

JAERI-M
8200

NSRR実験におけるジルカロイ被覆管
の酸化膜厚さに基づく円周方向温度分布
の評価

1979年5月

柳原 敏・塩沢 周策・斎藤 伸三

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.

NSRR実験におけるジルカロイ被覆管の酸化膜厚さに
基づく円周方向温度分布の評価

日本原子力研究所東海研究所安全工学部

柳原 敏・塩沢 周策・斎藤 伸三

(1979年3月16日受理)

本研究は、NSRR実験で照射した燃料について、被覆管外表面の酸化膜厚さを円周方向に測定し、酸化膜厚さと被覆管表面の最高温度が強い相関を持つことから、円周方向の最高温度分布を推定した結果についてまとめたものである。特に、NSRR実験において熱電対で測定している温度が、その実験における被覆管表面温度の標準的な値を示しているのかという問題について、酸化膜の厚さから解決を試みたものである。被覆管表面の最高温度を評価する方法については、既にNSRR実験における測定温度と酸化膜の厚さから、最高温度と酸化膜の厚さの関係が得られており、その関係を使用した。この結果以下のことが明らかになった。

- (1) 熱電対の取り付け部では、熱電対がフィンとして作用したことによる冷却効果等により、その近傍に比べて常に温度が低い。
- (2) 被覆管の横断面についてみると、円周方向に大きな温度差が生じており、本実験において調べた試料では測定温度が約1200°C以上の場合には、約100~600°Cの温度差が出来ていることが予想された。この温度分布は、円周方向に沿って展開すると正弦波状になることが多いことから、ペレットが偏心してギャップ幅に差が生じ移動熱量が異なることによるものと考えられる。

なお、以上の結果については、NSRR実験にとどまらず、他の実験についても当てはまる問題であると思われ、今後これらの結果をふまえた詳細な検討が必要であろうと考えられる。

Evaluation of Circumferential Temperature
Distribution of Zry-4 Cladding based on Oxide Layer Thickness
in NSRR Experiments

Satoshi YANAGIHARA, Shusaku SHIOZAWA and Shinzo SAITO

Division of Reactor Safety

Tokai Research Establishment, JAERI

(Received March 16, 1979)

Maximum temperature distributions around circumference of the Zry-4 cladding of test fuel rods irradiated in the NSRR experiments were evaluated on the basis of measured oxide layer thickness.

The relationship between maximum cladding surface temperature and oxide layer thickness obtained in the NSRR experiments was used to evaluate circumferential temperature distributions.

Following are the results:

- (1) The depression of maximum temperature at thermocouple positions was estimated from the drop of oxide layer thickness. It was possibly caused by the fin cooling effect of thermocouples.
- (2) Large temperature differences 200°C-600°C around circumference of Zry-4 cladding were estimated in the temperature range of cladding over 1200°C. Because maximum temperature distribution around the circumference was sinusoidal, the temperature differences were caused by the eccentricity of UO₂ pellets.

These phenomena would also be observed in other experiments than NSRR.

Keywords: NSRR Reactor, Zircaloy, Zirconium Oxides, Oxide Layer Thickness, Zircaloy-Steam Reaction, Cladding Surface Temperature, Temperature Distribution, Thermocouple, Fin Cooling Effect, Pellet Eccentricity

目 次

1	はじめに	1
2	測定方法	3
	(1) 試料の作成	3
	(2) 熱電対	3
	(3) 酸化膜厚さの測定方法	3
3	測定結果	7
4	考 察	14
5	結 論	22
	謝 辞	22
	参考文献	22

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Test Methods	3
(1) Test Samples for Micro Scopic Observation	3
(2) Characteristics of Thermocouple	3
(3) Measuring Method of Oxide Layer Thickness	3
3. Test Results	7
4. Discussions	14
5. Conclusions	22
Acknowledgments	22
References	22

1. はじめに

原子炉の反応度事故 (RIA) や冷却材喪失事故 (LOCA) 等では、燃料の被覆管表面における冷却材への熱伝達が DNB 点を越えて膜沸騰領域に達すると、被覆材 (軽水炉では一般にジルカロイ) と水 (又は水蒸気) の反応により酸化膜が被覆管表面に形成される。⁽¹⁾⁽²⁾ この酸化膜の厚さは、一般的に被覆材が高温を保持していた時間と、その温度の函数により表わすことができ、炉外実験に基づいて実験式が作られている。⁽²⁾ 炉内実験については、反応度事故を模擬した NSRR 実験でも、熱電対を被覆管表面に取り付けて実測した被覆管表面温度と、顕微鏡による被覆管の酸化膜厚の測定結果に基づき、基本的には炉外実験の結果と同様にして、被覆管表面の最高温度と酸化膜厚の関係が見い出されている。⁽³⁾ 従って、これらの結果に基づいて、酸化膜厚さから被覆管表面温度を推定することが出来るはずである。この NSRR 実験においては、通常 Fig. 1 に示す大気圧・常温水カプセルの中に試験燃料を取り付け、照射実験を行っている。⁽⁴⁾ 照射中における計測項目の一つとして、素線径 0.2~0.3 mm φ, Pt/Pt-13%Rh の熱電対を被覆管表面にスポット溶接した温度測定系により、被覆管表面温度を測定しており、燃料挙動解析の上で重要な情報の一つとなっている。しかし、一回の実験において取り付けられる熱電対の数は限られており、また、必ずしも測定した温度がその燃料の代表的な値である保証はない。特に、熱電対を取り付けることによりフィンとして作用する冷却効果が指摘されており、熱電対による測定とは別な方法で温度を測定し、熱電対による測定結果を評価することが望まれている。

この目的に従って、本研究では、NSRR で照射実験した燃料について、円周方向の酸化膜厚さ分布を測定し、この結果より、被覆管表面の温度分布を推定した。

温度評価の方法としては、既に NSRR 実験において得られている最高温度と酸化膜厚さの関係を使った。これは、熱電対により測定した温度ヒストリーより酸化膜の厚さを求めると、最高温度から 100°C 低い温度範囲にある時間内に酸化膜の約 90% が形成されることが分っており、⁽³⁾ 計算の上からも最高温度と酸化膜厚さの強い相関関係が示されていることから、妥当な方法といえる。

なお、熱電対による測定温度 (TC 温度) と酸化膜厚さより求めた温度 (酸化膜温度) が、1400°C 以下ではよく一致しているが、それ以上では TC 温度の方が低くなる傾向がある (Table 3)。この現象については、文献(3)で両者の温度を比較した結果について詳細に述べられているので、本研究では言及せず、便宜的に酸化膜温度を使い、概略的な温度分布を評価するにとどめた。

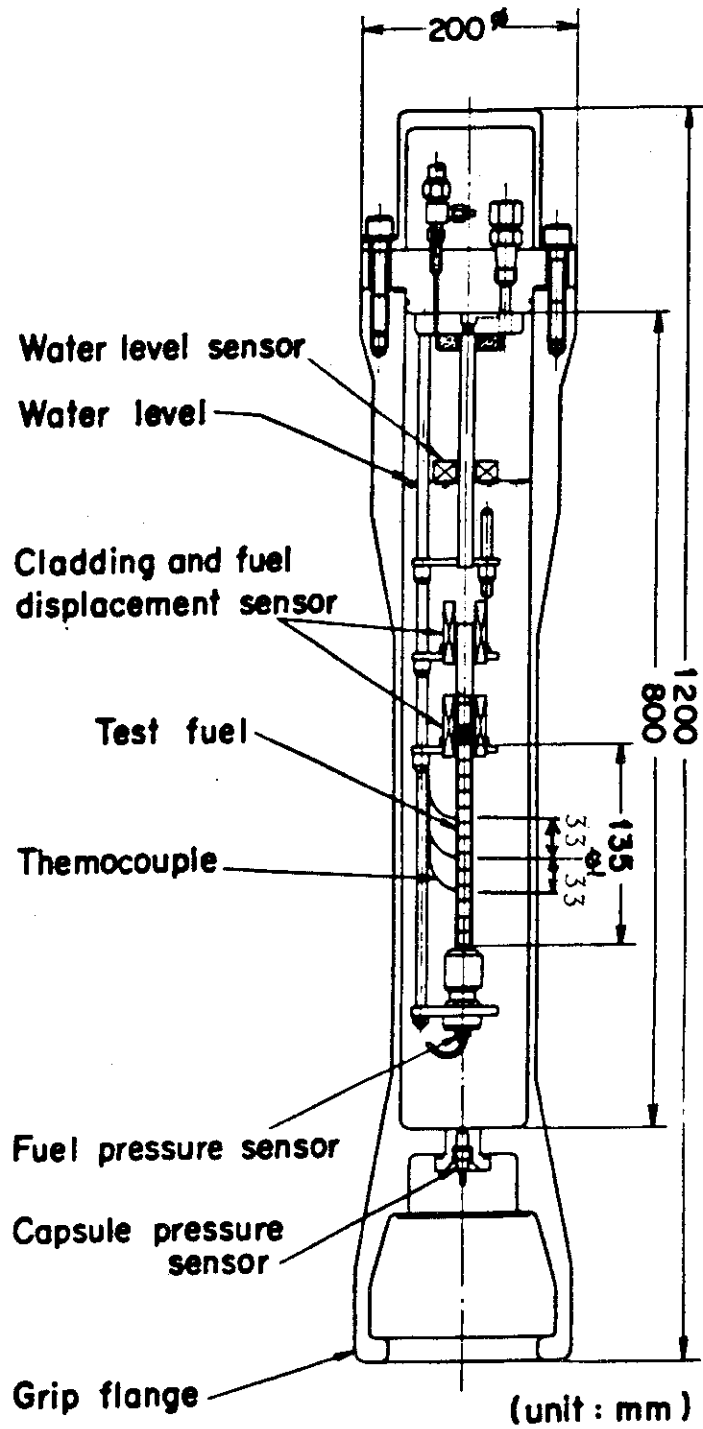


Fig. 1 Atmospheric water capsule & instrumentation

2. 測定方法

(1) 試料の作製

NSRR実験で照射した試験燃料のうち、標準試験（大気圧・常温水カプセル実験）の中から、熱電対により被覆管表面温度が測定できており、かつ酸化膜が精度よく測定できるものを選んで試料とした。これは、酸化膜の形成に影響をおよぼす被覆管表面温度が、冷却条件によって大きく変わるため、一般的な議論を行なう必要上最もデータの揃った、試験項目（主として燃料パラメータ試験）を選んだものである。なお、試験条件によっては酸化膜が剝離している燃料もあり、このようなものは試料作製の対象としなかった。

試料の作製については熱電対の取り付け部を多くの場合、円周方向に切断して、熱電対の取り付け部を含む被覆管の金相が観察できるようにした。切断後、試料は直径約3 cm、高さ約3 cmの円筒形樹脂に埋め込んだ後研磨した。樹脂の固化方法、研磨の方法等、試料作製の技術的な点については文献(3)に述べたので本文では省略する。観察した試料について、熱電対の位置（観察面に対応している）、熱電対の種類をTable 1およびFig. 2に示す。また、酸化膜厚は実験条件、燃料の種類によっても異なるので参考のためこれらについて記す。

(2) 熱電対

通常NSRR実験で使用している熱電対はPt/Pt-13%Rhであり素線径は0.2mmφないし0.3mmφである。被覆管への取り付けは、熱電対の素線を約1 mm間隔でスポット溶接する方法を採用しており、スポット溶接部は約1 mmの長さで被覆管に接している。Fig. 3に熱電対を取り付けた部分の顕微鏡写真を示す。図より、被覆管の熱電対取り付け部は溶接時の衝撃で凹んでおり、白金（又はロジウム）あるいはジルカロイが溶けて出来たと思われるコブが熱電対の両側に見られる。熱電対と被覆管が接している近傍で、扇状に色が変わっている部分が存在しているが、これは、白金（又はロジウム）とジルコニウムが反応して生じた合金相（第二相）であると考えられる。この写真について見る限り、熱電対は被覆管の肉厚の約10%まで埋めこまれており、又第二相は肉厚の約40%にまで達しているが、他の試料においても同様なことが言える。

(3) 酸化膜厚の測定法

試料の観察にはオリンパス製倒立型光学顕微鏡を用い、通常の場合400倍の倍率で酸化膜の厚さを測定した。測定法は、顕微鏡に付属しているスクリーン上に像を映し、この像の酸化膜の厚さを1ギス（ $1/20$ mmバーニア付）を用いて実測したものである。測定は、被覆管の円周上の一点を基準に取り、ほぼ 10° おきに試料を回転させて36点の測定を行なった。なお、熱電対取り付け部における酸化膜厚については、2本の熱電対の間で酸化膜厚さを幾つか測定し、その平均値を採った。しかし、この間の酸化膜厚はほとんど一定であった。

Table 1 Data on PIE specimens

Specimen No.	Test No.	Energy Deposition cal/g·UO ₂	Fuel Type	Thermocouple Position	Thermocouple Description
1	216-1	200	thin wall clad fuel	#2, #4	Pt/Pt-13%Rh 0.3mmφ
2	216-3	231	"	#2, #4	"
3	216-4	220	"	#2, #4	"
4	226-2	242	flat ended pellet fuel	#4A, #9A	"
5	"	"	"	#5A, #10A	"
6	"	"	"	#7A	"
7	"	"	"	#8A	"
8	232-16	219	narrow gapped fuel	#1, #5	"
9	"	"	"	#2, #4	"

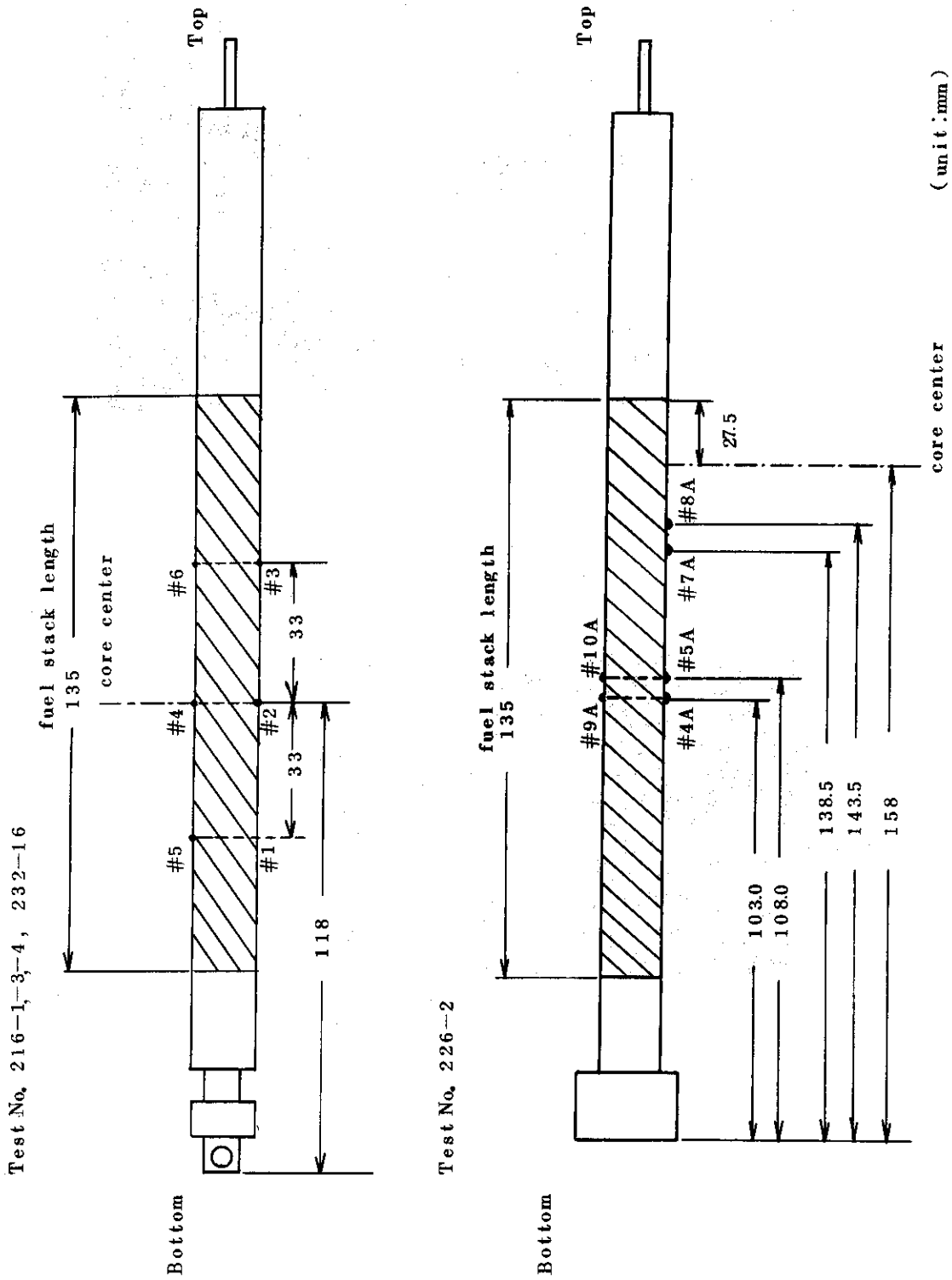


Fig. 2 Position of thermocouples instrumented on cladding surface

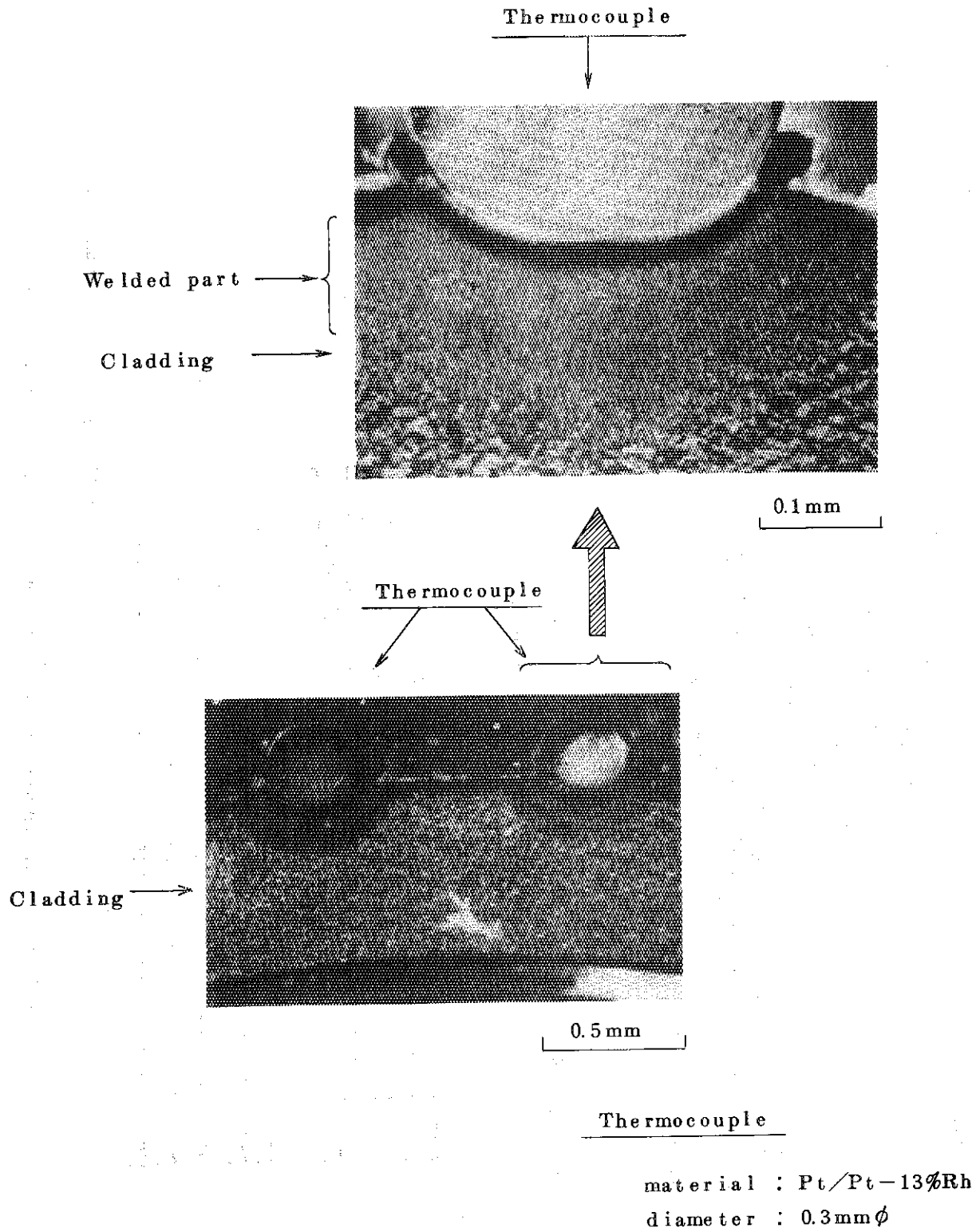


Fig.3 Transverse section of thermocouple attached on cladding surface

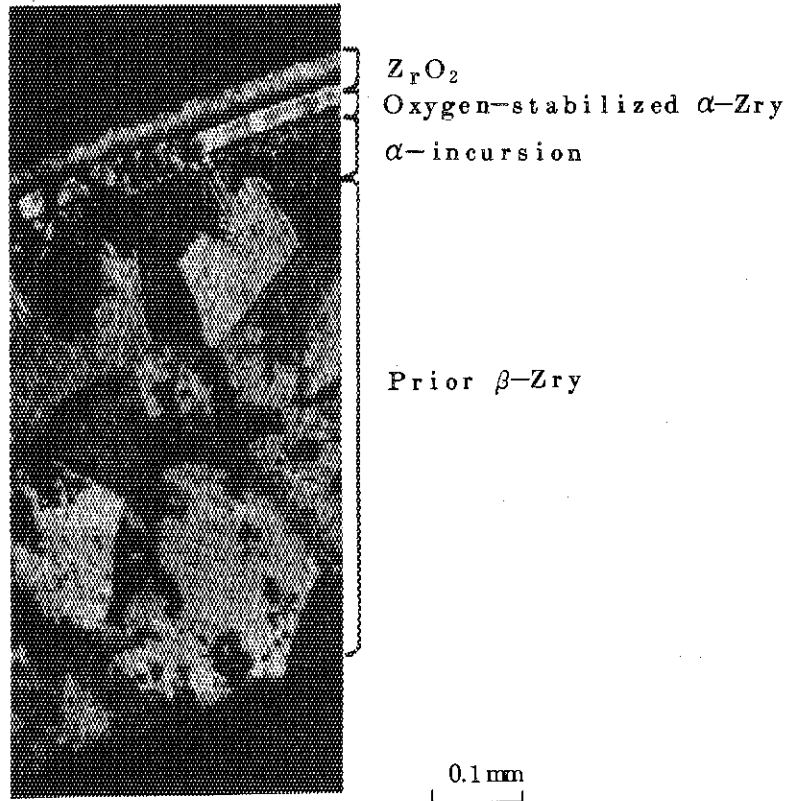
3. 測定結果

Fig. 4 に、照射後ジルカロイ被覆管の顕微鏡観察の一例を示す。図は、発熱量 $250 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ の照射条件で試験した標準燃料の被覆管を円周方向に切断して観察した結果である。被覆管表面より、 ZrO_2 相、安定化 α 相 (Oxygen stabilized α phase), prior- β 相の存在が認められる。NSRR 実験においては、図に見られる ZrO_2 相 (酸化膜) の厚さと被覆管表面の最高温度との間に強い相関が認められており、ゆえに、酸化膜厚さから被覆管表面の最高温度を求めることが可能である。Fig. 5 は、酸化膜厚さを円周方向で異なる数箇所において写真撮影した結果である。図より、同一の平面内においても、場所により酸化膜厚さが大きく異なっていることが分る。本図は、円周方向における酸化膜厚さの相違を概略的に見たものであるが、酸化膜厚さの分布を詳細に検討するために、試験条件の異なる幾つかの試験燃料から顕微鏡観察用の試料を作り、円周方向の酸化膜厚さの分布を測定した。Fig. 6~Fig. 9 は、測定結果の代表例を示したものである。図の Specimen No. は Table 1 のそれと対応している。図より、円周方向で酸化膜厚さが大きく異なっており、かつ、熱電対の取り付け部で常に減少していることが認められる。これらの事実は、円周方向の酸化膜厚さ分布を測定したほとんど全ての試料について言える。Table 2 は全ての試料について、熱電対取り付け部の酸化膜厚さと他の部分の酸化膜厚さを比較して示したものである。表より、熱電対取り付け部の酸化膜厚さは、照射実験の条件や測定位置により異なるが、平均の厚さ (熱電対の取り付け部近傍の値を除いた平均値) に対して約 20%~85%、最大の厚さに対して約 10%~70% と常に薄くなっている。また、最大値に対する平均値の割合は約 50%~80% である。さらに、Fig. 10 は熱電対取り付け部のごく近傍について酸化膜の厚さを測定した結果である。図より、熱電対の近傍になるほど酸化膜厚が徐々に減少しており、熱電対を取り付けたことによる影響を明らかに示している。この影響は円周方向ばかりではなく、軸方向についても言える。Fig. 11 は軸方向の酸化膜厚さの分布を熱電対取り付け部の近傍で測定した結果である。本図においても熱電対取り付け部で酸化膜厚さは減少している。

以上の結果をまとめると、

- (1) 酸化膜の厚さは熱電対取り付け部で常に減少している。
- (2) 酸化膜厚さは円周方向に大きな相違がある。

ことが分る。



Polarized light

Fig.4 Transverse section of the fuel rod
not failed at approximately 250 cal/g.UO₂

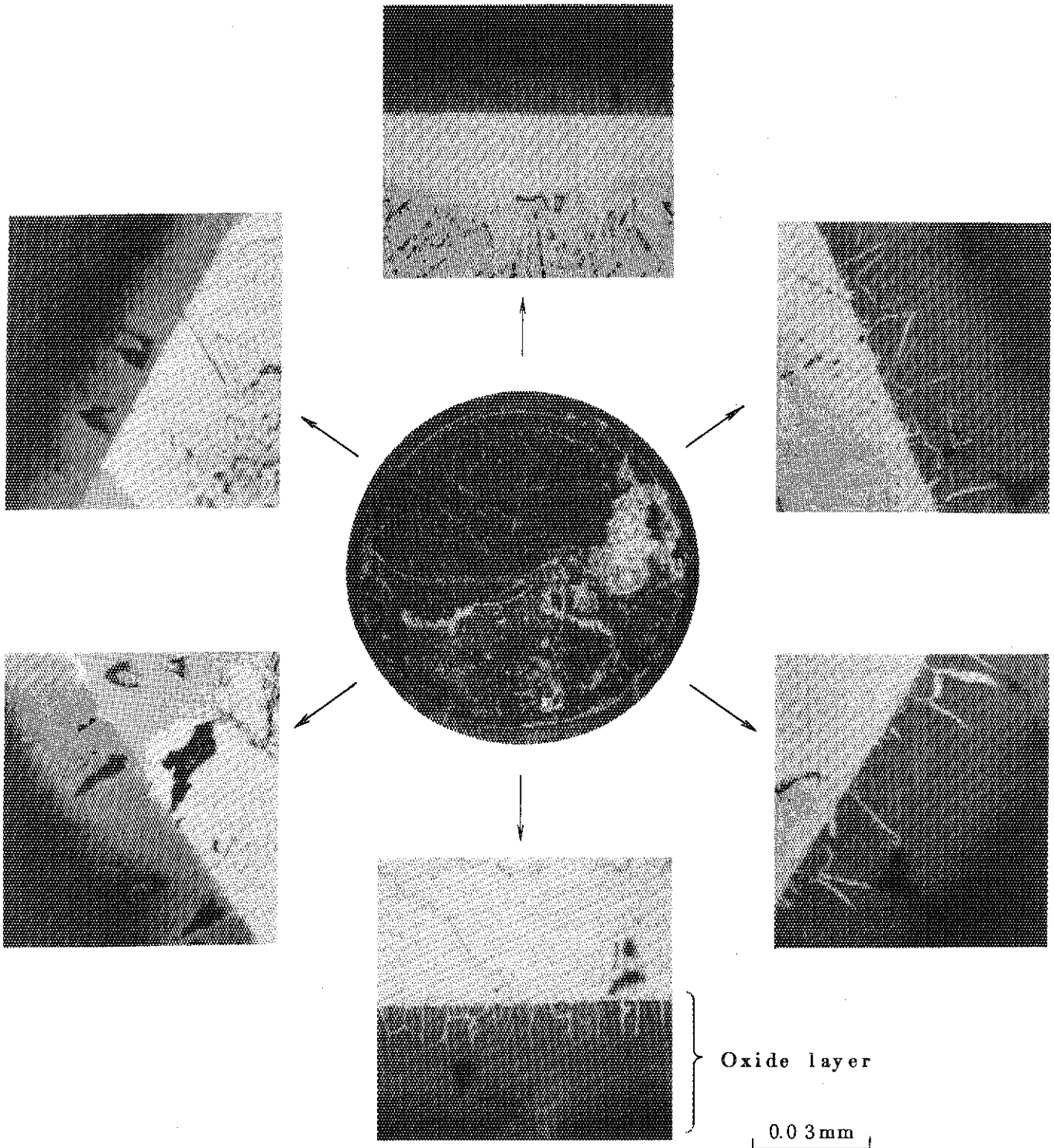


Fig.5 Circumferential variation of oxide layer thickness on Zry-4 cladding irradiated at 260 cal/g.UO_2

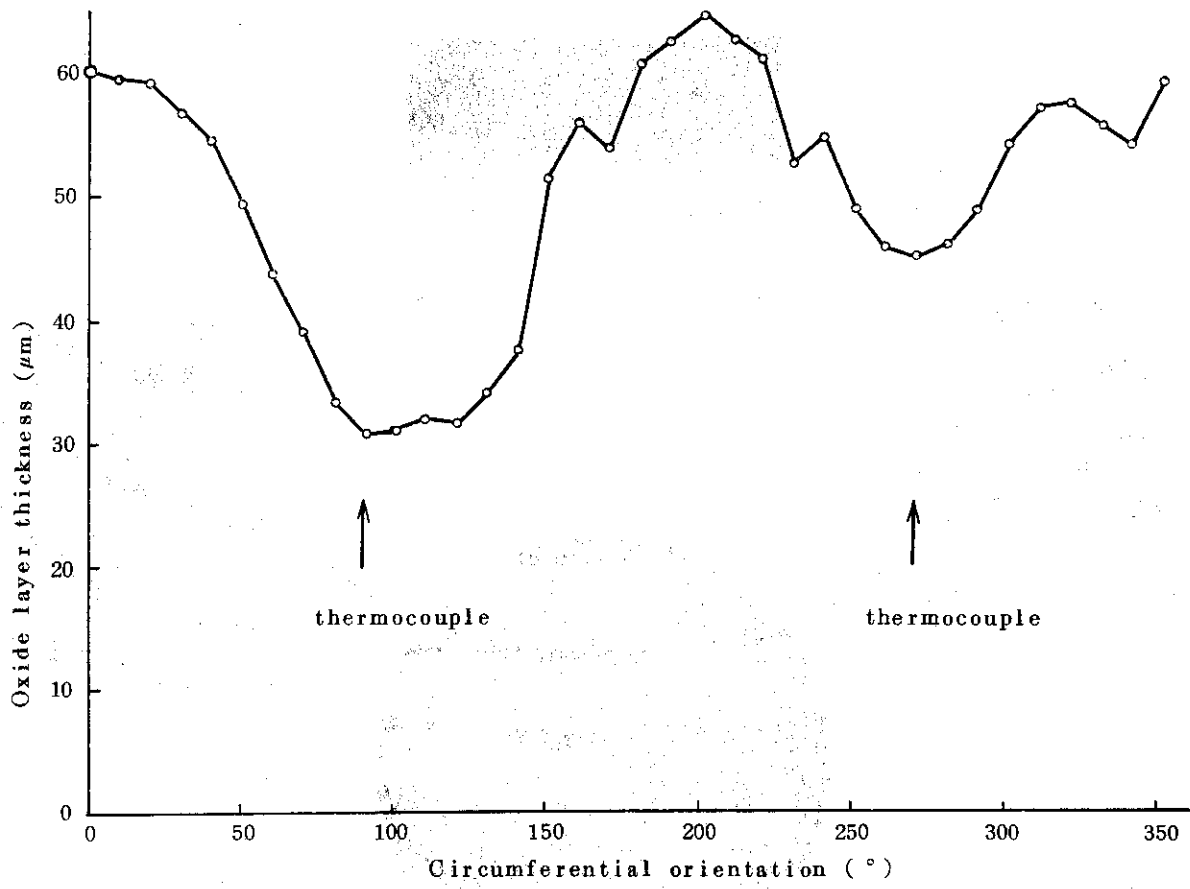


Fig.6 Example of nonuniform oxide layer thickness around circumference of specimen No.2.

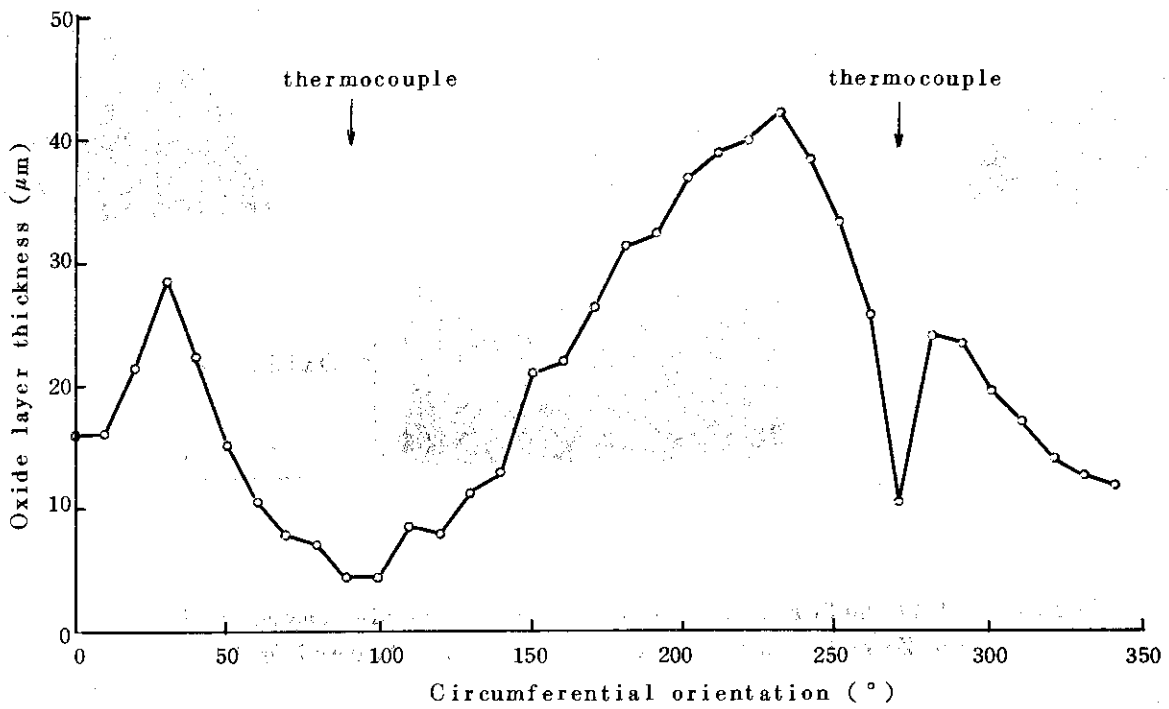


Fig.7 Example of nonuniform oxide layer thickness around circumference of specimen No.3.

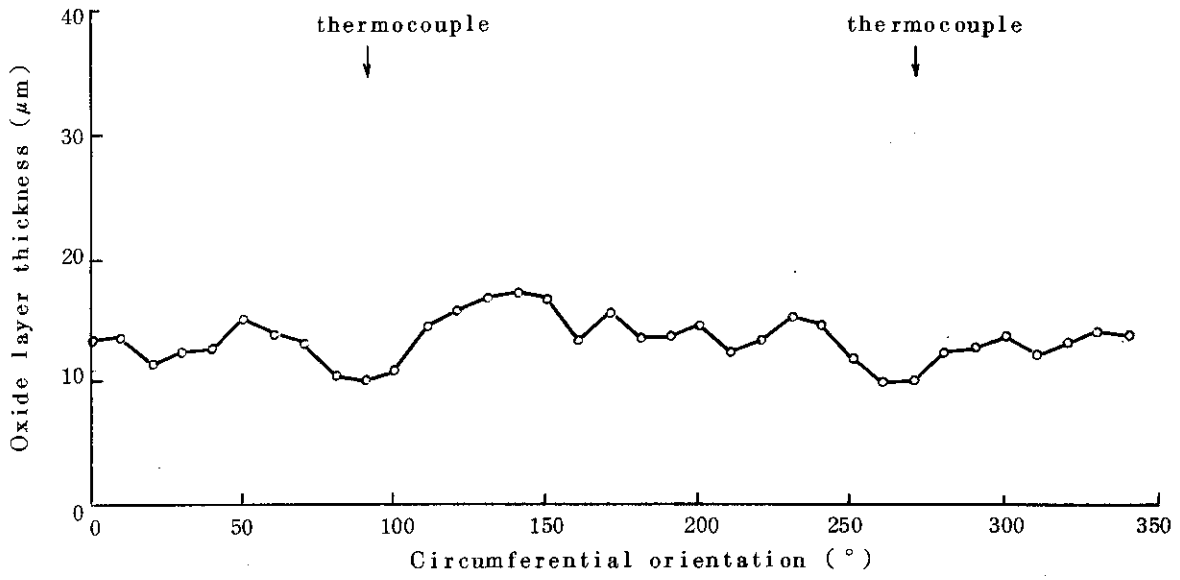


Fig. 8 Example of nonuniform oxide layer thickness around circumference of specimen No. 5.

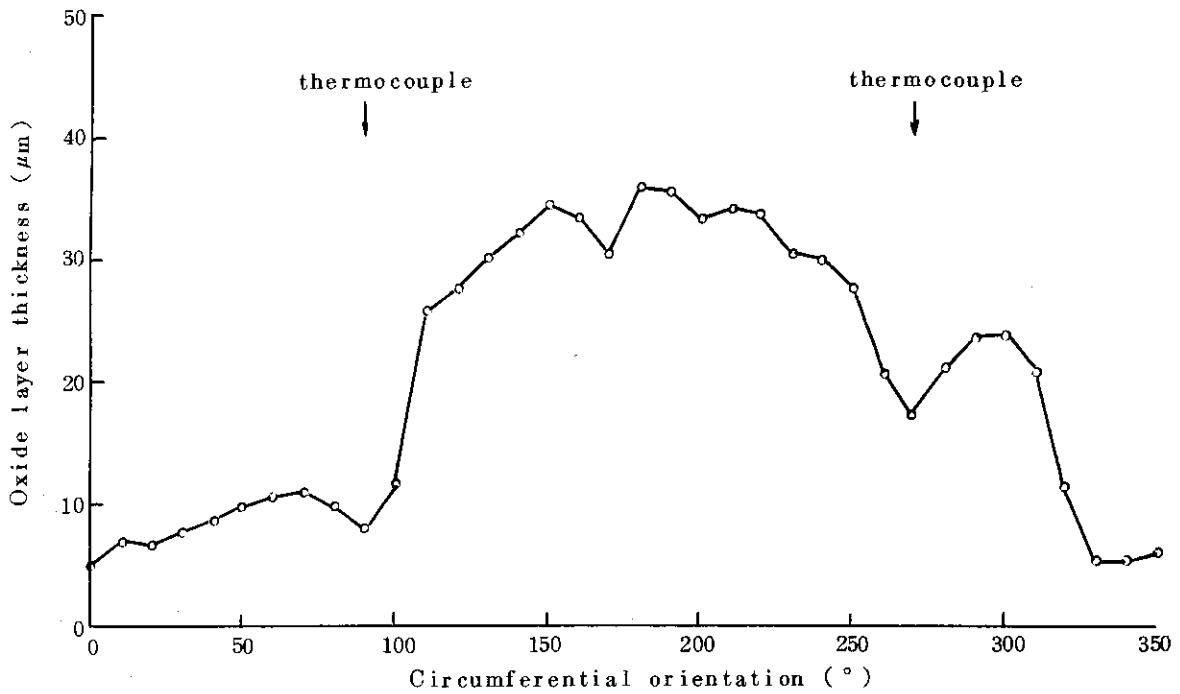


Fig. 9 Example of nonuniform oxide layer thickness around circumference of specimen No. 9.

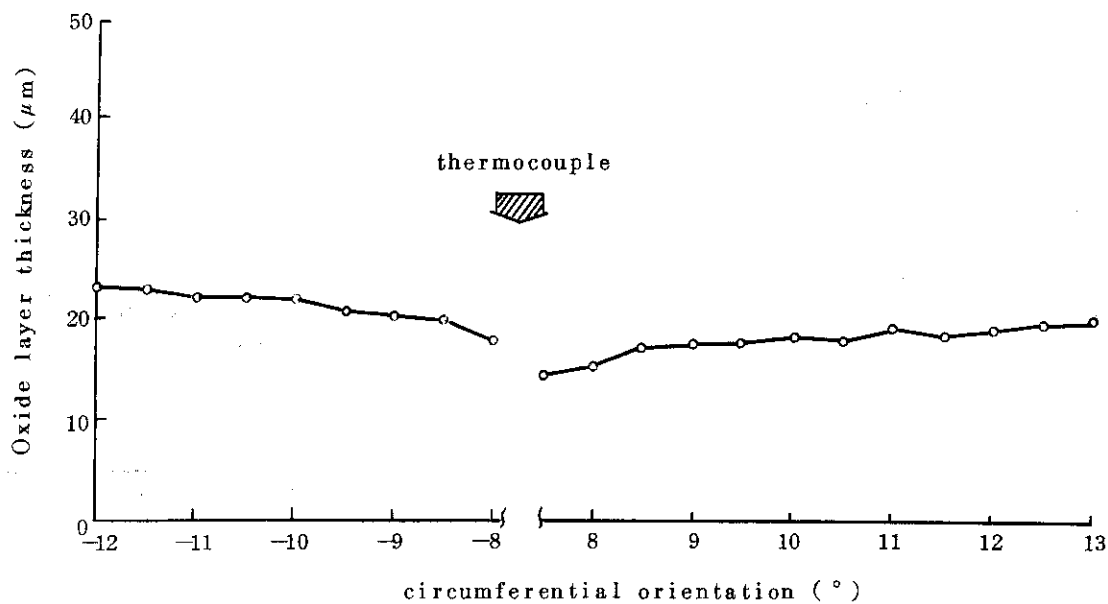


Fig.10 Example of oxide layer thickness distribution near thermocouple location of specimen No.9.

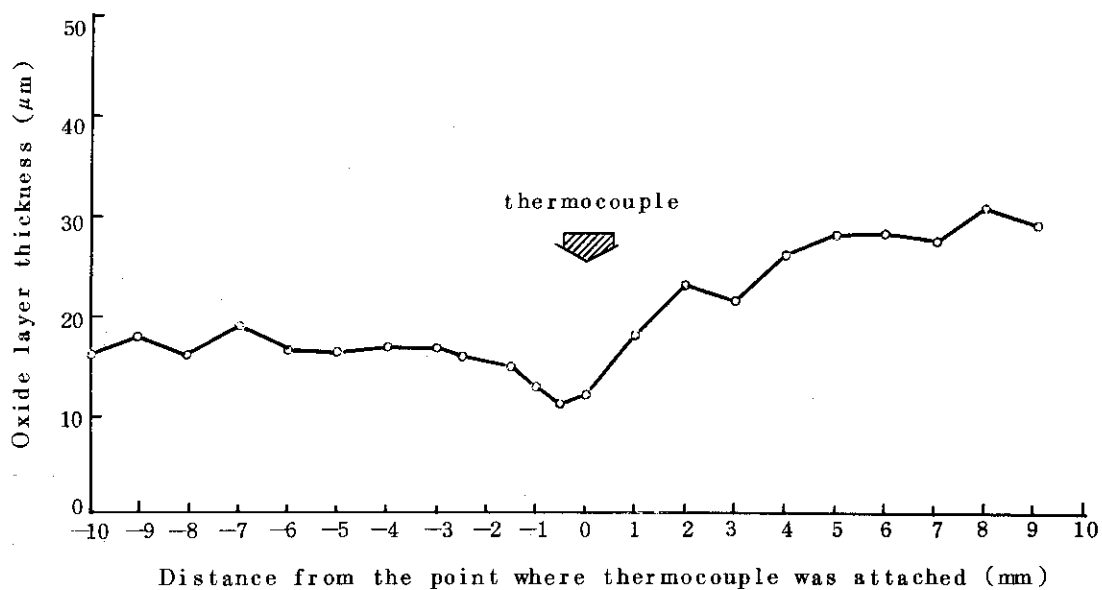


Fig.11 Example of longitudinal distribution of oxide layer thickness near thermocouple location

Table 2 Measuring Results of Oxide Layer Thickness

Specimen No.	Test No.	Energy Deposition (cal/g·UO ₂)	Measured Oxide Layer Thickness (μm)		Ratio of (%)				
			(1) Thermocouple location	(2) Average around the cladding surface	(3) Maximum thickness	(1) to (2)	(1) to (3)	(2) to (3)	
1	216-1	200	#2	9.26	1.413	#2	45	29	66
			#4			5.88	#4	63	
2	216-3	231	#2	5.223	6.438	#2	58	47	81
			#4			4.488	#4	86	
3	216-4	220	#2	2.197	4.200	#2	18	10	52
			#4			1.075	#4	49	
4	226-2	242	#4A	1.248	1.575	#4A	74	59	79
			#9A			7.78	#9A	62	
5	"	"	#5A	1.385	1.725	#5A	75	60	80
			#10A			8.85	#10A	64	
6	"	"	#7A	2.623	5.10	#7A	38	20	51
7	"	"	#8A	2.531	4.65	#8A	56	30	54
8	232-16	219	#1	2.506	4.188	#1	26	16	60
			#5			1.943	#5	78	
9	"	"	#2	2.095	3.500	#2	81	49	60
			#4			8.00	#4	38	

4. 考 察

被覆管の酸化膜厚さの分布を測定した結果、円周方向において差が大きく、かつ熱電対の取り付け部で厚さが減少していることが分った。NSRR実験においては被覆管の最高温度と酸化膜厚さに強い相関があることから、被覆管表面の温度が円周方向により異なっており、かつ、熱電対の取り付け部の温度が低かったことが考えられる。そこで、円周方向においてどの程度の温度差が生じているのかを評価した。

評価の方法としては、NSRR実験で測定された被覆管表面温度から炉外実験で得られている実験式を使って計算した酸化膜厚さと最高温度の関係を使った。この関係をFig. 12に示す。また酸化膜厚さの計算方法を以下に示す。

基本式 $y = \sqrt{ct}$

$$c = C_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

y : 酸化膜厚 (μm)

t : 反応時間 (sec)

T : 酸化温度 (K)

R : ガス定数 (cal/mol·K)

Q : 活性化エネルギー (cal/mol)

C_0 : 比例定数 ($\mu\text{m}^2/\text{sec}$)

差分型 $y_{i+1} - y_i = \frac{c_i}{2y_i} \Delta t_i$

初期条件: $y_1 = \sqrt{c_1 \Delta t_1}$

$T_i \leq 1850\text{K}$ $C_i = 2.15 \times 10^6 \exp(-35860/RT_i) (\mu\text{m}^2/\text{sec})$

JAERI⁶⁾

$T_i > 1850\text{K}$ $C_i = 1.6 \times 10^{11} \exp(-79800/RT_i) (\mu\text{m}^2/\text{sec})$

GE^{3),7)}

Table 3 に、上記の関係より求めた最高温度を示す。本表からは、各々の試料において程度の差はあるけれど、熱電対取り付け部の温度は平均温度よりも常に低く、その差は 50°C ~ 550°C の範囲にあり、また、円周方向の最も高い温度に対して 50°C ~ 600°C 低いことが分る。Fig. 13~Fig. 15 は上記の結果について、さらに円周方向の温度差を詳しく見るために、円周方向における最高温度分布の例を示したものである。本図からも、熱電対取り付け部における温度の低下、および円周方向の大きな温度差を認めることが出来る。そこで、このような温度分布を生ずる原因について以下に考察する。

(1) 熱電対取り付け部の温度低下について

Fig. 13~Fig. 15 から、熱電対の取り付け部で常にその近傍より温度が低いことが分った。またTable 3 では熱電対の取り付け部の温度と平均値との差が約 50°C ~ 550°C あることが分る。これは、熱電対を取り付けた結果、被覆管表面の温度挙動に何らかの影響が出た

と考えられる。この熱電対取り付け部の局所的な低温については、円周方向全体の温度分布の中に部分的に存在しているため、詳細な特徴を検討するのは難しいが、酸化膜厚さの分布および温度分布について調べた本試験の結果から次のことが概略的に言える。

- a. 熱電対の取り付けにより温度が低くなる部分は、被覆管が溶融していない場合、中心から円周方向への角度に換算して約 40° 、すなわち被覆管表面では約4 mmの範囲である。
- b. 一般に、被覆管表面が高温になるほど温度が低い傾向が顕著に現れ、かつ低温の範囲は大きくなる。

上述したような低温の原因としては、(i) ジルコニウムと白金(またはロジウム)が合金化した結果物性値(熱容量、熱伝導率等)が変化したため。(ii) 熱電対がフィンとして作用して熱伝達が良くなったため、等が考えられる。これらの原因については詳細な検討をしていないが、温度が低い範囲が熱電対のごく近傍ばかりでなく広いこと、被覆管表面が高温になるほどその領域が大きくなること、等から、フィン効果の影響がより大きいものと考えられる。熱電対がフィンとして作用したことによる冷却効果は別の試験からも推測できる。Fig. 16は加圧燃料を照射試験した後、被覆管直径の変形量をプロフィロメータで測定した結果である⁸⁾。熱電対の取り付け部で変形量が極小になっていることが顕著に認められる。このことは、熱電対取り付け部の温度が他より低かったために脹れ量が小さかったと考えられる。

(2) 円周方向の温度分布について

総ての測定試料について推定した被覆管の円周方向の平均温度、最高温度、熱電対取り付け部の温度を示したTable 3からは、円周方向に温度差が生じていたことが認められ、その差は $50^\circ\text{C}\sim 600^\circ\text{C}$ までの範囲にある。このような温度差が生じる原因について考察する。まず、被覆管の外表面における冷却条件については、燃料はFig. 1に示す実験カプセルの水中に置かれており、円周方向における幾何学的な冷却条件の相違は考えられず、ゆえに前節で述べた熱電対の取り付け部を除けば、冷却状態はほぼ均一と考えられる。一方、熱源である UO_2 ペレットについてみると、偏心および照射中における割れ、欠け等によりギャップ幅が変わるため、円周方向における熱伝達の非等方性が考えられる。しかも、温度分布は、一般的に一方向にのみ温度の高い部分があり、その形は正弦波曲線に類似していることから、 UO_2 ペレットが偏心していたためにギャップ幅が異なり、熱伝達の量に差を生じたことが原因であると考えられる。Fig. 17は照射後の燃料につき、ギャップ幅と酸化膜の厚さを同一の図にプロットした結果である。本図において、 UO_2 とジルカロイが反応を起こして結合している⁹⁾(ギャップ幅がなくなっている)部分で酸化膜の厚さは最大となり、ギャップ幅の増加に伴い酸化膜厚さが減少していることが分る。また、ギャップ幅の最大が約 $380\mu\text{m}$ となっているが、平均のギャップ幅が $95\mu\text{m}$ であることを考えると、高温になった被覆管が変形し、このように大きなギャップ幅が出来たものと考えられる。照射後における UO_2 ペレットの位置が必ずしも照射中における位置を示しているとは言えないが、本図については、一部で UO_2 ペレットと被覆管が強く結合しているため、照射中においてもほぼこのような位置を保っていたと考えられる。ゆえに、酸化膜厚さが円周方向で異なっている原因としては、 UO_2 ペレットの偏心が考えられる。

以上の点をまとめてみると、NSRR実験においてはTable 3およびFig. 13~Fig. 15に示したように、被覆管表面に大きな温度分布が生じていることが予想でき、この原因として

は、(1) 熱電対取り付け部の温度が低い現象は熱電対がフィンとして作用したことによる冷却効果による。(2) 円周方向に大きな温度差が生ずるのはペレットの偏心による影響が大きい。ことが考えられる。

なお、これらの結果はNSRR実験のみならず、原子炉の燃料挙動等を調べる実験上一般的に考えられる事実である。ゆえに、詳細な燃料挙動を調べる上には上記の影響を考慮することが必要であろうと考えられる。

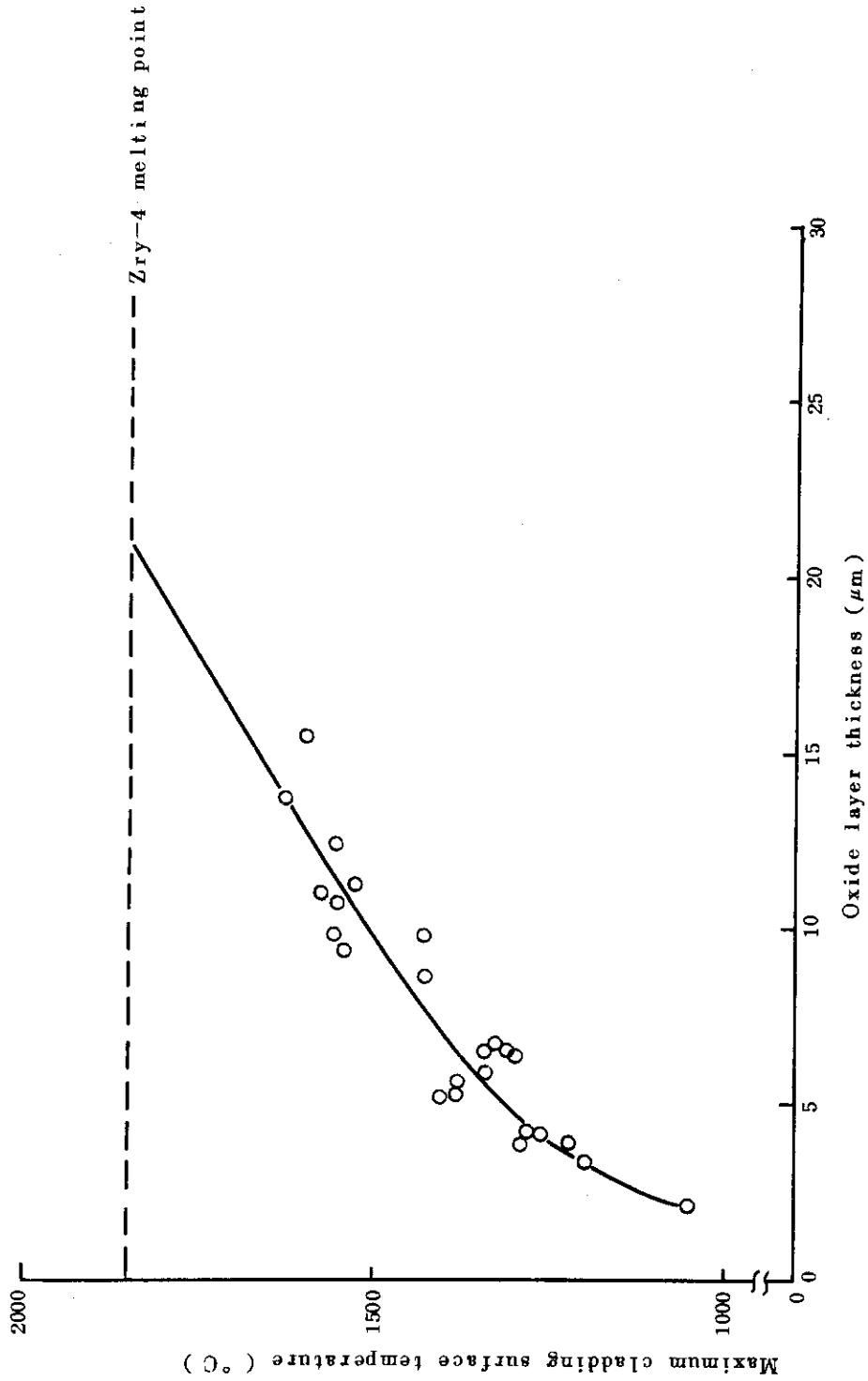


Fig.1.2 Relation between maximum cladding surface temperature and oxide layer thickness calculated from TC temperature.

Table 3 Estimated cladding surface temperature based on measured oxide layer thickness.

Specimen No.	Test No.	Energy Deposition (cal/g·UO ₂)	Estimated temperature based on oxide layer thickness (°C)			Difference between (°C)	T/C indication (°C)
			(1) Thermocouple location	(2) Average around the cladding surface	(3) Maximum temperature		
1	216-1	200	#2 1250	1500	1650	#2 250	#2 1220
			#4 1350			#4 150	#4 1280
2	216-3	231	#2 Melting	Melting	Melting	#2 600	#2 1560
			#4 "			#4 300	#4 1560
3	216-4	220	#2 1250	1800	Melting	#2 550	#2 1260
			#4 1500			#4 300	#4 1560
4	226-2	242	#4A 1450	1600	1700	#4A 150	#4A 1330
			#9A 1400			#8A 200	#9A 1300
5	"	"	#5A 1500	1600	1750	#5A 100	#5A 1340
			#10A 1450			#10A 150	#10A 1310
6	"	"	#7A 1500	1800	Melting	#7A 300	#7A 1410
7	"	"	#8A 1650	Melting	"	#8A 200	#8A 1430
8	232-16	219	#1 1400	Melting	"	# 450	#1 1380
			#5 1800			# 50	#5 1550
9	"	"	#2 1750	1800	"	# 50	#2 1560
			#4 1450			# 350	#4 1430

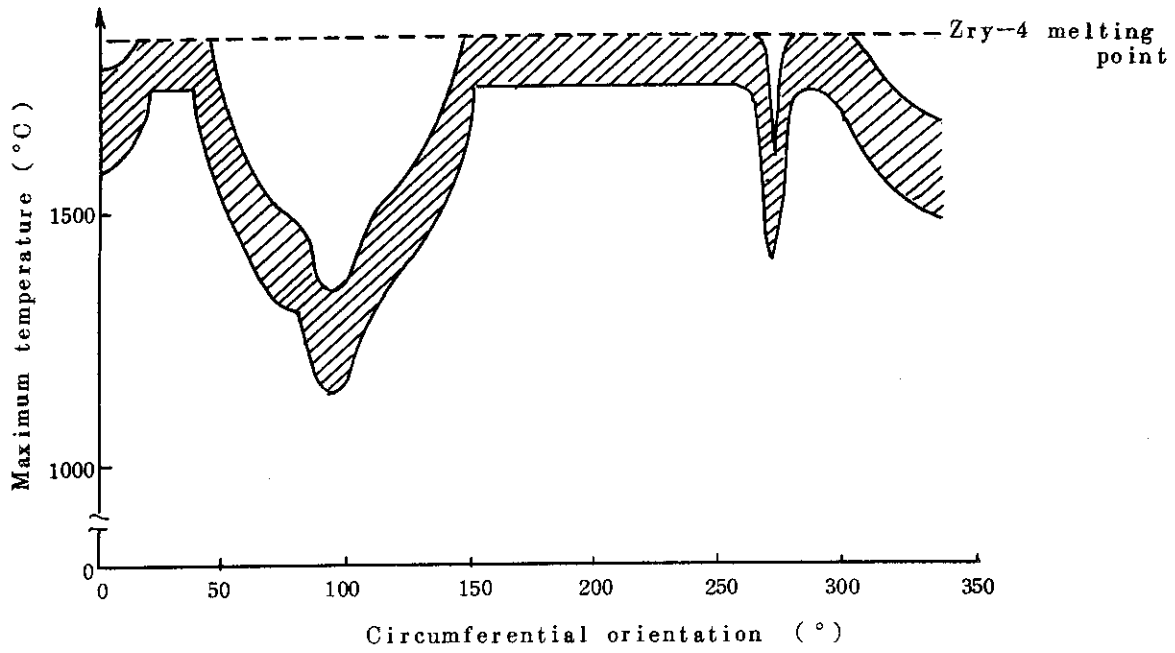


Fig.13 Estimated maximum cladding temperature based on oxide layer thickness around circumference of specimen No.3.

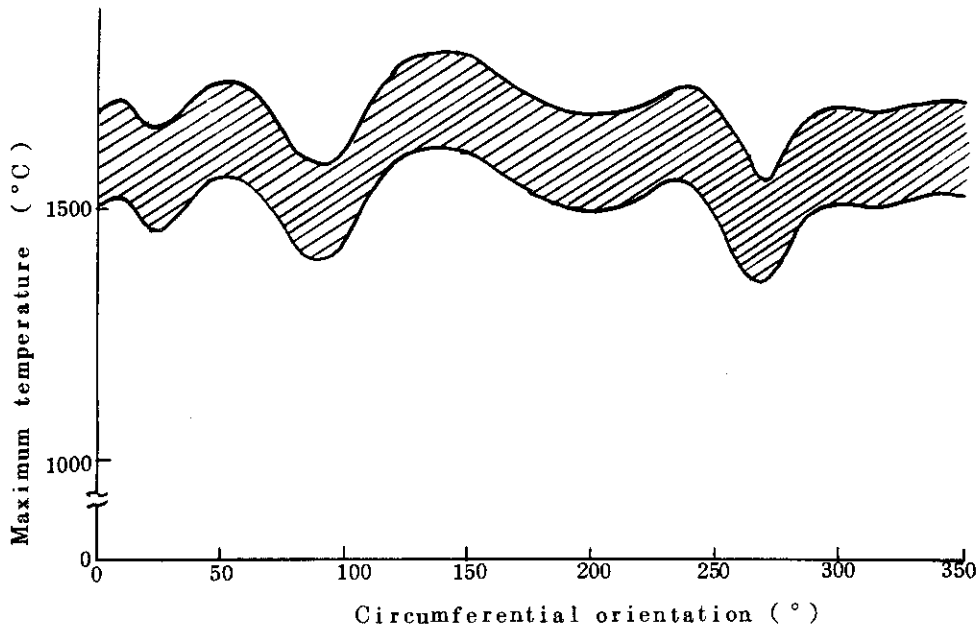


Fig.14 Estimated maximum cladding temperature based on oxide layer thickness around circumference of specimen No.5.

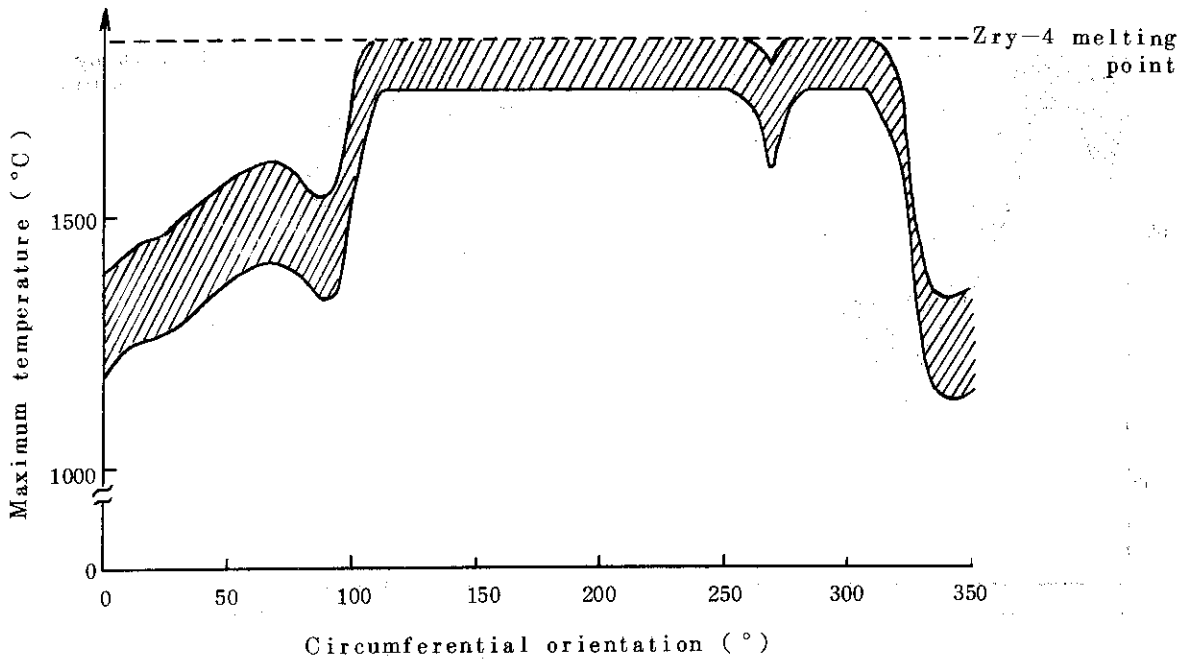


Fig.15 Estimated maximum cladding temperature based on oxide layer thickness around circumference of specimen No.9.

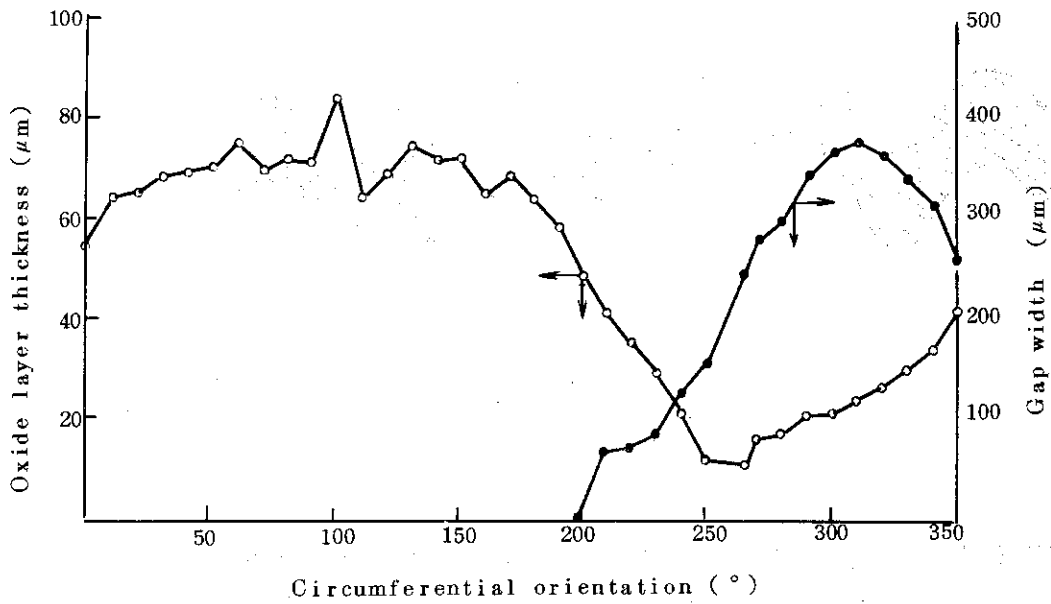


Fig.17 Oxide layer thickness and gap width around circumference

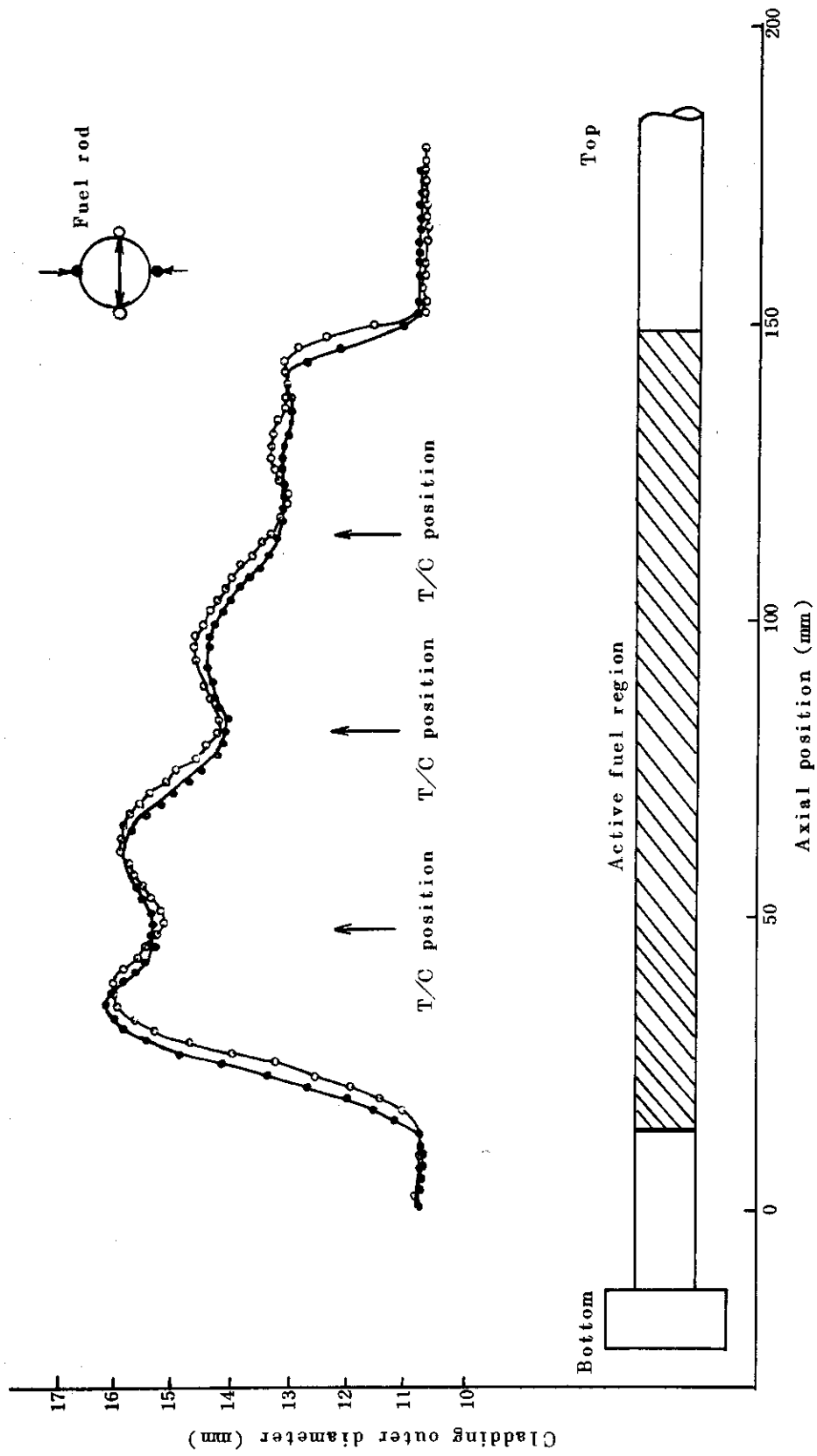


Fig.16 Diametral changes of pre-pressurized fuel rod after irradiation.

5. 結 論

ジルカロイ被覆管表面に形成される酸化膜厚さの分布を円周方向に測定し、炉外の実験式に基づいて得られているNSRR実験の酸化膜厚さと最高温度の関係より、被覆管表面の最高温度分布を評価した。この結果、以下の事実が明らかになった。

- (1) 熱電対の取り付け部では、熱電対がフィンとして作用したことによる冷却効果等により、その近傍に比べて常に温度が低い。本研究で用いた温度評価の方法によると、円周方向の平均温度に対して、大きい場合には約550°C低い例も認められた。
- (2) 被覆管の円周方向に大きな温度差が出来ており、本実験に用いた試料についてみると、測定温度が約1200°C以上の場合、約50°C~600°Cの温度差が生じていると予想できる。この温度分布は、円周方向に沿って展開すると正弦波の形になることが多いことから、 UO_2 ペレットの偏心による影響と考えられる。

謝 辞

本研究をまとめるに当り、総合的に御指導下さった反応度安全研究室・石川迪夫室長に深く感謝の意を表します。また、顕微鏡試料の製作準備に御助力願った、NSRR管理室・菊地孝行氏を始めとして反応度安全研究室、NSRR管理室の皆様方の御協力に衷心より謝意を表します。

参考文献

- (1) 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.
- (2) 燃料安全研究委員会, “軽水炉の冷却材喪失事故時燃料被覆のふるまい”, JAERI-M 7247(1977年)8月.
- (3) 塩沢周策他, “NSRR実験におけるジルカロイ被覆管の酸化量の評価”, JAERI-M 8187(1979年)2月
- (4) 山崎利他, “NSRR大気圧カプセル及び実験計装の現状”, JAERI-M 7105 (1977年)6月
- (5) “NSRR実験プログレスレポート・6”, JAERI-M 7977(1978年)12月
- (6) Kawasaki et al. J. Nuclear Science & Tech. 15〔8〕, 589(1978)
- (7) Ianni, P.W. APED-5454
- (8) “NSRR実験プログレスレポート・5”, JAERI-M 7554(1978年)3月
- (9) 塩沢周策他, “NSRR実験における UO_2 -ジルカロイ反応”近刊予定.

5. 結 論

ジルカロイ被覆管表面に形成される酸化膜厚さの分布を円周方向に測定し、炉外の実験式に基づいて得られているNSRR実験の酸化膜厚さと最高温度の関係より、被覆管表面の最高温度分布を評価した。この結果、以下の事実が明らかになった。

- (1) 熱電対の取り付け部では、熱電対がフィンとして作用したことによる冷却効果等により、その近傍に比べて常に温度が低い。本研究で用いた温度評価の方法によると、円周方向の平均温度に対して、大きい場合には約550°C低い例も認められた。
- (2) 被覆管の円周方向に大きな温度差が出来ており、本実験に用いた試料についてみると、測定温度が約1200°C以上の場合、約50°C~600°Cの温度差が生じていると予想できる。この温度分布は、円周方向に沿って展開すると正弦波の形になることが多いことから、 UO_2 ペレットの偏心による影響と考えられる。

謝 辞

本研究をまとめるに当り、総合的に御指導下さった反応度安全研究室・石川迪夫室長に深く感謝の意を表します。また、顕微鏡試料の製作準備に御助力願った、NSRR管理室・菊地孝行氏を始めとして反応度安全研究室、NSRR管理室の皆様方の御協力に衷心より謝意を表します。

参考文献

- (1) 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.
- (2) 燃料安全研究委員会, “軽水炉の冷却材喪失事故時燃料被覆のふるまい”, JAERI-M 7247(1977年)8月.
- (3) 塩沢周策他, “NSRR実験におけるジルカロイ被覆管の酸化量の評価”, JAERI-M 8187(1979年)2月
- (4) 山崎利他, “NSRR大気圧カプセル及び実験計装の現状”, JAERI-M 7105 (1977年)6月
- (5) “NSRR実験プログレスレポート・6”, JAERI-M 7977(1978年)12月
- (6) Kawasaki et al. J. Nuclear Science & Tech. 15[8], 589(1978)
- (7) Ianni, P.W. APED-5454
- (8) “NSRR実験プログレスレポート・5”, JAERI-M 7554(1978年)3月
- (9) 塩沢周策他, “NSRR実験における UO_2 -ジルカロイ反応”近刊予定.

5. 結 論

ジルカロイ被覆管表面に形成される酸化膜厚さの分布を円周方向に測定し、炉外の実験式に基づいて得られているNSRR実験の酸化膜厚さと最高温度の関係より、被覆管表面の最高温度分布を評価した。この結果、以下の事実が明らかになった。

- (1) 熱電対の取り付け部では、熱電対がフィンとして作用したことによる冷却効果等により、その近傍に比べて常に温度が低い。本研究で用いた温度評価の方法によると、円周方向の平均温度に対して、大きい場合には約550°C低い例も認められた。
- (2) 被覆管の円周方向に大きな温度差が出来ており、本実験に用いた試料についてみると、測定温度が約1200°C以上の場合、約50°C~600°Cの温度差が生じていると予想できる。この温度分布は、円周方向に沿って展開すると正弦波の形になることが多いことから、 UO_2 ペレットの偏心による影響と考えられる。

謝 辞

本研究をまとめるに当たり、総合的に御指導下さった反応度安全研究室・石川迪夫室長に深く感謝の意を表します。また、顕微鏡試料の製作準備に御助力願った、NSRR管理室・菊地孝行氏を始めとして反応度安全研究室、NSRR管理室の皆様方の御協力に衷心より謝意を表します。

参考文献

- (1) 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.
- (2) 燃料安全研究委員会, "軽水炉の冷却材喪失事故時燃料被覆のふるまい", JAERI-M 7247(1977年)8月.
- (3) 塩沢周策他, "NSRR実験におけるジルカロイ被覆管の酸化量の評価", JAERI-M 8187(1979年)2月.
- (4) 山崎利他, "NSRR大気圧カプセル及び実験計装の現状", JAERI-M 7105 (1977年)6月.
- (5) "NSRR実験プログレスレポート・6", JAERI-M 7977(1978年)12月.
- (6) Kawasaki et al. J. Nuclear Science & Tech. 15〔8〕, 589(1978)
- (7) Ianni, P.W. APED-5454
- (8) "NSRR実験プログレスレポート・5", JAERI-M 7554(1978年)3月.
- (9) 塩沢周策他, "NSRR実験における UO_2 -ジルカロイ反応" 近刊予定.