

海外出張報告書

EBR-IIのNa液面計に関する調査

1980年9月

技術資料コード

開示区分	レポートNo.
	N 960 80-08

この資料は 図書室保存資料です
閲覧には技術資料閲覧票が必要です

動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室

動力炉・核燃料開発事業団

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

PNC-TN960 80-08

1980年 9月

海外出張報告書

EBR-IIのNa液面計に関する調査

小宮一好*

要 旨

本調査報告書は、PNC-DOE間のプラント経験ワーキンググループの協定に基づき実施された第2回目のEBR-II運転訓練の際に入手した資料を元に作成したものである。

EBR-IIでは数種の型のレベル計測装置が設計、製作されて1次タンク内ナトリウム中で試験されたが、使用雰囲気であるナトリウムの高温、腐食性、放射性等に起因する検出器の絶縁劣化、計測回路の電気的なトラブル等のために、その多くは使用不能に陥った。

本報告書ではそれらのレベル計測装置の中から抵抗プローブ型及び差圧式レベル計測装置と、後に設計製作されて現在でも順調に作動しているフロート型レベル計測システムについてその調査結果を報告する。

*大洗工学センター高速実験炉部原子炉一課

目 次

1. 緒 言	1
2. ナトリウムレベル測定の必要性	2
3. EBR-II での Na レベル計測装置に関する経験	4
3.1 抵抗プローブ型レベル計測システム	4
3.2 差圧式レベル計測システム	4
4. フロート型レベル計測システム	10
5. フロート型レベル計測システムの運転結果	15
6. 結 言	16
7. APPENDIX	17
8. 参考文献	18

EBR-IIのナトリウムレベル測定システム

1. 緒 言

原子炉容器内のナトリウムレベルの測定は、ナトリウムが高温（約370°C）であること、腐食性、導電性及び放射能を持つこと等の理由で難かしい。液体ナトリウムのレベル測定のために、電気機械式プローブ、抵抗プローブ、差圧ユニット、インダクタンスプローブ等、数種の計測装置が開発されたが、これらはいずれも上記理由等に関係する固有の欠点を有していた。

EBR-IIでは当初二つの型のレベル検出器が、全ての運転状態での1次タンク内ナトリウムレベル測定のために、タンク内にナトリウムを充填する前に備え付けられた。1つは抵抗プローブ型でレベル表示のみに用いられた。他の1つは静圧ヘッドの測定原理に基づく差圧式レベル測定システムであるが、温度検出器すなわち補償器が組み込まれ、装置はナトリウム温度の変化の結果生ずるレベル変動のみを表示した。（1次タンク内のナトリウム量は一定なので、ナトリウム温度が変化しても静圧ヘッドは変化しない。）後者の装置はレベル表示及び警報、そして原子炉スクラムシステムの1次タンク内ナトリウム高及び低レベルトリップ回路の作動用に使用された。

しかしながらこれらのレベル検出器はいずれも変換器に関係した電気的な問題、温度補償上の問題等が生じ、装置の信頼性が損なわれ使用出来なくなっている。

原子炉で用いられるナトリウムレベル測定システムでは精度、リニアリティが良く、キャリブレーション頻度が少なく長期に亘り安定であること、補修頻度が少ないと等が要求される。EBR-IIではこれらの要求に合致した新しい型の浮力シリンダーを用いたナトリウムレベル検出装置を設置した。

本調査報告書では、当初用いられた抵抗プローブ型、および差圧式レベル測定システムと、現在使用されている浮力シリンダーを用いたフロート型レベル測定システムについて概説する。

2. ナトリウムレベル測定の必要性

Fig. 1にEBR-IIの1次タンクを示す。タンク内には86000 gal. (325.5 kℓ) のナトリウムが入っている。タンクはポット型であるのでタンク内のナトリウム量の増減はない。通常タンク内ナトリウムレベルの変動は、ナトリウム温度の変化のみにより生ずる。原子炉運転中、1次タンク内のナトリウム平均温度は700°F (約370°C) に保たれているので、タンク内ナトリウムレベルは、1次タンク床面より約299in (7.6 m) 上部、1次タンクカバー底部より17in (0.43 m) 下部となっている。1次タンク内ナトリウムの平均温度が1°F (0.56°C) 変化するとナトリウムレベルは^{*}0.032in (0.08 cm) 変化する。これは保修等のために1次タンク内ナトリウム温度が350°F (177°C) に冷却された場合、ナトリウムレベルが約11in (約28cm) 低下することに相当する。温度変化以外の原因による1次タンク内ナトリウムレベルの変動は、異常あるいは重大な事態が生じた事を意味する。例えば原子炉運転期間中の1次タンク内ナトリウムレベルの上昇は中間熱交換器の漏洩が想定され、2次系ナトリウムが1次タンク内に漏出したことが推定される。一方ナトリウムレベルの下降（ナトリウム温度が一定の場合）は1次タンク内壁からの漏洩が推定される。従ってEBR-IIでは、1次タンク内ナトリウムレベルの監視を行い、異常が認められた場合には、タンク内ナトリウムレベル高 (+7 in : 17.8 cm) あるいは低 (-7 in : -17.8 cm) で原子炉をトリップさせ重大事故に至る可能性を防止している。

*このレベル変動値は、ナトリウム温度280°F (約138°C) から700°F (約370°C) 間のレベル変動をスパークプラグ型プローブで測定した値を平均したものである。

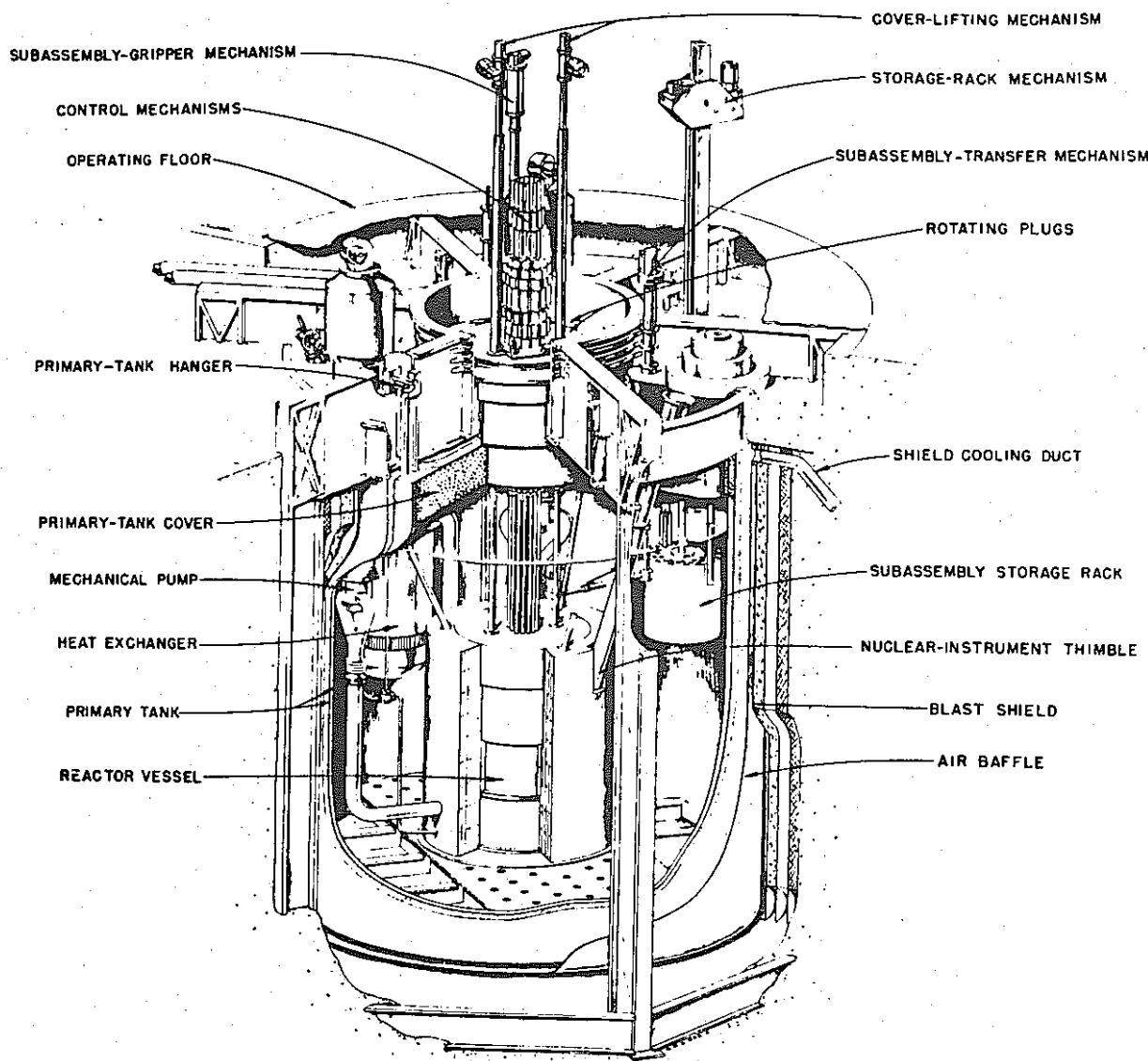


Fig. 1 EBR-II Primary Tank

3. EBR-IIでのNaレベル計測装置に関する経験

3.1 抵抗プローブ型レベル計測システム

Fig. 2 に抵抗プローブ型レベル計測装置を示す。抵抗プローブアッセンブリーは、すえ付けフランジから下方の溶融ナトリウム中に伸びる数種の異なる長さのチューブから構成されている。Fig. 3 に抵抗プローブアッセンブリーの詳細図を示す。プローブの本数は全部で25本あり、フランジの中央にすえ付けられているセンター・プローブ (PROBE No. 25) がコモン・プローブと称される。これらのプローブは304ステンレス鋼製チューブで内側には同心状に銅棒がすえ付けられており、センター・プローブ以外は、下端部を除き銅棒とチューブとは電気的に絶縁されている。銅棒とチューブは良好な電気的接触をもたせるために下端部でハンダづけられている。

(センター・プローブは上端部で、銅棒、チューブともフランジにハンダづけされている。)

Fig. 4 に抵抗プローブ型レベル測定回路のブロックダイアグラムを示す。プローブの各々は、プローブがナトリウムと接触していない時には平衡が保たれているそれぞれのブリッジ回路に接続されており、プローブの全電気抵抗は、低抵抗の銅棒と高抵抗の薄壁ステンレス鋼製チューブとの総和になっている。特定のプローブの一つにナトリウムが接触すると、フランジの中央にすえ付けられているコモン・プローブとの間に閉回路ができ、この抵抗変化がブリッジ回路を不平衡にし、リレーを作動させ、表示灯を点灯させる。この装置は1次タンクの頂部から吊り下げられており、F-1ノズルを通してタンク内ナトリウム中へ延長されている。これら全てのプローブのブリッジ回路はF-1ノズル近傍のビーム上に設置されている。

ブリッジ回路アッセンブリーからの出力信号は、中央制御室にあるグラフィックパネル1次系統部分の一連のタンクレベル表示灯へ送信される。レベルは数インチ (1 及至 2 in) 増加毎に段階的に、個々のブリッジ回路の不balanceによって点灯する表示灯で示される。

この抵抗プローブ型レベル計測装置は据え付け後、抵抗プローブに関係するいくつかの問題が伴い間欠的にしか作動しなかった。最も共通した問題点としては、(1)電源供給ユニットがフィルターと変圧器の故障による補修頻度が高く、最も頻繁に破損した。(2)リレーが供給電源の変動に対して敏感で動作点の設定が難かしく、温度変化に起因するドリフトを受け易い。(3)プローブの絶縁が難かしく絶縁材の損傷が頻繁に生じた。

上記の如き電気的な問題が装置の信頼性を損い、もはや使用出来ない状態となり、ここ数年間は使用されていない。

3.2 差圧式レベル計測システム

Fig. 5 に差圧式レベル計測装置を示す。レベル検出器はNa-Kを封入したダイヤフラム式差圧検出セルで、差圧検出セルは1次タンク内ナトリウム中にありタンク底部に設置されている。差圧検出セルの高圧側はタンク底部でタンク内ナトリウム中に開放されている。差圧検出セルの低圧側はタンク内ナトリウム上部の不活性ガスブランケット (Ar カバーガス空間) に開放しているチューブに接続されている。Na-Kが封入してある毛細管が、差圧検出セルか

ら1次タンクカバー上部に設置されている差圧セル及びストレンジゲージ変換器に繋れている。これらの構成要素及び電気回路は差圧測定システムで用いられているものと同様であるが、この回路には1次タンク内ナトリウム温度の変化を補償する熱電対からの信号が繋れている。温度補償なしでは、圧力トランスマッターは1次タンク内ナトリウムレベルではなく、タンク内ナトリウムの静圧ヘッドのみを測定することになる。レベルトランスマッターとして作動するためには、差圧検出装置は温度変化のみによるレベル変動の表示に対して非常に広範囲に亘る温度補償器を設けなければならない。これは圧力測定点のナトリウム温度を測定するサーモカップルを付け加えることによりなされた。

システムの圧力伝送部分は良好に作動したが、温度補償用サーモカップルは1次タンク内ナトリウムの平均温度を代表しておらず、原子炉出力変更時等に差圧検出部近傍のナトリウム温度のわずかな変化によっても温度補償器が過大補償傾向を示し数多くの誤レベルトリップを引き起した。差圧式レベル検出器は1次タンクカバーのF-2ノズル内にすえつけられたままであるが抵抗プローブ型レベル検出器と同様に現在では使用されていない。

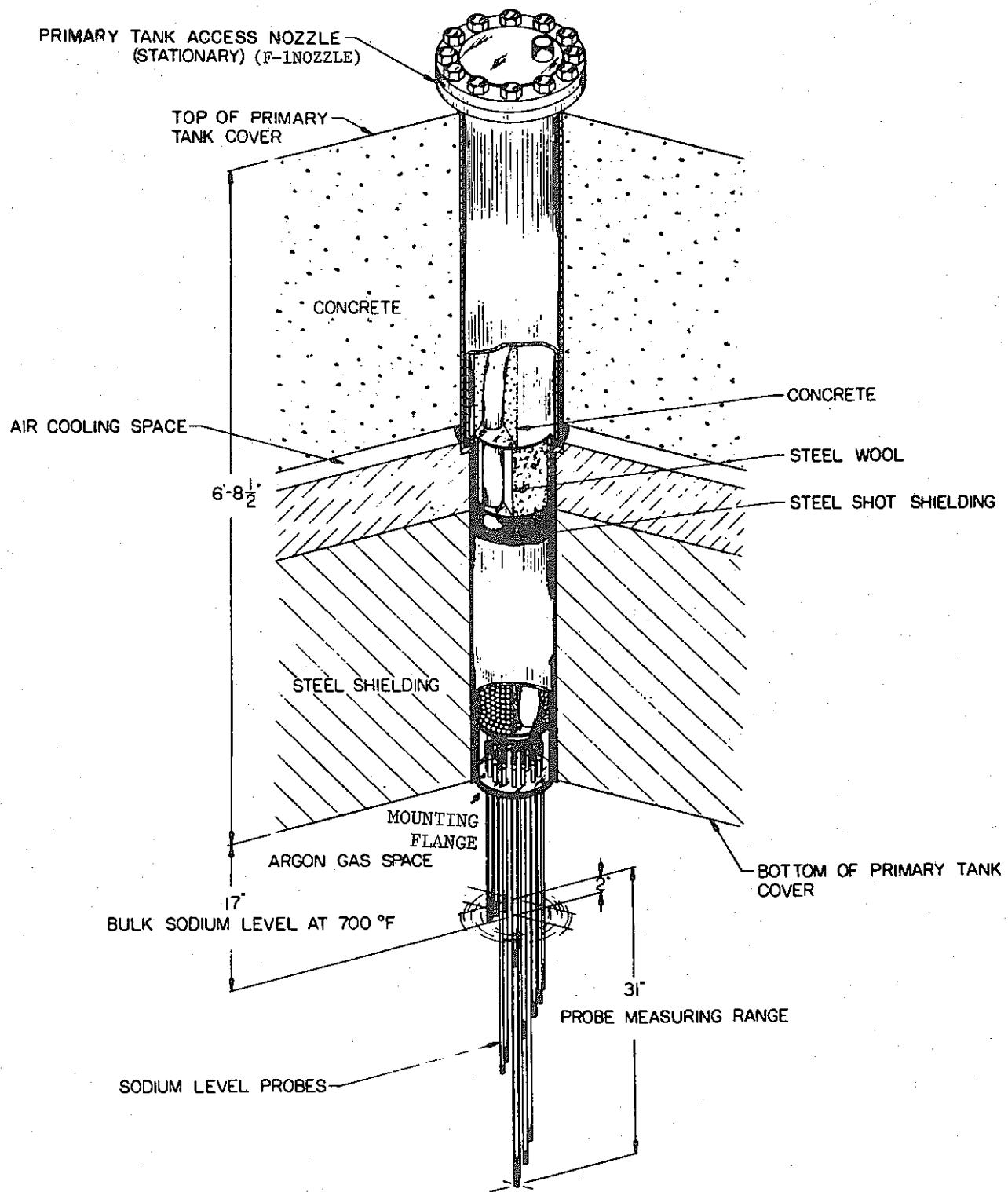


Fig. 2 . Installation of Resistance Probe

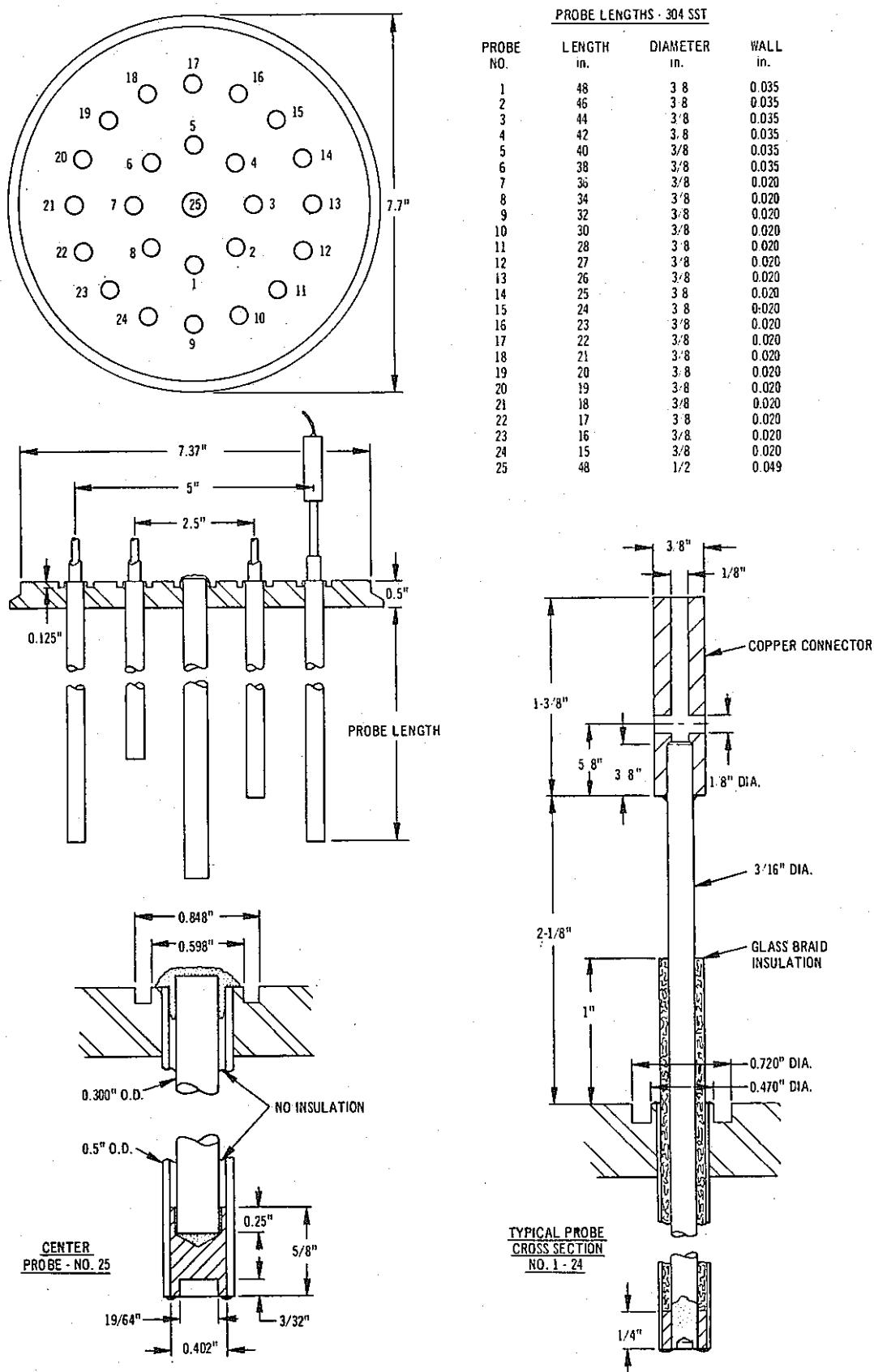


Fig. 3 Primary Tank Spiral Resistance Probe Assembly

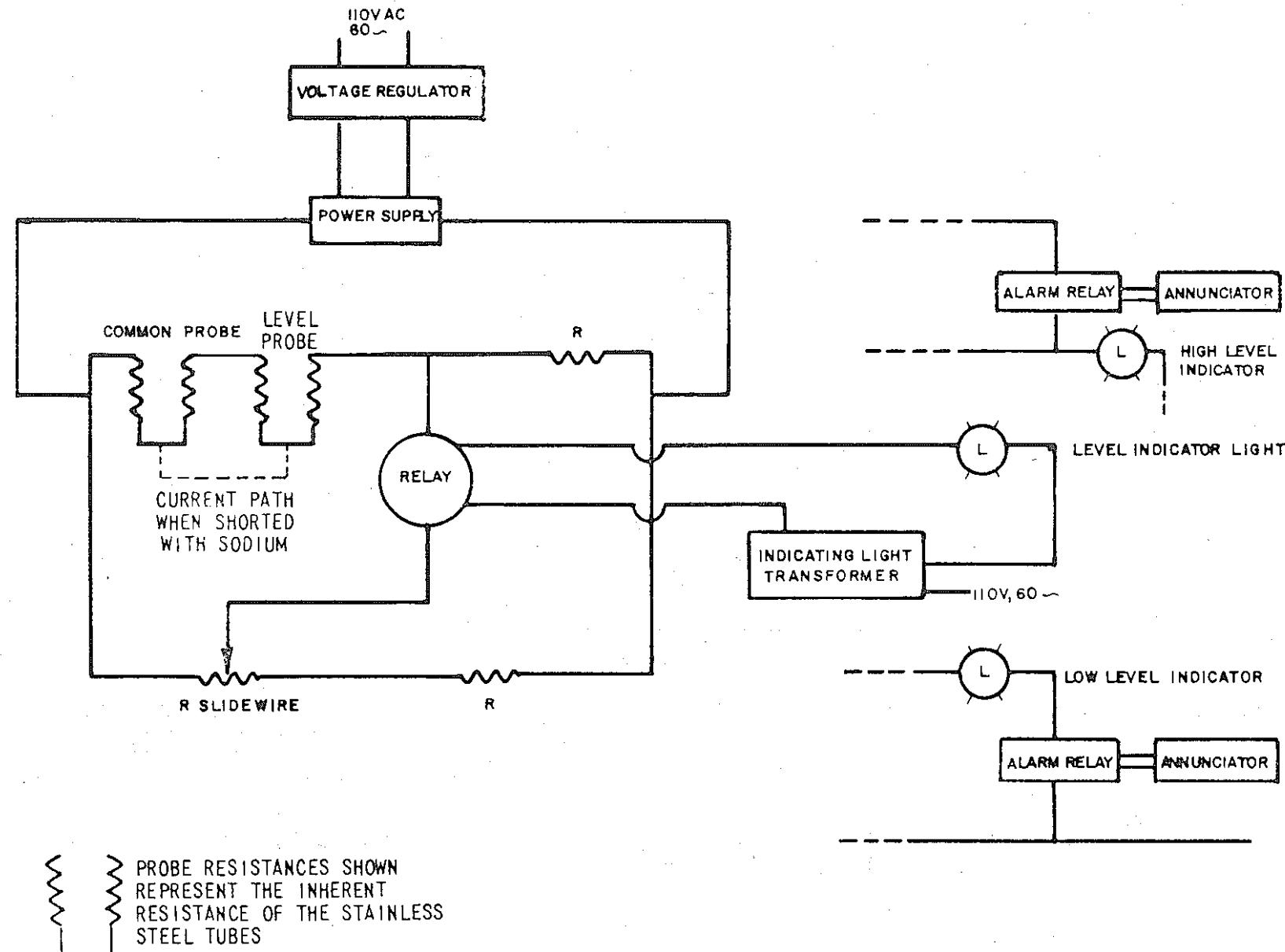


Fig. 4 Block Diagram of Typical Probe Type Level Measurement Circuit

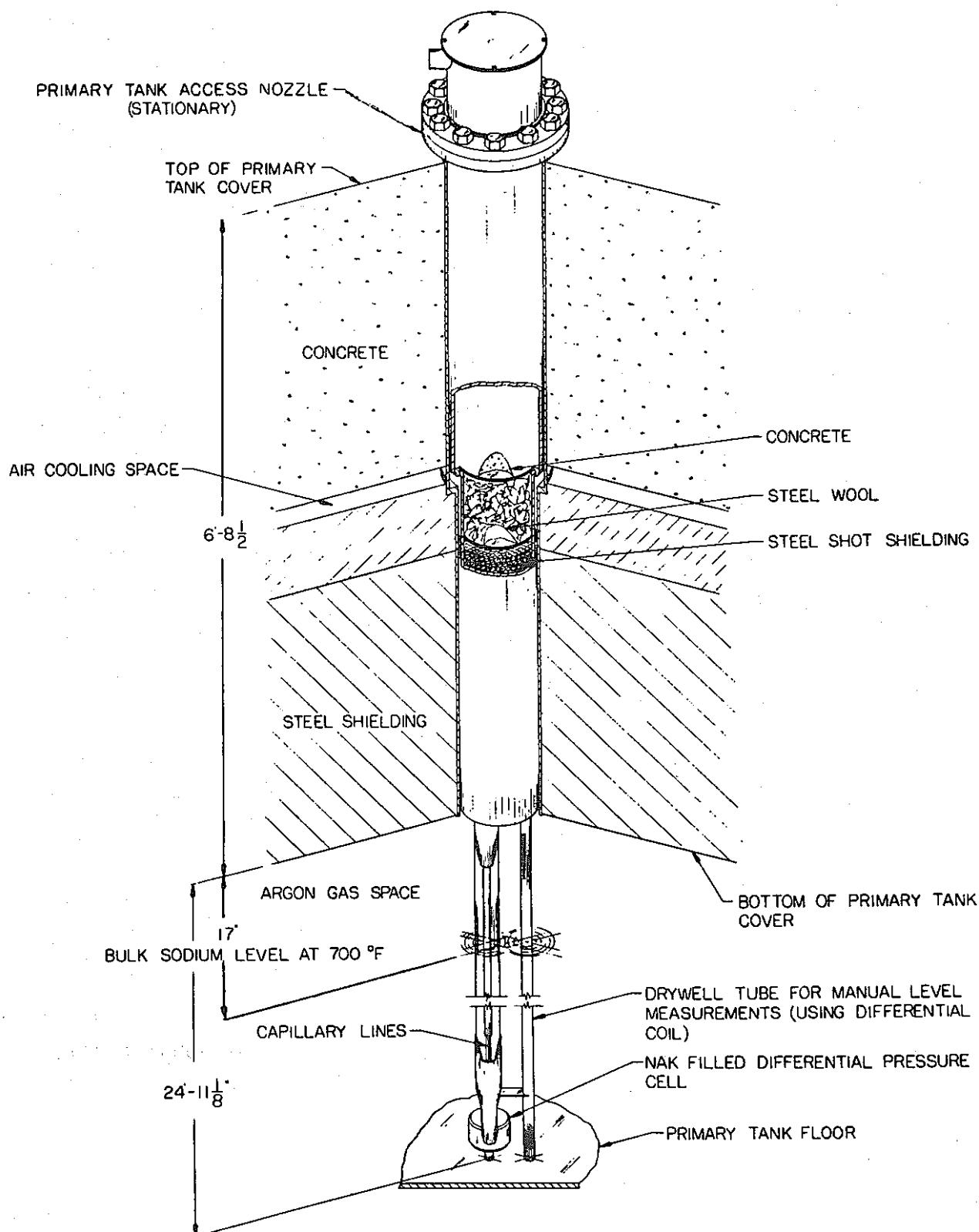


Fig. 5 Differential Pressure Type Level Transmitter

4. フロート式レベル計測システム

フロート式レベル計はアルキメデスの原理を用いたもので、すなわち浮力変換器にかかる荷重が浮力シリンダーの重量から浮力シリンダーがナトリウム中に浸漬した部分の体積に相当するナトリウムの重量を差し引いた重量に等しいと言う事を利用したものである。

Fig. 6 にフロート式レベル計測システムのブロックダイアグラムを示す。システムの構成要素は、浮力シリンダー及び浮力変換器を含むレベルトランスマッター、モジュレーター、増幅器、原子炉トリップ回路、及び表示器である。Fig. 7 にフロート式レベル計装システムのレベルトランスマッターを示す。レベルトランスマッターは1次タンクカバーの改造シールドプラグ内に設置されている。このプラグにはナトリウムの局所的な動きによる浮力シリンダーの移動を防ぐため、及び、アルゴンカバーガス中のナトリウムエアロゾルがトランスマッターの内部に入るのを制限するためにナトリウム液面下迄伸びているエクステンションチューブが取り付けられている。

遮蔽クラブの真下に、チューブ内のナトリウムレベル変化による圧力の効果を取り除くため、エクステンションチューブにはアルゴンカバーガス空間と通ずるベントホールが開けられている。レベルトランスマッターは浮力変換器、ガスシールとして作用するステンレス鋼製ベローズ、サポートロッド及び浮力シリンダーより成る。ステンレス鋼製の浮力シリンダー（外径4 in.、長さ20 in.）はわずかな鋼製の遮蔽部分を持つ直径 $\frac{1}{2}$ in のサポートロッドにより浮力変換器からつり下げられている。浮力変換器は測定範囲0~50lb (0~22.7kg) の差動変圧器型である。浮力シリンダー及びサポートロッドの重量は空気中で約45lb (20.4 kg) である。トランスマッターは1次タンク内ナトリウム温度700°F (約370°C) の時、浮力シリンダーがナトリウムに15in (約38cm) 浸漬する状態で設計されている。これは通常の700°F (約370°C) での運転時のレベルより15in (約38 cm) 下方、または5 in (約12.7 cm) 上部迄レベル表示が出来ることを考慮している。タンク内ナトリウムレベルの変動は、タンク内ナトリウム温度1°F (約0.56°C) の変化に対し0.0321 in. (0.08 cm) であるから、従って、プラント冷却期間中タンク内ナトリウム温度を220°F (約104°C) 及下げる必要がある場合でもレベルのモニターが可能である。浮力シリンダーはナトリウム中に1 in. 浸漬する毎に 12.56 in^3 (205.8 cm^3) のナトリウムと置き換わる。装置は通常1次タンク内ナトリウム温度300~700°F (約150~370°C) の間でナトリウムレベルの監視に用いられているので、浮力変換器の較正には500°F (260°C) でのナトリウムの密度が平均値あるいは参考値として用いられている。500°F (260°C) でのナトリウム密度に、浮力シリンダーがナトリウム中に1 in. 浸漬する時に置き換わる体積 12.56 in^3 (205.8 cm^3) を乗ずると、ナトリウムレベルが1 in. 変動する毎の浮力シリンダー及びサポートロッドの重量変化の平均0.4 lb (約0.18 kg) が得られる。これは空気中で45 lb (約20.4 kg) の浮力シリンダー及びサポートロッドの重量が、通常運転時のタンク内ナトリウム温度700°F (約370°C) で浮力シリンダーが15 in. (約38 cm) ナトリウム中に浸漬している時、その重量が約39lb(約17.7kg) に減少していることに相当する。浮力変換器にかかる荷重は、ナトリウムレベルが通常レベルより5in (約12.7

cm) 上部の時最小の 37 lb (約 16.8 kg) から、通常レベルより 15 in. (約 38 cm) 下方の時最大の 45 lb (約 20.4 kg) の間で変化する。

平均ナトリウム密度 ($500^{\circ}\text{F} = 260^{\circ}\text{C}$ での密度) を用いることで生じる誤差は、実際のナトリウム温度に対応する密度で補正したレベルに対して無視し得る。この誤差については、APPENDIX (付録) で計算されており、実際に表示されたレベル変動に対し、誤差は 2% 以下であることが示されている。ナトリウム温度が 350°F (約 177°C) 変化すると、実際に測定された 1 次タンクナトリウムレベルで $11\frac{1}{4}$ in. (約 28.6 cm) の変動となる。浮力変換器の変換率 0.4 lb/in. を用いて計算すると、レベル表示器は $11\frac{1}{16}$ in. (約 28.1 cm) レベル変動を示すことになる。それ故、この広範囲なナトリウムレベル変動に関する誤差はわずか $3/16$ in. (約 0.5 cm) と推定される。

トランスマッターの頂部フランジとサポートロッドの間のステンレス鋼製ベローズはリーグタイトなアルゴンガスシールを形成している。このベローズの伸縮は以下に説明する様にレベル測定上わずかな誤差の原因となる。浮力変換器の可動鉄心は、その定格負荷である 50 lb (約 22.7 kg) で 0.005 in. (約 0.13 mm) 伸びる。レベルトランスマッターが運転されるナトリウムレベル 20 in. ($+5 \sim -15 \text{ in.}$) の範囲では、ベローズの伸縮によるサポートロッド及び浮力シリンダーの動きは 0.0008 in. である。この伸縮 0.0008 in. にベローズのバネ定数 28 lb/in. を乗ずると、浮力シリンダーが $+5 \text{ in.}$ から -15 in. 迄 20 in. 変動した場合の重量変化 8 lb に対するベローズの伸びによる誤差 0.022 lb が得られる。これは 0.3% の誤差であり無視し得る。従って、トランスマッターはベローズシール部を介して浮力変換器に固定されているが、ベローズの伸縮に影響されず、浮力変換器にかかる浮力シリンダーの荷重は、ベローズがシールドアッセンブリーに接触する前後で変わらないと見做せる。

Fig. 8 にフロート式レベル計測システムの計測回路の概略図を示す。レベル計測部は、浮力変換器、モジュレーター、增幅器及び表示器より成る。回路には高低レベル ** 警報及び原子炉停止回路の一部であり通常タンクレベル (299 in. : 約 760 cm) から $\pm 7 \text{ in.}$ (約 $\pm 17.8 \text{ cm}$) に設定されているトリップ回路も含まれている。浮力変換器は、 50 lb (約 22.7 kg) の全荷重時に 0.005 in. 移動する可動鉄心型差動変圧器より成る。浮力変換器には、機械的な安全装置が上下両方向の荷重に対し、過荷重による損傷及びキャリブレーション時のシフトを避けるために取り付けられている。浮力変換器のリニアリティは 0.2% 、リピータビリティは 0.1% 、温度変化による最大の零点移動率は $0.02\%/\text{F}$ である。

モジュレーターは 1650 Hz の信号を差動変圧器に供給し、差動変圧器からの出力信号を検出する。モジュレーターは、差動変圧器にかかる荷重に比例している 1 mA 迄 (最大でも 1 mA) の出力電流を 1500Ω の負荷抵抗器に送る。浮力変換器 - モジュレーターは 1500Ω の負荷抵抗器を介して、 6 mV/lb の感度となる様調整されている。モジュレーターの出力は、増幅器 (mV/I

** 警報設定は $\pm 4 \text{ in.}$ (10.2 cm) とになっている。

変換器) に送られ、増幅器の出力は、警報及び原子炉スクラムリレー、レベル表示器に分配されている。

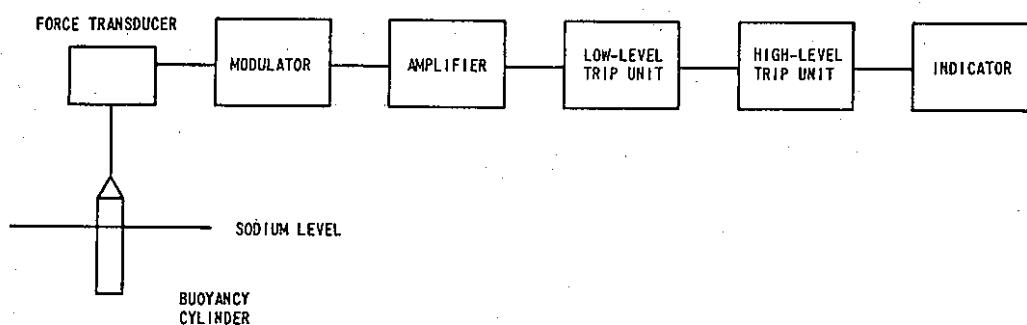


Fig. 6 Float Type Level System for EBR-II

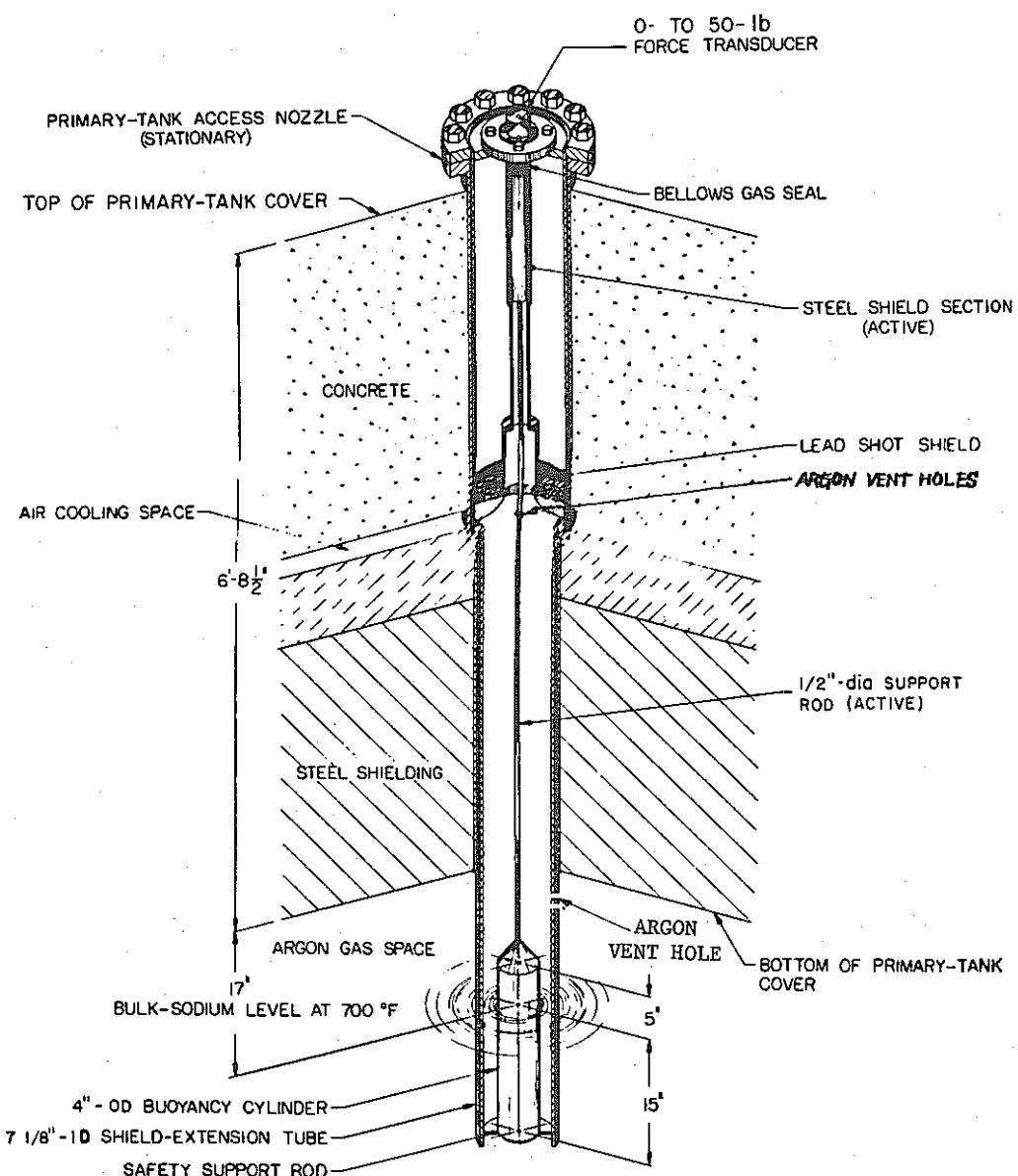


Fig. 7 Float Type Level Transmitter

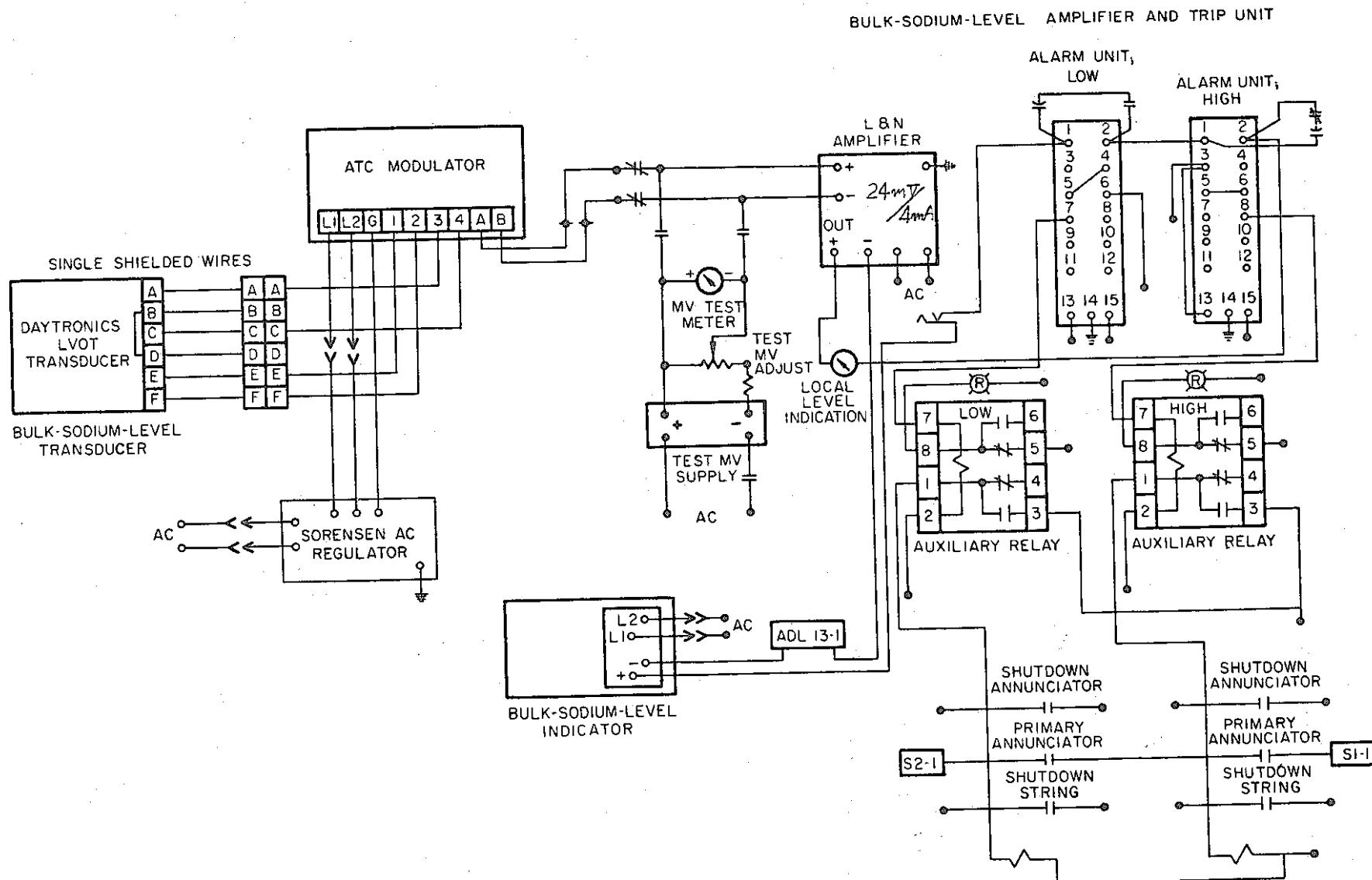


Fig. 8 Schematic Diagram-Circuit for Float-Type Sodium Level System

5. フロート式レベル計測システムの運転結果

フロート式レベル計測システムは増幅器の出力を記録計につなぎ連続6ヶ月間試験運転されたが、1次タンク内ナトリウム温度が一定の期間のレベル変動は通常レベルの $\pm 1/4$ in. の範囲内であった。

警報装置が出力信号に接続され、通常タンク内ナトリウムレベルから ± 1 in. 及び ± 3 in. に設定された。6ヶ月の試験運転期間中に数回の警報が記録されたが、各警報とも1次タンク内ナトリウム温度変化の結果生じた実際のレベル変動、あるいは電源関係の故障により生じたものであった。レベル計測システムの不安定あるいはドリフトにより生じた警報は一つもなかった。

このようにフロート式レベル計測システムは試験期間中、良好に運転された。そしてレベル変動は、1次タンク内ナトリウム温度の変化と良く相関した。試験期間中に二度、補修のために1次タンク内ナトリウム温度が350°F(約177°C)迄冷却されたが、二度ともレベル表示器の指示値はこの温度での計算から求めたレベル値と $\pm 1/4$ in. (約6.4 mm) の誤差範囲内で一致した。

試験終了後、トランスマッターがシールドプラグから引き抜かれ、そしてベローズシールのナトリウム酸化物あるいはナトリウムのビルドアップ状況が検査された。検査の結果、ベローズシールのいかなる部分にもナトリウム酸化物あるいはナトリウムのビルドアップは観察されなかつた。(Fig. 9 参照)

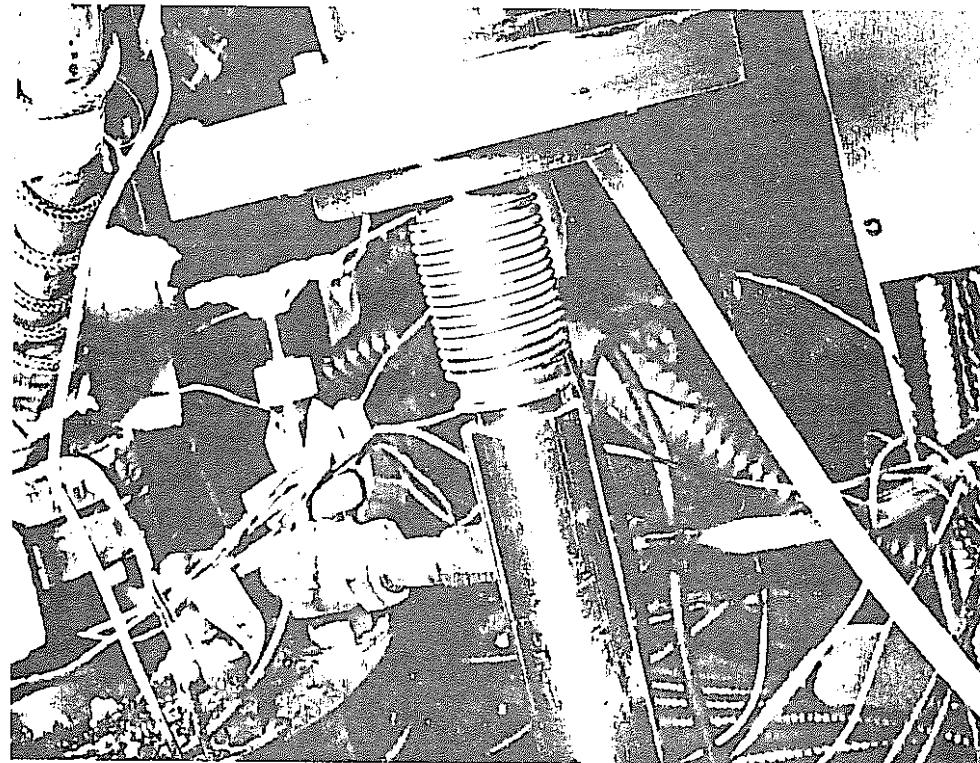


Fig. 9 Upper Assembly of Level Transmitter, Showing Bellows Seal after Six Months of Exposure in EBR-II Primary Tank

6. 結 言

フロート式レベル計測システムは、その後も長期間に亘り $\pm 1/4\text{in}$ の精度の範囲内で、1次タンク内ナトリウムの高温、腐食性、放射能による影響もほとんどなく現在でも順調に作動しており、ナトリウムシステムでの使用に適していることが確認された。

抵抗プローブ型レベル計測システムは、電源関係及び使用雰囲気に関連するプローブの絶縁損傷のため、一時使用出来ない状態となっていたが、今回の運転訓練参加の時点では、電源ユニット及びプローブの絶縁関係の改修がなされており、フロート式レベル計測システムと共に1次タンク内ナトリウムレベルの表示に供用されていた。

一方差圧式レベル計測システムは、原子炉出力の変更等に伴う1次タンク内ナトリウム温度の微少な変化に対する温度補償上の問題が解決されておらず、使用出来ない状態のまま現在に至っている。

このレベル計測システムを通じて考えられることは、特に、ナトリウム炉の炉内計測システムに於いては、その使用雰囲気条件を考慮すれば、フロート式レベル計測システムでみられる様に単純な原理に基づき、使用雰囲気の影響を受けにくい、簡単な計測システムが相応しいと言うことである。

7. APPENDIX

Calculation of Error Introduced by Using Average Sodium Density

This appendix presents the calculations used in determining the error in sodium-level readings that results from assuming an average sodium density over a temperature range of 350 to 700°F. The nomenclature for the equations precedes the calculations.

Nomenclature

D = diameter of float = 4 in. = 10.16 cm

Δh_1 = change in sodium level between 700 and 350°F, based on average calibration of 0.4 lb/in.

Δh_2 = change in sodium level between 700 and 350°F, based on actual change of 0.0321 in./°F

K = volumetric coefficient of expansion of stainless steel due to temperature = $3 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{F}$

l_1 = length of float submerged at 350°F = 3.76 in.

l_2 = length of float submerged at 700°F = 15 in.

ΔT = difference between temperature of sodium and 70°F

V_0 = volume of float per cm of length at 70°F

V_1 = volume of float per cm of length at 350°F

V_2 = volume of float per cm of length at 700°F

W_1 = weight of sodium displaced at 350°F

W_2 = weight of sodium displaced at 700°F

ΔW = change of weight on transducer between 700 and 350°F = $W_2 - W_1$

ρ_1 = density of sodium at 350°F = 0.907 g/cm³

ρ_2 = density of sodium at 700°F = 0.863 g/cm³

Calculations

Volume of float per cm at 70°F

$$V_0 = \pi D^2 / 4 = \pi (10.16)^2 / 4 = 81.1 \text{ cm}^3$$

Volume of float per cm of length at 350°F

$$V_1 = V_0(1+K\Delta T) = 81.1[1+(3 \times 10^{-5})280] = 81.8 \text{ cm}^3$$

Volume of float per cm of length at 700°F

$$V_2 = V_0(1+K\Delta T) = 81.1[1+(3 \times 10^{-5})630] = 82.6 \text{ cm}^3$$

Weight of sodium displaced at 350°F

$$W_1 = \rho_1 V_1 l_1 = (0.907)(81.8)(3.76)(2.54)(0.0022) = 1.56 \text{ lb}$$

Weight of sodium displaced at 700°F

$$W_2 = \rho_2 V_2 l_2 = (0.863)(82.6)(15)(2.54)(0.0022) = 5.98 \text{ lb}$$

Change of weight on transducer between 700 and 350°F

$$\Delta W = 5.98 - 1.56 = 4.42 \text{ lb}$$

Change in sodium level between 700 and 350°F based on average calibration of 0.4 lb/in.

$$\Delta h_1 = \Delta W / 0.4 = 4.42 / 0.4 = 11.05 \text{ in.}$$

Change in sodium level between 700 and 350°F based on actual change of 0.0321 in/°F

$$\Delta h_2 = 0.0321 \Delta T = 0.0321(350) = 11.24 \text{ in.}$$

Difference between Δh_2 and Δh_1 = 11.24 - 11.05 = 0.19 in.

Percentage difference based on Δh_2 = $0.19 / 11.24 \times 100 = 1.7\%$

8. 参 考 文 献

- (1) System For Measuring Sodium Level In EBR-II (ANL-7623)
- (2) EBR-II Operator Training Manual