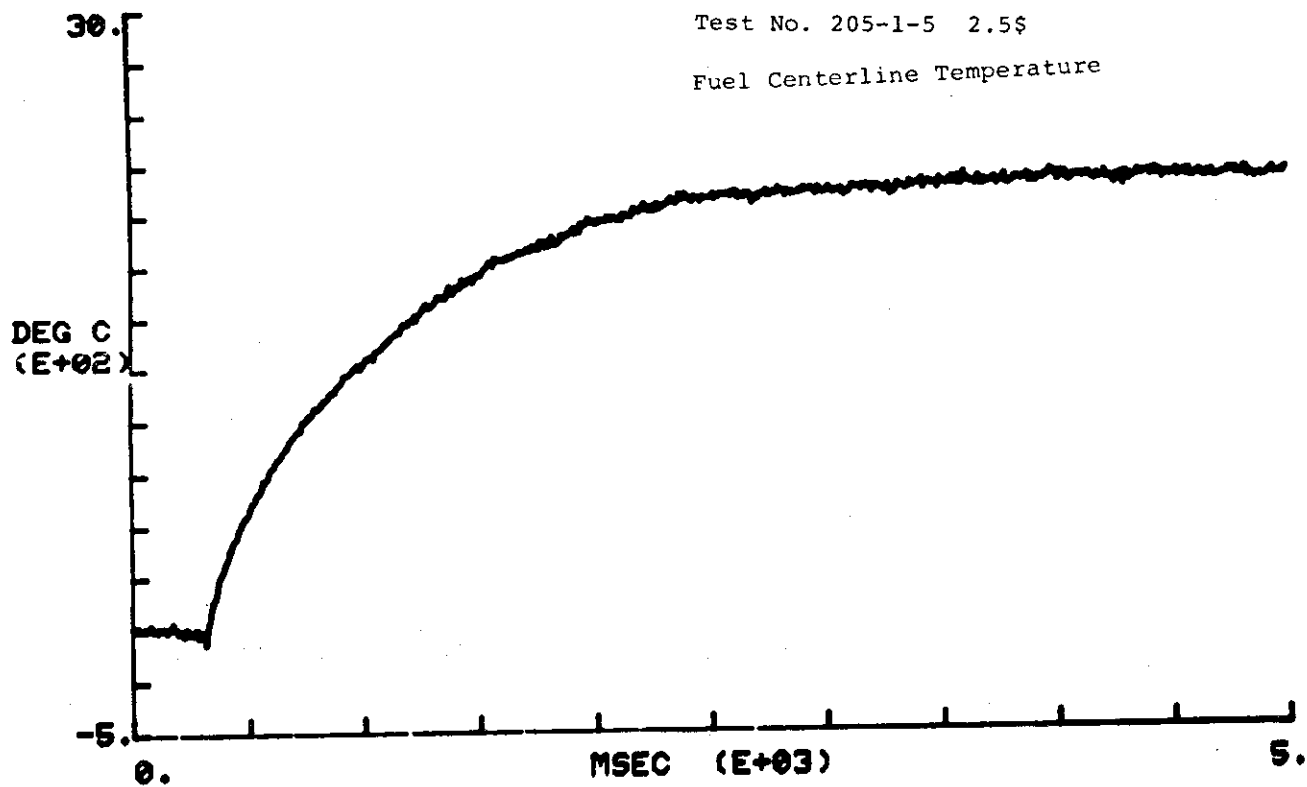
Test No. 205-1-4 2.04\$



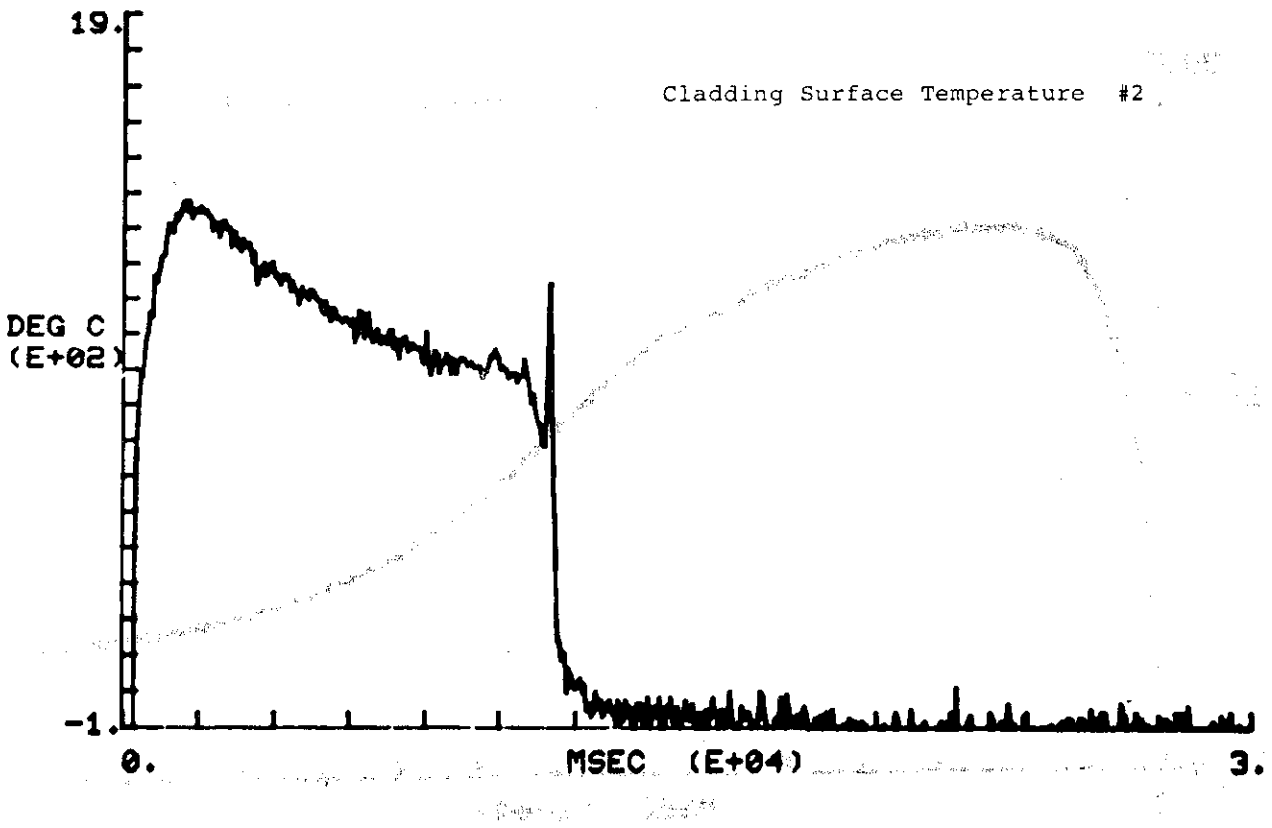
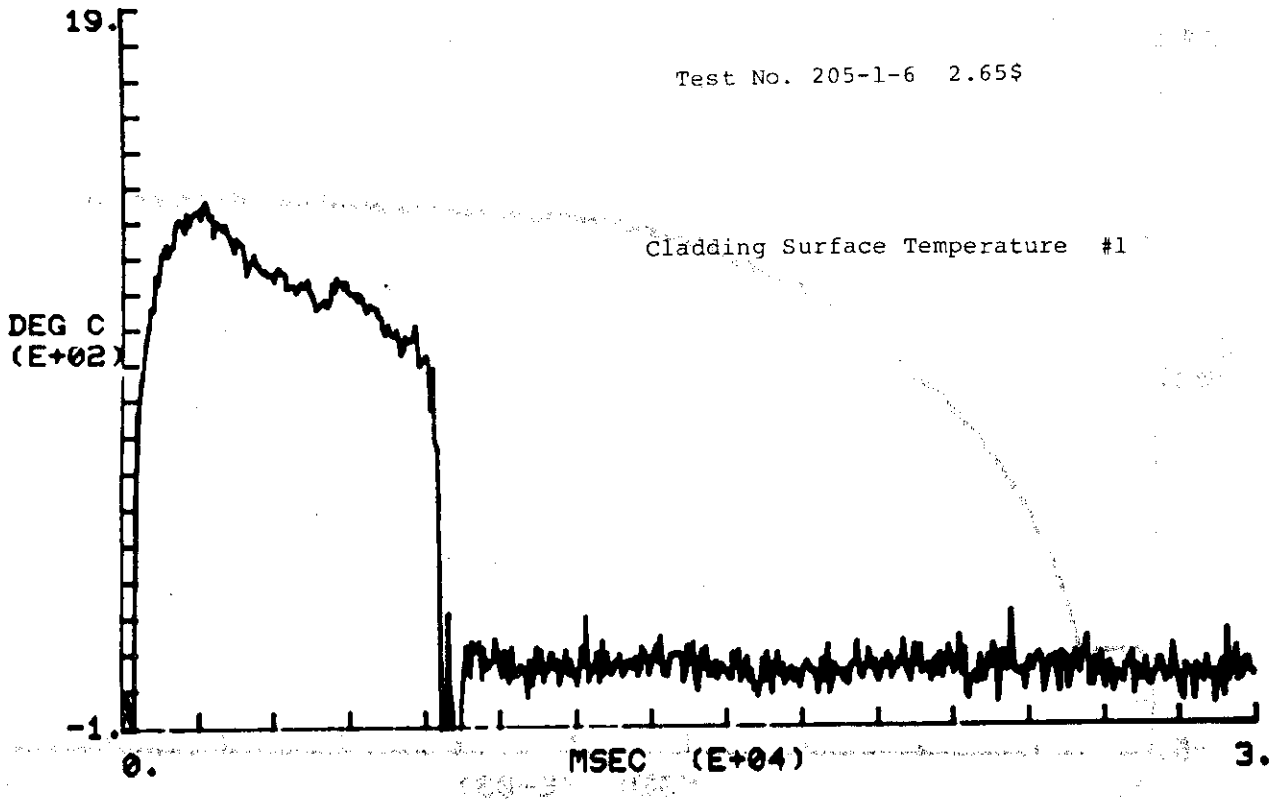




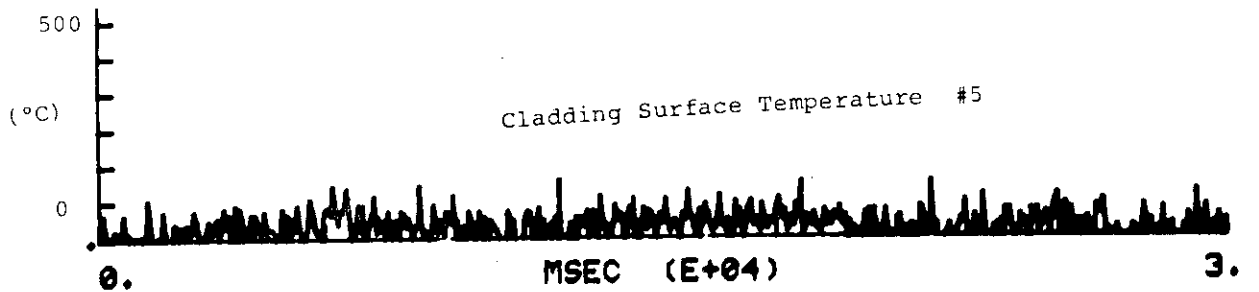
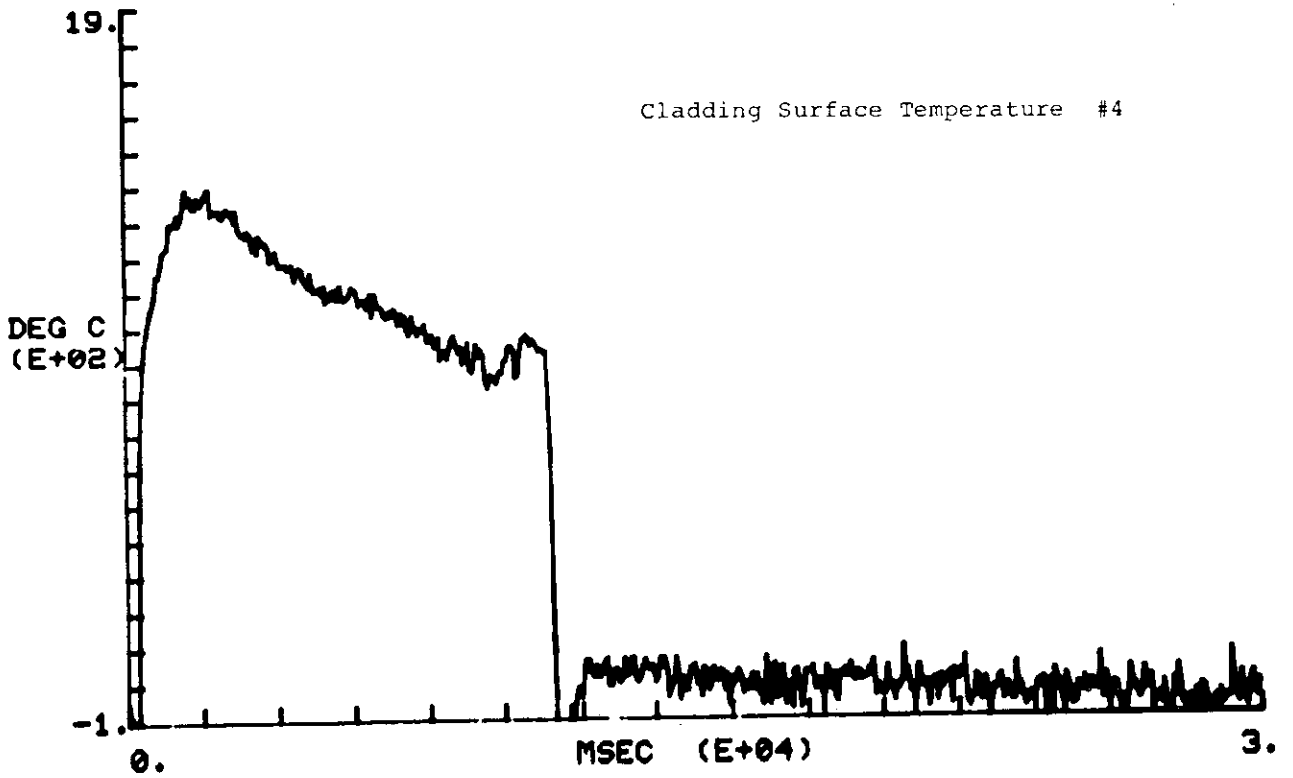
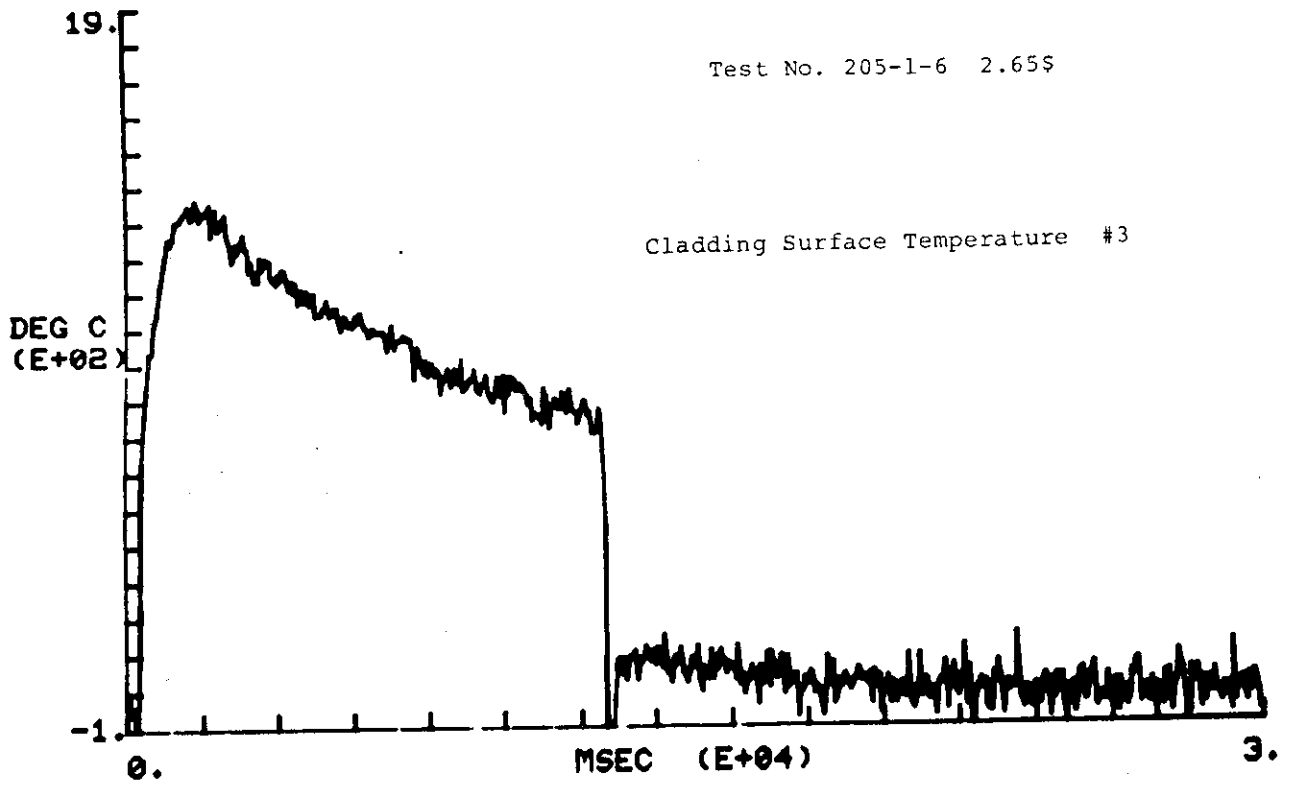


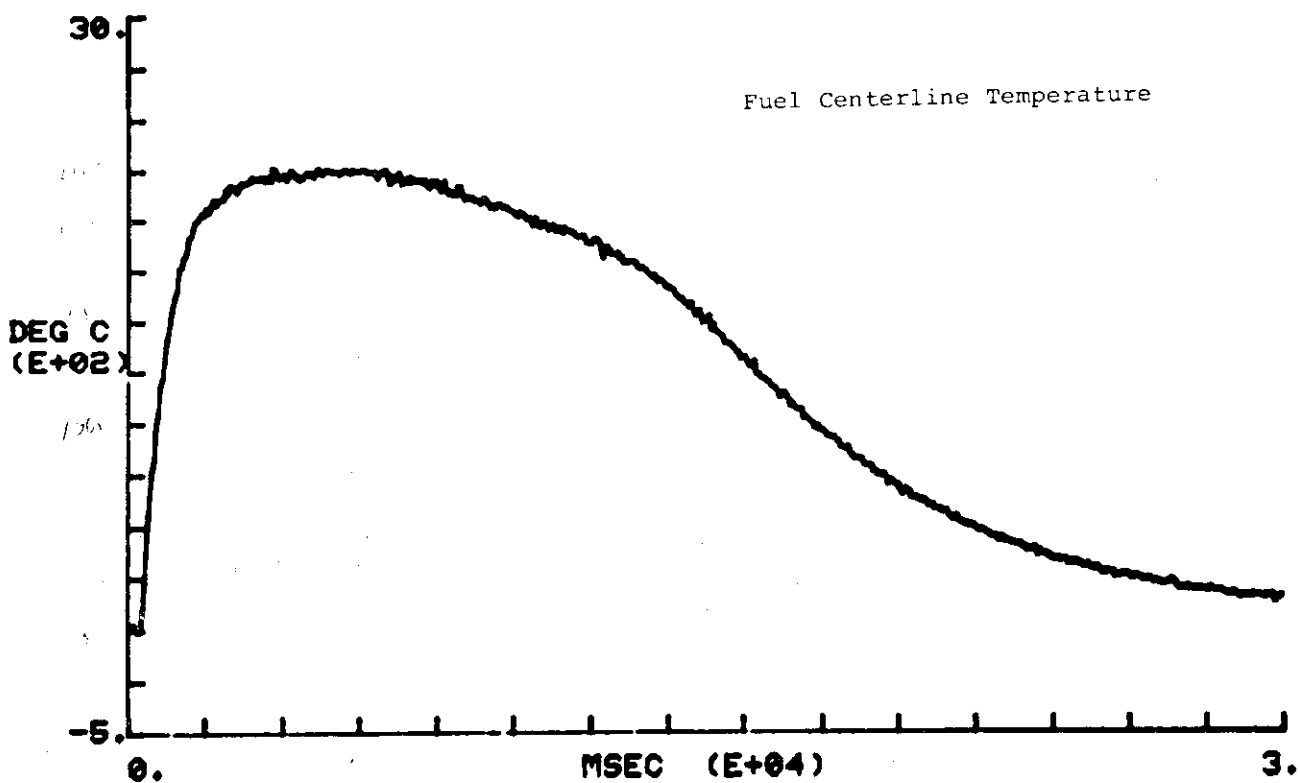
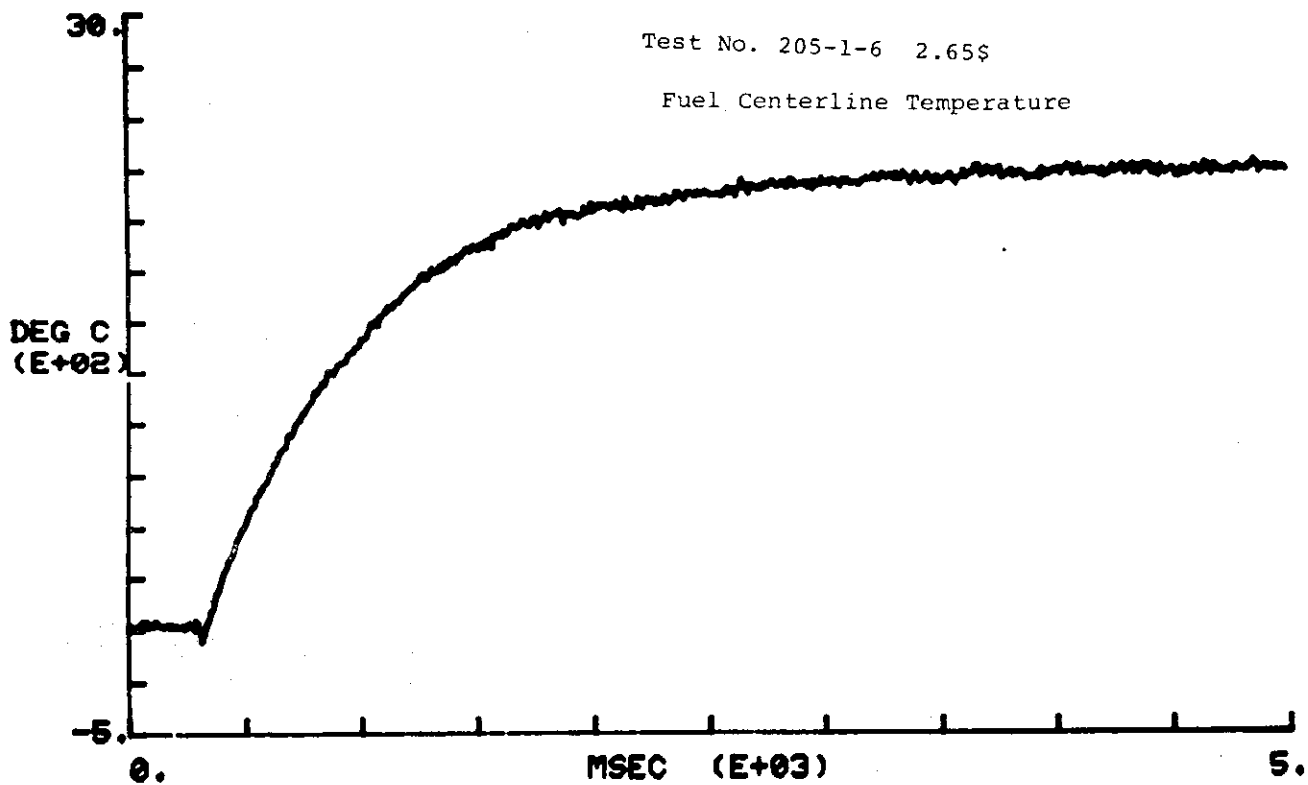


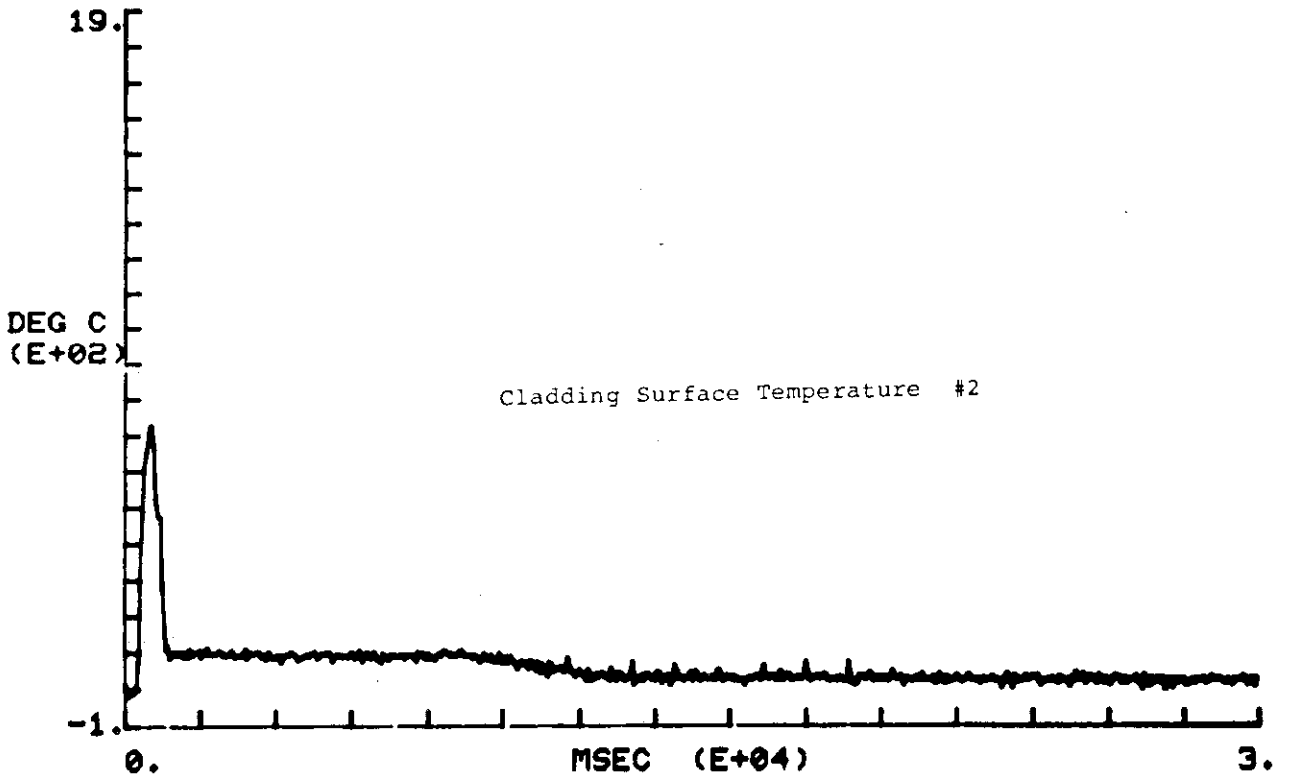
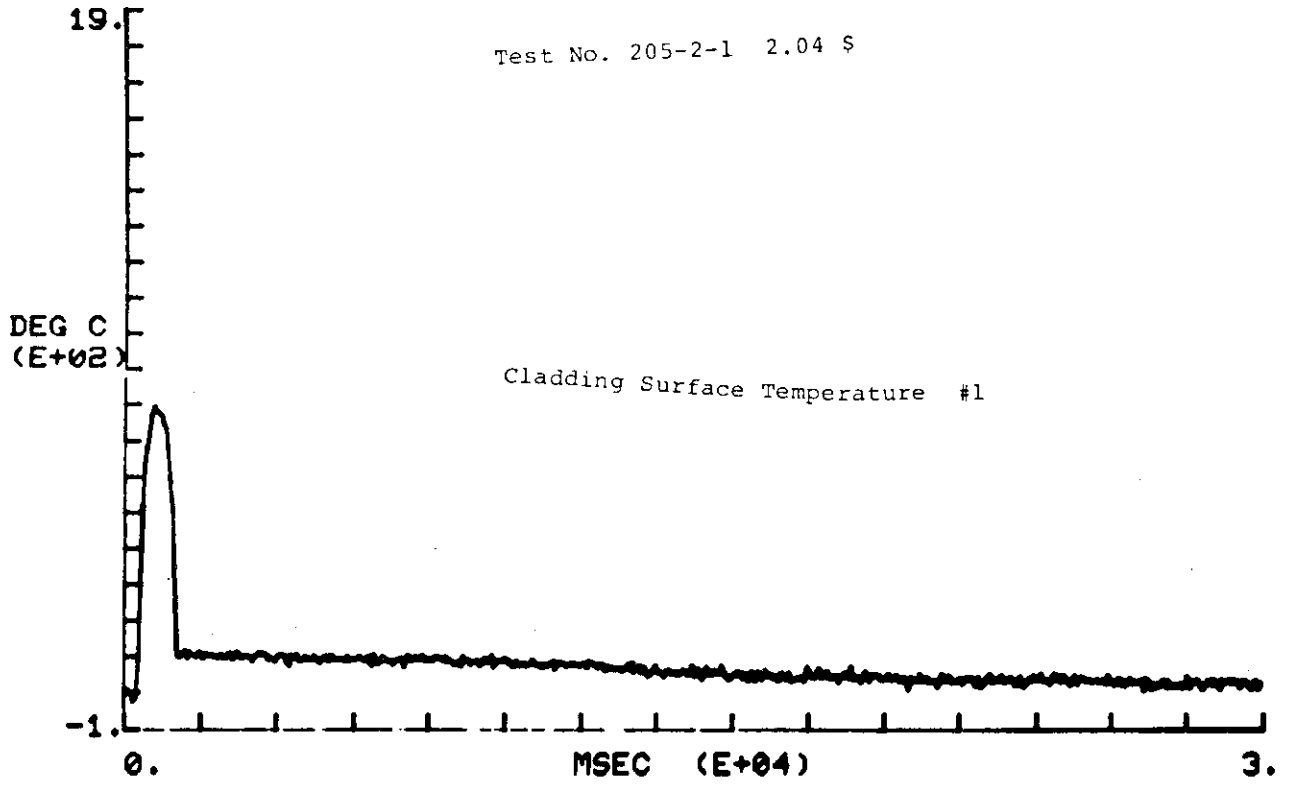
Test No. 205-1-6 2.65\$

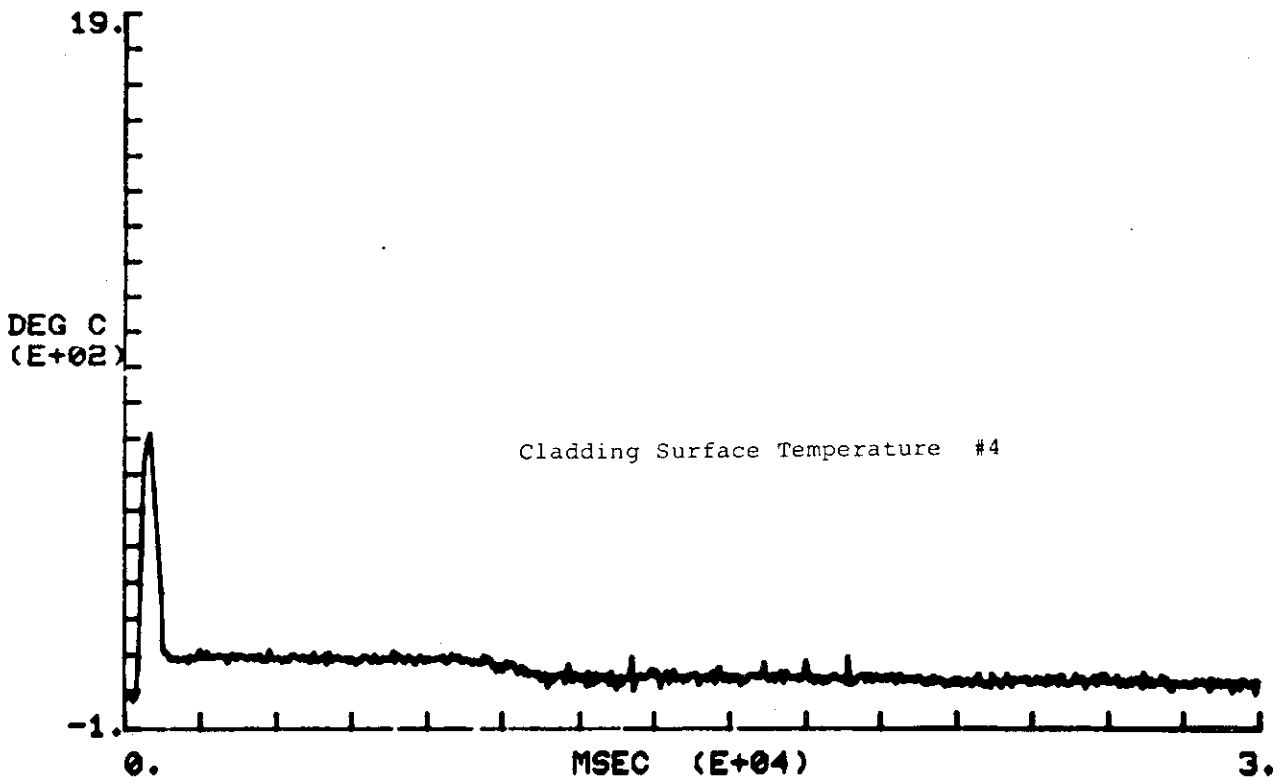
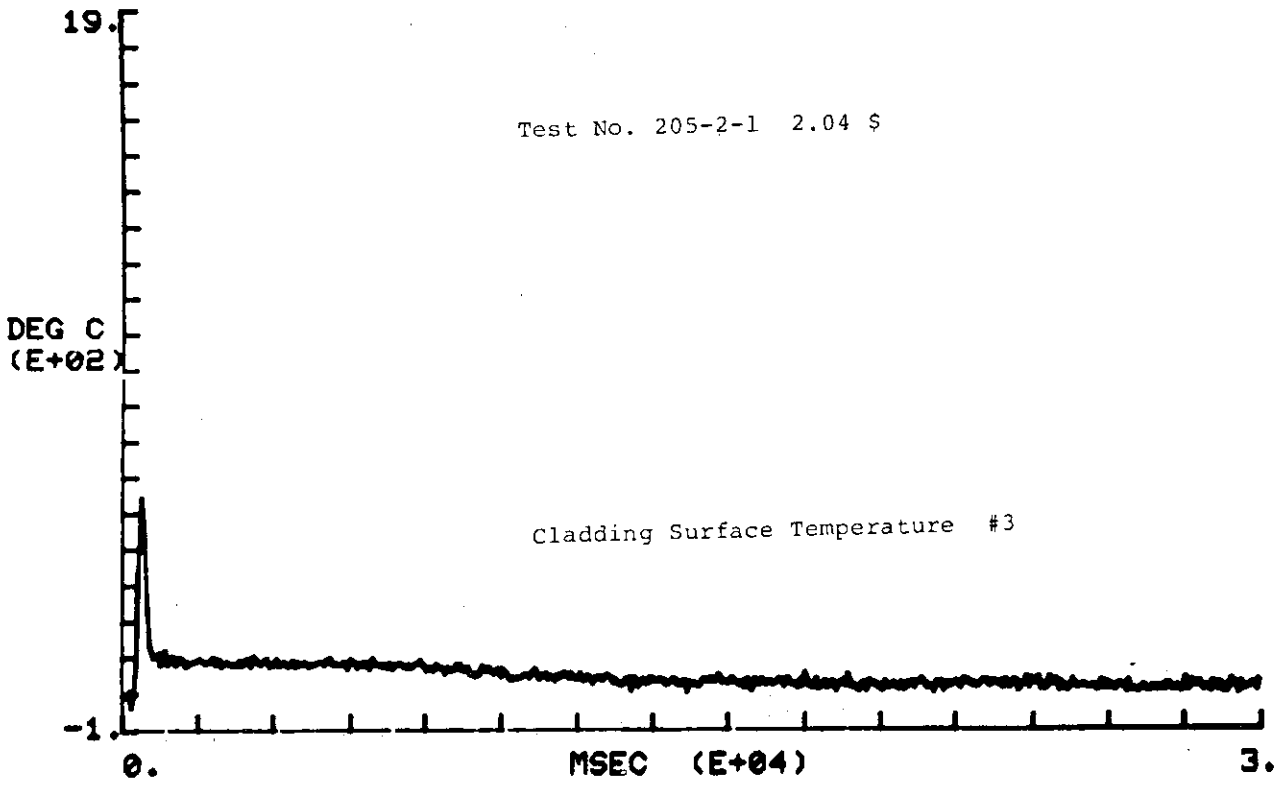


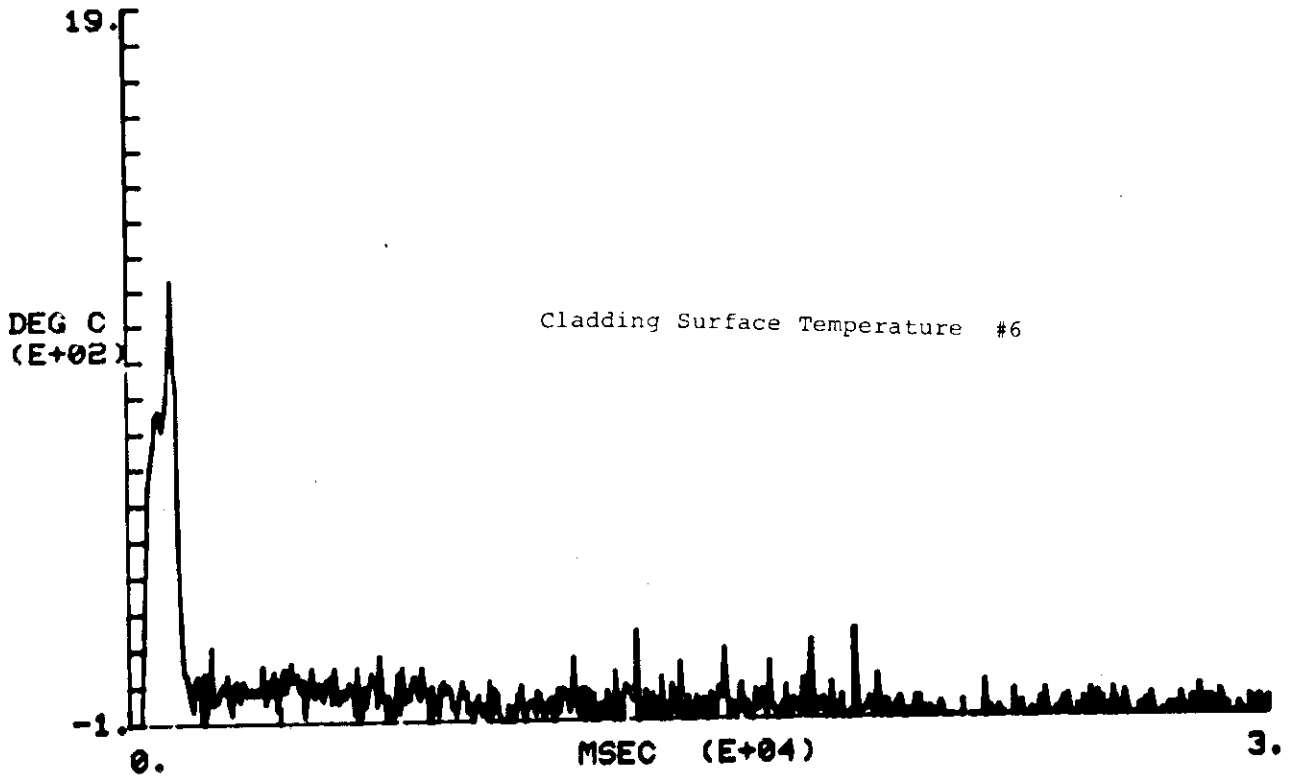
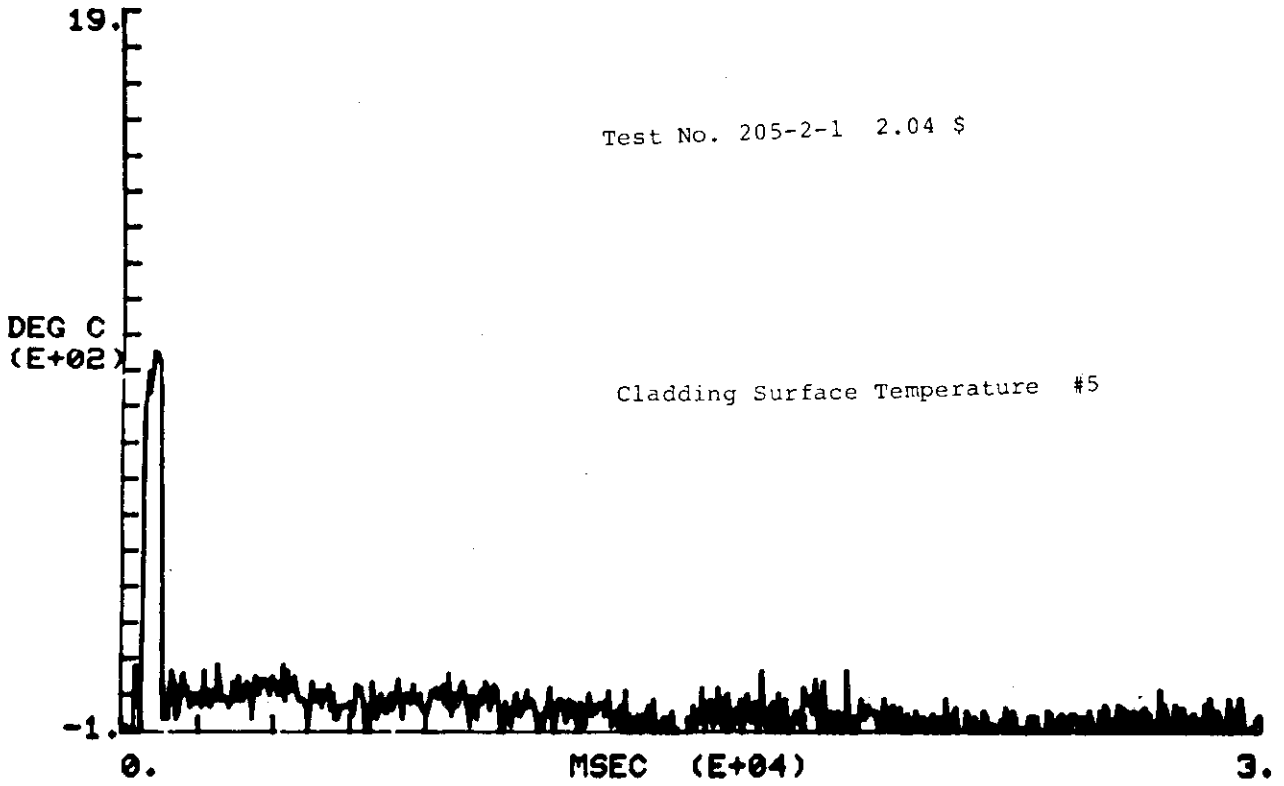
Test No. 205-1-6 2.65S

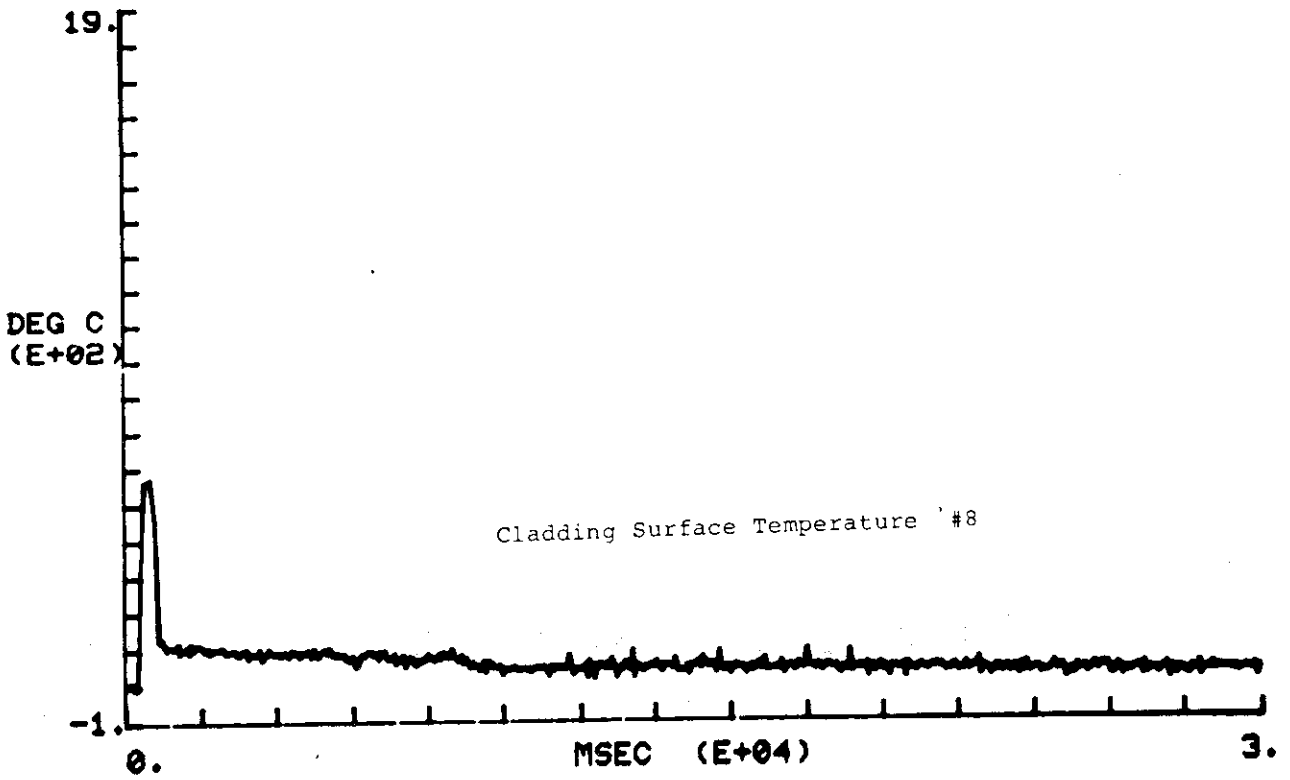
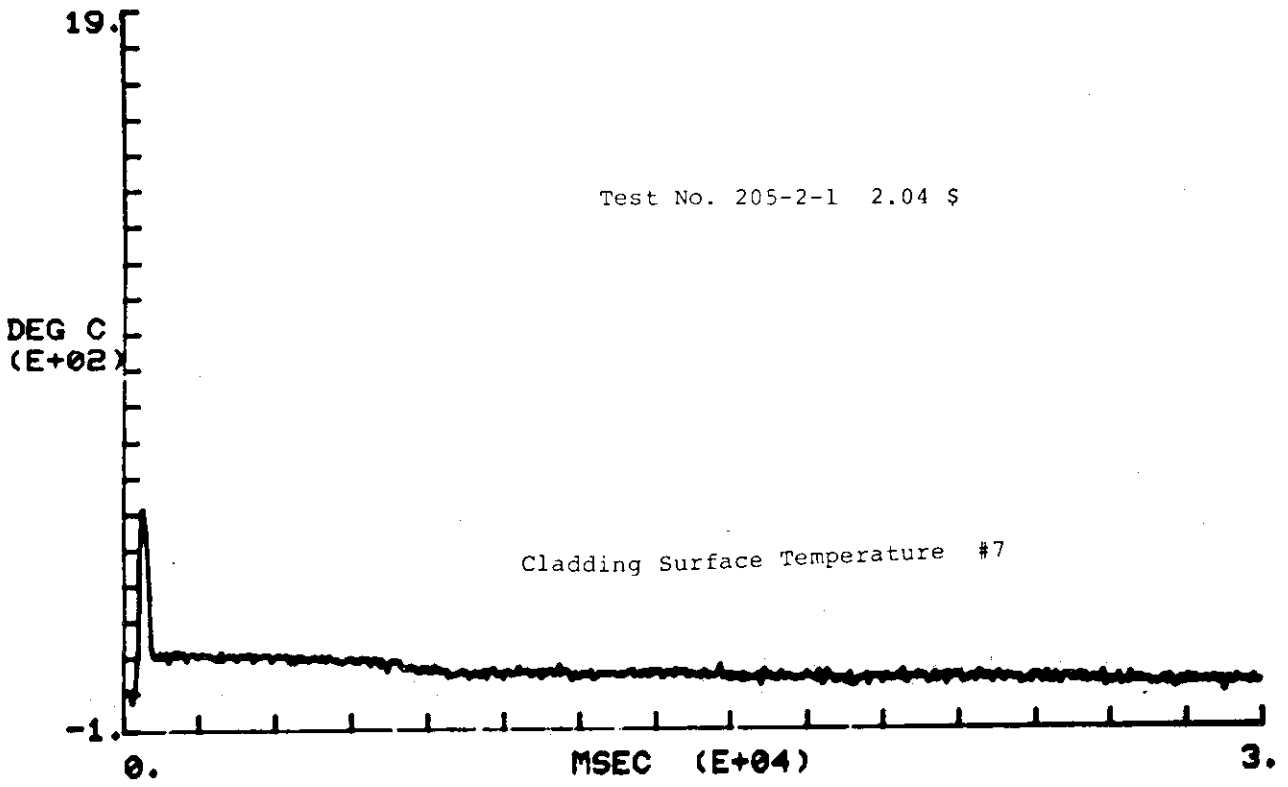


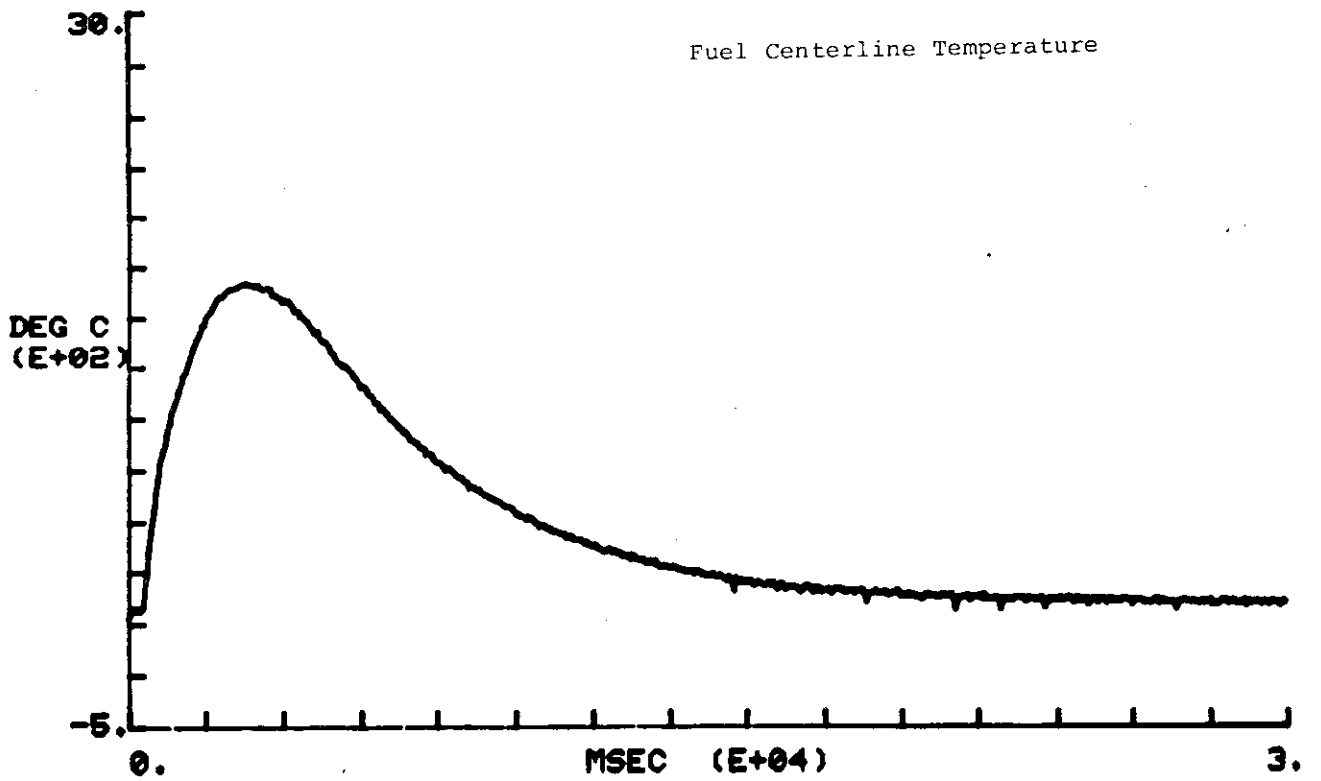
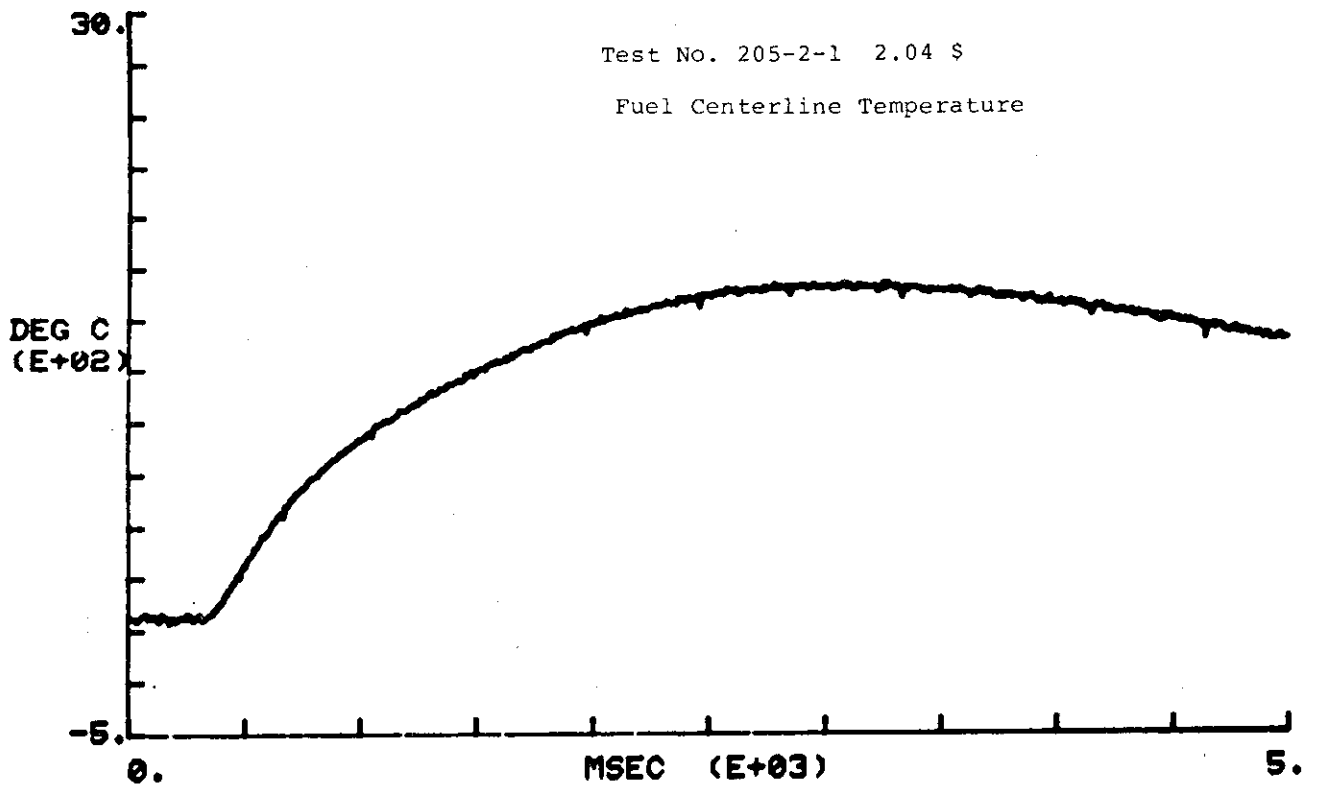




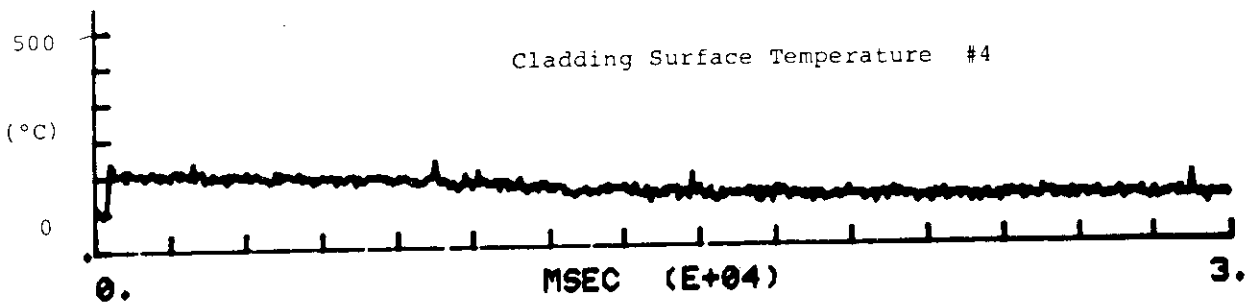
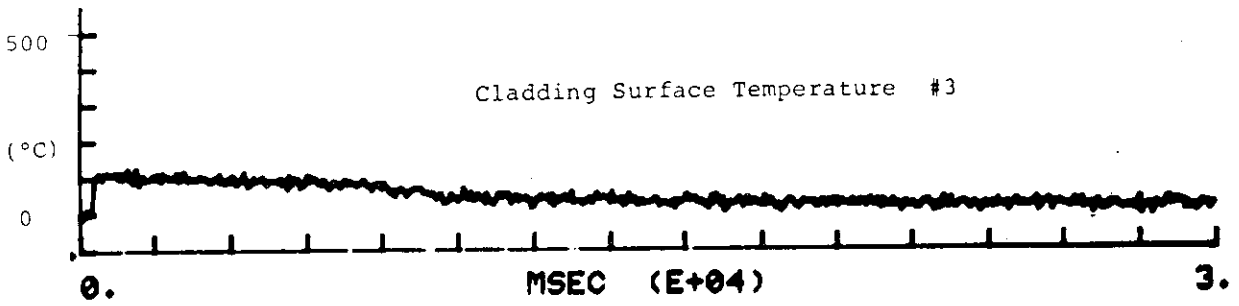
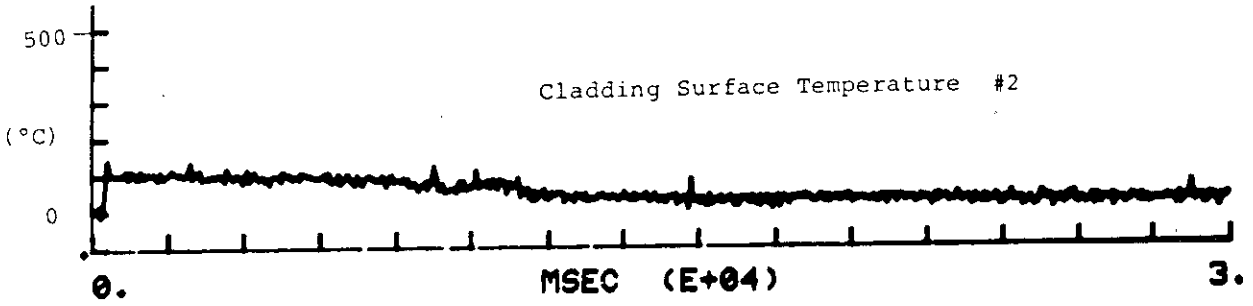
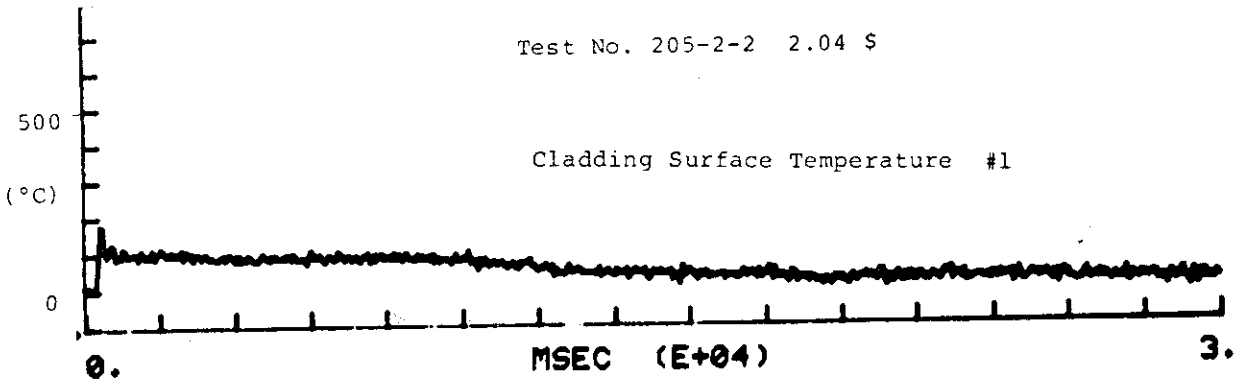


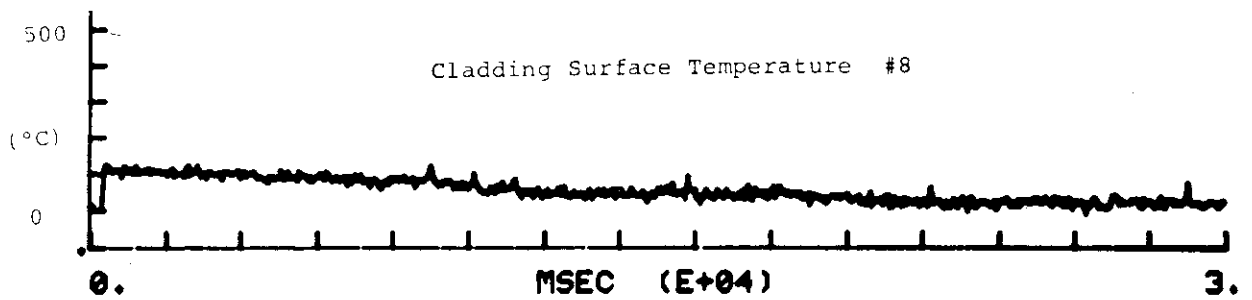
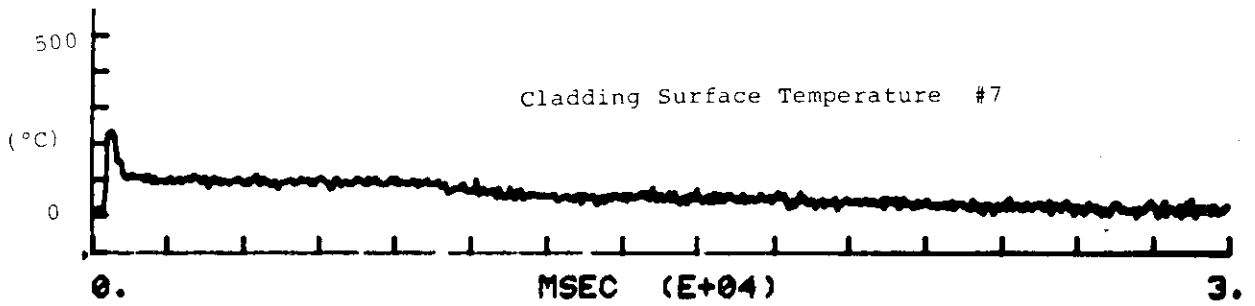
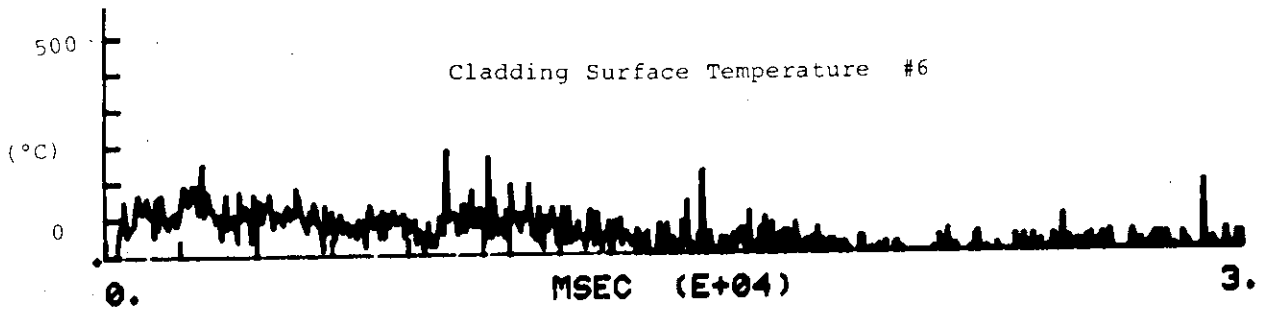
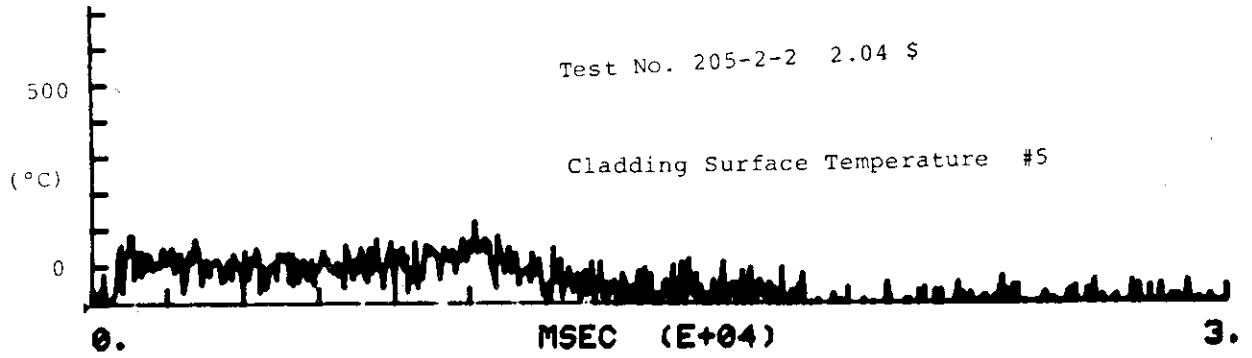


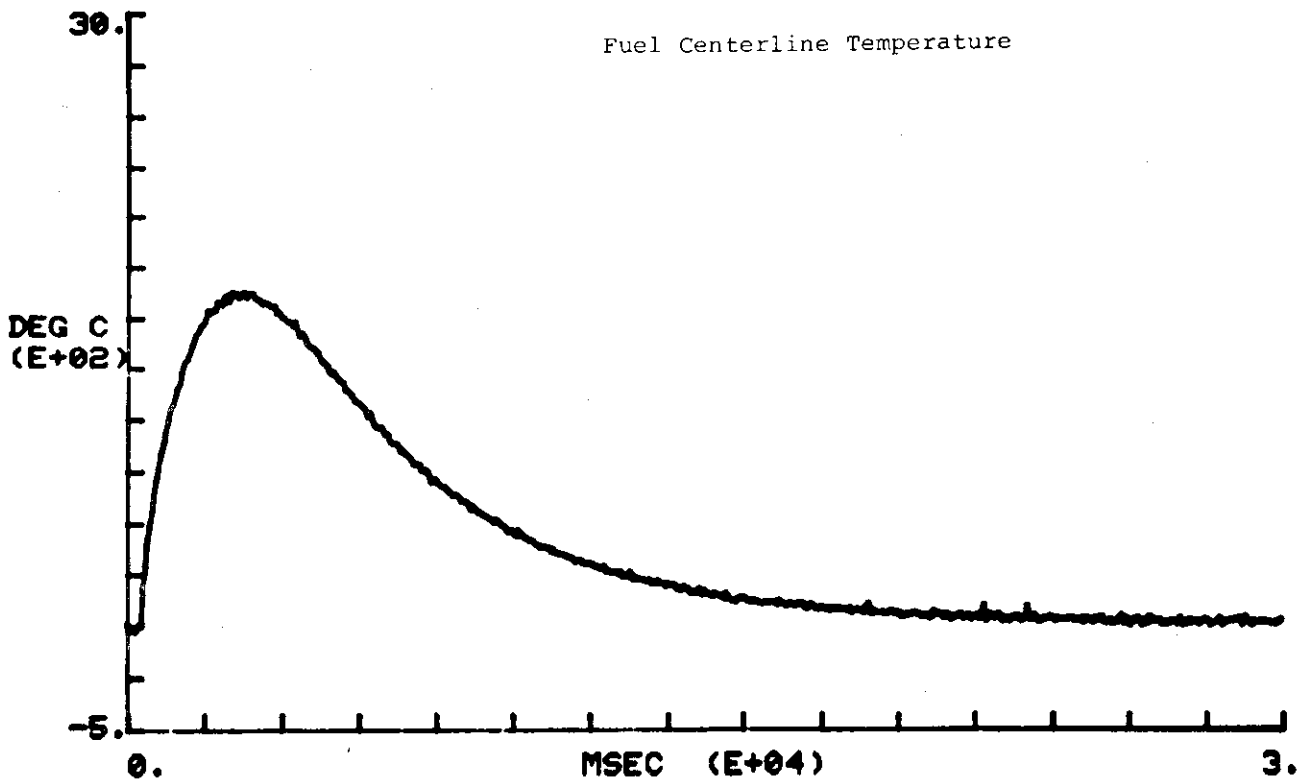
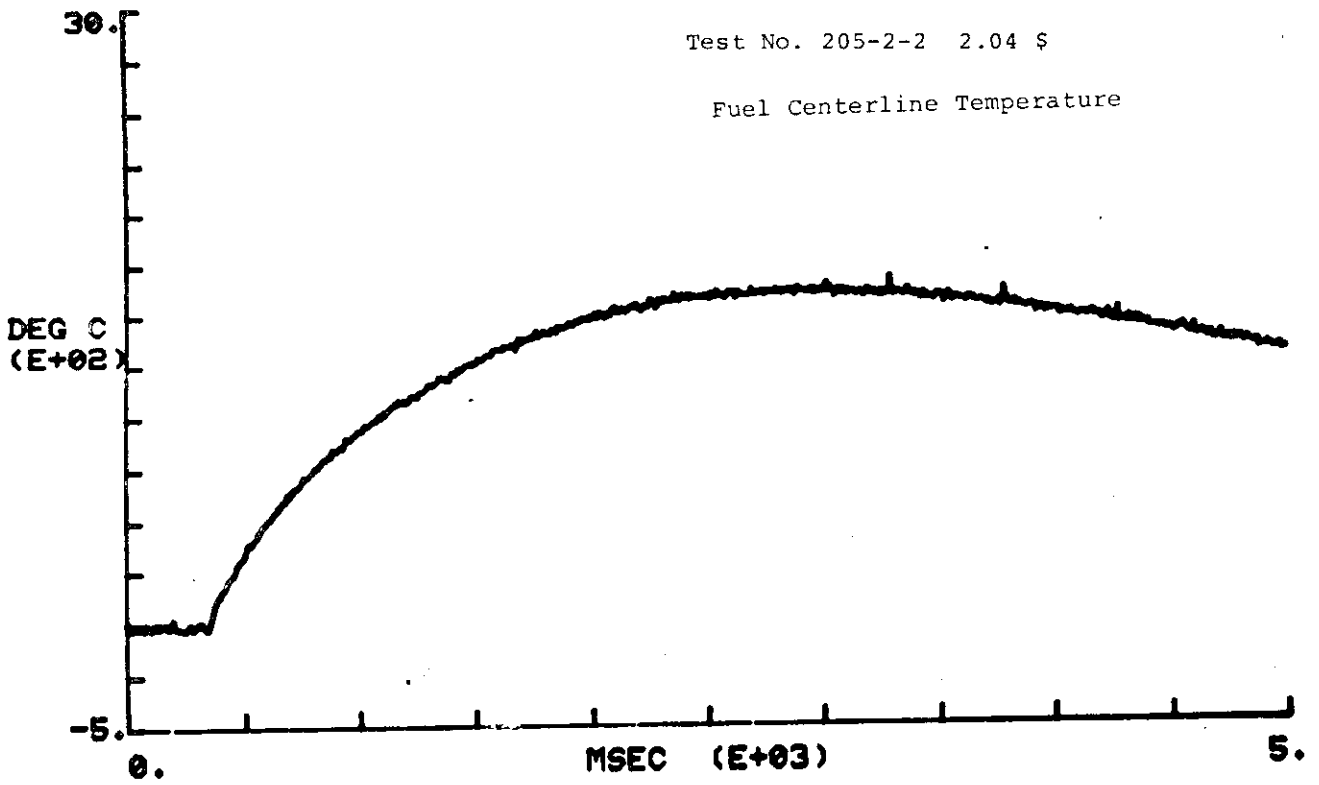


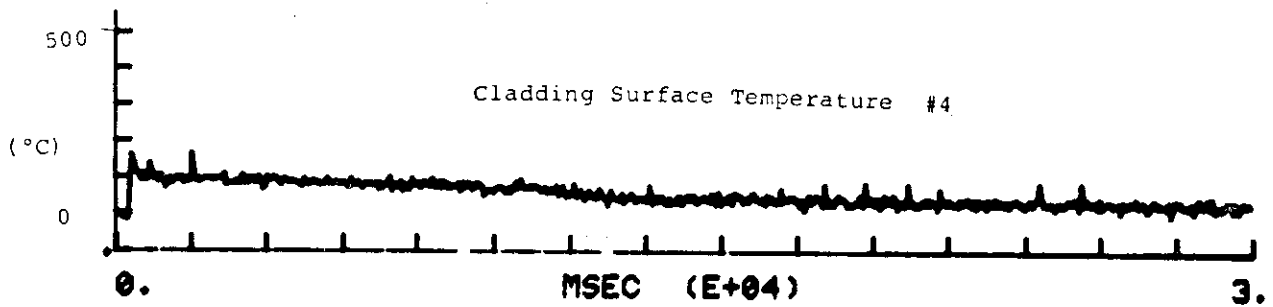
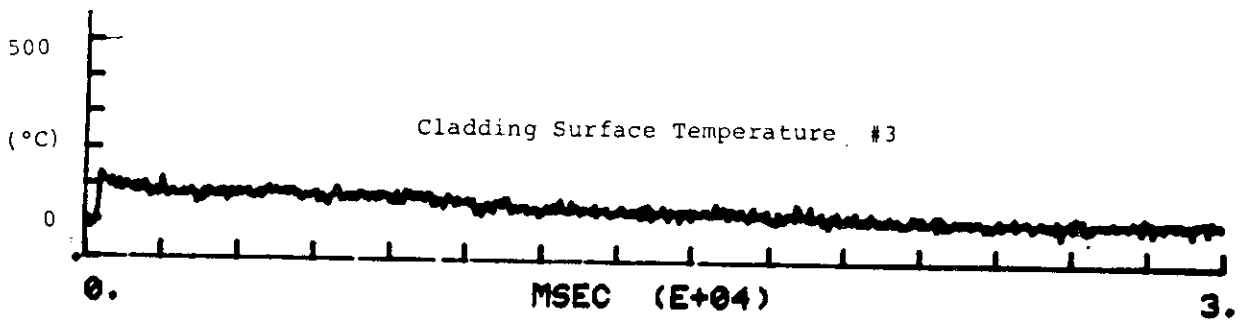
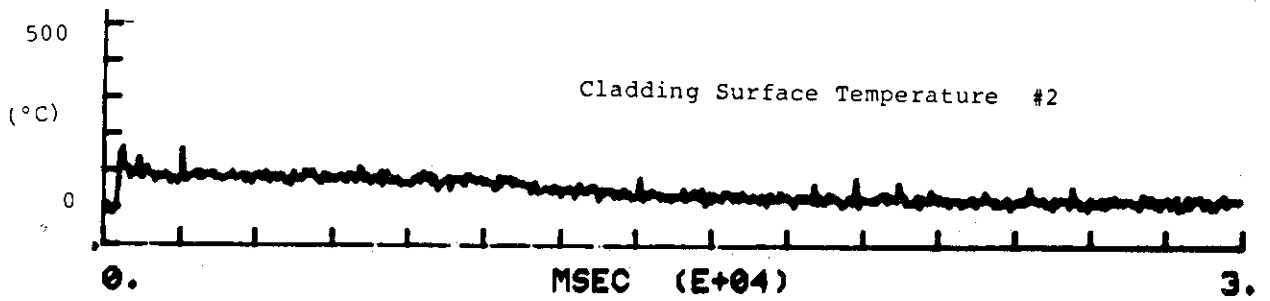
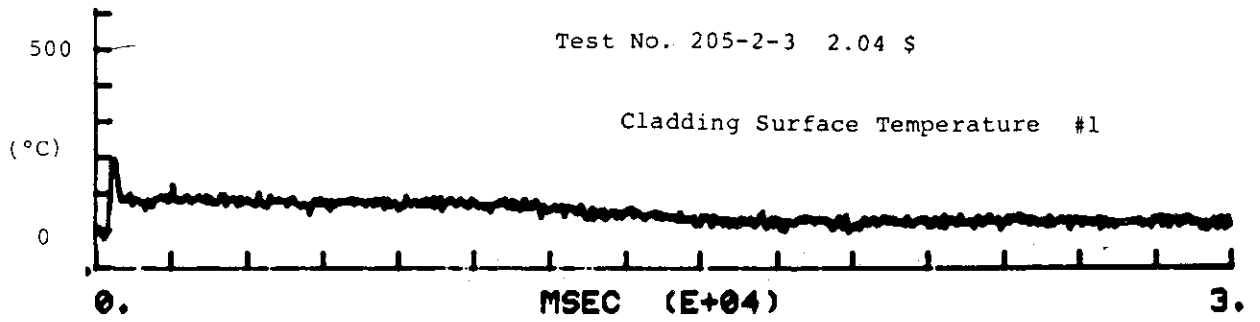


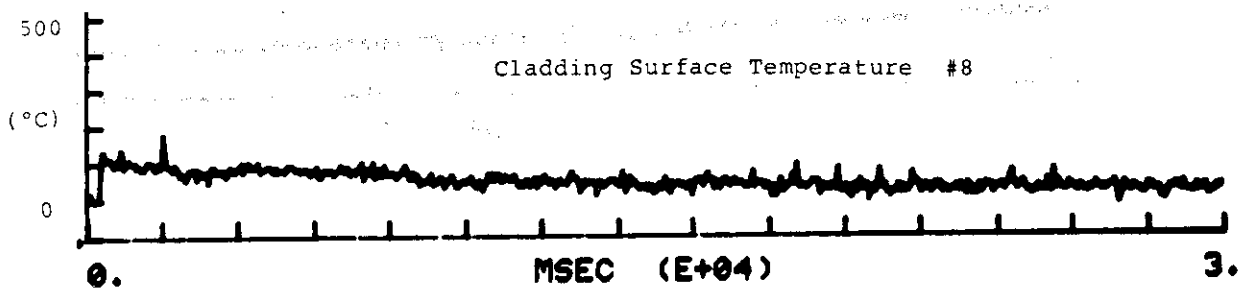
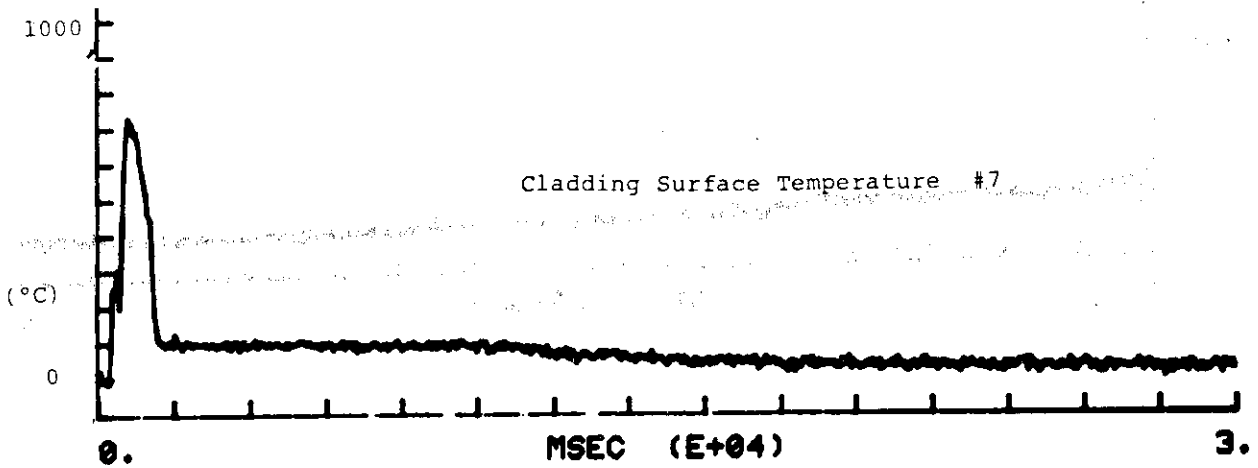
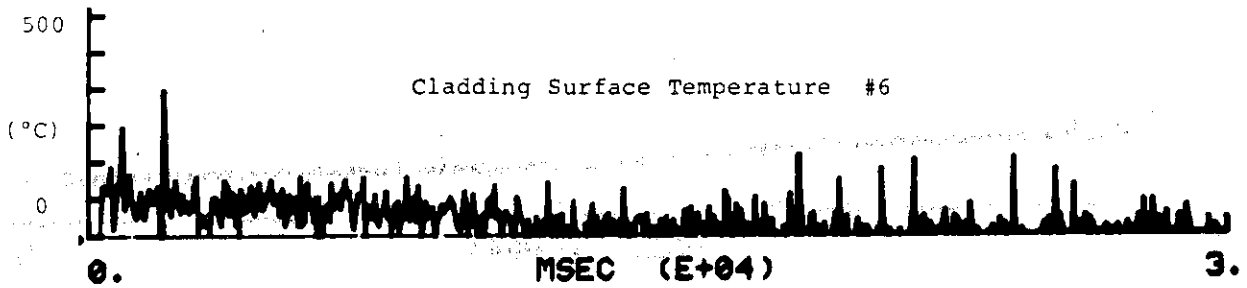
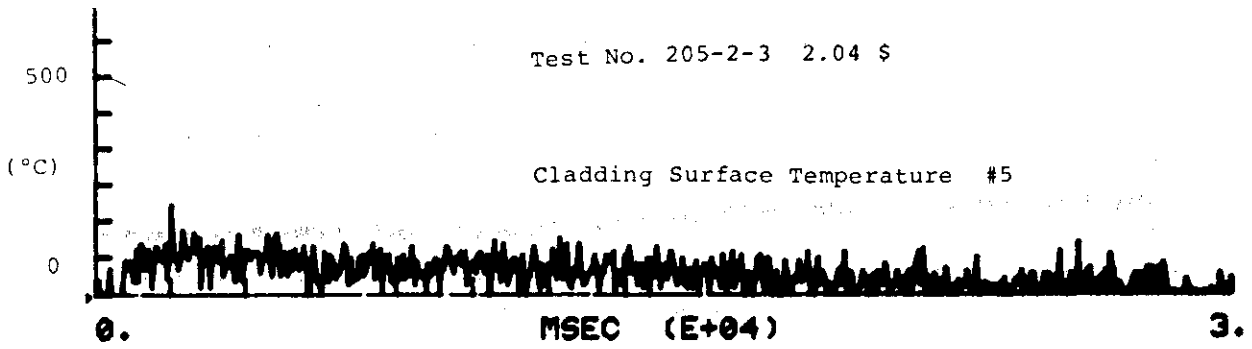
Test No. 205-2-2 2.04 S

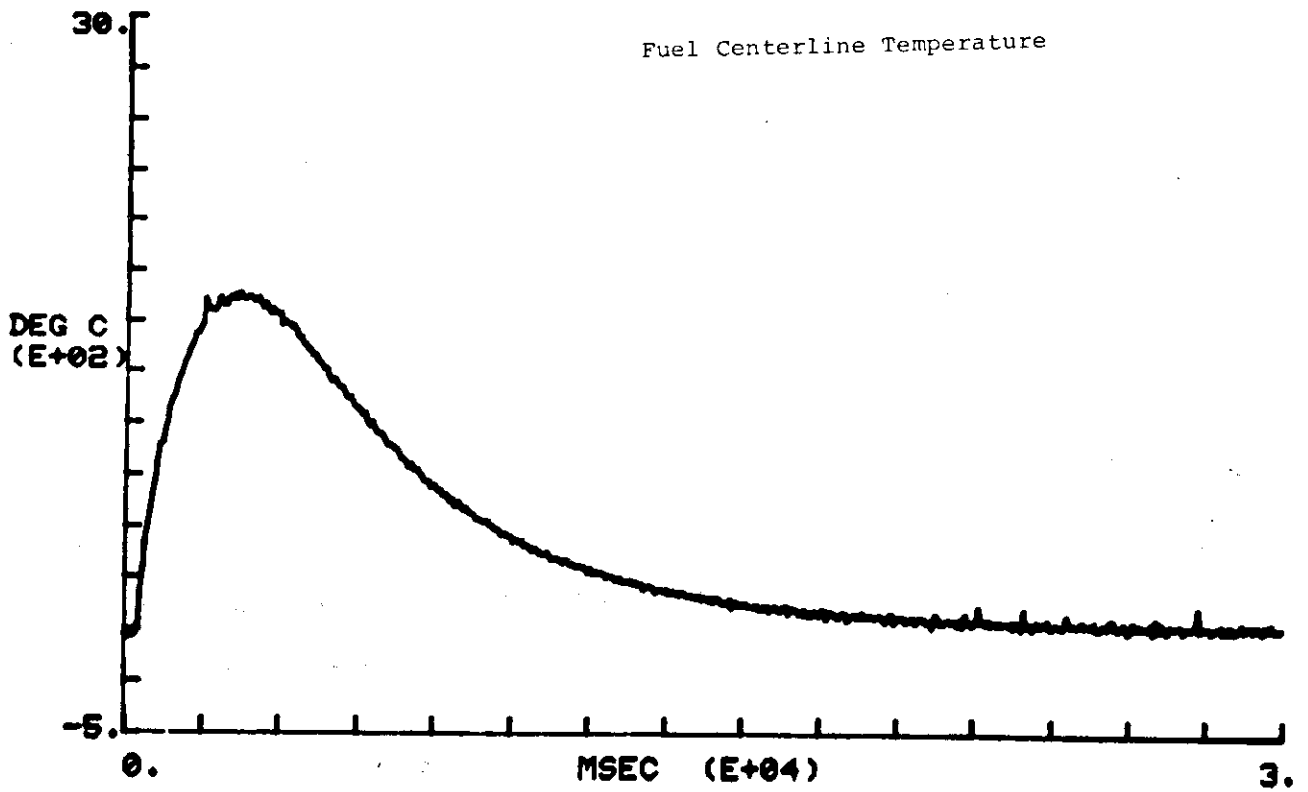
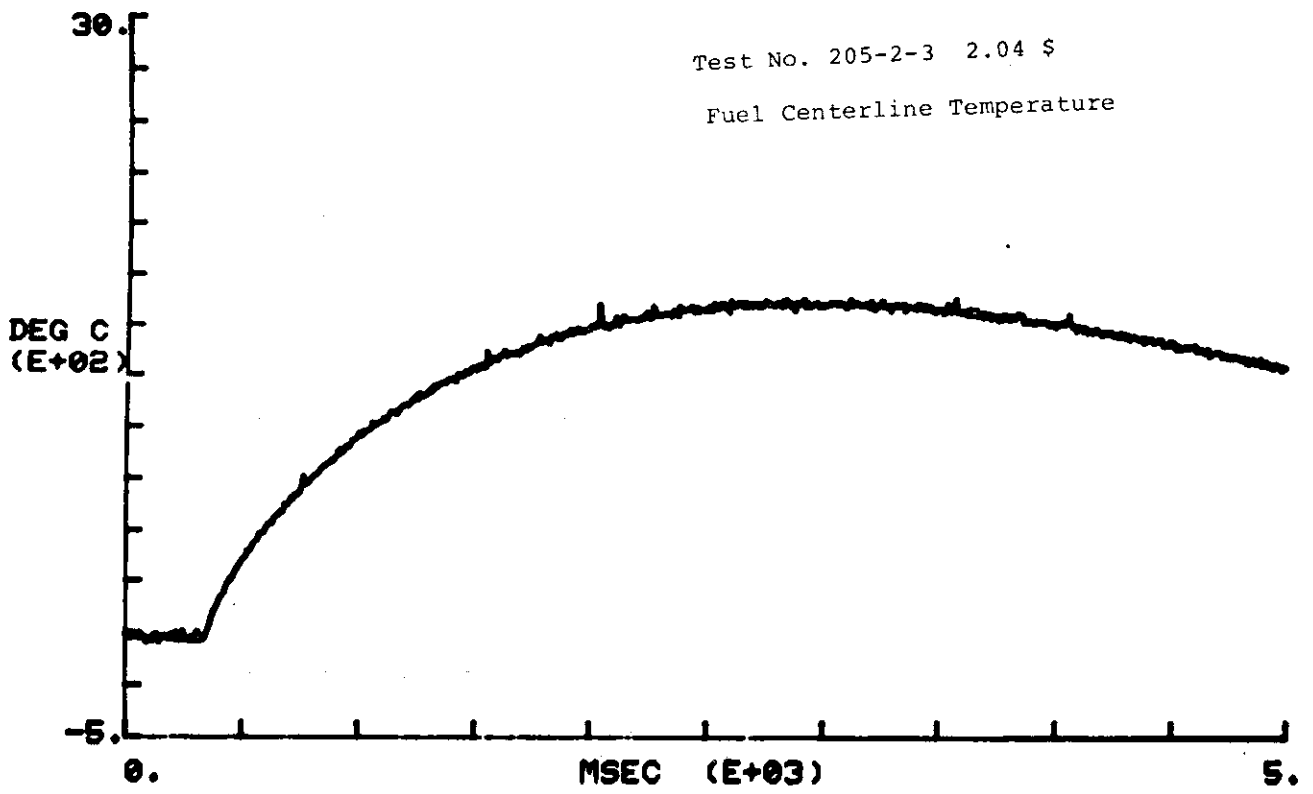


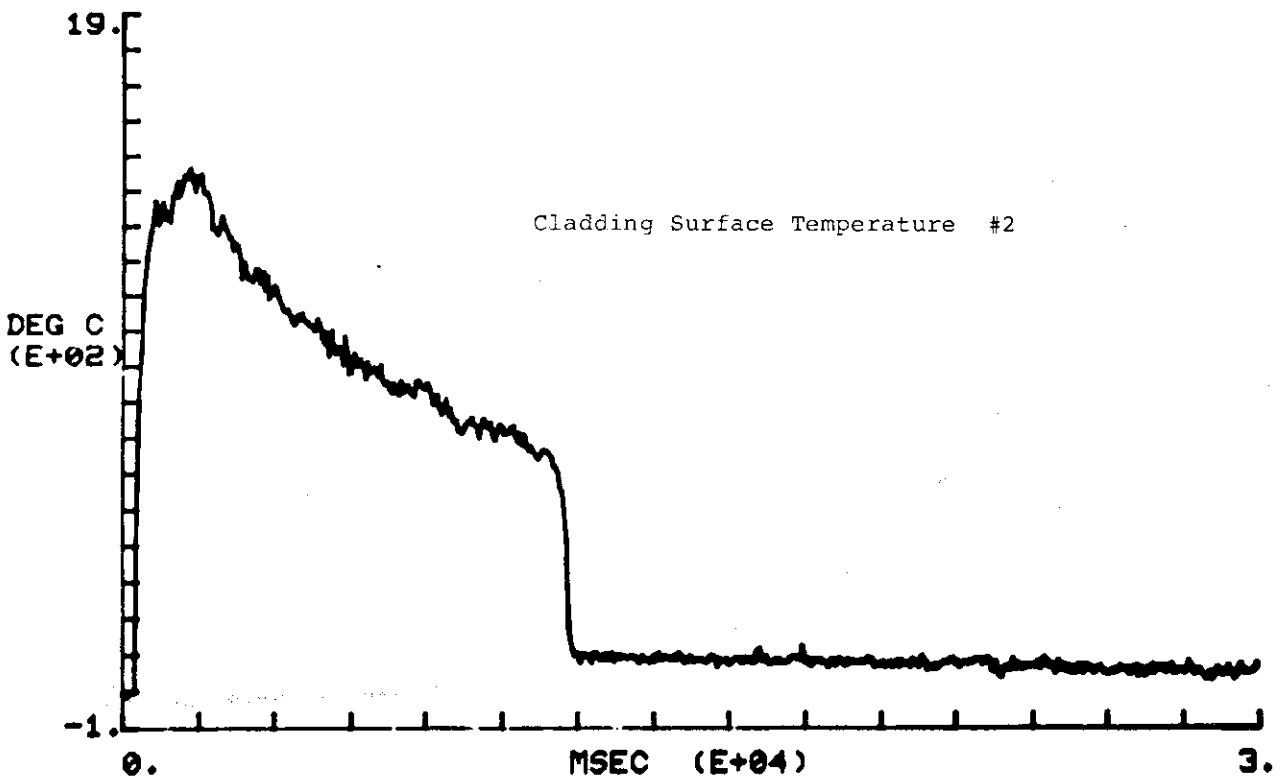
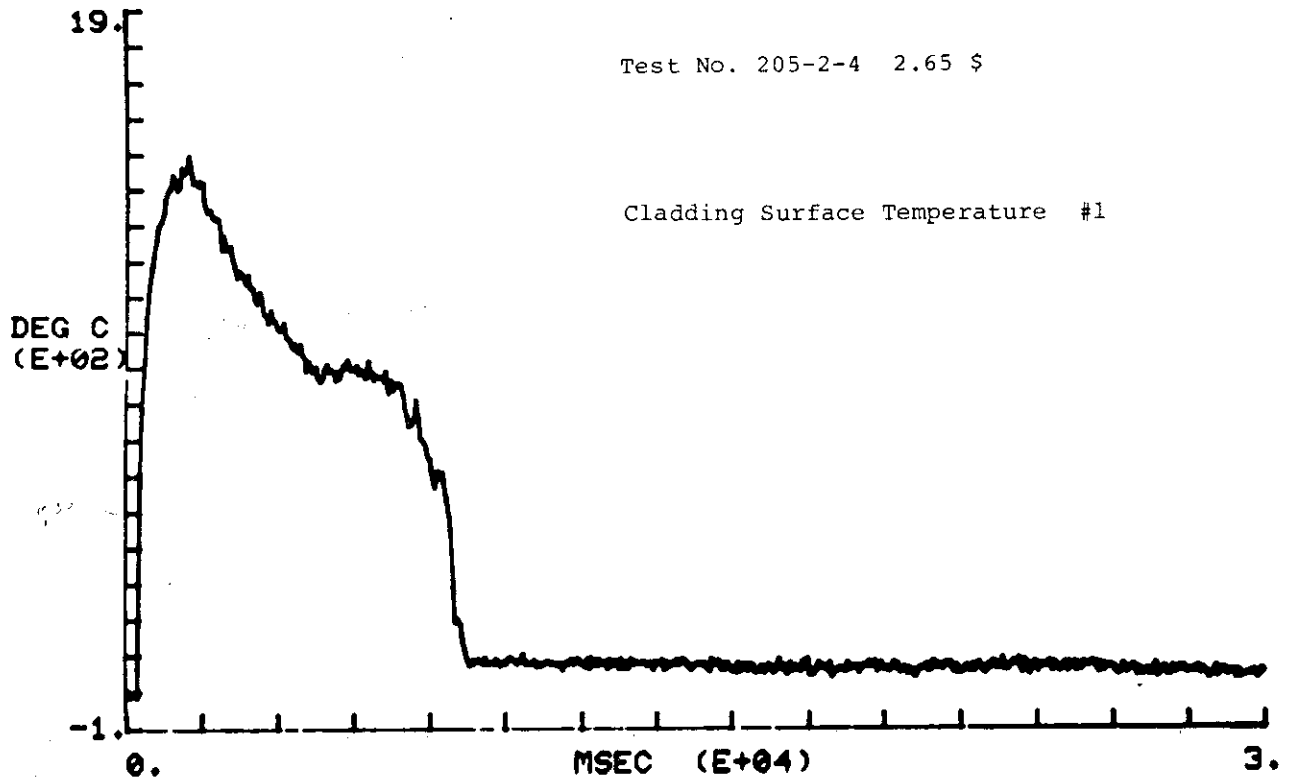


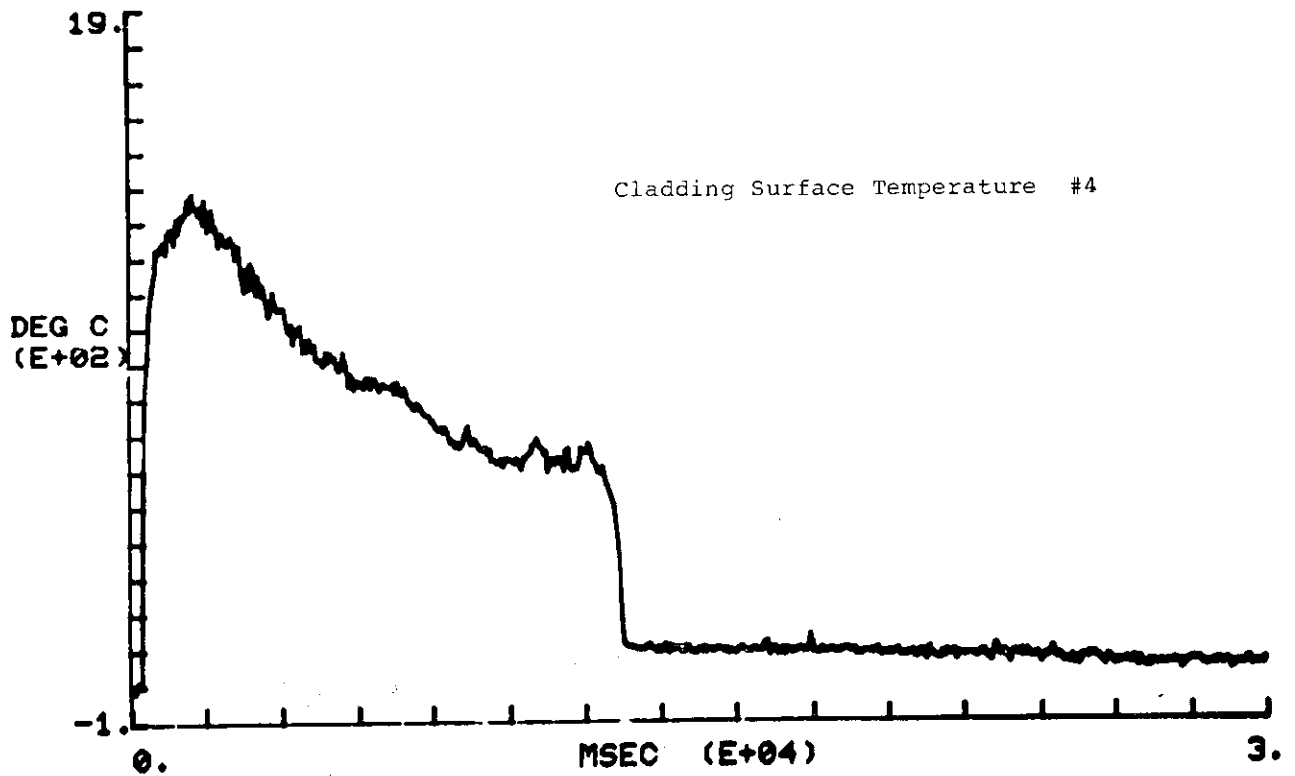
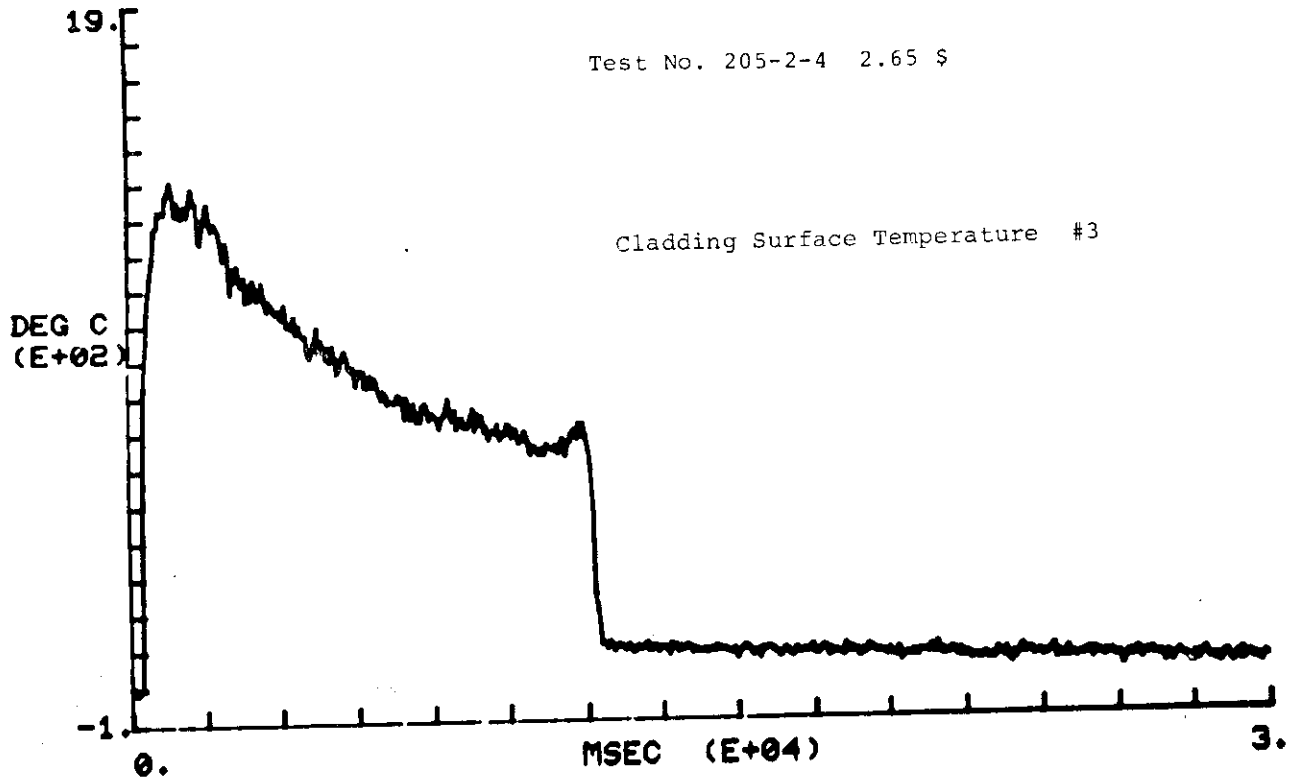


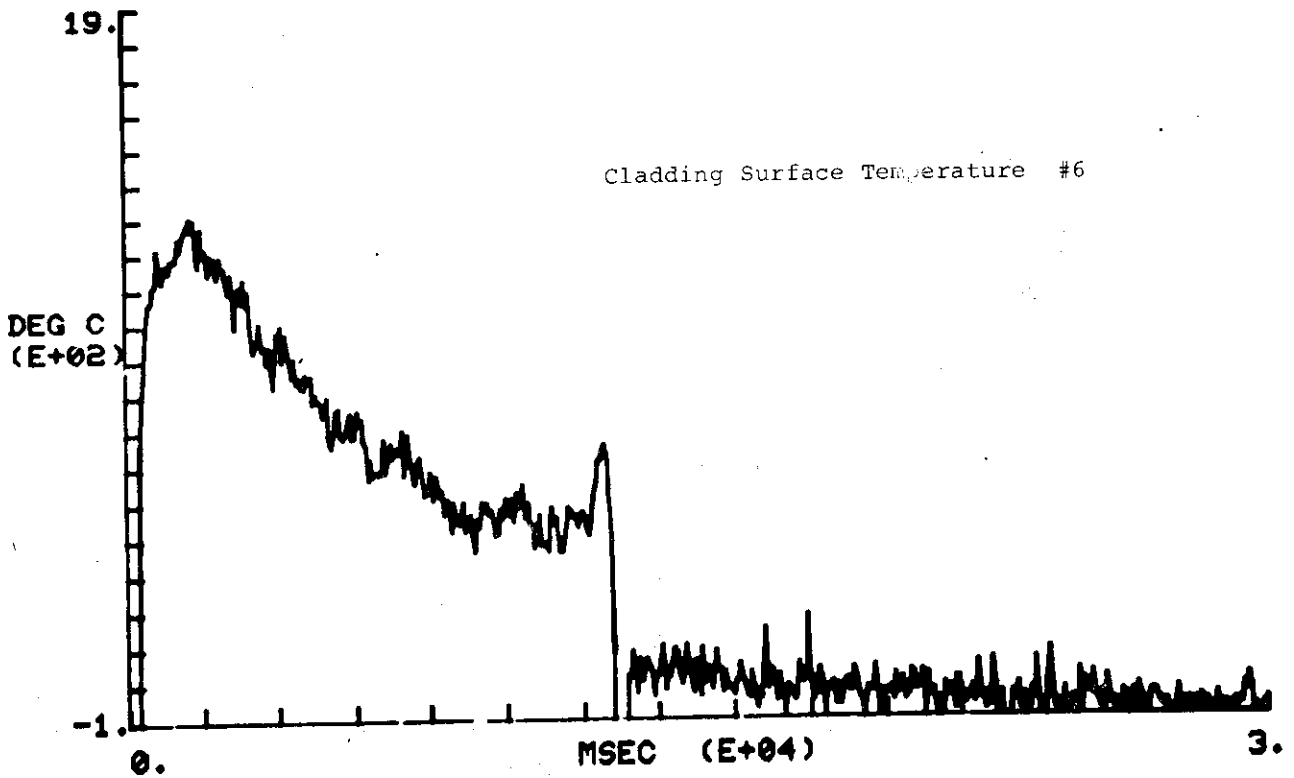
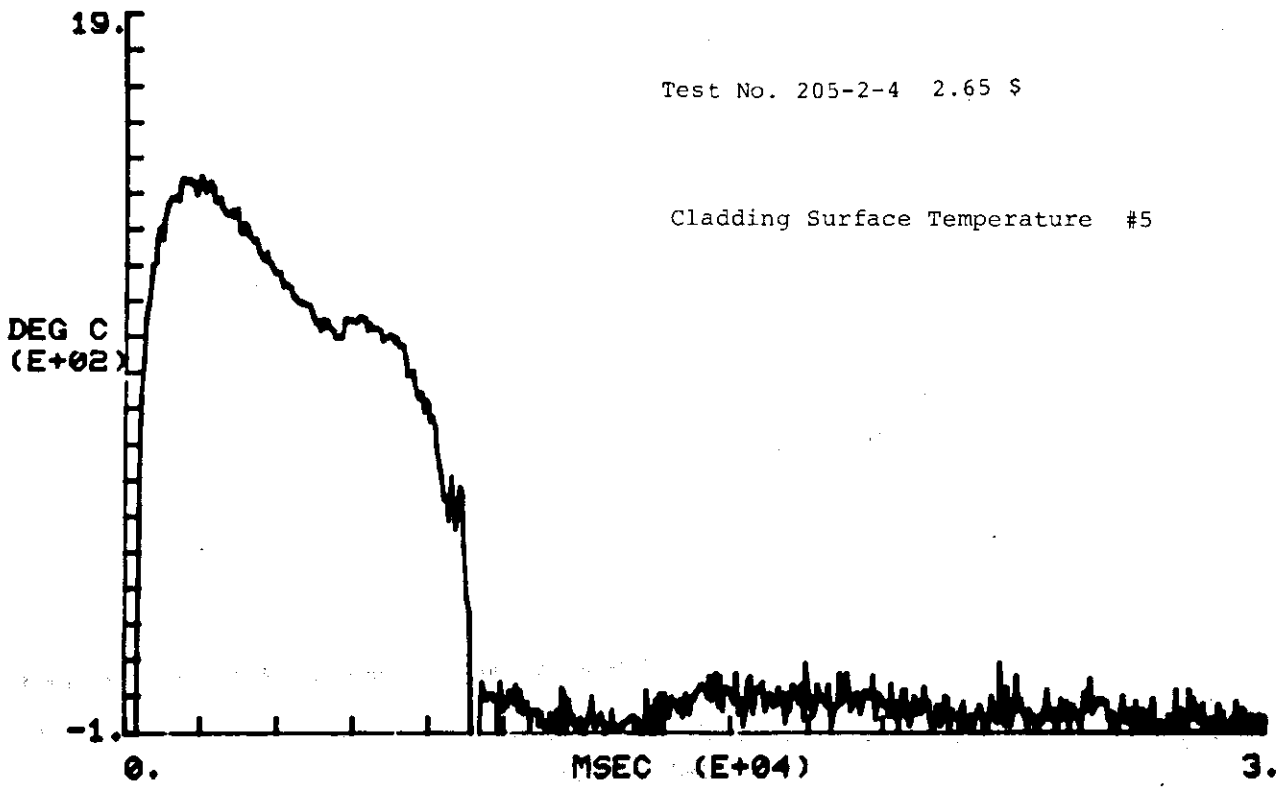


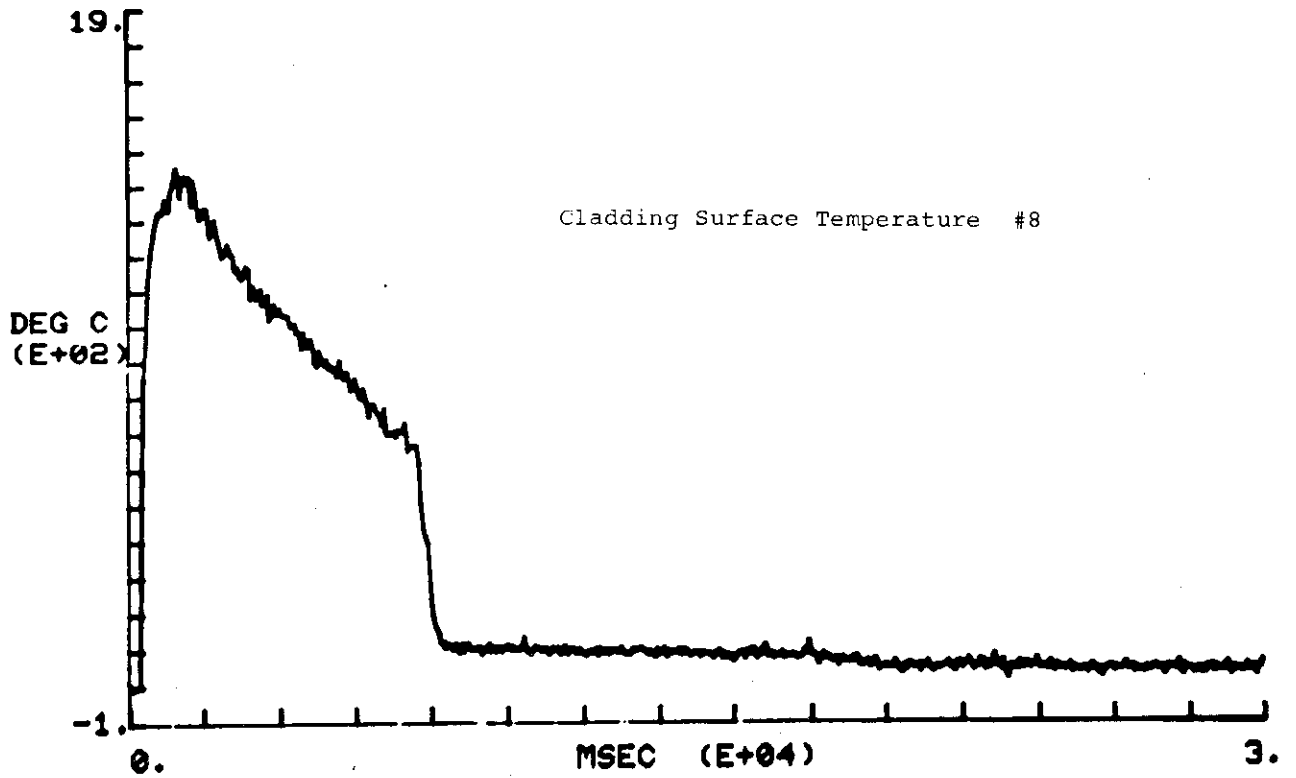
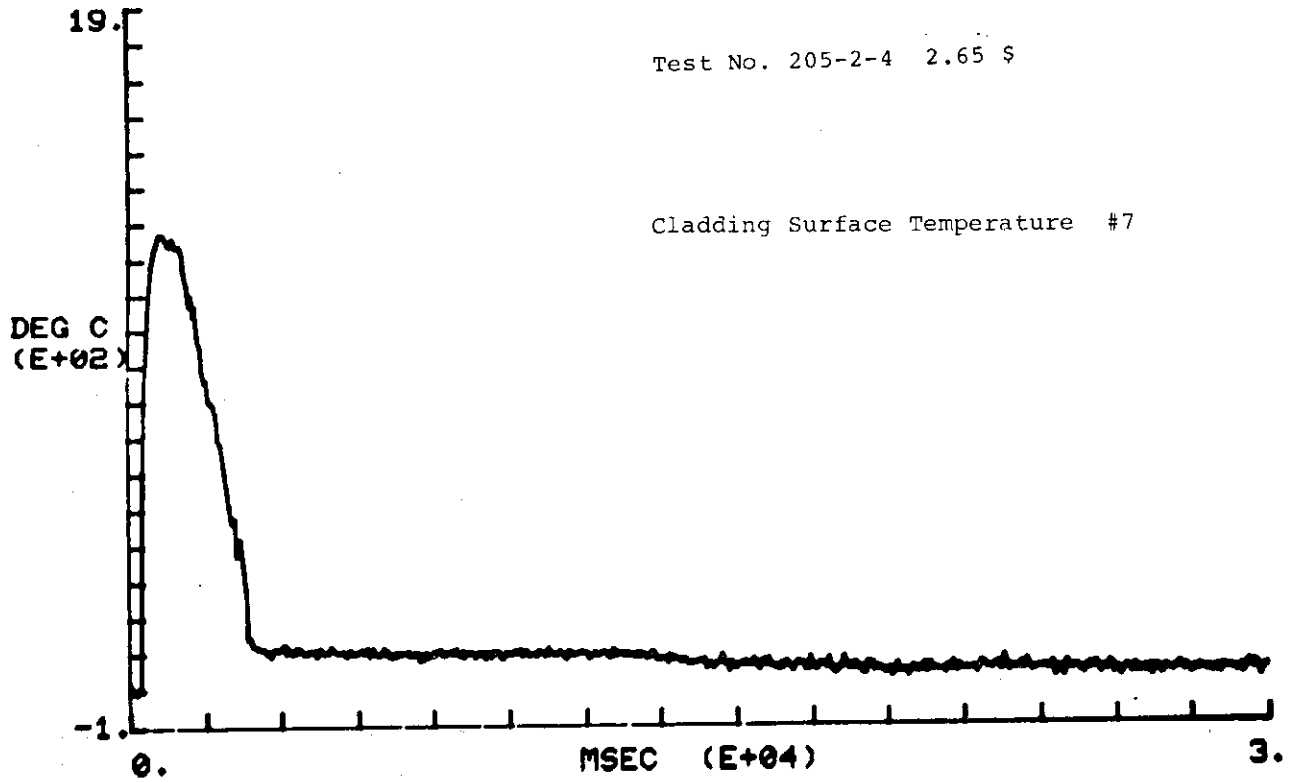


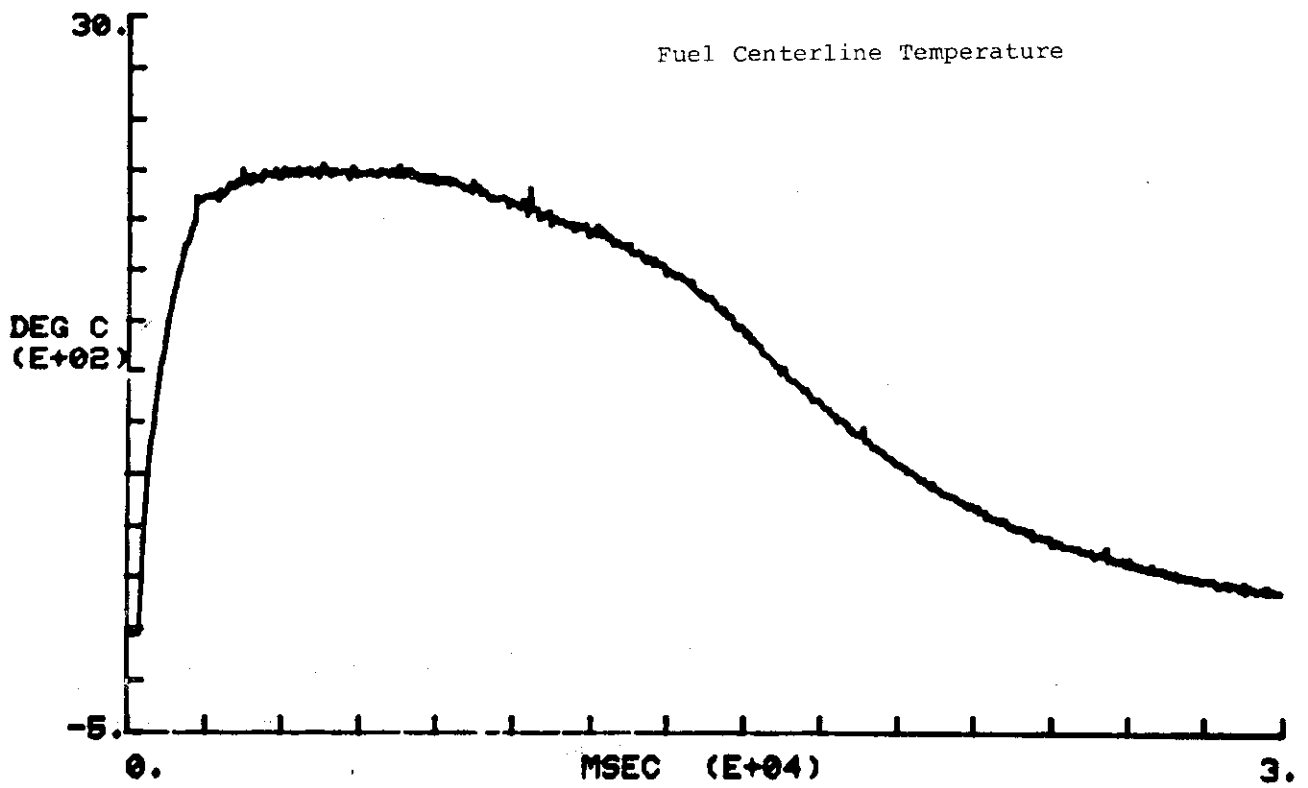
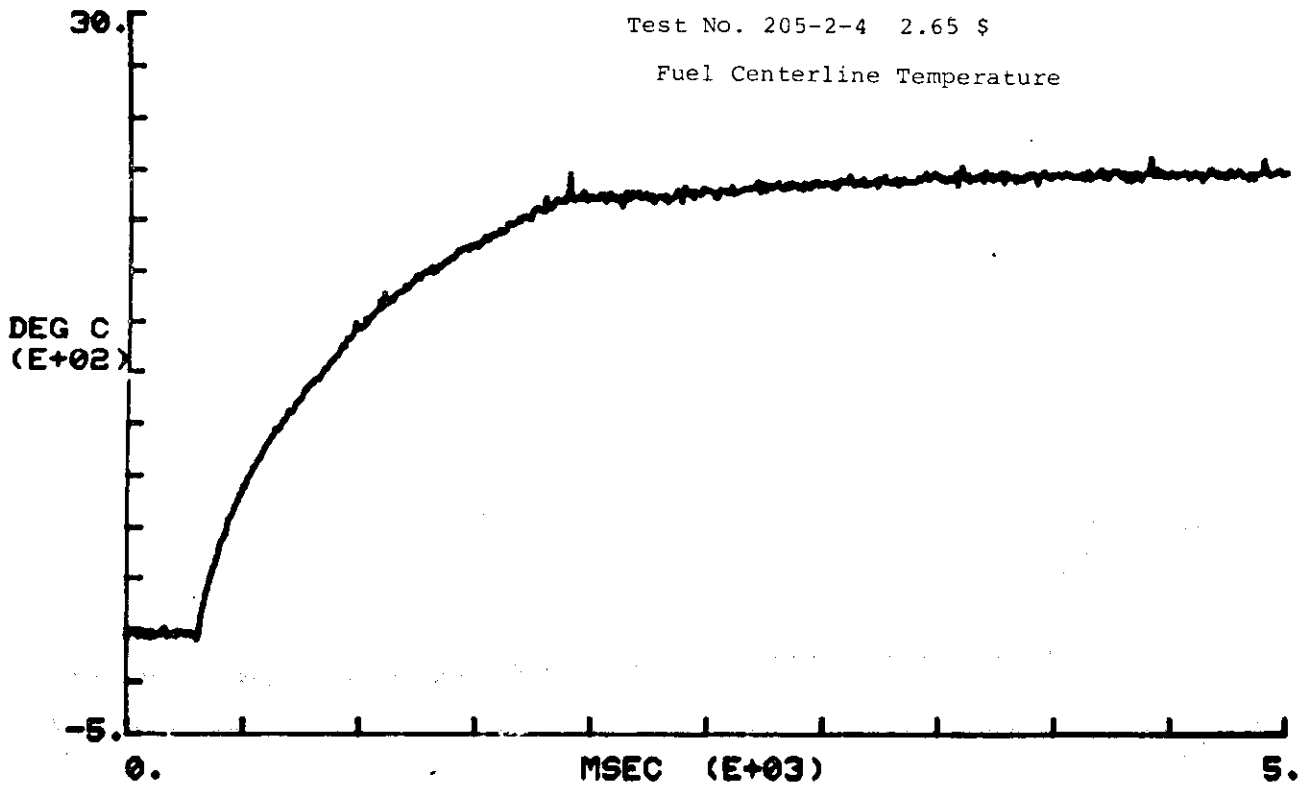


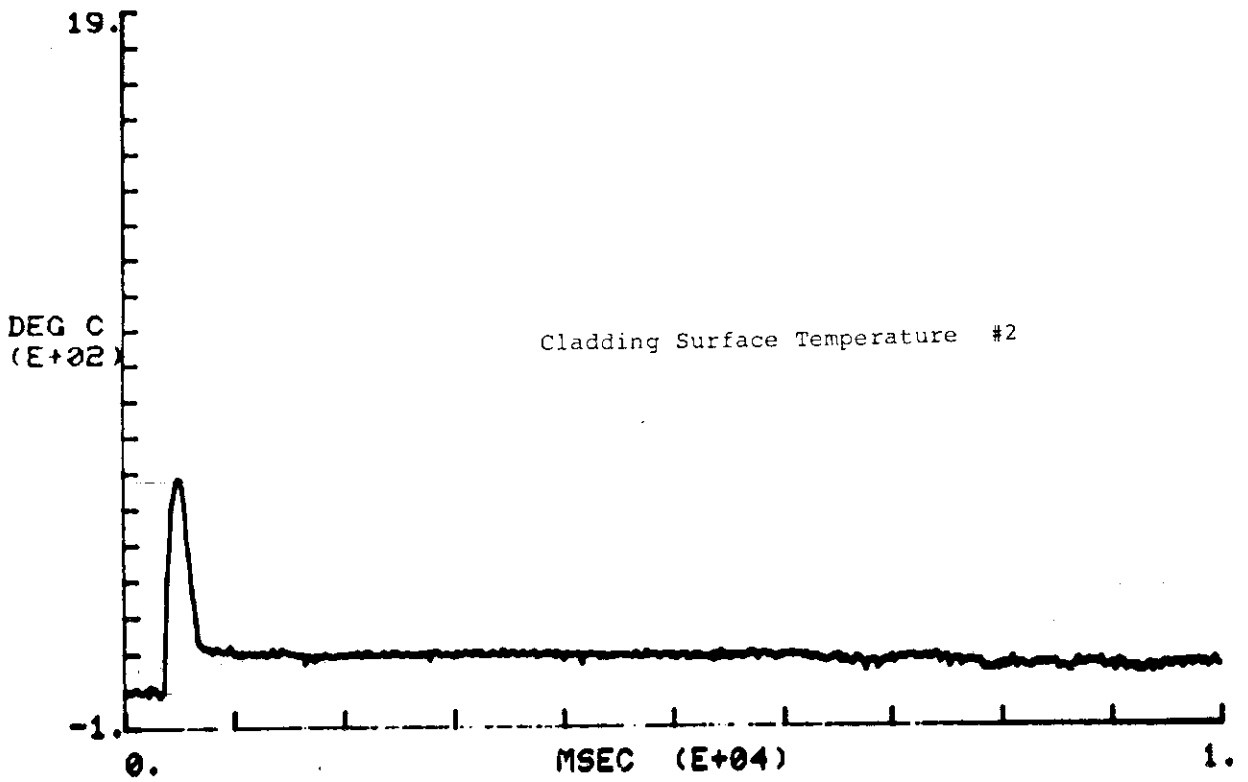
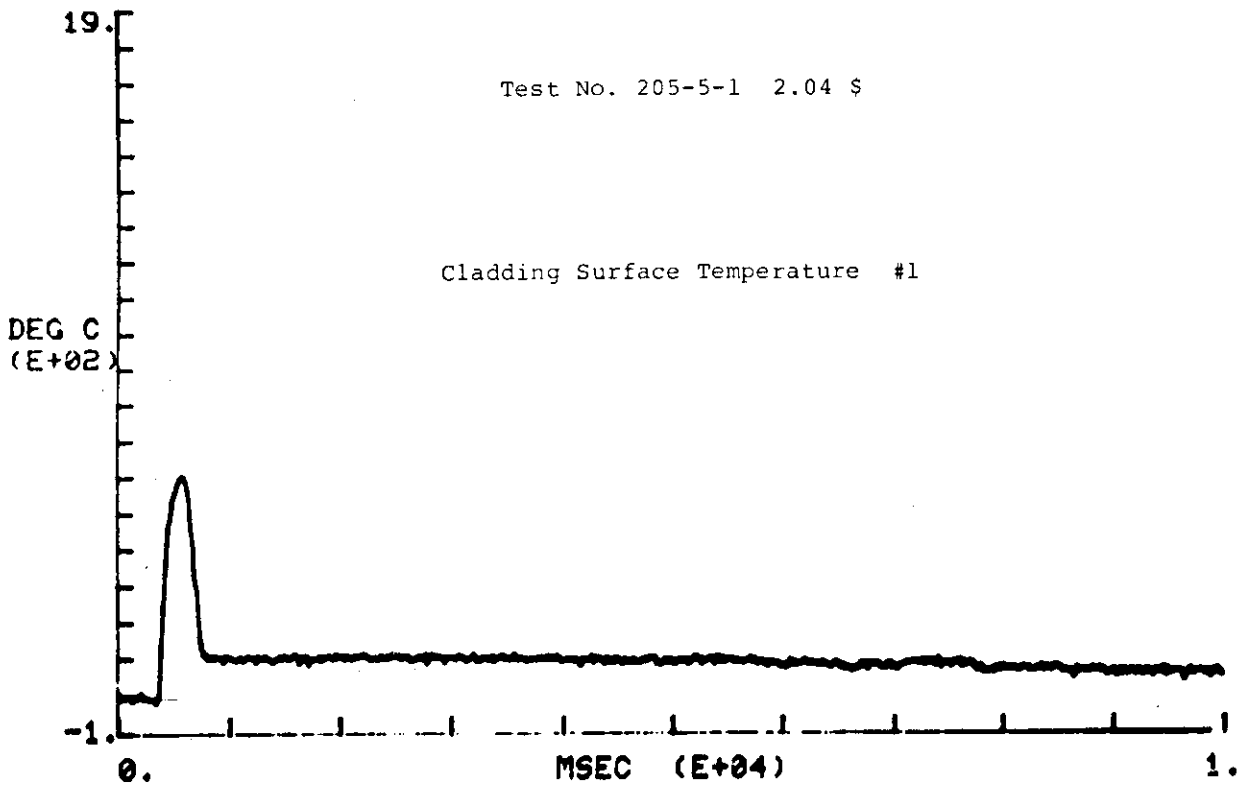


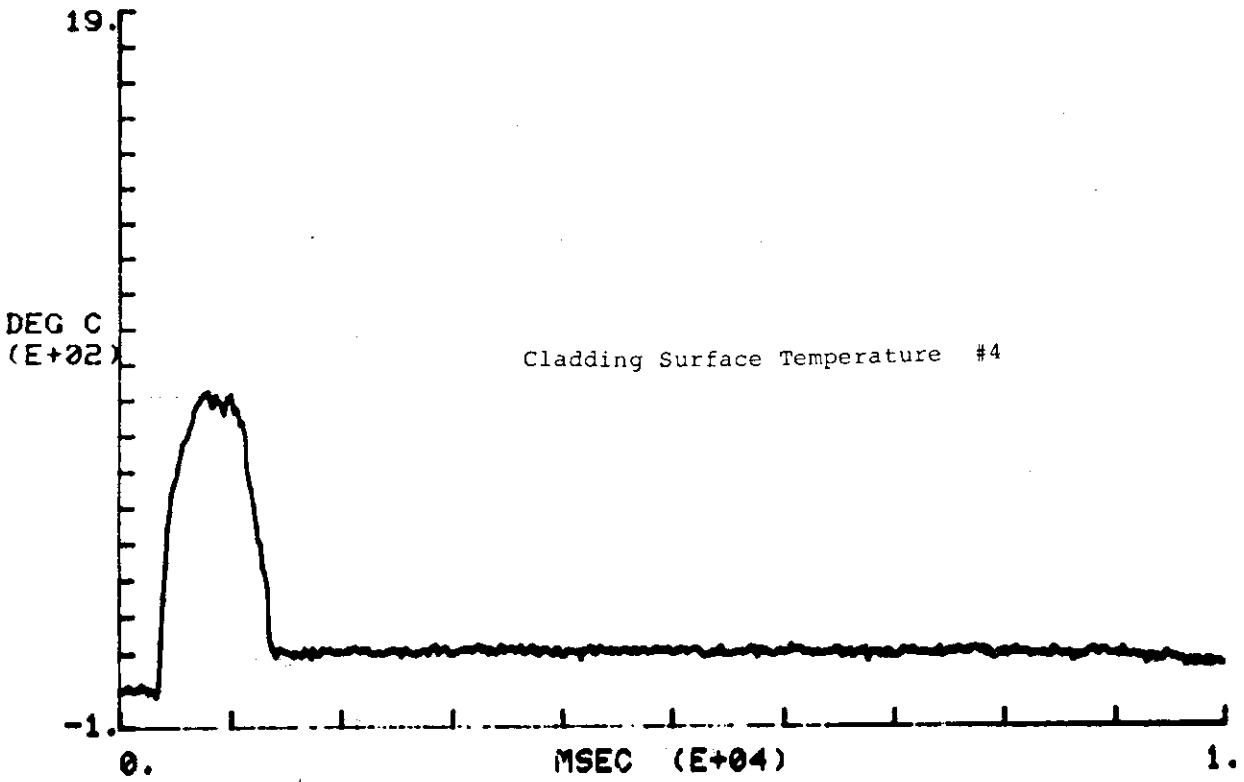
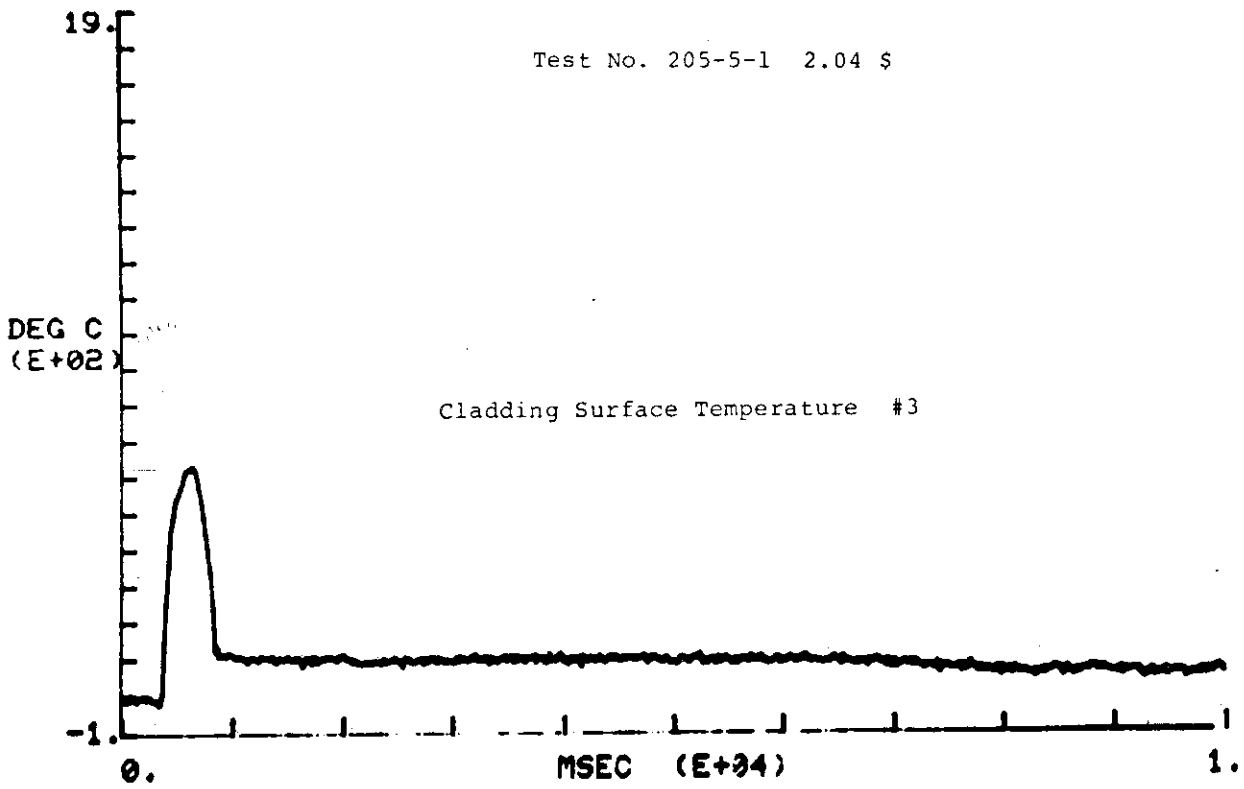


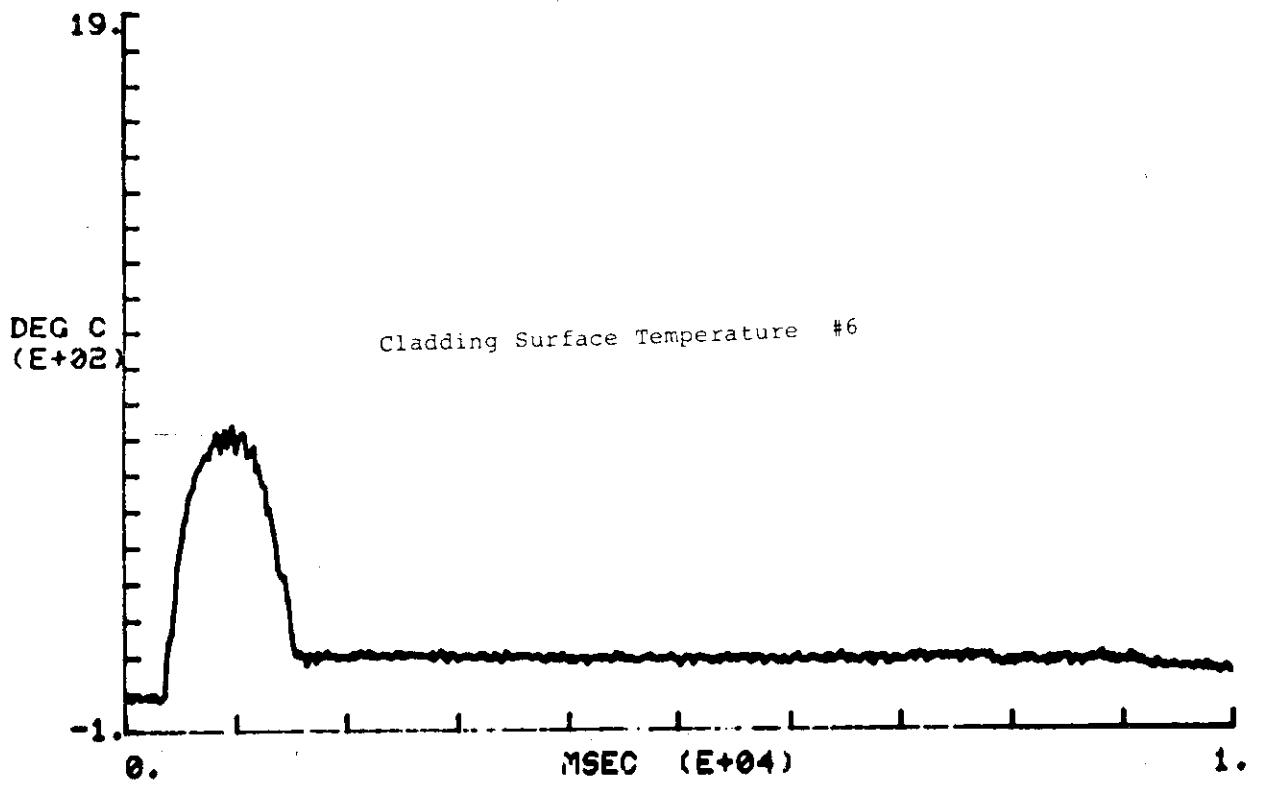
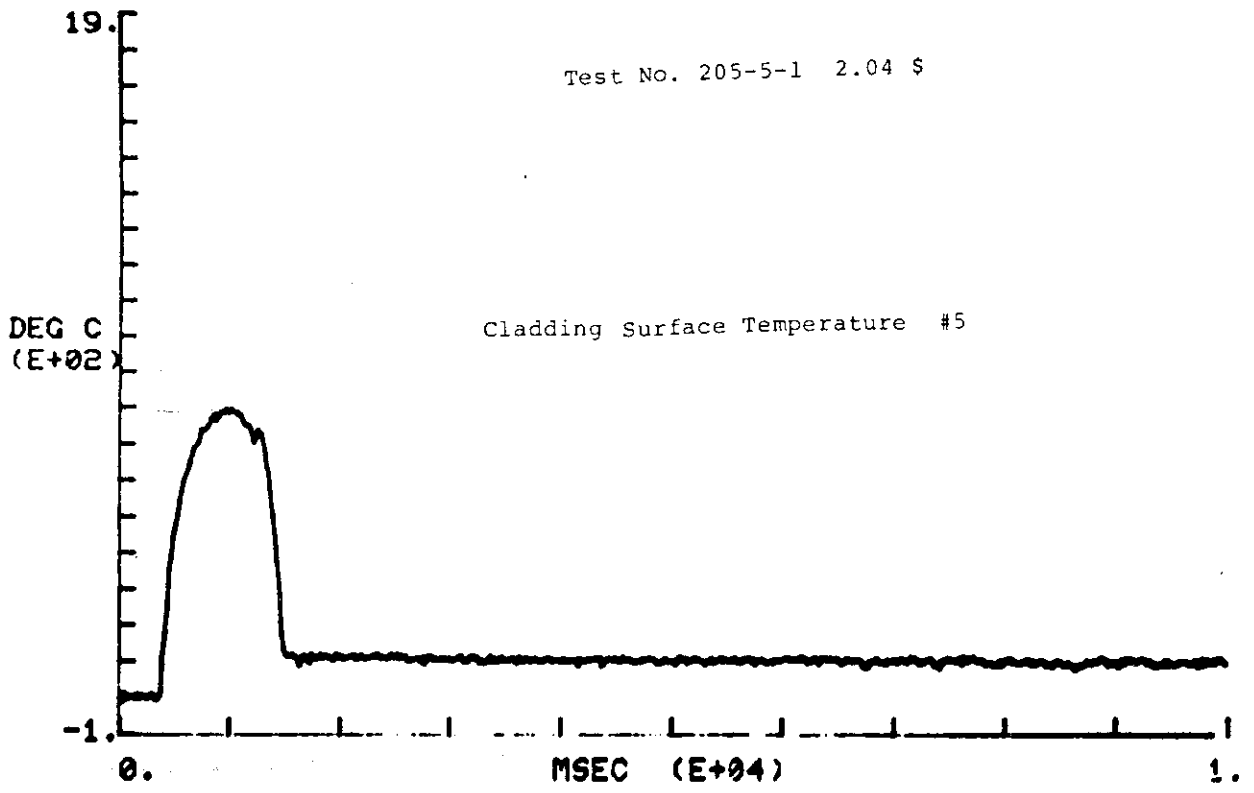


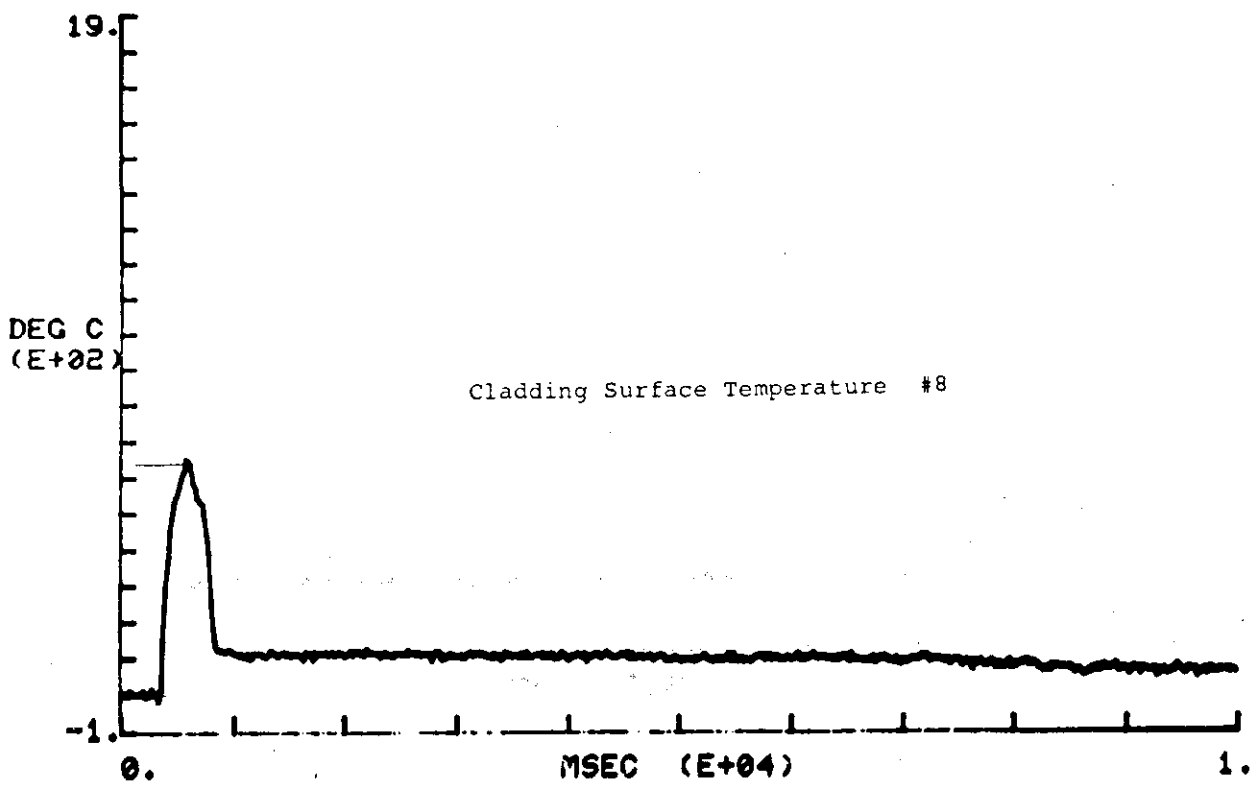
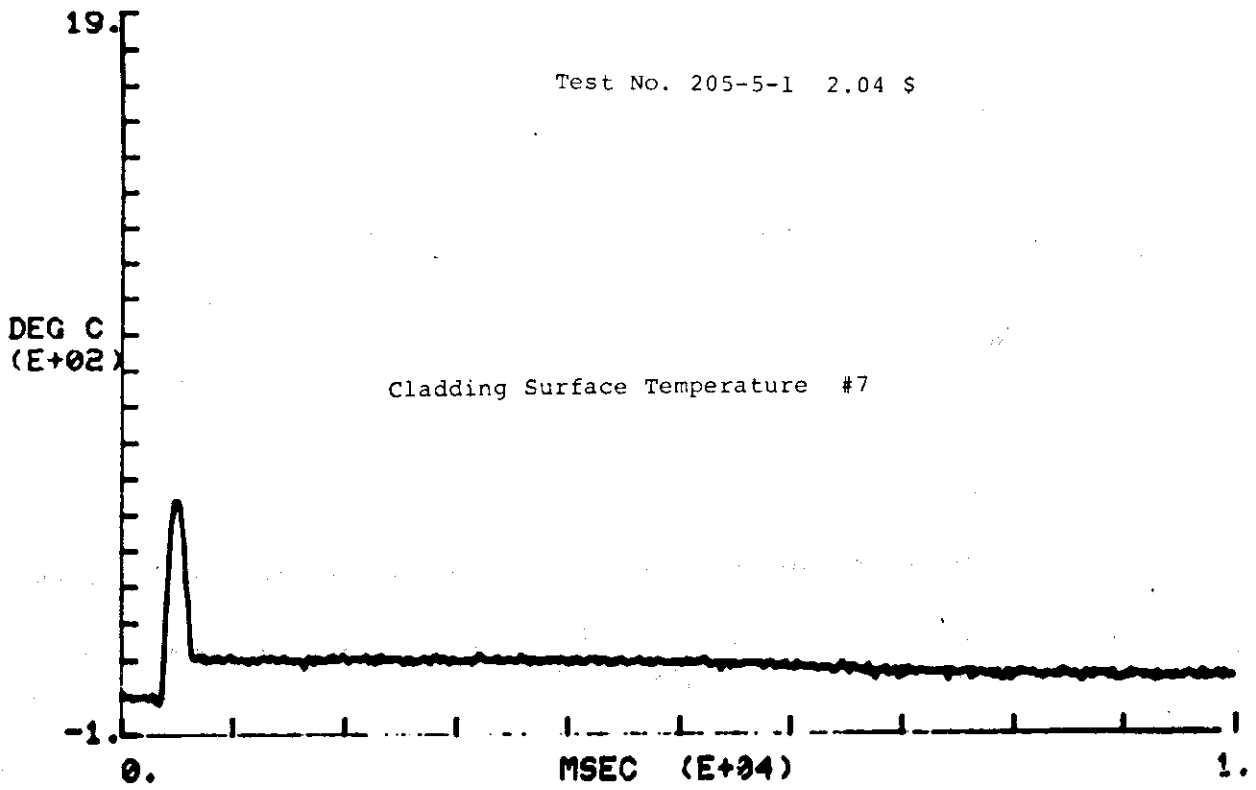


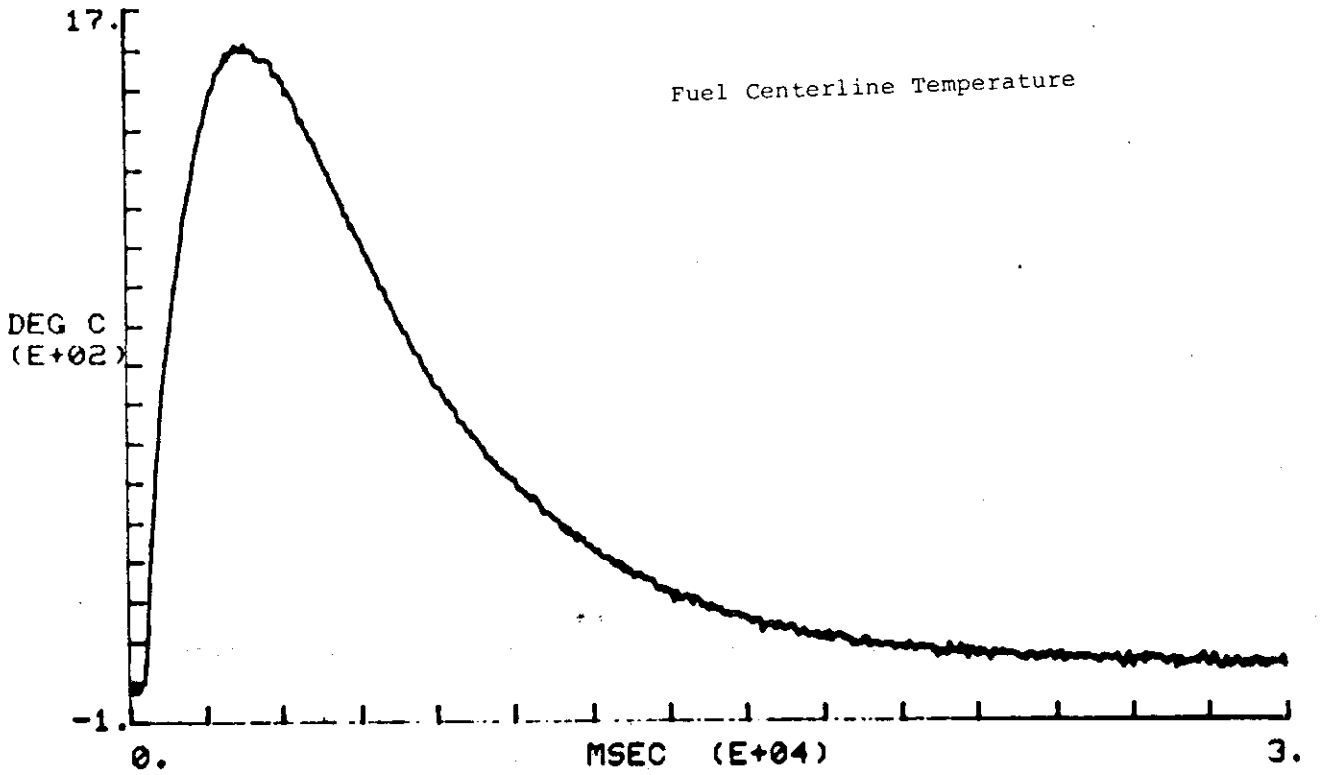
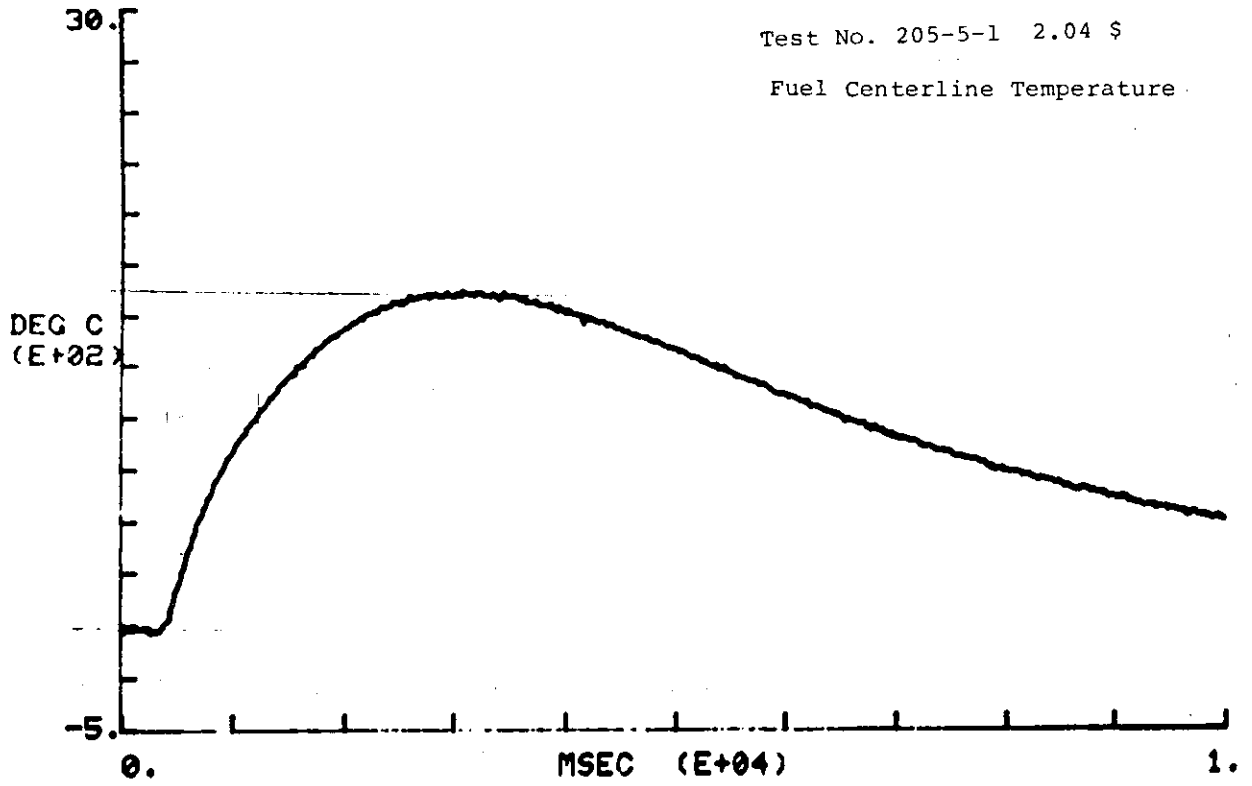












Test No. 205-5-2 2.28 S

