703. X線による燃料被覆管の残留応力測定

中 司 雅 文*

(1979年 10月25日 受 理)

(1980年 1月28日 再受理)

Measurement of Residual Stress in Fuel Cladding Tubes by X-Ray Method

By Masafumi NAKATSUKA

It is difficult to predict the residual stress distribution in FBR or LWR fuel cladding tubes using computer code or mechanical methods. In order to measure these stresses by X-ray method, the characterization of X-ray diffraction and optimum condition for stress measurement are investigated. Following conclusions are obtained:

- (1) The (211) $\text{CrK}\alpha$ and (2133) $\text{CuK}\alpha$ reflections are most suitable for the stress analysis of 316 stainless steel and Zircaloy-2 fuel cladding tubes, respectively.
- (2) Comparison between strain measured by X-ray and strain measured by strain gage shows good agreement in elastic region for both materials.
- (3) In order to obtain accurate results, it needs to remove surface more than $3\mu\text{m}$ by electro-polishing or acid etching.
- (4) There exists compressive residual stress in typical FBR fuel cladding tubes, and TIG welding of end plug induces additional compressive stress in welded portion or heat affected zone.
- (5) Residual stress distributions in Zircaloy-2 cladding tube deformed locally by the out-of-pile simulation tests, are obtained by the application of X-ray method.

KEYWORDS: fuel cladding tubes, residual stress, X-ray method, stress measurement, stainless steel-316, Zircaloy 2, welding, local deformation, X-ray diffraction, accuracy

I. 緒 言

核燃料要素の健全性は直接原子炉の経済性、安全性に影響を及ぼすので、燃料被覆管の強度を調べ、寿命を予測するために、燃料被覆管に発生する種々の応力を詳細に解析することが必要である。これらの応力のうち、燃料被覆管の製造時の加工によって発生する残留応力、燃料要素の端栓溶接部近傍に生じる残留応力等を、計算機コードなどの理論解析によって予測することは非常に困難であるため、従来この種の応力を求めた報告はほとんどないようである。

残留応力を測定する方法として、従来 Sachs のせん

孔法、層除去法、たわみ法、穴あけ法などの機械的な方法があるが、いずれも破壊測定である上に測定対象の面積が広いため、外径約6.5mmから約16mm程度の比較的小型の試料に属する燃料被覆管の応力分布を測定する目的には必ずしも適していない。

本報で用いたX線応力測定法は、Braggの回折条件から結晶格子面間隔の変化を測定し、そのひずみから材料の等方性を仮定して応力を計算するもので、非破壊検査の有力な手段としてその基礎的な測定技術は確立されており¹⁾、材料強度研究へ広く応用されている

* 東京芝浦電気(株)総合研究所(Res. and Develop. Center, Toshiba Corp.)。(日本核燃料開発(株)に出向)

ことは周知のとおりである^{(2)~(4)}。もちろんX線応力測定法にもケースバイケースで考えなければならない種々の技術的困難がある⁽⁵⁾。高速炉用燃料被覆管は冷間加工を受けた状態で使用されるので、X線法を応用する場合には相応力や表面効果の問題点⁽⁶⁾があり、また軽水炉用燃料被覆管は六方晶のZrを主成分とする合金であるので、特に集合組織もしくは異方性および弾性係数の回折格子面依存性などの問題を含んでいる⁽⁷⁾。さらに、これらの燃料被覆管はともに細径であることから結晶粒度、照射面積の問題などさまざまな技術的困難と固有の制限を伴っている。

しかしながら被覆管の強度は、管の外径膨脹等のマクロな挙動のみならず、応力腐食割れのように構造材料自身の化学反応過程によっても支配されているので、応力をミクロな視点から評価する必要がある。X線応力測定法は結晶に作用している応力、ひずみを直接観察し得ることなど他の方法にはない利点があり、技術的諸問題に注意を払いながら被覆管の応力測定に応用すれば充分有効な手段になり得ると考えられる。

このような観点から本報では、まず細径の試料である燃料被覆管の微小移動が可能である試料支持台を紹介し、次にステンレス鋼からなる高速炉用燃料被覆管とジルカイロ-2からなる軽水炉燃料被覆管のX線回折に適用して特性と最適測定条件を明らかにし、X線法適用の妥当性を検討したあと測定結果をまとめた。

II. 測定装置および方法

X線応力測定装置として、東京芝浦電気(株)製のX線回折装置(ADG-102型)のゴニオメータ軸(以下 θ 軸)上にFig. 1に示すような試料支持台を製作して取り付け付けた。本試料台では被覆管表面法線に対するX線入射角を変えるための回転角(以下 ψ 軸)が θ 軸と直交している。この機構は側傾法と呼ばれ、 ψ 軸を回転させることによって試料面法線と回折面法線とのなす角(以下この角を ϕ)を任意に設定することができ、低回折角度から高回折角度領域まで広い範囲に存在する回折線を用いることができる⁽⁸⁾。ここで用いた試料支持台(東芝応力試料台SU-035型)では、Fig. 1からわかるように、試料の長手方向および円周方向の微小移動が可能であり、長手方向および円周方向の応力分布が連続的に測定できる。また治具の交換によって試料に引張り荷重を作用させつつX線応力の測定もできる。

本装置では、曲面をもった試料を扱うので、試料位置のズレによる回折角の誤差が少ないように、X線光学学として次のような平行ビーム法を採用している。

Fig. 1 Device for measurement of strain distribution

すなわち、回折装置のX線管球から発したX線はダブルピンホール型のコリメータを通して試料に照射され、回折したX線が受光側のスリットを通して計数管に入る。また本測定では、すべて試料を計数管の走査速度の半分の速度で回転させながら測定する ψ 一定法⁽⁹⁾を用いることにする。使用したX線応力測定装置の概略をPhoto. 1に示す。

Photo. 1 X-ray stress measurement apparatus

X線応力測定法はよく知られているように、Braggの回折条件を満足した結晶格子面間隔の変化、すなわちひずみが回折角の変化に比例することを用いたもので、測定対象物が等方性で、かつ均質な弾性体と仮定すると、弾性力学の基礎式により ψ 軸に対して垂直方向の試料面表面上の応力 σ_z は次式で与えられる⁽⁸⁾。

$$\sigma_z = -\frac{E}{2(1+\nu)} \cot \theta_0 \frac{\partial(2\theta_0)}{\partial(\sin^2 \psi)}$$

ここで, E, ν : 材料のX線のヤング率, ポアソン比
 θ_0 : 無ひずみ状態での材料の回折角
 $\theta\phi$: 求めようとする応力の方向と試料面
 法線とを含む面内において種々の ϕ
 についての回折角

上式でわかるように, θ_0 が大きいほど精度がよいので θ_0 が 90° に近くなり, かつ充分強い回折X線ピーク強度が得られる特性X線と回折面を選んだ。

実際の測定においては, ステンレス鋼に対しては CrK_α 線を, ジルカロイ-2材については CuK_α 線の平行ビームをそれぞれ照射し, 回折X線を時定数16sのGM計数管で検出し, 1° 当り20mmになるように記録紙を送った。また, ピーク位置決定には半価幅法を一貫して採用した。

Ⅲ. 高速炉燃料被覆管の残留応力測定

1. 試料および測定条件

20%冷間加工のSUS316材をFig.2に示すような高速炉用の被覆管および端栓に加工したのち, 通常のTig溶接条件(最大電流20A, 回転速度3.5s/回, 通電時間9s, He雰囲気)で溶接して試料を作製した。溶接部近傍の金相観察の結果, デンドライト組織からなる溶接金属部が約1.3mmあり, その両端の熱影響部には明瞭な粗粒組織は認められなかった。また, 被覆管部の粒度はASTM No.9程度で直径0.7mmのX線照射範囲には約2,000前後の結晶粒が存在することになる。被覆管の化学成分および熱処理条件をTable 1にまとめている。なお, 測定に先立ってリン酸クロム酸溶液(正リン酸7溶, 硫酸3溶, 水, 無水クロム酸50g/l)⁹⁾中での電解研磨または王水による酸洗いによって表面の傷や加工層を取り除いた。

Fig. 2 Shape and dimensions of end plug and FBR fuel cladding

Table 1 Chemical compositions and heat treatments of specimen

Chemical analysis (%)		Mechanical properties (Temp.: R.T.)	
		Specimen (C)	(A)
C	0.061	U.T.S. (kg/mm ²)	84.6 53.6
Si	0.68	Yield strength (kg/mm ²)	76.5 23.6
Mn	1.69	Elongation (%)	28.0 65.5
P	0.011	Grain size (ASTM No.)	8.0 7.5
S	0.006	Cold work (%)	20.0 20.0
Ni	13.83	Annealing temp. (°C)	— 1,050
Cr	17.48	Annealing time (min)	— 30
Mo	2.24		
Co	0.03		
B	0.0003		
N	0.0006		

応力測定の精度を向上させるためには高角度の回折角(2θ)を利用する必要がある。特性X線として CrK_α 線を用いた時の回折強度をFig.3に示す。図からわかるように, オーステナイトの(220)面および(311)面の回折があった。回折強度のピークが 2θ で 129° 近くにある(220)面で ϕ を変化させると, 安定した回折のピークを生じるので, この回折面を採用することとした。

Fig. 3 Relation between diffraction intensities and diffraction angles

また応力値を求めるためのヤング率, ポアソン比として回折面に関係なく $20,500 \text{ kg/mm}^2$, 0.32 を用いた。その他の主な測定条件をTable 2にまとめている。

2. 測定結果および考察

(1) 熱影響と回折強度との関係

強圧延あるいは引抜きなどの冷間加工を強く受けた材料では, X線回折のピーク強度が ϕ に対して極端な依存性をもつことが知られている¹⁰⁾。Table 1での試料(C)(20%冷間加工材)の溶接部から3.5mm離れた点(b点)および端栓溶接時の熱影響部(a点)での ϕ と回

Table 2 Apparatus and condition for X-ray stress measurement

X-ray apparatus	Toshiba X-ray analyzer (Type ADG-102)
Characteristic X-ray	CrK α
Diffraction plane	(220)
Tube voltage	50 kV
Tube current	30 mA
Collimator	1 mm ϕ pinhole (0.7, 0.5)
Incident width of slit	0.4 mm
Scatter angle of slit	2°
Detector	GM tube
Scanning speed of detector	2°/min
Chart paper speed	40 mm/min

折強度との関係をFig. 4にまとめる。図をみると熱影響のないb点の回折強度分布はほぼ連続的に変化しており、若干の集合組織があることを示している。一方a点での結果は不連続な値を示しており、溶接時の熱によって試料の一部が再結晶化したことにより特定の方向で強く回折する傾向にあることがわかる。

Fig. 4 Dependence of diffraction intensity on ψ for specimen with as-welded end plug

溶体化処理をした試料(A)では、Fig. 5に示すように、この傾向はさらに強まる。これは再結晶が進み、かつ粗粒化するので一定の照射面積内で回折条件を満たす角度にある結晶数が ψ とともに変動するためであると考えられる。また、図をみると直径0.7 mmのコ

CHARACTERISTIC X-RAY
CrK α DIFFRACTION PLANE
(220)

○	30 mA 50 kV 1.0 mm ϕ 2 θ -129.05°
▲	14 mA 49 kV 1.0 mm ϕ 129.05°
●	30 mA 50 kV 1.0 mm ϕ 129.00°
○	30 mA 50 kV 0.7 mm ϕ 129.00°

ANNEALED CLADDING

Fig. 5 Dependence of diffraction intensity on ψ for annealed cladding

リメータでは強いピークを示した ψ の角度が少ない。このように不連続な強度分布しか得られない場合に精度を向上させるために、回折強度が極大になる ψ をあらかじめ選び出して応力測定を行なっている。

(2) 表面研磨の影響

金属材料の表面は一般的には、汚れや酸化膜におおわれていて特に冷間加工した試料の表面は著しい塑性流動を受けて加工変質層を形成している。X線の試料への侵入深さは数 μ m程度と小さいので、内部とは異なる加工層の影響が応力値に現れる。20%冷間加工したSUS316材(C材)の外表面をセンタレスグラインダを用いて研磨し、試料の表面状態と軸方向残留応力値との関係を各3回ずつ測定した結果をFig. 6にまとめる。なお、同図中には参考のために電解研磨後の大気中への放置時間の影響を示している。受け入れ材(電解研磨前)の場合には、 2θ - $\sin^2\psi$ 線図は折れ線を呈し測定値の誤差が大きいが、電解研磨後にはほぼ直線状態になっている。このことから加工変質層が残っていると回折角の分散が大きくなり応力値の誤差が大きいが、深さ約3 μ m程度除去すると表面層の影響が取り除かれて測定精度が向上することがわかる。

(3) 照射面積の影響

測定対象物である高速炉燃料被覆管は外径約6.5 mmの小型の試料であり、この試料上の応力分布を求めるためにはX線照射面積を可能な限り絞らなければ

Fig. 6 Effect of depth of electro-polishing on residual stress

ならない。一方、測定値の精度は回折に寄与する結晶数の増加とともに向上するので、広い照射面積が要求される。したがって実際の測定に際しては、所定の測定精度を確保できる最小内径のコリメータを選出する必要がある。Fig. 7は、試料(A)と(C)について 2θ - $\sin^2\psi$ 線図に及ぼすコリメータ径の影響を調べたものである。図をみると、冷間加工材では内径0.7と1.0mmのコリメータを用いた時の傾きはほぼ同じであるが、一方、焼鈍材では0.7mmの時には直線関係から大きく

Fig. 7 Relation between diffraction angle and $\sin^2\psi$

離れるが、1.0mmのコリメータから得られた結果はよい直線性を示していることがわかる。なお、焼鈍材では直線の傾きはゼロで無応力状態であることを示している。これらの結果から、冷間加工材では内径0.7mmのコリメータを用いてもよいが、焼鈍材では1.0mmのコリメータを使用すべきであることがわかった。

(4) 機械的なひずみとの比較

X線的に測ったひずみと、ストレインゲージなどで検出した機械的なひずみとの対応性を調べる目的で、試料に単軸引張り力を負荷できる試料支持台を用いた。被覆管の周方向に120°ずつ離れた3点のうち、2点にゲージ長5mmのひずみゲージを張り付けて供試材とし、さらに残りの1点にX線を照射して引張り力を加えながら各レベルでのひずみを求めた。2点のひずみゲージの値から試料には曲げ応力が発生していないことを確認している。Fig. 8には冷間加工材についての結果を示す。図をみると、それぞれの値は45°の傾きの直線上にほぼ一致している。これらの関係からX線的に測ったひずみの値と機械的なひずみは対応しており、X線的に求めたひずみ値の妥当性が示されている。

Fig. 8 Comparison between residual strains measured by X-ray and strains measured by strain gage

(5) 端栓溶接部の残留応力分布

典型的な高速炉燃料要素の端栓溶接部近傍の硬度、半価幅、軸方向残留応力等の分布の様子をFig. 9にまとめる。硬度の測定には荷重500gのマクロビッカース硬度計を使用した。また半価幅は $\psi=0^\circ$ での値である。これら両者の分布は非常によく似ており、ともに溶接金属部の縁から被覆管側に約1mm離れると溶

接の影響が及んでいないことがわかる。溶接したままの状態および溶接後 700°C まで加熱し、保持時間なしで炉冷した状態での軸方向残留応力の分布をそれぞれ●印および○印で表わしている。

Fig. 9 Axial distributions of hardness, half-value breadth and residual stress

図をみると、被覆管および端栓材には溶接前にすでに約 35 kg/mm² 前後の圧縮応力が存在しており、Tig 溶接によってビード部および熱影響(HAZ)部にはさ

らに圧縮応力が追加され、ビード部の縁から被覆管側に約 2 mm 離れた点まで影響を及ぼしていることがわかる。なお、700°C の加熱によって被覆管部の残留圧縮応力は急速に緩和するが、ビード部の残留圧縮応力はあまり低減していない。その結果 HAZ 部の外表面には軸方向に急激な応力勾配を生じている。

IV. 軽水炉燃料被覆管の残留応力測定

1. 試料

供試材としてジルコイ-2 からなる外径 12.5 mm, 内径 10.8 mm の典型的な軽水炉燃料被覆管(試料名 BWR)および同じジルコイ-2 からなる外径 16.46 mm, 内径 14.07 mm の燃料被覆管(試料名 ATR)を採用した。それぞれの化学成分を Table 3 にまとめている。測定に先立って試料の外表面をフッ硝酸溶液によって数 μ m 化学研磨し、表面の傷や加工層を取り除いて X 線を照射している。ジルコイ-2 は通常の使用温度範囲(<350°C)では α -Zr が主な結晶構造になっており¹⁰, この α -Zr は六方稠密構造($a_0=3.232$ Å, $c_0=5.147$ Å)であるので、著しく加工を受けると結晶軸が特定の方向に集中して集合組織を生じる。この集合組織の例として軽水炉燃料被覆管(BWR 材)の極点図を Fig. 10 に示す⁽¹³⁾。この図からわかるように、結晶の c 軸は半径方向から円周方向に向かって $\pm 30^\circ$ 付近に最も多く存在している。したがって、ジルコイ材は強い弾性および塑性異方性を伴っていることが予測される。

2. 測定結果および考察

(1) 回折面の影響

すでに述べたように、X 線応力測定を精度よく行うためには、 θ が 90° に近いような背面回折条件が必要

Table 3 Chemical compositions and mechanical properties of Zircaloy cladding

Chemical analysis						Mechanical properties (Temp.: R.T.)		
Alloy elements (%)			Impurities (ppm)					
	"BWR"	"ATR"		"BWR"	"ATR"		"BWR"	"ATR"
Sn	1.59	1.42	Al	36	<35	U.T.S.(kg/mm ²)	56.0	67.8
Fe	0.16	0.14	B	<0.25	<0.2	Yield strength (kg/mm ²)	40.1	53.0
Cr	0.11	0.10	C	110	170	Elongation (%)	34.5	27.4
Ni	0.06	0.06	H	<5	5	Grain size (ASTM No.)	12.5	12.0
Fe+Cr+Ni	0.33	0.30	Hf	71	68	Cold work (%)	70.7	58
			N	26	32	Annealing temp. (°C)	570	490
			O	1,170	1,040	Annealing time (h)	4.0	2.5
			Si	<50	57

Fig. 10 Pole figure of typical BWR fuel cladding (KNORR, D.B.: J. Nucl. Mat., 71, (1977))

であり、かつ広い範囲の ψ について強い回折が得られるように回折面を選ぶ必要がある。

Fig.11(a), (b)には、試料軸方向の応力を測定するため試料軸方向を ψ 軸と垂直方向に取り付けた状態で $\text{CrK}\alpha$ 線および $\text{CuK}\alpha$ 線を照射した時の回折角と回折強度とを示す。図中の各回折面は各ピークの 2θ に最も近い値である。 $\alpha\text{-Zr}$ の各回折面に対する計算値と測定値とは 2θ で約 0.5° 程度異なるが、これは Zry-2 中の他の合金成分の影響と考えられる。これらの図をみると、 $\text{CrK}\alpha$ 線では高角度での回折強度は弱く応力測定に適した回折角が得られないが、 $\text{CuK}\alpha$ 線による (2133) 面および $(10\bar{1}6)$ 面では、 ψ を変化させても S/N 比は $1.3\sim 2.0$ と他に比べると強い回折が得られた。

次に試料円周方向の応力を測定するため試料軸方向と ψ 軸とを平行にして $\text{CuK}\alpha$ 線を照射した時の回折面と回折強度との関係をFig. 12に示す。図をみると (0006) , (2133) , $(10\bar{1}5)$ 面で回折があるが、高い回折角になるほどピークが不鮮明になることがわかる。

Fig.13は、これらの回折面のうち最適のものを選び出すために試料に円周方向引張り荷重を与え、試料上の同一点を上述のそれぞれの回折面を用いて応力値を求めたものである。各回折面を用いた時の $\pm 80\%$ 信頼域は $\pm 2\sim \pm 3 \text{ kg/mm}^2$ 程度で大差はなかった。応力値の計算には S/N 比が低くなる ψ およ

び明らかに直線から離れる点はデータから落しており、また、ここでは回折面ごとの測定誤差を応力値で示しているが、それぞれの回折面でのヤング率、ポアソン比を用いずに、便宜上ジルコイ-2のバルクのヤング率、ポアソン比を用いている。なお、ジルコイ被覆管は弾性異方性をもっており、剪断応力項の影響は小さいのでこれらを落とすと表面では σ_n はほぼゼロであるので、次式が成り立つ。

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_n \\ \epsilon_t \\ \epsilon_l \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ \sigma_t \\ \sigma_l \end{Bmatrix}$$

ここで、 n, t, l : それぞれ被覆管の半径、円周、長手方向を意味する。

上の構成方程式から、次式が得られる。

$$\frac{\partial \epsilon_\psi}{\partial \sin^2 \psi} = (S_{22} - S_{12})\sigma_t + (S_{23} - S_{13})\sigma_l$$

したがって厳密には、直交異方性をもつジルコイ管

(a) $\text{CrK}\alpha$ -ray

(b) $\text{CuK}\alpha$ -ray

Fig. 11 Diffraction intensities of BWR cladding measured with $\text{CrK}\alpha$ - and $\text{CuK}\alpha$ -ray

Fig. 12 Diffraction intensities of ATR cladding measured with CuK α -ray

の場合には2方向の測定をする必要があるが、Fig. 10に例を示したような ψ 軸が円周方向 $\pm 30^\circ$ に程度傾いた被覆管の25°Cでの弾性コンプライアンスの測定値⁽¹²⁾を代入してみると、 σ_r, σ_t の係数はそれぞれ 13.3×10^{-12} , $0.3 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$ となり、後者は前者の2%程度と小さいので第2項は無視できる。このことから直交異方性をもつジルコイの場合も、通常用いられている均一等方性弾性論に基づいて応力値を求めた。

さて、以上のFig. 11~13より、試料軸方向の応力測定には(2133), (1015)面が、円周方向の応力測定には(1015), (2133), (0006)面がそれぞれ利用できるが、(2133)面は ψ が変化しても比較的安定した強いピークを示し、試料軸方向および円周方向の両方向の応力成分の測定に利用できることから、被覆管の応力測定には、この(2133)回折面を使用することにした。

(2) 検出器走査速度の影響

測定を効率的に行うには検出器(本試験ではGM管)の走査速度を速くすればよいが、ピーク位置がシフトして誤差が入る原因となる。また、 S/N 比が高々2.0程度であるのでピーク位置を読みやすくするには時定数を大きくすればよいが、回折強度曲線がひずんでくる。ピーク位置のズレは計測器の時定数と走査速度の積で決定され、その値が大きくなるほど誤差は大きくなるが、 $4^\circ/\text{min}$ の走査速度と32sの時定数までは測定値に及ぼす影響は認められないといわれている⁽¹⁾。表面の応力値が非常に小さいと考えられる570°C、4hの焼鈍材について、時定数を10sとし $2^\circ/\text{min}$ と

Fig. 13 Dependence of residual stress on diffraction plane

$1^\circ/\text{min}$ の走査速度で測定した結果をFig. 14に示す。

Fig. 14 Effect of detector speed on $2\theta - \sin^2 \psi$ relation

本試験ではX線の照射面積が狭いので、一般構造用鋼材の応力測定での回折強度より弱いため検出器の速度によって計数の統計変動による誤差が大きく、 $2^\circ/\text{min}$ の速度では応力値は -10.5 kg/mm^2 になる。また $2\theta - \sin^2 \psi$ の関係は直線から離れ、80%の信頼限界が $\pm 12 \text{ kg/mm}^2$ にも達しており、測定精度は低い。

一方、検出器速度が $1^\circ/\text{min}$ の場合には精度が向上

して応力値は -2.2 kg/mm^2 を示し、80%信頼限界も約 1 kg/mm^2 程度まで低下している。なお、局所的な応力分布を求めるにはX線照射範囲は狭いほどよいが、測定精度が低下する。そこで内径0.5, 0.7, 1.0 mmの3種のコレメータでX線を絞って測定したところ、精度よく応力値の求まる最小のコレメータ内径は1.0 mmであることを確認し、ジルカロイ被覆管の場合はすべて1.0 mmのコレメータを用いている。

(3) 機械的なひずみとの比較

X線で測定したひずみの妥当性を確認する目的で機械的なひずみとの比較を行なった。焼鈍したBWR被覆管に前章で述べた試料支持装置を用いて単軸引張り荷重を加え、電気抵抗式ゲージでひずみを測定するとともに、X線を照射して結晶に発生したひずみを測定した結果をFig. 15にまとめている。

Fig. 15 Comparison between residual strains measured by X-ray and strains measured by strain gage

X線法による結果は、信頼限界の幅が比較的広いものの、弾性範囲内では両者が一致することを表わしている45°の傾きをもつ直線上にはぼっており、X線応力測定の妥当性が示された。一方、引張荷重が大きくなり約0.35%以上の機械的なひずみを与えると直線から離れており、試料には弾性変形のみならず塑性変形も発生しつつあることを示している。その後、除荷すると直線から離れた塑性ひずみ部分はそのまま残留し、弾性ひずみのみが回復する。

(4) 残留応力測定例

被覆管の残留応力の測定例として、Fig. 16に示すようにPCMIを生じた時の被覆管の円周方向応力分布を中子拡散試験で模擬した。すなわち、中空アルミナペレットとAl棒を図のように被覆管内に挿入し、プ

レスでAl棒を圧縮させることによって、ペレットを半径方向に張り出して被覆管に局部ひずみを発生させた。その後、圧縮機より試料を取り外し、X線法により円周方向応力値の分布を求めた。参考のために被覆管外表面の硬さ分布および外径プロファイルも示している。硬度測定からは局部ひずみ分布の詳細を知ることとは不可能であったが、X線法で残留応力(ひずみ)を測ると被覆管には明確な応力分布があることがわかる。

Fig. 16 Circumferential stress distribution of cladding measured by X-ray method

さらに応用例として、実用炉の被覆管によく観察されるリッジと呼ばれる被覆管の竹の節状の変形部近傍の残留応力分布を測定した。ただし、試料としては照射した被覆管ではなく燃料ペレットの中心部に電気ヒータを挿入し、通電加熱により燃料ペレットの熱膨脹を模擬した炉外中心加熱試験で得た被覆管(BWR)を用いた。Fig. 17に測定結果を示すように、被覆管の変形は内外表面とも約 $20 \mu\text{m}$ 程度残留している。被覆管の外表面の軸方向残留応力も同図中に併記している。

X線応力測定によれば、リッジ部外表面には引張り

Fig. 17 Profile and axial residual stresses of cladding obtained from out-of-pile simulation test

応力が残留しているが、燃料ペレットの両端面から離れるに従って引張応力は低下していることがわかる。なお、被覆管の塑性変形が大きいにもかかわらず残留応力値が比較的小さいのは、上記試料が中心加熱試験中に 500°C 以上の高温下で変形したために、変形とともに焼鈍も同時に進行して応力緩和が起ったことによるものと考えられる。X線応力測定は表面層および深さ数 μm 程度までにある結晶の情報を利用するものであるため、試料の表面状態に特に敏感である。このことから、以上の例のほかに応力腐食割れのように表面層の応力状態に依存する現象の解明にも役立つであろうと思われる。

V. 結 論

高速炉および軽水炉燃料被覆管の残留応力分布を X

線的に求めるための試料保持台を製作したのち、典型的な燃料被覆管の X線回折特性と最適条件について検討し、2, 3 の測定を行なった結果から以下の結論が得られた。

- (1) SUS316材からなる被覆管の応力測定には $\text{CrK}\alpha$ 線による (220) 面の回折が利用でき、X線的に求めたひずみとストレインゲージで検出した機械的なひずみとは弾性範囲内で良好な一致を示した。
- (2) センタレスグラインダによる表面研磨を施した試料の測定値は分散が大きく、応力値を精度よく求めるためには酸洗ひまたは電解研磨によって、約 $3\mu\text{m}$ 以上の表面層を除去する必要がある。また、冷間加工材および溶体化処理材については、それぞれ内径 0.7 および 1.0 mm までのコリメータを用いて X線照射面積を絞ることができた。
- (3) 典型的な高速炉燃料要素の被覆管部には、溶接前にすでに圧縮応力が存在しており、端栓溶接後の熔融金属部および HAZ 部にはさらに圧縮応力が追加されている。700°C の短時間加熱により被覆管部の圧縮残留応力は急速に緩和した。
- (4) ジルカロイ-2 からなる被覆管の軸方向および円周方向の応力測定には、 $\text{CuK}\alpha$ 線による (2133) 面の回折を用いることが最も好都合であった。その際、精度よく応力値の求まる最小コリメータ内径は 1.0 mm であり、X 線的に求めた値と機械的なひずみとは良好な一致を示した。
- (5) 炉外模擬試験によって、ペレットと被覆管との相互作用を発生させた被覆管の残留応力分布を X 線を用いて測定することが可能になった。

— 参 考 文 献 —

- (1) 材料学会材料強度部門委員会：X線応力測定法標準，(1973)。
- (2) 平 修二：機械誌，78[681]，732 (1975)。
- (3) 材 料，X線材料強度特集号，20[219]，(1971)。
- (4) 同 上，28[306]，(1979)。
- (5) 白岩俊男，他：材 料，23[4]，133 (1971)。
- (6) 田丸武好，他：同 上，16[171]，972 (1967)。
- (7) MARION, R.H., et al.: The need for experimentally determined X-ray elastic constants, "Advances in X-ray Analysis", Vol. 20, (1975)。
- (8) 日本材料学会編："X線材料強度学"，(1973)。
- (9) ステンレス鋼便覧，p.779 (1976)，日本工業新聞社。
- (10) KÄLLSTRÖM, K.: Scand. J. Met., 4, 65 (1975)。
- (11) 森島淳好，他：JAERI-M 4881，(1972)。
- (12) CATIN, W.R., et al.: J. Nucl. Mat., 68, 345 (1977)。
- (13) KNORR, D.B., et al.: ibid., 71, 1 (1977)。