技術

報告

249. 2進コード化熱電対式水位計の開発と 炉容器内水位計測への適用試験

荒 克之^{*1}, 片桐 政樹^{*1}, 若山 直昭^{*1},
小林 一夫^{*2}, K. P. TERMAAT^{*3}, T. JOHNSEN^{*4}

(1992年 6月17日 受理), (1992年 11月24日 再受理)

*Development of Water Level Gauge with Binary Coding Thermocouples and
Its Application to Measurement of In-Vessel Reactor Water Level*

By Katsuyuki ARA, Masaki KATAGIRI,
Naoaki WAKAYAMA, Kazuo KOBAYASHI,
Karel P. TERMAAT and Tore JOHNSEN

In response to requirements from the authorities after the TMI-II accident, the authors proposed a new reactor water level gauge named BICOTH to perform direct measurement of the in-vessel reactor water level. The BICOTH is based on a binary coding arrangement of differential thermocouples with heaters. The success of trial fabrication and out-pile tests of prototype BICOTHs was followed by in-pile tests of a reactor-grade BICOTH in the Dodewaard nuclear power plant in the Netherlands. The in-pile tests proved its excellent in-vessel performances and revealed some points to be improved and developed.

Its absolute high measuring accuracy is assured by the geometrically-fixed positions of distributed hot-junctions of thermocouples in the BICOTH. The continuous measurement of water level change becomes possible with the additional utilization of analog information about the axial temperature profile in the BICOTH; i.e. the digital/analog hybrid processing of BICOTH output signals. The mechanical structure of BICOTH is as same as that of a metal-sheathed multi-wire thermocouple so that it is stout and heat- and pressure-resistant.

KEYWORDS: level indicators, measuring instruments, reactor control system, binary-coding thermocouples, differential thermocouple, in-vessel water level, measuring method, accuracy

I. 緒 言

1979年3月28日に発生した TMI-2 事故とその後の詳しい調査から多くの教訓が学ばれ、安全上検討すべき点と改善すべき点について、原子力安全に責任ある公的機関から幾つかの提案と要求がなされた⁽¹⁾⁽²⁾。この中に、原子炉水位低下および炉心冷却不足の発生を迅速に知る手段の1つとして、原子炉容器内水位を直接かつ正確に測定する可能性の検討が含まれていた。

このような背景のもとに、米国においては、加熱差動熱電対式、超音波式、 γ サーモメータ式、中性子検出器式、差圧式等の水位計が提案され、それらの開発と性能評価試験が行われた^{(3)~(6)}。このうち実際に採用されたのは、2, 3の例外を除い

^{*1} 日本原子力研究所 (Japan At. Energy Res. Inst.)

^{*2} 助川電気工業(株) (Sukegawa Electric Co., Ltd.)
(現在は中田造機(株))

^{*3} N.V. tot Keuring van Elektrotechnische Materialen (KEMA), The Netherlands.

^{*4} OECD Halden Reactor Project, Norway.

て、加熱差動熱電対式水位スイッチと差圧式水位計である。この2つの水位計について米国原子力規制委員会(NRC)がオークリッジ国立研究所において性能評価試験を行い、両者共に望まれる精度を満足するものではないが、異常の兆候を検知するいわゆる異常診断には有効であるとして、合格としている⁽⁷⁾。

米国 NRC が望む精度は測定誤差として $\pm 6\%$ ($\pm 0.75\text{ m}$) 以下である。これに対し、原子炉1次系の小破断事故時に対する加熱差動熱電対水位スイッチと差圧式水位計の測定誤差は $\pm 10\%$ ($\pm 1.25\text{ m}$) $\sim \pm 30\%$ ($\pm 3.75\text{ m}$) と大きい⁽⁷⁾。この原因は水位計方式そのものにある。すなわち、加熱差動熱電対式水位スイッチを用いる方式では、炉心上部に設けた管内にこの“水位スイッチ”を数個(最大8個)縦に並べたもので、全測定範囲にわたっての水位の連続測定を行うものではない。実際の例での分解能は(0.6~1.2 m)である⁽⁷⁾。

一方、差圧式水位計方式では、原子炉容器の底部、ホットレグ(1次冷却水出口)、頂部の3箇所から圧力伝送管を外に引き出して差圧計に導いている。そのため、原子炉過渡時には炉心内の複雑な冷却水の流れや、炉心の内と外の温度差の影響を受け、水位測定に大きな誤差を生じる。

著者らは、原子炉容器内における直接的かつ確実な水位計測を目的として、加熱型2進コード化熱電対(BICOTH: Binary Coding Thermocouples with Heaters)式水位計を提案し⁽⁸⁾⁽⁹⁾、その試作試験により実際の原子炉への適用可能性を示した⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。続いて、日本原子力研究所、ハルデンプロジェクト(OECD Halden Reactor Project, ノルウェー)および KEMA(N.V. tot Keuring van Elektrotechnische Materialen, オランダ)の共同研究として、1985年に原子炉級の BICOTH 式水位計を製作し、1986年からオランダのドデワード原子力発電所(自然循環型 BWR プラント, 熱出力 186 MW, 電気出力 60 MW)の炉内において実炉内適用試験を行ってきた⁽¹²⁾⁽¹³⁾。約4年にわたる本試験を通して、開発した BICOTH 式水位計の炉内適用性を確認するとともに、実用化に当たっての改良点およびデジタル/アナログのハイブリッド式信号処理による水位の連続測定の可能性を示すことがで

きた。ここに、これまでの研究開発の成果をまとめて報告する。

II. BICOTH 式水位計の原理

Fig. 1 に示すように、金属シースヒータピン的一部分を水中に挿入して加熱用電力を投入すると、シース表面から気相部および液相部への熱伝達率の違いにより、シース表面温度分布は水面付近で急激に変化する。したがって、このヒータピン表面温度分布の急激に変化する位置を検出すれば、水面位置すなわち水位を検出することができる。その方法の1つとして、シース表面軸方向に沿って多数の熱電対を取り付ける方法が提案されている⁽¹⁴⁾。しかしこの方法を原子炉容器内水位検出に適用すると、多数の熱電対線を原子炉容器外に取り出す、いわゆるケーブル貫通にかなりの負担が生じる。

Fig. 1 Metal-sheathed heater-pin and its surface temperature distribution

そこで著者らは Fig. 2 に示す差動熱電対列(DTT: Differential Thermocouple Train)を用いることを考案した。この DTT は2種類の熱電対素線 A, B を交互に直列接続して $2M$ 個の温度接点を形成している熱電対列で、別の見方をすれば M 個の差動熱電対を直列接続した差動熱電対列である。そこで、図に示すように、各温度接点の温度が $T_1 \sim T_{2M}$ で出力端の温度が T_0 であるとき、差動熱電対列の出力電圧 E は M 個の差動熱電対の出

Fig. 2 Differential thermocouple train (DTT)

力の総和となることから次式となる。

$$E = \sum_{k=1}^M \alpha_{ab} (T_{2k} - T_{2k-1}) = \sum_{k=1}^M \alpha_{ab} \Delta T_{2k-1} \quad (1)$$

ここに、 α_{ab} : 素線 A, B から成る熱電対の熱電能
 ΔT_{2k-1} : 奇数区間(2k-1)の両端部温度接点間の温度差

さて Fig. 3(a) に示すように、ヒータピンのシース表面に軸方向に沿って電気絶縁された DTT を取り付けただけの場合を考える。ここで、シース表面の軸方向温度分布が Fig. 3(b) に示すように、水面位置でステップ状に変化し、水面より下位および上位でそれぞれ一定の温度 T_1 , T_2 にあると仮定する。

いま水面が偶数区間(2k-2)にあるとすると、この区間より上位にあるすべての奇数区間の温度は T_2 で、また下位にあるすべての奇数区間の温度は T_1 なので、(1)式において、 $\Delta T_{2k-1}(k=1, 2, \dots, M)=0$ となり、したがって、 $E=0$ となる。

次に水面が奇数区間(2k-1)にあるときは、

$$\Delta T_{2k-1} = T_2 - T_1$$

$$\Delta T_{2i-1}(i \neq k, i=1, 2, \dots, k-1, k+1, \dots, M)=0$$

Fig. 3 Binary output of DTT with reference to water level

となるので、 $E = \alpha_{ab}(T_2 - T_1) \equiv E_d (\neq 0)$ となる。

ここで、 $[E=0]$ を 2 進数の「0」に、また $[E=E_d]$ を 2 進数の「1」に対応させると、水面の移動につれて DTT の出力は、Fig. 3(c) に示すように、「0, 1, 0, 1, ...」の 2 進信号となる。これをベースにして、Fig. 4 に示すような 1 群の DTT による

Fig. 4 Binary-coded DTTs and their outputs

水面の絶対位置を検出するための「2進コード化熱電対」の構成が考え出された。この図は測定範囲を15の区間に分割してデジタル式に水位を検出しようとする場合の例で、各区間に4桁の2進グレイコードを割り付け、このコードの4つの桁に対応する4本のDTTを用意したものである。各桁のDTTにおける温接点は、対応するコードの各桁において、数が[0⇔1]に変化するときの区間境界に配置してある。以下に、ヒータを含む2進コード化熱電対を加熱型2進コード化熱電対BICOTHと呼ぶ。図に示したグレイコードは最も基本的なグレイコードであるが、他にも多くの可能なグレイコードがある⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。区間数 N に対しDTTの本数(桁数) S を、 $S > \log_2(N-1)$ となるよう余裕を持たせ、各DTTの温接点の数がほぼ均等になるようなグレイコードが実用上好ましい。

DTTの動作原理に基づいてその考えを発展させると、3進コード化熱電対を構成することも可能である。その例をFig. 5に示す。Fig. 5(a)はクロメル(CR), アルメル(AL), コンスタンタン(CN)の3種類の熱電対素線を使って3進コード化用DDTを構成する例で⁽¹⁷⁾, CR/ALの組合せ区間では正(+)の信号を出力し, AL/ALではゼロ(0), また CN/ALでは負(-)となる。

Fig. 5 DTTs for trinary coding thermocouples with heaters

Fig. 5(b)はCR, ALの2種類の素線で構成する例で⁽¹⁸⁾, CR/ALで(+), AL/CRで(-), AL/ALおよびCR/CRで(0)となる。

Ⅲ. BICOTHの試作と作動試験

1. ピン型 BICOTH

試作したピン型 BICOTH の構造を Fig. 6 に示す。外径 20 mm, 肉厚 2 mm のヒータピンシースに幅 1.6 mm, 深さ 1.6 mm の縦溝を 5 本掘り, それぞれに 5 本の DTT [I1~I5] から成る 2 進コード化熱電対を埋め込み, その上に厚さ 2 mm のカバーシースを被せて, 高温高圧水の水位検出にも適用できるようにした。また比較のために, カバーシース表面にも [O1~O5] から成る 2 進コード化熱電対を埋め込んだ。ヒータピンシースおよびカバーシースの材料は SUS316 である。

Fig. 6 Fabricated pin-type BICOTH

Fig. 7 Static responses of pin-type BICOTH to water level

また各 DTT は外径 1.6 mm のインコネル 600 シースのクロメル・アルメル差動熱電対列である。測定範囲は約 2.6 m で、この範囲を下側より 100 mm ごとに 20 区間、それより上を 200 mm で 3 区間の計 23 区間に分割した。各区間には 5 桁のグレイコードに基づく 2 進数を割り当て、これに対応した DTT 群を配置した。

インコネル 600 シース DTT は通常のシース熱電対製造方法で製作した。その結果、温接点間隔は 200 mm の設計値に対して ± 7 mm ($\pm 3.5\%$) のズレが生じた。これは冷間線引加工によりシース DTT を直径 8 mm から 1.6 mm に減径していく工程での伸び率が DTT 線両端部と中央部で、また材料の組合せ(素線が AL/AL の部分と CR/AL の部分)で異なることによる。設計通りに調整して製作するには、数回の試作による伸び率に対するデータの蓄積とそれを反映した初期寸法の調整設

計が必要である。また、破壊試験として温接点溶接部の顕微鏡観察をした結果、その広がり約 5 mm であった。温接点の溶接は通常の TIG 溶接法で行なったので、レーザー溶接法の採用などにより溶接部の広がりを 2 mm 以下にすることは可能であろう。

このような温接点間隔の不揃いと温接点溶接部の広がりは測定精度に影響を与えるが、使用前に校正試験を実施して水位に対する実際の出来上がり区間配置*を校正し、この校正データをマイクロプロセッサ内に記憶させてそのデータに基づく水位表示を行えば、実際の出来上がり区間配置に基づく測定精度は保証される。

* 水位に対する各 DTT の出力電圧を測定し、各 DTT の最大出力電圧の 50% 点を見かけ上の温接点位置あるいは DTT 出力が「0」から「1」のデジタル変化を生じる区間実配置位置として校正する。

常温常圧水による静水面検出の校正試験は水位可変の透明アクリル管内で実施した。また、原子炉内温度圧力条件での校正試験はPWR炉内相当の高温高圧条件下(320℃, 15.0 MPa)で水位を変化できる長尺オートクレーブを製作して実施した。これらの結果はFig. 7に示した。

図はカバーシースの内側に取り付けた[DTTI1~DTTI5]の水位対出力電圧特性を示している。出力電圧は水面の下側と上側の安定領域の温度差に相当する熱起電力出力値で正規化してある。この温度差を、20℃-0.1 MPaの常温常圧水試験においては約220℃(8.8 mV), 320℃-15.0 MPaの高温高圧水試験においては約75℃(3.0 mV)になるように、ヒータピンへの電力投入を調整した。

図において、DTTの温接点位置と出力電圧の「立上がり開始位置」あるいは「立下がり開始位置」とがよく一致することが示されている。この位置関係は常温常圧水試験の場合と高温高圧水試験の場合とで変化はない。[正規化出力=0.5]のレベルを2進数「0」「1」の判定レベルとして、出力電圧のコード変換を行なった結果は各区間において設計コードとよく一致した。また、比較のために取り付けけたカバーシース外側のDTT[O1~O5]の出力はFig. 7に示したDTT[I1~I5]の出力とほとんど差異はなかった。

次に、常温常圧水の静止水面に対しBICOTHを急速に移動させることにより、過渡応答試験を行なった。移動範囲は5桁目の差動熱電対列DTT5の下側温接点を中心にして約±150 mmの範囲である。その結果をFig. 8に示す。BICOTHを急速に挿入した場合(水位ステップ上昇に相当)の69%応答時間は約31 sで、急速に引き抜いた場合(水位ステップ下降に相当)は約21 minであった。水位ステップ下降時の応答が遅いことの理由として、①BICOTH表面の濡れの乾燥に時間を要すること、②BICOTH表面から水への熱伝達率が比ベ気相部(実験では大気)への熱伝達率が非常に小さく、したがってBICOTH表面温度が平衡状態になるのにより多くの時間を要すること、の2つが考えられる。

Fig. 8に示した実験においては、BICOTH表面の濡れは数sのうちに完全に蒸発することが確

Fig. 8 Transient responses of pin-type BICOTH to rapid change of water level

認されており、したがって水位下降時の21 minという応答時間は②の原因による。しかし、BICOTH表面からの熱流束が小さい場合(水面上下部における表面温度差が小さい場合)には、表面の濡れの乾燥時間は無視できず、熱流束と温度圧力条件によって定まる遅れ時間を生じる。

実際の原子炉容器内での使用を考えると、BICOTH自身による水の沸騰は好ましくない。したがって、BICOTHを水の飽和温度圧力条件下で使用するには、BICOTH表面からの熱流束を大きくはできない。すなわち、水面上下部におけるBICOTH表面温度の差が小さい状態で使用することになる。実際の適用に当たっては、濡れの乾燥時間を含んだ応答特性の定量的評価を実施してBICOTH構造の適否を決定する必要がある。

2. ワイヤ型 BICOTH

試作したワイヤ型BICOTHの構造と構成をFig. 9に示す。ピン型BICOTHではDTTがヒータピンのカバーシース内に埋め込まれた構造になっているのに対し、ワイヤ型では個々のシース型DTT自身の内部にヒータ線を有する構造となっている。すなわち、外径1.6 mmのSUS

316 シースの内部にマグネシア絶縁されたクロメル・アルメルの DTT 線とアルメルのヒータ線が収納されている。そして、2 進グレイコードに対応して用意された 5 本のヒータ内蔵 DTT [DTT1 ~ DTT5] は、それぞれ外径 8 mm のステンレス鋼支持棒のまわりの支持リングに固定されている。測定区間は約 2 m で、[10 cm 間隔×20 区間]に分割してある。

Fig. 9 Fabricated wire-type BICOTH

試作したセンサに対して、ピン型センサとほぼ同じ試験条件で静水面検出校正試験および過渡応答試験を行なった。静水面検出校正試験の結果はピン型センサの場合とほぼ同様であったが、過渡応答特性については、センサ自身の熱容量の小ささを反映してピン型センサに比べてはるかに速い応答性を示した。Fig. 10 にその結果を示す。水位ステップ上昇時の 69.3% 応答は約 0.5 s、水位ステップ下降時では約 85 s であった。

Fig. 10 Transient responses of wire-type BICOTH to rapid change of water level

IV. 原子炉級 BICOTH 水位計の製作と実炉内試験

1. BICOTH 水位計の構成

原子炉級 BICOTH 水位計の構成を検討するに当たり、実際に試験を実施する場所、すなわちオランダ GKN 社のドデワード原子力発電炉(自然循環型 BWR, 熱出力 186 MW)の炉内条件(温度 290℃, 圧力 7 MPa)と、原子炉運転側から要求される水位計測への性能仕様を満足させることを考慮した。Fig. 11 はドデワード炉の炉内構造を示すもので、チムニイ上端部より上方 55 cm のところが通常運転時の平均水位であり、このレベルより [-40 cm ~ +70 cm] の範囲の水位を測定することが望まれた。また、製作する水位計は炉容器内壁と給水スパジャの間に装着可能な構造であることが要求された。そこで、水位計センサ部が細径にできることと応答速度が優れていることから、ワイヤ型 BICOTH を採用することとした。ワイヤ型 BICOTH を採用するに当っては実際の原子炉内で使用することを考慮し、また原子炉内でのシー

ス熱電対の使用経験を踏まえて、シース材料にインコネル600相当材料を、また絶縁材料にアルミナを使用することとした。これにより、炉内環境に十分に耐え得るワイヤ型 BICOTH を製作できると判断した。

Fig. 11 Dodewaard BWR and installation of BICOTH water level gauge

そこで、 $[-40 \text{ cm} \sim +70 \text{ cm}]$ の測定範囲に対し 5 cm の水位検出分解能を有すること、また故障に対して冗長性を有することの2つの点を基本として、Fig. 12 に示すような BICOTH 水位計の構成を決めた。すなわち、水位計の全体は図に示すような4桁の2進グレイコードに基づく2つの系統の BICOTH A, B から構成し、各系統の水位検出分解能を 10 cm として系統 A と B の位置関係を 5 cm ずらして配置することとした。これによって、系統 A, B ともに正常の場合は8桁のグレイコードに基づく BICOTH 水位計として 5 cm の分解能で水位検出が可能となる。また、いずれかの系統が故障した場合でも 10 cm の分解能で水位検出が可能である。

Fig. 12 Structure of reactor grade BICOTH water level gauge

2. センサの製作

Fig. 13 に、製作したヒータ内蔵差動熱電対列(以下、単にセンサ)の構造を示す。ヒータには Ni, また最上部温接点位置から上方のヒータリード線には Ni-Cu 合金を用いた。製作は通常のシース熱電対の製作方法で行なったが、特に注意した点は、①センサの温接点の溶接加工において可能なかぎり「点」状の温接点が実現できるように努力したこと、②最終仕上がり外径が $1/1,000$ の精度で製作すること、である。また原子炉内に持ち込むという点から、製作後に熱サイクル試験, He リーク試験, X 線検査, 実炉内温度圧力条件での

Fig. 13 Structure of DTT for reactor grade BICOTH water level gauge

オートクレーブ試験などを実施し、不良品の除外に努めた。

完成品については、点熱源の接触による温接点位置の確認および常温常圧水による出力校正試験を実施した。出力校正試験結果の代表例を Fig. 14 に示す。理想的には、センサ出力がゼロより一定値に増加していくときの「立上がり曲線」および一定値からゼロに減少していくときの「立下がり曲線」における「立上がり開始点」および「立下がり開始点」は、それぞれの温接点位置と一致することが望ましい。しかし実際の完成品では温接点溶接部は 4～7 mm 程度に引き延びており、温接点ごとにその長さが異なること、また溶接状態(クロメルとアルメルの混合状態)も異なることから、図の立下がり曲線の場合に見られるように、一致しない場合が多かった。さらに、温接点間の距離については設計値に対して ± 7 mm 程度のバラツキがあった。そこで出力校正曲線において、最大出力値の 50% になる点(水位)をセンサの「見かけ上の温接点位置」(デジタル出力の変化点[0 $\leftrightarrow$ 1])と定義し、設計値である 5 cm ステップの測定区間分割に最も近くなる組合せ 2 系統を選んで水位計を構成することにした。

Fig. 14 Example of output signal calibration results obtained with DTT for reactor grade BICOTH water level gauge

3. 水位計集合体の製作組立

ドワード原子炉は沸騰水型原子炉であり、運転中の原子炉内には沸騰泡立ち面(フロスレベル)

は存在するが明確な水面はない。したがって、なんらかの手段で沸騰泡がつぶれたときに現れるであろう水面(コラップスレベル)を実現し、その中に製作した BICOTH を置く必要がある。このような体系は、両端部の開いた管を原子炉容器内に設置すれば、その管内に実現することができる。この原理に基づいて、Fig. 15 のような水位計集合体を製作した。図に示すように、水位計集合体上半部に 2 系統の BICOTH を収納し、コラップスレベルを検出する構造とした。この場合の条件として、BICOTH への投入電力を必要最小限にして水位計集合体内部での沸騰を抑えることが重要である。

Fig. 15 BICOTH water level gauge assembly for Dodewaard BWR

水位計集合体の製作組立において特に注意した点は、センサの熱膨張による応力を緩和する構造である。これはセンサケーブルの応力腐食割れによる破損を避けるために重要な課題である。そのため、Fig. 16 に示すようなスプリングによる熱膨張の吸収構造を採用した。Photo. 1 にセンサワイアの取付け固定状態を示す。

4. ヒータ電源および信号処理システム

ヒータ用電源の主要回路部を Fig. 17 に示す。この電源は A, B 系統それぞれに用意されてい

Photo. 1 Assembling of DTT sensor cables

Fig. 16 Loose stretch mechanism for coping with thermal expansion of DTT sensor cable

る。絶縁トランスの2次側には、4本のセンサにヒータ電流を個別に供給する4つの独立した回路が用意されている。

Fig. 17 Schematic diagram illustrating heater power supply unit

この電源の特徴は、センサ最大出力が常に一定になるようにヒータ電流を制御していることである。すなわち、センサシース表面から液相部および気相部への熱伝達率は温度圧力条件によって変わるので、ヒータ電流を一定とすると、温度圧力条件の変化によりセンサ最大出力電圧が変化して正しいコード判別が困難になる。そこで、Fig. 12に示したように、すべての区間の2進コードには必ず1個以上の「1」が含まれていることに着目し、4本のセンサ出力信号のうち最も大きな値を示す信号を選択する回路を設けて、その最大値信号が常に一定となるように絶縁トランスの1次側電流を制御するようになっている。4つの回路間の不平衡はバランス抵抗で調整する。

Fig. 18に信号処理回路を示す。A, B系統のそれぞれのセンサ出力信号は、3 Hzで-3 dBのローパスフィルタ特性を持ち、かつ2,000倍の直流増幅率を持つフィルタ増幅器を通った後、2進コード変換のための「0/1」弁別器、ヒータ電流制御のための最大値信号検出回路および特性試験データの収集・解析のために別途用意したパーソナルコンピュータへそれぞれ分離供給される。「0/1」弁別器からの4つのデジタル出力信号は次のD/A変換回路に導かれるとともに、ハードワイヤード・ロジックユニットへ供給される。

D/A変換回路においては、2進コードのパターンと水位を1対1に対応させたテーブルをもとに水位を指示するアナログ変換信号が得られる。A, B系統のアナログ変換信号は、平均回路によって両者の水位レベルの平均値がとられた

Fig. 18 Schematic diagram illustrating signal processing for water level indication with BICOTH

後、デジタル表示される。また、それぞれのアナログ変換信号は、LED パーを使用した水位表示パネルに送られて原子炉水位のアナログ表示に使用されるとともに、アナログ・アラーム回路に送られて水位表示パネル上での水位異常の検出に使用される。ハードワイヤード・ロジックユニットの出力信号は水位異常を知らせる原子炉制御盤用警報信号として使用される。

一方、パーソナルコンピュータに送られたセンサ信号は、A/D 変換器により 8 ビットデジタル信号に変換され、データとして収集される。このデータは以下第 5～7 節で示すセンサ特性の詳細な解析に使用された。

5. 原子炉内作動試験

原子炉内作動試験は、①原子炉起動前コールド試験、②原子炉停止後ホット試験、③原子炉定格運転時作動試験である。Fig. 19 に、原子炉起動前コールド試験結果の 1 例を示す。このときの炉内温度圧力は常温常圧である。また、BICOTH の各差動熱電対列ヒータ(リード線を含む)への供給電力は約(25 V × 0.4 A)で、2 進コードの「1」に相当する差動熱電対列の熱起電力出力は約 0.8

mV(温度差で約 20°C)である。図に示したデータは炉水位を +70 cm から -5 cm まで下げていった

Fig. 19 Results of cold calibration test of BICOTH performed before reactor start-up;
(a) Direct DTT output signals amplified
(b) BICOTH water level indication

ときのもので、Fig. 19(a)の差動熱電対群の出力(増幅器出力)と、Fig. 19(b)の水位指示との対応がよく示されている。BICOTH 水位計の校正は、炉水位を20cmに静止させたときの直読式フロート式水位計の読みとBICOTH 水位計の指示を比較することで行なった。このとき、炉水位は完全に静止せず、直読式フロート式水位計の読みで 20 ± 1 cmの変化があったが、BICOTH 水位計の指示は20cmであり、これよりBICOTH 水位計の指示は正しいとした。

Fig. 20に、原子炉停止後ホット試験の結果を示す。この試験は、原子炉出力により炉内温度圧力条件をほぼ定格出力時と同じ高温高压条件(約 290°C , 7 MPa)にしたところで原子炉を停止(スクラム)させ、水位をフルスパンゆるやかに降下させて実施したものである。このときのBICOTH ヒータへの供給電力は約 $(50\text{ V} \times 0.6\text{ A})$ で、「1」に相当する最大出力は約 0.72 mV (約 18°C)である。この試験では、出力信号によるヒータ電流制御はまだ行っていない。そのため、水位が下降

Fig. 20 Result of hot calibration test of BICOTH performed after reactor scram at full power condition ;
(a) Direct DTT output signals amplified
(b) BICOTH water level indication

した時のヒータ加熱による水位計集合体上部の温度上昇を抑制できず、Fig. 20(a)に見られるように、やや大きなオフセットが生じた。しかしFig. 20(b)に示すように、BICOTH 水位計の出力は水位降下に対する予想通りの応答を示したので、高温高压条件下においてもBICOTH 水位計は正常に作動するものとした。

ホット試験の後、ヒータ電流制御ユニットの導入や信号処理ユニットの調整等を進めつつ、原子炉定格運転時におけるBICOTH 水位計の作動状態を監視した。その結果、約2週間後にBICOTH A系統のDTT:A-3(Fig. 12参照)が絶縁低下による不作動となった。これは、DTT 下端部のハウジング溶接部(Fig. 13参照)からの高温水の浸入によるものと思われた。そこで、BICOTH B系統のDTT:B-3の出力信号を同じくDTT:A-3の出力信号として利用することとした。この結果、全区間を5 cmの測定分解能で設定したものが、水位レベル WLG[65~60], WLG[35~30], WLG[15~10], WLG[-15~-20]の4つの区間(Fig. 12参照)の分解能が10 cmとなった。

その後は特に異常もなく安定に作動することが確認できたので、約2ヵ月後に原子炉定格運転時作動試験を実施した。その結果をFig. 21に示す。この試験は安全上許される範囲内で水位を変化させ、BICOTH 水位計の応答を調べたものである。図には他の主要な原子炉パラメータの値も示してある。BICOTH 水位計の指示は従来の差圧式水位計の指示とよく一致することが確認された。

Fig. 21 Performance of BICOTH during full power reactor operation as compared with that of DP-cell reactor water level monitor

6. BICOTH 出力のデジタル/アナログ・ハイブリッド処理

BICOTH による原子炉制御室の水位指示はおおむね運転員に好評であったが、水位指示のステップ変化はある種の緊張を生むとの指摘があった。そこで、DTT の水面付近での軸方向温度分布を水位のアナログ情報として利用することを試みた。すなわち、Fig. 14に示したように、DTT の出力は水位に対してステップ状に変化するものではなく、ある遷移領域において「0」 $\longleftrightarrow$ 「1」の間を連続的に変化する。この様子は DTT の水面付近での軸方向温度分布によって定まる。Fig. 22の実線で示したデータは Fig. 14に示したデータを正規化し、50%立上がり点および立下がり点を基準として $\pm 25\text{mm}$ の範囲を書き直したものである。すなわち、アナログ値としての出力電圧は、実際の水位が50%立上がり点あるいは立下がり点からどれだけ上下にずれているかを示す値である。著者らは、図の点線で示すように、この範囲で DTT の出力は直線的に変化すると近似し、Fig. 21に示したデータのスムージングを試みた。その結果を Fig. 23 に示す。1本の DTT の故障により分解能が10 cm となった水位レベル WL_G [35 $\sim$ 30]、WL_G [15 $\sim$ 10]においては、十分なスムージングが行われていないが、他の区間では水位指示はかなり連続的になった。DTT の出力を

Fig. 22 Extraction of analog information from DTT output signal about real water level existing in vicinity of hot-junction of DTT

直線近似でなく、例えば対数関数近似等を行えばより正確なものとなろう。

Fig. 23 Smoothing of BICOTH water level indication with digital-analog hybrid signal processing

7. 測定精度と応答速度の評価

BICOTH 式水位計の絶対測定精度はその中の DTT 群の温接点位置によって保証され、その精度は温接点位置校正精度によって決まる。水位計の製作組立後に、炉外の水ループ等を利用して“見かけ上の温接点位置”（例えば DTT 出力がその最大値の50%になる位置）を校正するとき、その校正誤差は $\pm 2\text{ mm}$ 以下である。一方、測定範囲を DTT 群の温接点位置によって区間分割したとき、実際の設計区間長に対して製作後の区間長のバラツキは $\pm 7\text{ mm}$ である。すなわち、最短区間長は(設計区間長 -7 mm)、最長区間長は(設計区間長 $+7\text{ mm}$)である。したがって、測定水位を BICOTH の2進コードに基づいて50 mm ほどのデジタル表示する場合を考えると、その表示には最大 $\pm [(50+7 \times 2)/2]\text{ mm}$ の不確定さが含まれていることになる。これに温接点位置の校正誤差を加えると、BICOTH 式水位計のデジタル水位表示には最大 $\pm 32\text{ mm}$ の不確定さが含まれる。

以上のことから、BICOTH 式水位計のデジタル水位表示の精度はおおよそ $\pm 30\text{ mm}$ 程度であると評価できる。また、DTT のアナログ出力値を当該区間での水位の情報源として取り入れる、いわゆるデジタル/アナログ・ハイブリッド出力信号処理の場合には、水位表示精度はデジタル表示に

比べて少なくとも1桁程度は改善されるものと思われる。これらの精度は、米国 NRC が要求している測定誤差として ± 0.75 m (± 750 mm) 以下という値に比べ、はるかに優れている。

次に応答速度について検討する。Fig. 20 より水位 [50 ~ -50 cm] での平均水位下降速度を求めると 2.1 cm/min である。このときの過渡応答速度(ランプ応答速度)を評価するために代表として DTT-AI のアナログ出力の立上がり変化に注目すると、その63%応答時間は約76 s である。したがって、水位がステップ状に下降変化したとすれば、その63%応答時間は76 s よりも幾分小さいはずである。仮にステップ応答時間もランプ応答時間と同等の76 s であるとしても、この高温高压条件下での応答時間は Fig. 10 に示した常温常圧での応答時間85 s より小さい。これは、常温常圧での気相の熱伝達率に比べ、290°Cでの飽和蒸気の熱伝達率が3.5倍ほど大きいことによる。

さて、この76 s という応答時間は BICOTH 水位センサそれ自身の応答速度を示すもので、原子炉水位変化に対する水位計全体としての応答速度ではない。これを評価するには、原子炉水位変化に対する BICOTH 水位センサ設置位置での水位変化応答を知る必要がある。そこで、Fig. 15 に示した水位計集合体構造において、被測定水位のステップ変化に対する BICOTH 水位センサ設置位置での水位変化応答を計算すると、その63%応答時間は約7 s となった(〔付録〕参照)。したがって、全体を単純な2つの1次遅れ系の結合であると近似すると、全体の63%応答時間は約83 s となる。

以上のことから、実炉内の高温高压条件下における BICOTH 水位計全体の炉水位変化に対する応答時間はほぼ90 s 程度であろうと評価できる。米国 NRC の要求では過渡応答速度についての規定はないが、10 min 程度の応答速度の水位センサの適用が認められている⁽⁵⁾。また、小破断 LOCA 時における10 min (600 s) 程度の時間遅れを議論している⁽⁷⁾。これらのことから、BICOTH 水位計は安全監視系として要求される応答速度を十分に有しているものと思われる。

V. 結 言

TMI-2 原子力発電所の事故を契機に、原子炉内で水位を直接計測できる新しい水位計の開発をめざして、加熱式2進コード化熱電対 BICOTH を提案し、その試作試験と実際の原子炉での適用試験を行ってきた。その結果、BICOTH の優れた特性と可能性が示された。

BICOTH による水位測定の絶対確度は、デジタル水位センサとして BICOTH 内 DTT の温接点の幾何学的配置によって保証される。また DTT の水面付近での軸方向温度分布を反映したアナログ出力を利用することによって、高精度かつ連続的な水位計測が可能である。その構造は金属シース多芯熱電対とよく似ており、単純かつ堅牢で耐高温高压性に優れている。

ドデワード発電炉内での実炉内適用試験により、以下のことが実証できた。

- (1) BICOTH を単にデジタル水位センサとして機能させた場合でも、測定誤差として ± 0.03 m 以下という高い精度での水位測定が可能である。これは米国 NRC の要求、すなわち測定誤差として ± 0.75 m 以下という要求を十分に満足する。
- (2) デジタル/アナログ・ハイブリッド信号処理を採用することによる水位の連続測定と測定精度の改善が可能である。
- (3) 水位の過渡的变化に対する応答速度は90 s 程度である。米国 NRC が認めている10 min 程度の応答速度および小破断 LOCA 時に問題となる10 min 程度の遅れ時間に対し、BICOTH の応答速度は十分に速い。このことから、BICOTH は安全監視系として適用可能と思われる。
- (4) 炉内適用試験の初期において1本の DTT ケーブルが故障したが、全体システム構成が5 cm ずらした A, B の2系統からなる冗長系であるゆえに、水位計としての機能を保持することができた。その後は他にトラブルもなく、1992年10月末の現在も水位計として正常に作動している。

また、今後の実用化に当って、改良すべき点お

よび開発実施課題は以下の通りである。

- (1) DTT の冷間減径線引工程における温接点間隔の伸びに対するデータの積み上げと、これを反映した DTT の初期設計組立て。これによって、完成時の温接点間隔のバラツキをなくし、デジタル水位計としての測定精度の向上を図る。
- (2) DTT 製作後の端末部溶接法の改良とその検査法の確立。これによって、初期故障の削減と長寿命化を図る。
- (3) LOCA 時および工学的安全設備作動時を模擬し得る原子炉安全性試験施設等での過渡応答試験の実施。これによって、安全系としての性能を実証する必要がある。

以上、著者らが提案した BICOTH 水位計について、その開発試験の結果を報告した。今後の新型軽水炉の開発あるいは軽水炉の高度化等に役立てば大きな喜びである。本水位計は原子炉内の水位計測のみならず再処理施設や安全研究施設などの厳しい環境下での液面センサとしても応用可能と考えている。

最後に、本水位計の提案から開発試験の各段階において、常に励ましとご支援を頂いた日本原子力研究所・原子炉工学部長 松浦祥次郎氏(現理事)および同・金子義彦氏(現大洗研究所長)に感謝いたします。また、水位計集合体の過渡応答計算にご協力を頂いた日本原子力研究所・原子炉工学部五藤 博氏に感謝します。

— 参 考 文 献 —

- (1) NUREG-0585, (1979).
- (2) 原子力安全委員会:「安全対策に反映されるべき16項目」, (1979).
- (3) HSU, Y.Y., *et al.*: *Nucl. Safety*, **22**, 728 (1981).
- (4) ROGERS, S.C., *et al.*: *IEEE Trans. NS.*, **29**, 665 (1982).
- (5) NEUSCHAEFER, C.H.: *ibid.*, **29**, 669 (1982).
- (6) HSU, Y.Y.: *Trans. Am. Nucl. Soc.*, **45**, 867 (1983).
- (7) ANDERSON, J.L., *et al.*: *IEEE Trans. NS.*, **36**, 1248 (1989).
- (8) 荒 克之, 他: 原子力学会「昭56秋の分科会」予稿集, E1, (1981).
- (9) 荒 克之, 他: 同 上, E2.
- (10) 荒 克之, 他: 同「昭57秋の分科会」予稿集, D19,

(1982).

- (11) 荒 克之, 他: 同 上, D20.
- (12) ARA, K., *et al.*: *IEEE Trans. NS.*, **36**, 1251 (1989).
- (13) 荒 克之, 他: 原子力学会「昭62年会」要旨集, F18~22, (1987).
- (14) 豊川俊次: 公開特許公報(A), 昭55-44923(1980).
- (15) GILBERT, E.N.: *Bell Technol. J.*, XXXVII, 815 (1958).
- (16) COHN, M.: *Inform. Control*, **6**, 70 (1963).
- (17) ARA, K., *et al.*: *IEEE Trans. NS.*, **37**, 1024 (1990).
- (18) VITANZA, C.: 私 信, ハルデンプロジェクト(1986).
- (19) 尾崎省太郎, 原 美明: “純流体素子入門”, (1967), 日刊工業新聞社.
- (20) 板谷松樹: “水力学”, (1959), 機械学会.

【付 録】

炉水位変化に対する BICOTH 水位センサ設置位置での水位変化速度

Fig. 15 に示した水位計集合体内部の BICOTH センサ設置位置において、その水位が外部の炉水位変化に対してどのように応答するかを検討する。水位計集合体のシュラウド管は二重管構造になっており、その構造・寸法の概略を Fig. A1 に示す。

炉水位が L_{r0} より L_r に時間 $t=0$ で 0.2 m のステップ上昇したとすると、シュラウド管底部の水位導入孔より炉水が流れ込み、シュラウド内管の水位 L_{in} と BICOTH センサ設置位置の水位 L_{out} がそれに追従して、ある応答速度で L_r まで上昇していく。このとき、シュラウド管の構造と寸法関係から、シュラウド管下半部の内管部の流れを無視し、流れは内管と外管の間のみにあるとする。また、このときの管路抵抗はオリフィス(流れの導入孔)部の抵抗に比べて無視できるとする。このような条件のもとに、流れ Q_1 (重量流量)に対して

$$Q_1 = C_f A_1 \{2g\gamma(P_1 - P_2)\}^{1/2} \quad (A1)$$

$$Q_1 = C_f A_2 \{2g\gamma(P_3 - P_4)\}^{1/2} \quad (A2)$$

ここに、 C_f : 流量係数

$A_i (i=1, 2, \dots)$: オリフィス流路面積

g : 重力加速度, γ : 水の比重

$P_i (i=1, 2, \dots)$: 静水圧力

が成り立つ。

Fig. A1 Water flows and water level changes in BICOTH assembly shroud tubes with change of outside reactor water

同様に、 Q_2, Q_3 に対して、

$$Q_2 = Q_1 - Q_3 \quad (A3)$$

$$Q_3 = C_f A_3 \{2g\gamma(P_4 - P_5)\}^{1/2} \quad (A4)$$

となる。

静水圧力 $P_i (i=1, 2, \dots)$ については、

$$P_1 = L_r \gamma \quad (A5)$$

$$P_2 - P_3 = 4.5 \gamma \quad (A6)$$

$$P_4 = (L_{in} - 4.5) \gamma \quad (A7)$$

$$P_5 = (L_{out} - 4.5) \gamma \quad (A8)$$

となる。

また、水位 L_{in}, L_{out} に対しては、 L_{r0} からの変化分、すなわち

$$(L_{in} - L_{r0}) \equiv \Delta L(\text{inner}),$$

$$(L_{out} - L_{r0}) \equiv \Delta L(\text{outer}) \text{ として,}$$

$$\Delta L(\text{inner}) A_{in} \gamma = \int_0^t Q_2 dt \quad (A9)$$

$$\Delta L(\text{outer}) A_{out} \gamma = \int_0^t Q_3 dt \quad (A10)$$

となる。

以上の式に、 $C_f = 0.6$, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, $\gamma = 10^3 \text{ kg/m}^3$, $A_1 = 8 \times \pi (4 \times 10^{-3})^2$, $A_2 = 10 \times \pi (2.5 \times 10^{-3})^2$, $A_3 = 4 \times \pi (1.5 \times 10^{-3})^2$, $A_{in} = \pi (8 \times 10^{-3})^2$ および $A_{out} = \pi \{(23 \times 10^{-3})^2 - (9 \times 10^{-3})^2\}$ を代入して整理すると、

$$\Delta L(\text{inner}) = 0.92 \int_0^t [0.2 - \Delta L(\text{inner})]^{1/2} dt$$

$$- 0.37 \int_0^t [\Delta L(\text{inner}) - \Delta L(\text{outer})]^{1/2} dt,$$

$$\Delta L(\text{outer}) = 0.053 \int_0^t [\Delta L(\text{inner}) - \Delta L(\text{outer})]^{1/2} dt$$

となる。

これを数値計算すると、Fig. A2 の結果が得られる。これより炉水位のステップ変化に対する BICOTH センサ設置位置の水位の 63% 応答速度は約 7 s であることがわかった。

Fig. A2 Calculation results; transient response of water levels inside BICOTH assembly shroud tubes to step change of outside reactor water level