

原子炉の計装

Nuclear Reactor Instrumentation

北之園 英博* 水野 雄弘*
Hidehiro Kitanosono Katsuhiko Mizuno

内 容 梗 概

原子炉の計装には、従来の一般工業用計装を、ある程度モディファイしたものも含まれるが、原子炉に固有な特殊性のあるものが比較的多い。ここではこの特殊性とそれに付随する種々の問題点について述べ、最も重要な原子炉の安全な運転にどのような関連をもつかについて概説する。

ただし放射線計測器など、測定装置単体について論ずることは省略し、別の機会に譲る。

1. 緒 言

原子炉の核計装、プロセス計装の最近の進歩は著しい。新しい原子炉の開発は、それに付随する新しい計装を進歩させている。ここでは主として水減速炉を対象として核計装の問題点、プロセス計装の特殊性について検討し、あわせて今回完成した日立教育訓練用原子炉の計装に触れる。第1図はこの原子炉制御盤である。

2. 核 計 装

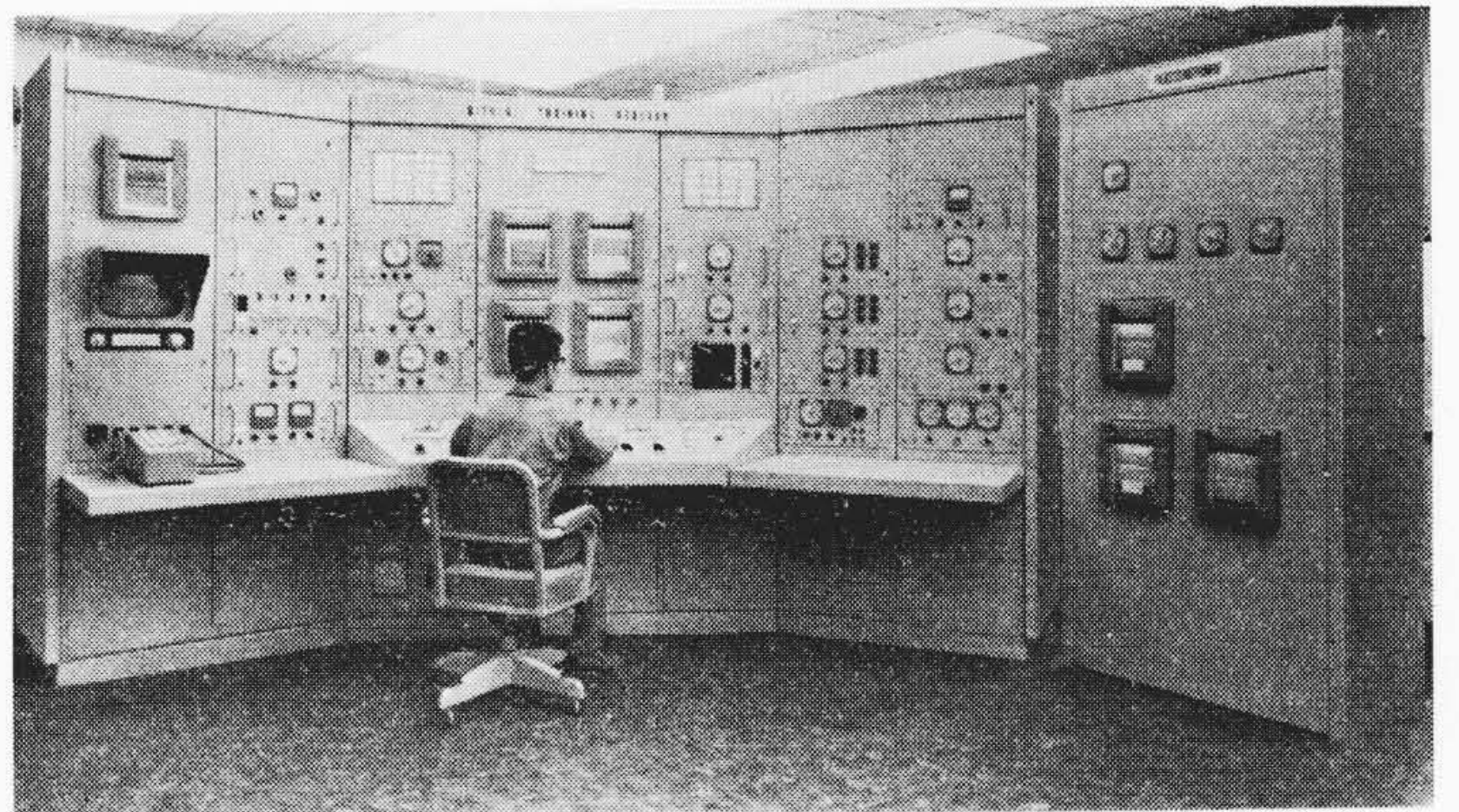
2.1 中性子束の検出と問題点

問題点の一つとして、検出器の設置場所における中性子束と炉内平均中性子束の対応性があげられる。特に燃焼度が炉内の位置によって変る場合には⁽¹⁾、燃焼の進むにつれ1対1の対応性がくずれてくる。炉内中性子束分布の測定は、炉内中性子束が 10^{10} nv程度をこえる炉では、直接測定することは一般に困難で（ドレスデンのような方法もあるが限度がある）、一つの方法は、炉の冷却チャンネルをいくつかの領域に分けその各領域で中性子の照射を受けた冷却水の一部を取り出し、 O^{16} の(n, p)反応で生じる N^{16} の γ -レベルを測定することにより連続的に、かつ長時間にわたって速中性子束の炉内空間分布を知ることができる。原理的には3次元の分布を知りうるが現在計画されているものでは2次元の測定である⁽²⁾。 N^{16} は半減期が短く数秒程度であるから冷却材の1サイクル後は消失しているとして良い。ただし流量変動に基づく誤差に注意を要する。

次に検出器の設置場所に関する問題点として、高中性子束炉における γ -レベルがある。高中性子束炉では炉外への中性子の漏えいを十分抑制する設計になっているが、たとえばしゃへいタンク外側に検出器を置けば、中性子束としては少なすぎる程度であるのに、 γ -レベルが著しく高い例もあり⁽³⁾、また、起動系における検出位置では、特に再起動時の γ -レベルが高すぎて測定誤差が大きくなった例もある⁽³⁾。これに対し一般には鉛しゃへいにより相当 n/γ 比を改善できるが⁽⁴⁾、それでもなお不十分なことがある。また γ 線補償形電離箱(CIC)は一般にいわれる使用可能全域にわたって完全な補償をしていないことも注意を要する。

検出器設置場所の温度が高中性子束炉では相当高くなる場合がある。電離箱には高温用として 500°C 程度まで使用可能なものも開発されているようであるが絶縁材に問題がある。このため分裂生成物をHeで炉外に取り出しその中の β , γ をG-Mまたはシンチレーション検出器で測定する方法もあり $1,000^{\circ}\text{C}$ くらいまでは良いが、温度上昇に伴い分裂生成物の拡散率が変り検出器の感度が落ちてくる⁽⁵⁾。この方法は非均質形炉では機構的な問題がある。なお電離箱では温度上昇による感度の変化はきわめて少ないが90%集電電圧が大になる。

* 日立製作所日立工場



第1図 原子炉制御盤

核分裂形カウンタは大きな出力パルスのでられること、飛程が短いから浅い電離箱で良いこと、 n/γ 比が良いこと、高温特性の良いこと、計数寿命の長いこと、使用電圧の低いことなどの長所を有するので起動系では貴重な役割を持つがその特長を生かして、電流形として出力領域の検出器として用いた例がある(WTR)。

起動系として別に BF_3 計数管があるが、不純物や BF_3 の解離による特性の劣化に注意を要する。

炉内中性子束の制御に γ 線測定を利用したものが提案されているが⁽⁶⁾、これはさきに触れた炉内中性子束分布の測定と類似しているもので、パイプを通して半減期の短い物質を中性子吸収断面積の小さな液体に溶かし炉出口でその活性度を測定する。これは独立したループを作るから誤差の点では問題が少ないが、半減期に対し十分長い時間をかけて循環させること、バックグラウンドを少なくすること、速応性のないことなど問題が多い。

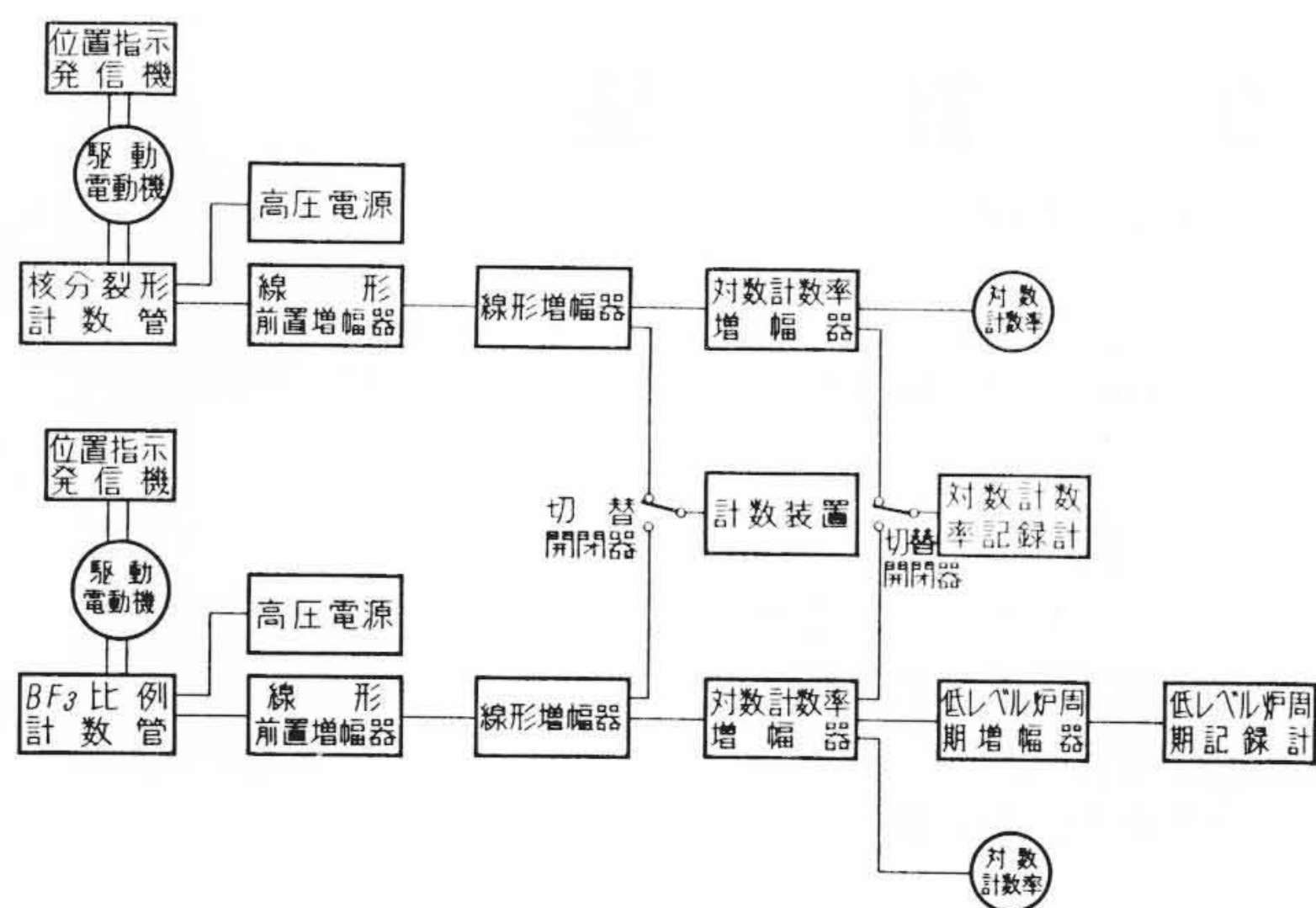
中性子束測定に近時サーモパイルが開発されているが、時定数の長いこと、線形性の成り立つ範囲が狭いこと、導線接続部の寄生熱起電力(周囲温度が急変すると過渡的に寄生熱起電力による誤差が $10\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ に達することがある)内外温度差による零点偏差などが無視できない。

活性化法による中性子束の測定はCo, An, Dy, Inなどいずれも中性子束の変動しないことが前提で、このために用途が限られる。ウランはくは中性子束そのものでなく、その時間積分値を測定するので照射実験にとっては貴重であるが事後処理が面倒なのが欠点である。反応度測定炉があればこの欠点は大幅に改善される⁽⁷⁾。

2.2 核計装の構成と問題点

2.2.1 起 動 系

原子炉起動系では中性子束が低く通常起動時に数cps程度の強さの位置に検出器を置く。したがって全出力時には過負荷にならないような領域まで検出器を移動するが、正規動作位置のシンプルおよびその関連装置が正規運転時に相当の γ 加熱を受けるの



第2図 起動系の構成

で、場合によっては内部冷却を要する。このように核計装系でも高中性子束炉ではいくつかの問題点が出てくる。たとえば非均質形で燃料の装荷量により超過反応度の制御を行なうものでは（燃料フォロワーのついたものなど）、ホット燃料が引き抜かれたときその γ 線によるパルスパイルアップが雑音の原因となって S/N 比を悪くする。このような起動系では計数が主たる動作であるため、特に検出器シグナルケーブルがスイッチ、リレー類の開閉に伴うパルス雑音を拾わぬよう注意を要する。また γ 線によるパルスはディスクリミネータによって常に除きうるとは限らない。

なお起動系に限らないが検出器から増幅器に至るケーブルの断線事故は特に注意を要する。第2図に起動系の一例を示す。

2.2.2 炉周期系

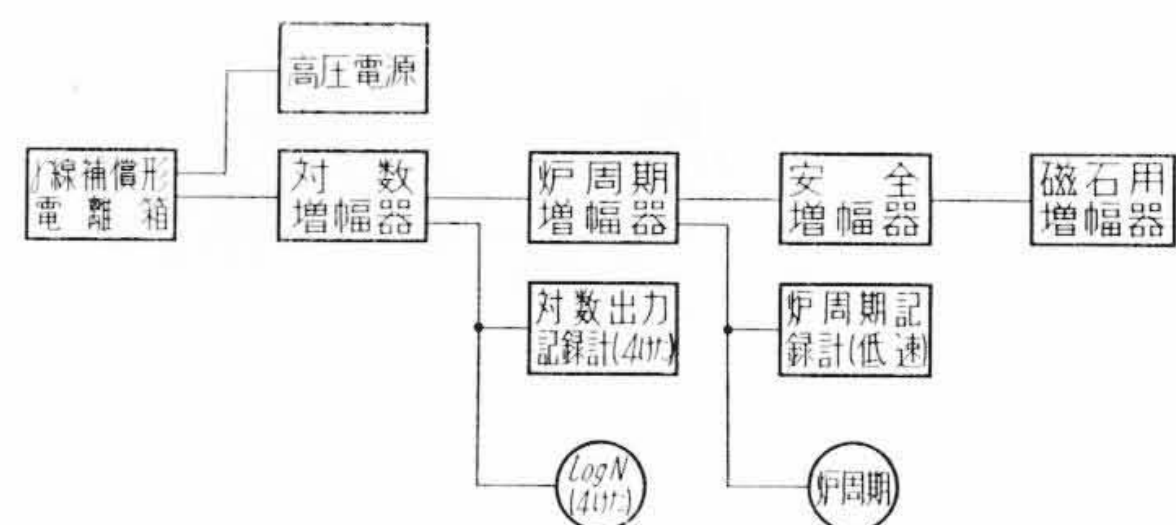
原子炉は起動時数十秒の周期を維持しつつ出力を上昇させるが、このとき炉周期は近似的に Newson の式⁽⁸⁾を満足しなければならない。概念的には炉周期がこの式を満足しなくなれば制御系の拘束を離れて出力が上昇し危険であるから、この系の信号を安全系に送って監視し炉を保護する。

この系の基本的構成は、検出器からの信号を対数増幅器に入れて入力信号の対数出力を取り出し、この微分演算をすれば炉周期の逆数が近似的に得られる。この系では対数特性の近似度、微分演算、系の時間遅れなどが問題となる。対数特性の近似には、二極管の初速度電流を利用するもの⁽⁹⁾が広く用いられているが、約 0.2 V/dec だから次段に増幅器が必要なこと、カソードの電子放出の飽和、空間電荷の影響などにより対数上限が押えられ、管壁からのリークやヒータの光電流などにより下限が決ること、カソード温度が大きな効果をもつこと、ヒータからの誘導のあることなどの問題がある。二極管のほかに五極管を用いたもの、シリコンダイオードによるもの、抵抗を切り替えて折線近似を行なうものなどがあるが、いずれも一長一短がある。これらは大略 6 dec にわたって対数特性を満足するが、精度を犠牲にすれば多少の外そうはできる。いずれにしてもこの範囲が自動起動の可能な範囲になる。微分演算は不完全微分であること、時間遅れのあることなどの問題がある。特に低出力時の時間遅れが問題である。

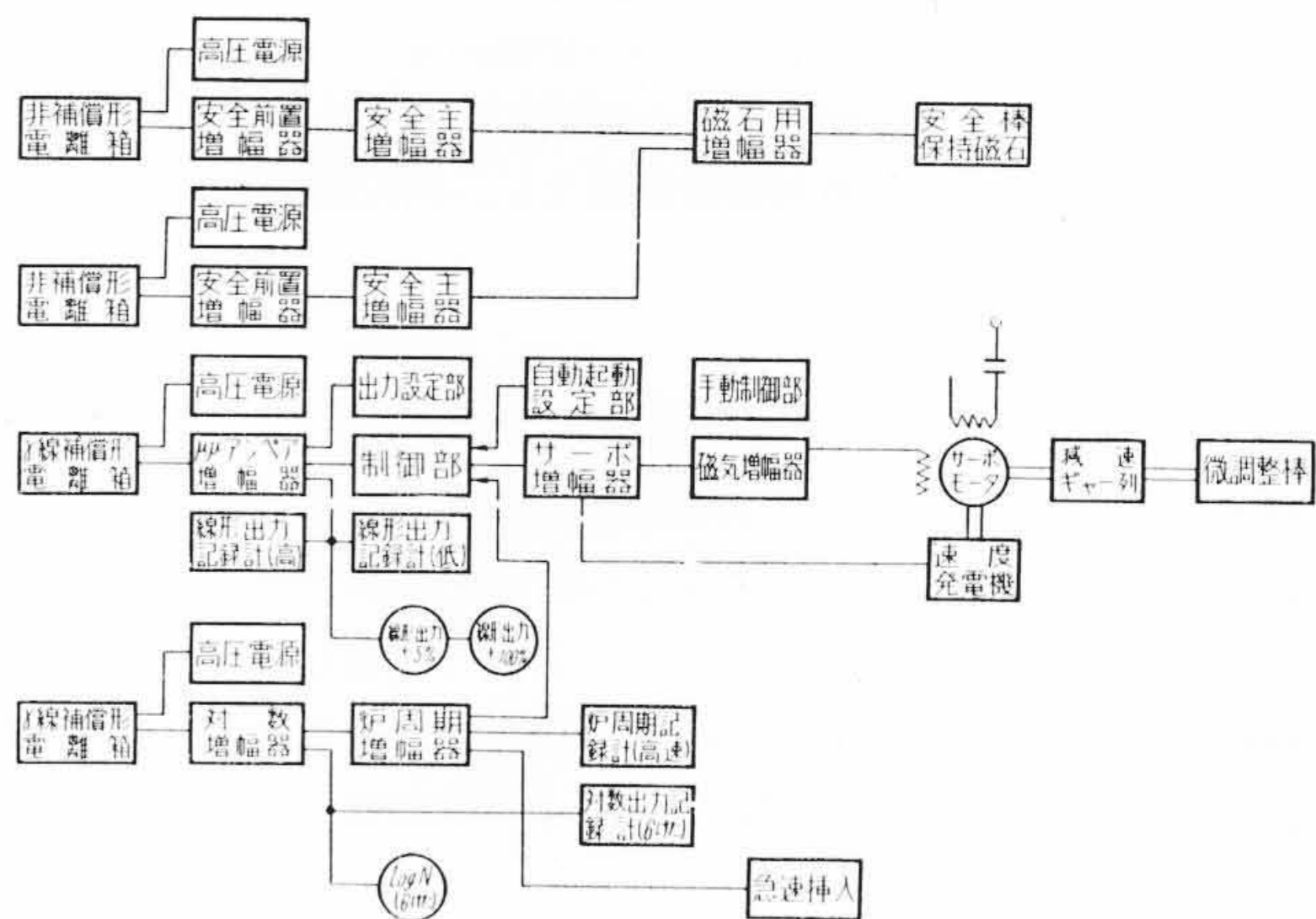
検出器としては補償形電離箱が広く用いられるが補償の設定値をどこに選ぶかが高い γ -レベルの炉では問題になる。第3図に炉周期系の一例を示す。

2.2.3 炉出力系と自動制御系

炉出力系の一つの目的は炉出力レベルの監視にあり、検出器としては非補償形電離箱が一般であるが、レンジを広げるとき、または γ -レベルが炉出力に対し無視できないときは補償形⁽²⁾や核分裂形⁽¹⁰⁾を用いた例もある。現在の出力レベルに応じて感度を自動的に切り替えるようにした例もある⁽¹¹⁾。これは初段増幅器の



第3図 炉周期系の構成



第4図 炉出力系の構成

入力インピーダンスを切り替えるもので、炉出力で 0.1~15%, 1~150% に対応させ、0.5 秒程度の時間で切り替えている。この許容時間は起動事故の解析によって決める。

自動制御系は中性子束の定値制御が重要である。実際には炉熱出力と中性子束は 1 対 1 の対応が厳密には成立せず、また動力用原子炉では原子炉負荷の特性も問題となるから中性子束の定値制御が唯一のものではない。中性子束の制御ではレオスタットの設計が問題となるが、性能を上げるため ETR では 250 タップを 500 タップに改造している。検出器の位置は機械構造上の制限を受けるが自動制御系の精度を十分とるためには、中性子束が不足しないことが必要で、かつ炉内中性子束を代表できる位置でなければならない。

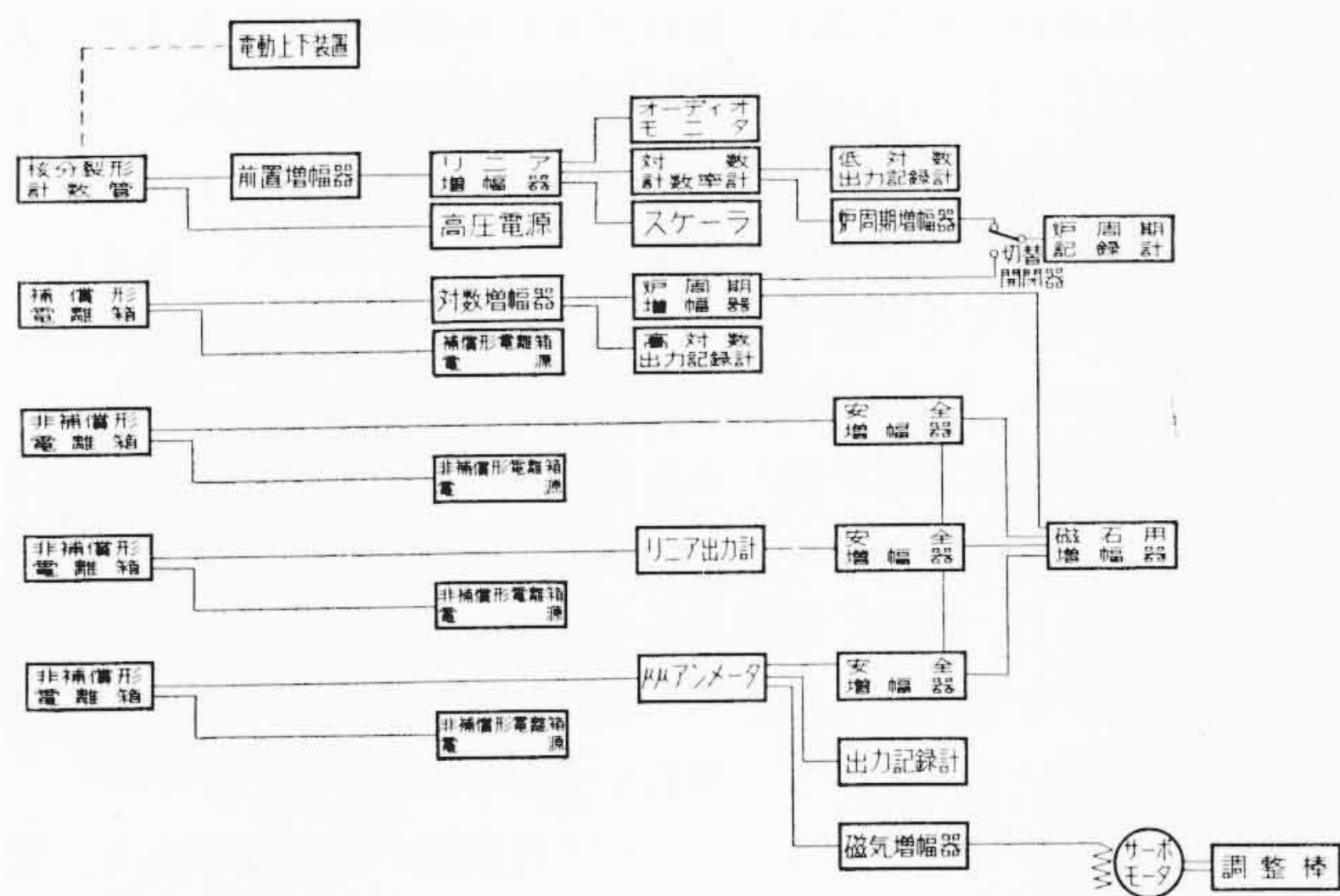
炉出力系、周期系から得られた危険信号を処理するものとして安全増幅回路がある。ここでは Fail to safe がすべてに先行する。最近では応答性を多少犠牲にしても真空管や半導体の数になるべく少なくし磁気コアのようなじょうぶな要素を利用する例も見られる⁽⁶⁾。炉出力の危険設定レベルについては幾通りかの方法があり、たとえば炉出力範囲を数グループに分け、それぞれのグループに危険レベルを設定するもの、中性子炉の現在値に対し全出力の一定割合相当を加えた値を危険レベルにするものなどがある。設定レベルの具体的な数値は事故解析から定められる。これらの点に関する回路上の問題点は少ない。

第4図に炉出力系の一例を示す。

2.3 燃料破損の検出 (FFD)

遅発中性子による場合は、 O^{17} の (n, p) 反応で生ずる N^{17} が崩壊して中性子を放出するから、このバックグラウンドを避けるだけの時間遅れが必要であり、重水炉の場合は (γ , n) 反応による光中性子の生成に注意を要する。

β 線による場合は、 β 線はレンジが短いから冷却材を直接測っても効率が悪く、冷却材中の分裂生成物を気水分離器で He に吸着させハロゲン G-M 計数器で測るなどの方法をとっている。このとき冷却材中の不純物が放射化して吸着させるのを防ぐためフィルタを



第5図 日立教育訓練用原子炉核計装の構成

通す必要がある。チェレンコフ効果利用の FFD では、冷却材中の不純物の放射線、燃料表面に付着しているウラン、宇宙線、フォトマルチプライアの雑音などがバックグラウンドとしてはいるから注意を要する。

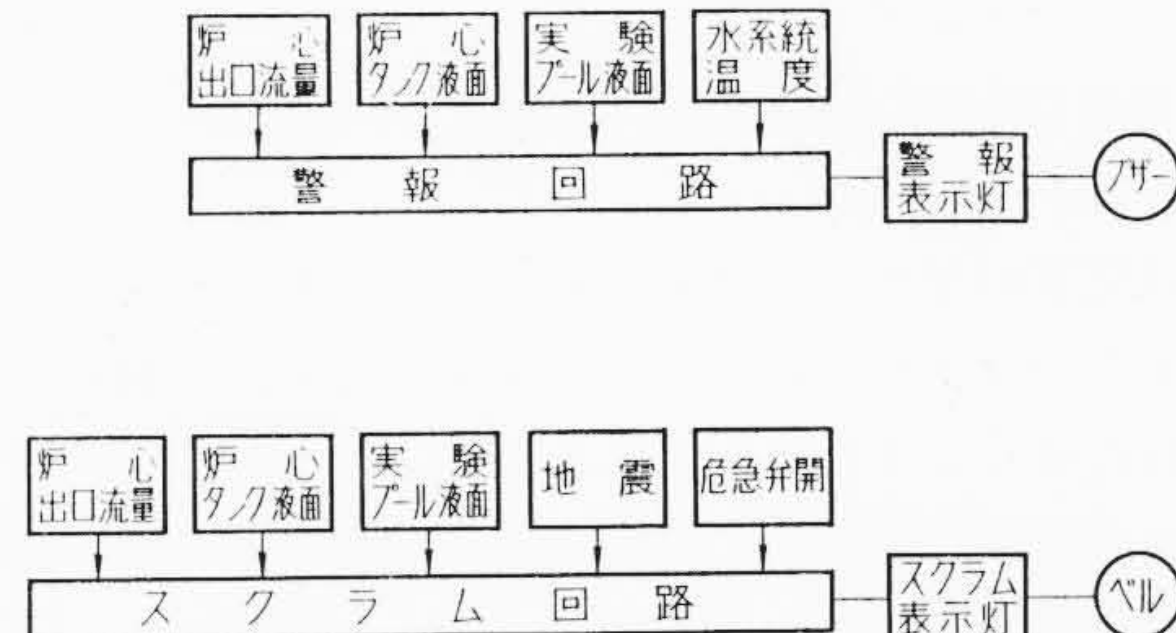
γ 線による方法のうち、イオン交換樹脂法は樹脂の再成が面倒であること、差動 γ 線法は非分裂生成物の放射線に感ずること、長寿命のバックグラウンドにより装置が汚染されて行くこと、処理装置の複雑なことなどの問題がある。

2.4 制御棒位置指示装置

大部分の原子炉では中性子吸収材で作られた制御棒を炉内にそう入することによって反応度を制御しているの、制御棒の位置を正確に知ることが炉の運転制御上重要である。方式は制御棒駆動の方法によって異なってくる。空気中に駆動装置があり、放射線レベルが低くて容易に保守できる場所では、従来から用いられていた位置指示計、すなわちシンクロ電機、スライド抵抗と電圧計との組み合わせ、符号化板と数字表示管との組み合わせ、リミットスイッチなどを用いることができる。ただしスクラム時に位置指示計発信器が制御棒から切り放されずに、ついて回転するものでは、スクラム動作を妨げないように慣性率および抵抗が小さくかつ高速回転と衝撃に耐えるものでなければならない。動力炉などで位置指示計発信器が高温高圧にさらされる場合には特殊なものがくふうされている。制御棒駆動装置に取り付けられた磁性体の位置変化を、非磁性体の高圧容器の外から電磁的に検出する方法、たとえば差動トランス、リードリレーに類したものが用いられている。このような場合には、保守の困難なことが多いので特に寿命および信頼性についての問題点が多い。

2.5 日立教育訓練用原子炉の核計装

日立教育訓練用原子炉 HTR (Hitachi Training Reactor) の核計装の系統を第5図に示す。起動系には核分裂計数管を用いている。また対数計数率計が一定数以上計数していることにより中性子源のそう入を確認し、炉の起動が可能となるようインターロックがとられている。水晶発信器により対数計数率計の較正をする回路がある。炉周期系には γ 線補償形電離箱を用いており、周期計よりの信号によって警報とスクラムが行なわれるのは前述のとおりである。周期の記録計は起動系と共同で切り替えて使用される。出力安全系には3本の非補償形電離箱を用い、1本は炉出力指示、1本はマイクロマイクロアンメータおよび炉出力自動制御に用いている。以上合計5本の検出器によって炉起動より全出力まで約10デカードの中性子束測定が行なわれる。安全系としては、炉周期が設定値以下になった場合および炉出力が設定値以上になった場合にスクラムする安全増幅器ならびに磁石用増幅器を設けている。この磁石用増幅器と



第6図 日立教育訓練用原子炉プロセス計測の構成

いうのは、安全棒を保持している電磁クラッチを励磁するものでスクラム信号がはいった場合には急速に電流を切る必要がある。特に炉出力からのスクラムには2 out of 3回路を用いて、3本の非補償形電離箱中2本以上の中性子束が設定値以上になった場合にのみスクラムするよう作られている。このため誤動作の確率を非常に小さくすることができ、動力用原子炉にはこの種の安全回路が広く用いられている。安全系には、電子管と半導体を用いた高速の論理回路のほかに、高速度継電器を用いた論理回路および磁氣的論理要素(ヒタログ)と磁気増幅器を用いた論理回路の2重のバックアップを行ない、さらにいっそうの安全性を増加している。また安全系には1秒ごとにその動作を確認する回路を付属せしめ万一故障した際にもただちにその表示と警報が行なわれる。

自動制御系としては、この炉が実験炉であるために中性子束レベル一定制御を行なっている。制御目標値の設定値はレオスタット切り替えにより行なわれ、原子炉の非線形性を補償している。タップ数は101で、タップ間は連続可変として補間をしている。制御用増幅器には磁気増幅器を用いて2相サーボモータにより調整棒を動かしている。

実際に計測制御装置を製作する際には、各計器ならびに操作押ボタン類や表示灯類の配列も重要な問題であって、人間工学的観点から検討する必要がある。原子炉においては起動時に事故が起りやすいので炉起動の際に必要な計器は1か所に集中し、制御棒駆動の押ボタンを近くに配置する。また核分裂計数管の系統にはスピーカを併用して聴覚による注意をも促している。

一般に放射線計測器類は取り扱う信号のレベルが低く、特にパルスを扱うものもあるので非常にノイズに感じやすい。一方原子炉の付近には電動機、大電流の流れる電線、リミットスイッチなど多くのノイズ発生源があり、さらに制御盤の中にも押ボタンなどノイズを出すものが計測器と共存するので、ノイズによって誤動作しないよう器具配置、配線、シールドには十分注意する必要がある。

3. プロセス計装と問題点

3.1 温度

原子炉の制御を行なう場合に温度が閉ループにはいることがある。炉の出口温度を一定に制御するもの、炉の熱出力を一定に制御するものなどがそれで、このほか炉内の異常な温度上昇を監視するため、あるいは研究炉の実験の温度を測定するためなどの場合に特殊性がいくつかある。制御を行なうときは応答性が問題となる。しかも自動制御のループにはいるときは、検出部における温度変化の範囲が比較的狭いこと、その制御性から検出ゲインに対する要求が比較的きびしいことなども考慮する必要がある。さらに検出部に許される空間も制限されることが多い。

一方炉内各部の温度を測定する場合には、高レベルの中性子線 γ 線などに検出端がさらされるために材料的に損傷を受ける可能性のあること、 γ 加熱による検出端の温度上昇が精度に影響することにも注意を要する。このような目的のために特に開発されたサーモカッ

プルとしてマグネシアで絶縁しステンレスのシースを施した外径 0.5 mmφ 程度のものが市販されている。

3.2 圧 力・流 量

圧力計は従来のプロセス計装のものと特に変わったものはない。原子炉では圧力の変化が反応度の変化をもたらす、一般には負の反応度係数を持たせるよう設計してあるため、高压の原子炉では圧力の喪失が正の反応度外乱として炉に危険を及ぼす。このため反応度の圧力係数の値にもよるが、ある値まで圧力が減少したときは炉を非常停止させる必要がある場合がある。しかも一般には圧力喪失事故時は急激な圧力の減少を結果するので圧力減少を検出する時間特性が問題となることがある。

流量計の中で、ベンチュリーで検出し水銀を用いた差圧発信器を利用するものでは、水銀の活性化が問題となる。ロータメータを用いた発信器ではこのような問題がなく、精度も同程度得られる。一部ではベンチュリーなどを用いず直接パイプの圧力降下を検出しているが⁽⁶⁾、低流量率のときには精度が期待できない。空気作動式は活性化という点では問題がないが応答性の点で好ましくない。

流量の減少は炉心の温度を上昇させるが、流量減少が特に問題になるのは、停電のときのように流量が 100% 喪失する場合で、炉の非常停止が正常に動作したとしても、分裂生成物の崩壊熱はしばらく発生し続けるため、ときには燃料の溶融を起すことがあることである。高出力密度の炉で事故が二重に起ると非常用タンクのバックアップでも不足することがある。流量喪失の検出はもちろん寸刻を争うわけではないが、主冷却系は摩擦損失が比較的大きなため、たとえばポンプモータ電源の切れたときは数秒で半分以下に減少するものもある。また炉の中には非常用タンクを持たず、パイプ破損事故のときには流量の減少でそれを検出して二次冷却系を切り替えて炉心の冷却を行なうものもあり、やはり速応性と検出の信頼性が要求される。

3.3 水位、電導度、その他

水位が問題となるのは特殊な場合で、大部分は水位が所定のレベルにあるかどうかを判断するだけのことが多い。しかし臨界実験装置の中には水位の定値性が実験結果の精度を左右するものがある。

このような水位の定値制御は一般のプロセス制御におけるものと大した変りはなく、しいていえば放射線損傷が問題になるが、このような炉では中性子束も比較的低いから重大なことではない。

電気伝導度の測定でも放射線損傷が最も大きな問題で、ときには高温高压水の電導度を測定することが負担となることがある。圧力は最大 2,000 psia、温度は数 100°C 程度である。

リーク検出器は冷却材が漏れると活性化されたものが外部に出ることと、重水のように高価なものが流出するという意味において必要性がある。検出の感度をどの程度にするかは検討を要するが、導電性物質を検出部に塗布して感度を高めたものは再使用できない欠点がある。また大きさが制約を受けることが多い。

このほか原子炉用の特殊なものとして地震動の検出器があり、従来の地震計の原理を応用している。速応性と信頼性が要求される。現在は地震動の加速度を検出しているがこれだけでは安心できない。また 3 次元の検出器ではまだ決定的な方法はない。

4. 結 言

以上原子炉計装の特殊性と問題点について述べた。ここでは主として水減速炉を対象としたが、以上のほかにたとえば、ガス冷却炉ではウィグナグロスの測定、有機減速炉では HBR (high boiler residue) の制御と検出、均質炉では燃料濃度制御と検出、そのほか多くの問題がある。

参 考 文 献

- (1) AECU-3607 (pt. 1)
- (2) IDO-16667
- (3) IDO-16566
- (4) Geneva Paper p/213 (1958)
- (5) Geneva Paper p/1207 (1958)
- (6) AECL-801
- (7) IDO-16108
- (3) Mon-P-271
- (9) KAPL-1234
- (10) Westinghouse Test Reactor
- (11) IDO-24020



特許第 276559 号

特 許 の 紹 介



岩 淵 芳 雄

水 中 溶 解 ガ ス 分 析 計

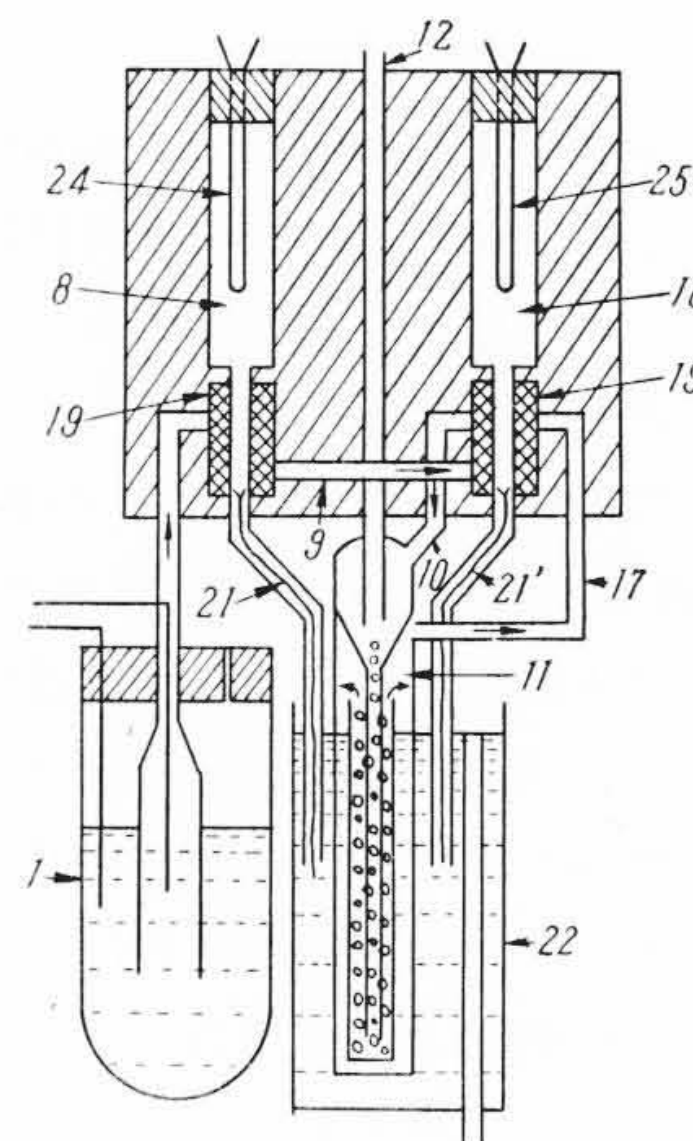
ボイラの給水時中の溶解酸素の量を測定するのに重要である水中溶解ガス分析計においては、

(1) 高精度の測定を行なうために比較室と測定室内とのガスの湿度が正確に一致していること、および比較室内に測定室の水素と酸素との混合ガスが逆流しない必要がある。

(2) 応答の速いことが必要である、この発明はこれらの難点を一挙に解決したものである。

まず原理について大略を述べれば、水電解槽 1 により基準ガスとする水素を発生させ、これを比較室 8 に導入する。一方この水素はさらに通路 9, 10 を経てガス抽出器 11 に導き、この内部においてパイプ 12 から導入される試料水を十分に混合し、水中の溶解酸素を水素泡中に放出させ、こうして得られた水素と酸素との混合ガスをパイプ 17 を経て測定室 18 に送る。ここで比較室 8 内の水素と測定室 18 内の混合ガスの熱伝導度が熱線 24, 25 によって測定され、その差が比較されて水中溶解酸素量が測定される。

この発明は以上の構成において、比較室 8 と測定室 18 の一部にそれぞれ繊維層 19, 19' を設けこれに容器 22 内の水を糸 21, 21' によって湿潤させるようにし上記 (1) の難点を解決し、さらにパイプ 10, ガス抽出器 11, パイプ 17 の経路をガス抽出器 11 の吸引作用により



高速度で循環させるようにして (2) の難点をも解決した。

(手島)