

高レイノルズ数実流校正設備による給水流量計の校正

Calibration of feedwater flowmeter by high Reynolds number calibration facility

産業技術総合研究所	古市 紀之	Noriyuki FURUICHI
産業技術総合研究所	寺尾 吉哉	Yoshiya TERAO
産業技術総合研究所	高本 正樹	Masaki TAKAMOTO

A high Reynolds number calibration facility for feedwater flowmeter in nuclear power plant is described in the paper. This calibration facility is achieved a 1.8×10^7 Reynolds number which is equivalent one with the actual plant. A calibration result of ultrasonic flowmeters, which are used to measure feedwater flowrate in a nuclear power plant, is also described under a variety of upstream conditions. Through these calibrations, the calibration method of feedwater flowmeter is suggested.

Keywords: Reynolds number, Flowrate, Feedwater, Ultrasonic flowmeter, Calibration

1. 緒言

原子力発電所における増出力方法のうち、MUR (Measurement uncertainty recapture)は、給水流量計の精度を向上させることにより、熱出力を1~1.4%程度増加することが可能であり、特に大規模な設備の変更を伴わない。したがって、低コストにて増出力を行うことが可能とされるために、注目度は高く、原子力学会における検討等がこれまでも行われてきている^[1]。給水流量計測は現行、フローノズルまたはベンチュリのような差圧式の流量計により行われており、その不確かさはGETABをベースに一律1.76%とされている^[2]。MURは、このような現行の流量計よりも不確かさが小さく見積もられている超音波流量計を用いて、実施することが想定されている。

給水配管は高温高压であることから、流量計測においても非常に厳しい条件であり、設置する流量計は汎用のそれに対して特殊性が求められる。一般的な校正設備において校正された流量計がこの給水配管の条件においても同等の性能を示すことを期待することは難しい。温度や圧力のパラメータに関する流量計の内径等の幾何学的な補正や、超音波の音速に対する補正は比較的容易である。しかしながら、流量計においてはこのような条件だけではなく、流動場による影響を考慮に入れなくてはならない。これは、一般的にはレイノルズ数と呼ばれる無次元数によって整理される。このレイノルズ数が給水配管においては非常に高く、こ

れは一般的な流量計の校正設備において校正可能なレイノルズ数の範囲を大きく超えている。差圧式の流量計で流量算出に使用される流出係数は、レイノルズ数において整理されるのが一般的であるが、このレイノルズ数の範囲においては、実流校正が不可能であることから、流出係数を外挿で求めているのが実情であった。このことは、MURのために導入が検討されている超音波流量計についても同様で、この流量計は強いレイノルズ数特性を有することが一般的である。校正を外挿において行う場合には、この外挿に対する不確かさを流量計の不確かさに上乘せする必要があり、MURのような小さい不確かさを要求される場合には問題となることが想定される。

そこで、産業技術総合研究所・計量標準総合センター (NMIJ: National Metrology Institute of Japan) では、Fig.1に示されるような、高レイノルズ数実流校正設備を構築してきた^[3]。本設備は 10^7 オーダーのレイノルズ数における流量計校正を可能にしており、このような設備は世界的に例を見ない。また、国家標準として運営をしていることから、この設備において校正された流量計は、国家標準にトレーサブルであるといえる。原子力発電のように安全性に関する機器の校正においては、公的な機関における流量計の校正が望ましいが、これを実現することができる設備である。

本報告においては、設備の概要を述べた後、実際の超音波流量計の校正結果を紹介する。またこれらの校正を通じた給水流量計の校正方法についての提案や問題点を述べるものとする。

連絡先: 古市紀之、〒305-8563 茨城県つくば市梅園 1-1-1
中央第3、産業技術総合研究所、電話 029-861-2293、
e-mail: furuichi.noriyuki@aist.go.jp

2. 高レイノルズ数実流校正設備

2.1 設備概要

Fig.1 に設備の全体像を示す。本校正設備は、従来から存在していた液体流量（水）に関する国家標準設備に新規の循環設備を拡張することにより構築されている。循環設備はヘッダー、循環ポンプ 4 台およびそれに付随したライン、各ライン（A～D）に設置された参照標準流量計（以下 WS：Working Standard）、試験部、戻り管およびプルーバー等によって構成されている。

試験時の運転では、並列に配置された 4 台の循環ポンプにより流れを発生させる。ポンプ 1 台あたりの最大流量は 3000 m³/h であり、各ラインの合流後の最大流量は 12000 m³/h となる。また、水温は、常温から 70 °C における試験を可能としている。水温の制御は地下貯水槽の水を低熱源とした熱交換によって行われる。高温時の試験温度は 70±2 °C の範囲で制御が可能であるが、1 試験サイクルを 1 時間程度とした場合、±0.2 °C 程度で運転が可能となっている。なお、水温が 70 °C、流量 12000 m³/h の条件のもと、600A 配管では最大レイノルズ数 1.8×10⁷ における運転が可能な設備となっている。

2.2 校正方法

本設備における校正方法の概要を Fig.2 に示す。本設備における流量計の校正は比較法と呼ばれる手法によって行われる。比較法とは、参照となる流量計（ここでは WS）を使用して、下記の式により被試験流量計の校正係数（K：K ファクタ）を算出する方法である。

$$K = \frac{1}{t} \frac{I}{Q} \quad (1)$$

ここで、 I は流量計から出力されるパルス数である。流量計は一般的に流量に比例した周波数のパルス列を発信するため、単位体積あたりに発信されるパルス数を、上述の K ファクタと呼び、校正係数としている。 t は計測時間 (s)、 Q は被校正流量計設置場所における流量値 (m³/s) である。流量値 Q は、下記の式により算出される。

$$Q = \frac{1}{t} \left(\frac{I_A}{K_A} + \frac{I_B}{K_B} + \frac{I_C}{K_C} + \frac{I_D}{K_D} \right) \quad (2)$$

添え字の A～D は、各ラインを意味する。したがって、各ラインの WS の K ファクタを使用して、流量を算出

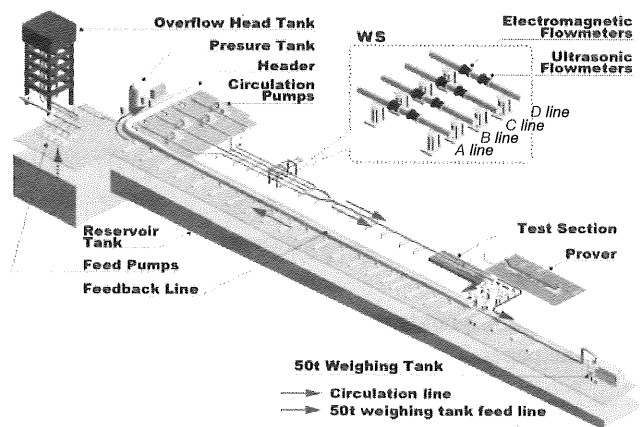


Fig.1 Overview of high Reynolds number calibration facility

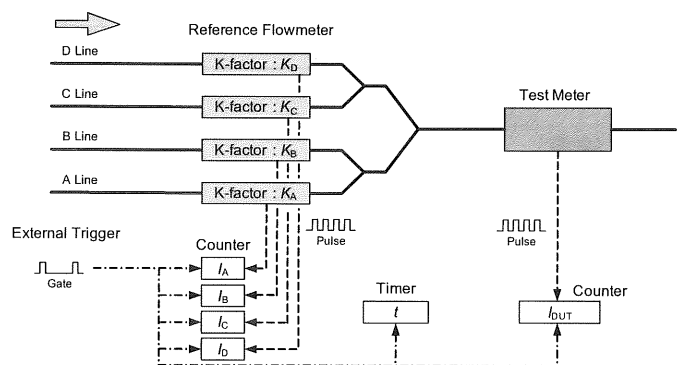


Fig.2 Schematic diagram of calibration method

することとなる。この K ファクタ値は、事前に 50 t 秤量タンクおよびプルーバーシステム等を使用して、校正された値となる。なお、WS は Fig.1 に示されるように、上流側に電磁流量計（Krohne 社 OPTIFLUX）、下流側に超音波流量計（同 ALTOSONI-V）を設置しているが、基本的に超音波流量計を正の WS として使用している。

校正は 10 分間の計測を 5 回繰り返して、K ファクタの平均値を算出する。また、この平均値の不確かさは以下の式により算出される。

$$U = k \sqrt{u_{CMC}^2 + \frac{\sigma^2}{5}} \quad (3)$$

ここで、 U は包含係数 k における拡張不確かさ（通常、 $k=2$ ）、 u_{CMC} は高レイノルズ数校正設備の標準不確かさ（最大流量に対して 0.038%^[3]）、 σ は K ファクタの標準偏差である。

3. 試験結果

3.1 給水流量計の不確かさ要因

給水流量計の不確かさについては、高レイノルズ数校正設備において個別に校正することを前提とすると、

大きく、(i) 補正係数の決定時の要因、(ii) 校正環境と実際の流量計の設置環境における差異による要因、(iii) 経年変化による要因に分けられると考えられる。

(i) に含まれる要因は、たとえば流量計の内径計測や電気回路等に依存する流量計自体の不確かさ要因と、後の詳述する流動場に起因する要因になる。レイノルズ数の外挿や上流側配管レイアウトの影響に関する不確かさもこの中に含まれる。通常、以上の要因は個体差が大きいと考えられる。これらの影響は、個別の校正を行い、それぞれに校正係数を求めることにより、この校正係数の中に含めることができる。これにより、以上を要因とする不確かさは、校正の不確かさそのものとなる。測定のばらつきについても、(3) 式に示されるように、校正の不確かさに含まれることになる。(ii) については校正時と現場設置時の差異であり、モデルとした配管形状と実配管との異なり、配管内面粗さによる影響、また、設置再現性や、温度による影響（校正時は 70 °C、実プラントは 200 °C 以上）等が、この不確かさ要因に相当する。その他、校正時と実機で異なる条件を持つもの（例えばケーブルの長さ）は、この中に含まれる。これらの不確かさ要因は、注意深く抽出し、ある程度の事前試験や調査を通して把握しておく必要がある。(iii) 経時変化については、定期点検間に流量計を再校正することができないことを前提に考えると、この期間に発生する可能性があるドリフトについて、不確かさとして見込む必要がある。超音波センサーの特性変化や内径の変化、配管内面粗さの変化等が要因となる。この経時変化による不確かさは、実使用後の再校正が望ましい。

3. 2 校正結果例

ここでは、給水流量計測に使用される可能性の高いと考えられる超音波流量計（Cameron 社、Chordal 型）の高レイノルズ数校正設備を使用した校正結果例を示す。この流量計はすでに米において多数使用されており、MUR が実施されている。また、原子力学会における検討においても、MUR 実施に最も近い流量計であると評価されている^[1]。

本節において実施される校正は、3.1 における (i) に相当する。給水流量計の校正においては、次の二点において特に注意して校正されなくてはならない。一点目がレイノルズ数である。レイノルズ数に関しては、緒言において示した通りであり、本校正設備における

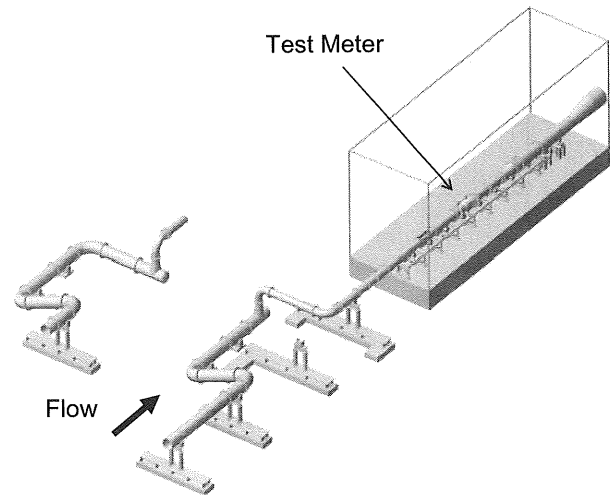


Fig.3 Example of 3D pipe layout

校正試験から、外挿に関する問題は解決される。

二点目は上流側条件である。一般的に流量計は上流側の条件によって、その特性が著しく影響を受ける。例えば上流側に曲がり管やバルブがある場合などは、その結果として流量計設置部における流速分布が異なる。流量計は流速分布に影響を受けるものが多く、特に超音波流量計においてはそれが顕著に発現する。したがって、通常流量計の使用では流量計の上流に十分に長い直管を設置することが、一般的である。しかしながら、給水流量配管は既設であり、後から設置される流量計に対して上流側の直管長さを十分に取ることは難しいとされる。したがって校正時に、設置される配管レイアウトを模擬することにより、この影響を取り去ることができる。模擬配管レイアウトの例を Fig.3 に示す。このような配管下流において試験を行うことにより、この配管レイアウトに特化した校正係数を得ることができる。この校正係数は、これ以外の配管レイアウトに使用する場合には、余分な不確かさを見積もらなくてはならないが、このレイアウトにのみ使用するのであれば、上流側影響による不確かさは考慮しなくてもよい、すなわち校正係数の不確かさに含まれることになる。

前述の超音波流量計に対する校正結果例を、Fig.4、Fig.5 に示す。Fig.4 が上流に十分な直管を設置して実施された校正結果であり、Fig.5 には、上流に実配管を模擬した複雑な三次元形状の配管を設置した校正結果である（以下 3D と呼ぶ）。流量計の上流側には、整流器（Tube bundle 型、三菱型）を取り付けた場合と、取り

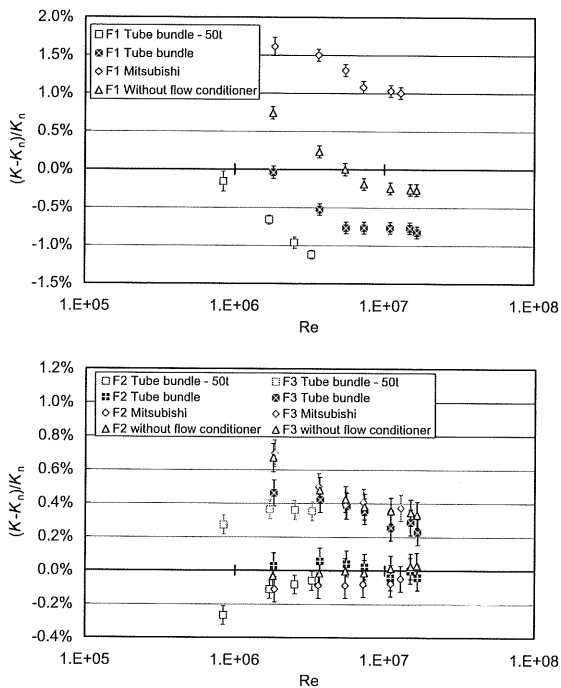


Fig.4 Calibration result for straight pipe layout

付けない場合に対して試験を行っている（結果は代表的な例のみ掲載）。流量計は上流側から Cameron 社 External 型 (F1)、Chordal 型が二台 (F2, F3) の順にて設置した。

結果については Chordal 型についてのみ検証する。直線、3D の試験ともに F2 と F3 の校正係数 (K ファクタ) のレイノルズ数に対するトレンドが大きく異なることが分かる。明らかな個体差を示しており、個別の校正が重要であることが分かる。レイノルズ数に対する感度については、比較的直線的な特性曲線を示しているため分かりにくいですが、低レイノルズ数での校正值から外挿した場合には、本試験における最大のケースで 0.1% ほどの偏差が生じる可能性がある。

3D の校正結果においては、上流側の整流器による効果から配管レイアウトを変えた場合の変化は大きくは観測されていない。しかしながら、特に F3 では、最大レイノルズ数においては最大最少の差が 0.1% 程度生じていることから、上流側配管を模擬した試験は必須である。特に、上流側に整流器を設置できない場合などは、曲がり管の影響を受けやすいので注意が必要である。

以上の校正における不確かさは、繰り返し性を考慮して 0.081% であり、この不確かさにはレイノルズ数の

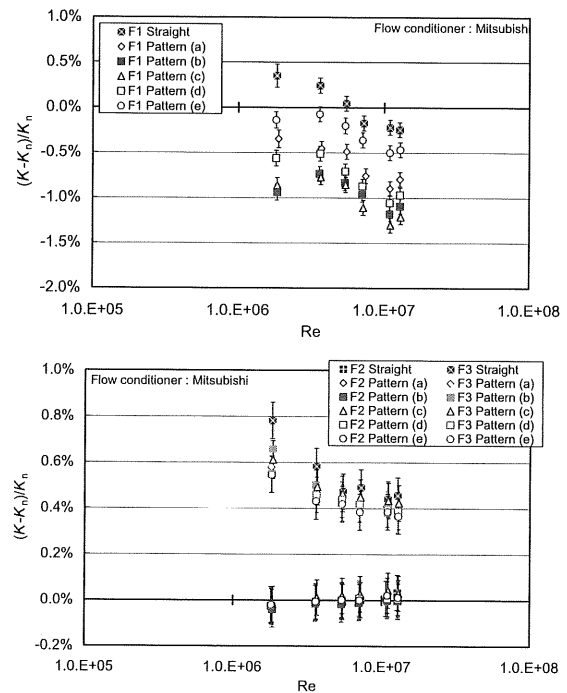


Fig.5 Calibration result for 3D pipe payout

外挿、立体配管等の上流側配管の影響、また流量計の幾何形状や電気回路に対する不確かさも含まれることになる。

4. 結言

産業技術総合研究所における高レイノルズ数校正設備を解説し、MUR を想定した超音波流量計の不確かさの考え方および校正結果を示した。

今後の課題としては、経時変化の見積もり方の検討があげられる。理想としては定期的な再校正により計時変化を抑制することが望ましいが、実プラントへ設置後に再び高レイノルズ数校正設備において校正を実施することは実質的に難しいことから、その方法を検討することが求められる。

参考文献

- [1] 岡本, 木倉, 山口, 三島, 関村, 原子炉出力向上に関する技術検討評価の結果について, 日本原子力学会誌, 50(12), 2009, pp.16-28
- [2] General Electric BWR Thermal Analysis Basis (GETAB) : Data, Correlation and Design Application, General Electric, NEDO-10958-A, 1977
- [3] Furuichi N., Terao Y., Takamoto M., A New Calibration Facility for Water Flowrate at High Reynolds Number, Flow Measurement and Instrumentation, Vol.20, No.1, pp.38-47, 2009