JNC TN9410 2001-010

「常陽」炉心内流量分布測定用電磁流量計校正試験（研究報告）

技術情報室
No.
2001. 8. -9
サイクル機構大洗工学センター

2001年3月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184　茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部　技術協力課

Inquires about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構（Japan Nuclear Cycle Development Institute）
2001

Ⓝ

JNC TN9410 2001-010
2 0 0 1 年 3 月

「常陽」炉心内流量分布測定用電磁流量計校正試験
（研究報告）

山本和弘[*1]、宮越博幸[*1]、林田均[*1]
上出英樹[*1]、石田公一[*2]、前田幸基[*2]

要 旨

高速実験炉「常陽」では MK－Ⅲ照射用炉心移行後の総合機能試験において、炉心内の流量配分が適切に行われていることを確認するための流量分布測定が計画されている。実機での流量測定に先立ち測定に使用する永久磁石式電磁流量計を炉心・機器熱流動試験施設を用いて炉外校正した。校正は容積法にて実施し、条件は「常陽」での使用条件を包含するよう温度および流量範囲をそれぞれ 200℃～275℃および 0～約 640ℓ/min とした。

試験の結果は、以下に示す通りである。

(1) 「常陽」での使用条件を包含する温度および流量範囲において適用可能な、流量と流量計出力の関係式を得た。流量計出力の直線性は良好で、非直線性はフルスケール（最大流量条件）の±0.4%以内であった。

(2) 実機使用温度（250℃）での流量計出力感度 ε は 29.48（μV/[ℓ/min]）であり、定格流量（約 570ℓ/min）での精度は約 1.5%となった。

(3) 流量計出力感度の温度依存性は次式で近似することができる。

$$\varepsilon = 21.39 + 1.16\times10^{-1}T - 5.02\times10^{-4}T^2 + 6.71\times10^{-7}T^3 \quad (T\,;\ 温度[℃])$$

(4) ナトリウム充填後、ナトリウム温度および流量を一定に保持した状態での流量計出力感度の時間変化から、流量計の流路管内面は比較的短時間で安定した状態となることがわかった。

(5) ナトリウムプラギング温度が異なる条件で流量計出力感度を比較した結果、ナトリウム純度が流量計出力感度に与える有意な影響は認められなかった。

以上の結果は、「常陽」MK－Ⅲ照射用炉心内流量分布測定およびその結果の評価に反映される。

[*1] 大洗工学センター、要素技術開発部　原子炉工学グループ
[*2] 大洗工学センター、実験炉部　技術課

JNC TN9410 2001-010
March, 2 0 0 1

In-sodium Calibration Test of Permanent Magnet Flow meter for JOYO Core Flow Distribution Measurement

Kazuhiro Yamamoto[*1], Hiroyuki Miyakoshi[*1], Hitoshi Hayashida[*1]
Hideki Kamide[*1], Kouichi Ishida[*2], Yukimoto Maeda[*2]

Abstract

Flow distribution in the core is planned to measure in the Experimental LMFBR, Joyo. Flow rate in a subassembly will be measured by permanent magnet type electromagnetic flow meter (EMF) which is set at the top of the subassembly by fuel handling machine.

In-sodium calibration tests of the EMF were carried out in the Core Component Thermal Hydraulics Test Loop (CCTL).

Tests were performed under such various conditions that sodium and permanent magnet temperature were 200, 225, 250, 275℃, and sodium flow rates ranged 0 to 640 ℓ/min. Tests results are as follows:

(1) Calibration curves were obtained at under each temperature condition. The correlations were linear and the maximum deviation between the calibration curve and the experimental data was within ±0.4%.

(2) The sensitivity of the EMF output (ε) at 250℃ was 29.48 (μV/[ℓ/min]). The uncertainty was 1.5% under the nominal flow rate condition (570 ℓ/min).

(3) ε depended on the sodium temperature (T) as follows:

$$\varepsilon = 21.39 + 1.16\times10^{-1}T - 5.02\times10^{-4}T^{2} + 6.71\times10^{-7}T^{3}$$

(4) Initial change of the ε after the sodium charge was examined, during few days. The ε was constant and stable.

(5) There was no dependency of impurity concentration (plugging temperature) for the ε.

The calibration curves and temperature dependency are applied to the flow distribution measurement and the evaluation in the Joyo core.

---

*1 Rector Engineering Group, Advanced Technology Division, O-arai Engineering Center, JNC

*2 Rector Technology Section, Experimental Reactor Division, O-arai Engineering Center, JNC

目 次

1．はじめに………………………………………………………………… 1
2．試験設備………………………………………………………………… 2
2.1　試験装置 ………………………………………………………………… 2
2.2　炉内電磁流量計試験体 ………………………………………………… 2
2.3　データ収録システム …………………………………………………… 3
3．試験方法………………………………………………………………… 4
3.1　試験方法 ………………………………………………………………… 4
3.2　試験内容 ………………………………………………………………… 4
3.2.1　濡れ特性試験………………………………………………………… 4
3.2.2　純度特性試験………………………………………………………… 5
3.2.3　校正試験……………………………………………………………… 5
4．試験結果………………………………………………………………… 6
4.1　濡れ特性試験 …………………………………………………………… 6
4.2　純度特性試験 …………………………………………………………… 6
4.3　校正試験 ………………………………………………………………… 6
4.3.1　流量と流量計出力の関係…………………………………………… 6
4.3.2　流量計出力の温度依存性…………………………………………… 7
5．流量計校正の不確かさ………………………………………………… 8
5.1　不確かさの計算方法 …………………………………………………… 8
5.1.1　校正装置側に起因する不確かさ計算 ……………………………… 9
5.1.2　流量計側に起因する不確かさ計算 ………………………………… 11
5.1.3　流量計校正における合成標準不確かさ …………………………… 11
5.2　不確かさの評価 ………………………………………………………… 12
5.2.1　校正装置側に起因する不確かさ計算 ……………………………… 12
5.2.2　流量計側に起因する不確かさ計算 ………………………………… 17
5.2.3　流量計校正に係る不確かさの総括 ………………………………… 18
6．落下ナトリウム体積の補正に対する評価 …………………………… 19
7．まとめ…………………………………………………………………… 20

謝　辞 ……………………………………………………………………… 21
参考文献…………………………………………………………………… 22
付録 A　内筒外側アニュラス内ナトリウム液位の推定による落下体積の補正 ……… 44

表リスト

表３.２－１　校正試験条件一覧 …… 23
表４.１－１　濡れ特性試験結果 …… 24
表４.３－１　「常陽」炉内電磁流量計第１回校正試験結果 …… 25
表４.３－２　「常陽」炉内電磁流量計第２回校正試験結果 …… 26
表４.３－３　「常陽」炉内電磁流量計第３回校正試験結果 …… 27
表５－１　炉内電磁流量計校正時のナトリウム体積に係る不確かさ …… 28
表５－２　炉内電磁流量計校正試験に係る不確かさ …… 29

図リスト

図２－１　炉心・機器熱流動試験施設系統図 ･･････････････････････････････ 30
図２－２　計測試験容器構造図 ･･ 31
図２－３　炉内電磁流量計構造図 ･･････････････････････････････････････ 32
図２－４　データ収録システム ･･ 33
図３－１　容積法による流量計校正の概要 ･･････････････････････････････ 34
図４.１－１　濡れ特性試験における流量計出力感度の変化 ････････････････ 35
図４.３－１　炉内電磁流量計出力特性（200℃） ･･････････････････････････ 36
図４.３－２　炉内電磁流量計出力特性（225℃） ･･････････････････････････ 37
図４.３－３　炉内電磁流量計出力特性（250℃） ･･････････････････････････ 38
図４.３－４　炉内電磁流量計出力特性（275℃） ･･････････････････････････ 39
図４.３－５　校正試験における流量計出力と主要温度の時系列 ････････････ 40
図４.３－６　炉内電磁流量計出力感度の温度依存性 ･･････････････････････ 41
図６－１　炉内電磁流量計出力特性（ナトリウム体積の補正なし） ････････････ 42
図６－２　炉内電磁流量計出力特性（ナトリウム体積の補正あり） ････････････ 43

1．はじめに

高速実験炉「常陽」では、炉心出口における冷却材温度をできる限り均一化するため、各炉心構成要素に流入する冷却材流量を流量調節機構および減圧機構によって適切に配分するよう設計されている。この炉心内冷却材流量配分は、原子炉熱出力が MK－Ⅱ照射用炉心の1.4 倍に達する MK－Ⅲ照射用炉心の熱設計を行う上で極めて重要な因子に挙げられる。

このため「常陽」MK－Ⅲ照射用炉心移行後の総合機能試験では、炉心内の冷却材流量配分が適切に行われていることを確認するとともに、「常陽」MK－Ⅲ照射用炉心の設計裕度の確認および今後の炉心運転計画策定に資することを目的とした流量測定が計画されている。流量測定は、燃料交換機先端部に炉心内流量分布測定用の電磁流量計（以下、炉内電磁流量計という）を装着した炉心内流量分布測定装置により行う。装置は、フランジにより遮蔽プラグの燃料交換孔ドアバルブに固定され、燃料交換と同様の操作で測定対象の炉心構成要素頂部へ炉内電磁流量計を圧着することで各炉心構成要素の通過流量を測定するものである。

この炉内電磁流量計は従来の計測に使用された電磁流量計[1]とは磁石形状が異なることから、実機での流量分布測定およびその評価にあたっては炉内電磁流量計の出力特性、流量計出力感度の温度および流量依存性等を確認しておく必要がある。

このため、ナトリウム流動伝熱試験室の炉心・機器熱流動試験施設に「常陽」MK－Ⅲ照射用炉心の流量分布測定に使用する炉内電磁流量計を設置し、「常陽」での使用条件を満たすナトリウム温度、流量条件下での流量計実流校正を行った。

2．試験設備

2.1 試験装置

試験は、原子炉工学グループが所有する炉心・機器熱流動試験施設（CCTL）を用いて実施した。図 2−1 に CCTL 試験ループの系統図を示す。校正試験は容積法で実施し、落下ナトリウムの貯留には図 2−2 に示す外径 1.4 m、ナトリウム高さ約 2 m（校正試験有効高さ約 1.2 m、有効容積約 1700 ℓ）の計測試験容器を使用する。計測試験容器内には、誘導型固定点式レベル計が設置されており、液位 HH、M、L および LL の４点の測定が可能である。各液位間のナトリウム容積は、HH−M および M−L 間が約 250 ℓ、L−LL 間が約 1200 ℓとなっている。

校正試験時における流量設定は、容器下方にある３本の主配管（3B×Sch20）に設置された流調弁（SV351M～353M）の開度調節により行った。主配管を下降したナトリウムは、ドレン配管（4B×Sch20）に設置された炉内電磁流量計を経てナトリウムドレンタンクに導かれる。ドレン配管への炉内電磁流量計の設置にあたっては、口径の差異が流動場に影響を及ぼさないようレジューザを介して両者を接続するとともに、炉内電磁流量計の上流および下流に 10D（D=42.6mm，流量計流路管の内径）以上の助走区間を確保した。

炉内電磁流量計の外側には、「常陽」での使用時に想定される磁石温度を模擬し、ナトリウム流路の外側に位置する磁石を落下するナトリウム温度と同一温度に保持するための電気ヒータが設置されている。また、炉内電磁流量計の下流側には、ナトリウム温度を計測するためのウェル型内挿熱電対（K型、シース外径 3.2mm）が設置されている。

2.2 炉内電磁流量計試験体

炉内電磁流量計の構造図を図 2−3 に示す。炉内電磁流量計は、内径 40mm、長さ 460mm の流路管の周囲に円弧形状の磁石および電極（１対）を配置した永久磁石式流量計で、流路管の両端には燃料交換機に設置するためのフランジが取り付けられている。

電磁流量計のヨークには SS400、磁石にはアルニコ（NKS-550）が使用され、その熱処理温度は約 600℃である。アルニコ磁石は、ナトリウム装置等の電磁流量計に通常使用されるフェライト磁石に比べ出力感度は低いものの、磁力の温度依存性が小さく炉内での使用に適した磁石といえる。

また、炉内電磁流量計には磁石温度を測定するための熱電対（K型、シース外径 1.6mm）および電極に生ずる起電力を外部に出力するための MI ケーブル（外径 3.2mm）が設置されている。磁石および電極は SUS304 のステンレス製外筒により密閉され、その内部には磁石等の酸化を防止するためのヘリウムガスが充填されている。

2.3　データ収録システム

データ収録システムを図 2−4 に示す。主な計測信号は、計測試験容器内および炉内電磁流量計出口ナトリウム温度、磁石温度、流量計出力電圧、ならびにレベル計４点（HH、M、L および LL）の液位信号である。

各信号は、アンプで増幅した後、A/D 変換器でデジタル変換し、パソコンのハードディスクに収録した。収録した電圧データに対する物理量変換等の処理は、データ処理プログラムを用いて実施した。

3．試験方法

3.1　試験方法

炉内電磁流量計の校正は容積法で行った。容積法は、図 3−1 に示すように内容積が既知の計測試験容器からダンプタンクにナトリウムを自然落下させて、そのときの落下したナトリウムの体積と落下に要した時間から平均流量を求め、流量計の出力電圧と比較、校正する方法である。ここで流量 Q が時間とともに変化するが Q と流量計出力電圧 E の間に常に(3.1)式が成立するとして、出力感度 ε を(3.2)式に示すように平均出力電圧と平均流量の比から求める。

$$E = \varepsilon \cdot Q \tag{3.1}$$

$$\varepsilon = (1/t)\int E\,dt \,/\, (1/t)\int Q\,dt \tag{3.2}$$

ここで、

E　：電磁流量計出力（mV）

Q　：流量（ℓ/min）

ε　：出力感度（μV/[ℓ/min]）

t　：積分時間（秒）

流量の算出に当たっては、計測試験容器と内筒間のアニュラス（内筒外側アニュラス）部に存在するナトリウム（約 34ℓ：校正に使用する液位 M−LL 区間体積の約 2.4%）がアニュラス底部にある直径 6mm の貫通孔から排出されず一部が残留することを考慮した。残留ナトリウム量の評価には、長期崩壊熱除去評価用ネットワークコード LEDHER[2]を使用した。評価に用いた解析モデルの概要を付録−A に示す。本解析モデルによる評価結果の妥当性については第 6 章で述べる。

また、試験に当たっては、ナトリウム落下の初期に生ずる急激な流量変化の影響が流量計測区間（液位 M−LL 間）に及ばないよう、試験開始時の計測試験容器内ナトリウム液位を、400ℓ/min を超える流量領域の校正では液位 M から約 210mm 上方(液位 HH から約 35mm 上方)、400ℓ/min 以下では液位 M から約 140mm 上方にセットした。

3.2　試験内容

3.2.1　濡れ特性試験

濡れ特性試験では、CCTLL 試験ループにナトリウムを充填した後、炉内電磁流量計のナトリウム通過流量および温度を一定条件に保持した状態での炉内電磁流量計出力変化をこの下流側に直列に設置されている既設電磁流量計出力（F353）と比較することにより

炉内電磁流量計流路管内面の濡れが流量計出力に及ぼす影響を確認する。

試験におけるナトリウム流量条件は、計測試験容器内に設置される細径熱電対の流力振動を回避できる最大流量（約 180ℓ/min）を下回る 150ℓ/min とした。また、温度条件は、炉内電磁流量計の最高許容温度の 300℃とした。

なお、濡れ特性試験におけるデータ収録は、12 時間毎に行い、そのサンプリング周期およびデータ数はそれぞれ 0.1 秒および 2000 点とした。

3.2.2 純度特性試験

純度特性試験では、CCTL 試験ループへのナトリウム充填後に、コールドトラップを介して不純物を捕獲する純化運転を行った場合と、これを行わない場合の炉内電磁流量計出力値を比較することによりナトリウム中の不純物濃度が流量計出力に及ぼす影響を確認する。

本試験におけるナトリウム流量条件は、純化運転停止時の計測試験容器ナトリウム液位（液位 M から約 100mm 上方）からのナトリウム落下初期において生じる急激な流量変化の影響が流量計測区間（液位 M−LL）に及ばないよう約 400ℓ/min に制限した。また、温度条件は実機での使用条件を考慮し、250℃とした。

試験データの収録は、ナトリウム落下開始から計測試験容器液位 LL 消灯までを、サンプリング周期 0.1 秒で行った。

3.2.3 校正試験

校正試験では、表 3.2−1 に示す試験条件に基づき校正を行い、炉内電磁流量計の出力特性および出力感度の温度依存性を確認する。試験時のナトリウム温度条件には、「常陽」における使用条件の 250℃を考慮し、200℃～275℃の温度範囲を 25℃刻みとした４条件を設定した。また、ナトリウム流量条件には、炉心燃料集合体、制御棒集合体および中性子源集合体の流量条件である 0.7～8.5kg/s（約 50～570ℓ/min、γ=892kg/m^3 at 250℃）を包含する流量範囲で６～７条件を選択した。なお、CCTL 試験ループ校正ラインの最大流量は、200℃で約 610ℓ/min、275℃で約 640ℓ/min であることから、これらを校正時の最大流量条件とした。

更に、校正試験ではこれら一連の試験を３回繰り返すことにより結果の再現性を確認するとともに、繰り返しの際の試験条件設定を工夫することで温度及び流量ヒステリシスの影響を確認した。

4．試験結果

4．1　濡れ特性試験

炉内電磁流量計校正は試験工程の都合から 2 回に分けて実施しており、濡れ特性試験は何れも試験ループへのナトリウム充填直後に行った。濡れ特性試験におけるナトリウム循環時間は、第 1 回および第 2 回試験でそれぞれ 84 時間（約 4 日間）および 276 時間（約 12 時間）であり、これらの試験結果を表 4.1－1 および図 4.1－1 に示す。

図によれば、計測試験容器入口流量計（F353）の出力に基づき算出した炉内電磁流量計の出力感度は、ナトリウム循環時間によらずほぼ一定値で推移することが分かる。流量計出力感度の平均値と各測定時における出力感度の差の割合（表中の偏差を示す）は、最大でも 0.8%程度で後述の流量計校正に係る不確かさ（精度）の範囲内であった。本結果から、炉内電磁流量計の流路管内面はナトリウム充填後の比較的短時間で安定した状態になると考えられる。

4．2　純度特性試験

試験結果を下表に示す。純化ありのケースは、約 10 日間の純化運転を経た後に実施した試験結果を示している。一方、純化なしのケースは、試験前に純化運転を一切行わない場合の試験結果を示している。なお、試験におけるナトリウム純度の指標となるプラギング温度は、純化ありのケースで 137℃、純化なしのケースで＞200℃（測定レンジ以上）であった。

プラギング温度が 137℃および＞200℃の流量計出力感度は、それぞれ 29.62 および 29.68（μV/[ℓ/min]）で、ナトリウム純度の低下が出力電圧に与える有意な影響は認められなかった。

	流量 (ℓ/min)	磁石温度 (℃)	流量計出力 (mV)	出力感度 (μV/[ℓ/min])
純化あり	382.95	252.11	11.34	29.61
純化なし (jyct1-250-400)	401.66	249.90	11.91	29.66
〃 (jyct2-250-400)	397.92	250.71	11.81	29.68
〃 (jyct3-250-400)	415.93	249.35	12.34	29.67

4．3　校正試験

4．3．1　流量と流量計出力の関係

表 4.3－1～表 4.3－4 および図 4.3－1～図 4.3－4 に試験結果を示す。表中には校正に使用した液位 M－LL 間のナトリウム体積に基づく校正結果のほか、液位 M－L 間および L－LL 間のナトリウム体積に基づく校正結果についても記載した。また、図 4.3－5 には校

正試験における炉内電磁流量計出力と流量計ナトリウムおよび磁石温度の時系列データの一例を示す。

図 4.3−1〜図 4.3−4 はそれぞれ 200℃、225℃、250℃、275℃におけるナトリウム流量と流量計出力の関係（下図）およびその非直線性（上図）を示す。下図の横軸は、液位 M−LL 間のナトリウム体積（補正済み）と液位区間通過時間より算出した試験温度における実流量Q（ℓ/min)、縦軸は流量計出力E（mV）である。測定結果を最小二乗法で直線近似し、その勾配から流量計の出力感度出ε（μV/[ℓ/min]）を算出した。

最小二乗法により得られた結果を以下に示す。

$E = 0.0332 + 0.0299 \times Q$　　$\varepsilon = 29.87$　at 200℃

$E = 0.0277 + 0.0297 \times Q$　　$\varepsilon = 29.71$　at 225℃

$E = 0.0271 + 0.0295 \times Q$　　$\varepsilon = 29.48$　at 250℃

$E = 0.0288 + 0.0293 \times Q$　　$\varepsilon = 29.26$　at 275℃

上図の偏差は、非直線性を表しており直線回帰からの偏差を最大流量時の値で除した値である。偏差は±0.4%以内で流量と流量計出力の関係は良好な直線関係にあることが分かる。また、温度および流量の設定順序が異なる 3 回の試験結果に顕著な差は認められず良好な再現性を示している。

4.3.2 流量計出力の温度依存性

図 4.3−6 に流量計出力感度の温度依存性を示す。横軸にナトリウム温度（磁石温度）T（℃）、縦軸に流量計の出力感度出ε（μV/[ℓ/min]）をとり、温度依存性を三次曲線で近似した。その結果、炉内電磁流量計の出力感度は、ナトリウム温度に対して次式で表された。

$$\varepsilon = 21.39 + 1.16 \times 10^{-1} T - 5.02 \times 10^{-4} T^2 + 6.71 \times 10^{-7} T^3 \quad (T\text{ ; 温度[℃]})$$

流量計出力感度は 200℃〜275℃で 2.04%（−0.027%/℃）低下しているが、その主な理由はアルニコ磁石の温度依存性（−0.021%/℃）によるものと考えられる。

5．流量計校正の不確かさ

5.1　不確かさの計算方法

炉内電磁流量計校正にける不確かさ（精度）は、参考文献[4]に基づき以下のように定めた。流量計の感度は、式（5.1）の関係から求められる。t_1、t_2を計測試験容器内のナトリウム液面がレベル計の２点を通過する時間とすれば$Q_n(t)$の積分値が２点間の体積となり、$S(t)$をt_1からt_2まで積算し、$S(t)$の積分値を求めることによって出力感度εが求められる。実際には、体積および流量計出力の積算値を（t_2-t_1）で除することによって得られる流量および流量計出力の平均値から計算している。

炉内電磁流量計校正における不確かさは、式（5.1）からナトリウム流量$Q_n(t)$の測定に係る不確かさ、即ち校正装置側に起因する不確かさと、流量計出力$S(t)$に係る不確かさ、即ち流量計側に起因する不確かさに分けて計算することができる。校正装置側に起因する不確かさは、ナトリウム体積と積分時間を求めるときの不確かさである。また、流量計側に起因する不確かさは、流量計出力の計測および磁石温度変化による変動にともなう不確かさである。以下に不確かさの具体的な算出方法を示す。

$$\varepsilon = \int_{t_1}^{t_2} E(t)\,dt \Big/ \int_{t_1}^{t_2} Q_n(t)\,dt \qquad (5.1)$$

ε　：出力感度（μV/[ℓ/min]）

$E(t)$　：電磁流量計出力（mV）

$Q_n(t)$　：ナトリウム流量（ℓ/min）

t_1　：校正開始時間（秒）

t_2　：校正終了時間（秒）

流量計出力$E(t)$のt_1からt_2までの平均値をE、t_1からt_2までに落下するナトリウム流量の平均値をQ_nとすると、式（5.1）は式（5.2）のように表すことができる。

$$\varepsilon = E/Q_n \qquad (5.2)$$

E　：流量計出力の平均値

Q_n　：ナトリウム流量の平均値

$Q_n = V_n/\Delta t$

V_n　：計測試験容器内ナトリウム体積

Δt　：積分時間

$$\varepsilon = E \cdot \Delta t / V_n \qquad (5.3)$$

ここで、V_n、E、Δtの不確かさをそれぞれuV_n、uE、$u\Delta t$とすると、出力感度の不確かさ$u\varepsilon$は間接測定の誤差伝播の法則から次のようになる。

$$u\varepsilon=\sqrt{\left(\frac{\partial\varepsilon/\varepsilon}{\partial V_n/V_n}\right)^2 uV_n^2+\left(\frac{\partial\varepsilon/\varepsilon}{\partial E/E}\right)^2 uE^2+\left(\frac{\partial\varepsilon/\varepsilon}{\partial\Delta t/\Delta t}\right)^2 u\Delta t^2}$$

$$=\sqrt{uV_n^2+uE^2+u\Delta t^2} \qquad (5.4)$$

5.1.1　校正装置側に起因する不確かさ計算

(1) ナトリウム体積

図2－2に示す計測試験容器のナトリウム体積V_nは、次式により求めた。

$$V_n=V_0-V_A-\sum_{i=1}^{21}V_{Si} \qquad (5.5)$$

V_0は流量計校正に使用する液位M－LL間における計測試験容器単体のナトリウム体積、V_Aは校正終了時（液位 LL 消灯時）において内筒外側アニュラス部に残留するナトリウムの体積で解析的に予測する値である。また、V_{Si}は液位 M－LL 間に設置される内部構造物の体積を示しており、V_{Si}の各要素の体積は概ね次式の何れかで表される。

〔内部構造物が円筒の場合〕

$$V_{Si}=\frac{\pi}{4}D_{1i}^{\ 2}(1+\alpha\,\Delta T)^3 L_i N_i$$

〔内部構造物が円管の場合〕

$$V_{Si}=\frac{\pi}{4}\left(D_{1i}^{\ 2}-D_{2i}^{\ 2}\right)(1+\alpha\,\Delta T)^3 L_i N_i$$

〔内部構造物が角管の場合〕

$$V_{Si}=\left(D_{1i}^{\ 2}-D_{2i}^{\ 2}\right)(1+\alpha\,\Delta T)^3 L_i N_i$$

〔内部構造物が角板の場合〕

$$V_{Si}=D_{1i}\cdot D_{2i}(1+\alpha\,\Delta T)^3 t_i N_i$$

ここで、

D_{1i}　：内部構造物の外径（角板の場合は横幅）
D_{2i}　：内部構造物の内径（角板の場合は縦幅）
α　：校正温度における構造物（SUS316）の線膨張率
ΔT　：室温と校正ナトリウム温度の差
L_i, t_i：内部構造物の長さまたは厚さ
N_i　：内部構造物の員数

(2) ナトリウム体積に係る不確かさ

計測試験容器内ナトリウム体積V_nに係る不確かさuV_nを式（5.6）で定義し、以下にそ

の計算方法を示す。

$$uV_n = \left(uV_0 + uV_C + \sum_{i=1}^{21} uV_{Si} \right) \Big/ \left(V_0 - V_C - \sum_{i=1}^{21} V_{Si} \right) \tag{5.6}$$

uV_n ：計測試験容器内のナトリウム体積に係る不確かさ

uV_0 ：計測試験容器単体の体積に係る不確かさ

uV_C ：アニュラス部に残留するナトリウムの体積に係る不確かさ

uV_{Si} ：内部構造物の体積に係る不確かさ

V_0 ：計測試験容器単体の体積

V_{Si} ：内部構造物の体積

計測試験容器単体のナトリウム体積に係る不確かさ uV_0 は次式で表される。

$$uV_0 = \frac{\pi}{4}(D_1 + uD_1)^2 \{1 + (\alpha + u\alpha)(\Delta T + u\Delta T)\}^3 (L + uL) - V_0$$

ここで、

uD_{1i} ：計測試験容器の内径寸法に係る不確かさ

$u\alpha$ ：校正温度における構造物（SUS316）の線膨張率に係る不確かさ

$u\Delta T$ ：室温と校正ナトリウム温度の差に係る不確かさ

uL ：校正に使用するレベル計間（液位 M－LL 間）距離に係る不確かさ

内筒外側アニュラス部に残留するナトリウム体積に係る不確かさ uV_A は、当該部のナトリウム落下を支配するアニュラス底部オリフィスの圧力損失係数を理論的な振れ巾の上・下限で評価した場合の解析結果に基づき定めた。

また、内部構造物の体積に係る不確かさ uV_{Si} は概ね次式の何れかで表される。

〔内部構造物が円筒の場合〕

$$uV_{Si} = \frac{\pi}{4}(D_{1i} + uD_{1i})^2 \{1 + (\alpha + u\alpha)(\Delta T + u\Delta T)\}^3 (L_i + uL_i) N_i - V_{Si}$$

〔内部構造物が円管の場合〕

$$uV_{Si} = \frac{\pi}{4}\left\{ \left(D_{1i} + \frac{uD_{1i}}{\sqrt{2}} \right)^2 - \left(D_{2i} - \frac{uD_{2i}}{\sqrt{2}} \right)^2 \right\} \{1 + (\alpha + u\alpha)(\Delta T + u\Delta T)\}^3 (L_i + uL_i) N_i - V_{Si}$$

〔内部構造物が正四角管の場合〕

$$uV_{Si} = \left\{ \left(D_{1i} + \frac{uD_{1i}}{\sqrt{2}} \right)^2 - \left(D_{2i} - \frac{uD_{2i}}{\sqrt{2}} \right)^2 \right\} \{1 + (\alpha + u\alpha)(\Delta T + u\Delta T)\}^3 (L_i + uL_i) N_i - V_{Si}$$

〔内部構造物が角板の場合〕

$$uV_{Si} = (D_{1i} + uD_{1i})(D_{2i} + uD_{2i})\{1 + (\alpha + u\alpha)(\Delta T + u\Delta T)\}^3 (t_i + ut_i) N_i - V_{Si}$$

ここで、

uD_{1i}　：内部構造物の外径（角板の場合は横幅）に係る不確かさ

uD_{2i}　：内部構造物の内径（角板の場合は縦幅）に係る不確かさ

$u\alpha$　：校正温度における構造物（SUS316）の線膨張率に係る不確かさ

$u\Delta T$　：室温と校正ナトリウム温度の差に係る不確かさ

uL_i, ut_i　：内部構造物の長さまたは厚さに係る不確かさ

(3) 積算時間の不確かさ

積算時間にかかる不確かさ $u\Delta t$ は、次式により表される。

$$u\Delta t = \sqrt{\sum_{i=1}^{4} (u\Delta t_i)^2}$$

ここで、

$u\Delta t_1$：レベル計応答性（液位 M）に係る不確かさ

$u\Delta t_2$：レベル計応答性（液位 LL）に係る不確かさ

$u\Delta t_3$：A/D 変換器サンプリング変換時間遅れに係る不確かさ

$u\Delta t_4$：サンプリング時間に係る不確かさ

5.1.2　流量計側に起因する不確かさ計算

(1) 流量計出力 E の不確かさ

流量計出力に係る不確かさ uE は、次式により表される。

$$uE = \sqrt{\sum_{i=1}^{5} (uE_i)^2}$$

ここで、

uE_1：出力信号の増幅に係る不確かさ

uE_2：出力信号の A/D 変換に係る不確かさ

uE_3：平均化処理に係る不確かさ

uE_4：ナトリウム温度変化の出力に対する影響

uE_5：磁石温度変化の出力に対する影響

5.1.3　流量計校正における合成標準不確かさ

流量計校正に係る不確かさ $u\varepsilon$ は次式により総括される。

$$u\varepsilon = \sqrt{uV_n^2 + uE^2 + u\Delta t^2}$$

ここで、

$u\varepsilon$ ：流量計出力感度に係る合成標準不確かさ

uV_n ：ナトリウム体積に係る不確かさ

uE ：流量計出力に係る不確かさ

$u\Delta t$ ：積算時間に係る不確かさ

5.2　不確かさの評価

第 5.1 項で示す不確かさの計算方法に基づき、ナトリウム温度 250℃での第 1 回目校正試験（最大流量時：628.7ℓ/min）における不確かさを評価する。

5.2.1　校正装置側に起因する不確かさ計算

(1) ナトリウム体積

計測試験容器内ナトリウム体積V_nの計算結果を示す。また、計算に使用した各定数の値および各部体積の計算結果を表 5－1 に示す。

$$V_n = V_0 - V_A - \sum_{i=1}^{21} V_{Si}$$

=1419.7ℓ

なお、計算における熱膨張率と温度変化には以下の値を用いた。

α ：校正温度における SUS316 の線膨張率

線膨張率[3]16.60×10^{-6}［1/℃］(at 250℃)

ΔT ：ナトリウム温度変化

計測試験容器内のナトリウム温度の室温からの変化を表す。ここでは、室温を 20℃とし温度変化を 230℃とする。

(2) ナトリウム体積に係る不確かさ

(2.1) 計測試験容器単体および内部構造物体積に係る不確かさ

① 容器内径寸法に係る不確かさ

計測試験容器内径寸法は、容器製作時に実施した水張り検査結果に基づき定めた。水張り試験では、校正に使用する液位 M－LL 区間（1000mm）の水重量を予め校正されたデジタル台秤を用いて測定しており、その重量は 1452.1kg（体積=1453.9ℓ、γ=998.77kg/m^3 at 9℃）であった。当該区間には内筒の一部（φ1322.5/φ1316.7×L399.3）および内筒スペーサ（φ18/φ14×L50×6）が含まれるため、水張り検査で得られた体積にこれら加算した上で計測試験容器の平均的な内径を算出し、本数値を内径寸法とした。本計算に基づく内径寸法は 1362.8mm で、別途実施した寸法測定結果

1363.1mm（4カ所の平均値）とほぼ一致している。本容器内径寸法に係る不確かさは、水張り検査における液位間距離および重量の測定精度に基づき定めた。

液位間距離の精度には、測定に使用した直定規の寸法精度および寸法読み取り精度を考慮する。測定に使用した直定規は有効長さ 2000mm の JIS A 級直定規で、その精度は 10μm である。また、寸法の読み取り時の精度は、直定規の最小目盛 1mm に対し、0.5mm まで読み取り可能とし、両端で 1mm とした。直定規の寸法精度および寸法読み取り精度を総括（二乗和の平方根）した 1.0mm を液位間距離の精度とした。

重量測定精度は、測定に使用したデジタル台秤の校正結果に基づき定めた。校正では検査用分銅により再現性、偏荷重および直線性を検査しており、これらは何れも計器の最小表示である 0.05kg 以内であった。重量測定精度は、測定が 10 回に分割して行われたことを考慮し、0.5kg とした。

液位間距離の測定精度 1.0mm および重量の測定精度 0.5kg が容器内径寸法に及ぼす影響（±0.91mm）を容器内径寸法の不確かさとした。

② 内部構造物寸法に係る不確かさ

表 5－1 に内部構造物寸法に係る不確かさを示す。各寸法に対する不確かさは、製作時の寸法測定におけるばらつき、JIS に定める測定工具の精度および鋼管の許容差等に基づき定めたもので、以下に概要を示す。なお、構造物が液位区間の全長に亘る熱電対ウェル、試験体の主軸、支柱、ガス供給管および熱電対の長さに対する不確かさには、後述の液位間距離に係る不確かさを採用した。

(a) 内筒本体（i=1）

D_{1i},D_{2i} の精度は、4カ所の寸法測定におけるばらつきから±0.65mm とした。また、長さ L_i に対する精度は、直定規の精度 10μm および読み取り精度 0.5mm を考慮し、±0.50mm とした。

(b) その他の内部構造物（i=2～21）

その他の内部構造物は、大半が鋼管を採用している。鋼管の外径および内径寸法に係る不確かさには、JIS G3459（配管用ステンレス鋼鋼管）の外径の許容差、即ち、配管外径が 30mm 未満のものに対しては±0.3mm、30mm 以上のものに対しては±1% を考慮した。また、長さに対する精度には、計測液位区間内に設置される構造物に対しては直定規の精度 10μm および読み取り精度 0.5mm を総括した±0.50mm を、測定液位区間に構造物の一部が設置されるものに対しては、次項③の液位間距離に係る不確かさ評価におけるレベル計動作精度を一方のみに考慮して計算した±1.72mm を用いた。

一方、振れ止め等の平板構造物の縦・横寸法に係る不確かさには、加工精度の±1mm

を、厚さに係る不確かさには、JIS G3194（熱間圧延平鋼）の厚さの許容差、即ち、厚さ 6mm 未満のものに対しては±0.3mm、6.0mm 以上 12mm 未満のものに対しては±0.4mm、12mm 以上のものに対しては±4%を考慮した。

③ 液位間距離に係る不確かさ

流量計校正に使用する液位 M－LL 間距離に係る不確かさは、レベル計の固定に用いる案内管の寸法測定精度、レベル計傾きの影響、液位計動作精度および液面波立ちの影響を考慮し、以下の通り定めた。

(a) レベル計案内管寸法測定精度

レベル計案内管寸法測定の精度は、直定規の精度 10 μm および読み取り精度 0.5mm を考慮し、±0.50mm とした。

(b) レベル計傾きの影響

レベル計設置時の傾きによる影響で、液位 LL（フランジ面から 1860.5mm 下方）でのずれを 50mm と仮定した。50mm の傾きを考慮した場合、レベル計動作点が 0.67mm 上方に移動する。これをレベル計傾きの影響とした。

(c) レベル計「M」動作精度

レベル計「M」動作精度は、固定点式レベル計の性能仕様から±5mm が従来から採用されてきている。校正における不確かさの大部分はレベル計の動作精度によることから、今回の校正試験ではアルミパイプを使用したレベル計の動作確認を各液位について試験前後にそれぞれ 3 回繰り返し、動作位置を鋼製巻尺（JIS 1 級）により測定した。測定の結果、動作位置は 1mm 以内で一致することを確認した。よって、レベル計「M」動作精度は、動作確認時のばらつき±1mm、鋼製巻尺の精度±0.3mm および読み取り精度 0.5mm を総括し、±1.16mm とした。

(d) レベル計「LL」動作精度

レベル計「LL」動作精度は、レベル計「M」動作精度と同様に±1.16mm とした。

(e) 液面波立ちの影響

計測試験容器の液面波立ちは、試験中においてレベル計に再動作（消灯後に再度点灯）が観察されなかったことから、波立ちはデータサンプリング周期（0.1 秒）の液位下降速度に比べ小さいと判断される。校正の最大流量（約 670 ℓ/min）における 0.1 秒間の液位落下距離は 0.82mm となる。これを波立ちの影響とした。

(f) 液位間距離に係る不確かさの総括

(a)～(e)を総括（二乗和の平方根）した±2.01mm を液位間距離に係る不確かさとした。

④ 熱膨張率に係る不確かさ

熱膨張の評価に使用する SUS316 の線膨張率（16.60×10^{-6}［1/℃］）は、文献[4]のグラフから読み取った。グラフ読み取り時に生ずる差異は約 5%（8.30×10^{-7}［1/℃］）で、本数値を線膨張率に係る不確かさとした。

⑤ 温度測定に係る不確かさ

温度測定に係る不確かさは、熱電対の精度、増幅器の精度、A/D 変換器の精度、計測試験容器内ナトリウム温度のばらつきに基づき定めたもので、以下にその概要を示す。

(a) 熱電対精度

温度測定に使用した熱電対は JIS 0.4 級であるため、その精度は 0.4%または 1.5℃の何れか大きい値となる。本値に零度温度補償器の精度（カタログより 0.05℃）を考慮した±1.50℃を熱電対精度とした。

(b) 増幅器および A/D 変換器の精度

増幅器および A/D 変換器の精度は、標準電圧発生器を用いて実施した計測系統校正結果に基づき作成した最小二乗回帰曲線のあてはめの適合度および標準電圧発生器の精度より求めた。回帰曲線のあてはめの適合度（SEE：下式参照）は±0.002mV、標準電圧発生器の精度はカタログより 0.024mV でこれらを総括した±0.024mV（±0.6℃）を増幅器および A/D 変換器の精度とした。

$$SEE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(y_i-y_{LS,i}\right)^2}{N-C}}$$

ここに、

N　：データ数（6）

C　：回帰に含まれる定数の数（2）

$y_{LS,i}$：校正式に代入して求めた値

y_i　：校正結果

(c) 計測試験容器内ナトリウム温度のばらつき

計測試験容器に設置した 3 本の熱電対の温度標準偏差は最大流量条件において 0.1℃以下、最小流量条件においても 0.2℃以下であった。また、設定温度と最高温度または最低温度と差は 3℃以内であった。以上を考慮して計測試験容器内ナトリウム温度のばらつきを±3℃とした。

(d) 温度測定に係る不確かさの総括

(a)～(c)を総括（二乗和の平方根）した±3.41℃を温度測定に係る不確かさとした。

⑥ 計測試験容器単体および内部構造物体積に係る不確かさ

①～⑤に基づき定めた計測試験容器単体および内部構造物体積に係る不確かさは、それぞれ6.04ℓおよび0.53ℓであった（表5－1参照）。

(2.2) 内筒外側アニュラス部の残留ナトリウム体積に係る不確かさ

内筒外側アニュラス部の残留ナトリウム体積は、LEDHER コード[2]を用いて解析的に評価している。残留ナトリウム体積に係る不確かさは、アニュラス底板（t=8mm）の1カ所に設けた直径 6mm の貫通孔の形状損失係数を標準値（K=1.1）に対し、落下ナトリウム量を保守側に評価するケースでは 1.0、非保守側に評価するケースでは 1.5 として残留ナトリウム量の評価を行い、これらの評価結果と標準値に基づくとの評価結果との差を不確かさとして取り扱うこととした。

評価の結果、K=1.0 および K=1.5 における残留ナトリウム量は、それぞれ 30.89ℓおよび31.35ℓで、K =1.1における残留ナトリウム量（31.03ℓ）との差は、それぞれ－0.14ℓおよび0.3ℓであった。

本評価結果に基づき±0.33ℓを内筒外側アニュラス部の残留ナトリウム体積に係る不確かさとした。

(2.3) ナトリウム体積に係る不確かさの総括

計測試験容器単体体積、内部構造物体積および内筒外側アニュラス部の残留ナトリウム体積に係る不確かさ uV_0、uV_SおよびuV_Cは、それぞれ 6.04ℓ、0.53ℓおよび 0.33ℓで、これらを合計した±6.90ℓ（±0.49%）をナトリウム体積に係る不確かさとした。

(3) 積算時間に係る不確かさ

積算時間に係る不確かさは、レベル計応答時間、A/D 変換器サンプリング変換時間遅れ、およびサンプリング時間の不確かさを考慮し、以下の通り定めた。

(a) レベル計応答時間

計器仕様によれば、レベル計の応答時間は最大 30msec である。本応答遅れは、液位 M と液位 LL で相殺されると考えられる。よって、30msec をレベル計応答時間に係る不確かさとした。

(b) A/D 変換器サンプリング変換時間遅れ

A/D 変換器の変換速度は 10μsec で、校正所要時間の 135.5sec に比べ非常に小さな値となるため無視することとした。

(c) サンプリング時間の不確かさ

測定開始（液位 M 消灯）および測定終了（液位 LL 消灯）時にサンプリング周期（0.1sec）

分時刻がずれると考え、0.14sec をサンプリング時間に係る不確かさとした。

(d) 積算時間に係る不確かさの総括

(a)～(c)を総括（二乗和の平方根）した 0.14sec（0.11%）を積算時間に係る不確かさとした。

5.2.2 流量計側に起因する不確かさ計算

流量計側に起因する不確かさには、増幅器の精度、A/D 変換器の精度、平均化処理に係る不確かさ、磁石温度変化の影響および評価に用いる校正式の不確かさに基づき定めたもので、以下にその概要を示す。

(1) 増幅器および A/D 変換器の精度

増幅器および A/D 変換器の精度は、標準電圧発生器を用いて実施した計測系統校正結果に基づき作成した最小二乗回帰曲線のあてはめの適合度および標準電圧発生器の精度より求めた。回帰曲線のあてはめの適合度（SEE：下式参照）は±0.076mV、標準電圧発生器の精度はカタログより 0.024mV でこれらを総括した±0.080mV（±0.43%）を増幅器および A/D 変換器の精度とした。

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(y_i - y_{LS,i}\right)^2}{N - C}}$$

ここに、

N ：データ数（24）

C ：回帰に含まれる定数の数（2）

$y_{LS,i}$ ：校正式に代入して求めた値

y_i ：校正結果

(2) 平均化処理に係る不確かさ

流量計出力は、液位 M－LL 間での出力信号を平均することにより求めている。校正時のナトリウム流量変化は、図 4.3－5 に示すように落下初期において非直線的に減少する傾向を示す。落下流量が増大すると、この流量変化が測定区間に及び平均出力との間に差異が生ずる可能性がある。この差異を平均化処理に係る不確かさとするが、図 4.3－5 の通り校正区間での流量はほぼ直線的に変化しているため無視することとした。

(3) 磁石温度変化の影響

校正試験における流量計磁石温度平均値と設定温度との差は 5℃以内であった。アルニコ磁石の温度係数は、カタログより－0.021%/℃であることから、本値に設定温度の差を乗じた 0.11%を磁石温度変化に係る不確かさとした。

(4) 校正式の不確かさ

流量計校正試験結果に基づき作成した最小自乗回帰曲線のあてはめの適合度より求めた。回帰曲線のあてはめの適合度（SEE：下式参照）は±0.037mV（±0.20%）で、本値を校正式に係る不確かさとした。

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(y_i - y_{LS,i}\right)^2}{N-C}}$$

ここに、

N　：データ数（21）

C　：回帰に含まれる定数の数（2）

$y_{LS,i}$：校正式に代入して求めた値

y_i　：校正結果

(5) 流量計側に起因する不確かさの総括

(1)～(4)を総括（二乗和の平方根）した±0.49%を流量計側に起因する不確かさとした。

5.2.3　流量計校正に係る不確かさの総括

流量計校正に係る合成標準不確かさを式（5.4）に基づき総括する。

$$\begin{aligned} u\varepsilon &= \sqrt{uV_n^2 + uE^2 + u\Delta t^2} \\ &= \sqrt{0.49^2 + 0.49^2 + 0.11^2} \\ &= 0.70\,\% \end{aligned}$$

流量計校正に係る拡張不確かさUは$k \cdot u\varepsilon$で表されるため 1.39%となる。kは包含係数を表し、ここでは 2 を採用した。なお、拡張不確かさの大きさは、ばらつきが正規分布すると想定した場合に、$k=2$であれば値が$\pm U$の範囲に 95%存在することを意味する。

同様に、流量計校正におけるその他流量条件での不確かさを求め、結果を表 5−2 にまとめた。

6. 落下ナトリウム体積の補正に対する評価

LEDHER コードによる解析結果に基づき評価した内筒外側アニュラス内ナトリウム落下量に対する妥当性を確認する。評価の妥当性は、当該アニュラスの影響を受けない液位 M−L 間のナトリウム体積に基づく校正結果と、当該アニュラスを一部に含む液位 M−LL および L−LL 間のナトリウム体積に基づく校正結果を比較することにより確認した。

図 6−1 は、内筒外側アニュラス内のナトリウムが内筒内側の液位と同速で低下すると仮定した場合の結果を示している。液位 M−LL および L−LL 間のナトリウム体積に基づく校正結果は、液位 M−L 間のナトリウム体積に基づく校正結果に比べ流量計出力を過小評価している。これは内筒外側アニュラス内のナトリウム液位の低下速度が内筒内側に比べ緩慢で、両者の液位を同速で低下するとした場合は落下ナトリウム体積を過大評価することを示唆している。

一方、液位 M−LL および L−LL 間の落下ナトリウム体積に対して解析的な補正を行った場合の結果を図 6−2 に示す。解析結果に基づく体積補正を行うことにより、補正前に生じていた液位区間毎の校正結果の差異が解消され、何れの使用液位区間でも同等の流量計出力特性を示すことが確認できた。

以上の結果から、解析結果に基づく落下ナトリウム体積の補正に対する妥当性が確認できたと判断する。

7．まとめ

高速実験炉「常陽」MK－Ⅲ照射用炉心の炉心内に使用する永久磁石式電磁流量計を炉心・機器熱流動試験施設を用いて炉外校正した。容積法による校正結果から以下の結論を得た。

(1) 「常陽」での使用条件を包含する温度および流量範囲において適用可能な、流量と流量計出力の関係式を得た。流量と出力との関係は良好な直線関係にあり、その偏差は最大流量に対して±0.4%以内であった。

(2) 炉内電磁流量計の出力感度は200℃、225℃、250℃および275℃それぞれ29.87、29.71、29.48および29.26（μV/[ℓ/min]）であり、定格流量（約570ℓ/min）での精度は約1.5%となった。

(3) 流量計出力感度とナトリウム温度（磁石温度）との関係は、以下に示す三次曲線で近似することができる。

$$\varepsilon = 21.39 + 1.16\times10^{-1}T - 5.02\times10^{-4}T^2 + 6.71\times10^{-7}T^3 \quad (T\text{；温度[℃]})$$

流量計出力感度は200℃～275℃で2.04%（－0.027%/℃）低下しているが、その主な理由はアルニコ磁石の温度依存性によるものと考えられる。

(4) 炉内電磁流量計流路管内面の濡れが流量計出力感度に及ぼす影響を確認するため、ナトリウム温度および流量を一定に保持した状態での流量計出力感度の時間変化を測定した。流量計の出力感度はナトリウム循環時間によらずほぼ一定値で推移しており、流路管内面はナトリウム充填後比較的短時間で安定した状態になると考えられる。

(5) ナトリウム純度が流量計出力に及ぼす影響を確認するため、ナトリウム純度の指標となるプラギング温度が異なる条件での流量計出力感度を測定した。プラギング温度が137℃および＞200℃の流量計出力感度は、それぞれ29.62および29.68（μV/[ℓ/min]）で、ナトリウム純度の低下が出力電圧に与える有意な影響は認められなかった。

謝　辞

本試験の実施にあたり、常陽産業（株）の方々にはナトリウム試験ループの運転、試験データの取得に多大なご協力を頂いた。また、LEDHER コードによる解析および結果の処理に関して原子力システム（株）の中根茂氏にご協力を頂いた。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

[1] 大山信美，他：「常陽」炉内流量分布測定用電磁流量計の炉外校正，PNC ZN941 82-57，(1982).

[2] 上出英樹，山口彰，他：FBR 大型炉の設計主要目に関する研究（II）(8)自然循環除熱能力の検討，日本原子力学会「昭 63 年会」予稿集，F32，P282（1988.4).

[3] DONALD PECKNER, I.M.BERNSTEIN, "Handbook of Stainless Steels, McGraw-Hill Book Company, (1977).

[4] BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML: GUIDE TO THE EXPRESSION OF UNCERTAINTY IN MEASUREMENT, (1993).

表３.２－１　校正試験条件一覧

試験順序	第1回校正試験名称	設定条件 温度［℃］	設定条件 流量［ℓ/min］	第2回校正試験名称	設定条件 温度［℃］	設定条件 流量［ℓ/min］	第3回校正試験名称	設定条件 温度［℃］	設定条件 流量［ℓ/min］
1	jyct1-200-000	200	0	jyct2-275-650	275	最大流量	jyct3-200-000	200	0
2	-050		50	-500		500	-050		50
3	-100		100	-400		400	-100		100
4	-200		200	-200		200	-200		200
5	-400		400	-100		100	-400		400
6	-500		500	-050		50	-500		500
7	-650		最大流量	-000		0	-650		最大流量
8	jyct1-225-000	225	0	jyct2-250-650	250	最大流量	jyct3-225-000	225	0
9	-050		50	-500		500	-050		50
10	-100		100	-400		400	-100		100
11	-200		200	-200		200	-200		200
12	-400		400	-100		100	-400		400
13	-500		500	-050		50	-500		500
14	-650		最大流量	-000		0	-650		最大流量
15	jyct1-250-000	250	0	jyct2-225-650	225	最大流量	jyct3-250-000	250	0
16	-050		50	-500		500	-050		50
17	-100		100	-400		400	-100		100
18	-200		200	-200		200	-200		200
19	-400		400	-100		100	-400		400
20	-500		500	-050		50	-500		500
21	-650		最大流量	-000		0	-650		最大流量
22	jyct1-275-000	275	0	jyct2-200-650	200	最大流量	jyct3-275-000	275	0
23	-050		50	-500		500	-050		30
24	-100		100	-400		400	-100		50
25	-200		200	-200		200	-100		100
26	-400		500	-100		100	-200		200
27	-500		600	-050		50	-400		400
28	-600		最大流量	-000		0	-500		500
29	－		－	－		－	-650		最大流量

表4.1-1　濡れ特性試験結果

循環時間 (h)	計測試験容器入口流量計 F353流量 (l/min)	炉内電磁流量計 出力感度(μV/[l/min])	偏差 (%)
第1回試験			
12	148.78	30.32	0.27
24	149.61	30.37	0.09
36	150.35	30.41	-0.04
48	147.95	30.40	0.00
60	149.77	30.43	-0.08
72	149.28	30.48	-0.26
84	148.78	30.39	0.03
第2回試験			
12	132.78	30.09	-0.50
24	131.98	30.13	-0.61
36	132.91	30.18	-0.79
48	137.95	29.90	0.14
60	138.11	29.97	-0.07
72	138.03	29.96	-0.04
84	137.38	29.92	0.10
96	137.91	29.94	0.01
108	137.47	29.92	0.08
120	138.16	29.88	0.21
132	137.73	29.89	0.20
144	137.91	29.95	-0.02
156	137.17	29.87	0.24
168	136.71	29.89	0.17
180	139.32	29.90	0.14
192	137.69	29.90	0.14
204	136.46	29.94	0.03
216	137.40	29.93	0.06
228	137.43	29.92	0.09
240	137.88	29.91	0.10
252	137.46	29.91	0.11
264	136.98	29.88	0.22
276	137.83	29.94	0.01

表4.3−1 「常陽」炉内電磁流量計第1回校正試験結果

試験名称	液位M-L				液位M-LL					液位L-LL				
	流 量 (l/min)	流量計出力 (mV)	磁石温度 (℃)	出力感度 (μV/[l/min])	流 量 (l/min)	補正流量 (l/min)	流量計出力 (mV)	磁石温度 (℃)	出力感度 (μV/[l/min])	流 量 (l/min)	補正流量 (l/min)	流量計出力 (mV)	磁石温度 (℃)	出力感度 (μV/[l/min])
jyctl-200-000	0.00	0.00	201.56		0.00	0.00	0.00	201.56		0.00	0.00	0.00	201.56	
-050	56.63	1.68	199.87	29.69	53.23	52.82	1.57	198.54	29.70	52.37	51.90	1.55	198.28	29.80
-100	125.89	3.77	200.79	29.92	123.27	121.45	3.66	199.52	30.10	122.30	120.14	3.63	199.25	30.23
-200	248.30	7.45	199.63	30.00	248.80	244.17	7.36	199.72	30.14	248.05	242.49	7.34	199.74	30.27
-400	420.20	12.61	200.64	30.02	416.05	407.56	12.25	200.66	30.06	413.75	403.56	12.18	200.66	30.17
-500	552.17	16.59	198.62	30.04	540.99	529.63	15.88	198.48	29.98	536.82	523.21	15.72	198.45	30.04
-650	653.64	19.55	200.05	29.91	631.95	618.45	18.49	199.42	29.90	625.35	609.24	18.27	199.29	29.99
jyctl-225-000	0.00	0.00	225.37		0.00	0.00	0.00	225.37		0.00	0.00	0.00	225.37	
-050	52.72	1.55	224.92	29.49	45.78	45.49	1.34	223.70	29.44	44.36	44.04	1.30	223.48	29.52
-100	113.30	3.36	224.27	29.68	103.68	102.29	3.05	224.01	29.86	101.46	99.84	3.00	223.96	30.00
-200	224.27	6.69	223.83	29.82	224.01	219.95	6.58	224.01	29.93	223.13	218.25	6.56	224.05	30.07
-400	421.35	12.58	224.48	29.85	415.57	407.09	12.15	224.82	29.86	412.83	402.67	12.07	224.90	29.96
-500	538.56	16.06	224.30	29.82	529.14	518.05	15.43	224.09	29.78	525.23	511.94	15.30	224.05	29.88
-650	648.10	19.37	224.61	29.89	632.27	618.77	18.39	224.30	29.73	626.68	610.53	18.19	224.24	29.80
jyctl-250-000	0.00	0.00	250.76		0.00	0.00	0.00	250.76		0.00	0.00	0.00	250.76	
-050	57.85	1.70	250.48	29.34	54.65	54.22	1.59	248.89	29.35	53.80	53.30	1.57	248.57	29.46
-100	106.73	3.15	249.68	29.52	105.09	103.67	3.07	249.11	29.62	104.33	102.63	3.05	248.99	29.76
-200	214.82	6.37	249.29	29.65	216.37	212.49	6.31	249.81	29.70	215.85	211.17	6.30	249.92	29.83
-400	413.38	12.30	249.35	29.75	410.01	401.66	11.91	249.90	29.66	407.68	397.66	11.83	250.02	29.75
-500	491.80	14.58	249.78	29.65	485.74	475.66	14.07	250.25	29.58	482.56	470.47	13.96	250.35	29.68
-650	659.26	19.51	250.21	29.59	642.40	628.66	18.54	250.31	29.50	636.39	619.97	18.34	250.33	29.59
jyctl-275-000	0.00	0.01	279.91		0.00	0.00	0.01	279.91		0.00	0.00	0.01	279.91	
-050	72.59	2.12	274.01	29.26	68.36	67.68	1.98	273.78	29.25	67.23	66.45	1.95	273.74	29.37
-100	118.47	3.47	274.60	29.32	115.47	113.82	3.35	274.00	29.41	114.36	112.40	3.32	273.87	29.55
-200	206.13	6.06	274.60	29.42	207.66	203.97	6.01	274.86	29.47	207.11	202.67	6.00	274.92	29.60
-400	400.39	11.81	273.89	29.50	398.14	390.06	11.47	274.44	29.41	395.99	386.29	11.40	274.56	29.51
-500	490.22	14.47	272.95	29.53	487.98	477.84	14.04	273.36	29.38	485.45	473.28	13.95	273.45	29.47
-650	670.83	19.65	272.78	29.29	654.30	640.29	18.73	272.96	29.25	648.15	631.39	18.54	272.99	29.37

表4.3−2　「常陽」炉内電磁流量計第２回校正試験結果

試験名称	液位M-L				液位M-LL					液位L-LL				
	流　量 (l/min)	流量計出力 (mV)	磁石温度 (℃)	出力感度 (μV/[l/min])	流　量 (l/min)	補正流量 (l/min)	流量計出力 (mV)	磁石温度 (℃)	出力感度 (μV/[l/min])	流　量 (l/min)	補正流量 (l/min)	流量計出力 (mV)	磁石温度 (℃)	出力感度 (μV/[l/min])
jyct2-200-000	0.00	0.03	199.42		0.00	0.00	0.03	199.42		0.00	0.00	0.03	199.42	
-050	51.09	1.54	197.98	30.19	46.46	46.16	1.40	197.30	30.27	45.42	45.08	1.37	197.17	30.38
-100	99.32	3.00	201.82	30.17	96.04	94.81	2.87	200.97	30.28	95.04	93.58	2.85	200.79	30.40
-200	231.75	6.99	199.35	30.14	231.36	227.14	6.86	199.35	30.22	230.49	225.41	6.84	199.35	30.33
-400	429.64	12.91	197.75	30.05	423.56	414.90	12.48	198.01	30.08	420.84	410.45	12.39	198.06	30.19
-500	550.19	16.44	203.90	29.88	536.98	525.71	15.74	203.38	29.94	532.41	518.93	15.60	203.27	30.05
-650	645.37	19.26	203.59	29.85	627.83	614.44	18.29	203.12	29.77	622.07	606.06	18.09	203.03	29.85
jyct2-225-000	0.00	0.02	224.35		0.00	0.00	0.02	224.35		0.00	0.00	0.02	224.35	
-050	61.70	1.85	224.02	29.92	57.99	57.51	1.73	222.83	30.01	57.04	56.48	1.70	222.59	30.14
-100	109.80	3.28	223.81	29.89	106.62	105.17	3.16	223.64	30.04	105.57	103.84	3.13	223.61	30.17
-200	234.59	7.02	224.47	29.92	235.79	231.47	6.94	224.88	29.99	235.18	229.98	6.93	224.97	30.12
-400	416.76	12.47	223.82	29.92	412.22	403.82	12.07	224.28	29.88	409.75	399.67	11.98	224.38	29.98
-500	548.21	16.37	222.36	29.86	539.31	527.99	15.72	222.49	29.78	535.47	521.90	15.59	222.51	29.86
-650	653.64	19.42	223.55	29.71	636.44	622.84	18.50	223.25	29.70	630.55	614.29	18.31	223.19	29.80
jyct2-250-000	0.00	0.02	251.88		0.00	0.00	0.02	251.88		0.00	0.00	0.02	251.88	
-050	58.51	1.74	250.97	29.66	54.20	53.78	1.60	249.11	29.75	53.15	52.67	1.57	248.75	29.88
-100	119.68	3.55	250.47	29.67	116.82	115.15	3.44	249.40	29.83	115.77	113.78	3.41	249.17	29.98
-200	210.10	6.25	249.75	29.73	210.92	207.16	6.18	250.28	29.81	210.26	205.74	6.16	250.39	29.94
-400	407.87	12.14	250.46	29.77	406.18	397.92	11.81	250.71	29.68	404.22	394.30	11.74	250.76	29.77
-500	532.92	15.76	248.52	29.58	526.27	515.25	15.24	248.72	29.58	522.80	509.59	15.13	248.76	29.69
-650	656.44	19.40	251.83	29.55	643.83	630.05	18.56	251.10	29.45	638.67	622.18	18.38	250.95	29.54
jyct2-275-000	0.00	0.02	276.54		0.00	0.00	0.02	276.54		0.00	0.00	0.02	276.54	
-050	66.70	1.96	275.37	29.41	64.02	63.43	1.87	272.95	29.44	63.21	62.51	1.85	272.46	29.56
-100	116.75	3.44	276.10	29.43	114.40	112.78	3.33	274.96	29.51	113.44	111.50	3.31	274.73	29.65
-200	207.53	6.11	275.92	29.45	209.20	205.48	6.06	276.13	29.47	208.68	204.20	6.04	276.18	29.60
-400	402.50	11.85	272.59	29.45	399.60	391.49	11.52	272.86	29.42	397.31	387.58	11.45	272.92	29.53
-500	493.38	14.51	277.37	29.41	490.73	480.53	14.07	277.34	29.28	488.10	475.85	13.98	277.34	29.37
-650	673.78	19.74	275.93	29.30	659.25	645.12	18.84	275.99	29.20	653.48	636.57	18.65	276.01	29.30

表4.3—3　「常陽」炉内電磁流量計第３回校正試験結果

試験名称	液位M-L				液位M-LL					液位L-LL				
	流　量 (l/min)	流量計出力 (mV)	磁石温度 (℃)	出力感度 (μV/[l/min])	流　量 (l/min)	補正流量 (l/min)	流量計出力 (mV)	磁石温度 (℃)	出力感度 (μV/[l/min])	流　量 (l/min)	補正流量 (l/min)	流量計出力 (mV)	磁石温度 (℃)	出力感度 (μV/[l/min])
jyct3-200-000	0.00	0.03	202.92		0.00	0.00	0.03	202.92		0.00	0.00	0.03	202.92	
-050	37.43	1.13	199.87	30.24	34.11	33.98	1.03	198.12	30.28	33.36	33.21	1.01	197.78	30.38
-100	81.53	2.45	203.04	30.09	78.95	78.07	2.36	201.29	30.23	78.15	77.11	2.34	200.93	30.35
-200	216.95	6.52	201.36	30.07	215.51	211.65	6.39	201.20	30.20	214.47	209.83	6.36	201.17	30.33
-400	421.36	12.67	201.63	30.07	415.45	406.98	12.23	201.62	30.05	412.80	402.63	12.14	201.62	30.14
-500	542.38	16.22	203.79	29.90	531.07	519.93	15.56	203.39	29.92	526.90	513.57	15.42	203.31	30.02
-650	642.66	19.20	201.71	29.88	622.88	609.60	18.21	201.09	29.86	616.69	600.83	18.00	200.96	29.96
jyct3-225-000	0.00	0.04	224.67		0.00	0.00	0.04	224.67		0.00	0.00	0.04	224.67	
-050	59.63	1.79	223.62	29.99	51.71	51.34	1.54	222.17	30.06	50.10	49.68	1.50	221.90	30.17
-100	79.25	2.37	227.43	29.92	74.80	74.01	2.22	226.08	30.03	73.65	72.71	2.19	225.81	30.16
-200	236.03	7.05	226.30	29.86	237.60	233.23	6.98	226.54	29.93	237.06	231.80	6.97	226.60	30.05
-400	426.05	12.72	226.62	29.86	420.60	412.00	12.29	226.48	29.83	417.91	407.60	12.20	226.44	29.93
-500	544.31	16.23	225.48	29.82	535.66	524.42	15.60	225.43	29.75	531.88	518.41	15.47	225.42	29.84
-650	650.85	19.33	225.70	29.71	632.27	618.77	18.36	225.27	29.68	626.13	609.99	18.16	225.18	29.78
jyct3-250-000	0.00	0.03	252.88		0.00	0.00	0.03	252.88		0.00	0.00	0.03	252.88	
-050	61.50	1.76	252.96	28.58	56.71	56.25	1.62	250.91	28.78	55.57	55.04	1.59	250.51	28.93
-100	135.59	4.03	249.56	29.75	133.94	131.89	3.94	249.25	29.86	133.06	130.61	3.92	249.19	30.00
-200	226.93	6.75	250.61	29.75	228.89	224.72	6.69	250.52	29.79	228.40	223.38	6.68	250.50	29.91
-400	429.63	12.78	249.10	29.75	424.61	415.93	12.34	249.35	29.67	421.88	411.47	12.25	249.40	29.77
-500	542.37	16.04	251.00	29.57	535.00	523.78	15.46	251.04	29.51	531.35	517.90	15.33	251.05	29.60
-650	659.26	19.50	251.54	29.58	644.30	630.52	18.55	251.24	29.42	638.67	622.18	18.35	251.18	29.49
jyct3-275-000	0.00	0.03	280.55		0.00	0.00	0.03	280.55		0.00	0.00	0.03	280.55	
-030	22.70	0.68	273.20	30.01	19.80	19.80	0.60	268.64	30.12	19.20	19.20	0.58	267.82	30.26
-050	45.18	1.34	277.33	29.65	41.73	41.50	1.23	273.78	29.62	40.88	40.62	1.21	273.09	29.73
-100	115.61	3.42	274.93	29.62	113.14	111.55	3.31	273.52	29.66	112.16	110.26	3.28	273.23	29.79
-200	204.75	6.03	273.97	29.47	205.79	202.15	5.98	274.21	29.57	205.15	200.76	5.97	274.26	29.71
-400	420.19	12.43	273.86	29.58	417.80	409.27	12.05	274.12	29.45	415.54	405.30	11.97	274.17	29.54
-500	491.79	14.51	274.62	29.51	489.08	478.91	14.07	274.78	29.38	486.44	474.24	13.98	274.81	29.48
-650	664.99	19.63	274.35	29.52	652.34	638.37	18.70	274.34	29.30	646.98	630.25	18.51	274.34	29.37

表５－１　炉内電磁流量計校正時のナトリウム体積に係る不確かさ

線膨張率 α($u\alpha$)	1.66E-05	(8.30E-07)
温度差 ΔT($u\Delta T$)	230.0	(3.41)
$1+\alpha\times\Delta T$	1.0038	(1.0041)

No. (i)	内部構造物名称		内部構造物体積計算：内部構造物体積計算概略寸法	D_{1i} (mm)	uD_{1i} (mm)	D_{2i} (mm)	uD_{2i} (mm)	L_i or t_i (mm)	uL_i or ut_i (mm)	N_i 員数	体積計算 V_{si}(ℓ)	体積計算 uV_{si}(ℓ)	体積計算 V_s(ℓ)	体積計算 uV_s(ℓ)	アニュラス部体積 V_A(ℓ)	アニュラス部体積 uV_A(ℓ)	容器Na体積 (D=1362.8) V_0(ℓ)	容器Na体積 (uD=0.91) uV_0(ℓ)	Na体積 V_n(ℓ)	Na体積 uV_n(ℓ)
1	内筒	内筒本体	φ1322.5/φ1316.7×L390.25	1322.5	0.65	1316.7	0.65	390.25	0.50	1	4.75	0.007								
2		内筒ｽﾍﾟｰｻ	φ18/φ14×L50	18	0.3	14	0.3	50	0.50	6	0.03	0.004								
3	液位計	液位計案内管	φ27.2×L175.5	27.1	0.3	0	0	175.5	0.50	3	0.31	0.008								
4	ﾉｽﾞﾙ類	ｵｰﾊﾞｰﾌﾛｰﾉｽﾞﾙ	φ34.0×L551.15	34	0.34	0	0	551.15	1.72	1	0.51	0.012								
5		熱電対ｳｪﾙ(M,L)	φ10.5×(L993×2+L117.05)	10.5	0.3	0	0	2103.05	5.75	1	0.18	0.011								
6		ｳｪﾙ振れ止め板(1)	76×30×t5-φ12.5×t5	76	1	30	1	5	0.3	3	0.03	0.004								
7		ｳｪﾙ振れ止め板(2)	53×30×t5-φ12.5×t5	53	1	30	1	5	0.3	1	0.01	0.001								
8	ｽﾘｯﾄ噴流試験体	主軸(下部)	□40/□34×L993	40	0.4	34	0.34	993	2.01	4	1.78	0.227								
9		ﾄﾗｽ(水平)	φ21.7×L200	21.7	0.3	0	0	200	0.50	2	0.15	0.005								
10		ﾄﾗｽ(斜め)	φ21.7×L244.15	21.7	0.3	0	0	244.15	0.50	6	0.55	0.017								
11		端部板(1),(2)	10×680×L297.38	10	0.3	680	1	297.38	1.72	2	4.09	0.157	14.41	0.53	31.03	0.33	1465.16	6.04	1419.73	6.90
12		支柱	φ8.0×L993	8	0.3	0	0	993	2.01	2	0.10	0.008								
13		支柱振れ止め	35×30×t10-φ10.0×t10	35	1	30	1	10	0.3	2	0.02	0.002								
14		ｶﾞｽ供給管	φ10×L993	10	0.3	0	0	993	2.01	3	0.24	0.015								
15		熱電対	φ0.5×L993	0.5	0.005	0	0	993	2.01	50	0.01	0.000								
16	熱電対ﾂﾘｰ	ﾊﾟｲﾌﾟ(1)	φ30×L910.62	30	0.3	0	0	910.62	1.72	2	1.30	0.030								
17		継ぎ	φ30/φ20×L40	30	0.3	20	0.3	40	1	2	0.16	0.008								
18		固定金具(1)	φ20×L41.88	20	0.3	0	0	41.88	1	2	0.03	0.001								
19		ﾊﾟｲﾌﾟ(4)	φ30/φ25×L137.38	30	0.3	25	0.3	137.38	1.00	2	0.06	0.006								
20		固定金具(4)	φ40/φ30×L40	40	0.3	30	0.3	40	1	4	0.09	0.006								
21		固定金具(4)	25×40×t8	25	1	40	1	8	0.4	2	0.02	0.002								

表５－２　炉内電磁流量計校正試験に係る不確かさ

流量Q_n	出力感度ε	容器単体体積		内部構造物体積		アニュラス部体積		ナトリウム体積		積算時間		流量計出力		合成標準	拡　張
(l/min)	(μV/[l/min])	V_0(ℓ)	uV_0(ℓ)	V_s(ℓ)	uV_s(ℓ)	V_A(ℓ)	uV_A(ℓ)	V_n(ℓ)	uV_n(ℓ)	Δt(s)	$u\Delta t$(s)	E(mV)	uE(mV)	不確かさu_c	不確かさU
628.66	29.50	1465.16	6.04	14.41	0.53	31.03	0.33	1419.73	6.90	135.5	0.14	18.54	0.09	0.70%	1.39%
475.66	29.58					30.12	0.46	1420.63	7.04	179.2		14.07	0.09	0.81%	1.62%
401.66	29.66					29.55	0.51	1421.21	7.09	212.3		11.91	0.09	0.90%	1.80%
212.49	29.70					26.03	0.96	1424.72	7.53	402.3		6.31	0.09	1.49%	2.99%
103.67	29.62					19.62	1.47	1431.13	8.04	828.3		3.07	0.09	2.92%	5.84%
54.22	29.35					11.32	2.37	1439.44	8.94	1592.8		1.59	0.09	5.56%	11.11%

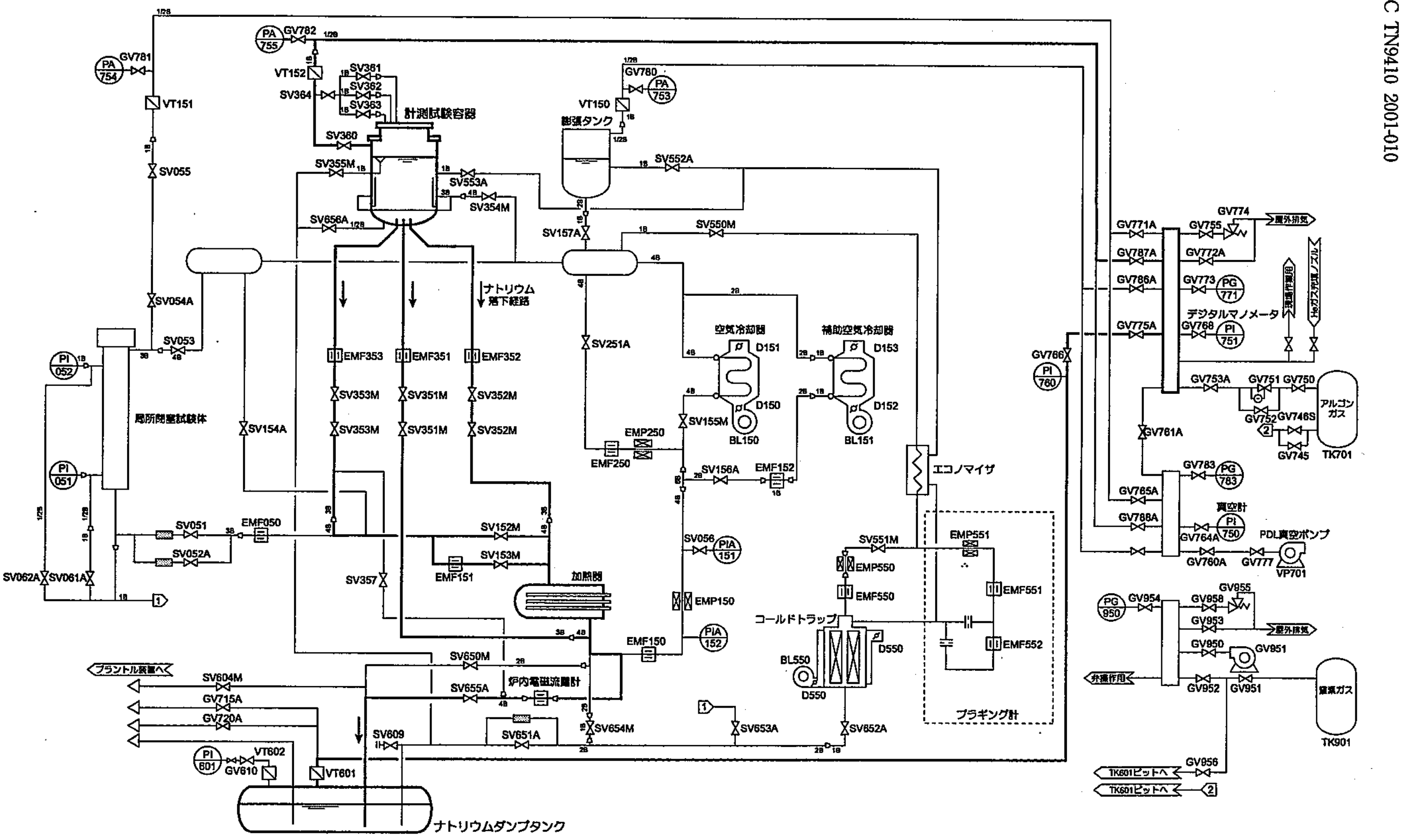


図２－１　炉心・機器熱流動試験施設系統図

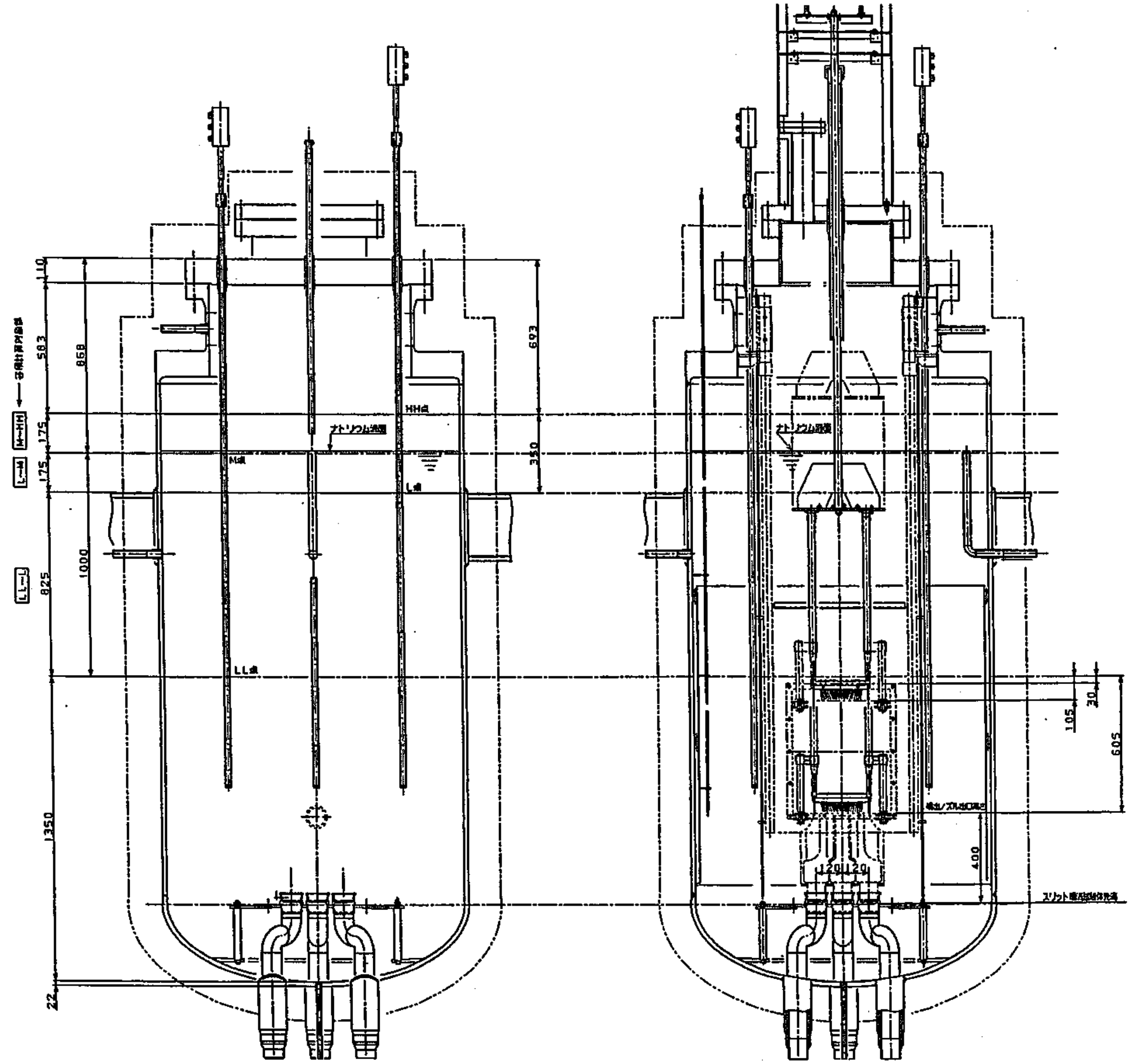
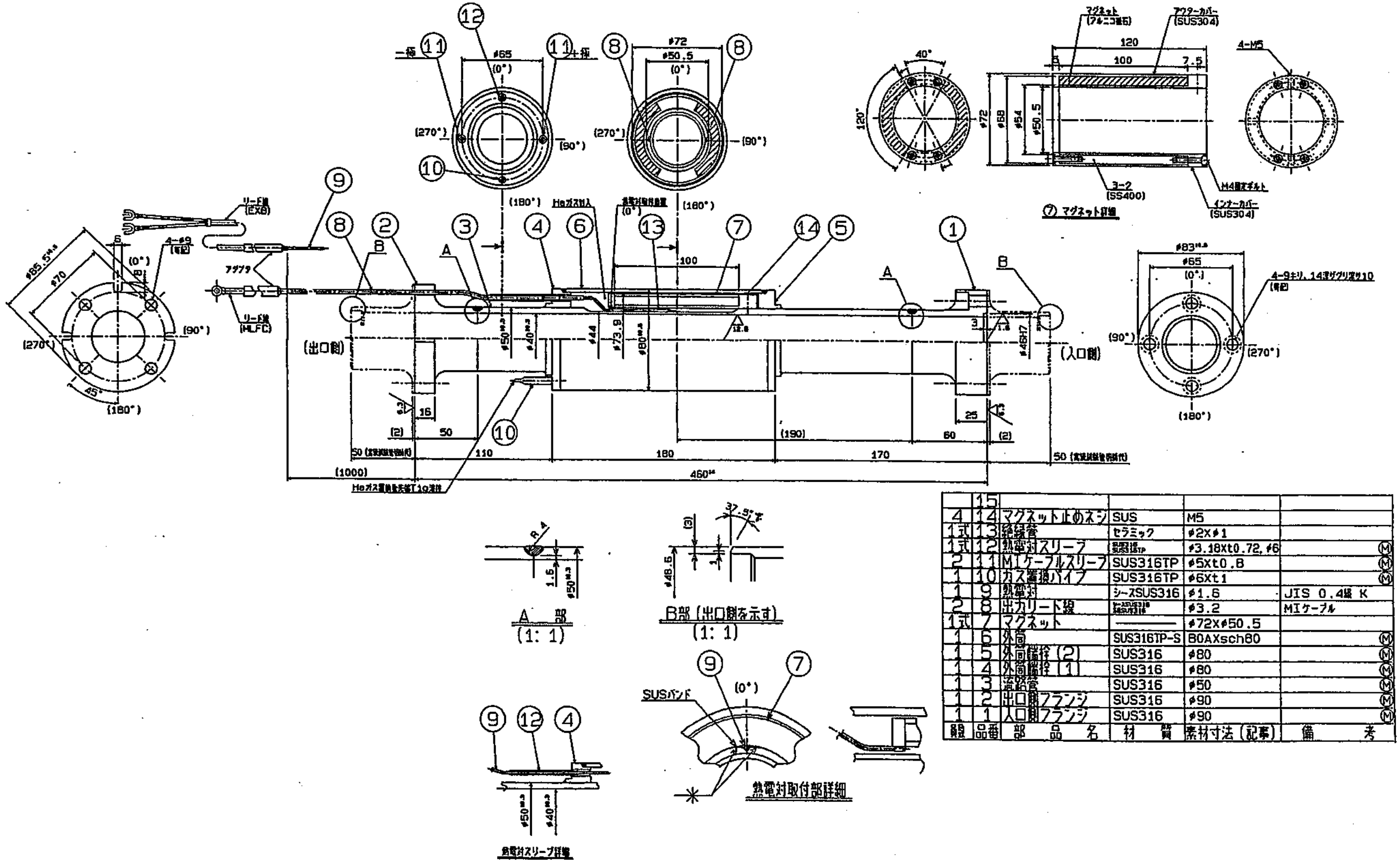


図２－２　計測試験容器構造図



個数	品番	部品名	材質	素材寸法（記事）	備考
	15				
4	14	マグネット止めネジ	SUS	M5	
1式	13	絶縁管	セラミック	φ2Xφ1	
1式	12	熱電対スリーブ	[illegible]	φ3.18Xt0.72, φ6	Ⓜ
2	11	MIケーブルスリーブ	SUS316TP	φ5Xt0.8	Ⓜ
1	10	ガス置換パイプ	SUS316TP	φ6Xt1	Ⓜ
1	9	熱電対	シースSUS316	φ1.6	JIS 0.4級 K
2	8	出力リード線	[illegible]	φ3.2	MIケーブル
1式	7	マグネット	――――	φ72Xφ50.5	
1	6	外筒	SUS316TP-S	80AXsch80	Ⓜ
1	5	外筒端栓（2）	SUS316	φ80	Ⓜ
1	4	外筒端栓（1）	SUS316	φ80	Ⓜ
1	3	流路管	SUS316	φ50	Ⓜ
1	2	出口側フランジ	SUS316	φ90	Ⓜ
1	1	入口側フランジ	SUS316	φ90	Ⓜ

図２－３　炉内電磁流量計構造図

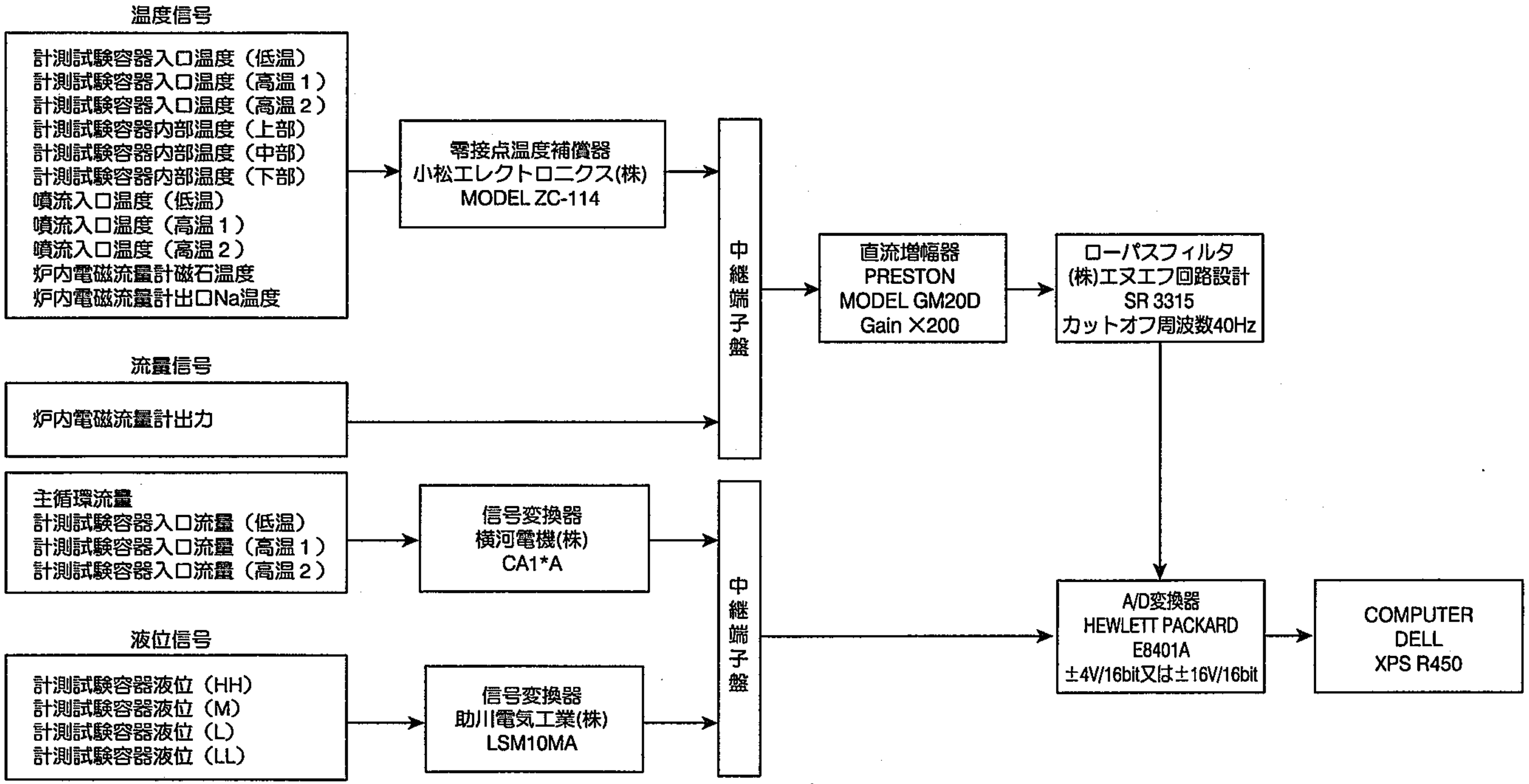


図２－４　データ収録システム

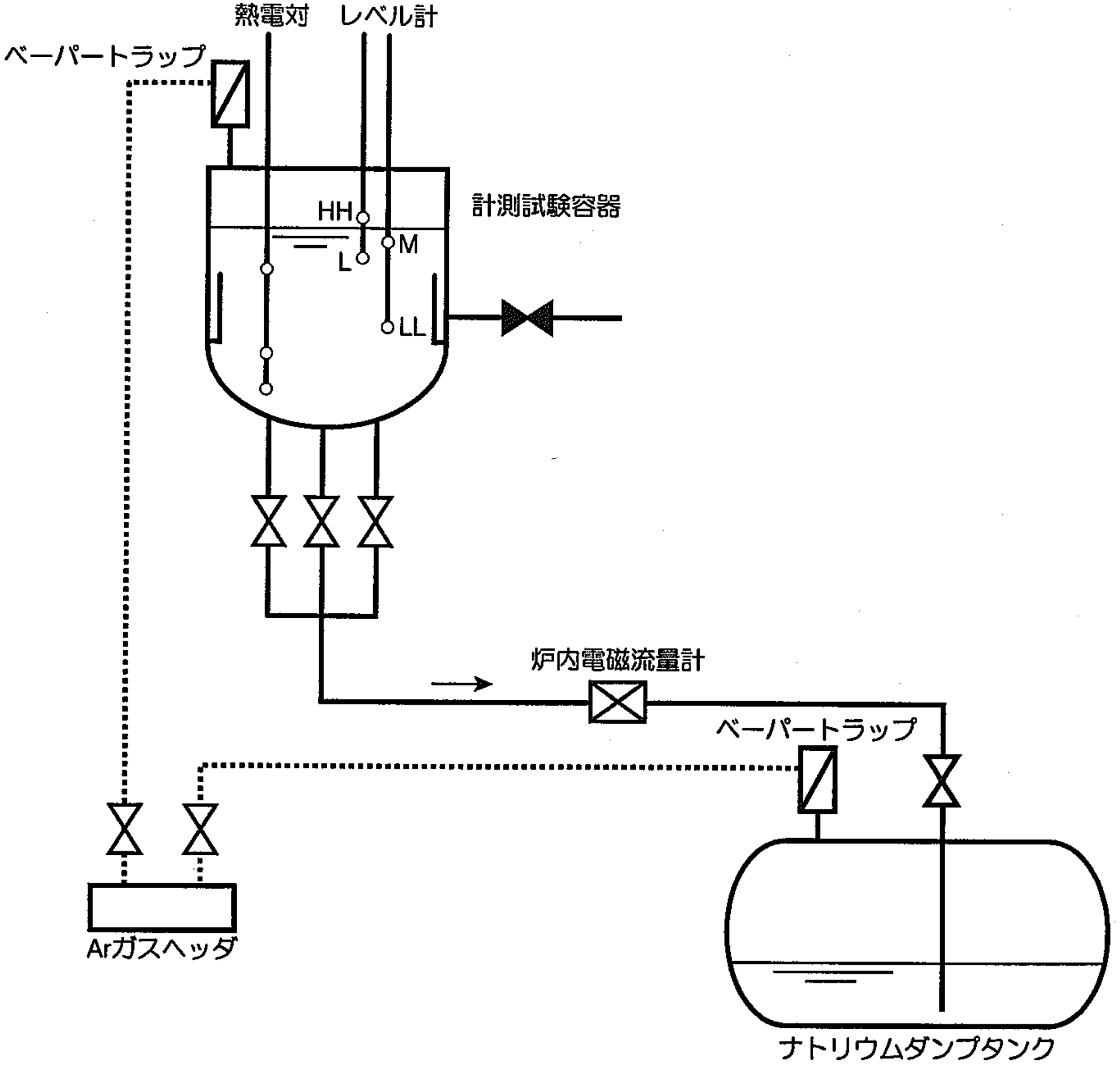


図３－１　容積法による流量計校正の概要

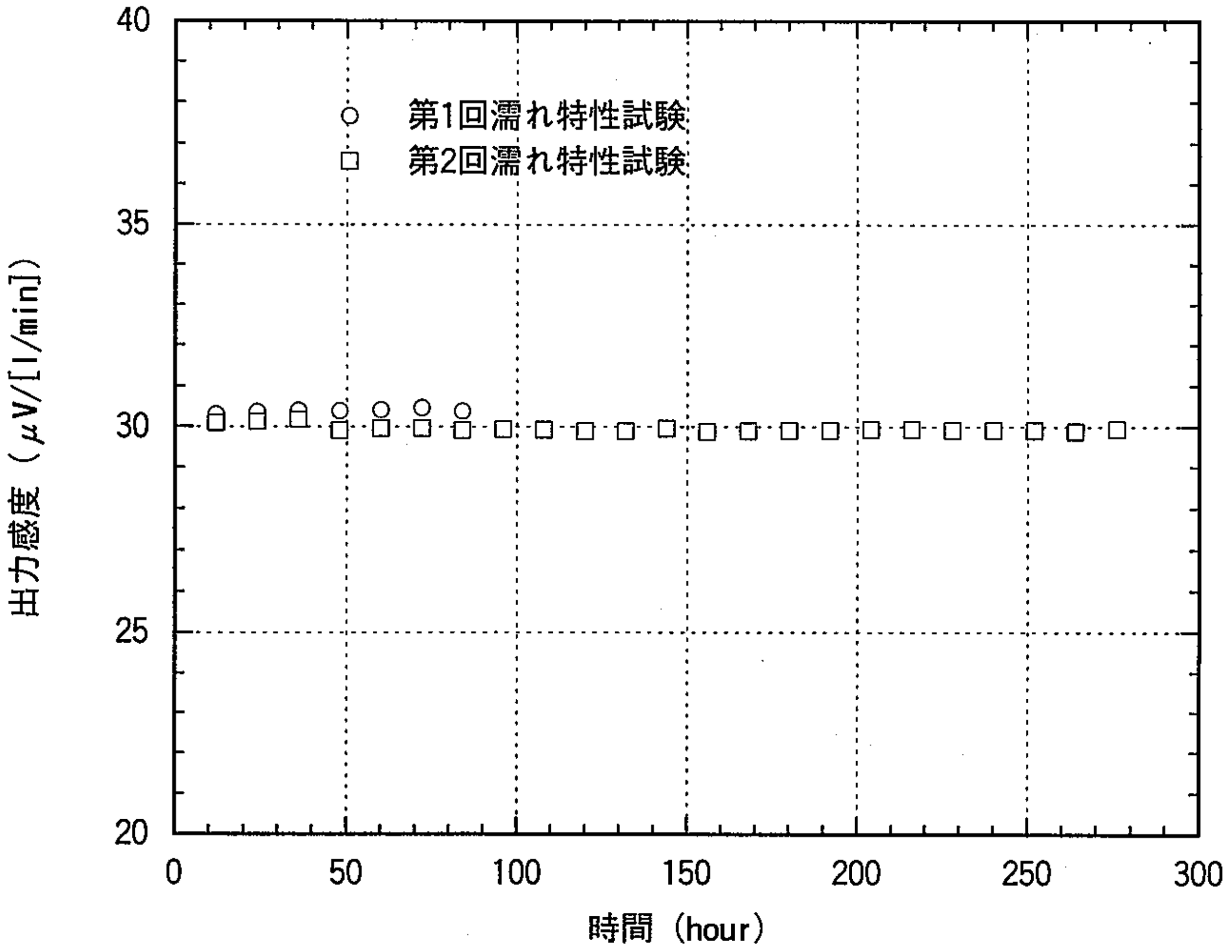


図4.1—1　濡れ特性試験における流量計出力感度の変化

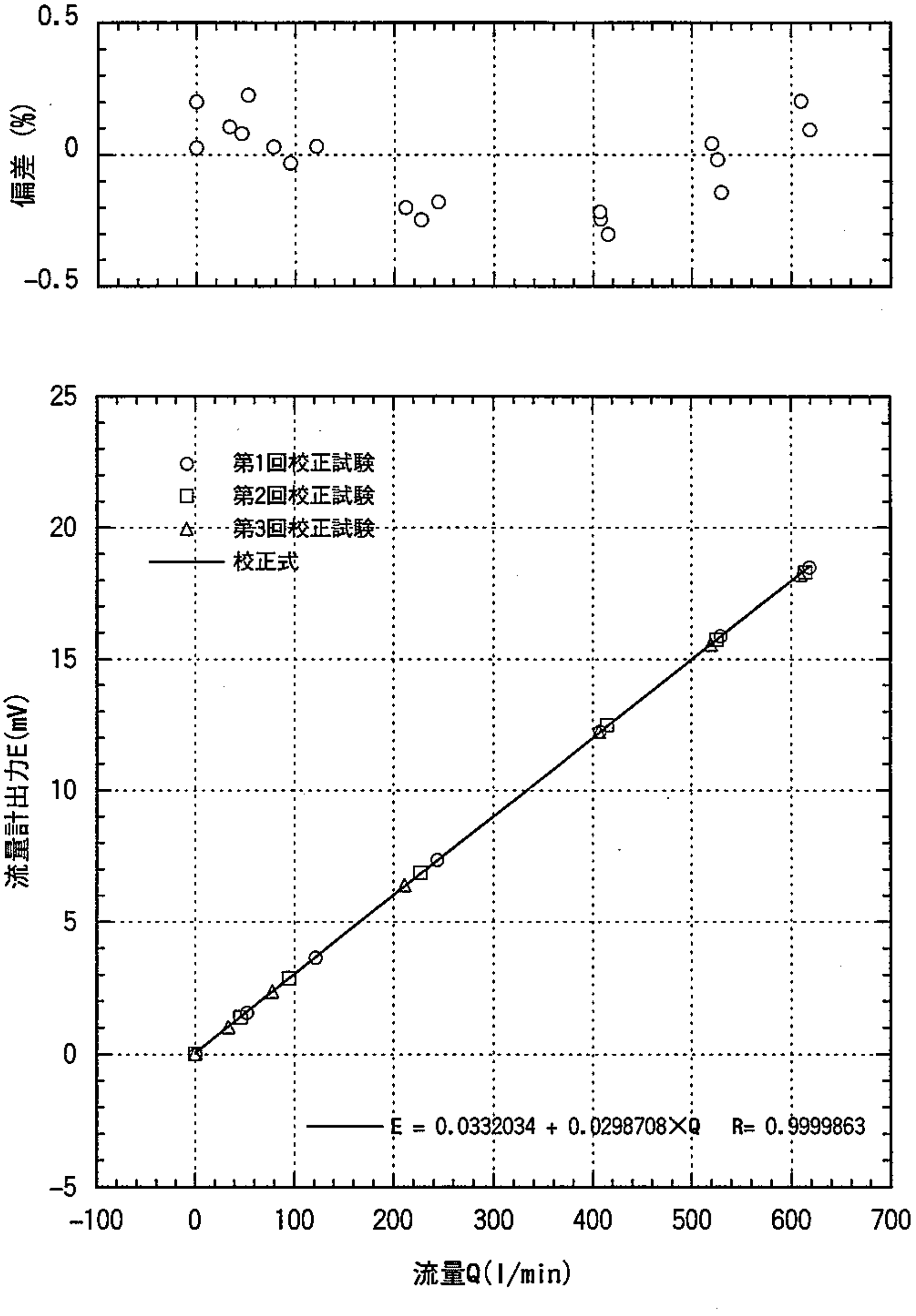


図4.3-1 炉内電磁流量計出力特性（200℃）

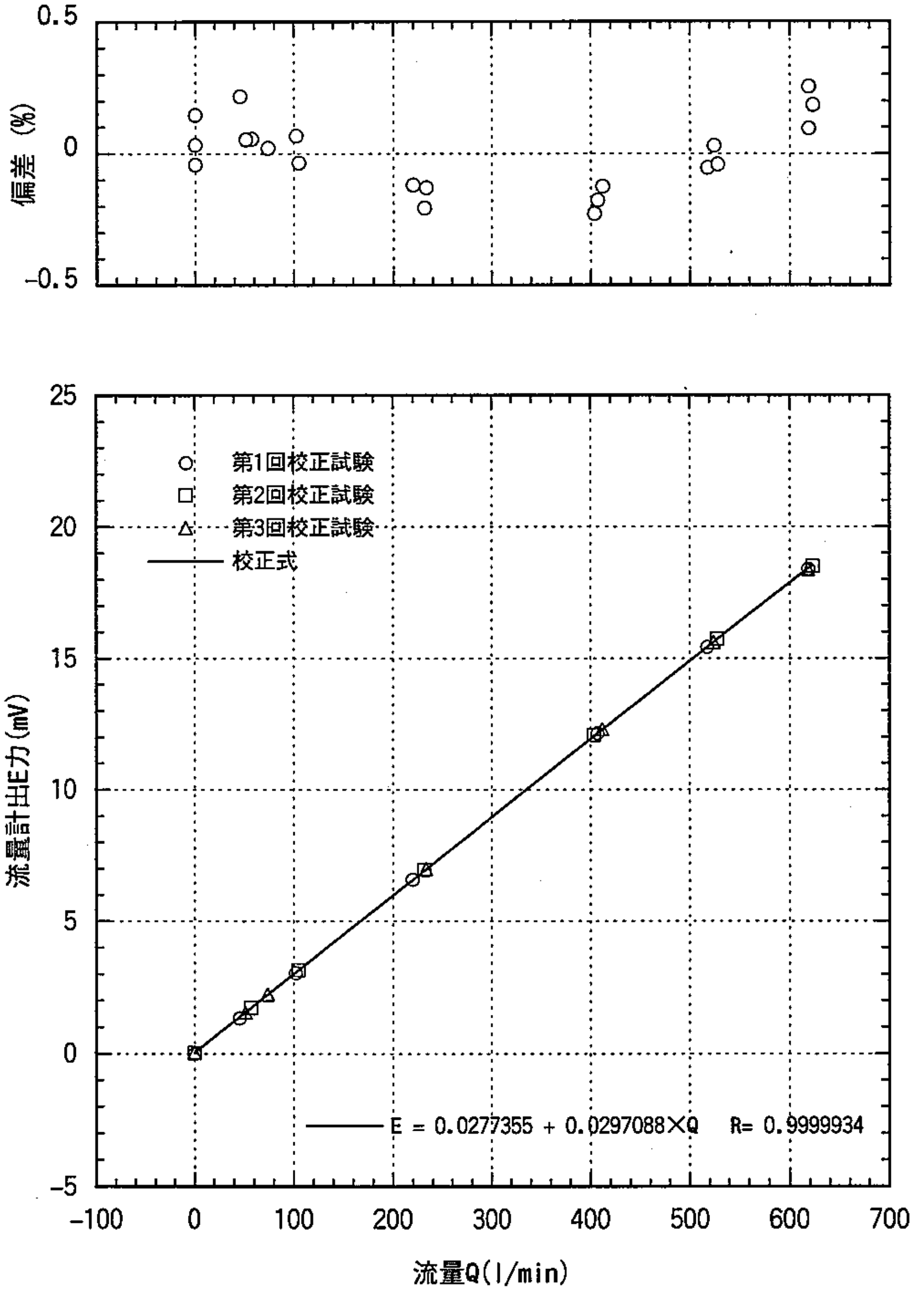


図4.3-2 炉内電磁流量計出力特性 (225℃)

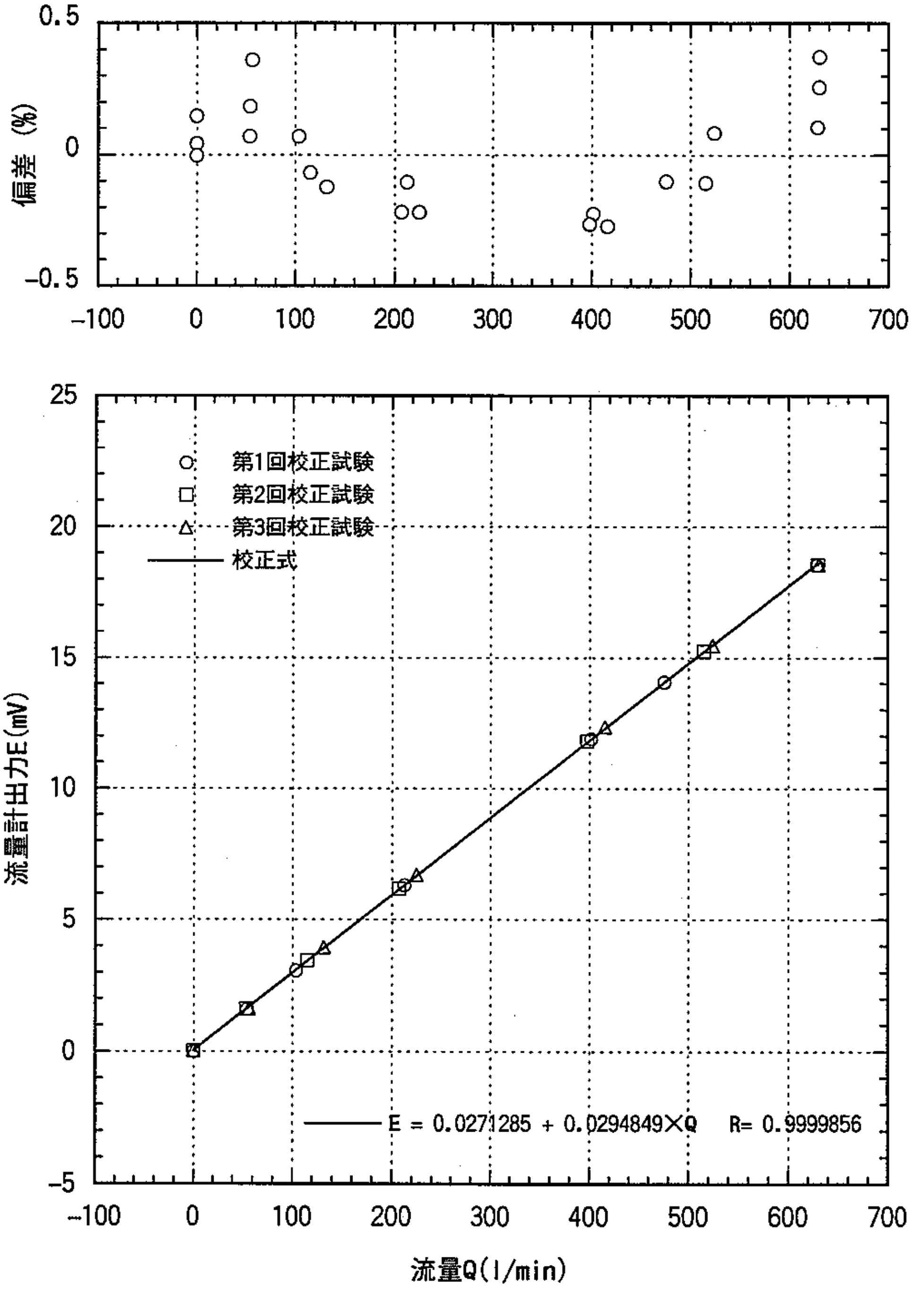


図4.3-3 炉内電磁流量計出力特性（250℃）

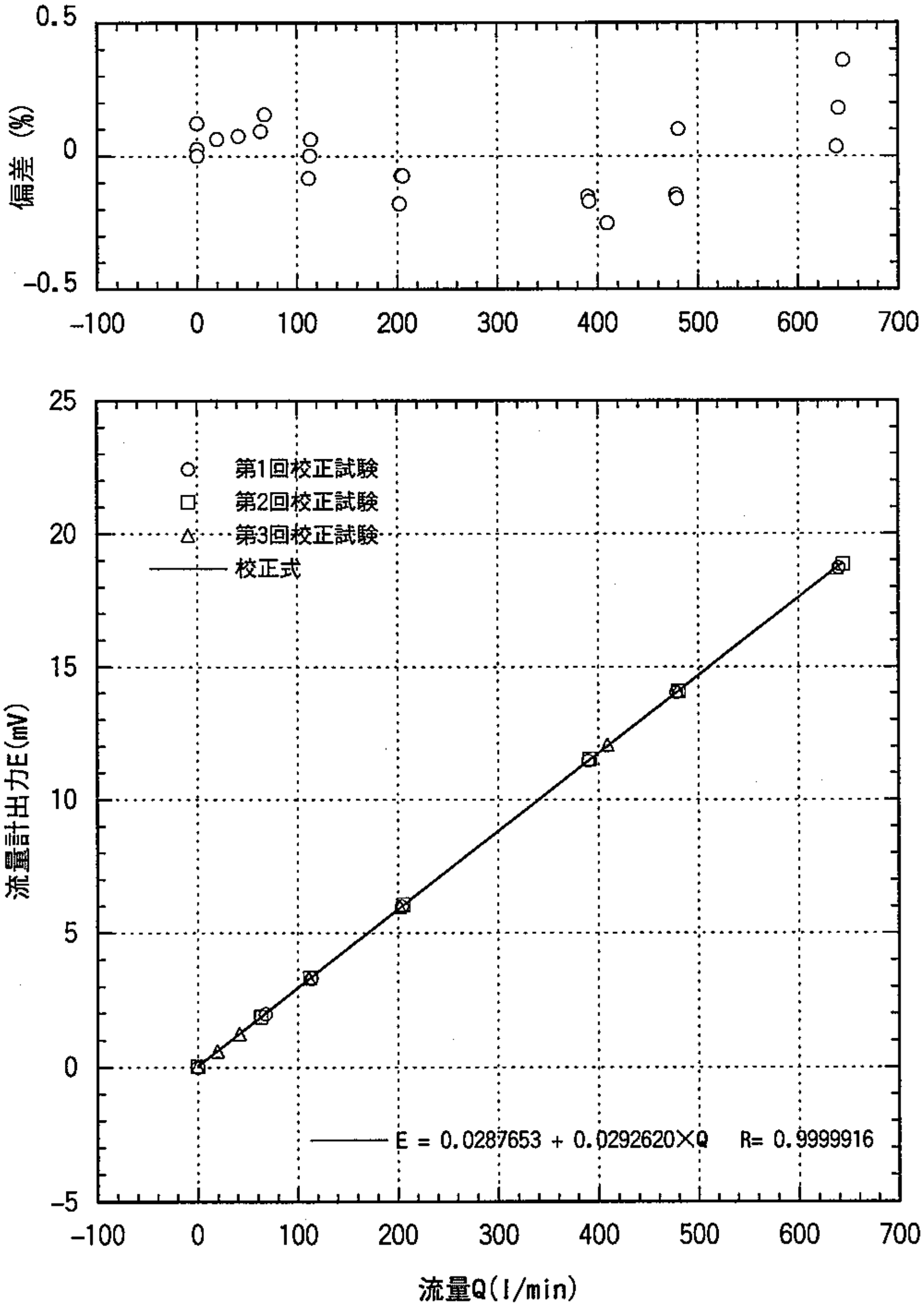


図4.3-4　炉内電磁流量計出力特性（275℃）

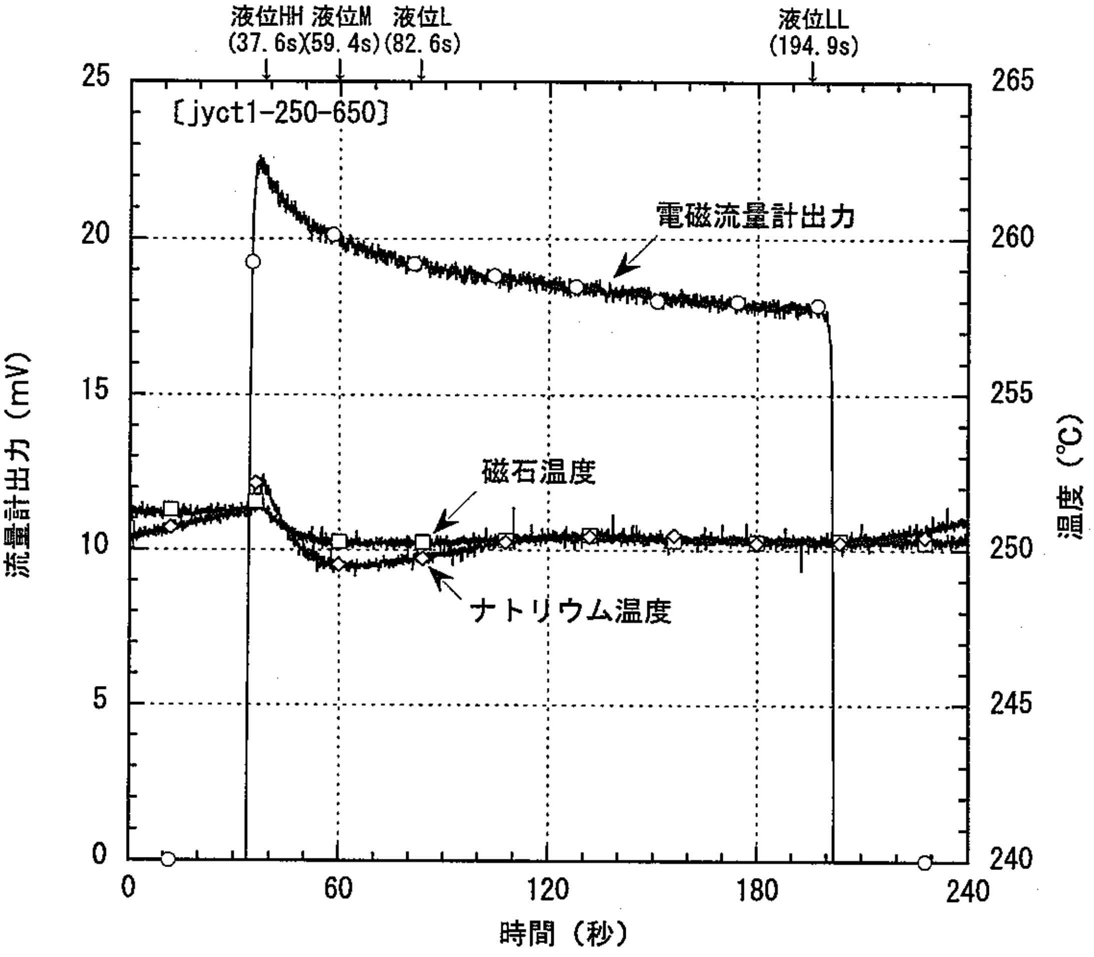


図4.3−5　校正試験における流量計出力と主要温度の時系列

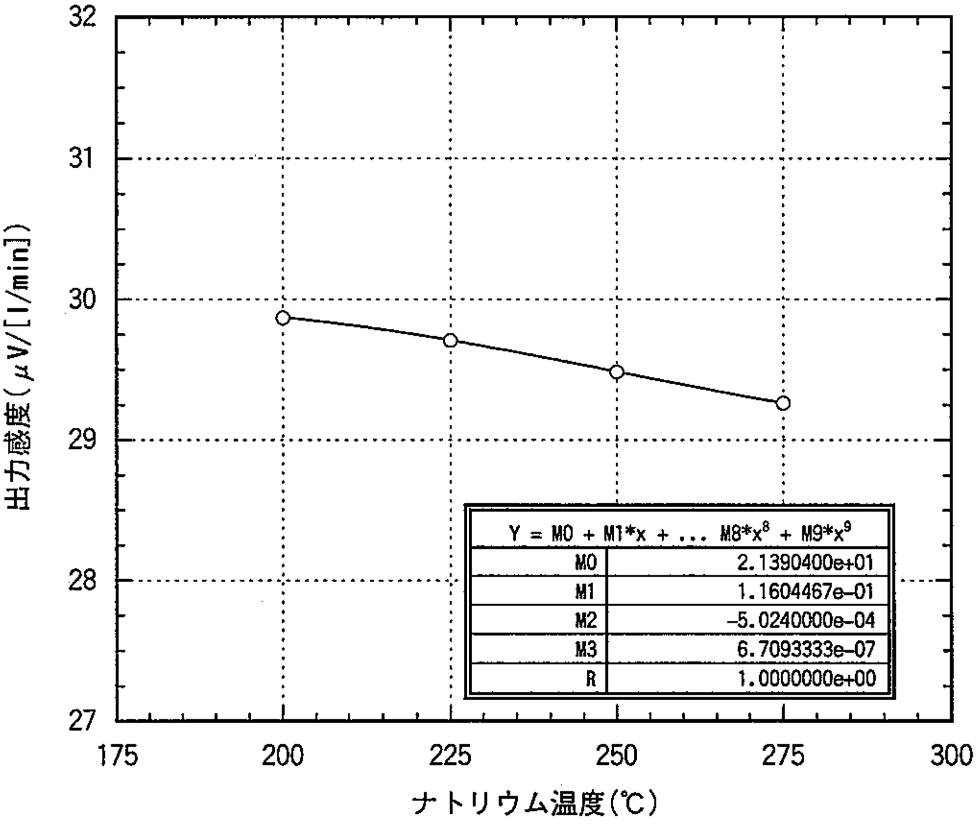


図4.3−6　炉内電磁流量計出力感度の温度依存性

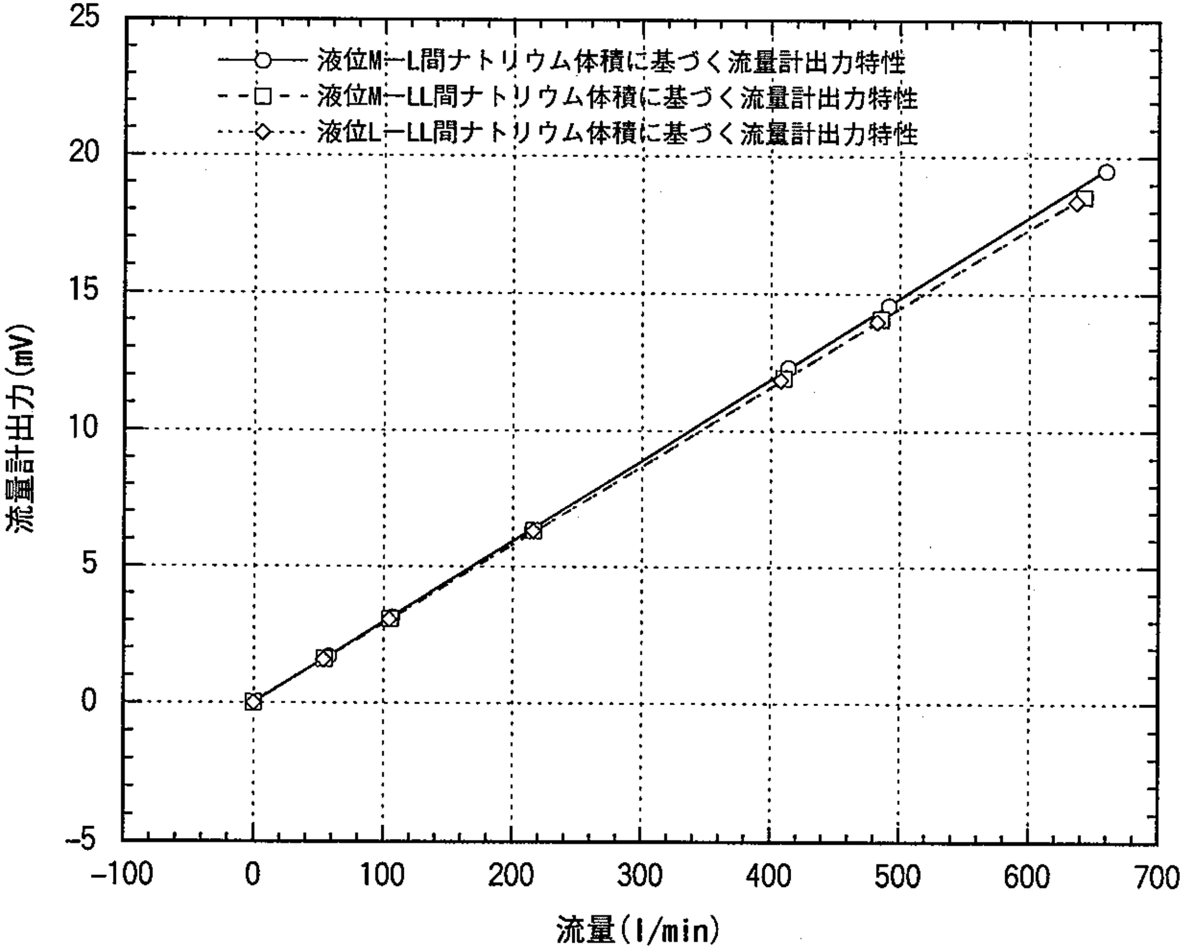


図6－1　炉内電磁流量計出力特性（ナトリウム体積の補正なし）

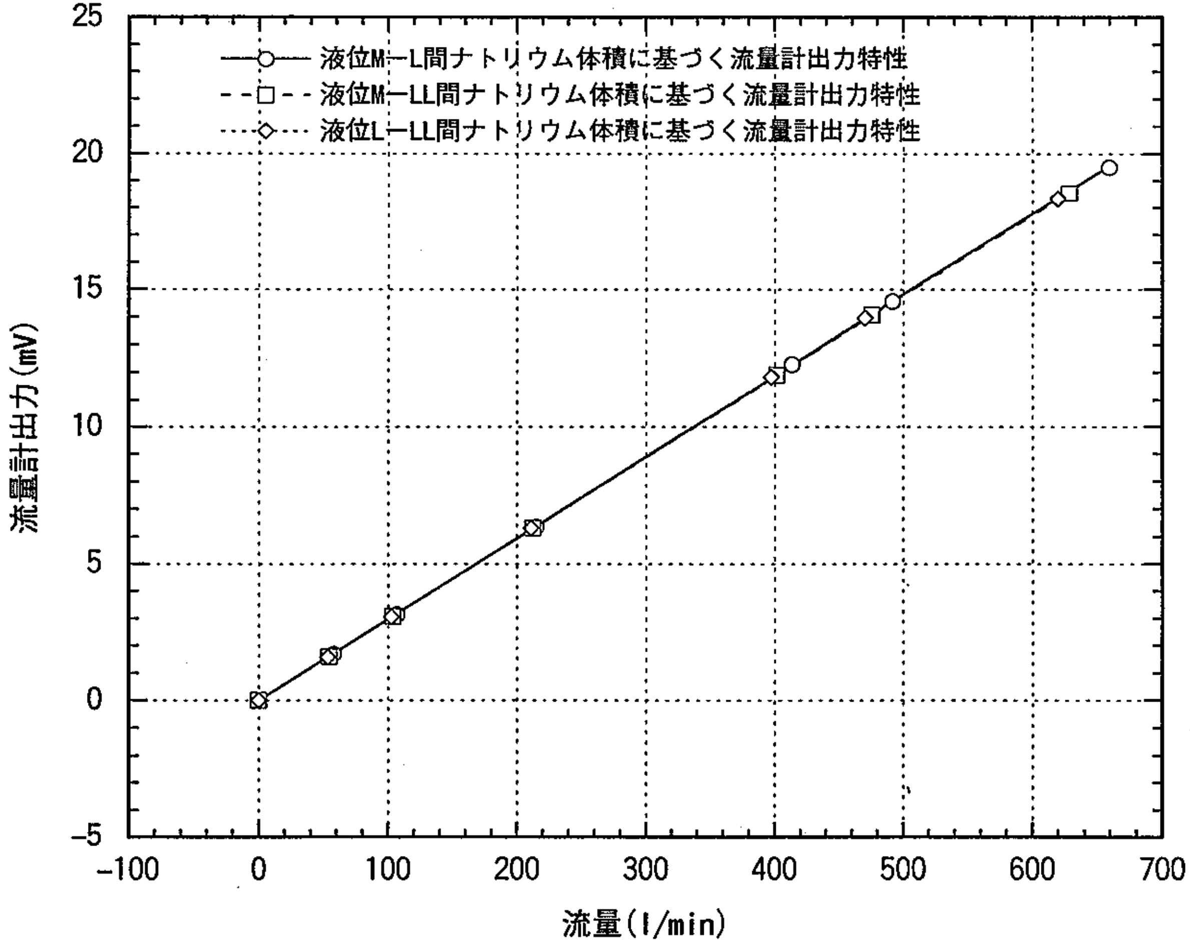


図6－2　炉内電磁流量計出力特性（ナトリウム体積の補正あり）

付録－A　内筒外側アニュラス内ナトリウム液位の推定による落下体積の補正

1．落下体積補正の考え方

CCTL 試験装置に設置した計測試験容器を用いて落下法による流量計の絶対校正を行う場合、落下体積を求める際に容器内のアニュラス部の存在を考慮する必要がある。Fig. A1 に計測試験容器および試験ループの概念を示す。試験容器には、下部に入口配管が3系統あり、出口は容器の側面に2系統ある。落下法による流量計校正以外の試験では、入口配管よりナトリウムを試験容器に流入させ、試験を行う。出口配管が2カ所しかないことから試験容器内の流れが周方向に偏ることで試験に影響が生じないよう試験容器には内筒が設けられ、内筒を乗り越えてから出口配管に向かうよう設計されている。しかし、内筒と試験容器壁に囲まれたアニュラス部は出口配管より下方に容積を有し、この部分のナトリウムをドレンする必要から周方向に1カ所だけドレン孔を設けている。落下法による流量計校正を行う場合、レベル計の M 位置より上方に初期液位をおき、出口配管はバルブにより閉止した上で落下開始バルブを”望む流量がでる開度”まで開くことにより試験容器内のナトリウムがダンプタンクに向かって落下する。試験容器内の液面は内筒の上端を下回る時点でアニュラス部と内筒の内側の2カ所に形成される。落下流量が多い場合、内筒の内側は液位が速く低下する。一方、アニュラス部はドレン孔での流動抵抗が大きいことからゆっくりと液位が低下する。内筒の内側の液位がレベル計の LL 位置にきた時点で試験は終了となる。このとき落下体積はレベル計の M－LL 間の体積となるが、アニュラス部に残ったナトリウムの体積を除く必要がある。

アニュラス部に残る体積は全体の落下流量が多い場合には多くなり、落下流量が少ない場合にはアニュラス部の液位低下が内筒の内側の液位に追いつき易いことからアニュラス部内のナトリウム量は少なくなる。従ってアニュラス内部の残留ナトリウムの体積は落下流量に依存して変わることになり、その相関を求めることで落下体積を補正することが可能になる。但し、M-LL 間の全ナトリウム体積に対してアニュラス部の全体積は 2.4%であり、補正量は 2.4%以下である。校正精度を確保する上で、2.4%は小さい数字ではないことから先の相関関係を求める必要がある。

2．アニュラス内液位の推定

ここではフローネットワークモデルを用いた解析によりアニュラス内の液位および内筒内の液位、落下流量の変化を求め、平均の落下流量と内筒内の液位が LL 位置に到達したときのアニュラス内液位の関係を得ることとした。解析には長期崩壊熱除去評価用ネットワークコード LEDHER を用いた。Fig. A2 にフローネットワークモデルを示す。アニュラス内の液位を L_1、内筒の内側の液位を L_2、ダンプタンク内の液位を L_3 としている。アニュラス部

の下端にあるドレン孔の流動抵抗は形状損失係数 K_1 によりモデル化する。アニュラス部の液位を例に基礎式を示す。

$$P_1 = Pg_1 + \rho \cdot g \cdot L_1$$

$$W_1 = \rho \cdot A_1 \cdot \frac{dL_1}{dt}$$

$$P_1 - P_3 = \frac{1}{2} \frac{K_1 \cdot W_1^2}{\rho \cdot A_{pipe}^2} - \rho \cdot g(H_1 - H_3)$$

このような方程式を各流路および液面について連立させて解くことにより各液位、流量の過渡変化を計算することができる。ここで Pg はガス圧力であるが、解析では試験容器、ダンプタンク内ともに大気圧で一定とした。実際の試験では Fig. A1 に示すように試験容器内のガス空間はダンプタンクのそれとガス系配管により連通されており、ガス流路の流動抵抗により両者のガス圧力には差が生じる。しかし、本節で求めようとしている流量と２つの液位の関係には大きな影響はない。

CCTL 装置、計測試験容器の形状データに基づき、ある流量で落下させた場合のアニュラス部、内筒の内側の液位、合計の落下流量（W3 に相当）の解析例を Fig. A3 に示す。図中には後述するドレン孔のオリフィスとしての形状損失係数をパラメータとして液位を示しており、K=1.1 を標準とする。図からわかるように液位が内筒の上端に達した時点で液面が２つに分かれ、アニュラス側の液位は遅れて低下する。内筒の内側の液位が LL 位置に達した時点でのアニュラス側の液位をグラフより求めることができる。このような解析を Fig. A2 中の流動抵抗係数 K_3 をパラメータとして実施することにより、M−LL 間落下流量の時間平均値とアニュラス内残留液位の関係を求めた。得られた相関を Fig. A4 に示す。これから図に示す相関式を求めた。本相関式をもとに、アニュラス部を含め全量が落下したとして求めた落下流量（補正量は 2.4%以下と保証されている）に対するアニュラス内残留ナトリウムの体積を求め、これにより落下流量を補正した。

本解析における誤差を定量化する。解析における誤差の主たる要因はアニュラス部下端のドレン孔の流動抵抗係数の評価誤差となる。この他、時間刻み幅の影響等が考えられるが、ここでは十分短い刻み幅（1ms）とすることでその影響は無視できると考える。オリフィスの流動抵抗係数はオリフィスの面取り量に大きく依存し、面取りが十分になされていると形状損失係数は 1.0 に近づく。製作時の図面よりオリフィスには直径 6mm の孔径に対して 0.4～0.5mm の面取りがなされている。そこで、オリフィスの形状損失係数として 1.1 を用いた。解析の誤差幅としてオリフィスの形状損失係数を面取り量が非常に大きい場合の最低値として 1.0 ならびに面取りがされていない場合の最大として 1.5 とした場合の液位変化を求め、図にオーバープロットした。試験条件範囲での最低流量（50l/min、流量が低いほどアニュラス部の液位は大きく低下し、抵抗係数による差が大きくなる）におけるアニュラス内

液位を最確評価での値と比較すると、形状損失係数を 1.5 とした場合との差は 27mm で、解析における液位推定の最大誤差はアニュラス部深さ 39cm に対して 3cm 程度と評価できる。

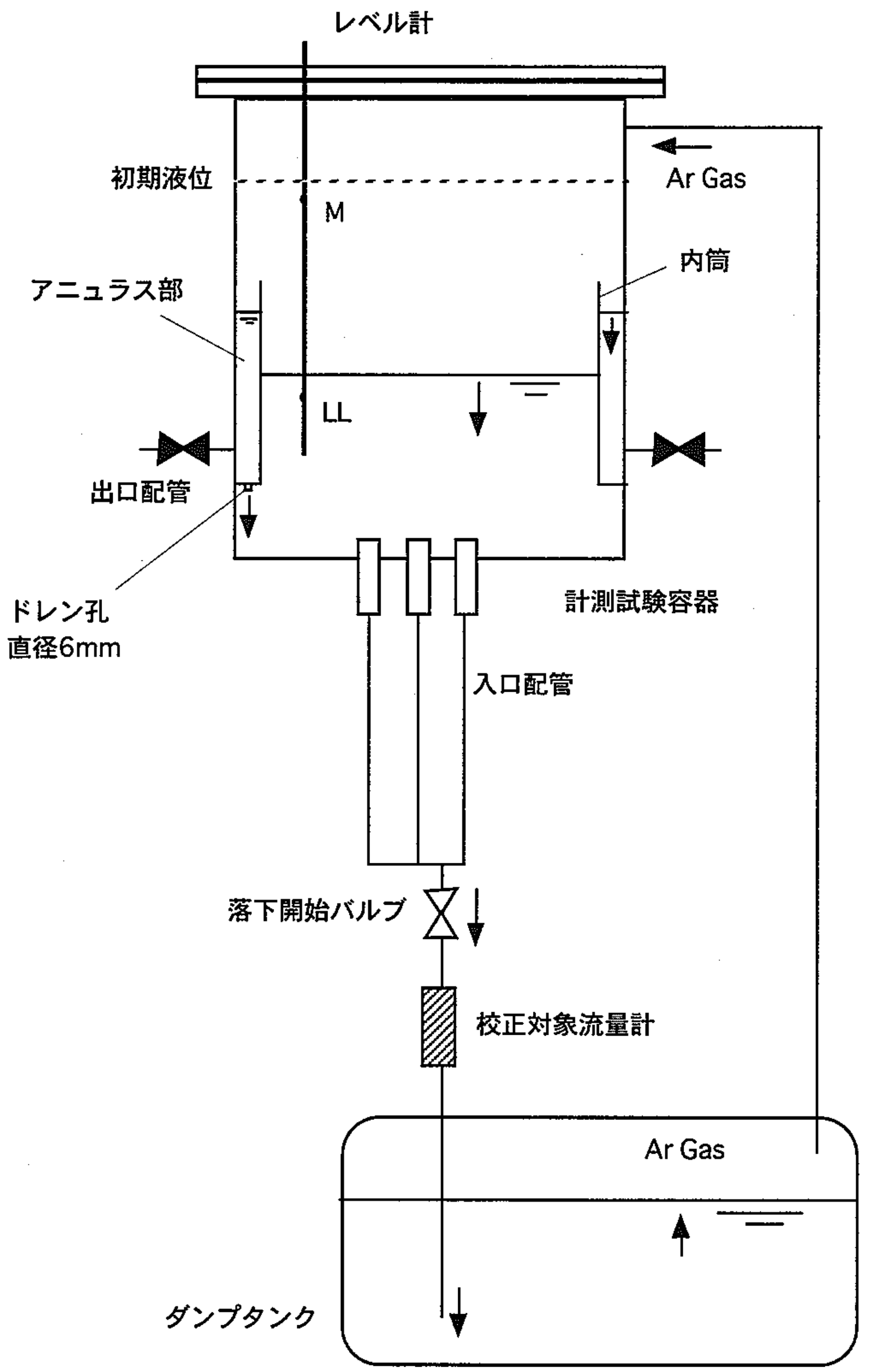


Fig. A1 CCTL test tank and loop configuration

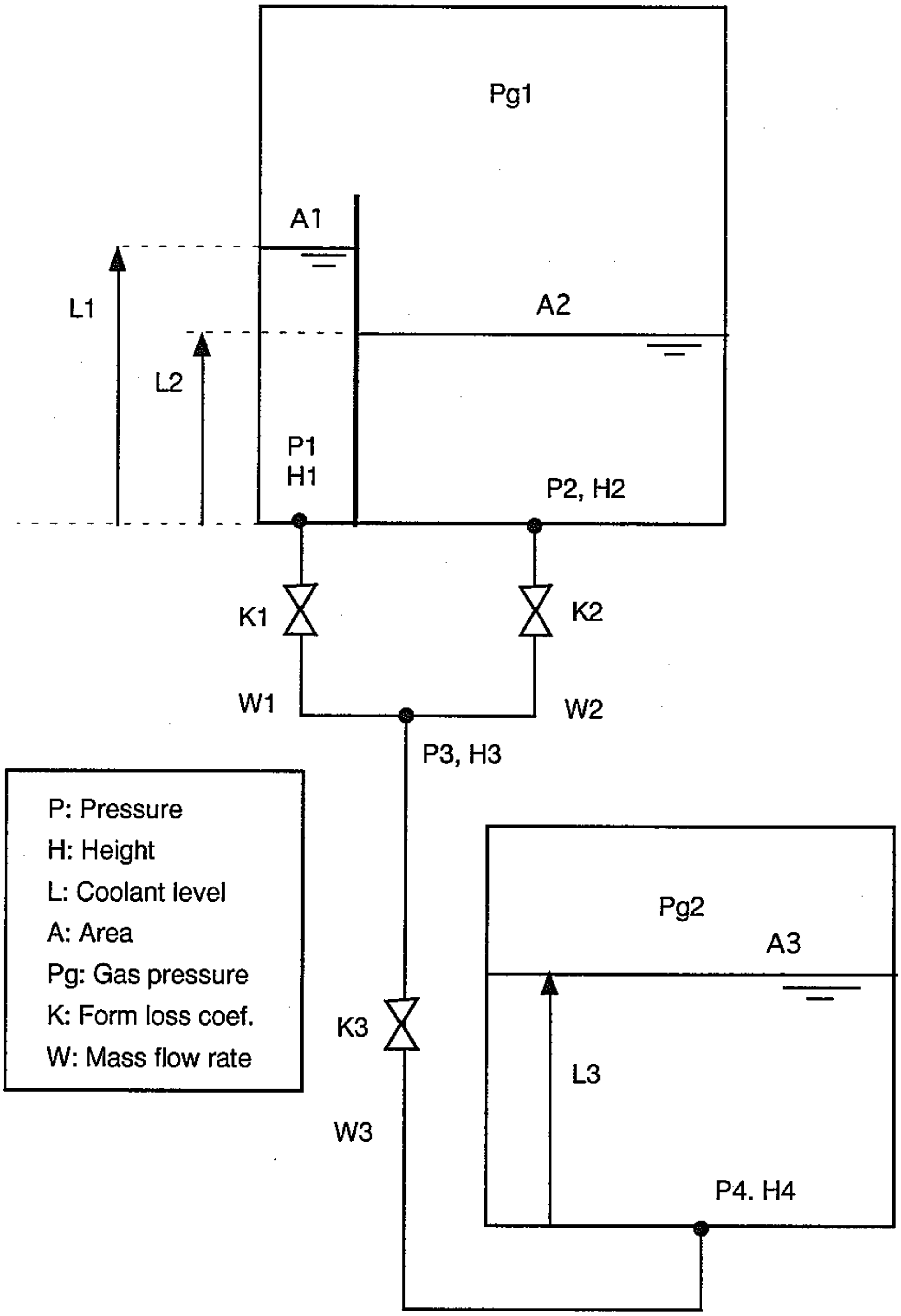


Fig. A2 Network model of CCTL loop

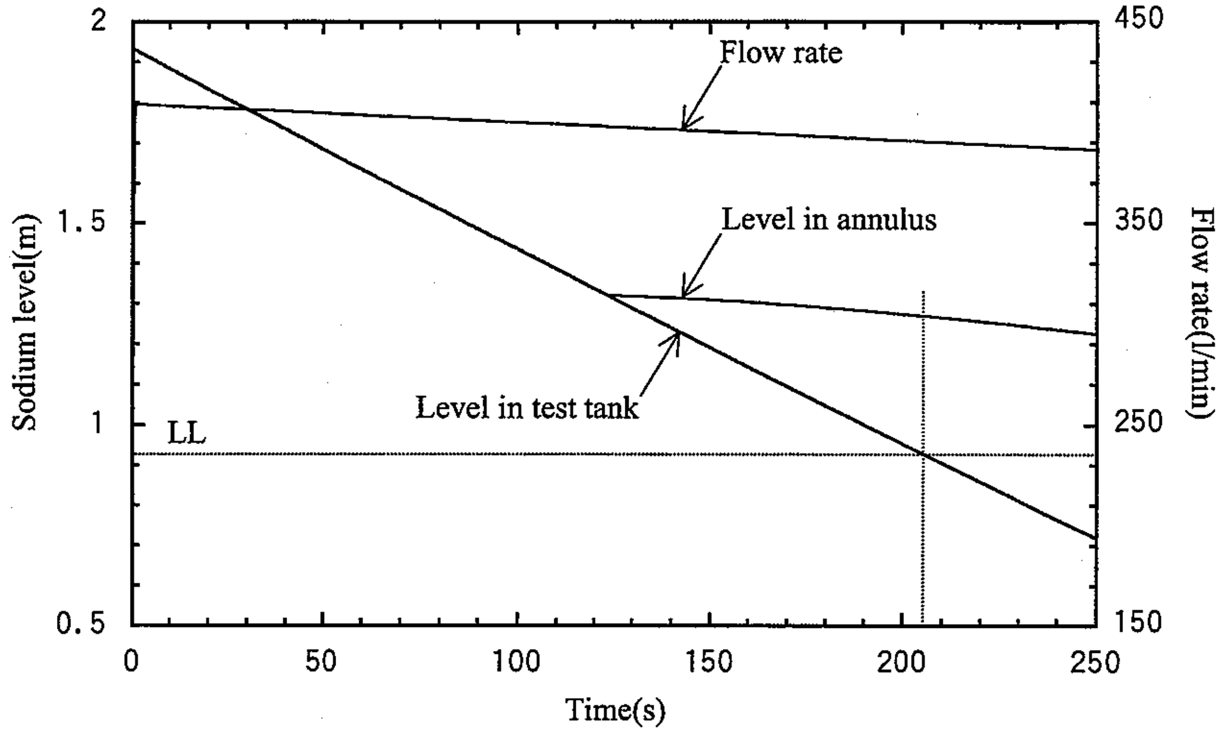


Fig. A3 Trend of sodium level and flow rate

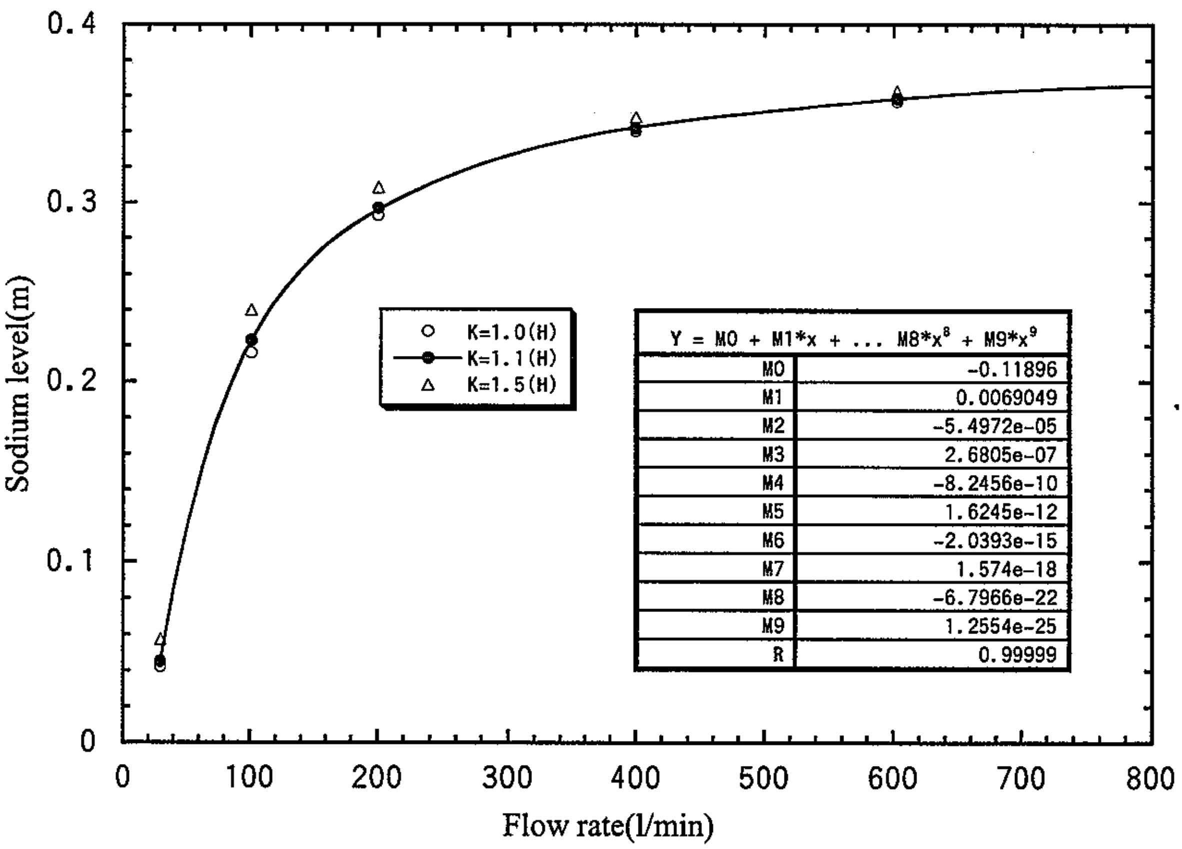


Fig. A4 Correlation between sodium level in the annulus and flow rate