JAEA-Technology
2014-047

STACY（定常臨界実験装置）施設の更新に係るモックアップ試験（給水停止スイッチ水面検知器の精度検証）

Mock-up Test of the Modified STACY
(Accuracy Verification of Water-feed-stop Switch Detector)

関 真和　井澤 一彦　曽野 浩樹

Masakazu SEKI, Kazuhiko IZAWA and Hiroki SONO

福島研究開発部門
原子力科学研究所
福島技術開発試験部

Department of Fukushima Technology Development
Nuclear Science Research Institute
Sector of Fukushima Research and Development

March 2015

Japan Atomic Energy Agency　日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ（http://www.jaea.go.jp）
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2 番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2015

JAEA-Technology 2014-047

STACY（定常臨界実験装置）施設の更新に係るモックアップ試験
（給水停止スイッチ水面検知器の精度検証）

日本原子力研究開発機構　福島研究開発部門　原子力科学研究所
福島技術開発試験部

関　真和、井澤　一彦、曽野　浩樹

(2014 年 12 月 15 日　受理)

原子力機構では、溶液燃料を用いる STACY（定常臨界実験装置）施設を「棒状燃料と軽水減速材を用いる熱中性子炉用臨界実験装置」に更新する計画を進めている。STACY 更新炉の反応度制御は、現行 STACY と同様に、炉心タンクへの給水量を調整する水位制御方式を採用する。この軽水（脱塩水）の水位制御における水面検知に関し、現行 STACY（ウラン硝酸水溶液）で使用している電気伝導率変化検知式が使用できないため、浮力による水面検知式のフロートスイッチを採用する。STACY 更新炉の安全運転のためには、その水面検知位置は、全水温範囲においても正確かつ確実に作動する必要がある。本書では、STACY 更新炉の軽水使用温度範囲（常温～70℃）におけるフロートスイッチ水面検知精度検証試験について報告する。

原子力科学研究所：〒319-1195　茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

JAEA-Technology 2014-047

Mock-up Test of the Modified STACY
(Accuracy Verification of Water-feed-stop Switch Detector)

Masakazu SEKI, Kazuhiko IZAWA and Hiroki SONO

Department of Fukushima Technology Development
Nuclear Science Research Institute
Sector of Fukushima Research and Development
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki

(Received December 15, 2014)

The Japan Atomic Energy Agency is conducting a reactor modification project of the Static Experiment Critical Facility (STACY). In the modification, STACY is to be converted from a thermal reactor using solution fuel into that using fuel rods and light water moderator. Reactivity of the modified STACY is controlled by the water level fed in the core tank as well as the present STACY. Regarding water level detection, however, a float-type water-feed-stop switch is adopted in the modified STACY because the electro-conductivity-type switch of the present STACY for uranyl nitrate solution cannot detect demineralized water used in the modified STACY. For safety operation of the modified STACY, the float-type switch needs accurate and reliable detection of water level at any temperature. This report describes a mock-up test on accuracy verification of the float-type water-feed-stop switch in whole range of water temperature (room temperature ~ 70 degrees Celsius) in the modified STACY operation.

Keywords : STACY, Critical Facility, Reactor Modification, Float-type Switch, Water-level Detection, Mock-up Test, Accuracy Verification

目　次

1.　はじめに 1
1.1.　STACY 更新の目的 1
1.2.　モックアップ試験 1
1.3.　本報告書の構成 1
2.　STACY 更新炉の概要 2
2.1.　STACY 更新炉の主要設備 2
2.1.1.　炉心 2
2.1.2.　給排水系 2
2.1.3.　プロセス計装 3
2.2.　STACY 更新炉の運転の流れ 3
3.　フロートスイッチの水面検知精度検証試験 5
3.1.　フロートスイッチの水面検知精度検証試験の必要性 5
3.2.　水位スイッチ精度確認試験装置 5
3.3.　水面検知精度確認試験 6
3.3.1.　繰り返し水面検知位置の精度確認 6
3.3.2.　水温変化時の水面検知位置変化量の確認 7
3.4.　フロートスイッチの水面検知精度の評価 8
4.　まとめ 9
4.1.　試験結果のまとめ 9
4.2.　今後の課題 10
謝 辞 10

Contents

1. Introduction ---- 1
1.1 Objective of the STACY modification ---- 1
1.2 Mock-up test ---- 1
1.3 Structure of this report ---- 1
2. Outline of the modified STACY ---- 2
2.1 Major equipment ---- 2
2.1.1 Core ---- 2
2.1.2 Water feed and drain system ---- 2
2.1.3 Process instrumentation ---- 3
2.2 Operation procedure of the modified STACY ---- 3
3. Accuracy verification test on water detection of the float-type switch ---- 5
3.1 The need for accuracy verification of the float-type switch ---- 5
3.2 Testing device of float-type switch ---- 5
3.3 Accuracy verification test ---- 6
3.3.1 Repeatability test of water detection ---- 6
3.3.2 Accuracy evaluation during water temperature change ---- 7
3.4 Accuracy evaluation of float-type switch ---- 8
4. Summary ---- 9
4.1 Results of accuracy verification test ---- 9
4.2 Future tasks ---- 10
Acknowledgments ---- 10

1. はじめに

1.1. STACY 更新の目的

独立行政法人日本原子力研究開発機構（以下「原子力機構」という。）原子力科学研究所に設置されている定常臨界実験装置 STACY（Static Experiment Critical Facility）は、再処理施設等で取り扱われる溶液状核燃料（以下「溶液燃料」という。）に関する臨界安全基礎データの取得を目的とした臨界実験装置（以下「現行 STACY」という。）である。原子力機構では、この現行 STACY を「溶液燃料を用いる臨界実験装置」から「棒状燃料及び軽水減速材を用いる熱中性子炉用臨界実験装置」に更新（以下、更新後の STACY を「STACY 更新炉」という。）する計画を平成 22 年から進めている。STACY 更新炉は、原子力施設の臨界基礎データの取得、核燃料サイクル施設に係る臨界安全データベースの確立等を目的とする。当面の間の研究対象として、東京電力（株）福島第一原子力発電所の廃炉（とりわけ破損燃料の取出し等に係る臨界管理技術）に関する技術開発に供する予定である。

1.2. モックアップ試験

STACY 更新に係る原子炉設置変更許可申請（平成 23 年 2 月 10 日申請）において規制当局による安全審査を受けるにあたり、設計仕様に係る成立性等を確認するため、原子力機構では平成 24 年度から各種モックアップ試験を実施している。モックアップ試験とは、実機と同型・同規模・同性能の試験装置を用いて、実機製作前にその性能等を検証する試験をいう。STACY 更新炉のモックアップ試験では、反応度制御の成立性や運転上重要なプロセス量の計測精度について様々な試験データを取得している。

STACY 更新炉のモックアップ試験は、以下の 4 つの項目に大別される。

(1) 給排水系モックアップ試験
(2) プロセス計装モックアップ試験
(3) 安全板装置モックアップ試験
(4) その他機器のモックアップ試験

本報告は、(2) プロセス計装モックアップ試験のうち、運転管理上重要なプロセスデータの一つである給水停止スイッチの水面検知器（フロートスイッチ）の水面検知精度について検証するものである。

1.3. 本報告書の構成

以下、第 2 章では、STACY 更新炉の概要について、第 3 章では、フロートスイッチの水面検知精度検証試験について、第 4 章では、本検証試験で得られた成果を基にフロートスイッチの計測精度を総括し、給水停止スイッチの水面検知精度の見通しについて報告する。

2. STACY 更新炉の概要

本章では、STACY 更新炉の主要設備（第 2.1 節）及び STACY 更新炉の運転の流れ（第 2.2 節）について述べる。

2.1. STACY 更新炉の主要設備

STACY 更新炉は、運転制御に関連する主な設備として、炉心、給排水系、安全板装置、プロセス計装設備等から構成される。STACY 更新炉の概略系統図を図 1 に、STACY 更新炉の主要仕様を表 1 に示す。

以下では、炉心及び給排水系と水位制御に係るプロセス計装設備の主な仕様について解説する。

2.1.1. 炉心

STACY 更新炉の炉心は、棒状燃料と軽水減速材で形成される。棒状燃料は、外径約 9.5mm、長さ約 150cm の筒状ジルカロイ製の被覆管内にウラン酸化物ペレットを充填した燃料棒である。この棒状燃料は、直径約 180cm、高さ約 190cm の円筒形状の炉心タンク内に設置された格子板により支持され、所定の格子間隔（1.09～2.55cm 間隔）をもって配列される。STACY 更新炉では、この格子間隔を変化させることで、減速材対燃料ペレット体積比を変化させ、炉心の核特性を変化させることができる。軽水は、地階に設置されたダンプ槽から遠心ポンプによって炉心タンクに給水し、炉心タンク水位を調整することで反応度を制御する。炉心タンクの概略図を図 2 に示す。

2.1.2. 給排水系

給排水系は、給水系及び排水系並びにダンプ槽で構成され、その配管は炉心タンクの底面で接続されている。給水系は、給水流量に応じて、高速給水系と低速給水系がある。両系統は、給水ポンプ、吐出弁、流量調整弁、バイパス系等で構成され、ダンプ槽に貯留した軽水を炉心タンクに給水する。給水系は、炉心タンクに給水することにより、炉心タンクに正の反応度を添加する。このとき、臨界水位（事前解析等による予想された水位）の 4 分の 3 の水位までは高速給水系（最大 380 ℓ/min）を用い、臨界近傍では反応度添加率を制限するため低速給水系（最大 150 ℓ/min）を用いる。

排水系は、急速排水弁、通常排水弁等で構成される。排水弁を開とすることで、炉心タンクに給水した軽水を自由落下によりダンプ槽に排水し、負の反応度を添加する。このとき、急速排水弁は、原子炉を緊急停止させるスクラム信号を受信すると 1 秒以内に開となり、原子炉を速やかに停止に導く。また、急速排水弁は、同弁の動力源や制御信号が断たれた場合にもスプリング反力により自動開となるフェイルセーフ機構となっている。

ダンプ槽は、炉心タンクへの給水及び排水に用いる軽水を貯留するためのタンクであり、約 6 m^3 の貯留能力を有している。

2.1.3. プロセス計装

プロセス計装とは、原子炉運転時のプロセスデータ（炉心水位、炉心水温、給水流量等）を計測する機器のことを言い、給排水系の水位制御に関する機器には給水停止スイッチ、排水開始スイッチ、最大給水制限スイッチ、サーボ型水位計がある。

給水停止スイッチは、給水系から炉心タンクへの供給量を制限するための装置である。給水停止スイッチは、炉心タンク内を上下する駆動軸、駆動軸を上下させるためのネジ軸及びネジ軸を回転させるための電動機、炉心タンク水面を検知するフロートスイッチ等で構成される。フロートスイッチは、駆動軸の先端に装備されている。給水停止スイッチによる給水量の制限は、あらかじめ目標とする炉心水位に水面検知器を設定し、給水により水面が設定水位に到達すると水面検知器が作動して給水停止信号が発信されることで行われる。給水停止スイッチの概略図を図 3 に示す。

排水開始スイッチは、給水停止スイッチと同じ駆動軸の上方に設置され、給水停止スイッチと同じフロートスイッチが使用される。排水開始スイッチは、地震等により炉心タンク水面が揺動などにより給水停止スイッチの設定水位を超えて水面が上昇した場合に排水開始（排水弁開）信号を発信することで、炉心タンク内の軽水を自動排水させる。

最大給水制限スイッチは、給水停止スイッチ及び排水開始スイッチの故障を想定し、いかなる場合でも炉心の最大過剰反応度を 80 セント以下に制限する水位に設定される。最大給水制限スイッチに水位が到達しその水面検知器が作動した場合には、スクラム信号が発信され、原子炉の緊急停止動作（給水の停止及び排水開始、安全板の炉心挿入）が行われる。最大給水制限スイッチについても水面検出器は給水停止スイッチと同じフロートスイッチが使用される。

サーボ型水位計は、炉心タンクに供給される水位の連続監視及び給水停止後の静止水面の高さ計測を行うための水位計である。

2.2. STACY 更新炉の運転の流れ

STACY 更新炉は、前節で述べたとおり、炉心タンクに給水する軽水減速材の水位高さを調整することによって臨界近接及び反応度制御を行う原子炉である。STACY 更新炉の運転手順は、以下のとおりである。

① 原子炉の起動準備

炉心タンクに給水する前に、給水停止スイッチを無限平板体系の最小推定臨界下限値（棒状燃料ミート部下限を水位 0mm として水位 40mm）の位置に設定する。次に、原子炉の緊急停止に備え、安全板を炉心タンク上部に引き上げ、挿入待機させる。その後、給水準備として通常排水弁及び急速排水弁を開、給水吐出弁及び流量調整弁を閉の状態で給水ポンプを起動し、バイパスラインによる循環運転を行う。次に、通常排水弁及び急速排水弁を閉、給水吐出弁及び流量調整弁を開とすることで炉心タンクに軽水を給水する。

② 炉心タンクへの給水による臨界近接

炉心タンクの水位が給水停止スイッチの設定水位に到達すると、給水停止スイッチから給水吐出弁及び流量調整弁に閉止信号が発信され、両弁が閉止となることで炉心タンクへの給水が停止する。このとき、給水ポンプは停止せず、バイパスラインによる循環運転となる。その水位にて中性子逆増倍率の測定を行って臨界水位を予想する。その後、給水停止スイッチを次の設定水位まで上昇させ、再び炉心タンクに給水する。予想臨界水位の 4 分の 3 までは高速ポンプによる高速給水を行い、それ以降は低速ポンプによる低速給水を行う。

このように、炉心タンクへの段階的な給水と中性子逆増倍率の測定を繰り返し、原子炉を臨界状態とする。臨界到達後、サーボ型水位計による水位計測等、必要な計測を行う。

炉心タンクへの段階的給水手順の概要を図 4 に示す。

③ 原子炉の停止

運転終了時は、通常排水弁及び急速排水弁を開とし、炉心タンクに給水した軽水をダンプ槽に排水する。ダンプ槽に軽水が全量排水されたことを確認した後、安全板を炉心タンク内に挿入し、原子炉を停止する。

④ 原子炉の緊急停止

給水停止スイッチの故障等により給水が継続され、炉心タンク水位が異常上昇した場合には、まず、給水停止スイッチより上方に設置された排水開始スイッチが作動し、排水開始インターロックが発信される。排水開始インターロック信号により、急速排水弁及び通常排水弁が開となり炉心タンク内の軽水が排水される。また、排水開始スイッチが作動しない場合、さらに上方に設置された最大給水制限スイッチが作動し、スクラム信号が発信される。このスクラム信号により、急速排水弁及び通常排水弁が開となり炉心タンクに給水した軽水が急速に排水されるとともに、安全板が炉心タンク内に挿入されることで、原子炉は緊急停止となる。

3. フロートスイッチの水面検知精度検証試験

本章では、STACY 更新炉の全水温範囲における給水停止スイッチ（フロートスイッチ）の水面検知精度を検証する。以下では、はじめに、フロートスイッチの水面検知精度検証試験の必要性（第 3.1 節）について概説し、フロートスイッチの水面検知精度検証試験を実施するために製作した水位スイッチ精度確認試験装置（第 3.2 節）について説明する。次に、フロートスイッチの精度確認試験として実施した計測試験とその結果（第 3.3 節）について述べる。

3.1. フロートスイッチの水面検知精度検証試験の必要性

STACY 更新炉で使用する軽水は電気伝導率の低い脱塩水であるため、現行 STACY で採用されてきた電気伝導率変化式の水面検知器（精度±0.2mm）が使用できない。このため、それに代わる水面検知器として、浮力を利用するフロートスイッチを採用する。しかし、フロートスイッチの水面検知精度が、STACY 更新炉の全水温範囲（常温～70℃）においてどの程度となるか不明であるため、フロートスイッチの水面検知精度検証試験を行う必要がある。

本検証試験では、フロートスイッチの水面検知精度として±0.5mm 以下を目標とする。これは、安全評価（事故シナリオ）上、給水停止スイッチの計測精度を±1.5mm としているためであり、そのうち給水停止スイッチ駆動軸の伸縮等を含めた位置設定精度を±1.0mm、フロートスイッチによる水面検知精度を±0.5mm と見込んでいることによる。

3.2. 水位スイッチ精度確認試験装置

水位スイッチ精度確認試験装置は、図 5 に示すとおり、駆動モーター、ネジ軸、ヒーティングバス（恒温槽）、フロートスイッチ、レーザー変位計、温度計等で構成されている。水位スイッチ部は、実機と同様に、駆動モーターが回転することでネジ軸が回転し、ネジ軸に接続されたフロートスイッチがモーターの回転に伴い上下する機構となっている。また、フロートスイッチが下降し、水面に達するとフロート（実機と同材質の SUS316）が作動し、水面検知信号を発する。その検知信号を駆動モーターが受信することで下降が停止するよう制御される。このとき、人的誤差を極力少なくし、より精度の高い正確な検証試験とするため、自動制御装置（Programmable Logic Controller、以下「PLC」という。）を採用した。

フロートスイッチの下降及び上昇速度は、駆動モーターの操作電圧に応じて変化させることができる。水位スイッチ精度確認試験装置では水面が一定であるため、フロートスイッチの下降速度が実機給水時の炉心タンク内の水位上昇速度（給水流量）を再現する形態となっている。また、フロートスイッチの上下の移動距離は、駆動モーターから発せられるパルス信号を PLC の高速パルスカウンターで計測することで移動距離に換算する。

その他、測定中の温度変化及び蒸発による水位変化を考慮するため、フロートスイッチとは別にレーザー変位計を用いて水位（水面位置）を正確に測定し、フロートスイッチの検知位置を補正した。

3.3. 水面検知精度確認試験

フロートスイッチの水面検知精度確認試験として、次の２つの計測試験を実施する。

(1) 繰り返し水面検知位置の精度確認

水温とフロートスイッチの移動速度をパラメータとし、水面検知を繰り返したときの水面検知位置のばらつき（再現性）を確認する。

(2) 水温変化時の水面検知位置変化量の確認

水温を徐々に変化させ、全水温範囲（常温～70℃）における水面検知位置の変化量を確認する。

3.3.1. 繰り返し水面検知位置の精度確認

(1) 試験方法及び試験条件

STACY 更新炉の実験においては、1 回の運転の中で水温を変化させることはないが、実験計画に応じて初期水温を常温～70℃の範囲で調整する。また、炉心タンクへの給水流量は、炉心構成及び反応度添加率の制限内で変化させる。このことから、想定される水温と給水流量（給水速度）を組み合わせた条件での水面検知位置のばらつきを確認する。

初期位置の高さからフロートスイッチを下降させ、フロートスイッチが水面を検知するまでの移動距離（パルス数）を計測する。その後、フロートスイッチを初期位置まで戻し、再度計測を行う。試験温度は STACY 更新炉の実験温度範囲が常温～70℃であるため、常温（約 25℃）、50、70℃の 3 点で計測する。また、フロートスイッチの移動速度は、STACY 更新炉の給水流量範囲（最大 380 ℓ/min）を考慮し、0.5mm/s（75 ℓ/min 相当）～2.5mm/s（380 ℓ/min 相当）とし、0.5mm/s 刻みで変化させる。計測回数は、それぞれの移動速度において 20 回とする。

水面検知フローを図 6 に、繰り返し水面検知精度の確認試験フローを図 7 に示す。

(2) 試験結果

水温 3 点での繰り返し水面検知位置の計測結果を図 8 に示す。水温毎のグラフの基準水位（変化量ゼロ点）は、フロートスイッチの移動速度が最も遅い 0.5mm/s 時の計測値の平均とした。

図 8 によると、水温が常温の場合、フロートスイッチの移動速度が変化しても各速度における平均値は基準水位からほとんど変わらない。しかし、水温が高い場合は、移動速度が高速（すなわち実機給水時の水位上昇速度が高速）になるほど基準水位より低い位置（実機給水時では設定した基準水位より高い位置）で検知される傾向があり、その傾向は水温が高いほど大きくなる。水面検知位置が低く（実機給水時の水面検知位置が高く）なる理由は、①水温上昇による水の密度低下（つまり浮力低下）により、フロートの吃水位置が上昇してフロートの始動時期が遅くなるため、②水温上昇による水の粘度低下に加え、フロートスイッチの移動速度（実機給水時の水位上昇速度）に比例して水面検知までのフロートの沈み込みが大きくなるためである。このように、水温及び移動速度の条件により水面検知位置が下方（実機給水時に水面検知位置が上方）に移動する傾向があるものの、各条件において検出位置のばらつきが拡大する傾向は見られない。このことから、フロートスイッチ繰り返し計測精度は、水温及び移動速度

が変わっても大きく変わることはないと言える。このため、各水温における計測値の 3σ（標準偏差σの 3 倍）の最大値をフロートスイッチの繰り返し計測精度（再現性）とする。これらの評価結果を表 2 に示す。

以上の結果から、フロートスイッチの再現性は±0.18mm（水温常温、移動速度 0.5mm/s のときの 3σ）と評価した。

3.3.2. 水温変化時の水面検知位置変化量の確認

(1) 試験方法及び試験条件

STACY 更新炉では、実験計画に応じて水温条件を変更するが、フロートスイッチの材質等を水温（軽水の密度等）に合わせて変更することはない。このため、実験毎に水温が変わった場合における水面検知位置の変化量を確認する。

試験水温は STACY 更新炉の水温範囲である常温（約 25℃）～70℃とするが、試験水温を変化させる方法は 70℃からの自然冷却とする。自然冷却による水温変化としたのは、恒温槽内を加熱すると水中に気泡が発生し、温度変化及び蒸発による水位変化を補正するためのレーザー変位計が正確に計測できなくなるためである。また、フロートスイッチの移動速度（実機給水時の水位上昇速度に相当）は、0.5、1.5、2.5mm/s とする。計測回数は、移動速度により 1 回あたりの計測時間が異なることから、70℃から約 25℃までに冷却される間に計測可能な回数として、0.5mm/s では 200 回、1.5mm/s では 400 回、2.5mm/s では 600 回とする。

水温変化時の水面検知位置変化量の確認試験フローを図 9 に示す。

(2) 試験結果

移動速度 3 点での水温変化時の水面検出位置変化量の計測結果を図 10 に示す。移動速度毎のグラフの基準水位（変化量ゼロ点）は、水温変化が最も緩やかな 25～30℃の計測値の平均とした。この設定は、第 3.3.1 節の結果から、水温が常温付近の場合、フロートスイッチの移動速度が変化してもその水面検知位置の平均値がほとんど変わらないことからも妥当なものである。

図 10 によると、水温が上昇すると基準水位より低い位置（すなわち実機給水時では設定した基準水位より高い位置）で検知される傾向があり、その傾向はフロートスイッチの移動速度が高速なほど大きくなる。これは、第 3.3.1 節の試験結果と同じ傾向であり、その理由も同様である。つまり、①水温上昇による水の密度低下（つまり浮力低下）により、フロートの吃水位置が上昇してフロートの始動時期が遅くなるため、②水温上昇による水の粘度低下に加え、フロートスイッチの移動速度（実機給水時の水位上昇速度）に比例して水面検知までのフロートの沈み込みが大きくなるためである。この結果を基に、水温変化に対する水面検知位置の補正量を評価するため、計測値を 5℃刻みで平均化し、線型一次式による近似曲線を引いたグラフを図 11 に示す。図 11 から、水面検知位置の水温補正係数は、

- 移動速度 0.5mm/s のとき、－0.0025mm/℃
- 移動速度 1.5mm/s のとき、－0.0044mm/℃
- 移動速度 2.5mm/s のとき、－0.0059mm/℃

となる。この結果から、STACY 更新炉の水温範囲である常温（約 25℃）～70℃におけるフロ

ートスイッチの水面検知位置の変化量は、移動速度 2.5mm/s の場合が最大となり、

$$-0.0059\text{mm}/℃ \times (70℃-25℃) = -0.27\text{mm}$$

であると評価できる。

さらに、この水面検知位置の水温補正係数をフロートスイッチ移動速度（実機給水時の水位上昇速度）の線型一次式として近似すると、水面検知位置の補正式は次式で表される。

$$\Delta L = (-0.0017 \times F - 0.0017) \times (T - 25) \qquad (1)$$

ただし、

ΔＬ：水面検知位置の補正量（フロートスイッチ設定位置と水面位置の差）（mm）

Ｆ　：フロートスイッチ移動速度（実機給水時の水位上昇速度）（mm/s）

Ｔ　：水温（℃）

実機給水時にこの補正式を使うことによって、水温変化及び水位上昇速度を考慮した高精度な給水停止操作（水面検知）が可能となる。

3.4.　フロートスイッチの水面検知精度の評価

フロートスイッチの水面検知精度は、第 3.3.1 節で評価した「繰り返し水面検知位置精度」と第 3.3.2 節で評価した「水温変化時の水面検知位置変化量」を合算することで求められる。図 12 に、「繰り返し水面検知位置精度」±0.18mm と「水温変化時の水面検知位置変化量」の近似式に重ねて示す。図 12 から、水面検出位置のプラス側の最大誤差は＋0.18mm、マイナス側の最大誤差は、水温変化及びフロートスイッチ移動速度を考慮した水面検知変化量－0.27mm にマイナス側の繰り返し精度－0.18mm を加えた－0.45mm となる。つまり、STACY 更新炉の全水温範囲におけるフロートスイッチ水面検知位置の精度は、＋0.18mm、－0.45mm である。これに、フロートスイッチの固体差及び水温の常温範囲（下限 20℃）その他の安全裕度を加味し、小数点第 2 位を繰り上げた＋0.2mm、－0.5mm を水面検知精度とする。このうち、マイナス側の誤差に含まれる「水温変化及びフロートスイッチ移動速度に起因する水面検知変化量－0.27mm」は、第 3.3.2 節に示した補正近似式（第(1)式）により補正することが可能であり、その場合、水面検知精度は、±0.2mm（すなわち「繰り返し水面検知位置精度」のみ）となる。

以上の結果から、STACY 更新炉の運転範囲におけるフロートスイッチの水面検知精度は最大でも＋0.2mm、－0.5mm（「水温変化及びフロートスイッチ移動速度に起因する水面検知変化量」を補正した場合で±0.2mm）となり、STACY 更新炉実機において目標とする許容精度±0.5mm 以内となることを確認した。

4. まとめ

原子力機構が進めている STACY 更新計画に関し、STACY 更新炉（棒状燃料及び軽水減速材を用いる熱中性子炉用臨界実験装置）の設計仕様に係る成立性等を確認するため、モックアップ試験を実施してきた。このうち、反応度制御に関する事項として、炉心タンクに給水する軽水減速材の水位制御に用いる「給水停止スイッチ」（フロートスイッチ）の水面検知精度検証試験を実施した。

検証試験では、STACY 更新炉実機の給水停止スイッチと同じ駆動機構を有する水位スイッチ精度確認試験装置を用い、固定水面に対しフロートスイッチを下降駆動させて水面検知位置の計測試験を行った。STACY 更新炉実機の給水時には、あらかじめ設定した給水停止スイッチの水位高さまで水面が到達（フロートスイッチが水面検知）することで給水が停止する機構であることから、フロートスイッチの下降速度が実機給水時の炉心タンク内の水位上昇速度（給水流量）を再現する形態となっている。

以下、試験結果を総括し、今後の課題をまとめる。

4.1. 試験結果のまとめ

フロートスイッチの水面検知精度確認試験として実施した「繰り返し水面検知位置の精度確認試験」及び「水温変化時の水面検知位置変化量の確認試験」の結果、以下の事項が明らかとなった。

(1) フロートスイッチの繰り返し計測精度（再現性）は、水温及びフロートスイッチ移動速度（実機給水時の水位上昇速度に相当）を変化させても大きく変わることはなく、±0.18mm（標準偏差σの 3 倍）である。

(2) 水温の上昇及びフロートスイッチの移動速度（実機給水時の水位上昇速度）の上昇に伴い、基準水位（実際の水位）より低い位置（すなわち実機給水時では設定した基準水位より高い位置）で検知される傾向が見られた。この理由は、①水温上昇による水の密度低下（つまり浮力低下）により、フロートの吃水位置が上昇してフロートの始動時期が遅くなるため、②水温上昇による水の粘度低下に加え、フロートスイッチの移動速度（実機給水時の水位上昇速度）に比例して水面検知までのフロートの沈み込みが大きくなるためである。水温変化及びフロートスイッチ移動速度に対する「水面検知位置の変化量」（フロートスイッチの水面検知位置と実際の水面位置との差）は、STACY 更新炉実機の運転範囲において最大－0.27mm と見積もられた。さらに、この水面検知位置の変化量に関する補正近似式も導出した。実機給水時にその補正近似式を使うことによって、水温変化及び水位上昇速度を考慮した高精度な給水停止操作（水面検知）が可能となる。

(3) 上記 (1) 及び (2) に加え、フロートスイッチの固体差及び水温の常温範囲（下限 20℃）その他の安全裕度を加味した水面検知精度を＋0.2mm、－0.5mm と評価した。このうち、マイナス側の誤差に含まれる「水温及びフロートスイッチ移動速度に起因する変化量－0.27mm」は、補正近似式により補正することが可能であり、その場合、水面検知精度は、±0.2mm（す

なわち上記（1）の繰り返し計測精度に安全裕度を加味したもののみ）となる。

以上のとおり、STACY 更新炉の運転範囲におけるフロートスイッチの水面検知精度は最大でも＋0.2mm、－0.5mm（「水温変化及びフロートスイッチ移動速度に起因する水面検知変化量」を補正した場合で±0.2mm）であり、STACY 更新炉実機において目標とする許容精度±0.5mm 以内となることが確認できた。このことから、本検証試験で採用したフロートスイッチを STACY 更新炉実機の給水停止スイッチの水面検知器に使用しても問題ないことが実証された。

4.2. 今後の課題

本報告では、給水停止スイッチの精度検証試験のうち、フロートスイッチの水面検知精度を確認した。このほか、給水停止スイッチ全体としての水位計測精度検証としては、水温変化時のフロートスイッチ駆動軸の伸縮精度を検証する必要がある。

給水停止スイッチ全体としての水温変化時のフロートスイッチ駆動軸の伸縮確認試験については、今後の STACY 更新炉の詳細設計が確定次第、実施する。温度変化（常温～70℃）に伴う給水停止スイッチ駆動軸の伸縮は避けられないが、その熱膨張による変位量を含めた位置設定精度は±1.0mm 以内と見込んでいる。給水停止スイッチ全体としての計測許容誤差±1.5mm のうち、今回の試験結果から計測フロートスイッチの水面検知精度＋0.2mm、－0.5mm（補正した場合で±0.2 mm）を除いた＋1.3mm、－1.0mm（補正した場合で±1.3mm）の設計余裕が確認できたことから、十分対応可能な見通しである。

謝 辞

本報告書を結ぶにあたり、水位スイッチ精度確認試験装置を製作いただいた電子工業(株)の中込敏雄氏、剱地清正氏に感謝いたします。また、本検証試験を遂行する上でご指導、ご鞭撻とご援助をいただいた臨界技術第１課の方々に感謝の意を表します。

表１　STACY 更新炉の主要仕様

炉心	燃料体	棒状燃料 外径　約 9.5mm、長さ　約 150cm（燃料有効長　約 145cm）、 ウラン重量約 0.8kgU/本 ^{235}U 濃縮度　　10wt%以下 使用可能本数　50 本以上 900 本以下
	炉心 タンク	材質　ステンレス鋼 形状　円筒型 直径　約 180cm、高さ　約 190cm 炉心構成範囲　40cm 以上 140cm 以下※
	格子板 ユニット	材質　ステンレス鋼、アルミニウム合金又はジルコニウム合金 格子板　上、中、下 3 段組
給排水系	給水系	最大給水流量：高速系：380 ℓ/min 以下 低速系：150 ℓ/min 以下 給水吐出弁、流量調整弁：スプリング反力駆動型 （スクラム信号発生後 1 秒以内に作動）
	排水系	急速排水弁、通常排水弁：スプリング反力駆動型 （スクラム信号発生後 1 秒以内に作動）
	ダンプ槽	材質　ステンレス鋼 容量　約 6m^3
安全板 装置	安全板 駆動装置	材質　ステンレス鋼又はアルミニウム合金 駆動ストローク　約 150cm
	安全板	材質　被覆材　ステンレス鋼 充填剤　カドミウム 寸法　幅 20cm 以上 又は 約 10cm、長さ　約 150cm
プロセス 計装	給水停止スイッチ （排水開始スイッチ）	水面検知器　フロートスイッチ 設定範囲：0～1400mm※
	最大給水停止スイッチ	水面検知器　フロートスイッチ 最大設定位置：1450mm※
	サーボ型水位計	計測範囲　－100～1500mm※

※　棒状燃料ミート部下限をゼロとする。

表 2　温度毎の繰り返し計測の評価結果

試験温度 (℃)	駆動速度 (mm/s)	平均値 (mm)	標準偏差 3σ
23	0.5	0.00	**0.18**
23	1.0	−0.01	0.15
23	1.5	0.02	0.11
23	2.0	0.01	0.13
23	2.5	0.02	0.13

試験温度 (℃)	駆動速度 (mm/s)	平均値 (mm)	標準偏差 3σ
50	0.5	0.00	0.16
50	1.0	−0.02	0.10
50	1.5	−0.04	0.10
50	2.0	−0.05	0.07
50	2.5	−0.06	0.10

試験温度 (℃)	駆動速度 (mm/s)	平均値 (mm)	標準偏差 3σ
70	0.5	0.00	0.11
70	1.0	−0.04	0.08
70	1.5	−0.08	0.09
70	2.0	−0.12	0.09
70	2.5	−0.15	0.07

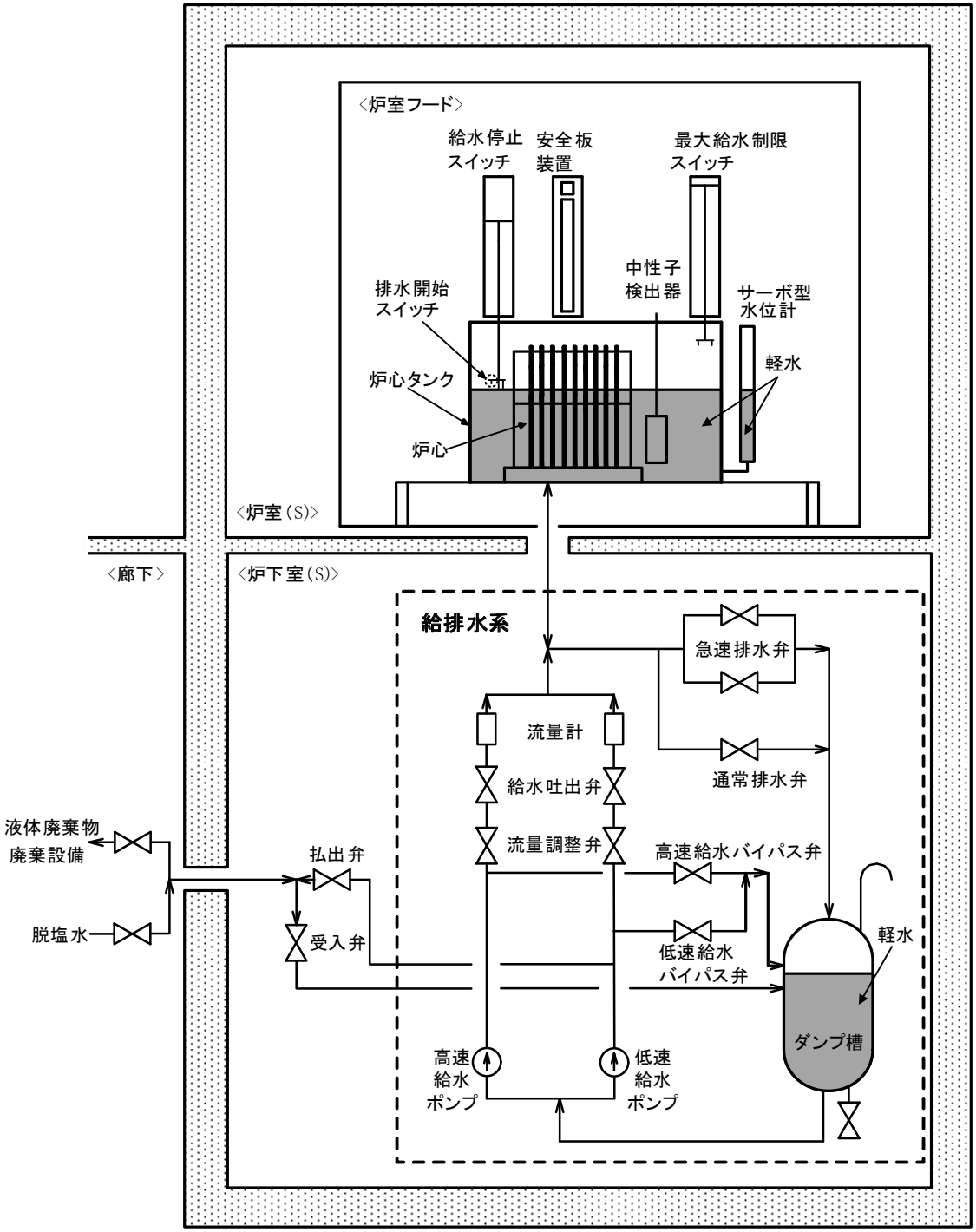


図 1　STACY 更新炉の概略系統図

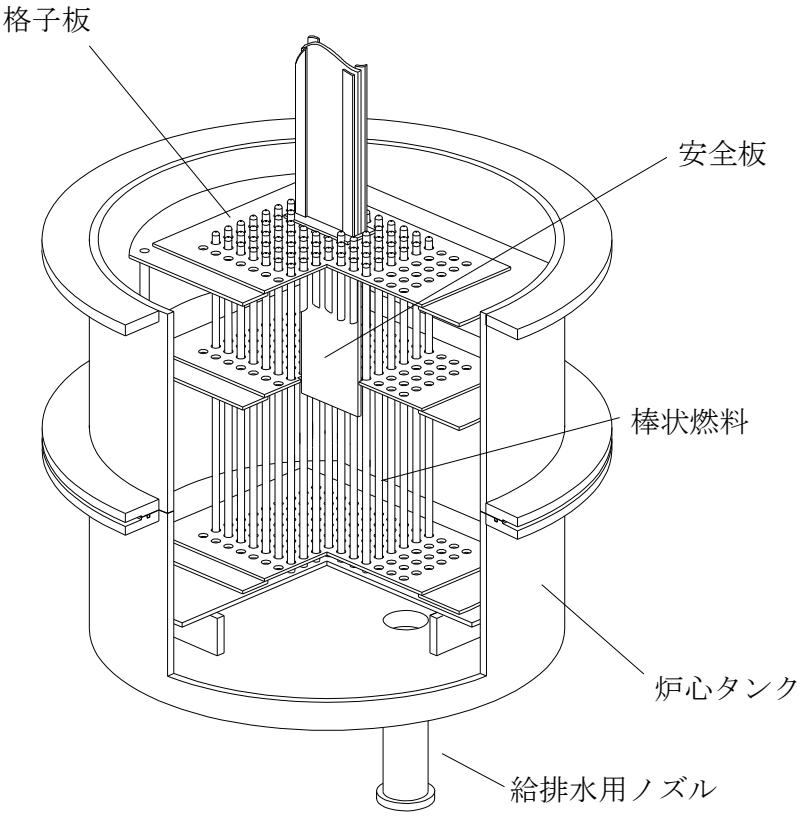


図２　炉心タンクの概略図

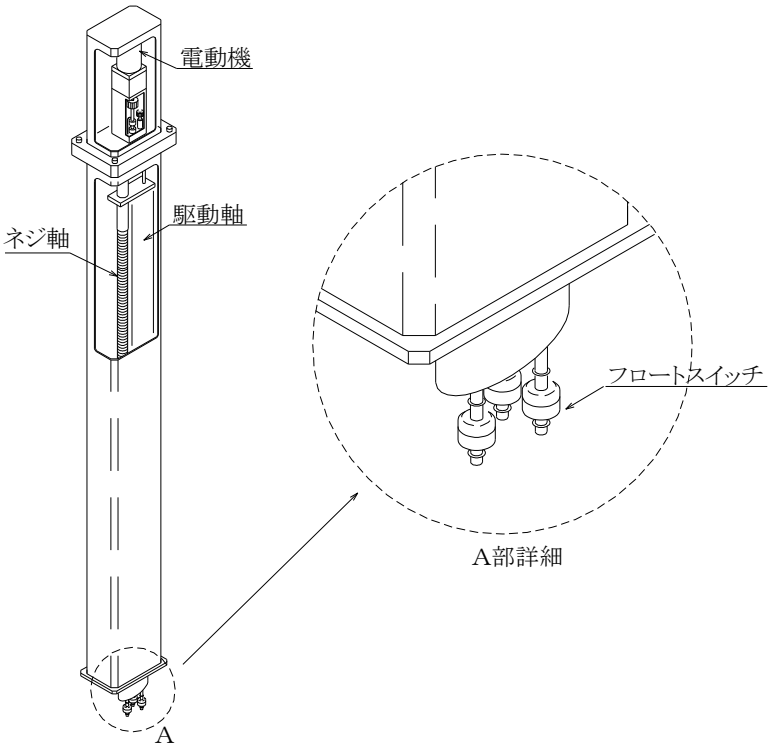


図３　給水停止スイッチの概略図

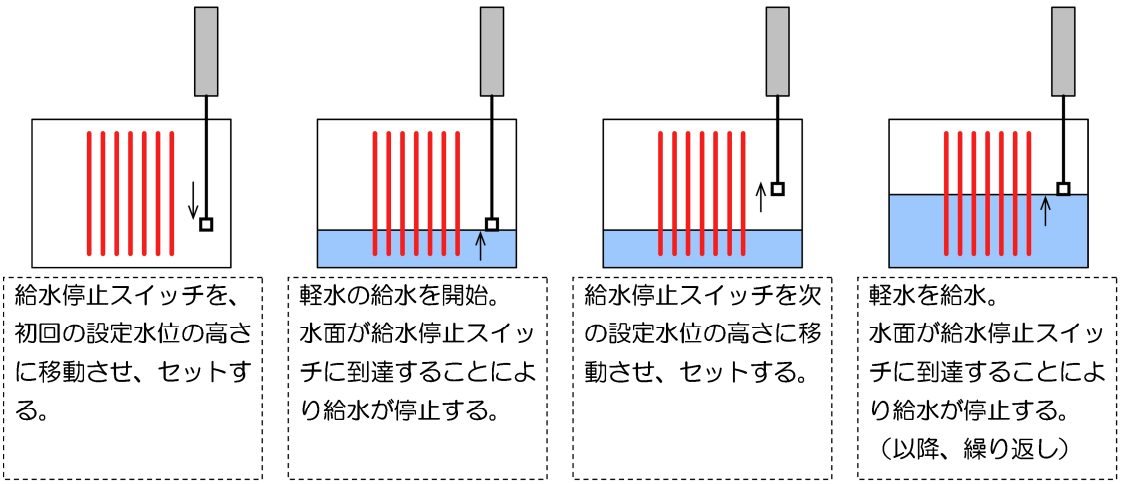


図 4　炉心タンクへの段階的給水手順の概要

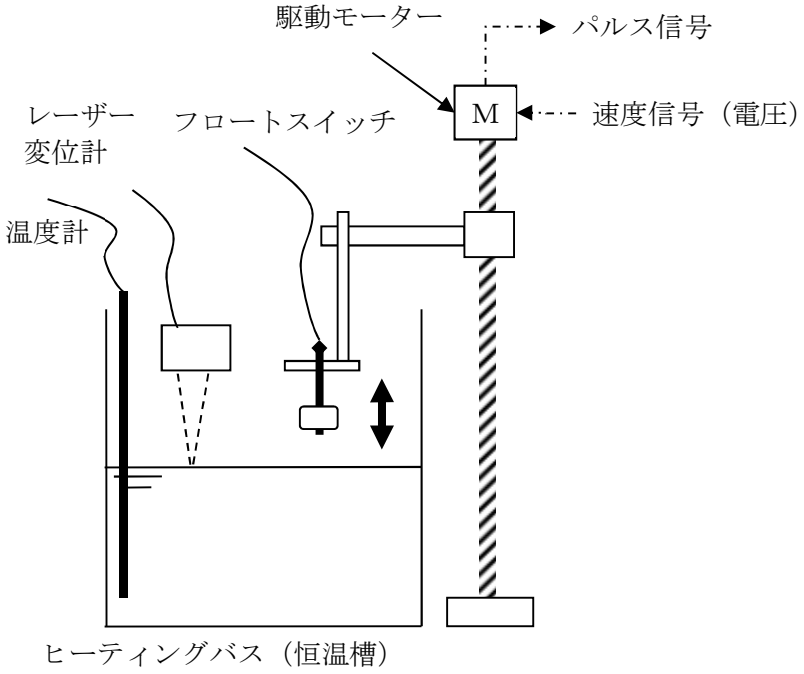
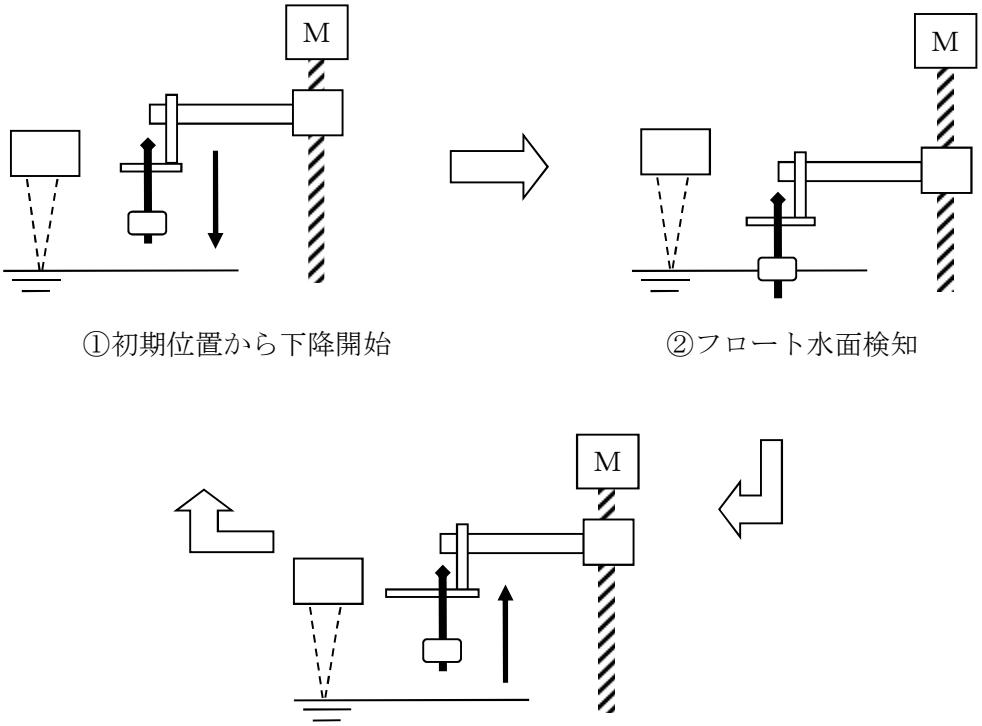


図 5　水位スイッチ精度確認試験装置の概略図



①初期位置から下降開始　　②フロート水面検知

③初期位置まで上昇

図 6　水面検知フロー

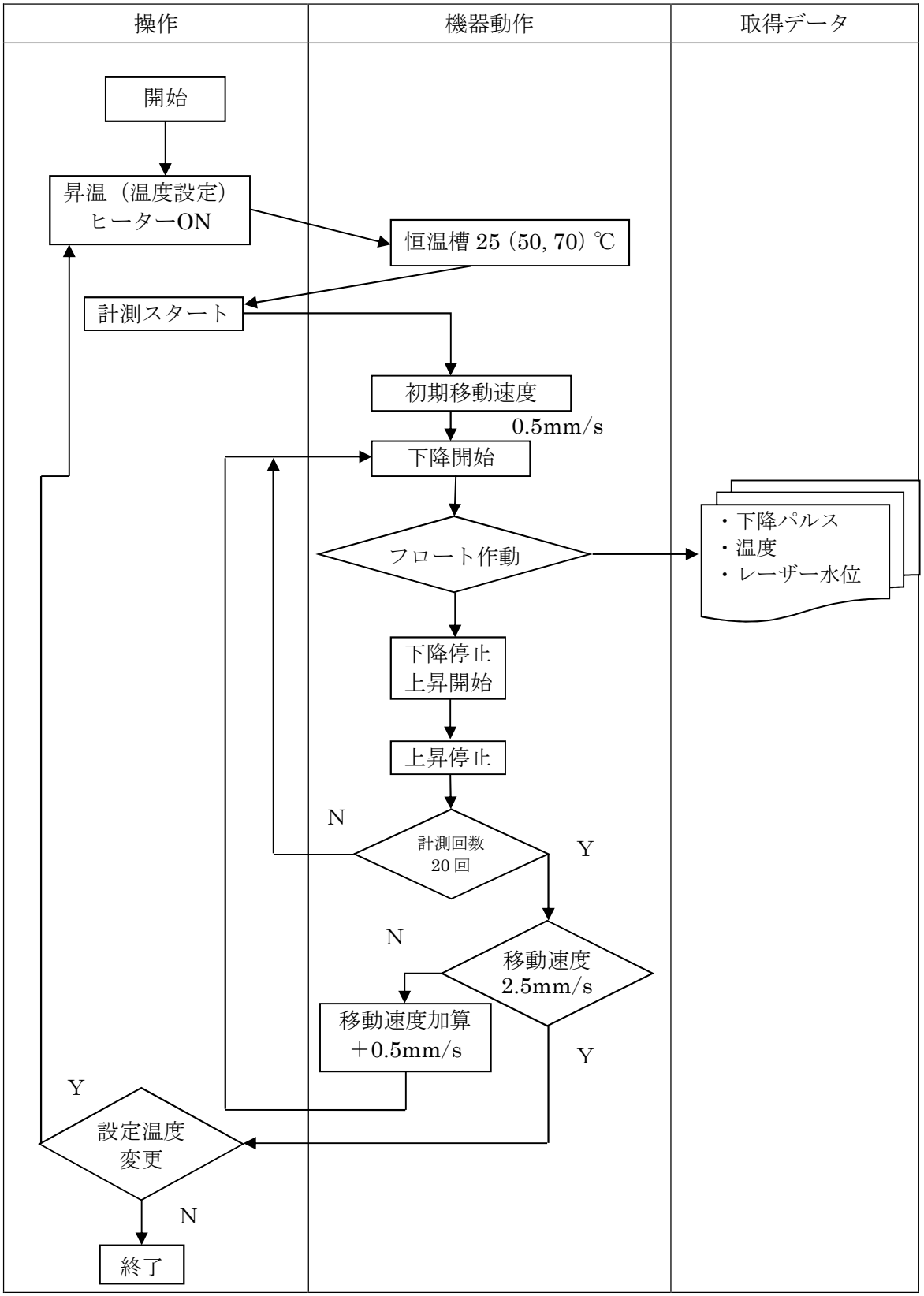
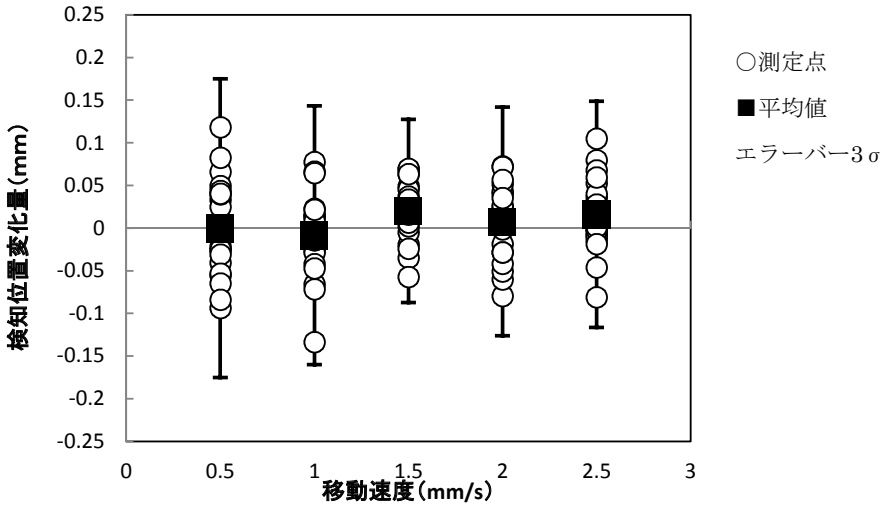
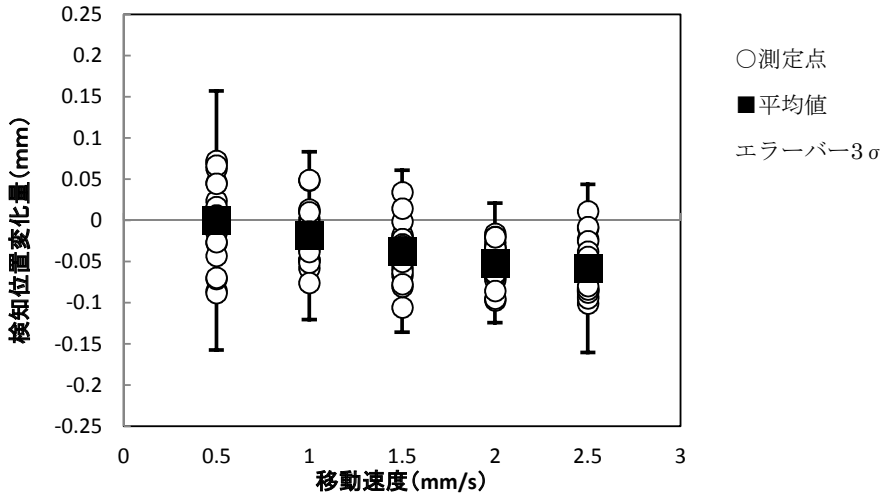


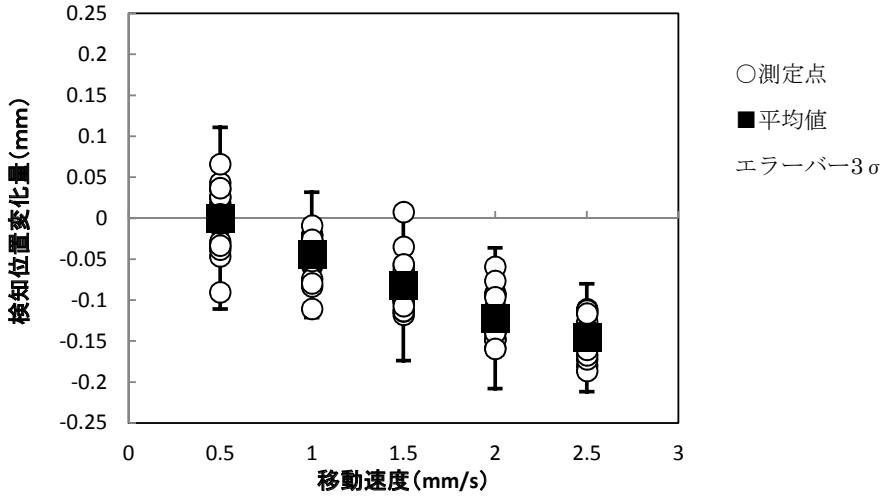
図 7　繰り返し水面検知精度の確認試験フロー



(a) 水温 常温（23℃）



(b) 水温 50℃



(c) 水温 70℃

図 8　繰り返し水面検知位置の計測結果

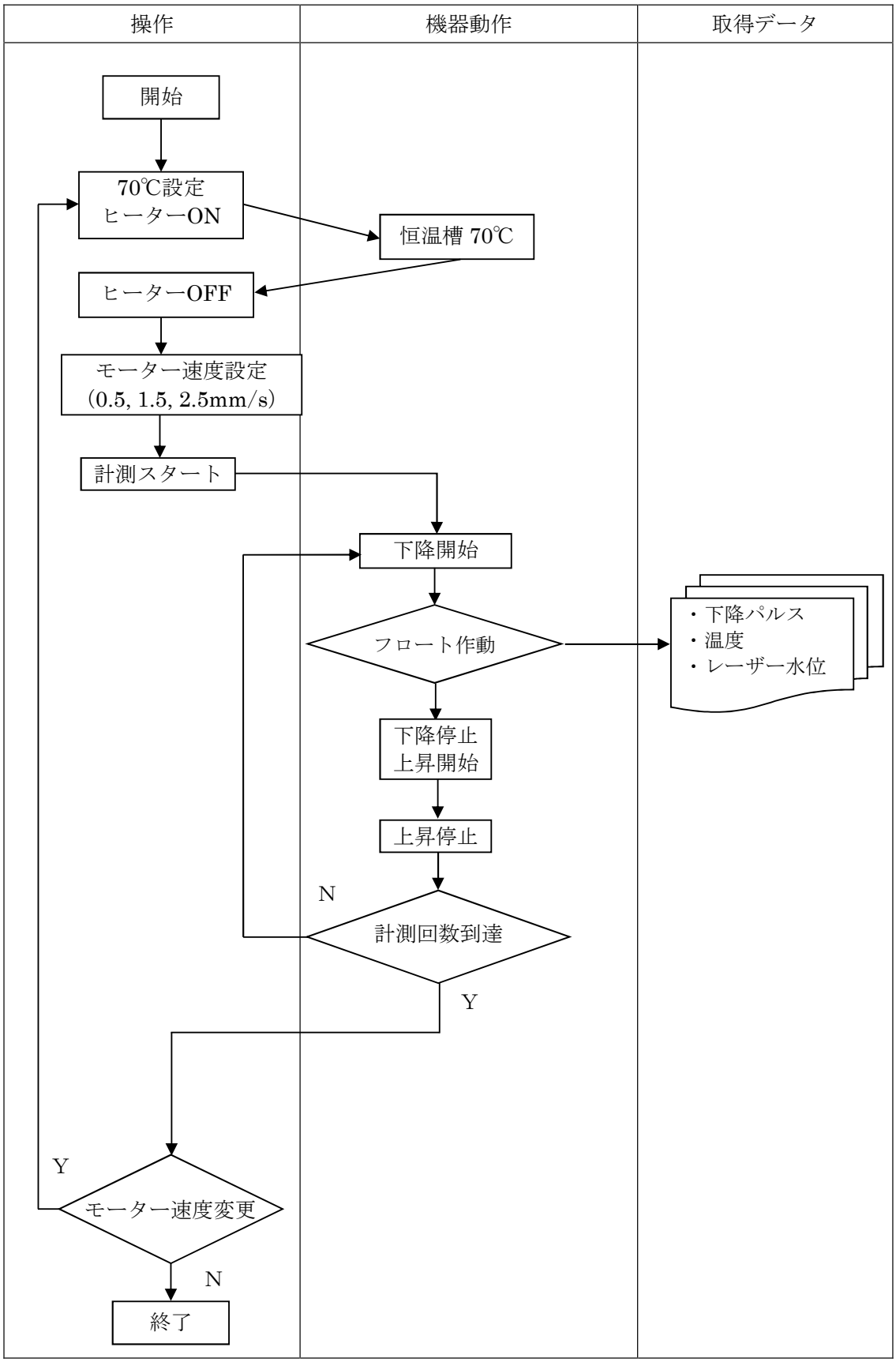
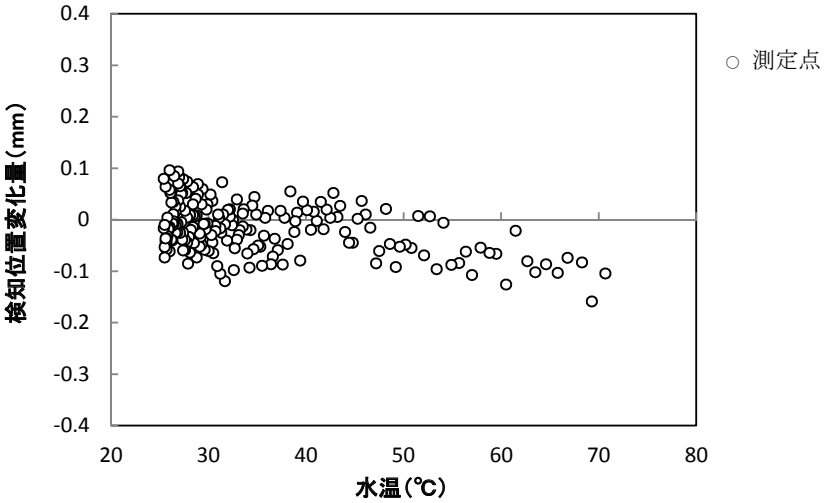
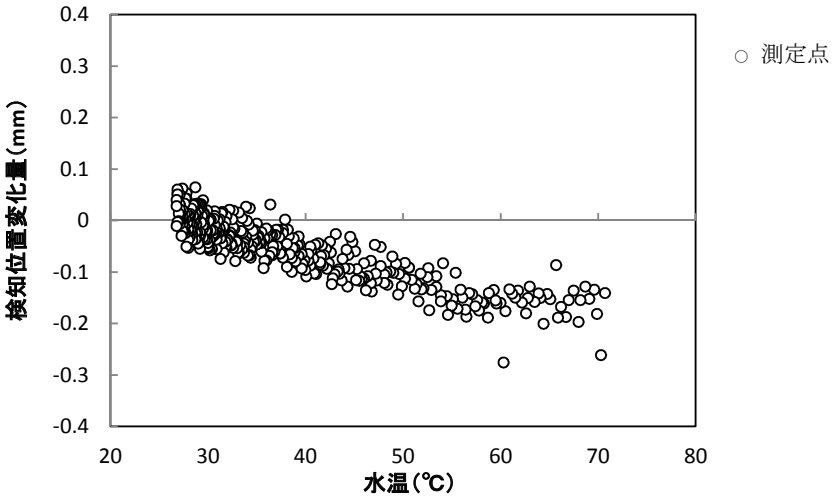


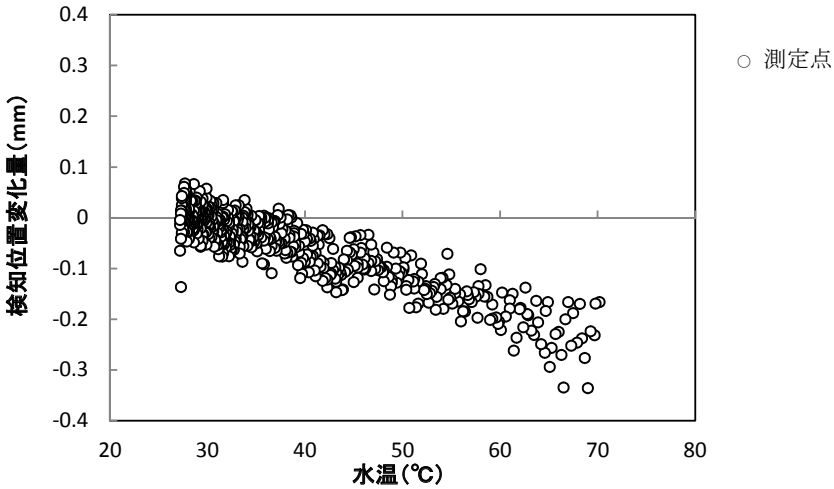
図 9　水温変化時の水面検知位置変化量の確認試験フロー



(a) フロートスイッチ移動速度 0.5mm/s

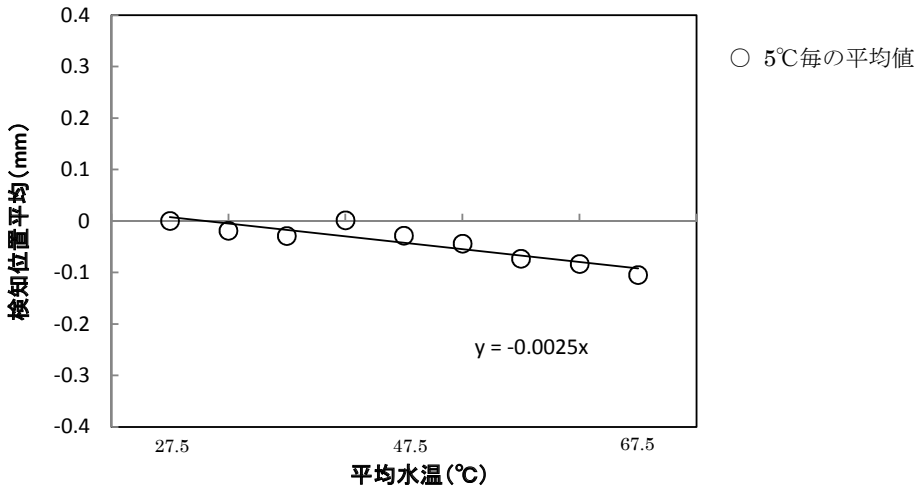


(b) フロートスイッチ移動速度 1.5mm/s

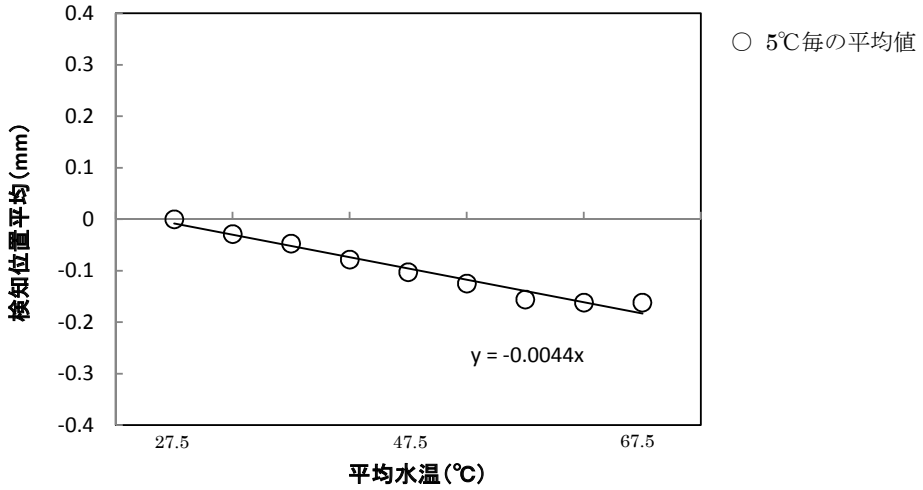


(c) フロートスイッチ移動速度 2.5mm/s

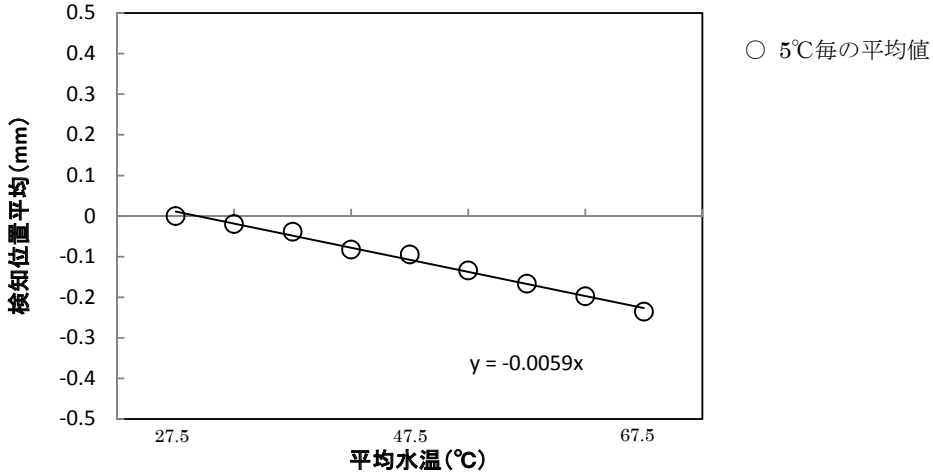
図 10　水温変化時の水面検出位置変化量の計測結果



(a) フロートスイッチ移動速度 0.5mm/s



(b) フロートスイッチ移動速度 1.5mm/s



(c) フロートスイッチ移動速度 2.5mm/s

図 11 水温変化時の水面検知位置変化量の計測結果（まとめ）

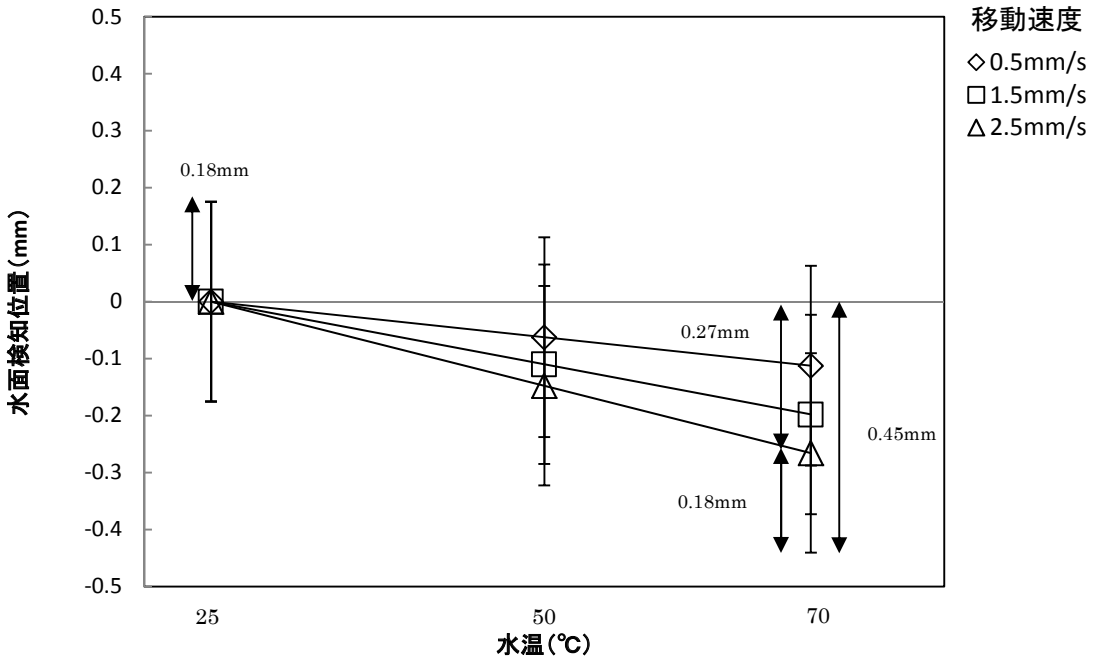


図 12 フロートスイッチの水面検知精度の評価結果

国際単位系（SI）

表１．SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表２．基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立法メートル	m^3
速さ，速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	毎メートル	m^{-1}
密度，質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m^2
比体積	立方メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度[a]，濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率[b]	（数字の）　1	1
比透磁率[b]	（数字の）　1	1

(a) 量濃度（amount concentration）は臨床化学の分野では物質濃度（substance concentration）ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元１をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の１は通常は表記しない。

表３．固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン[b]	rad	1 [b]	m/m
立体角	ステラジアン[b]	sr[c]	1 [b]	m^2/m^2
周波数	ヘルツ[d]	Hz		s^{-1}
力	ニュートン	N		$m\ kg\ s^{-2}$
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
仕事率，工率，放射束	ワット	W	J/s	$m^2\ kg\ s^{-3}$
電荷，電気量	クーロン	C		s A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2	$kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度[e]	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd sr[c]	cd
照度	ルクス	lx	lm/m^2	$m^{-2}\ cd$
放射性核種の放射能[f]	ベクレル[d]	Bq		s^{-1}
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト[g]	Sv	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
酸素活性	カタール	kat		$s^{-1}\ mol$

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b)ラジアンとステラジアンは数字の１に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の１は明示されない。
(c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f)放射性核種の放射能（activity referred to a radionuclide）は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g)単位シーベルト（PV,2002,70,205）についてはCIPM勧告2（CI-2002）を参照。

表４．単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	$m^{-1}\ kg\ s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	$kg\ s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m\ m^{-1}\ s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m\ m^{-1}\ s^{-2}=s^{-2}$
熱流密度，放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	$kg\ s^{-3}$
熱容量，エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}$
比熱容量，比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2\ s^{-2}\ K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	$m\ kg\ s^{-3}\ K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m^3	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$m\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m^3	$m^{-3}\ sA$
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ sA$
電束密度，電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ sA$
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2\ kg\ s^{-2}\ mol^{-1}$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}\ mol^{-1}$
照射線量（X 線及びγ線）	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1}\ sA$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2\ s^{-3}$
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=m^2\ kg\ s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2\ sr)$	$m^2\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=kg\ s^{-3}$
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m^3	$m^{-3}\ s^{-1}\ mol$

表５．SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^{6}	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^{3}	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表６．SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	’	1’=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	”	1”=(1/60)’=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	$1ha=1hm^2=10^4m^2$
リットル	L, l	$1L=11=1dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	$1t=10^3$ kg

表７．SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.602\ 176\ 53(14)\times10^{-19}J$
ダルトン	Da	$1Da=1.660\ 538\ 86(28)\times10^{-27}kg$
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	$1ua=1.495\ 978\ 706\ 91(6)\times10^{11}m$

表８．SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	$1\ bar=0.1MPa=100kPa=10^5Pa$
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	$1\ Å=0.1nm=100pm=10^{-10}m$
海里	M	1 M=1852m
バーン	b	$1\ b=100fm^2=(10^{-12}cm)2=10^{-28}m^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	B	
デジベル	dB	

表９．固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	$1\ erg=10^{-7}\ J$
ダイン	dyn	$1\ dyn=10^{-5}N$
ポアズ	P	$1\ P=1\ dyn\ s\ cm^{-2}=0.1Pa\ s$
ストークス	St	$1\ St\ =1cm^2\ s^{-1}=10^{-4}m^2\ s^{-1}$
スチルブ	sb	$1\ sb\ =1cd\ cm^{-2}=10^4cd\ m^{-2}$
フォト	ph	$1\ ph=1cd\ sr\ cm^{-2}\ 10^4lx$
ガル	Gal	$1\ Gal\ =1cm\ s^{-2}=10^{-2}ms^{-2}$
マクスウェル	Mx	$1\ Mx\ = 1G\ cm^2=10^{-8}Wb$
ガウス	G	$1\ G\ =1Mx\ cm^{-2}\ =10^{-4}T$
エルステッド[c]	Oe	$1\ Oe \triangleq (10^3/4\pi)A\ m^{-1}$

(c) ３元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≙ 」は対応関係を示すものである。

表10．SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	$1\ Ci=3.7\times10^{10}Bq$
レントゲン	R	$1\ R = 2.58\times10^{-4}C/kg$
ラド	rad	$1\ rad=1cGy=10^{-2}Gy$
レム	rem	$1\ rem=1\ cSv=10^{-2}Sv$
ガンマ	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フェルミ		1フェルミ=1 fm=10-15m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー）4.184J（「熱化学」カロリー）
ミクロン	μ	$1\ \mu\ =1\mu m=10^{-6}m$

（第8版，2006年改訂）