

JAERI-M

6200

原子炉内放射線による抵抗線ひずみゲージ
の照射挙動

1975年8月

熊谷 勝昭・横尾 宏・北原 種道・海江田 圭右

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.

原子炉内放射線による抵抗線ひずみゲージの照射挙動

日本原子力研究所・東海研究所・研究炉管理部

熊谷 勝昭，横尾 宏

北原 種道* 海江田圭右

(1975年7月16日受理)

原子炉内の放射線環境下における抵抗線ひずみゲージの挙動を調べるために一連の照射実験を行なった。主にベークライト基材，アドバンス（ニッケル-銅合金）素線のゲージをステンレス鋼又はアルミニウム合金の板に接着し，JRR-2に設置されたインパイル・ヘリウムループTLG-1中でゲージ温度を一定（約80°C）に保ちながら約300時間照射した。このときのみかけひずみ，及び素線-被測体間の基材に流れるリーク電流などを測定した。

結果は次のように要約できる。

- (1) 照射によるゲージ感度の変化及びゲージの絶縁劣化は殆んどなかった。
- (2) みかけひずみは放射線強度に依存して発生するものと，照射積算量に依存して発生するものの2つに分類できる。両者ともゲージ抵抗が減少する方向の変化であった。
- (3) 前者のみかけひずみは，主に γ 線によって基材中に流れるリーク電流に基づくものであると考えられる。一方，後者の原因は明確にすることができなかったが，ゲージ素線の放射線損傷による抵抗減少と推定される。
- (4) ハーフブリッジ又はフルブリッジ法により，みかけひずみを補償して，動的ひずみは勿論，短期間の静的ひずみも十分に測定できる。

* 現在：動力炉・核燃料開発事業団（大洗）

Study on the behavior of resistance strain gages
in nuclear radiation environments

Katsuaki KUMAGAI, Hiroshi YOKOO, Tanemichi KITAHARA* and Keisuke KAIEDA
Division of Research Reactor Operation, Tokai, JAERI

(Received July 16, 1975)

A series of irradiation experiments were carried out on the behavior of resistance strain gages in nuclear radiation environments. The gages made of bakelite base and advance (nickel-copper alloy) wire were bonded to stainless-steel or aluminium-alloy plates. They were inserted into an in-pile helium loop TLG-1 installed in the JRR-2 reactor, and irradiated at 80°C for nearly 300 hours, during which the apparent strain and the leakage current through the base material between the resistance wire and the plate were measured.

The results are summarized in the following:

- (1) The sensitivity change and the insulation-resistance deterioration of the gage are hardly observed.
- (2) The apparent strain observed can be divided into two components; one dependent on the radiation intensity and the other on the radiation fluence. Both of them indicate the decrease of the gage resistance.
- (3) The former apparent strain is possibly due to the leakage current through the base material induced by gamma-rays. The latter may be ascribed to the decrease of the wire resistance caused by the radiation damage.
- (4) Either the half-bridge or full-bridge method makes it possible to compensate the apparent strain and to measure static strain for a few days satisfactorily as well as dynamic strain.

* Present address: Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, Oarai-machi, Ibaraki-ken

目 次

1. まえがき	1
2. ゲージの照射効果	1
3. 実 験	2
3.1 概 要	2
3.2 照射試料	2
3.3 測定系	6
3.4 実験条件	6
3.5 実験手順	9
4. 実験結果と検討	9
4.1 感度と直線性	9
4.2 電気絶縁性	11
4.3 みかけひずみ	15
4.3.1 みかけひずみの発生	15
4.3.2 放射線強度に依存するみかけひずみ	15
4.3.3 照射積算量に依存するみかけひずみ	17
4.3.4 みかけひずみの補償	18
5. 結 論	19
6. あとがき	21

1 ま え が き

抵抗線ひずみゲージは小型で、取り扱いが簡単であり、しかも感度が高いため広い分野で使用されている。原子炉においても燃料要素の変形、燃料被覆管内のFP圧力、燃料棒及び制御棒の振動などの測定にゲージ使用の要求は高い。しかし、ゲージを高放射線下で使用する場合には擬似信号の発生や、ゲージの劣化が予想されるので、その効果を充分に調べておく必要がある。

ゲージの照射効果の研究はこれまでもなされてきた^{(1)~(5)}。それらの報告は、いずれも照射により大きなみかけひずみが発生し、測定上大きい誤差を伴うことを指摘している。2枚のゲージを使い、みかけひずみを補償する方法も試みられているが、まだ十分な結果が得られていない。またみかけひずみの発生原因は殆んど究明されていない。

ゲージには多くの種類があるが、薄板状のものと細い棒状のものに大別できる。前者は電気抵抗体としての細線や箔をプラスチックなどの基材に接着したゲージであり、一般に広く使用されている。後者は酸化マグネシウムなどで絶縁した電気抵抗細線をステンレス鋼などの細管に封入したゲージであり、高温条件下で使用できる。

原子炉内での使用には放射線による劣化の少ないセラミック基材の金属シーす型が望ましいが、国産品がなく、高価でもあり、且つ製品個々のばらつきが大きい。そこで一般に使用されている国産品で、比較的精度のよい測定ができ、200°C程度まで使用可能なベークライト基材—アドバンス素線型のゲージを対象にして、次の目的の実験を行った。

- ① 原子炉内の放射線によるゲージの感度や直線性の変化、絶縁抵抗の変化及びみかけひずみの発生を調べる。
- ② 放射線による影響の原因を調べる。
- ③ 複数のゲージをブリッジに組合せ、それぞれのゲージに生ずる照射効果を打消させる方法により、安定した測定の可能性を調べる。

2 ゲージの照射効果

ゲージを原子炉内で使用すると放射線により種々の照射効果が発生するが、ひずみ測定上問題となるのは、みかけひずみの発生と、感度の変化である。前者は圧力や応力の変化を長期間にわたって測るような静的ひずみ測定と振動や過渡的变化を測る動的ひずみ測定の両方に影響し、後者は動的ひずみ測定に影響する。

放射線下におけるひずみ計の指示出力 ϵ は電気抵抗の相対変化 $\Delta R/R$ に比例するから次式で表わされる。

$$\epsilon = \frac{1}{K_m} \frac{\Delta R}{R} = \frac{K}{K_m} \epsilon_0 + \frac{1}{K_m} \left\{ \alpha + K(\beta_1 - \beta_2) \Delta T \right\} + f(\phi, t)$$

- ここで K : 使用ゲージのゲージ率
 K_m : 使用ひずみ計のゲージ率
 ϵ_0 : 測定しようとする真のひずみ

1 ま え が き

抵抗線ひずみゲージは小型で、取り扱いが簡単であり、しかも感度が高いため広い分野で使用されている。原子炉においても燃料要素の変形、燃料被覆管内のFP圧力、燃料棒及び制御棒の振動などの測定にゲージ使用の要求は高い。しかし、ゲージを高放射線下で使用する場合には擬似信号の発生や、ゲージの劣化が予想されるので、その効果を十分に調べておく必要がある。

ゲージの照射効果の研究はこれまでもなされてきた^{(1)~(5)}。それらの報告は、いずれも照射により大きなみかけひずみが発生し、測定上大きい誤差を伴うことを指摘している。2枚のゲージを使い、みかけひずみを補償する方法も試みられているが、まだ十分な結果が得られていない。またみかけひずみの発生原因は殆んど究明されていない。

ゲージには多くの種類があるが、薄板状のものと細い棒状のものに大別できる。前者は電気抵抗体としての細線や箔をプラスチックなどの基材に接着したゲージであり、一般に広く使用されている。後者は酸化マグネシウムなどで絶縁した電気抵抗細線をステンレス鋼などの細管に封入したゲージであり、高温条件下で使用できる。

原子炉内での使用には放射線による劣化の少ないセラミック基材の金属シーヌ型が望ましいが、国産品がなく、高価でもあり、且つ製品個々のばらつきが大きい。そこで一般に使用されている国産品で、比較的精度のよい測定ができ、200°C程度まで使用可能なベークライト基材—アドバンス素線型のゲージを対象にして、次の目的の実験を行った。

- ① 原子炉内の放射線によるゲージの感度や直線性の変化、絶縁抵抗の変化及びみかけひずみの発生を調べる。
- ② 放射線による影響の原因を調べる。
- ③ 複数のゲージをブリッジに組合せ、それぞれのゲージに生ずる照射効果を打消させる方法により、安定した測定の可能性を調べる。

2 ゲージの照射効果

ゲージを原子炉内で使用すると放射線により種々の照射効果が発生するが、ひずみ測定上問題となるのは、みかけひずみの発生と、感度の変化である。前者は圧力や応力の変化を長期間にわたって測るような静的ひずみ測定と振動や過渡的变化を測る動的ひずみ測定の両方に影響し、後者は動的ひずみ測定に影響する。

放射線下におけるひずみ計の指示出力 ϵ は電気抵抗の相対変化 $\Delta R/R$ に比例するから次式で表わされる。

$$\epsilon = \frac{1}{K_m} \frac{\Delta R}{R} = \frac{K}{K_m} \epsilon_0 + \frac{1}{K_m} \left\{ \alpha + K(\beta_1 - \beta_2) \Delta T \right\} + f(\phi, t)$$

ここで K : 使用ゲージのゲージ率

K_m : 使用ひずみ計のゲージ率

ϵ_0 : 測定しようとする真のひずみ

- a : ゲージ素線の電気抵抗温度係数
 β_1 : 被測体の熱膨張係数
 β_2 : ゲージ素線の熱膨張係数
 ΔT : 被測体の温度変化
 $f(\phi, t)$: 照射により発生するみかけひずみ
 ϕ : 放射線の強度 (線束又は線量率)
 t : 照射経過時間

である。

照射による感度の変化は前式の K の変化として現われる。 K の変化は①ゲージ抵抗素線のポアソン比の変化, ②ゲージ基材や接着層の劣化などが原因となると考えられる。そこで感度変化の測定はゲージを貼った被測体に同一のひずみ ϵ_0 を与えたときの指示出力が, 照射前後において変化するかどうかを測定することに帰着する。

一方みかけひずみの測定は被測体は無ひずみ ($\epsilon_0 = 0$) の状態で照射し, あらかじめ測定した温度係数により補正することにより求められる。 $f(\phi, t)$ の測定には計器零点のドリフトやゲージのクリープなどが混入する可能性があるが, 照射実験に先立って計器及びゲージを長時間ウォーミングアップし, 安定化することにより, これらを見捨てる程度に低く押えることができる。

3 実 験

3.1 概 要

照射実験は JRR-2 (Japan Research Reactor-2) の水平実験孔 HT-2 に設置されたインバイルヘリウムループ TLG-1⁽⁶⁾ を使用して, その照射筒内で行なった。照射したゲージはベークライト基材及びアスベスト基材のゲージである。その仕様を Table 1 に示す。

またこのゲージを 1 枚～6 枚を 1 組として被測体に貼りつけた照射試料 (specimen) の一覧を Table 2 に示す。試料番号は実験目的と形状により 6 つのタイプ (A, B, C, D, E, F 及び G) に分けた。A タイプはみかけひずみの発生を測定するため, B タイプは Cd 被覆により熱中性子をカットしたときのみかけひずみを A タイプと比較するため, C タイプは基材の異なるゲージのみかけひずみをやはり A タイプと比較するための試料である。D タイプはみかけひずみの補償効果を調べるため, E タイプ及び A-5 は照射下において抵抗素線間及び抵抗素線-被測体間に流れるリーク電流を測定するための試料である。F タイプは内圧による円筒表面のひずみ応答を測定し, ゲージの感度と直線性の変化を調べるため, G タイプは一定振幅振動板のひずみ出力の変化を調べるための試料である。

3.2 照射試料

試料の形状の概略を Fig. 1 に示す。

(1) A タイプ

ベークライト基材-アドバンス抵抗素線からなる自己温度補償型のゲージ 1 枚を板状の被測

- α : ゲージ素線の電気抵抗温度係数
 β_1 : 被測体の熱膨張係数
 β_2 : ゲージ素線の熱膨張係数
 ΔT : 被測体の温度変化
 $f(\phi, t)$: 照射により発生するみかけひずみ
 ϕ : 放射線の強度 (線束又は線量率)
 t : 照射経過時間

である。

照射による感度の変化は前式の K の変化として現われる。 K の変化は①ゲージ抵抗素線のポアソン比の変化、②ゲージ基材や接着層の劣化などが原因となると考えられる。そこで感度変化の測定はゲージを貼った被測体に同一のひずみ ϵ_0 を与えたときの指示出力が、照射前後において変化するかどうかを測定することに帰着する。

一方みかけひずみの測定は被測体を無ひずみ ($\epsilon_0 = 0$) の状態で照射し、あらかじめ測定した温度係数により補正することにより求められる。 $f(\phi, t)$ の測定には計器零点のドリフトやゲージのクリープなどが混入する可能性があるが、照射実験に先立って計器及びゲージを長時間ウォーミングアップし、安定化することにより、これらを見捨てる程度に低く押えることができる。

3 実 験

3.1 概 要

照射実験は JRR-2 (Japan Research Reactor-2) の水平実験孔 HT-2 に設置されたインパイルヘリウムループ TLG-1⁽⁶⁾ を使用して、その照射筒内で行なった。照射したゲージはベークライト基材及びアスベスト基材のゲージである。その仕様を Table 1 に示す。

またこのゲージを 1 枚～6 枚を 1 組として被測体に貼りつけた照射試料 (specimen) の一覧を Table 2 に示す。試料番号は実験目的と形状により 6 つのタイプ (A, B, C, D, E, F 及び G) に分けた。A タイプはみかけひずみの発生を測定するため、B タイプは Cd 被覆により熱中性子をカットしたときのみかけひずみを A タイプと比較するため、C タイプは基材の異なるゲージのみかけひずみをやはり A タイプと比較するための試料である。D タイプはみかけひずみの補償効果を調べるため、E タイプ及び A-5 は照射下において抵抗素線間及び抵抗素線-被測体間に流れるリーク電流を測定するための試料である。F タイプは内圧による円筒表面のひずみ応答を測定し、ゲージの感度と直線性の変化を調べるため、G タイプは一定振幅振動板のひずみ出力の変化を調べるための試料である。

3.2 照射試料

試料の形状の概略を Fig. 1 に示す。

(1) A タイプ

ベークライト基材-アドバンス抵抗素線からなる自己温度補償型のゲージ 1 枚を板状の被測

Table 1 Specifications of Strain Gages Used

gage name	shape of element	base material	dimension (mm x mm)	material specified	max. temperature specified
KB-10-A1-16	wire	bakelite	21 x 8	stainless steel	180°C
KB-10-A1-23	"	paper impregnated with phenol resin	21 x 8	aluminium	"
KB-6-A1-16	"		16 x 6	stainless steel	"
KFB-2-C1-16	etched foil		8.5 x 5.5	"	"
MT-10-A1	wire	asbestoes	26 x 8	not specified	450°C
		asbestoes impregnated with silicon resin			

Material of resistor element : advance(nickel-copper alloy)

Electrical resistance : 120 Ω

Gage factor : 2.0~2.1

Adhesive : PC-6(phenol resin)

Manufacturer : KYOWA DENGYO

体に接着した試料である。被測体の材質はステンレス鋼及びアルミニウムで、寸法は厚さ1.0mm巾10mm、長さ35mmである。ステンレス鋼は700°C、アルミニウムは300°Cまで加熱することにより内部応力を除去した。ゲージと被測体との接着にはメーカー指定のフェノール系熱硬化樹脂接着材(PC-6)を使用した。被測体無しずみの状態に保つため、一端が自由になるように照射用ホルダ(アルミニウム製)に取り付けた。リード線は直径1mm、長さ5mのフォーマル銅線を使用し、温度補償をするためゲージの一端に1本、他端に2本の合計3本を結線した(3線結合方式)。また試料温度測定のため被測体の端部に熱電対を取り付けた。

(2) Bタイプ

熱中性子の影響を除去するため、Aタイプと同一の試料を厚さ1mmのカドミウム板で被覆してある。被覆したことによる熱的影響はループの冷却ガスで除去した。

(3) Cタイプ

アスベスト基材のゲージを使用しているほかは全てAタイプと同様の試料である。

(4) Dタイプ

みかけひずみを補償するため2枚及び4枚の同一規格のゲージを並べて接着した試料である。被測体の材質はステンレス鋼で、寸法は厚さ1.0mm、巾25mm、長さ30mmであり、その他についてはAタイプと同様である。

(5) Eタイプ

ゲージ基材を通して抵抗素線間に流れるリーク電流を測定するためにゲージを交互に3枚ず

Table 2 Summary of irradiation experiments

Specimen No.	Objective	Gage used		Material of plate	Radiation intensity *			Irradiation time (h)
		gage name	number		n_{th} flux ($\times 10^{12}$ n/cm ² s)	n_f flux ($\times 10^{12}$ n/cm ² s)	dose rate ($\times 10^6$ R/h)	
A-1	apparent strain	KB-10-AI-16	1	stainless steel SUS-27	3.1	0.82	10	204
A-2	"	"	1	"	3.0	0.80	10	202
A-3	"	"	1	"	0.80	0.23	2.5	202
A-4	"	"	1	"	13.0	3.5	40	125
A-5	" and leakage current	KB-10-AI-23	1	aluminium alloy AIP3 (2S)	13.0	3.5	40	125
A-6	apparent strain	KFB-2-CI-16	1	stainless steel SUS-27	10.0	2.8	35	585
B-1	"	KB-10-AI-16 (Cd covered)	1	"	---	0.80	10	202
C-1	"	MT-10-AI	1	"	13.0	3.5	40	125
D-1	compensation of apparent strain	KB-10-AI-16	2	"	3.0	0.80	10	202
D-2	"	KB- 6-AI-16	4	"	10.0	2.8	35	585
D-3	"	"	4	"	10.0	2.8	35	585
D-4	"	KFB-2-AI-16	4	"	10.0	2.8	35	585
D-5	"	"	4	"	10.0	2.8	35	585
E-1	leakage current	KB-10-AI-16	6	"	3.0	0.80	10	202
F-1	strain of cylinder surface	KB- 6-AI-16	4	"	9.0	2.5	32	585
G-1	strain of vibrating plate	KB-10-AI-16	2	"	3.1	0.82	10	204

* at the reactor power of 10MW

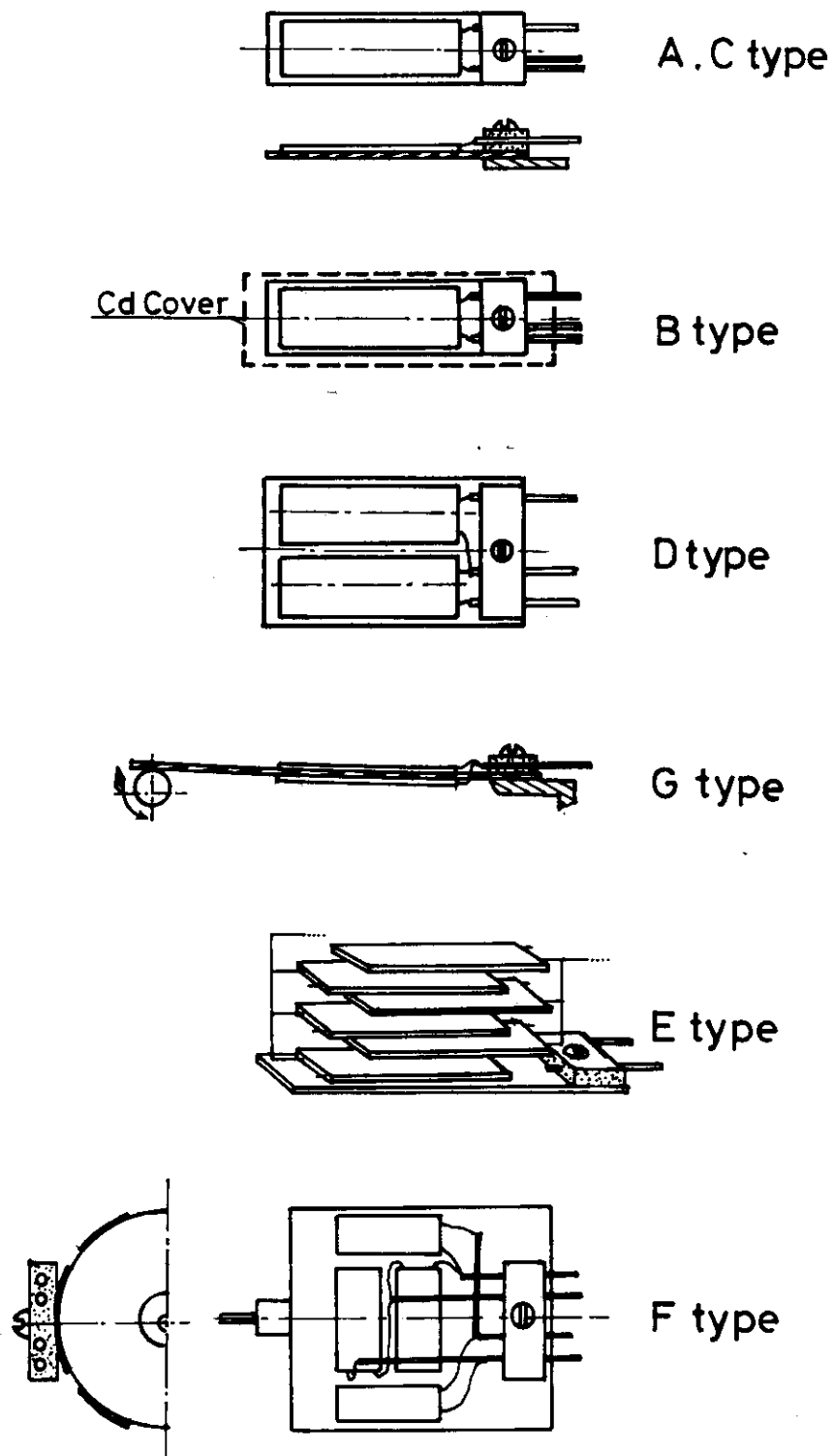


Fig. 1 Illustration of various types of specimens irradiated.

つ計 6 枚を重ねて、ステンレス鋼板に接着した試料である。リード線は 2 本のフォルマル銅線でそれぞれ 3 枚のゲージに接続した。

(6) Fタイプ

直径 30mm, 長さ 40mm, 肉厚 2mm のステンレス鋼製のカプセルの表面に横方向と縦方向にそれぞれ 2 枚ずつゲージを接着した試料である。このカプセルには銅管が接続してあり、照射中にもカプセル内へ任意の圧力を加え、それぞれのゲージに対する温度や放射線の影響を打消して、ひずみを測定できる。

(7) Gタイプ

ループ冷却ガスの流れを利用して回転する風車に取りつけたカムによって、一定振巾で振動するステンレス鋼板(巾 10mm, 長さ 40mm, 厚さ 1.0mm)の上下の両面へ 1 枚ずつゲージを接着した試料であり、それぞれのゲージに対する放射線や温度の影響を相殺することができる。Fig. 2 に試料の写真を示す。

これらの試料は 2~5 個を組合せて照射ホルダに取りつけた。

3.3 測定系

Fig. 3 に測定系の概略図を示す。ゲージはブリッジボックスを通じてひずみ計に接続した。静的ひずみ出力は打点式記録計で記録し、動的ひずみは電磁オシログラフで記録した。Fig. 4 にゲージのブリッジ構成を示す。1 枚のゲージを使用する A, B, C タイプ試料の結線は“3 線結合方式”とし、Fig. 4(1)のようにブリッジの一辺に接続した。2 枚のゲージを使用する G-1 及び D-1 のゲージは Fig. 4(2)のようにブリッジの隣り合う 2 辺に接続した。4 枚のゲージを使用する F-1 及び D-2~5 は Fig. 4(3)のようにアクティブゲージとダミーゲージが隣り合うように接続した。

ブリッジボックスは共和電業製の 1 辺が 120Ω の DB-120B 型を、又ひずみ計は同社の DPM-6AT 型と DM-6 型を使用した。ブリッジの印加電圧は交流 5 kHz, 3.5 V である。

試料 E-1 及び A-5 の照射中におけるリーク電流測定は、乾電池でバイアスを印加し $100k\Omega$ の抵抗を間に挿入し微小電圧計で測定した。

照射前後の電気絶縁抵抗はテスター、500V メガー及び照射中と同じリーク電流測定法によって行なった。

3.4 実験条件

ゲージの照射は JRR-2 の 1 運転サイクル(10MW, 約 300 時間)を通して行なった。試料の温度はループ冷却ガス温度を調節することにより $80 \pm 5^\circ\text{C}$ に維持した。

ループの照射筒内における熱中性子及び速中性子束 ($> 1\text{MeV}$) の最高値はそれぞれ 2×10^{13} 及び $6 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2 \text{ sec}$ である⁽⁶⁾。γ線量率の最高値は約 $7 \times 10^7 \text{ R/h}$ である*。中性子束及び γ線量率の照射筒内における分布形は殆んど同一で、炉心側より 25cm 離れると約 1/10

* ループ照射筒内の γ熱測定値 (0.4 w/g) をもとに、JRR-2 の VT-2 孔における γ線量率と γ熱測定値⁽⁷⁾との関係を利用して推定した値である。

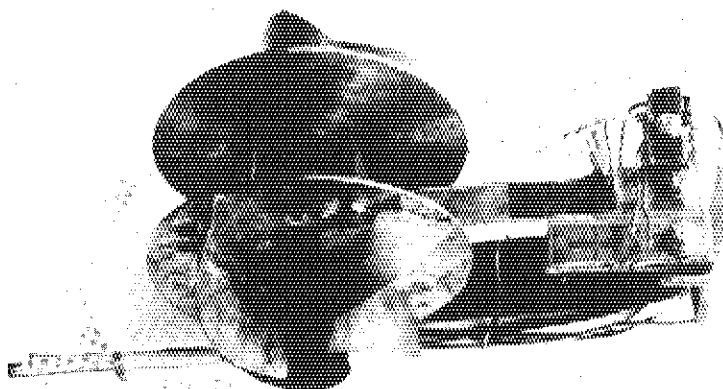


Fig. 2 G-type specimen.

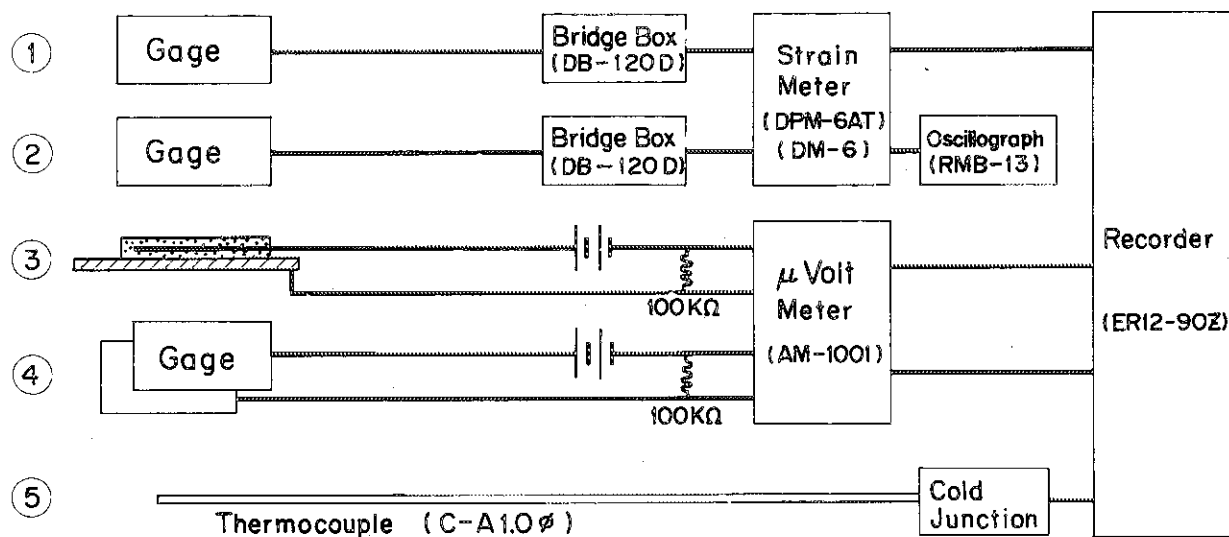


Fig. 3 Block diagram of measurement system.

- ① strain measurement (A, B, C, D, F-type)
- ② strain measurement (G-type)
- ③ leakage current measurement (A-type)
- ④ leakage current measurement (E-type)
- ⑤ temperature measurement (all types)

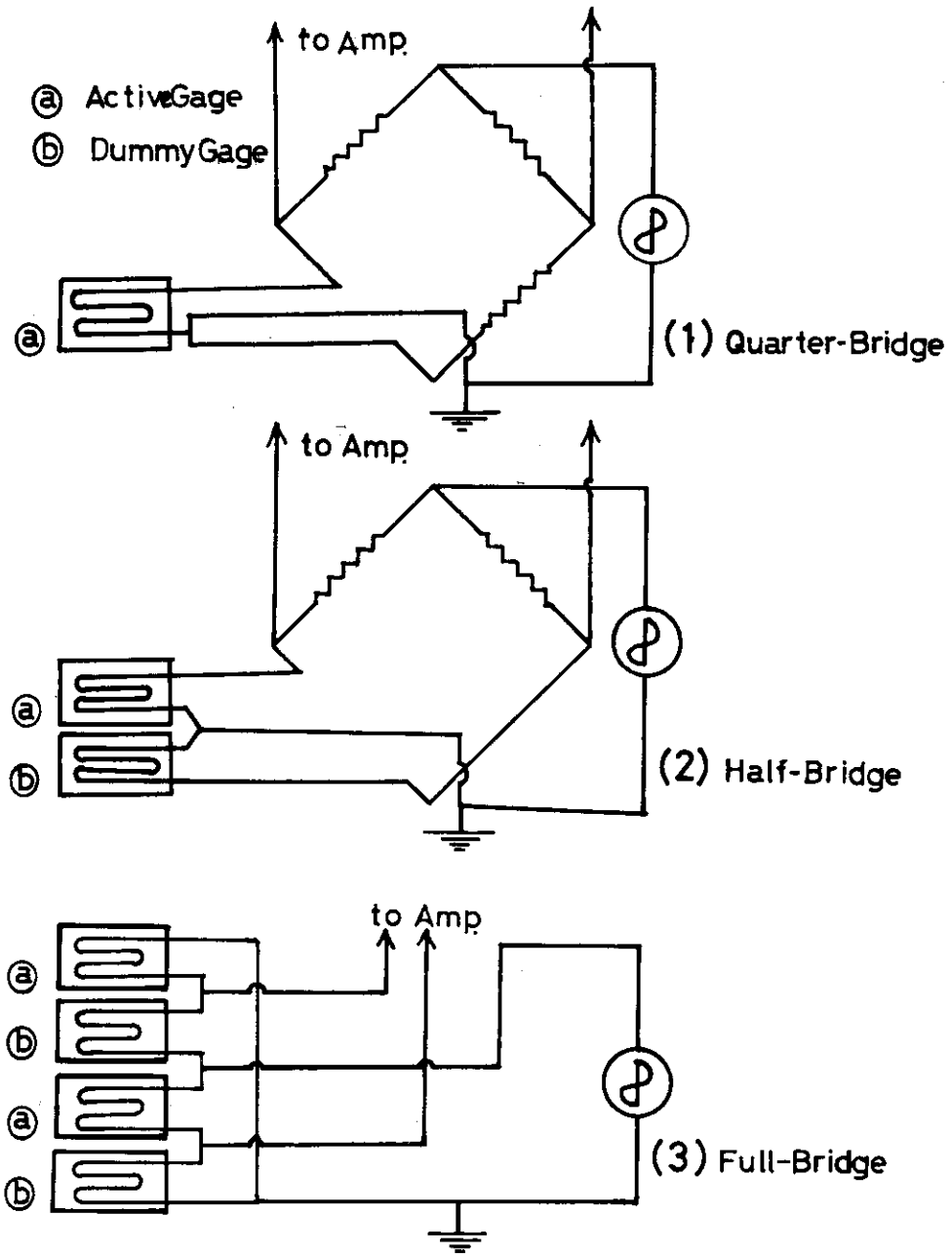


Fig. 4 Bridge configurations in strain measurements.

に低下する。各試料の位置における放射線強度（線束又は線量率）をTable 2に示す。

3.5 実験手順

実験は4回に分けて行なったが、いずれの場合も実験手順はほとんど同じであり、以下の通りである。

- ① 被測体の表面処理，内部応力除去
- ② ゲージの接着，焼付
恒温槽内で80°C 1時間，120°C 2時間，150°C 2時間の順に加熱した後徐冷する。
- ③ 各試料の照射ホルダへの取付，導線，熱電対および中性子モニタワイヤの取付
- ④ 照射ホルダのループ照射筒内挿入
- ⑤ ゲージのキュアリング（100°C 10～20時間）
- ⑥ 照射前試験
電気絶縁試験，ゲージの抵抗温度係数の測定，振動ひずみ（G-1）及びカプセル表面ひずみ（F-1）を測定する。
- ⑦ ゲージと測定系の安定確保
測定系のドリフトを最小にするため実験開始3～4日前から測定器を作動し，照射開始5～6時間前に試料温度を規定値に設定する。
- ⑧ 原子炉起動時の変化測定
原子炉出力とみかけひずみおよびリーク電流の関係を炉出力10kW，100kW，1MW，5MW，7MW，10MWにおいて測定する。
- ⑨ 原子炉定格出力運転時の測定
ひずみ出力，試料温度，リーク電流の測定をする。
- ⑩ 原子炉停止時の変化測定
みかけひずみ，リーク電流の変化を測定する。
- ⑪ 照射後試験
照射後試験と同一項目の測定をする。
- ⑫ ループ照射筒から取出，外観検査

4 実験結果とその検討

4.1 感度と直線性

Fig. 5は周波数500～600Hz，一定振巾で振動する板に接着したゲージ（G-1）からのひずみ出力を照射時間に対して示したものである。204時間までの照射（照射積算量は熱中性子 $2.2 \times 10^{18} \text{ n/cm}^2$ ，速中性子 $6.5 \times 10^{17} \text{ n/cm}^2$ ， γ 線 $2 \times 10^9 \text{ R}$ ）に対して，ひずみ出力は測定誤差（約10%）の範囲内にあり，変化は認められなかった。

Fタイプ試料のカプセルへ加えた圧力に対するひずみ出力の照射前後における測定結果をFig. 6に示す。通算585時間の照射（照射積算量は熱中性子 $2.1 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ，速中性子 $6.4 \times 10^{18} \text{ n/cm}^2$ ， γ 線 $2 \times 10^{10} \text{ R}$ ）に対して直線性的変化は認められない。また感度は数

に低下する。各試料の位置における放射線強度（線束又は線量率）をTable 2に示す。

3.5 実験手順

実験は4回に分けて行なったが、いずれの場合も実験手順はほとんど同じであり、以下の通りである。

- ① 被測体の表面処理，内部応力除去
- ② ゲージの接着，焼付
恒温槽内で80°C 1時間，120°C 2時間，150°C 2時間の順に加熱した後徐冷する。
- ③ 各試料の照射ホルダへの取付，導線，熱電対および中性子モニタワイヤの取付
- ④ 照射ホルダのループ照射筒内挿入
- ⑤ ゲージのキュアリング（100°C 10～20時間）
- ⑥ 照射前試験
電気絶縁試験，ゲージの抵抗温度係数の測定，振動ひずみ（G-1）及びカプセル表面ひずみ（F-1）を測定する。
- ⑦ ゲージと測定系の安定確保
測定系のドリフトを最小にするため実験開始3～4日前から測定器を作動し，照射開始5～6時間前に試料温度を規定値に設定する。
- ⑧ 原子炉起動時の変化測定
原子炉出力とみかけひずみおよびリーク電流の関係を炉出力10kW，100kW，1MW，5MW，7MW，10MWにおいて測定する。
- ⑨ 原子炉定格出力運転時の測定
ひずみ出力，試料温度，リーク電流の測定をする。
- ⑩ 原子炉停止時の変化測定
みかけひずみ，リーク電流の変化を測定する。
- ⑪ 照射後試験
照射後試験と同一項目の測定をする。
- ⑫ ループ照射筒から取出，外観検査

4 実験結果とその検討

4.1 感度と直線性

Fig. 5は周波数500～600Hz，一定振巾で振動する板に接着したゲージ（G-1）からのひずみ出力を照射時間に対して示したものである。204時間までの照射（照射積算量は熱中性子 $2.2 \times 10^{18} \text{ n/cm}^2$ ，速中性子 $6.5 \times 10^{17} \text{ n/cm}^2$ ， γ 線 $2 \times 10^9 \text{ R}$ ）に対して，ひずみ出力は測定誤差（約10%）の範囲内にあり，変化は認められなかった。

Fタイプ試料のカプセルへ加えた圧力に対するひずみ出力の照射前後における測定結果をFig. 6に示す。通算585時間の照射（照射積算量は熱中性子 $2.1 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ，速中性子 $6.4 \times 10^{18} \text{ n/cm}^2$ ， γ 線 $2 \times 10^{10} \text{ R}$ ）に対して直線性的変化は認められない。また感度は数

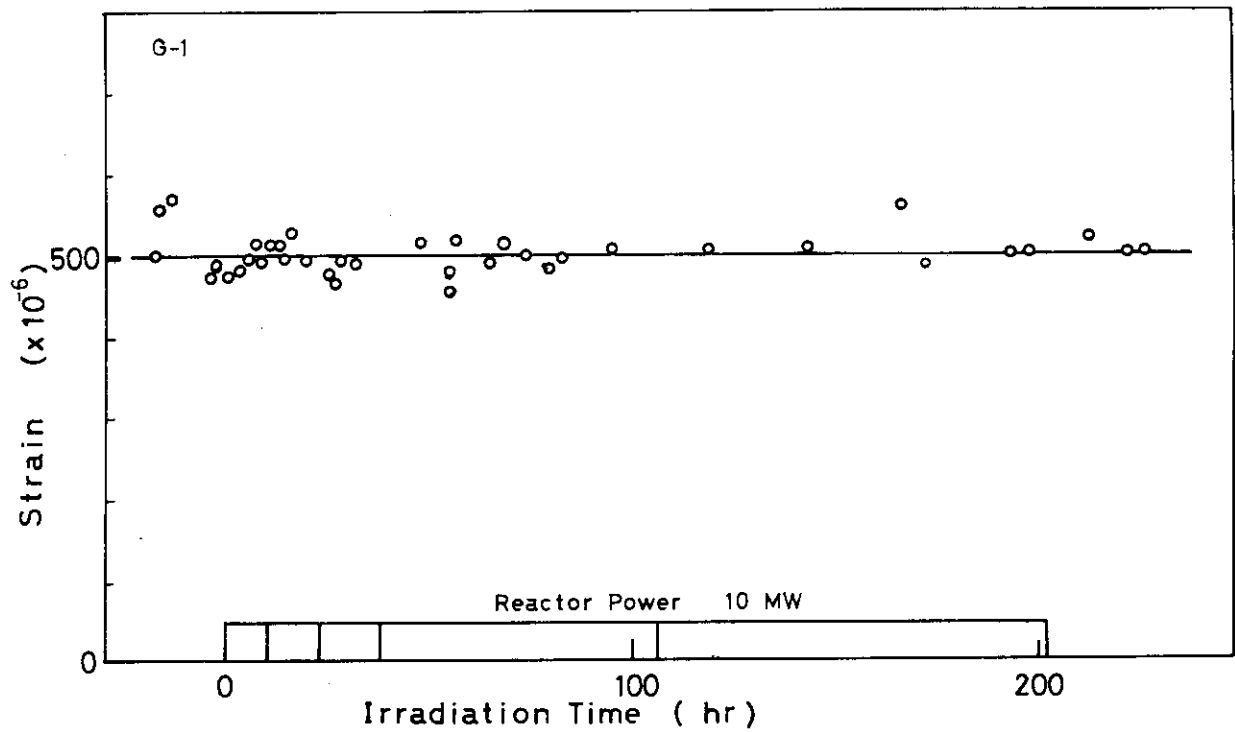


Fig. 5 History of strain output from the G-type specimen vibrating with constant amplitude.

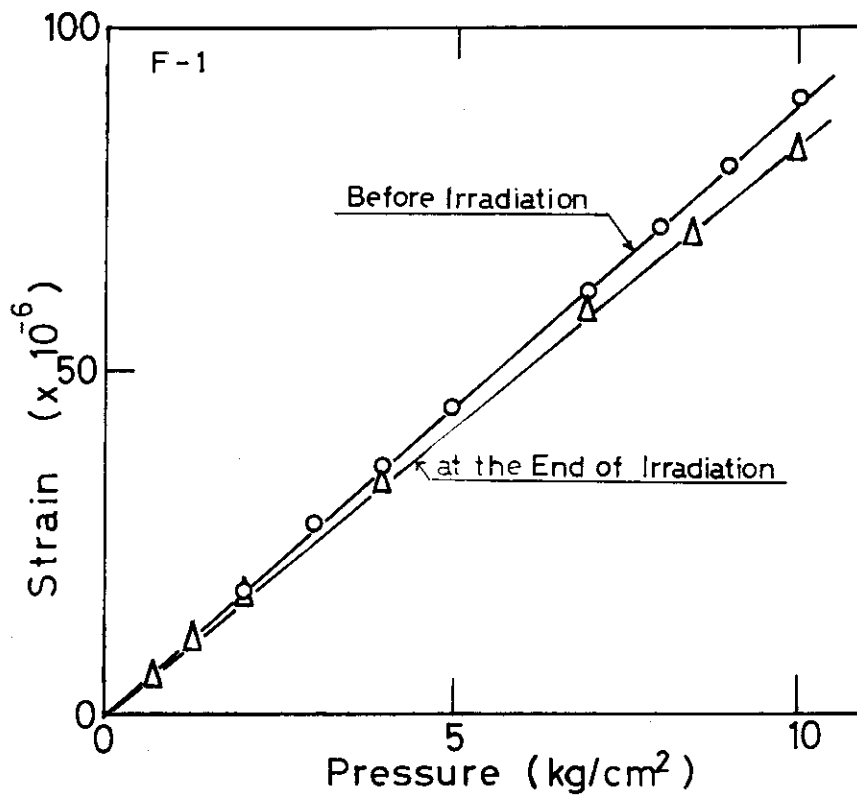


Fig. 6 Comparison between pressure-strain relations at the end of irradiation and before irradiation.

%の変化が見られるが実用上問題にならない範囲である。

4.2 電気絶縁性

使用した全てのゲージについて照射前及び照射終了3～4日後に絶縁抵抗を測定した結果、いずれも500M Ω 以上あり、照射による劣化の無いことを確認した。

次に試料A-5とE-1について照射中の絶縁抵抗(リーク電流)を測定した。2つの試料とも照射中には絶縁抵抗が非常に小さくなることが分った。Fig. 7(2)は試料A-5の抵抗素線に-9Vの電圧を加えたときの素線-被測体間のゲージ基材を通して流れるリーク電流の照射経過を示したものである。原子炉出力がステップ状に増加すると、それに対応してリーク電流が増加した。照射前 3×10^{-9} Aであったリーク電流は原子炉出力が10MWのとき 2.5×10^{-7} Aであり、炉出力が一定になってからの増加はわずかであった。原子炉の停止とともにリーク電流は急速に減少し、その後はゆるやかに減衰し、2日後には照射前の値まで戻った。(Fig. 7(3)については後述)。試料E-1の抵抗線間についても同様の変化が見られた。

Fig. 8に原子炉出力に対する試料A-5とE-1のリーク電流変化を示す。両者ともリーク電流は原子炉出力の約0.7乗に比例している。またこの図から抵抗素線間のリーク電流(E-1の場合)より抵抗素線-被測定間のリーク電流(A-5の場合)の方が非常に大きいこと。及び抵抗素線に印加する電圧が負のときよりも正のときの方が大きいことが分る。Fig. 9は試料A-5の印加電圧に対する抵抗素線-被測体間のリーク電流を示したもので、ダイオード特性に似た性質のあることが分る。

原子炉停止後のリーク電流比をFig. 10に示す。縦軸は炉運転中のリーク電流で正規化してある。破線は炉内 γ 線の0.7乗の変化を示すものであり、炉内 γ 線としてはPerkins & King⁽⁸⁾による100時間照射時のFP γ 線を用いている。なお、炉運転時の γ 線による熱出力を全熱出力の10%(核分裂当りの γ 線エネルギーが ~ 20 MeVであるので)と仮定して規格化してある。0.7乗しているのは、リーク電流が原子炉出力の0.7乗にほぼ比例するという関係(前述)を考慮したためである。Perkins & Kingの結果が 10^3 秒以下で低めになるといわれている⁽⁹⁾ことを考慮に入れると、2つの曲線は相対的に極めてよい一致をしていることが分る。リーク電流に及ぼす炉内 γ 線の強度を熱出力の単位で表わすことの妥当性については問題があり、2つの曲線の間が開きがあるのはこのためとも考えられる。炉停止後の中性子束が急激に減少することを考え併せると、リーク電流は主に γ 線の照射によって発生すると推定できる。

γ 線による電流の発生機構として次の2つが考えられる。

- ① ゲージ基材中に γ 線の照射によりできた電子と空孔による伝導。
- ② ゲージ基材を挟む電極(抵抗素線、被測体)表面から γ 線によりたたき出された電子による伝導。

実験によって得られたダイオード特性は①の場合には空孔は電子と比較し易動度が極めて小さいため、空孔を集める表面積の差によるもの、②の場合は電子を放出する表面積の差によるものと解釈できる。

このようなゲージ抵抗素線と被測体間を流れる電流については、Pettigrewが被覆型スト

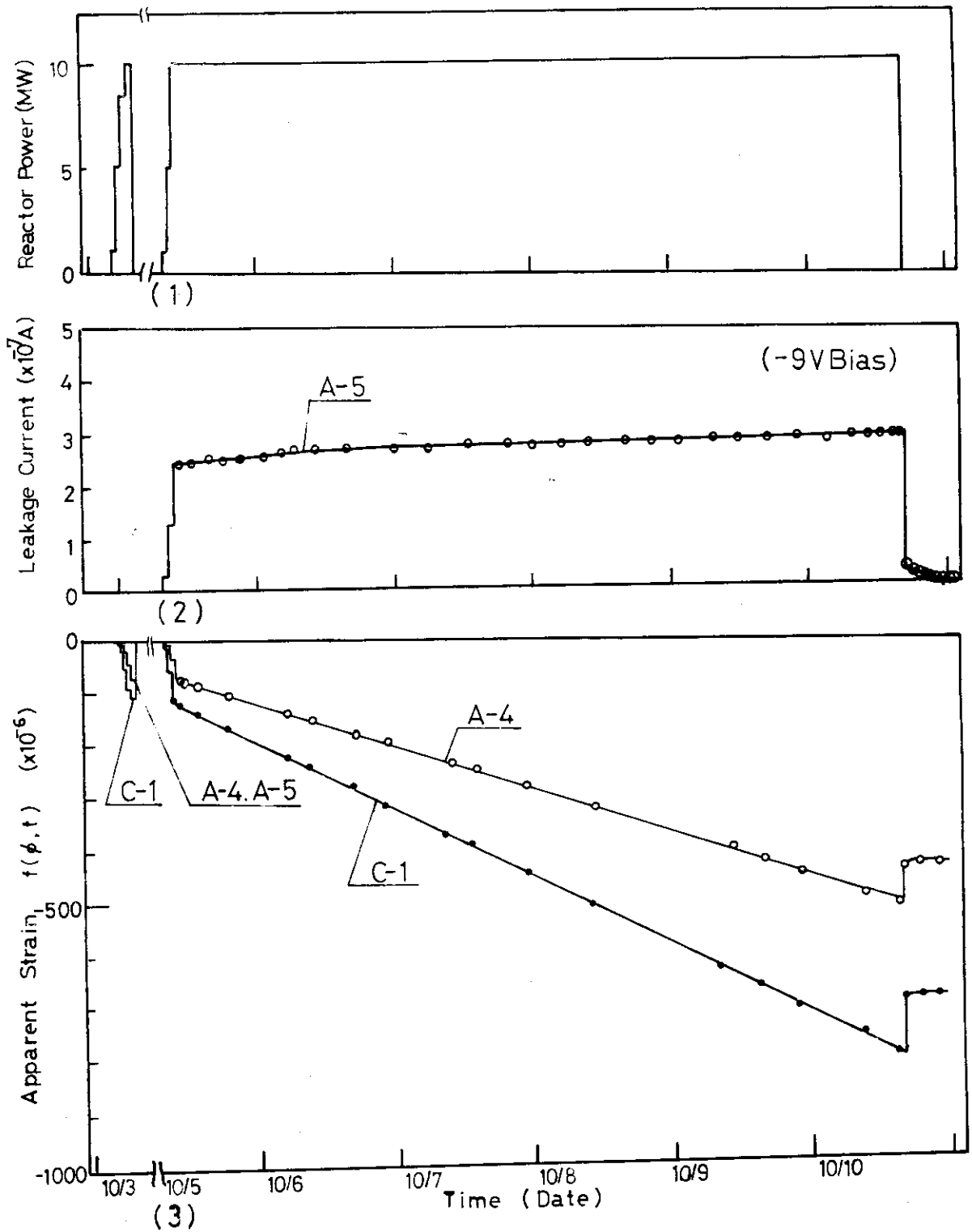


Fig. 7 History of reactor power (1), leakage current (2), and apparent strain (3). The specimen A-5 was used for the apparent strain measurement and for the leakage current measurement.

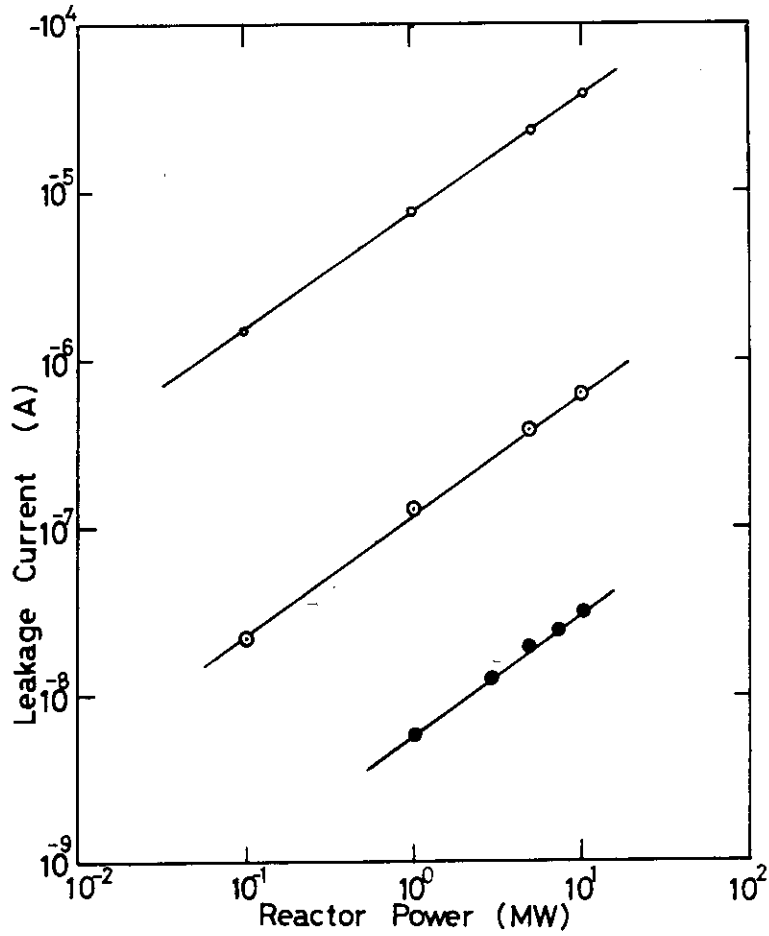


Fig. 8 Dependence of leakage current on reactor power.
 ○ A-5 (+24V), ⊙ A-5 (-24V), ● E-1 ($\pm 24V$)

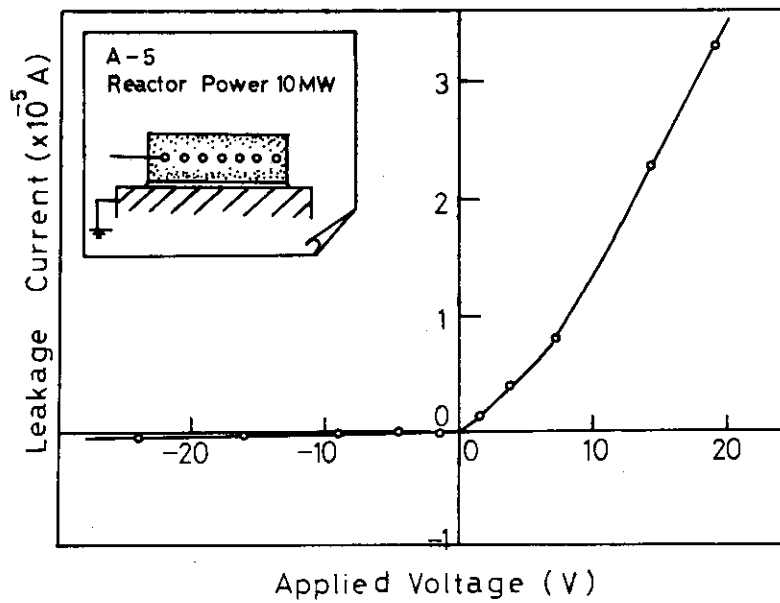


Fig. 9 Quasi-diode characteristic of leakage current for the specimen A-5.

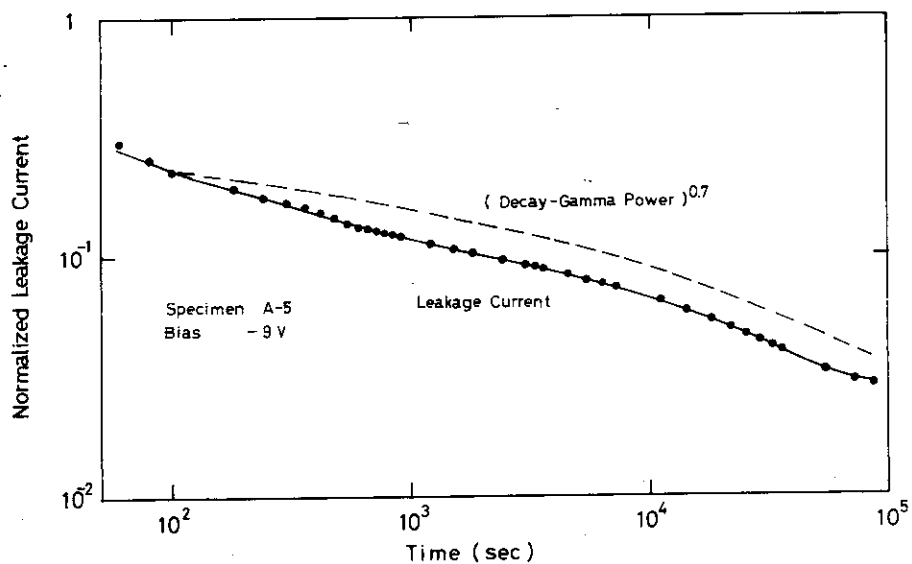


Fig. 10 Decay of leakage current after reactor shutdown.
The dotted line is based on the decay gamma-rays from U-235 fuel due to 100-hour irradiation after Perkins and King⁽⁸⁾. Both the leakage current and decay gamma power are normalized to the values at the reactor shutdown.

レンジをNRXで照射し、被覆と抵抗素線の間には 1.2×10^{-8} A の電流が流れることを見出し、この電流を自己出力型中性子計と同じ原理で発生したとしている⁽⁴⁾。また Wnuk は原子炉内でセラミック基材のゲージを照射し、ゲージの上へ取付けた電極板と被測体との間に -160V の電圧を加えると、それらの間に 10^{-4} A の電流が流れたことを報告している⁽¹⁾。

Wnuk の測定した電流は今回測定した電流と同一の原理に基づいて流れると考えられ、Pettigrew の自己出力型中性子計の原理と異なることは電流の大きさ、ダイオード特性の方向から見て明らかである。この違いはゲージの材質、寸法、形状（特に抵抗素線と被測体あるいは被覆との間隔）によるものと考えられる。

4.3 みかけひずみ

4.3.1 みかけひずみの発生

ゲージ1枚から成る試料（A, B, Cタイプ）は全て照射により大きなみかけひずみが発生した。Fig. 7(3)にその一例を示す。みかけひずみのうち温度変化によるものは補正してある。原子炉出力がステップ状に増加するとそれに対応して圧縮方向（ゲージの電気抵抗で減少方向）のみかけひずみが発生した。原子炉運転中はさらに圧縮方向のみかけひずみが一定の率で増大しつづけることが観測された。原子炉が停止するとそれに応じてみかけひずみは引張方向へ変化し、この変化量は起動時の変化量にほぼ等しかった。

このみかけひずみの変化 $f(\phi, t)$ を模式的に示したのが Fig. 11 である。図において $f_1(\phi)$ が放射線強度による変化、 $f_2(\phi, t)$ が照射積算量による変化であつて、 $f(\phi, t)$ は両者を合成したものと考えることができる。

4.3.2 放射線強度に依存するみかけひずみ

(1) $f_1(\phi)$ の特徴

Fig. 12 に各種タイプの試料に対して得られた放射線強度（代表として γ 線線量率）とみかけひずみとの関係を示す。図から $f_1(\phi)$ の特徴として次の点があげられる。

- ① 常に $f_1(\phi)$ は圧縮側に現われる。
- ② いずれのゲージも放射線強度の 0.5 ~ 0.7 乗に比例している。
- ③ カドミウムで被覆したゲージの $f_1(\phi)$ は被覆なしのそれよりも約 10% 大きかった。
- ④ 被測体の材質にステンレス鋼とアルミニウムの違いがあつても $f_1(\phi)$ の大きさは殆んど変らなかつた。
- ⑤ アスベスト基材の $f_1(\phi)$ はベークライト基材のそれより大きく、箔型抵抗素線の $f_1(\phi)$ は細線型抵抗素線のそれより大きかった。

(2) $f_1(\phi)$ の発生原因

みかけひずみの測定に使用した被測体は厚さが 1mm で、 γ 線も最大 0.4 w/g にすぎず、かつループガスで十分に冷却していることから、熱応力によるひずみは無視できるものと考えられる。

Fig. 7 の(2)と(3)を比較してみるとみかけひずみの $f_1(\phi)$ 相当部分とリーク電流の変化とが相似していることが分る。また $f_1(\phi)$ もリーク電流も放射線強度の 0.5 ~ 0.7 乗に比例して

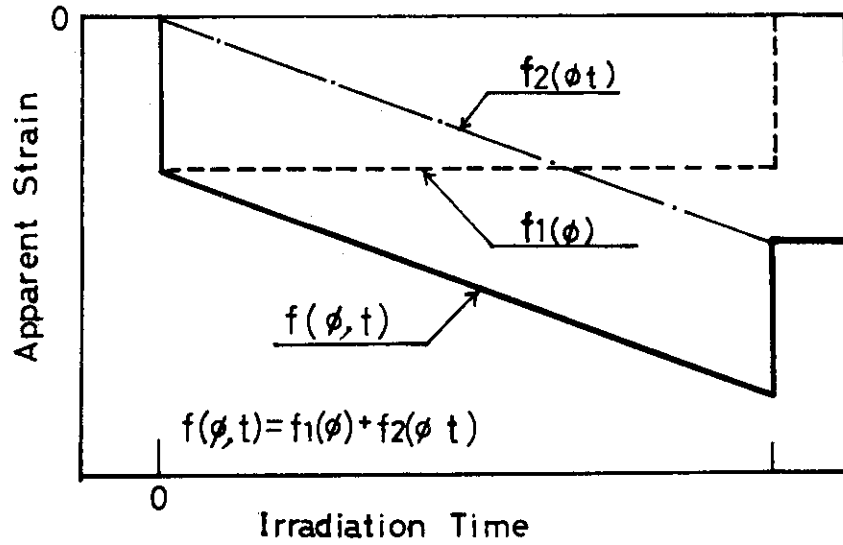


Fig. 11 Two components of apparent strain. The components, $f_1(\phi)$ and $f_2(\phi t)$, are dependent on radiation intensity and fluence, respectively.

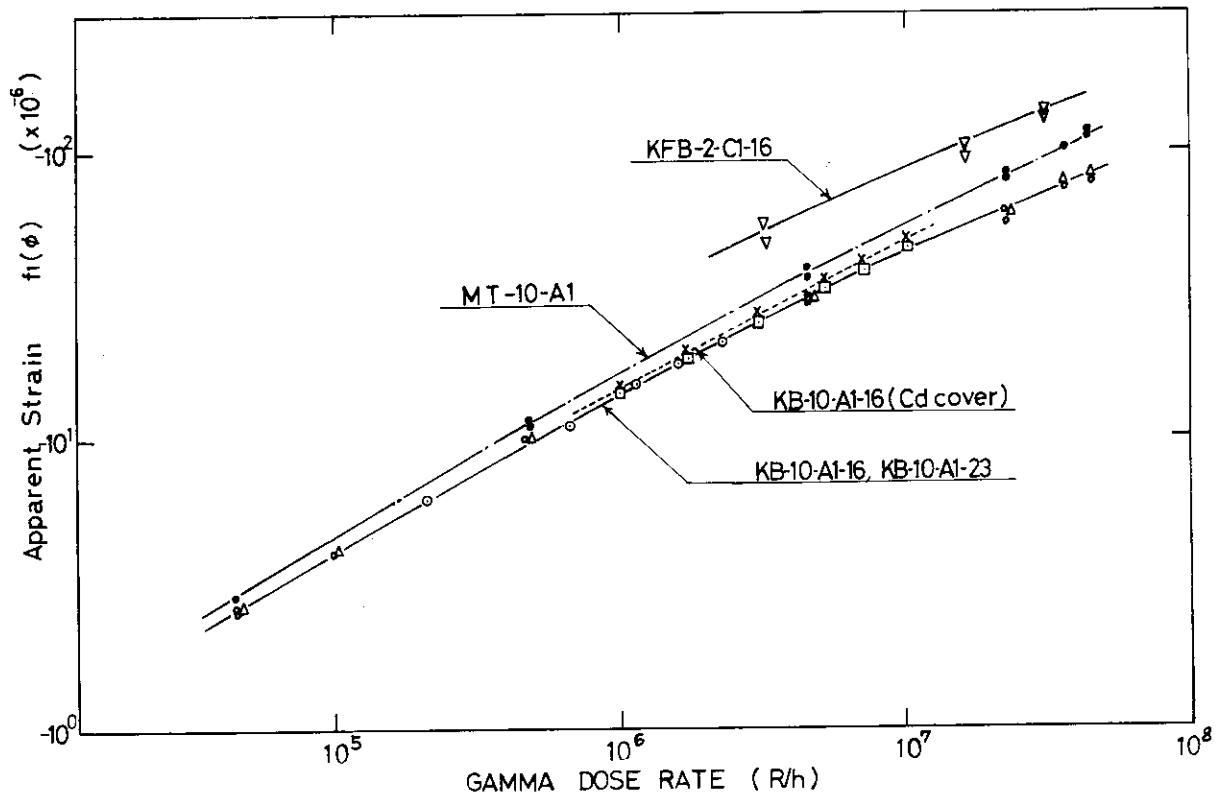


Fig. 12 Dependence of apparent strain $f_1(\phi)$ on radiation intensity.
 \square A-2, \circ A-3, \bullet A-4, \triangle A-5, ∇ A-6, \times B-1, \cdot C-1

いる。このことから $f_1(\phi)$ はゲージ基材を通して抵抗素線-被測体間に流れるリーク電流に基
 因することが推定できる。カドミウム被覆したゲージの $f_1(\phi)$ が大きくなった理由も、リーク
 電流が主に γ 線照射によって発生すること(4.2節参照)と、カドミウムの (n, γ) 反応に
 より γ 線の増加があることとを考え併せると理解できる*。また④や⑤の理由もリーク電流が電
 極の幾何学的形状や絶縁物材質に依存することから理解される。

通常ひずみ測定では電気回路の安定のため Fig. 4 のようにブリッジの1点を接地している。
 抵抗素線から被測体へ流れるリーク電流はアースを通してブリッジへ戻り、ゲージの抵抗を一
 部分バイパスすることになる。すなわち照射中の絶縁抵抗 R_i がゲージ抵抗 R に並列に挿入さ
 れたと考えると、ゲージ抵抗はみかけ上 $\Delta R = -R^2/R_i$ だけ変化し、 $\epsilon = -R/KR_i$ のみかけ
 ひずみが発生する。例えば、ひずみ計の標準電圧 3.5V 付近で $R_i = 1.0 M\Omega$ (Fig. 9参照)
 であるから、 $\epsilon = -60 \times 10^{-6}$ となる。これに対して実測値は $f_1(\phi) = -75 \times 10^{-6}$ であり、
 ほぼ一致する。

以上のことから $f_1(\phi)$ の発生は、主に γ 線の照射によって生じるリーク電流(特に抵抗素線
 と被測体間)に起因し、ゲージ抵抗がみかけ上、低下するためと考えられる。

4.3.3 照射積算量に依存するみかけひずみ

(1) $f_2(\phi t)$ の特徴

各実験における $f_2(\phi t)$ と照射積算量(代表として速中性子束)の関係を Fig. 13 に示
 す。これから $f_2(\phi t)$ の特徴として以下の点があげられる。

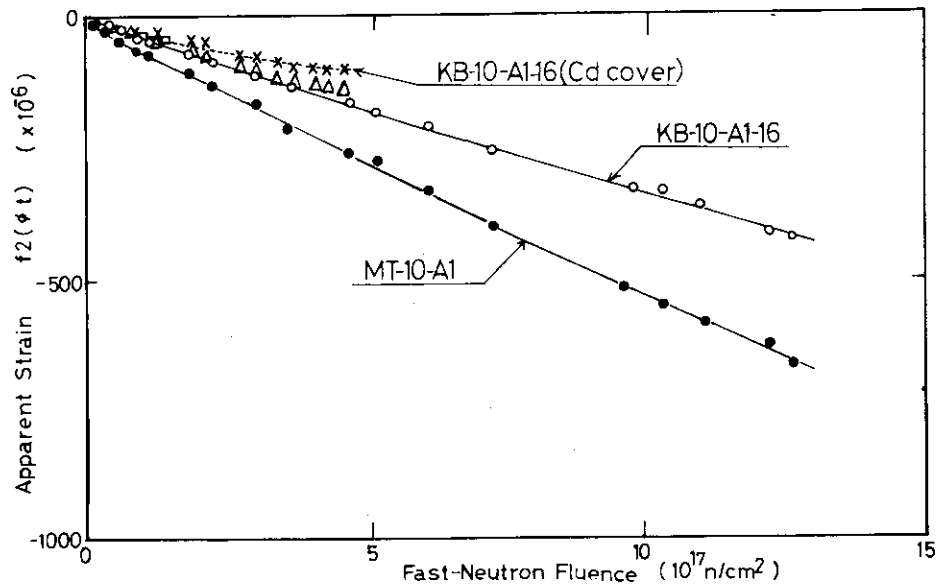


Fig. 13 Dependence of apparent strain $f_2(\phi t)$ on radiation fluence.

Δ A-2, \square A-3, \circ A-4, \times B-1, \bullet C-1

* Cd 被覆へ入射する熱中性子(Cd 被覆による depression factor を 0.2 と仮定する)
 の全てが捕獲 γ 線に変換され、等方的に放出されるものと考えて線量率を計算すると約
 $7 \times 10^5 \text{ R/h}$ となる。この値はこの位置における γ 線線量率の 7% に相当する。

- ① 各実験を通して同一型のゲージでは $f_2(\phi t)$ の変化は同程度である。
 - ② 照射時間が長くなると (100~200 hr) 多少変化率が低下する傾向がある。
 - ③ カドミウムで熱中性子をカットした試料の変化は他の試料の変化より小さい。
 - ④ アスベストゲージ (MT型) はベークライトゲージ (KB型) より約50%大きい。
- (2) $f_2(\phi t)$ の発生原因

照射積算量に依存するみかけひずみの発生原因としてはゲージ基材の電気絶縁劣化, ゲージ基材や接着層の機械的強度低下, ゲージ抵抗素線の比抵抗変化などが考えられる。

① ゲージ基材の電気絶縁劣化

4.2節で述べたように照射前後において電気絶縁抵抗はほとんど変化していない。1,000M Ω の電気抵抗変化はひずみ変化に換算して 0.1×10^{-6} であり, ひずみ計の検出感度以下である。

② ゲージ基材や接着層の機械的強度劣化

ゲージ基材のベークライト (ベーパーベースベークライト含浸) はこの実験の照射量 (高速中性子で $1 \times 10^{18} \text{ n/cm}^2$ 程度) で80~90%の引張強度の低下が予想される^{(10),(11)} ので, 大きいひずみ測定の場合には当然問題になる。しかし今回の実験では, 被測体には応力がかからないように保たれているので, ゲージ基材にかかる応力はゲージ基材-抵抗素線間またはゲージ基材-被測体間における熱応力のみである。この熱応力の値は照射により低下した引張強度の $1/5 \sim 1/10$ であり, あまり問題にならない。また $f_2(\phi t)$ の変化の傾向から見ると, 割れ, 剝離に起因する急激な変化は発生していない。

③ ゲージ抵抗素線の比抵抗変化

実験に使用したゲージの抵抗素線はいずれもアドバン線 (銅ニッケル合金) である。銅は中性子照射により比抵抗は増加するが, 合金になると減少するものが多い。またこの照射による変化率は合金材質, 合金比, 結晶構造の差により大きく変ることが Billington と Crawford によって示されている⁽¹²⁾。アドバンス線も他の銅合金と同じく中性子照射により比抵抗が減少する可能性がある。

Smithらはニクロム線とコンスタンタン線を抵抗素線とする2種類の箔型ゲージを原子炉で照射し, 高速中性子照射量 $5.5 \times 10^{17} \text{ n/cm}^2$ に対して, ニクロム線ゲージの電気抵抗が1~1.8%増加したがコンスタンタンでは0.2~0.7%減少したと報告している⁽³⁾。また Pettigrew はニクロム線を抵抗素線とする被覆型ゲージを照射し, 高速中性子照射量 $1 \times 10^{18} \text{ n/cm}^2$ に対して電気抵抗は0.9%増加したがさらに照射すると電気抵抗変化は減少に変わり, $1.9 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ に対して6~7%の減少になったことを報告している⁽⁴⁾。さらに Weltevreden も Pettigrewと同じ溶接型被覆ゲージを照射して, 高速中性子 $7.4 \times 10^{17} \text{ nvt}$ の照射量でゲージの抵抗が15%減少したと報告している⁽²⁾。

これらの報告で抵抗素線の材質の違いにより電気抵抗変化が大きく変ることが分る。今回の実験で得た $f_2(\phi t)$ は熱中性子の吸収及び高速中性子による損傷による抵抗素線の比抵抗変化に起因しているものと推定される。

4.3.4 みかけひずみの補償

放射線によって発生するみかけひずみの補償法としては, 通常の変温変化に対する補償法と

と同様ブリッジの隣辺にダミーゲージを挿入して照射効果を打ち消させる方法（ハーフブリッジ法およびフルブリッジ法）が考えられる。この有効性を調べるためDタイプ試料で0点のシフトを測定した。

(1) $f_1(\phi)$ の補償

A, D両タイプ試料の原子炉出力に対するみかけひずみの関係をFig. 14に示す。Dタイプ試料のみかけひずみは極めて小さいことが分る。したがって $f_1(\phi)$ に関して、ハーフブリッジ法は十分補償効果があるものと考えられる。

(2) $f_2(\phi t)$ の補償

A, D両タイプ試料の照射経過時間に対するみかけひずみの変化の一例をFig. 15に示す。図からDタイプ試料ではAタイプ試料と比べて、みかけひずみの変化率が小さいことが分かる。わずかに圧縮方向に変化しているがこの変化率は $0.1 \sim 0.2 \times 10^{-6}/\text{hr}$ と極めて低い値である。他の4個のDタイプ試料については更に高い照射を行なったが、平均 $0.2 \times 10^{-6}/\text{hr}$ であった。

5 結 論

ベークライト基材—アドバンス素線型—のストレングージを原子炉内で照射し、その挙動を調べた結果次の結論が得られた。

- ① 感度や直線性に対する放射線の影響は実用上問題ない。動的ひずみの測定は十分可能である。
- ② 放射線の照射によってゲージにはみかけひずみが発生する。このみかけひずみは放射線強度（主に γ 線量率）に依存するものと、照射積算量に依存するものとに分けることができる。
- ③ 放射線強度によるみかけひずみは常に圧縮方向に発生し、主に γ 線の照射によってゲージ基材を通して流れるリーク電流に起因するものと考えられる。
- ④ 照射積算量によるみかけひずみの発生原因については明確にすることはできなかったが、放射線損傷による抵抗素線の比抵抗変化が主な原因と推定できる。
- ⑤ ゲージの電気絶縁抵抗は照射後においても十分高く、今回の照射量では劣化はなかった。
- ⑥ 使用するゲージの材質、形状的アンバランスに十分注意すれば、ハーフブリッジ又はフルブリッジ法によりみかけひずみを補償して、動的ひずみは勿論、短期間の静的ひずみも十分に測定できる。

と同様ブリッジの隣辺にダミーゲージを挿入して照射効果を打ち消させる方法（ハーフブリッジ法およびフルブリッジ法）が考えられる。この有効性を調べるためDタイプ試料で0点のシフトを測定した。

(1) $f_1(\phi)$ の補償

A, D両タイプ試料の原子炉出力に対するみかけひずみの関係をFig. 14に示す。Dタイプ試料のみかけひずみは極めて小さいことが分る。したがって $f_1(\phi)$ に関して、ハーフブリッジ法は十分補償効果があるものと考えられる。

(2) $f_2(\phi t)$ の補償

A, D両タイプ試料の照射経過時間に対するみかけひずみの変化の一例をFig. 15に示す。図からDタイプ試料ではAタイプ試料と比べて、みかけひずみの変化率が小さいことが分かる。わずかに圧縮方向に変化しているがこの変化率は $0.1 \sim 0.2 \times 10^{-6}/\text{hr}$ と極めて低い値である。他の4個のDタイプ試料については更に高い照射を行なったが、平均 $0.2 \times 10^{-6}/\text{hr}$ であった。

5 結 論

ベークライト基材-アドバンス素線型のスレンゲージを原子炉内で照射し、その挙動を調べた結果次の結論が得られた。

- ① 感度や直線性に対する放射線の影響は実用上問題ない。動的ひずみの測定は十分可能である。
- ② 放射線の照射によってゲージにはみかけひずみが発生する。このみかけひずみは放射線強度（主に γ 線量率）に依存するものと、照射積算量に依存するものとに分けることができる。
- ③ 放射線強度によるみかけひずみは常に圧縮方向に発生し、主に γ 線の照射によってゲージ基材を通して流れるリーク電流に起因するものと考えられる。
- ④ 照射積算量によるみかけひずみの発生原因については明確にすることはできなかったが、放射線損傷による抵抗素線の比抵抗変化が主な原因と推定できる。
- ⑤ ゲージの電気絶縁抵抗は照射後においても十分高く、今回の照射量では劣化はなかった。
- ⑥ 使用するゲージの材質、形状的アンバランスに十分注意すれば、ハーフブリッジ又はフルブリッジ法によりみかけひずみを補償して、動的ひずみは勿論、短期間の静的ひずみも十分に測定できる。

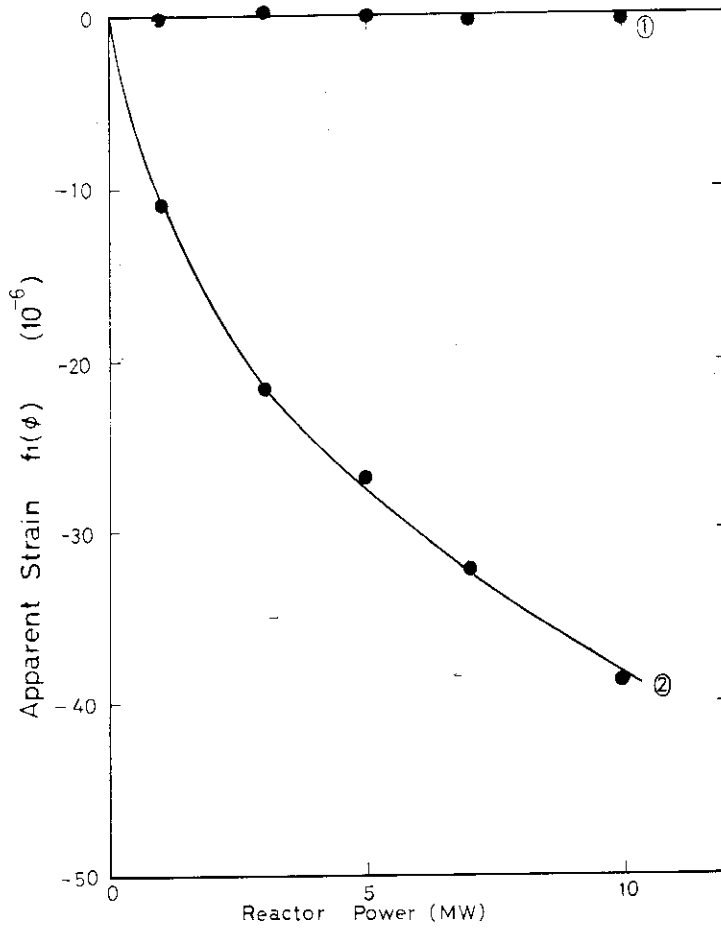


Fig. 14 Effect of half-bridge compensation on apparent strain $f_1(\phi)$.
 ① D-1, ② A-3

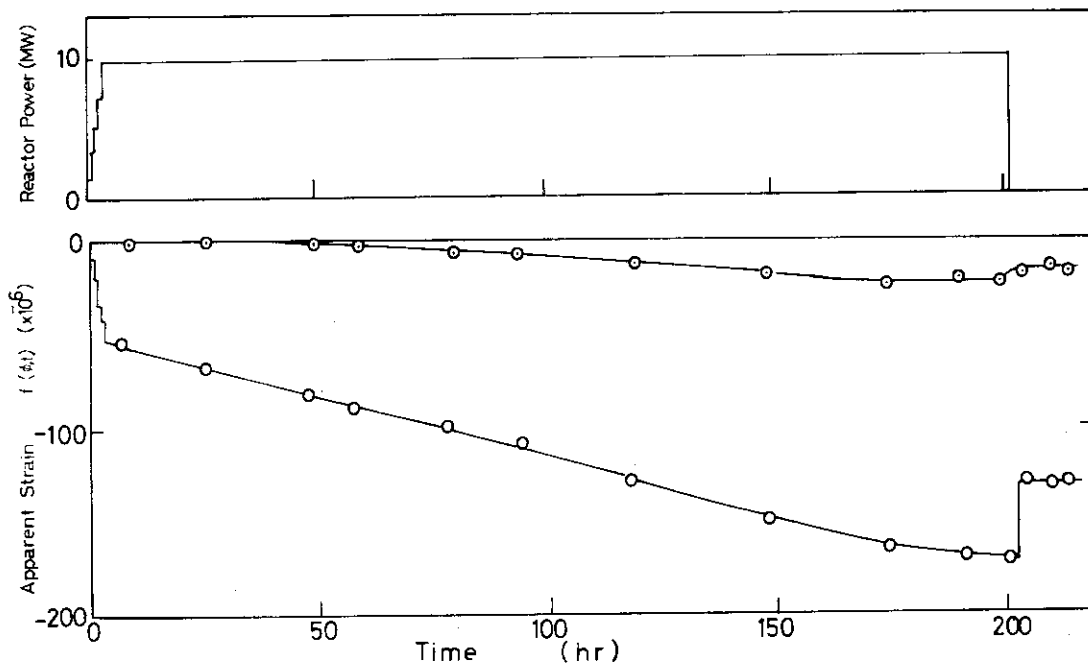


Fig. 15 Effect of half-bridge compensation on apparent strain $f_2(\phi t)$.
 ○ D-1, ○ A-2

6 あ と が き

薄板型のベークライトゲージはこれまで原子炉等の高放射線下での使用が不可能とされてきたが、 200°C 以下という制限はあるが使用可能であることが分った。またゲージに発生する照射効果のメカニズムも、不十分ではあるが明らかにすることができたので、被覆付溶接型のゲージの場合にも参考になると思う。

本研究はTLG-1ループの運転及びデータ解析で御協力を頂いた村田秀男氏、豊島征夫氏、山田忠則氏、小菅征夫氏に負うところが多い。研究計画の検討には白井英次氏に御協力を頂いた。また浅見哲夫研究炉技術課長代理には本報告の作成に当り有益な助言を頂いた。ここに深く感謝致します。

-----References-----

- (1) Wnuk, S.P.Jr: Progress in High-temperature and Radiation-resistant Strain Gage Development, Exp. Mech., 5, 27A-33A (May, 1965)
- (2) Weltevreden, P.: In-pile Application of Strain Gages Preliminary Results, EUR-2649.e (1966)
- (3) Smith, R.C. and Rendler N.J.: Transducers for Strain Measurement in Intense Radiation Fields, Proc .S.E.S.A, 16(2), 73-80(1959)
- (4) Pettigrew, M.J.: An Evaluation of Weldable Strain Gages in Nuclear Reactor Environments, Exp. Mech., 10, 203-209 (1970)
- (5) Morandi, G: Prospects and Limits of Employment of Resistance strain Gauges in Radioactive Environment, energia nucleare, 18, 55-62 (1971)
- (6) 北原種道他: TLG-1の運転経過と撤去, 研究炉・ホットラボの運転と技術管理 (昭和48年度), JAERI-M 5845, P61~76 (1974)
- (7) 井上晃次, 横尾 宏: 原子炉材料の放射線による発熱(3), JRR-2 VT-2内での黒鉛の発熱測定, JAERI-memo 1208 (1963)
- (8) Perkins, J.F., and King, R.W.: Energy Release from the Decay of Fission Products, Nucl. Sci. Eng., 3, 726-746 (1958)
- (9) 田坂完治他: 核分裂生成物の崩壊熱, 原子力学会誌, 17, 2-22 (1975)
- (10) Sisman, O. and Bopp, C.D.: Physical Properties of Irradiated Plastics, ORNL-928 (1951)
- (11) Sisman, O. and Wilson, J.C.: Engineering Use of Damage Data, Nucleonics 14(9), 58-62 (1956)
- (12) Billington, D.S. and Crawford, J.H.: Radiation Damage in Solids, pp. 201-212, Princeton University Press (1961)