り、また同じ x の値に対して生成温度が高いほど格子定数は小さかった。ただ1,200°Cでは x の値に関係なくUCとほぼ等しい値が得られた。すなわち、 $UC_{1-x}O_x$ の格子定数は生成温度に関するが、これは温度によって $UC_{1-x}O_x$ に対するU, C, Oの固溶度が異なるからと考えられる。

- (3) UC_2 と UO_2 との数種の混合比のものを、 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ mmHgの真空中、1,200°, 1,600°Cの温度、4および16 hr反応させた結果、UCの場合と同じように $UC_{1-x}O_x$ が生成された。しかし1,200°Cでは、UCの場合より反応速度はおそく、反応生成物に未反応の UC_2 が残っているのが認められた。
- (4) $UC_{1-x}O_x$ の安定領域について考察し、 x とCOガス圧との関係について、Figs. 3, 4を得た。 $UC_{1-x}O_x$ の生成自由エネルギーを仮定し、実験結果からUOの生成自由エネルギーを計算すると、 UO_2 の値の1/2に近い値をとると推察された。このことはUOの存在に対し今後に示唆を残すのである。

本研究を報告するにあたり、試料についてご配慮を賜った三菱原子力工業(株)渡辺孝章博士および住友電気工業(株)窪田治夫氏に厚くお礼申し上げる。

(1964年 1月7日 受理)

— 参 考 文 献 —

- (1) 難波慎吾, 井本正介, 佐野忠雄: 本誌, **3**, No. 6, 457~461 (1961).
- (2) E. J. HUBER, C. E. HOLLEY: *Thermody. of Nucl. Materials*, IAEA, 581 (1963), Vienna.
- (3) W. J. DEISS, H. MICHAUD, G. ANTELME: *ibid.*, SM-26/54.
- (4) R. N. R. MULFORD, F. H. ELLINGER, *et al.*: "Plutonium 1960", 301 (1961), Cleaver-Hume Press Ltd.
- (5) R. F. STOOPS, J. V. HAMME: *ORO-364*, (1960).
- (6) R. F. STOOPS, J. V. HAMME: *NCSC-2663-10*, (1963).
- (7) L. E. RUSSEL: *AERE-R-4330*, (1963).
- (8) N. H. BRETT, E. A. HARPER, H. J. HEDGER, J. S. POTTINGER: *Symp. Carbides in Nucl. Energy*, Harwell, A12, (1963).
- (9) P. MAGNIER, J. TROUVE, A. ACCARY: *ibid.*, A9, (1963).

研究論文

372. 核燃料被覆管検査用二重周波うず電流探傷器

小 野 邦 男*

Double Frequency Eddy Current Instrument for Nuclear Fuel Clad Tubing Inspection

By Kunio ONO

A double frequency eddy current nondestructive testing instrument which makes it possible to estimate the depths and the radial locations of defects in tube walls has been developed for use in the inspection of fuel clad tubing.

The two frequencies are chosen such a way that lower one gives a larger penetration depth, while higher one gives a less penetration depth of eddy currents than the tube wall thickness.

The instrument has two channel pulse generators, from which lower and higher frequency damped oscillatory pulses are alternately supplied to the same driving coil that encircles a test object, and detected signals from a differential pickup coil are divided

* (株)日立製作所日立研究所(Hitachi Res. Lab., Hitachi Ltd.)

again to the low frequency and high frequency signals by time gate circuits.

Experiments are conducted using aluminum tubes and the depths and the radial locations of defects in tube walls have been proved to be estimated by the ratios of the amplitudes of the low frequency detected signals and high frequency ones.

I. 緒 言

うず電流探傷法は、核燃料被覆管の有力な非破壊検査法の1つであり、内外において種々な研究が行なわれて来たが、従来の方法における大きな困難の1つは、外面欠陥と内部欠陥とでは欠陥検出感度がかなり相違するために、検出信号から実在欠陥の様相を知ることが困難な点にあった。

そこで著者は、この点を改善すべく、高低2つの周波数のパルス波を用いたうず電流探傷器を試作し、欠陥の深さや内外の別を推定する方法を検討した。

2つの周波数を用いるという構想は、すでにアメリカ Argonne 研究所の Renken らにより報告されている⁽¹⁾⁽²⁾が、これでは高周波をコイルと試料間の空隙の影響を補償するのに用いており、2つの周波数もそれぞれ固定されている。

著者は、この構想をさらに発展させて内外の欠陥の判別を可能ならしめる2つの周波数の選定法について検討し、これら周波数の組合せも被検査体の材質や肉厚に応じて適宜選択しうるような装置を試作して、その有効性を実験的に確かめた。

本報は、試作装置の説明とアルミニウム管による実験結果について述べる。

II. 原 理

1. 丸棒導体内のうず電流分布と周波数

円筒状コイル内に同心の丸棒導体を挿入し、コイルに交流電流を加えた場合、導体内における磁束分布およびうず電流分布は、丸棒の中心軸からの距離 r の関数としてつぎのように表わされる⁽³⁾⁽⁴⁾。

$$B_z(r) = B_0 \frac{I_0\left(\sqrt{j} \cdot \sqrt{\frac{f_0}{f_g}} \cdot \frac{r}{r_0}\right)}{I_0\left(\sqrt{j} \cdot \sqrt{\frac{f_0}{f_g}}\right)} \quad (1)$$

ここで、 B_z : 導体内の軸方向磁束密度

B_0 : 導体表面の磁束密度

I_0 : Modified zero order bessel function

j : 虚数

f_0 : コイルに加える交流電流の周波数

f_g : 限界周波数 $=\rho/2\pi\mu r_0^2$

ρ : 導体の固有抵抗

μ : 導体の透磁率, r_0 : 丸棒の半径

$$J_\phi(r) = \frac{1}{\sqrt{j}} \cdot \sqrt{\frac{f_0}{f_g}} \cdot \frac{B_0}{r_0 \mu} \cdot \frac{I_1\left(\sqrt{j} \cdot \sqrt{\frac{f_0}{f_g}} \cdot \frac{r}{r_0}\right)}{I_0\left(\sqrt{j} \cdot \sqrt{\frac{f_0}{f_g}}\right)} \quad (2)$$

ここで、 J_ϕ : 丸棒内に同心円状に流れるうず電流密度

I_1 : Modified one order bessel function

実際の被検査体は管であるが、管の場合も丸棒の場合と同様の傾向を示す⁽⁵⁾ので、この場合は上記丸棒の場合について論ずることとする。

さて、(1)、(2)式から丸棒内の磁束分布とうず電流分布を求めると第1、2図のようになる。磁束およびうず電流の透入深さ δ_B および δ_J は、磁束密度およびうず電流密度がそれぞれ外表面の値の $1/e$ つまり37%になるまでの表面からの深さであるとの定義に従えば、第1、2図を用いて、 δ_B または δ_J と周波数との関係は第3図のように表わされる。

したがって、うず電流の透入深さ δ_J を所要の値に

第1図 丸棒導体内の磁束分布

第2図 丸棒導体内のうず電流分布
($r_0 = 1 \text{ cm}$ とする)

第3図 周波数と磁束およびうず電流
透入深さとの関係

選ぶには、第3図の δ_r の値に対応する f_0/f_1 を求め、 f_0 は被検査体の材質と径より定まるので、これから求められる周波数 f_0 を用いればよい。

本法について、高低2つの周波数をいかに選ぶべきかは、この δ_r の値をそれぞれいかに選ぶべきかに帰着するわけで、本法を金属管の欠陥検査に应用する場合、高周波 f_h のうず電流は管内の表面近くのみ流れてその部分のみの欠陥検出を行なうようにし、低周波 f_l のうず電流は管内全体に流れて管内面の欠陥をも検出するようにしたいので、高周波のうず電流透入深さ δ_{rh} は管肉厚より充分小とし、低周波のうず電流透入深さ δ_{rl} は管肉厚より大に選ぶのが適当である。

1例として、 δ_{rh} を管肉厚の0.5倍、 δ_{rl} を1.5倍に選べば、外径10 mm、肉厚0.75 mmのアルミニウム管($\rho = 2.62 \mu\Omega\text{-cm}$)に対する f_h は48 kc、 f_l は6.8 kcとなり、同寸法のジルカロイ管($\rho = 45 \mu\Omega\text{-cm}$)に対する f_h

は840 kc、 f_l は115 kcとなる。

2. パルス波形と周波数帯域

以上の考察はすべて正弦波の交流を念頭においているが、本法でうず電流探傷用コイルに加える電流波形は第4図(a),(b)のようなパルス発生回路で発生される減衰振動パルス波形で、これが一定時間間隔ごとにコイルに加えられる。

(a) パルス発生回路

$$V = V_0 e^{-(R/2L)t} \cos \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \cdot t$$

(b) パルス波形

第4図 パルス発生回路とパルス波形

この1つの波形はつぎのとおりになる。

$$V = V_0 e^{-\alpha t} \cos \omega_0 t \quad (3)$$

ここで、 V_0 : 初期電圧値

α : 減衰定数 $= R/2L$

ω_0 : パルス角周波数 $= 2\pi f_0$

$$= \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$$

t : 時間

いまこのようなパルス波が、周期 T_1 、つまり繰り返し周波数 $f_1 = 1/T_1$ で加えられた場合について、Fourier展開してその周波数成分を求めてみると、大部分は f_0 の付近に集中していることがわかる。1例として、 $V_0 = 1V$ 、 $\alpha = 2 \times 10^4 \text{ sec}^{-1}$
 $f_1 = 10^3 \text{ cps}$ 、 $f_0 = 10^5 \text{ cps}$
の場合について、周波数成分を求めた結果を第5図に示す。

$V = \varepsilon^{-2 \times 10^4 t} \cos 2\pi \times 10^5 t$ の波が 10^{-8} sec の周期で繰り返される場合の Fourier 級数

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{2n\pi}{10^{-8}} t + b_n \sin \frac{2n\pi}{10^{-8}} t \right)$$

第5図 パルス波の Fourier 展開例

第3図からもわかるとおり、うず電流透入深さは周波数に多少の相違があっても大きく変わることがないので、上記のようなパルス波を用いる場合、周波数は f_0 で代表させても大きな誤りはないといえる。

Ⅲ. 装置の説明

1. 回路方式

本回路方式のブロックダイアグラムを第6図に示す。同期信号発生器は、マルチバイブレータによる矩

形波発生回路で、ここで得られる矩形波を微分して正の尖頭パルス波を得、これをサイラトロンによる低周波パルス発生回路に加える。また、上記と逆位相の矩形波を微分して得られる正の尖頭パルス波を高周波パルス発生回路に加える。したがって、低周波パルスと高周波パルスとは時間的に交互に生ずることになる。これらパルスの周波数は、第4図で示したようにコイルのインダクタンスと、これに並列に挿入されたコンデンサの容量によって定まる。

このようにして生じた2つのパルス波は、パルス合成トランスにより合成されて交互に同一励磁コイルに加えられる。このように同一コイルに加えるようにしたのは、被検査体とコイル相互の幾何学的配置による高低2つの周波数の検出信号の差異をなくすためである。

つぎに、励磁コイルの内側に差動に巻かれた検出コイルからの検出信号は、バランス回路を経てゲート回路に入り、ここで低周波信号と高周波信号とに分離される。このゲート回路のゲート信号は、同期信号発生器からの矩形波を時間的に約 $1/4$ 周期だけ遅らせた信号とその逆位相の信号とを用いる。

こうして分離された高低両周波検出信号は、それぞれ三角波となして増幅したのち整流されてレコーダに記録される。

このようにゲートによる分離を行なっているので、検出部の回路は周波数に依存せず、周波数の選定は発振部のみで行ないうる。

第6図 装置のブロックダイアグラムと各部の波形

第6図には、同時に回路各部の波形を示した。

本装置の外観を写真1に、また、発生された高低両周波のパルス波形と合成されたパルス波形の1例を写真2に示す。

写真1

写真2

2. 探傷コイルの構造⁽⁶⁾⁽⁷⁾

うず電流探傷コイルに要求される性能としては、

- (1) 近接する2つの欠陥がある場合にも、できるだけこれらを分離検出できるよう、良好な分解能が望まれる。
- (2) 低周波パルスにより、管の内面の欠陥をも検出できるようにするため、内面の磁束密度は表

面の磁束密度に比べてあまり小さくならないようにすることが望ましい。

上記(1)の性能を得るには、被検査管に加える磁束の軸方向の分布を集中させる必要があり、また(2)の性能を得るには、第Ⅱ章で述べたような表皮効果を考えない場合に磁束の径方向の分布を平坦にする必要がある。

実際には、この両者を完全に満足するようなコイルを得ることは困難であるが、このような観点から従来のものに改良を加えて第7図に示すような構造の探傷コイルを用いた。

第7図 探傷コイルの構造

この構造のコイルでは、磁束の軸方向の分布を集中させるため、励磁コイルとして主コイルの両側に補助コイルを置き、これに主コイルと逆の励磁電流を流して、主コイルによって生ずる磁束分布の袖を打ち消したことで、および被検査管の置かれるべき位置における磁束分布を平坦にするため、被検査管に対して充分大きな径の励磁コイルを用いた。

検出コイルは、2つのコイルを差動接続したもので、2つのコイルの間隔は励磁コイルで発生される磁束の軸方向分布の集中度に合わせて定め、コイルの径は被検査管の径より若干大きくなるように選んだ。

IV. 実験結果および検討

1. 供試材料

試料としては、外径12 mm、肉厚0.8 mmの2Sアルミニウム管(王禅寺臨界実験装置の被覆管として用いたもの)に、第8図に示すように、内外面に人工欠陥として各種深さのノッチを付したものをを用いた。しかし、このままではノッチが端部にあるため、ノッチの検出信号に端の影響が入るおそれがあるので、これをさけるため、第9図に示すように、ノッチを付した端部に同材質同寸法の管を樹脂で接着させたものを実験に供した。

(a) 外面軸方向ノッチ試料

(b) 内面軸方向ノッチ試料

第8図 供試試料(材質: 2Sアルミニウム)

2. 実験方法

実験方法は、一般のうず電流探傷の場合と同じように、被検査管をコイル内に貫通させて一定速度で駆動し、上記人工ノッチの検出信号をペンレコーダにて記録するようにした。第9図は、このときペンレコーダに記録される信号の例を示したが、ここで検出信号の大きさとしては、検出コイルがノッチ端部に入るときに生ずる山の高さ V_n を記録紙から求めた。

第9図 供試試料とレコーダに記録される検出信号の例

なお、この際の試料の駆動速度は約 3 cm/sec、ペンレコーダの記録速度は 5 mm/sec とした。

3. 実験結果ならびに検討

各種人工欠陥による検出信号をペンレコーダに記録した結果の1例を第10図に示す。これは低周波 f_L を 8.75 kc とし、高周波 f_H を 50 kc とし、管外面の深さ 1.0~0.8 mm の人工ノッチの検出信号を同時に記録したものであり、ノッチの深さが深くなると信号の大きさも大となる様相がわかる。

第10図 人工欠陥検出結果の1例

このようにして、各種の周波数を用いて外面ならびに内面の人工ノッチ深さと検出信号との関係を求めた結果を次頁の第11図に示す。

第11図からつぎのことがいえる。

- (1) 一般に周波数が比較的低い範囲では、外面欠陥の深さが深いほど検出信号は大となるが、周波数が高くなると、外面欠陥の深さが変わっても検出信号の大きさはあまり変わらない。
- (2) 一般に周波数が高くなると、周波数の低い場合に比して内面欠陥の検出感度は減退する。

これらの結果は、いずれも第Ⅱ章で述べた理論的な傾向と一致するものであり、これから同一欠陥に対する低周波検出信号と高周波検出信号とを比較することにより、その欠陥の深さや内外面の別を判定することが可能となる。

ここで用いたアルミニウム管の外径は 12 mm、肉厚は 0.8 mm であるので、第Ⅱ章で論じたように、うず電流の透入深さ δ_r が肉厚に対して大きい場合と小さい場合、ここでは低周波 f_L として 8.75 kc、高周波 f_H

第11図 各種周波数でのノッチ深さと検出信号との関係

として 50 kc を採用した場合を検討してみる。この場合、 f_i に対する透入深さ δ_{ji} は 0.96 mm で肉厚 0.8 mm の 1.2 倍となり、 f_h に対する透入深さ δ_{jh} は 0.37 mm で肉厚の 0.46 倍となる。このような周波数の組合せを用いた場合、各種人工ノッチ深さと検出信号との関係は第12図のようになる。ただしこの場合には、外面深さ 0.5 mm のノッチに対する高低周波検出信号の大き

さが一致するようそれぞれの検出回路の感度を設定してある。なお、第12図で高周波検出信号は、内面 0.3 mm 以下のノッチに対しては雑信号以下となつてはつきり検出できなかった。

第12図から、低周波検出信号と高周波検出信号との比 S を求めて、内外面人工ノッチ深さとの関係を求めると第13図のようになり、これより明らかにつぎのこ

第12図 選定された2つの周波数でのノッチ深さと検出信号との関係

第13図 各種人工ノッチに対する低周波検出信号と高波検出信号との比

とが いえる。

$$S = \frac{f_l \text{の検出信号 } V_{nl}}{f_h \text{の検出信号 } V_{nh}} < 1; \text{ 外面深さ } 0.5 \text{ mm} \text{ 以下の欠陥}$$

$$1 < S < 1.4: \text{ 外面深さ } 0.5 \text{ mm} \text{ 以上の欠陥}$$

$$2 < S: \text{ 内面欠陥}$$

欠陥検出信号の絶対値は、欠陥の深さのみならず、その広がり の程度にも依存するので、これだけから欠陥の深さや内外面の差を判別することはできないが、上記のように S を求めれば、検出信号の絶対値の大小にかかわらず欠陥の深さや内外の別を推定することが可能となり、検査結果の判定上有力な手段となりうる。

実際に遭遇する種々な欠陥に対しては、今後経験を積み重ねなければならないが、以上の人工欠陥による検討結果から、2つの周波数の選定は理論的に予想される値を採用してよく、したがって各種材質や寸法の管に対しても、本実験の場合とほぼ同様のうず電流透入深さの条件を与えるよう周波数を選定してよいと思われる。

V. 結 言

以上述べたように、本試作探傷器は、ほぼ所期の結果が得られることを確認し、すでに実用に供している

が、最近の核燃料被覆管は、原子炉の高度化に伴いますます高度の信頼性が要求され、微小な欠陥の確実な検出が要求されるようになってい るので、今後さらに種々な材質や寸法の管について実験を試み、また自然欠陥に対する経験を積むことによって、本探傷器による検査法を確立したいと思っている。

終りに臨み、終始ご指導を賜った日立研究所西堀博博士ならびに片木剣三郎博士に謝意を表する。

(1964年 1月16日 受理)

— 参 考 文 献 —

- (1) C.J.RENKEN, R.G.MYERS, W.J.MCGONNAGLE: ANL-5861, (1958).
- (2) C.J.RENKEN, R.G.MYERS: ANL-5935, (1959).
- (3) F.FÖRSTER, STAMBE: *Z. Metallkunde*, **45**, 166, (1954).
- (4) R.HOCHSCHILD: "Progress in Nondestructive Testing", **1**, 59 (1959), Macmillan.
- (5) R.C.MCMMASTER: "Nondestructive Testing Handbook", **2**, Sec. 38, (1959), Ronald Press.
- (6) K.ONO, W.J.MCGONNAGLE: ANL-6278, (1961).
- (7) 小野邦男: 非破壊検査, **13**, 4, (1964).

☆ 本 誌 投 稿 の 手 引 ☆

- 一般投稿は研究論文・技術報告・資料を原則として、会員の資格を要する。
- 内容はオリジナルものに限り、暫く刷上り8頁以内(超過の場合、超過分1頁当り実費約4,000円は著者負担)とする。和文は「会誌」に、欧文は Journal に掲載される。欧文の場合は修文添削にとくに充分な考慮を要する。
- 掲載範囲は、原子力研究に関連する凡ゆる部門を含め、とくに限定しない。
- 執筆にあたっては投稿規程に従い、所定の原稿用紙を使用する(欧文は適宜に厚手のタイプ用紙に2段送り、1枚約25行にタイプする)。和・欧文とも所定の原稿表紙を添付する。図面の線図はそのまま製版できるよう必ず墨入れトレースする。
- 投稿希望者は事務局へ連絡すれば、原稿用紙(30枚綴1部100円干共)と投稿規程が送付される。
- 和・欧文を問わず表題・抄録・所属機関名などを和・英両文で適確に書いて添付する。
- 別に締切り日は設けない。原稿受理次第「受理通知」を本人に送る。原稿は当該分野担当の

査読委員の査読に回わり、次回以後の編集委員会において採否を審議する。査読通過および掲載巻号は決定次第通知される。

- 査読通過した論文は受理順に掲載される。(掲載まで約3~4ヵ月)
- 掲載論文1篇につき30部まで無料で別刷が贈られる(30部以上希望の時は、1部につき、100部まで4頁以内50円、5~8頁60円程度著者負担)。
- 査読・審議の結果、内容・文章の短縮・修正または図面トレースの書直しを要求されたり、時には掲載を遠慮いただく場合があるので、予めご了承ください。

特に欧文の修文・添削については著者の負担とする(和訳を要求される場合もある)。

- 返却原稿は6ヵ月以内に再提出なき場合は撤回とみなされる。
- 討論・寄書・談話室・私のノートから・会誌に期待するの各欄は、随時、随意に気軽なご寄稿を歓迎する。
- その他詳細は事務局へお問い合わせ下さい。