



JRR-3プロセス計装設備(安全保護系)のループ精度

Loop Accuracy of JRR-3 Safety Protection System

池亀 吉則 大内 諭 諏訪 昌幸 井坂 浩二
後藤 真悟 村山 洋二

Yoshinori IKEKAME, Satoshi OHUCHI, Masayuki SUWA, Koji ISAKA
Singo GOTO and Yoji MURAYAMA

東海研究開発センター
原子力科学研究所
研究炉加速器管理部

Department of Research Reactor and Tandem Accelerator
Nuclear Science Research Institute
Tokai Research and Development Center

August 2007

本レポートは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/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行っ
ております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

*〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources 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

JRR-3 プロセス計装設備（安全保護系）のループ精度

日本原子力研究開発機構 東海研究開発センター

原子力科学研究所 研究炉加速器管理部

池亀 吉則、大内 諭、諏訪 昌幸、井坂 浩二、後藤 真悟、村山 洋二

（2007年6月4日受理）

JRR-3 は、平成 2 年 3 月に初臨界に達した後、熱出力 20MW で、各種照射設備及び中性子ビーム実験装置を装備した高性能研究用原子炉として、機構内外の利用に供している。

原子炉の安全安定運転を維持するためには、プロセス計装設備により、冷却材などの状態量を適正に計測・指示させる必要がある。そのため、保守・整備及び設備の更新において、計装系のループ精度から、適正な基準を定め、プロセス計装設備の計器校正を行っている。

本報告書は、JRR-3 プロセス計装設備のうち、安全保護系を構成する機器の精度及び計装系のループ精度を整理し、とりまとめたものである。これにより、JRR-3 のプロセス計装設備の保守管理がより一層効率的で客観性を有するものとなった。

Loop Accuracy of JRR-3 Safety Protection System

Yoshinori IKEKAME, Satoshi OHUCHI, Masayuki SUWA
Koji ISAKA, Singo GOTO and Yoji MURAYAMA

Department of Research Reactor and Tandem Accelerator
Nuclear Science Research Institute
Tokai Research and Development Center
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received June 4, 2007)

JRR-3 has been utilized for various researches such as neutron irradiation experiment, neutron beam experiment and so on as a high performance research reactor with thermal power of 20MW since the first criticality in March,1990.

For safe and stable operation, it is necessary to measure and indicate the process values such as flow rate of coolant appropriately with the process instrumentation facilities. After maintenance or refurbishmen of the reactor facilities such as cooling pumps, the process instrumentation facilities should be calibrated considering the loop accuracy of the facilities.

This report is compiling the loop accuracy and each component's accuracy of the safety protection system, a part of the process instrumentation facilities. Using these date, the process instrumentation facilities would be maintained more effectively and objectively.

Keywords : JRR-3, Process Values, Safety Protection System, Loop Accuracy, Maintenance, Process Instrumentation Facilities

目 次

1. はじめに	1
2. JRR-3 の概要	2
3. プロセス計装設備の構成	2
4. 安全保護系の構成機器及び機器精度	3
4. 1 検出器	3
4. 2 安全保護系変換器盤及び安全保護系制御盤	4
4. 3 プロセス制御計算機	6
5. ループ精度	7
6. まとめ	8
謝辞	8

Contents

1. Introduction	1
2. General description of JRR-3	2
3. Structure of process instrumentation facilities	2
4. Component and its accuracy of safety protection system facilities	3
4.1 Detector system	3
4.2 Converter board and control board for safety protection system	4
4.2 Process control computer system	6
5. Loop accuracy of safety protection system	7
6. Conclusions	8
Acknowledgement	8

This is a blank page.

1. はじめに

JRR-3 は、昭和 60 年から改造工事が行われ、平成 2 年 3 月に初臨界に達した後、最大熱出力 20MW、最近の原子炉の利用動向に対応した各種照射設備及び中性子ビーム実験装置を装備した原子炉施設として機構内外の利用に供している。

原子炉の計測制御系統施設のプロセス計装設備は、1 次冷却系及び 2 次冷却系等、原子炉施設のプロセス量を測定し監視する設備である。

原子炉の安定運転に欠くことの出来ないプロセス計装設備の計器が適正な指示を示すためには、保守・整備及び計器等の更新において行う計器校正の判定基準に適正なループ精度を用いることが必要である。また、計器校正の判定基準は機器精度を要素とするループ精度を用いた計器指示値の許容誤差でもあり、算出根拠を明確にすることは計器管理に重要である。

本報告書は、JRR-3 プロセス計装設備のうち安全保護系のループ精度の算出根拠となる機器構成と機器精度を整理し、適正なループ精度の算出に活用できるよう取りまとめたものである。これにより、JRR-3 プロセス計装設備の保守管理がより一層効率的で客観性のあるものになると考える。

2. JRR-3 の概要

JRR-3 は、熱出力 20MW の低濃縮ウラン軽水減速軽水冷却スイミングプール型研究用原子炉で最近の原子炉の利用動向に対応した各種照射設備及び中性子ビーム実験装置を装備した原子炉施設である。

炉心は標準型燃料要素 26 体、ハフニウム制御棒 6 体（フォロー型燃料要素付）、照射筒 5 体及びベリリウム反射体 26 体からなり、約 60cm ϕ \times 75cm h の円筒状である。

冷却系統施設は、1 次冷却系、2 次冷却系及び重水冷却系により炉心の核分裂で発生した熱を冷却塔から大気中に放散冷却する。冷却系の定格流量は、1 次冷却系：約 2,400m³/h、2 次冷却系：約 3,200m³/h、重水冷却系：約 70m³/h である。

計測制御系統施設は、中性子計装設備、プロセス計装設備、原子炉出力制御設備、原子炉保護設備、工学的安全施設作動設備、プロセス放射能監視設備及び、計算機システム等で構成し、原子炉制御棟の中央制御室において集中監視・制御を行っている。

3. プロセス計装設備の構成

JRR-3 のプロセス計装設備は、安全保護系と計測制御系から構成され、原子炉の安全保護動作及び運転制御に必要な情報として、1 次冷却系及び 2 次冷却系等、原子炉施設のプロセス量を測定・監視する設備である。その情報量は、アナログ入出力点数：713 点、デジタル入出力点数：4135 点（合計 4848 点）と膨大であり効率的な管理が必要である。

安全保護系は検出器、安全保護系変換器盤、安全保護系制御盤、プロセス計装盤で構成されておりそれぞれ分離した 2 チャンネルを持ち、電源は計装用無停電電源から独立した非常用電源から供給されている。検出器と計装盤間の配線は、チャンネル相互を分離することにより、チャンネルの単一故障が起こっても安全保護機能を失わないように多重性を有している。安全保護系は、原子炉の安全上重要なパラメータを常時監視し、異常状態発生時には警報を発すると共に原子炉保護設備、工学的安全施設を自動的に作動させる機能を有している。

計測制御系は検出器、プロセス制御計算機、プロセス計装盤から構成され、主要なパラメータの信号が設定値を超えたときは表示ランプが点灯しブザーが鳴動する。

4. 安全保護系の構成機器及び機器精度

4. 1 検出器

冷却材の流量、温度、プール水位等を差圧伝送器、測温抵抗体及び熱電対を用いて測定する。

(1) 差圧伝送器

- UNE 1 1 形 (横河電機製)
主に原子炉プール水位計に用いている。
測定範囲 - 2 1 4 1 ~ 2 1 4 1 k P a
- UNE 1 1 D S F 形 (横河電機製)
主に重水溢流タンク水位計に用いている。
測定範囲 - 2 1 4 1 ~ 2 1 4 1 k P a
- UNE 1 2 形 (横河電機製)
微差圧用の伝送器であり主に非常用排風機流量計に用いている。
測定範囲 - 6 9 ~ 6 9 k P a
- UNE 1 4 形 (横河電機製)
高差圧用の伝送器であり主にフィルター差圧計に用いている。
測定範囲 - 7 3 5 ~ 1 0 3 0 k P a
- D P F 1 1 0 形 (横河電機製)
主に 1 次冷却材流量計に用いている。
測定範囲 1 9 6 ~ 1 9 6 1 k P a
- 機器精度 FS ± 0 . 2 %

(2) 温度計

- シース測温抵抗体 (横河電機製)
主に 1 次冷却材炉心出口温度計に用いている。
測定範囲 0 ~ 5 0、0 ~ 5 5、0 ~ 1 0 0 ° C
- シース熱電対 (横河電機製)
主にポンプ軸受温度計に用いている。
測定範囲 0 ~ 1 0 0 ° C
- 機器精度 FS ± 0 . 1 5 %

4. 2 安全保護系変換器盤及び安全保護系制御盤 (SYSTEM1100)

JRR-3 安全保護系で使用されている横河電機(株)製の SYSTEM1100 は、原子炉の異常な過渡変化時及び事故時にその異常状態を検知し、原子炉保護設備、工学的安全施設を自動的に作動させる信号を出力するシステムである。なお、システムは故障率低減のために、高信頼性部品の採用、部品のストレスを考慮した適正な回路設計、部品の種類と数量の削減、省エネルギー設計による部品の温度劣化対策を行っている。

(1) SYSTEM1100 用モジュール (横河電機製)

① I/E. I p I S O L

DC4~20mA 信号をこれと対応した DC0~10V と DC4~20mA 信号に変換するモジュール。このモジュールの入出力間、出力相互間は絶縁され、出力回路にはプロテクタ回路が設けられ、出力側からの高電圧印加に対して、内部回路を保護すると共に、入力側へのノイズの影響を防止している。

- ・ 入力 : DC 4 ~ 2 0 mA
- ・ 出力 : DC 0 ~ 1 0 V、DC 4 ~ 2 0 mA
- ・ 機器精度 FS±0. 1 %

② E/E. I p I S O L

DC0~10V 信号をこれと対応した DC1~5V と DC4~20mA 信号に変換するモジュール。このモジュールの入出力間、出力相互間は絶縁され、出力回路にはプロテクタ回路が設けられ、出力側からの高電圧印加に対して、内部回路を保護すると共に、入力側へのノイズの影響を防止している。

- ・ 入力 : DC 0 ~ 1 0 V
- ・ 出力 : DC 1 ~ 5 V、DC 4 ~ 2 0 mA
- ・ 機器精度 FS±0. 1 %

③ M U L T / D I V

ジャンパ接続によって、乗除算、開平、乗算開平などの演算を行うモジュール。

- ・ 機器精度 FS±0. 2 5 %

④ R / E

測温抵抗体入力信号をこれと対応した 0~10V DC 信号に変換するモジュール。入出力間は絶縁されている。

- ・ 入力：白金－ニッケル測温抵抗体、出力：DC 0～10V
- ・ 機器精度 FS±0.1%
- ・ PROP. BIAS
- ・ 入力DC 0～10V、出力：DC 0～10V
- ・ 機器精度 FS±0.5%

4. 3 プロセス制御計算機 (CENTUM)

JRR-3 プロセス制御計算機で使用されている横河電機(株)製の CENTUM は、原子炉施設の各設備の運転監視・制御を総合的に行う分散型制御システムである。制御（主にシーケンス制御）や信号伝達機能を持つフィールド・コントロール・ステーション（原子炉制御棟、原子炉建家、2次冷却塔等に分散設置）及び中央制御室に設置しているヒューマン・インターフェイス（HIS）により中央制御室において集中監視・制御を行っている。

(1) CENTUM 用カード (横河電機製)

① VM1

多点アナログ入力カード

- ・ 機器精度 FS±0.1%

② VM2

多点アナログ入出力カード

- ・ 機器精度 FS±0.3%

③ CA1

4～20mA DC入力シグナル・コンディショナー・カード

- ・ 機器精度 FS±0.1%

④ CT5

熱電対(タイプT)シグナル・コンディショナー・カード

- ・ 機器精度 FS±0.1%

⑤ CR5

測温抵抗体(PT100Ω3線式)シグナル・コンディショナー・カード

- ・ 機器精度 FS±0.1%
- ・

⑥ CA0

4～20mA DC出力シグナル・コンディショナー・カード

- ・ 機器精度 FS±0.1%

⑦ CH0

1～5V DC出力シグナル・コンディショナー・カード

- ・ 機器精度 FS±0.1%

- ⑧ CH1
1～5 V DC入力シグナル・コンディショナー・カード
・ 機器精度 FS±0.1%
- ⑨ CH1第2出力
1～5 V DC入力シグナル・コンディショナー・カード
・ 機器精度 FS±0.3%

5. ループ精度

工業用計器の精度は、検出器、発信器、変換器、表示部（指示計、記録計、積算計）を含めた系統（以下ループという）を構成する機器のループ精度で管理する必要がある。ループ精度は、一般的に次式で計算される。

$$E = \pm \sqrt{(e1)^2 + (e2)^2 + (e3)^2 + \dots}$$

E : ループ精度

e1、e2、e3、… : ループを構成する機器の単体精度

安全保護系等の計器名称を Table 1 に示し、ループ構成計器の機器精度及びループ精度を Fig 1.1～Fig 1.5.2 に示す。

6. まとめ

プロセス計装設備（安全保護系）の計器校正に用いられる判定基準は、ループ精度を基に定められている。本報告書は、安全保護系に対してループ精度の再チェック及び整理を行ったものである。これにより保守・整備の判定基準に誤りのないことを確認するとともに、ループ精度が整理されたことで、自主検査等の信頼性が確認されるとともに、今後の設備更新に伴う判定基準の変更も誤りなく確実に実施出来ることになった。

謝辞

研究炉加速器管理部山下清信部長のご指導のもと、JRR-3 管理課の方々に技術的な助言、協力を頂き、ここに記して謝辞と致します。本報告書をまとめるにあたり、ご指導を頂いた JRR-3 管理課鳥居義也課長代理、JRR-3 管理課根本工課長代理にはここに感謝の意を表します。

Table.1 安全保護系の計器名称

計器名称	計器番号	検出器名称	警報レベル	図番号
1次冷却材流量(A系)	FI215A	差圧伝送器	スクラム・アラーム	Fig1. 1
1次冷却材流量(B系)	FI215B	差圧伝送器	スクラム・アラーム	Fig1. 2
1次冷却材炉心出口温度(A系)	TI212A	測温抵抗体	スクラム・アラーム	Fig2. 1
1次冷却材炉心出口温度(B系)	TI212B	測温抵抗体	スクラム・アラーム	Fig2. 2
1次冷却材炉心出入口温度差(A系)	TI21A1	測温抵抗体	スクラム・アラーム	Fig3. 1
1次冷却材炉心出入口温度差(B系)	TI21A2	測温抵抗体	スクラム・アラーム	Fig3. 2
原子炉プール水位(A系)	LI171A	差圧伝送器	スクラム・アラーム	Fig4. 1
原子炉プール水位(B系)	LI171B	差圧伝送器	スクラム・アラーム	Fig4. 2
重水温度(A系)	TI231A	測温抵抗体	スクラム・アラーム	Fig5. 1
重水温度(B系)	TI231B	測温抵抗体	スクラム・アラーム	Fig5. 2
重水流量(A系)	FI233A	差圧伝送器	スクラム・アラーム	Fig6. 1
重水流量(B系)	FI233B	差圧伝送器	スクラム・アラーム	Fig6. 2
重水溢流タンク水位(A系)	LI232A	差圧伝送器	スクラム・アラーム	Fig7. 1
重水溢流タンク水位(B系)	LI232B	差圧伝送器	スクラム・アラーム	Fig7. 2
1次冷却材炉心入口温度(A系)	TI216A	測温抵抗体	アラーム	Fig8. 1
1次冷却材炉心入口温度(B系)	TI216B	測温抵抗体	アラーム	Fig8. 2
2次冷却材流量	FI2231	差圧伝送器	アラーム	Fig9. 1
2次冷却塔入口温度	TI2255	測温抵抗体	アラーム	Fig10. 1
2次冷却塔出口温度	TI2232	測温抵抗体	アラーム	Fig11. 1
ヘリウム流量	(FI2422)	熱式流量計	アラーム	Fig12. 1
重水再結合器入口温度	(TI2417)	測温抵抗体	アラーム	Fig13. 1
重水再結合器出口温度	(TI2418)	測温抵抗体	アラーム	Fig14. 1
原子炉プール水温度	(TI2418)	測温抵抗体	常設警報	Fig15. 1

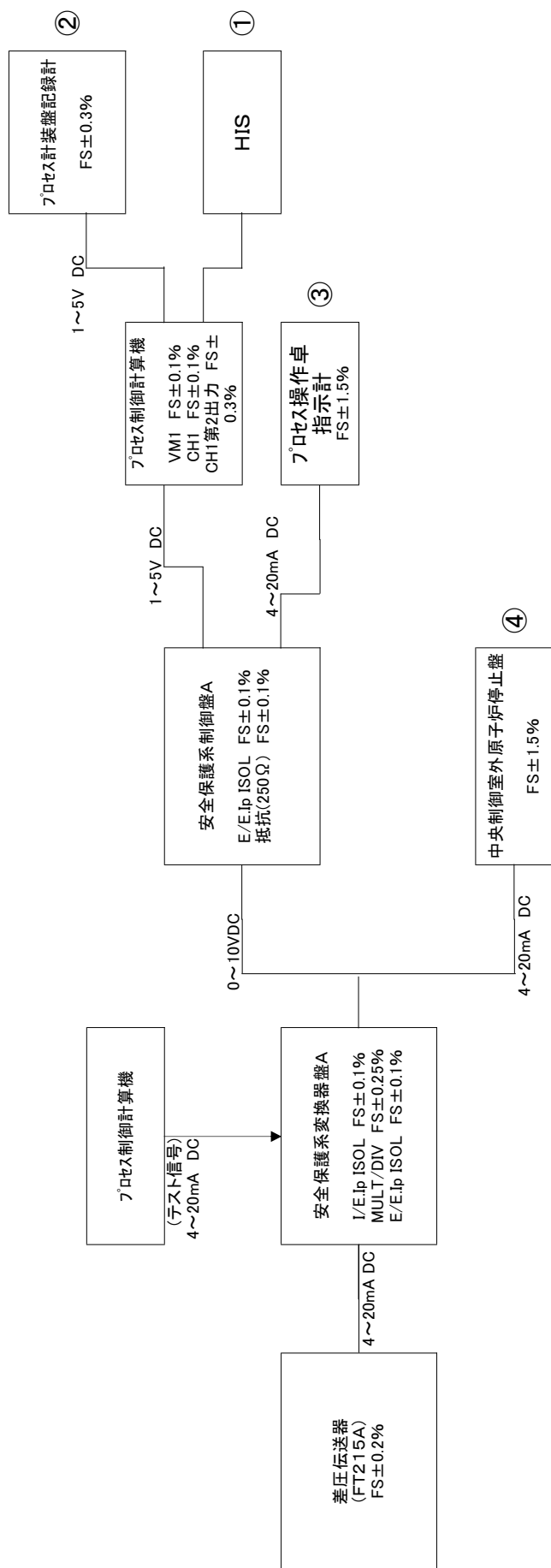


Fig. 1. 1 1 冷却材流量計 (A系) の計器構成図と機器精度

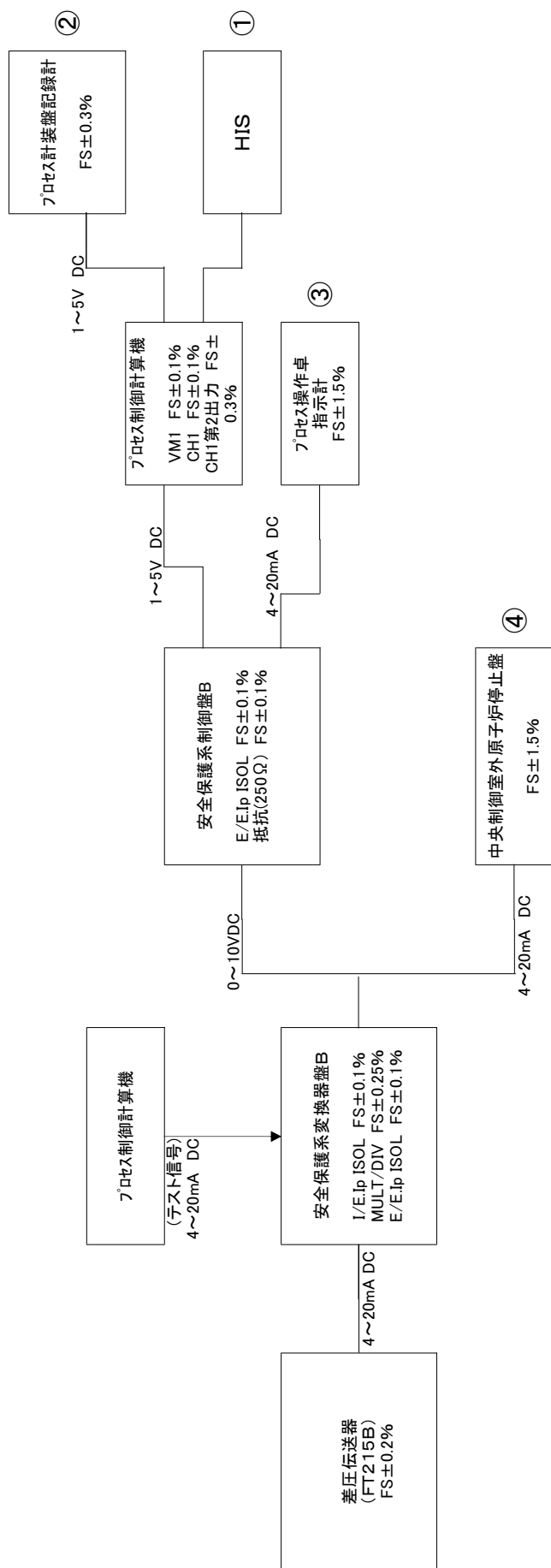


Fig. 1. 2 1 冷却材流量計(B系)の計器構成図と機器精度

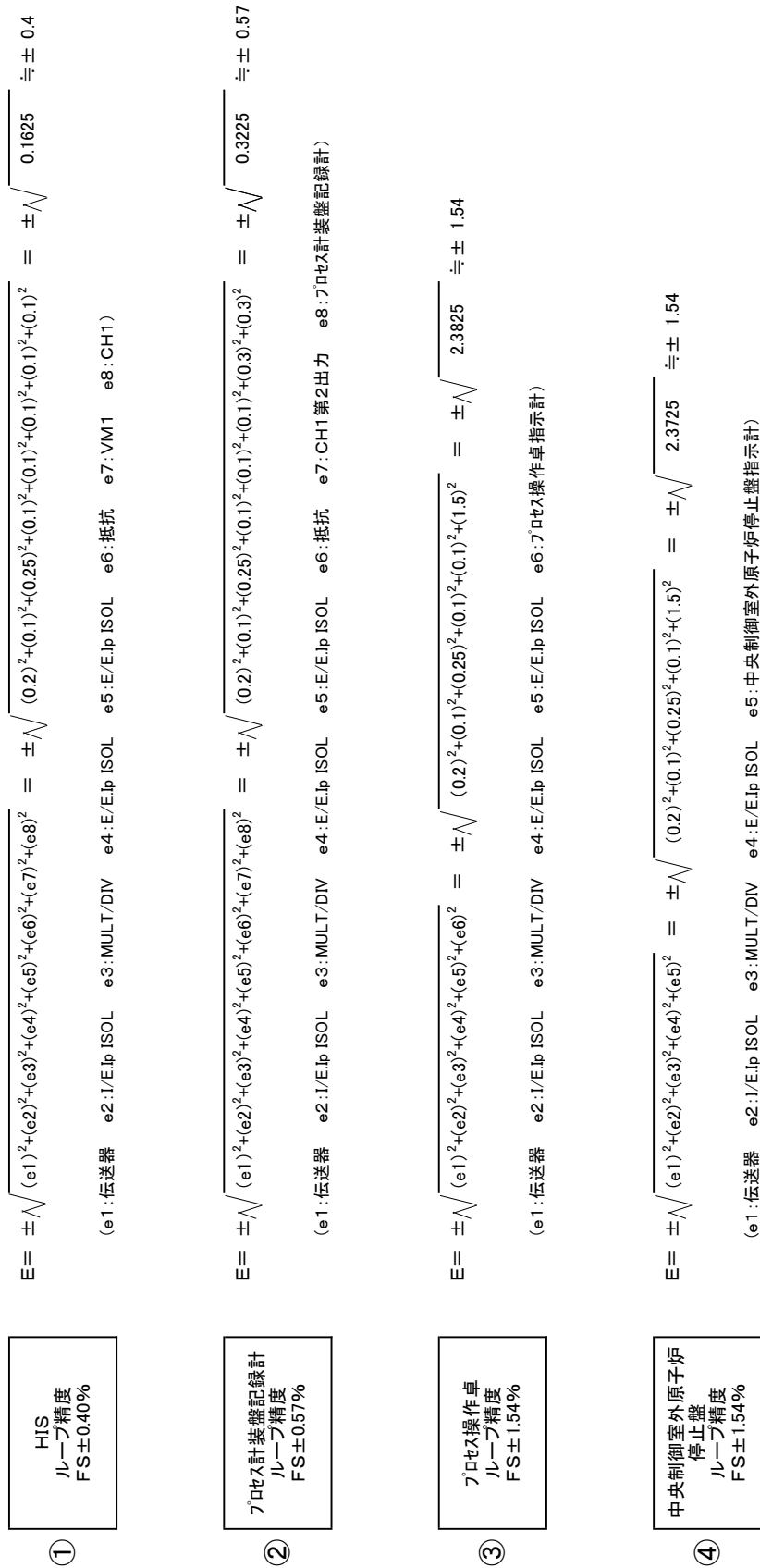


Fig. 1. 3 1 冷却材流量計(A・B系)のループ精度

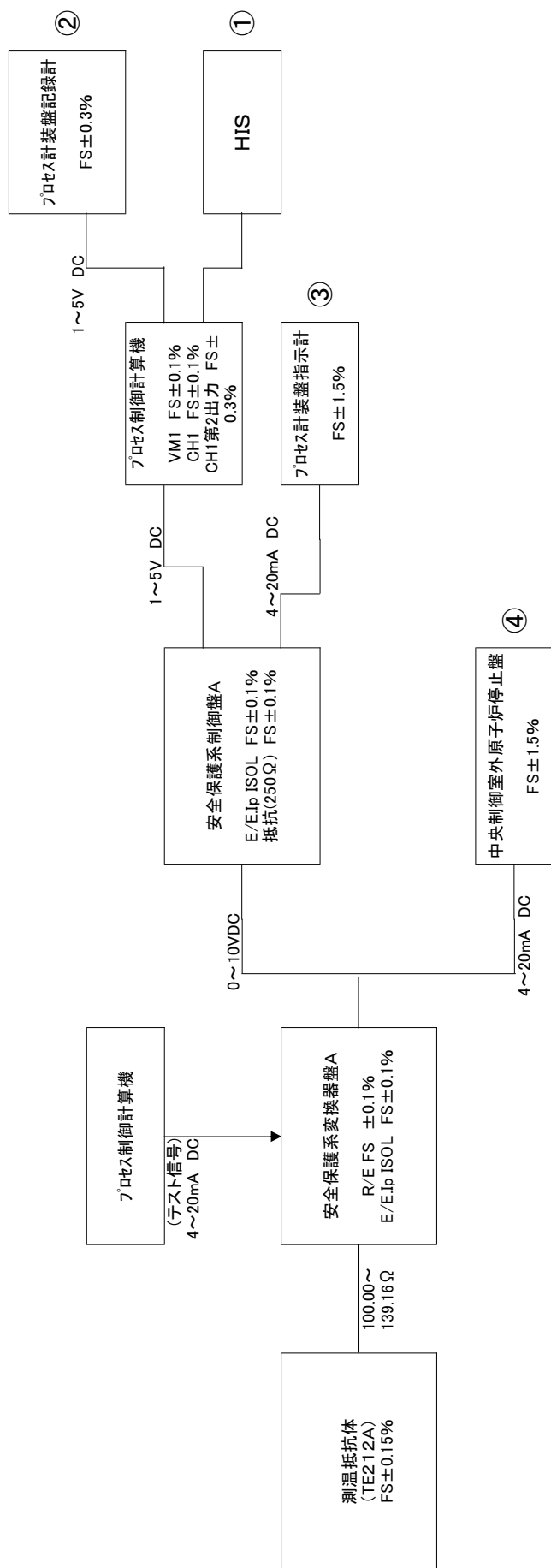


Fig. 2. 1 1次冷却材炉心出口温度計(A系)の計器構成図と機器精度

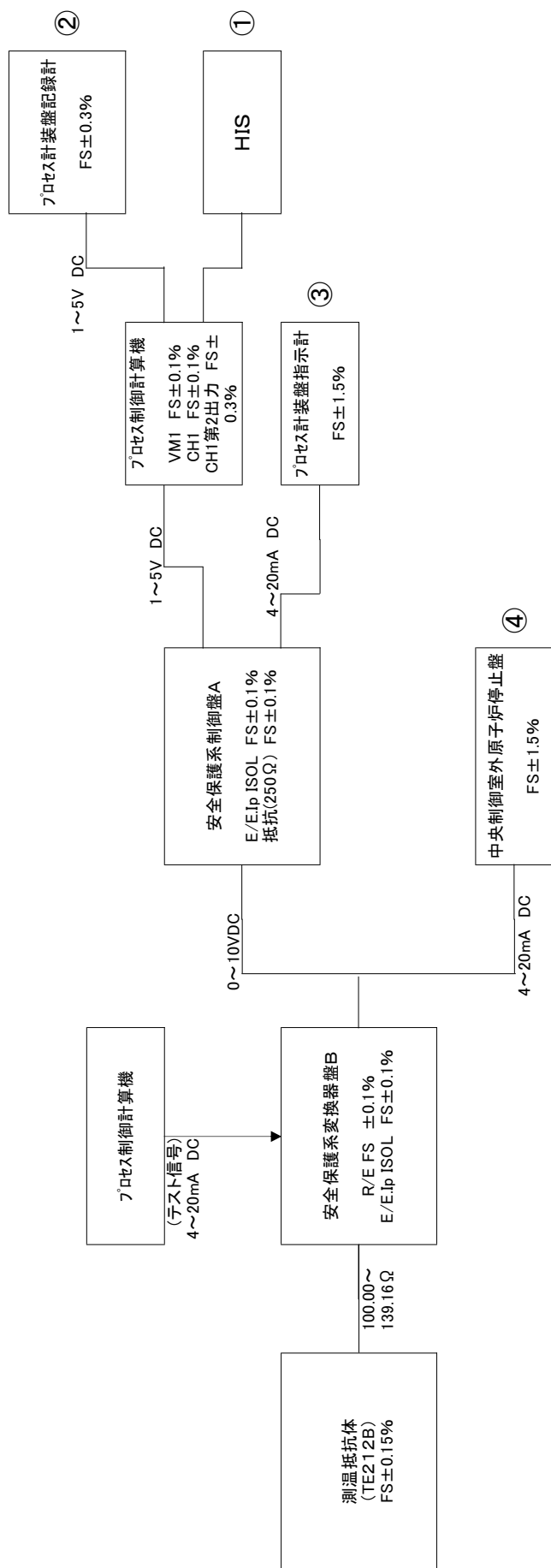


Fig. 2. 2 1次冷却材炉心出口温度計(B系)の計器構成図と機器精度

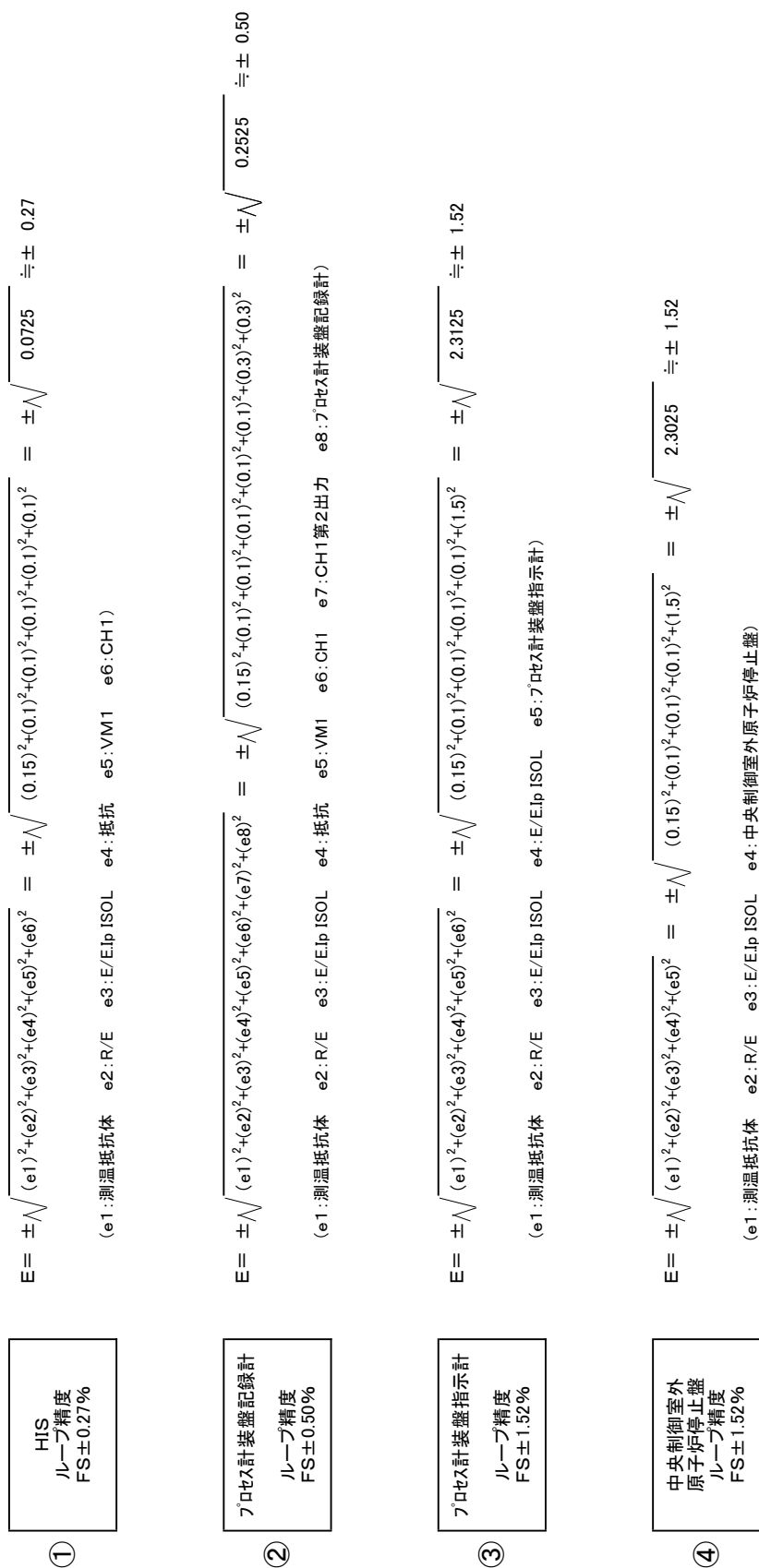


Fig. 2.3 1次冷却材炉心出口温度計(A・B系)のループ精度

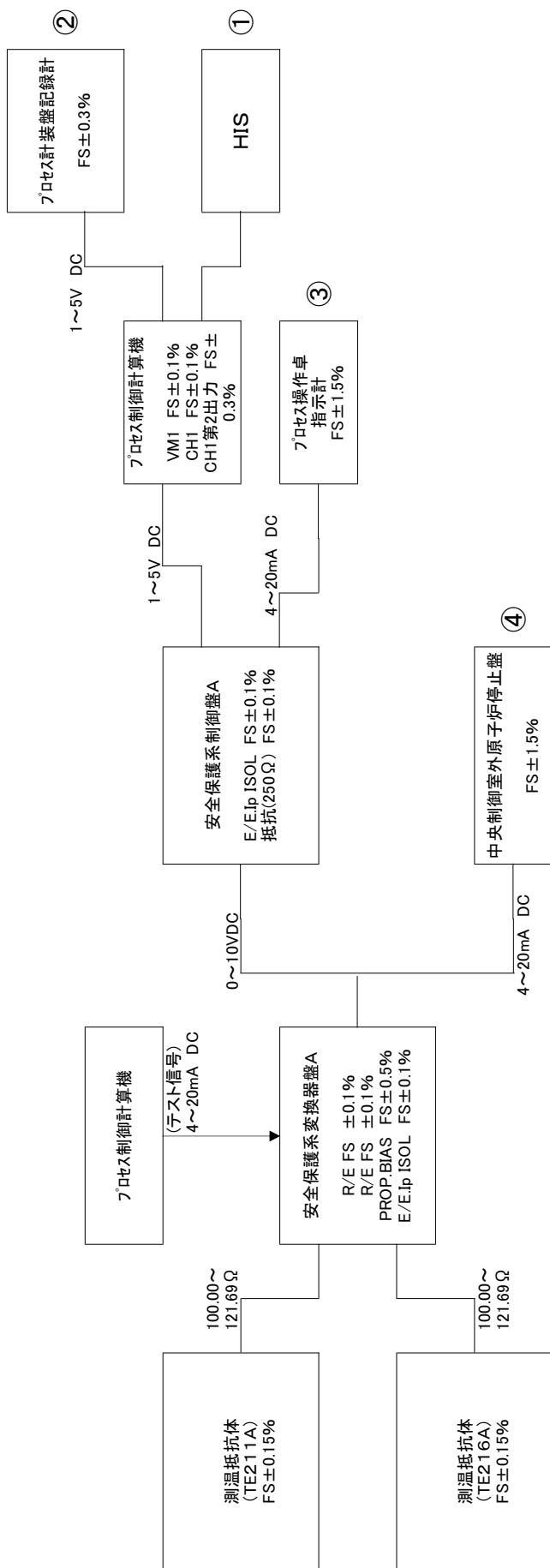


Fig. 3. 1 1次冷却材炉心出入口温度差計(A系)の計器構成図と機器精度

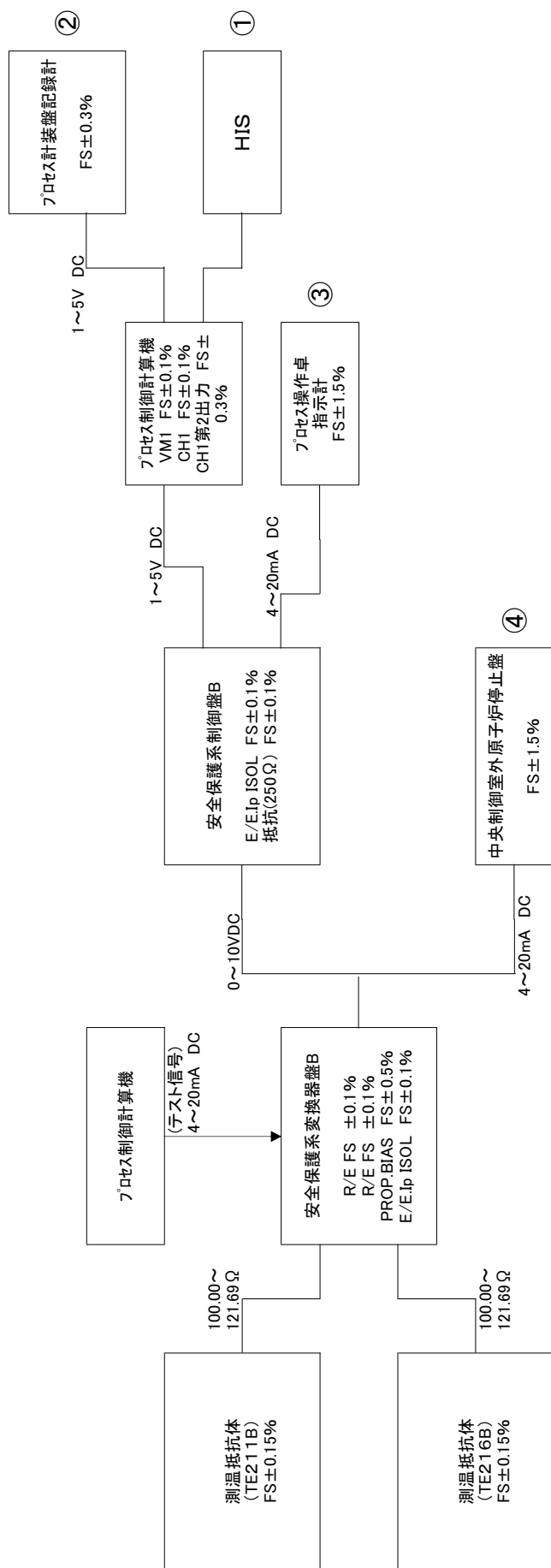


Fig. 3. 2 1次冷却材炉心出入口温度差計(B系)の計器構成図と機器精度

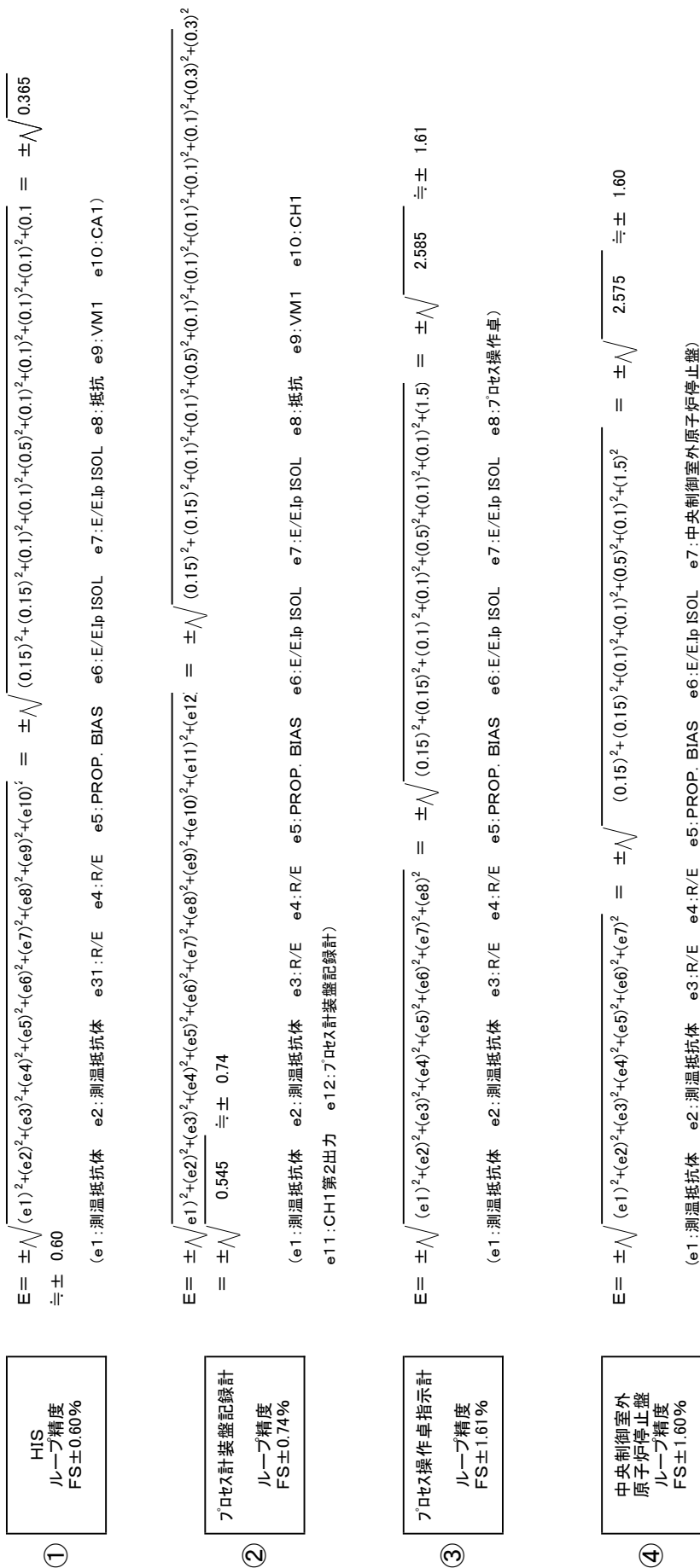


Fig. 3.3 1次冷却材炉心出入口温度差計(A・B系)のループ精度

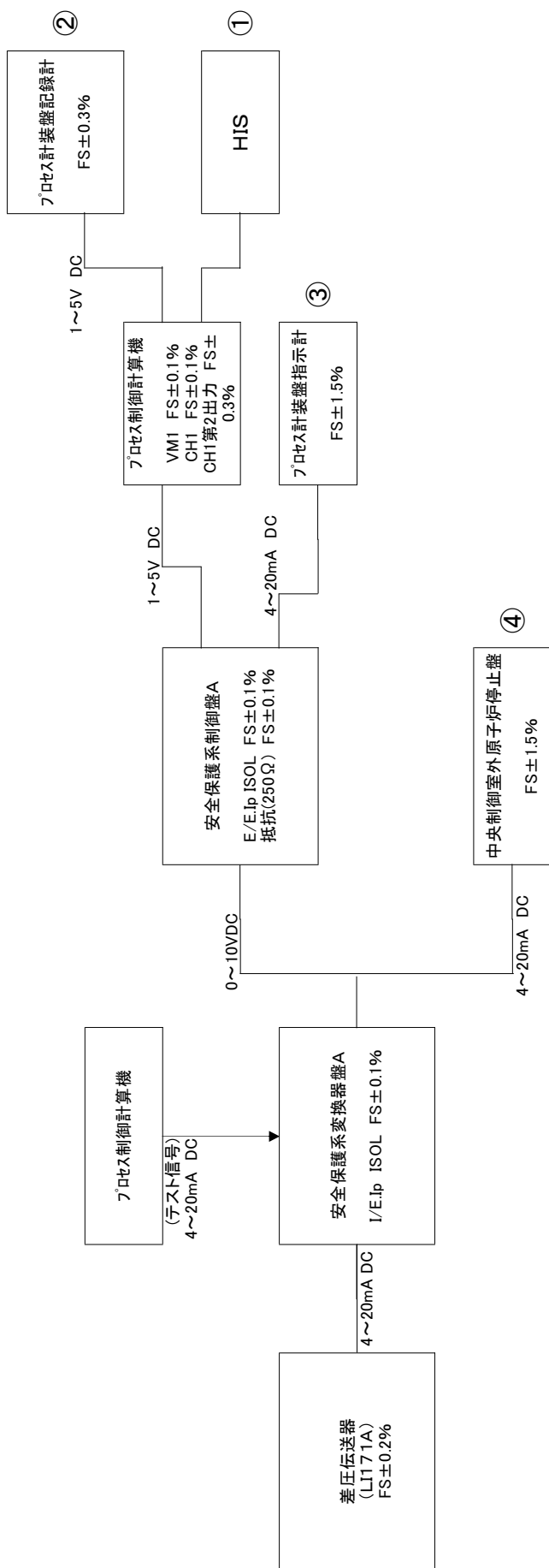


Fig. 4.1 原子炉プール水位計(A系)の計器構成図と機器精度

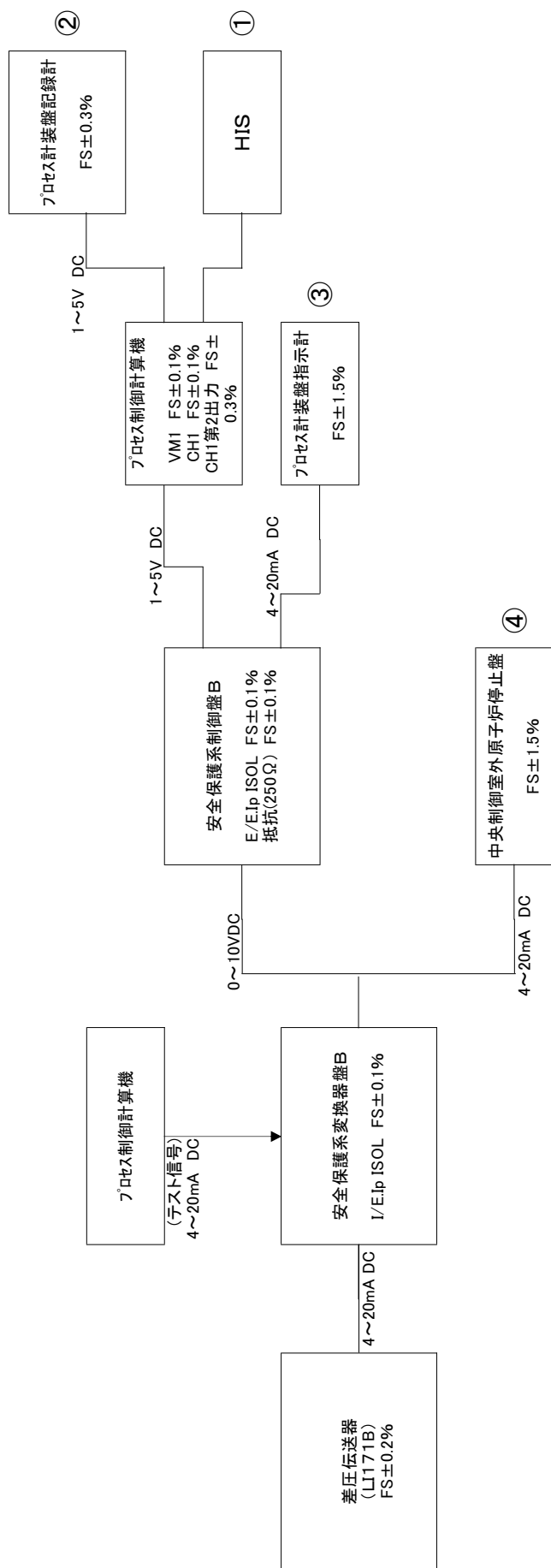


Fig. 4. 2 原子炉プール水位計(B系)の計器構成図と機器精度

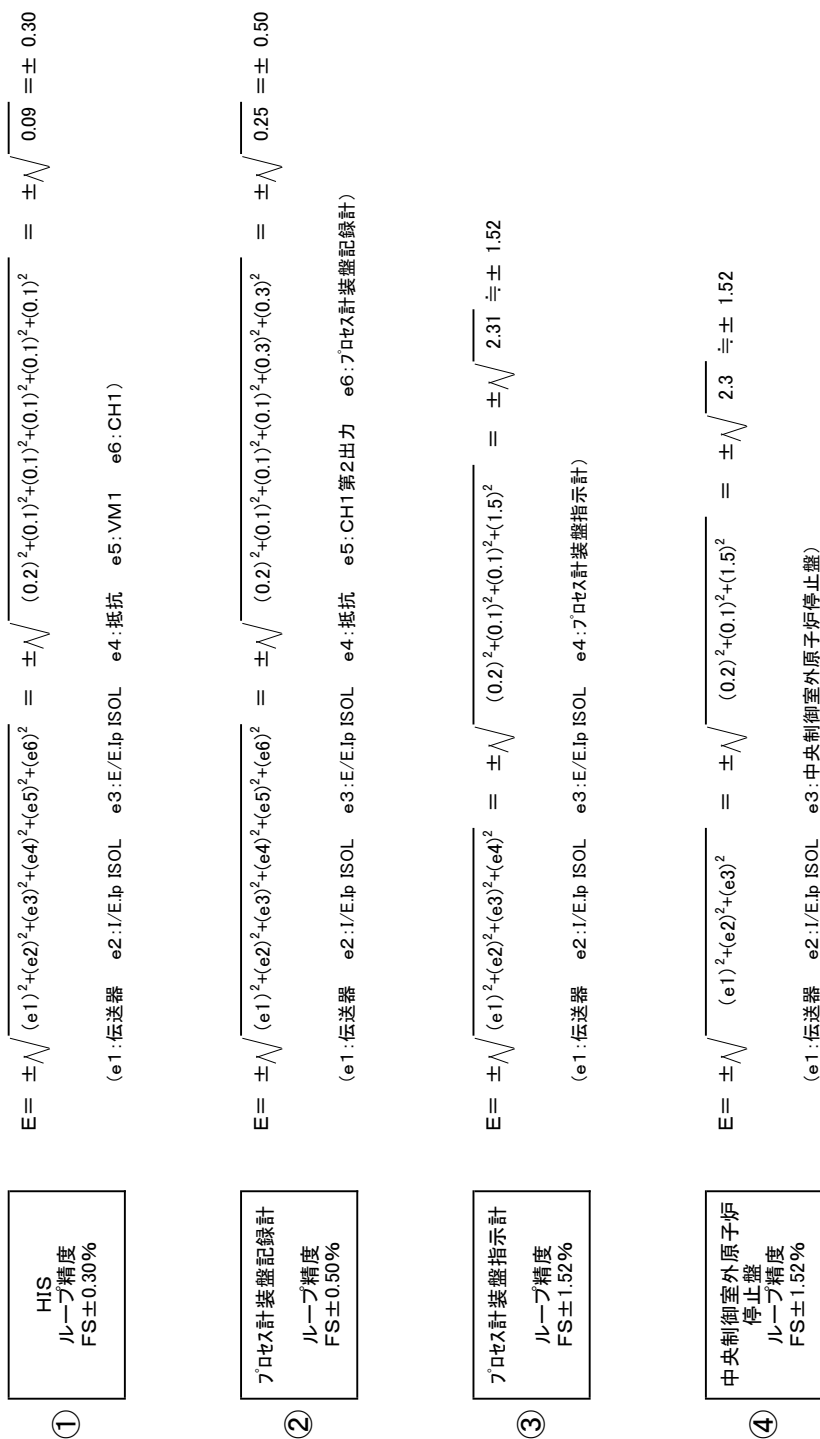


Fig. 4. 3 原子炉プールの水位計 (A・B系)のループ精度

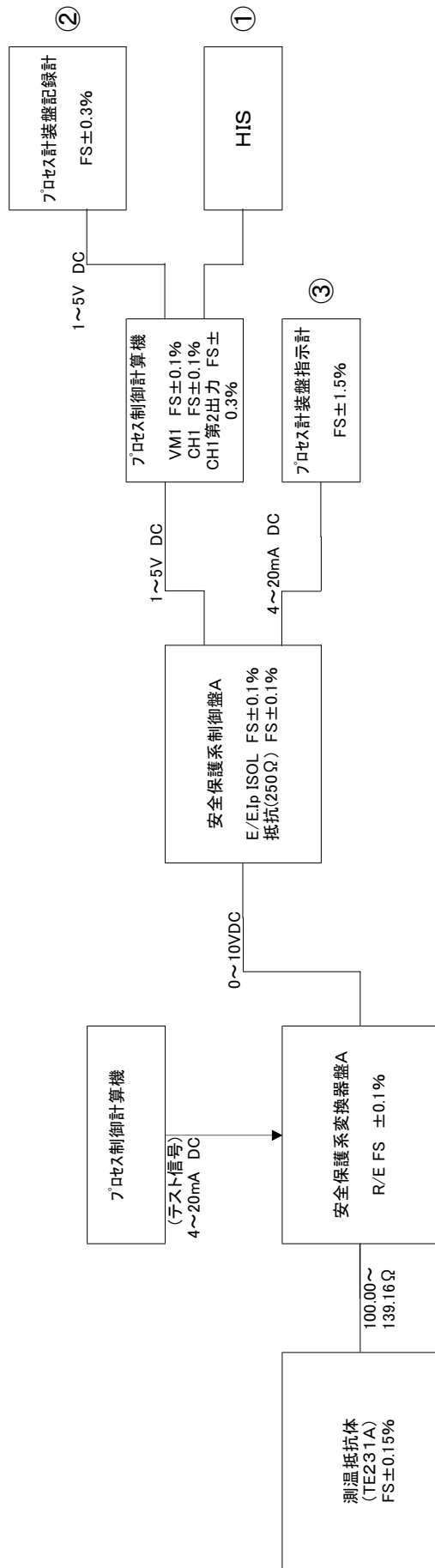


Fig. 5. 1 重水温度計(A系)の計器構成図と機器精度

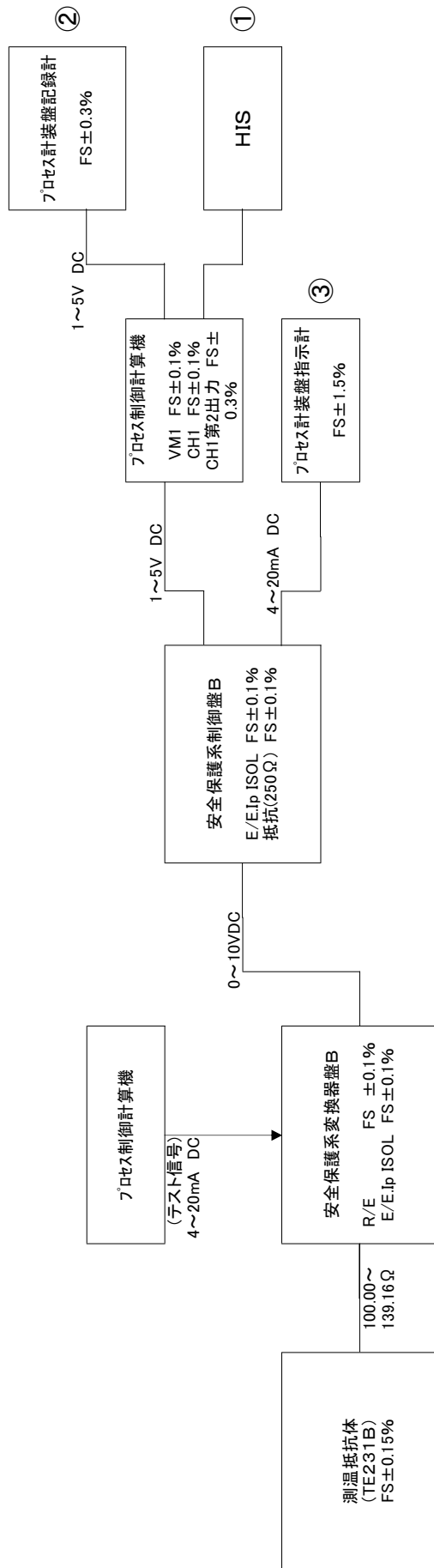


Fig. 5. 2 重水温度計(B系)の計器構成図と機器精度

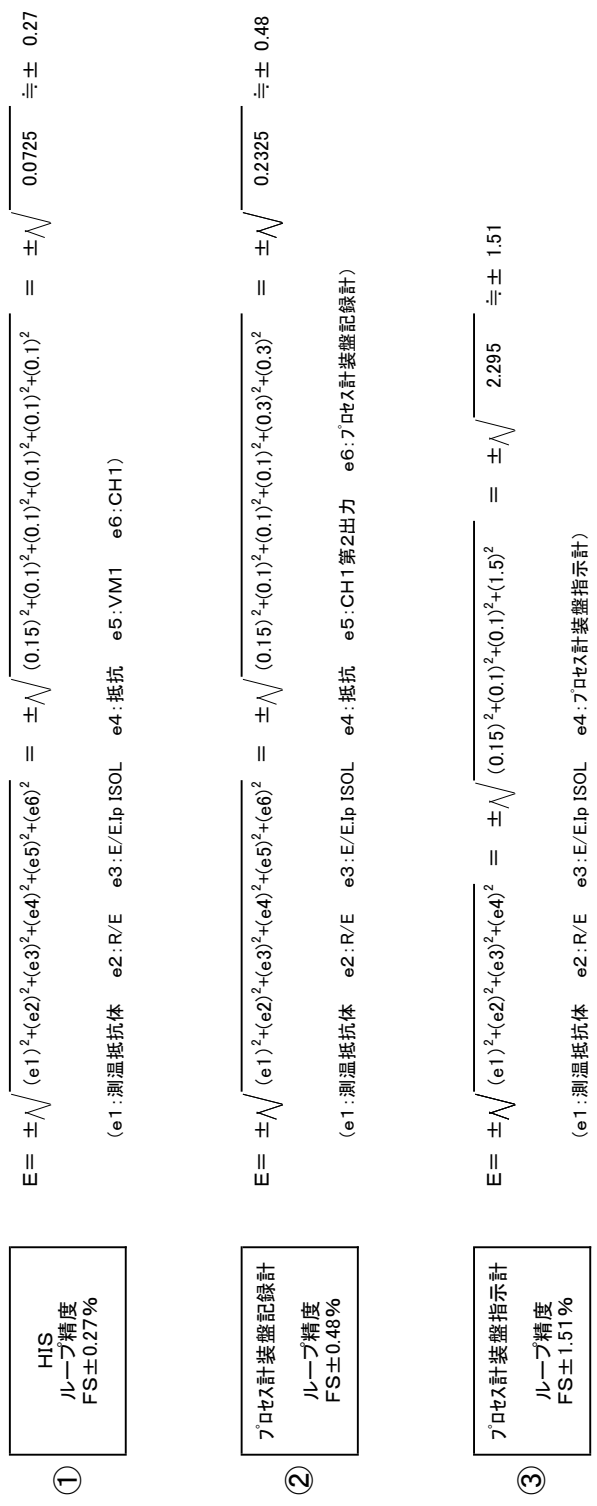


Fig. 5.3 重水温度計(A・B系)のループ精度

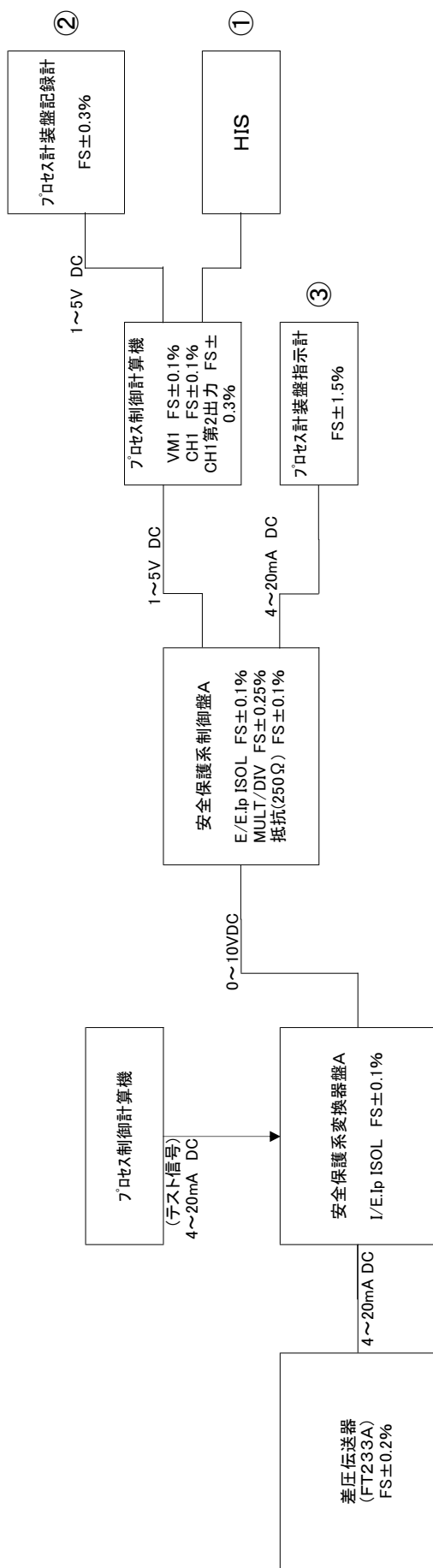


Fig. 6. 1 重水流量計 (A系) の計器構成図と機器精度

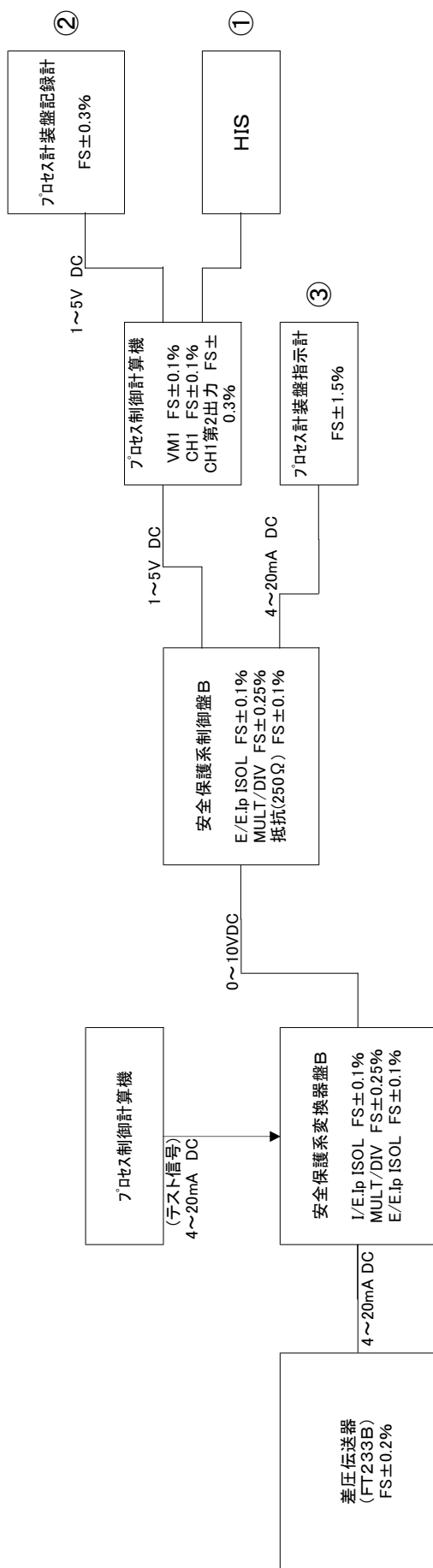


Fig. 6.2 重水流量計(B系)の計器構成図と機器精度

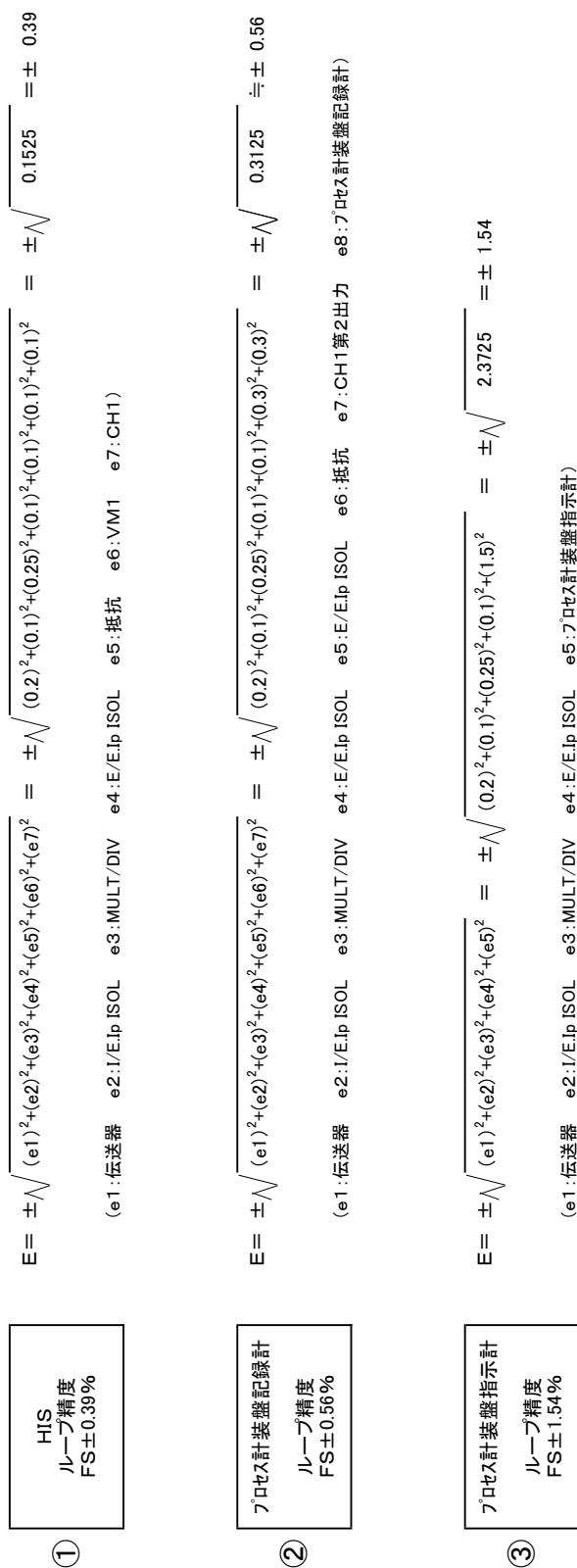


Fig. 6.3 重水流量計(A・B系)のループ精度

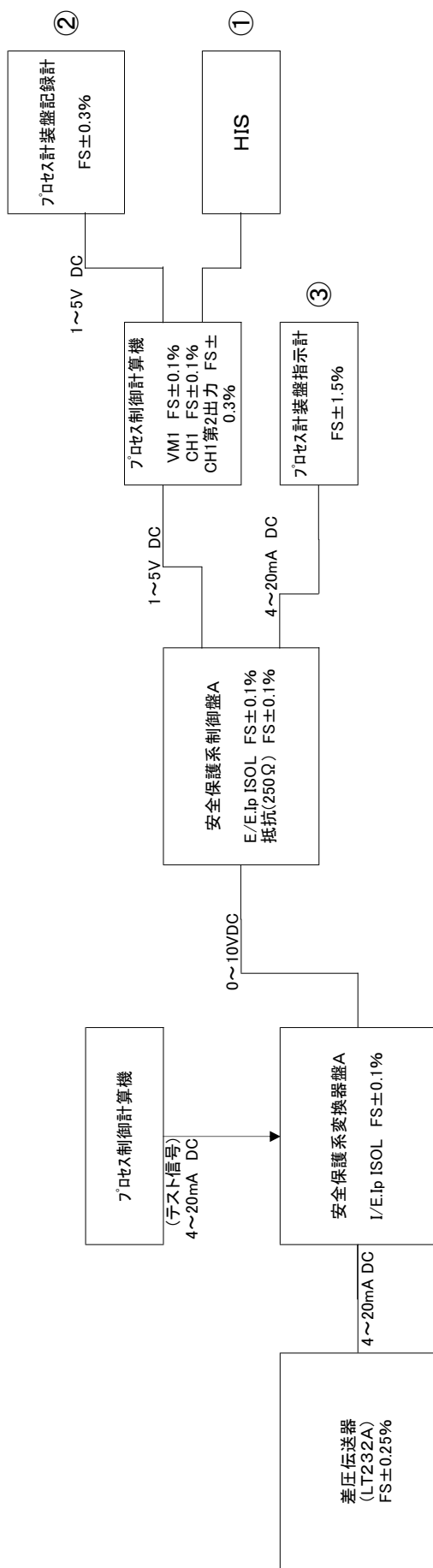


Fig. 7. 1 重水溢流タンク水位計 (A系) の計器構成図と機器精度

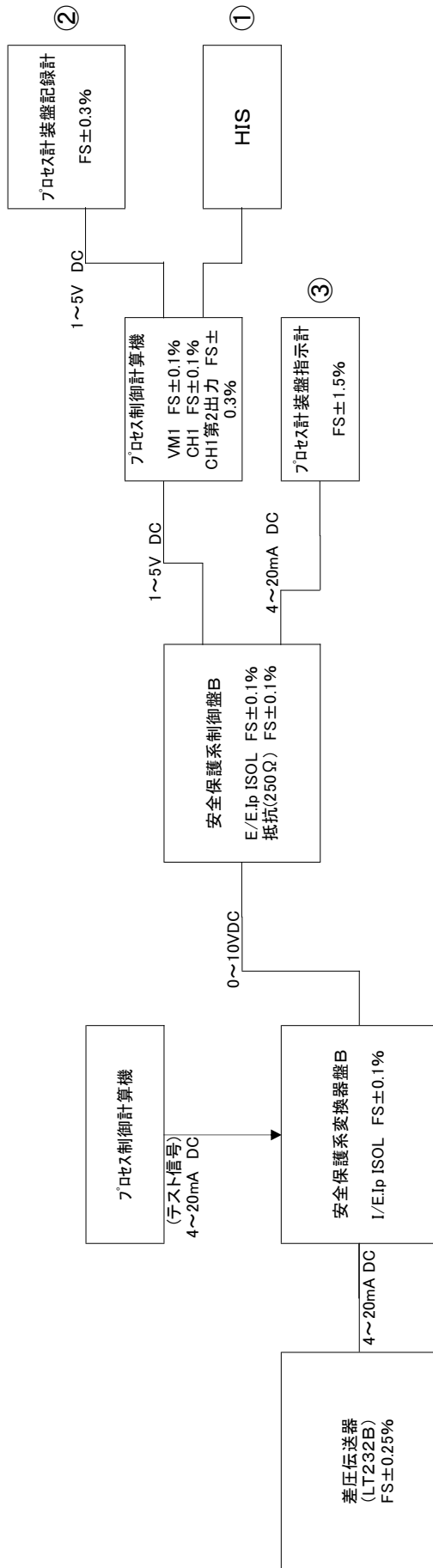


Fig. 7.2 重水溢流タンク水位計 (B系) の計器構成図と機器精度

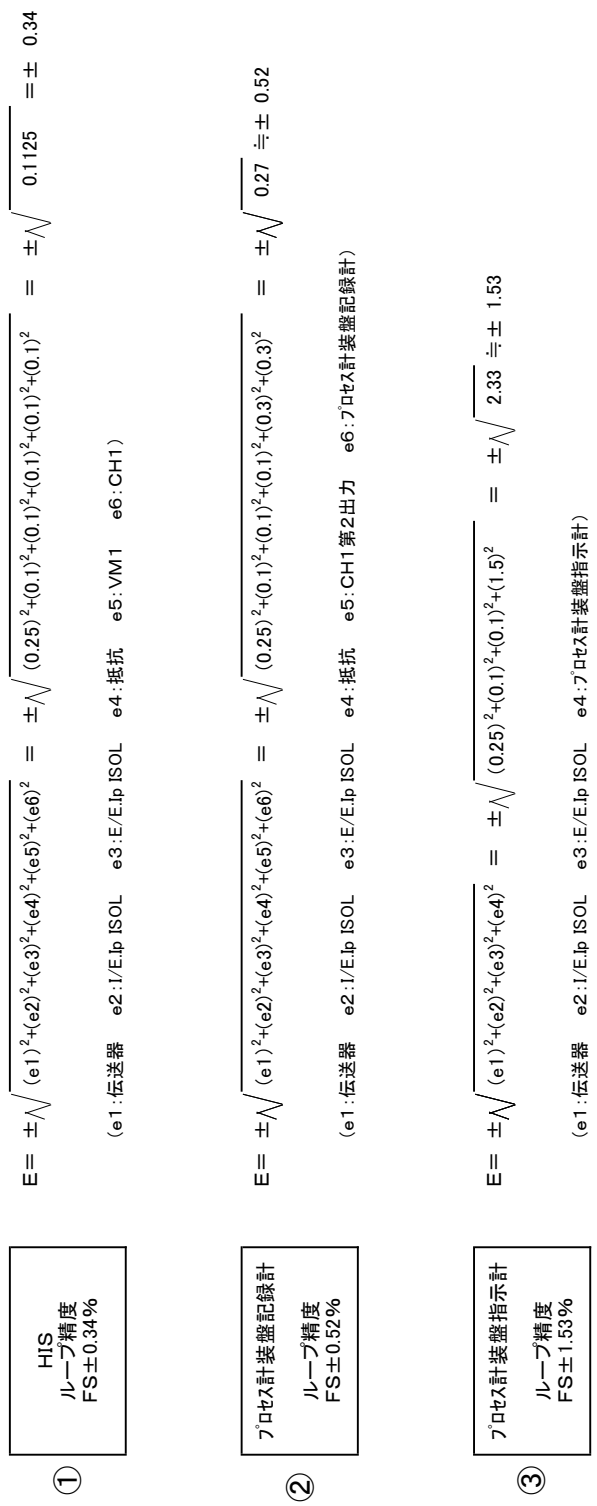


Fig. 7. 3 重水溢流タンク水位計(A・B系)のループ精度

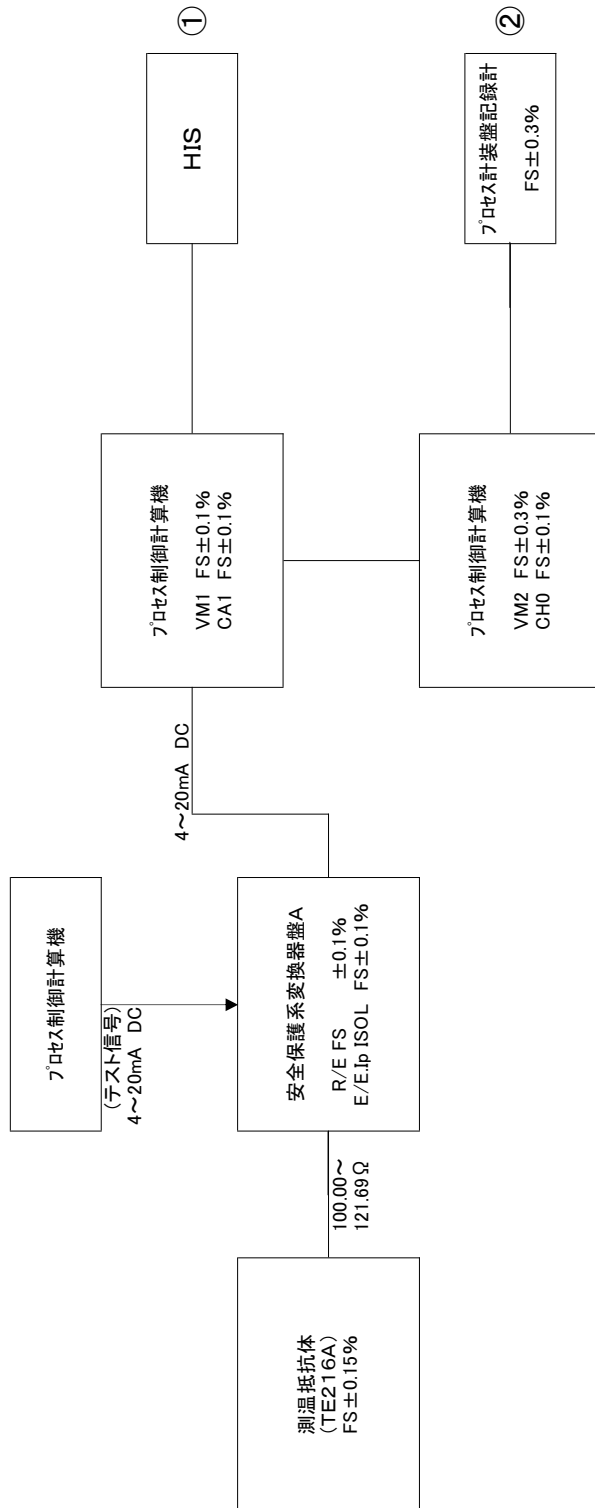


Fig. 8. 1 1次冷却材炉心入口温度計(A系)の計器構成図と機器精度

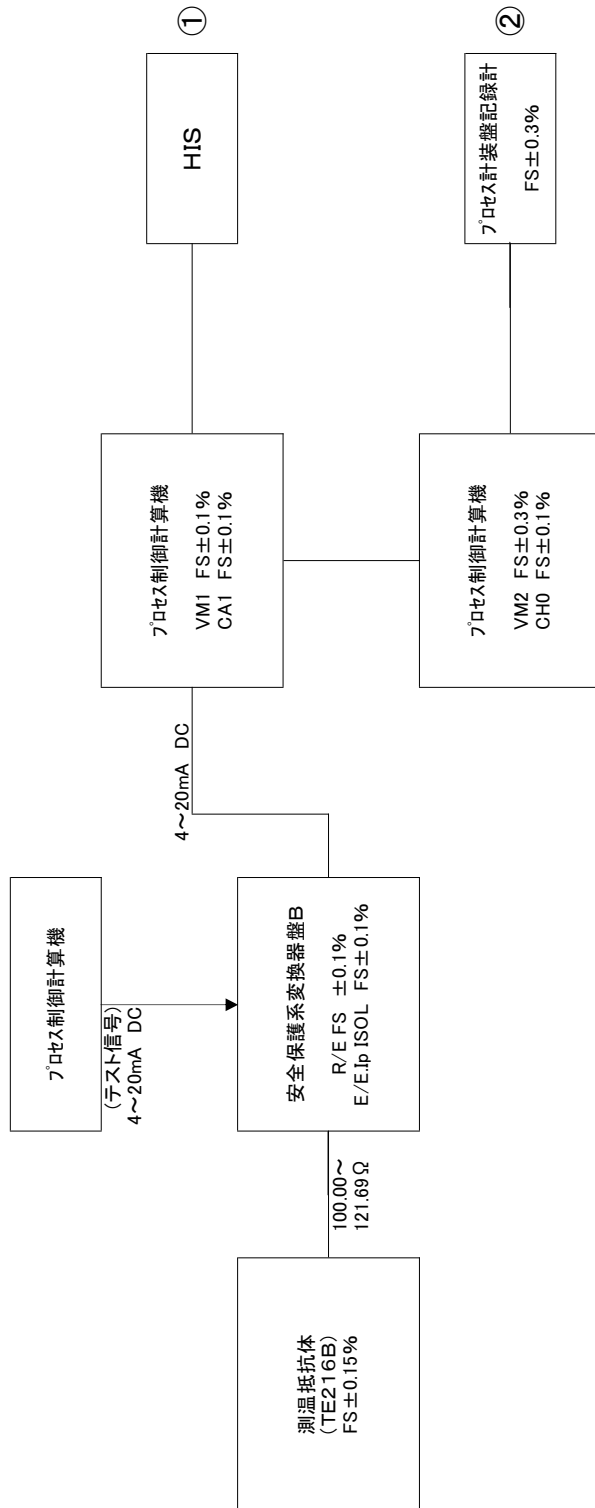


Fig. 8. 2 1次冷却材炉心入口温度計(B系)の計器構成図と機器精度

①

HIS
ループ精度
FS±0.25%

$$E = \pm \sqrt{(e1)^2 + (e2)^2 + (e3)^2 + (e4)^2 + (e5)^2} = \pm \sqrt{(0.15)^2 + (0.1)^2 + (0.1)^2 + (0.1)^2 + (0.1)^2} = \pm \sqrt{0.0625} = \pm 0.25$$

(e1: 測温抵抗体 e2: R/E e3: E/E Ip ISOL e4: VM1 e5: CA1)

②

プロセス計装盤記録計
ループ精度
FS±0.50%

$$E = \pm \sqrt{(e1)^2 + (e2)^2 + (e3)^2 + (e4)^2 + (e5)^2 + (e6)^2 + (e7)^2 + (e8)^2} = \pm \sqrt{(0.15)^2 + (0.1)^2 + (0.1)^2 + (0.1)^2 + (0.1)^2 + (0.1)^2 + (0.1)^2 + (0.3)^2} = \pm \sqrt{0.255} = \pm 0.50$$

(e1: 測温抵抗体 e2: R/E e3: E/E Ip ISOL e4: VM1 e5: CA1 e6: VM2 e7: CHO e8: プロセス計装盤記録計)

Fig. 8. 3 1次冷却材炉心入口温度計(A・B系)のループ精度

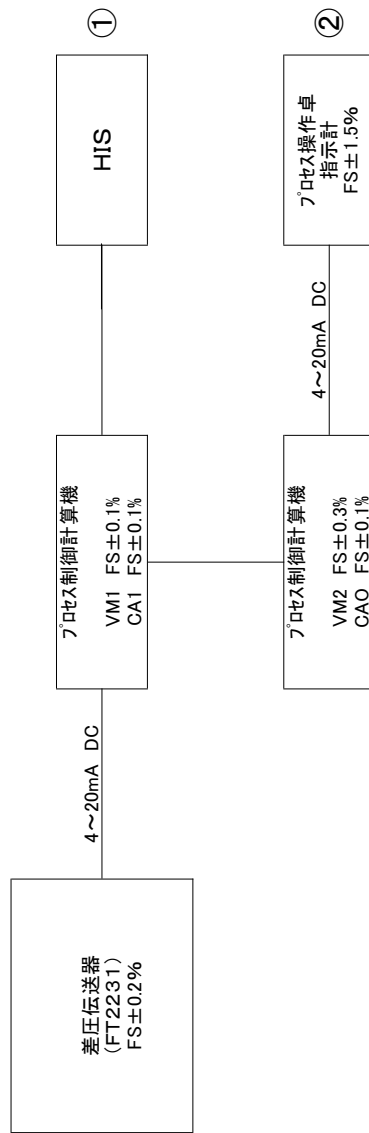


Fig. 9. 1 2次冷却材流量計の計器構成図と機器精度

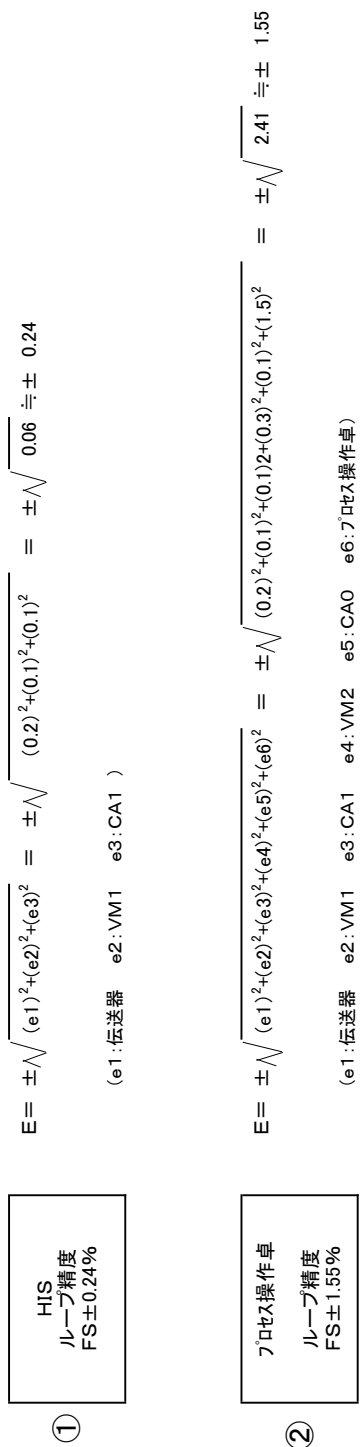


Fig. 9. 2 2次冷却材流量計のループ精度

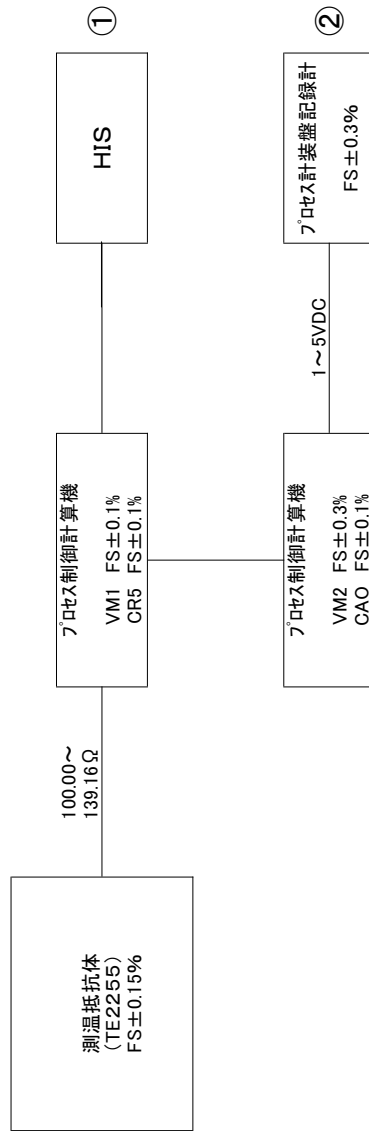


Fig. 10. 1 2次冷却塔入口温度計の計器構成図と機器精度

①

HIS
 ループ精度
 FS±0.21%

$$E = \pm \sqrt{(e1)^2 + (e2)^2 + (e3)^2} = \pm \sqrt{(0.15)^2 + (0.1)^2 + (0.1)^2} = \pm \sqrt{0.0425} \approx \pm 0.21$$

(e1: 測温抵抗体 e2: VM1 e3: CR5)

②

プロセッサ装盤記録計
 ループ精度
 FS±0.48%

$$E = \pm \sqrt{(e1)^2 + (e2)^2 + (e3)^2 + (e4)^2 + (e5)^2 + (e6)^2} = \pm \sqrt{(0.15)^2 + (0.1)^2 + (0.1)^2 + (0.1)^2 + (0.1)^2 + (0.3)^2} = \pm \sqrt{0.2325} \approx \pm 0.48$$

(e1: 測温抵抗体 e2: VM1 e3: CR5 e4: VM2 e5: CA0 e6: プロセッサ装盤記録計)

Fig. 10.2 2次冷却塔入口温度計のループ精度

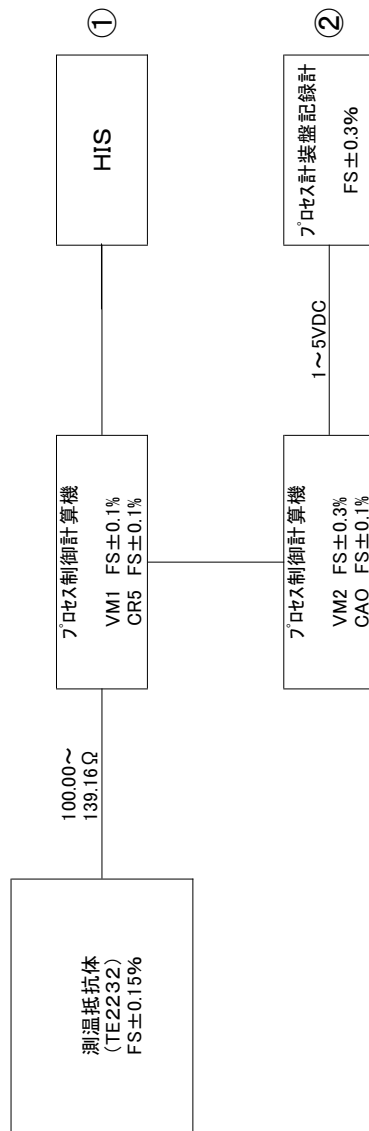


Fig. 11.1 2次冷却塔出口温度計の計器構成図と機器精度

①

HIS
ループ精度
FS±0.21%

$$E = \pm \sqrt{(e1)^2 + (e2)^2 + (e3)^2} = \pm \sqrt{(0.15)^2 + (0.1)^2 + (0.1)^2} = \pm \sqrt{0.0425} \approx \pm 0.21$$

(e1: 測温抵抗体 e2: VM1 e3: CR5)

②

プロセス計装盤記録計
FS±0.48%

$$E = \pm \sqrt{(e1)^2 + (e2)^2 + (e3)^2 + (e4)^2 + (e5)^2 + (e6)^2} = \pm \sqrt{(0.15)^2 + (0.1)^2 + (0.1)^2 + (0.3)^2 + (0.1)^2 + (0.3)^2} = \pm \sqrt{0.2325} \approx \pm 0.48$$

(e1: 測温抵抗体 e2: VM1 e3: CR5 e4: VM2 e5: CAO e6: プロセス記録計)

Fig. 11. 2 2次冷却塔出口温度計のループ精度

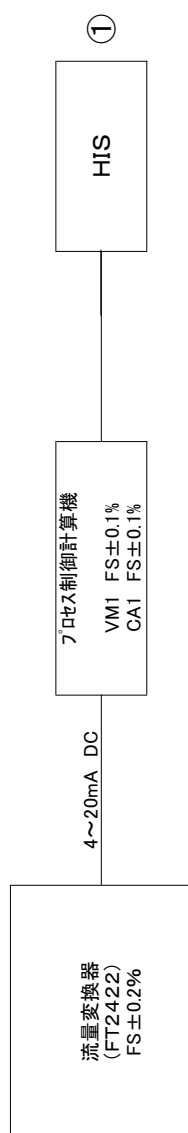


Fig. 12. 1 ヘリウム流量計の計器構成図と機器精度

HIS
 ループ精度
 FS±0.24%

①

$$E = \pm \sqrt{(e1)^2 + (e2)^2 + (e3)^2} = \pm \sqrt{(0.2)^2 + (0.1)^2 + (0.1)^2} = \pm \sqrt{0.06} \doteq \pm 0.24$$

(e1: 伝送器 e2: VM1 e3: CA1)

Fig. 12.2 ヘリウム流量計のループ精度

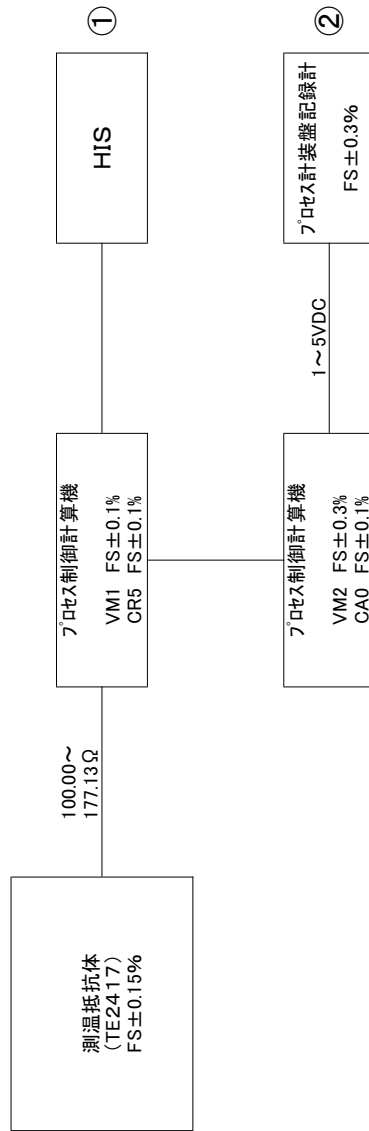


Fig. 13. 1 重水再結合器入口温度計の計器構成図と機器精度

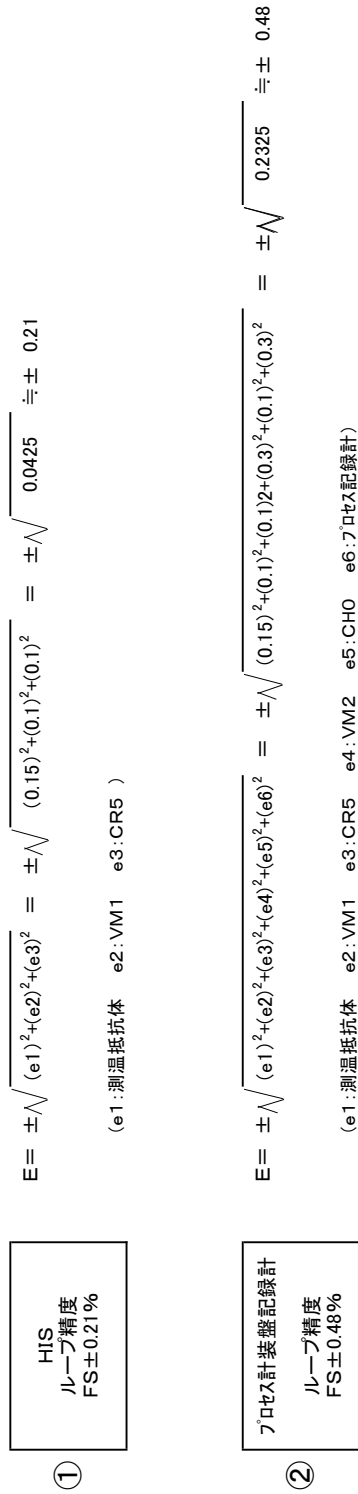


Fig. 13.2 重水再結合器入口温度計のループ精度

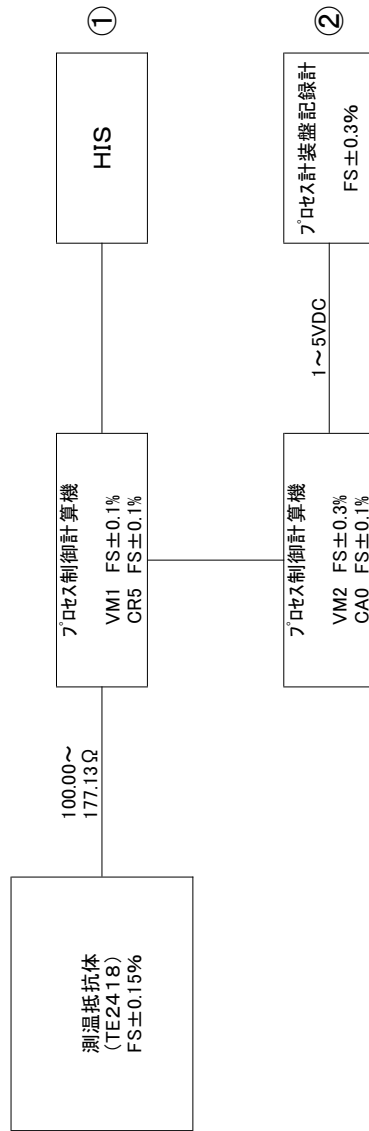


Fig. 14. 1 重水再結合器出口温度計の計器構成図と機器精度

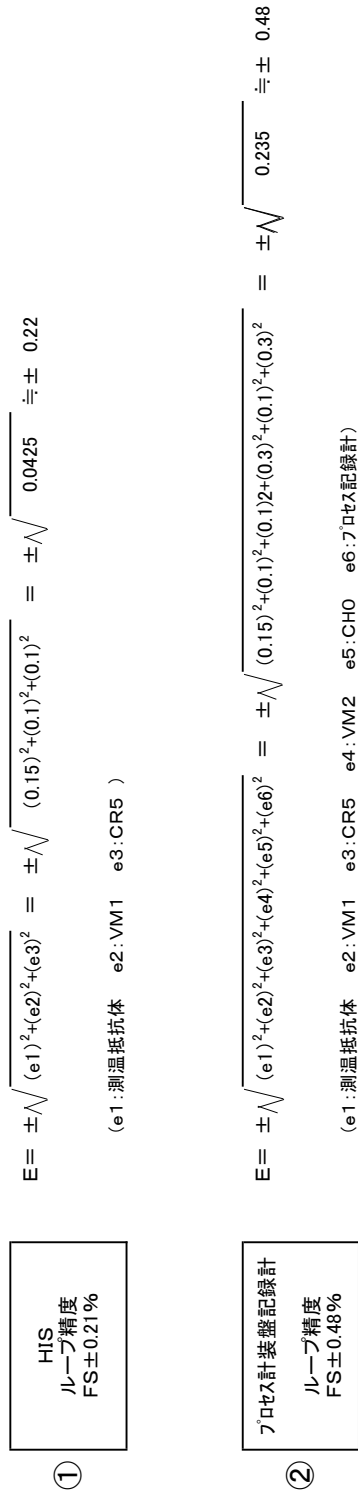


Fig. 14.2 重水再結合器出口温度計のループ精度

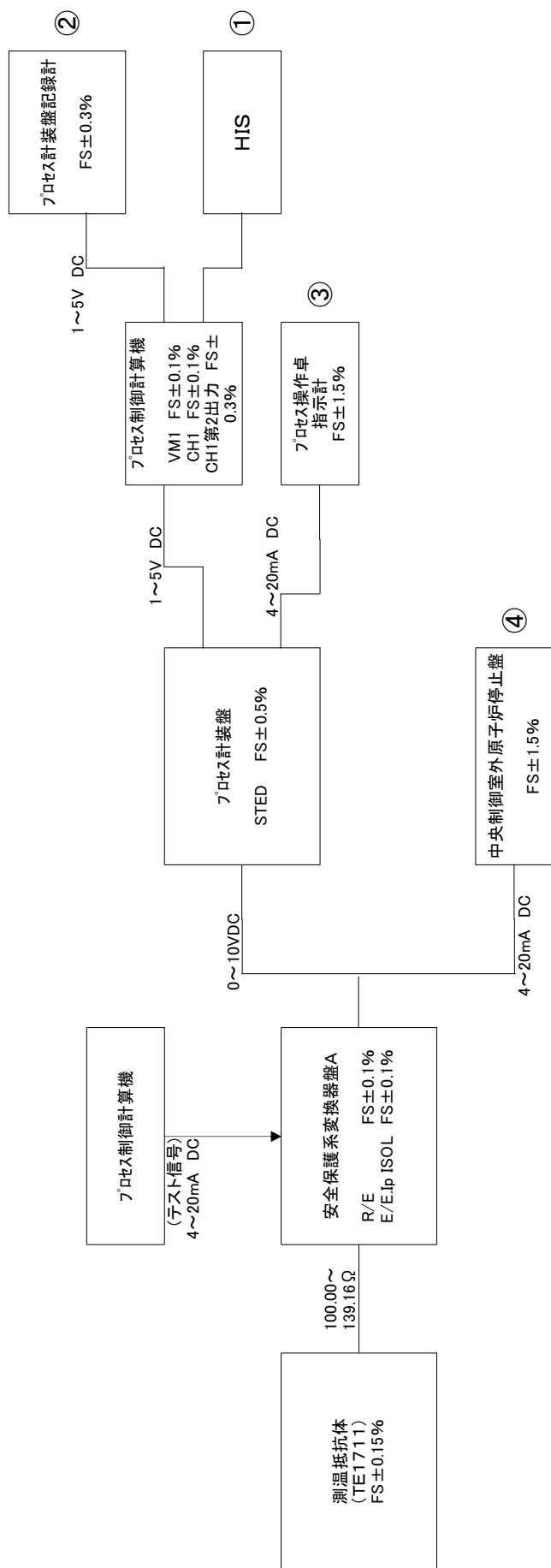


Fig. 15. 1 原子炉プール水温度計の計器構成図と機器精度

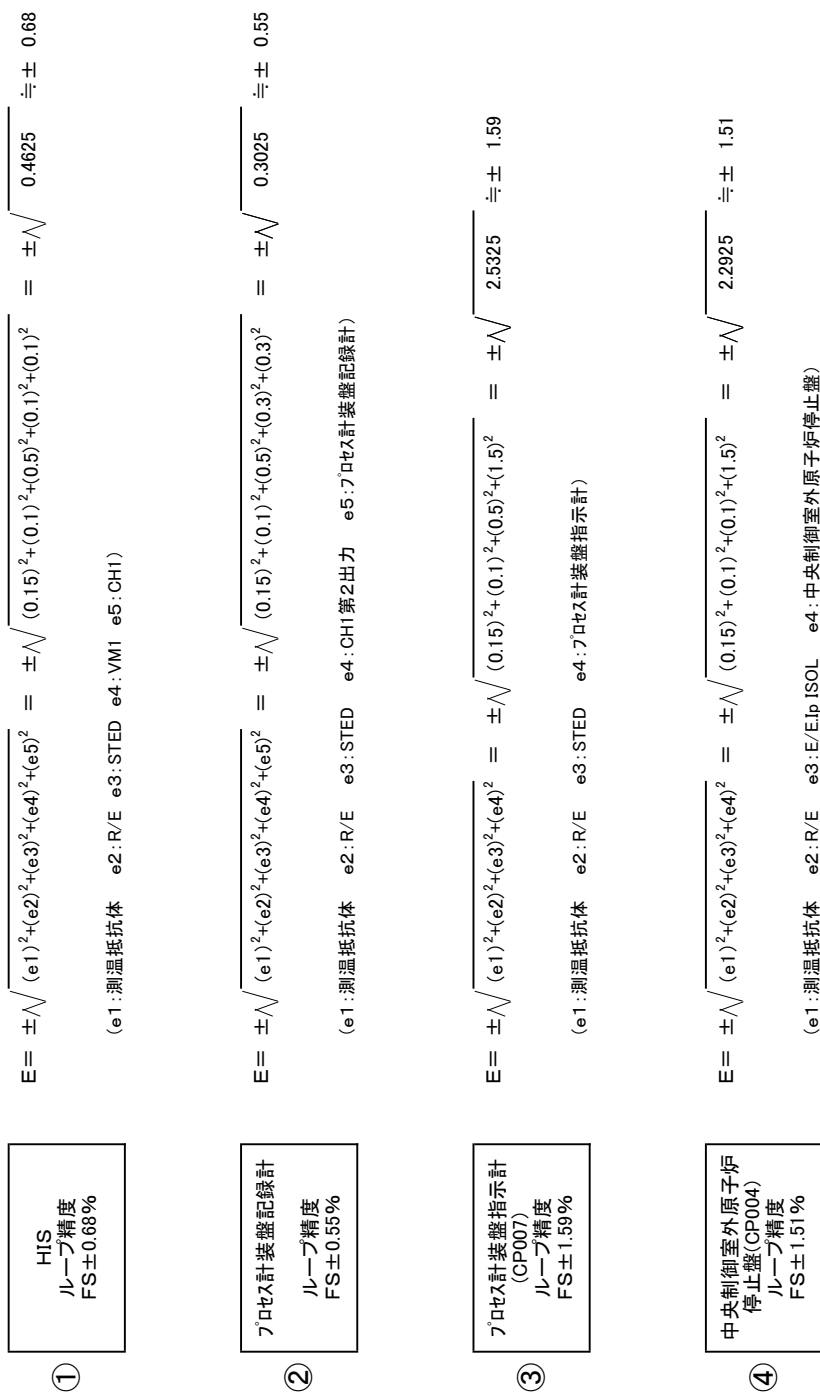


Fig. 15.2 原子炉プール水温度計のループ精度

This is a blank page.

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
物質の量	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	立方メートル	m ³
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
質量体積 (比体積)	立法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
(物質の)濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	(数の) 1	1

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3. 固有の名称とその独自の記号で表される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 ^(a)	rad		m ² ・m ⁻¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m ² ・kg ² ・s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ・kg ² ・s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg ² ・s ⁻²
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg ² ・s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s ² ・A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg ² ・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 ² ・s ⁻³ ・A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
磁束密度	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・A ⁻¹
磁束	テスラ	T	Wb/m ²	kg ² ・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C		K
光照射度	ルーメン	lm	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
放射能	ベクレル	Bq	lm/m ²	m ² ・m ⁻⁴ ・cd=m ⁻² ・cd
吸収線量, 質量エネルギー分与, カーマ線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	グレイ	Gy	J/kg	s ⁻¹
	シーベルト	Sv	J/kg	m ² ・s ⁻²

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作る際のいくつかの用例は表4に示されている。
 (b) 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“1”は明示されない。
 (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
 (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含む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
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa・s	m ⁻¹ ・kg ² ・s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N・m	m ² ・kg ² ・s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg ² ・s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m ² ・m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m ² ・m ⁻¹ ・s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg ² ・s ⁻³
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー	ジュール毎キログラム	J/K	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
質量エネルギー (比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	m ² ・kg ² ・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 ² ・s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m ² ・kg ² ・s ⁻³ ・A ⁻¹
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ ・s ² ・A
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ・s ² ・A
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 ² ・kg ² ・s ⁻² ・A ²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² ・kg ² ・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 ² ・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 ・s ² ・A
吸収線量	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 ² ・s ⁻³ =m ² ・kg ² ・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 ² ・s ⁻³ =kg ² ・s ⁻³

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648000) rad
リットル	l, L	1 l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1 Np=1
ベル	B	1 B=(1/2) ln10 (Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位で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 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1 u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1 ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里		1 海里=1852m
ノット		1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1 a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バール	b	1 b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エル	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=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G=10 ⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe=(1000/4π) A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx=10 ⁻⁸ Wb
スチル	sb	1 sb=1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位		1 X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ	fem	1 femi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 metric carat=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カリ	cal	1 cal=4.184 J
マイクロン	μ	1 μ=1um=10 ⁻⁶ m

