

原子炉の安全系統

Safety System for Reactors

水 野 雄 弘*
Katsuhiko Mizuno

内 容 梗 概

安全系統は原子炉の最も重要な設備の一つである。その設計原則は炉の形式や用途によって異なるが、故障は安全側に起きるという原則はいつも守られねばならない。1961年に臨界に達した日立教育訓練用原子炉では、実験炉という立場からその安全系統の設計が行なわれた。本文はこれを中性子安全回路、プロセス安全回路、その他の安全回路に分けて論じている。

1. 緒 言

どのような機器においても安全回路は重要なものであるが、特に原子炉ではその事故による災害が大きく一般公衆にも害を及ぼすものであるから、その安全性についてはきびしい要求がなされている。原子炉においては、中性子束レベル、炉周期のような核的量および冷却材減速材の温度、流量、圧力、液面、電気伝導度などのプラント諸量を常時測定することにより原子炉の状態を監視し、これらに異常状態が発生すると、その程度によって警報あるいは炉出力を減少させ、重故障の場合には炉を非常停止する安全系統が重要な設備として付属している。監視する項目には、このほかにも炉周辺の放射線のような保健物理的な諸量、炉の制御計測設備が正しく働くための各種電源の状態などの二次的な量もある。このような項目は、炉の大きさ、種類、使用目的によって異なる。通常監視される項目を第1表にまとめた。原子炉の用途と規模によって安全系統設計の原則にも差がでてくる。おおざっぱに原子炉を未臨界集合体、臨界集合体、実験炉、動力炉に分類してみよう。未臨界集合体は一応臨界事故の危険性はないものとしてよいであろう。臨界集合体では炉心配置、燃料の濃縮度、減速材の状態などを変化させるのが実験目的の一つであり、思いがけないことで暴走させる危険は最も大きい。しかし集合体そのものが実験設備であるから誤って炉を停止してもその被害は少ない。実験炉になると炉心は一定してくるが、実験の種類によって正の反応度が大量に投入される危険は残る。しかもむやみに炉を止めることは実験の性質上不都合な場合も多い。また実験炉でも中性子束レベルの高い炉ではXeの毒作用のために再起動が困難となる場合もある。訓練用に使われるときには誤操作についても考える必要がある。動力炉の事故による災害は炉が大きただけに非常に大きくなるが、炉の使用方法はまったく一定しているし、運転者も熟練している。しかし炉の誤停止は炉の使用目的から厳に戒められるし、熱応力の問題から再起動に時間がかかる。またXeの毒作用についても考える必要がある。このように考えてくると、炉の形式や用途によって安全系統がどのような原則によって設計されるべきかは、おのずから決まってくる。以下に述べてゆくHTR (Hitachi Training Reactor) の安全系統は炉の性格から

(1) たとえ故障が起きてもそれは必ず炉を停止する側であること。しかしむやみに炉を止めないように考慮すること。

(2) 誤操作によって危険を生じないこと。

を原則として設計された。

2. 中性子安全回路

原子炉において監視すべき項目は数多くあるけれども、炉の核的状态を示すものとして、中性子束や γ 線量の測定は重要である。核

* 日立製作所日立工場

第1表 原子炉において測定すべき項目

分 類	測 定 項 目
核 的 量	中性子束, 炉周期, γ 線量
工 学 的 量	流量, 液面, 温度, 圧力, 電気伝導度, PH
保 健 物 理 量	α 線量, β 線量, γ 線量
そ の 他 の 量	地震, 商用電源電圧, 核計測用高圧電源電圧, 各種増幅器類電源電圧, 実験孔プラグなどドアの状態, 炉室内外の圧力差

第2表 HTRの警報スクラム要因

測 定 項 目	警 報	リリーススクラム	エレクトロニックススクラム
炉 心 出 口 流 量*	<0.4m ³ /min	<0.25m ³ /min	>定 格×1.1
プ ー ル 液 面	<-70mm	<-140mm	
タ ン ク 液 面	<-70mm	<-140mm	
実 験 孔 プ ラ グ 開*		※	
中 性 子 束	>定格×1.05		< 5 秒
エ リ ア モ ニ タ	>定常×2	>定 常×3	
地 震		>25 ガル	
炉 周 期	<10秒		
危 急 弁 開*		※	> 15% <-15% 上, 下限
自 動 制 御 誤 差			
調 整 棒 位 置	上下限付近		
炉 心 出 口 冷 却 水 温 度	>50°C		
記 録 計 ス ケ ー ル オ ー バ	※		
安 全 増 幅 器 故 障	※		
非 補 償 形 電 離 箱 電 源 故 障	※		
補 償 形 電 離 箱 電 源 故 障	※		
核 分 裂 計 数 管 電 源 故 障	※		

- (1) ※印は警報またはスクラムが行なわれることを示す。
(2) *印はかぎスイッチにてバイパス可能であることを示す。
(3) 危急弁とは自然循環冷却と強制循環冷却を切換える弁で、強制循環冷却時には閉となる。
(4) エレクトロニックススクラムは必ずリリーススクラムによってバックアップされる。
(5) リリーススクラムは必ず全制御棒を全速でさし入れることによってバックアップされる。

的な事故は短時間に起り、炉を暴走させる危険があり、熱応力の問題もあるので重大である。起動時には炉周期が、定常運転時には γ 線レベルや中性子束レベルが主として監視される。炉周期の測定には γ 線補償形電離箱、対数増幅器、炉周期増幅器が用いられ、炉周期増幅器からの信号が設定値以上に達するとスクラムが行なわれる。この系統の比較回路以降は中性子束レベル測定の場合とまったく同じであるからここでは省略する。ただ電離箱の出力電流が小さい間は、対数増幅器の時定数が長いので検出が遅れることと、微分回路のために炉周期信号に雑音が入って誤スクラムしやすいことには、十分注意すべきである。中性子束レベルの監視は通常高出力において行なわれるので、特殊な炉を除いて n/γ 比が十分大きく、 γ 線非補償形電離箱を使用できる。また定格出力付近において中性子束の監視をする場合には、電離箱の出力電流も大きいので——多くの場合 10^{-4} A 程度である——比較的簡単な回路で安全回路を構成できる。 γ 線量の測定では、検出器にシンチレーションカウンタなどを用い計数率計を使う点がちがうが、基本的には同じ考え方が適用で

きる。その炉において予想される超過反応度が投入され、炉出力がスクラム設定値に達し、スクラムがなされ、炉が停止し、冷却されるという事故時の一連の動作の解析をして、この際炉が核的および熱的に決して危険な状態にならないようにスクラム設定値が選定される。したがってこの値には制御棒駆動速度、スクラム動作に要する時間、炉の形式、構造なども関係してくる。この値は普通定格出力の110~140%程度に選ばれるけれども、起動時に事故を起し、中性子束がスクラム設定値に達するときにはその上昇率が大きくなっているため、危険な場合がある。そこで原子炉を起動し炉出力を上げてゆく際には、その時の中性子束レベルに応じて、スクラム設定値を変更する方式が望ましい⁽⁵⁾。HTRでは中性子束が定値制御される範囲において、中性子束が設定値より15%以上変化するとスクラムがなされる。このような場合には γ 線補償形電離箱を使用する必要があり、電離箱の出力電流も小さいので、電位計回路では真空管の選定、回路構成、絶縁抵抗を高く保つことなどに十分注意を払い、比較回路もくふうする必要がある。炉周期および中性子束レベルによるスクラムは、炉の核的な異常状態によるものであるから、動作時間のきわめて短いことが要求される点において、他のプロセス量によるスクラムと異なっている。

2.1 安全増幅器

一般には中性子束レベルが設定値以上に上昇したとき、これを検知して電磁石用増幅器にスクラム信号を送り安全棒を落下させるもので、原子炉の安全を最終的に確保するものであるから高い信頼度が要求される。小形の訓練用原子炉などでは、電離箱を2本用いてどちらの出力電流が増加した場合でも炉をスクラムさせるという直列方式が用いられる。この方式では安全増幅器の故障によって誤まってスクラムされる確率が高いので、大形の炉や発電炉では2 OUT OF 3 同時回路方式が用いられている。これらの回路は動作時間の短いことが要求されるために、真空管を用いて構成されてきたが、安全回路に多数の真空管を使用することは保守の点や信頼度の点から問題があるので、最近では回路の半導体化⁽⁶⁾が進められており、また信頼度を高めるために磁気要素の使用⁽⁷⁾が提案されている。

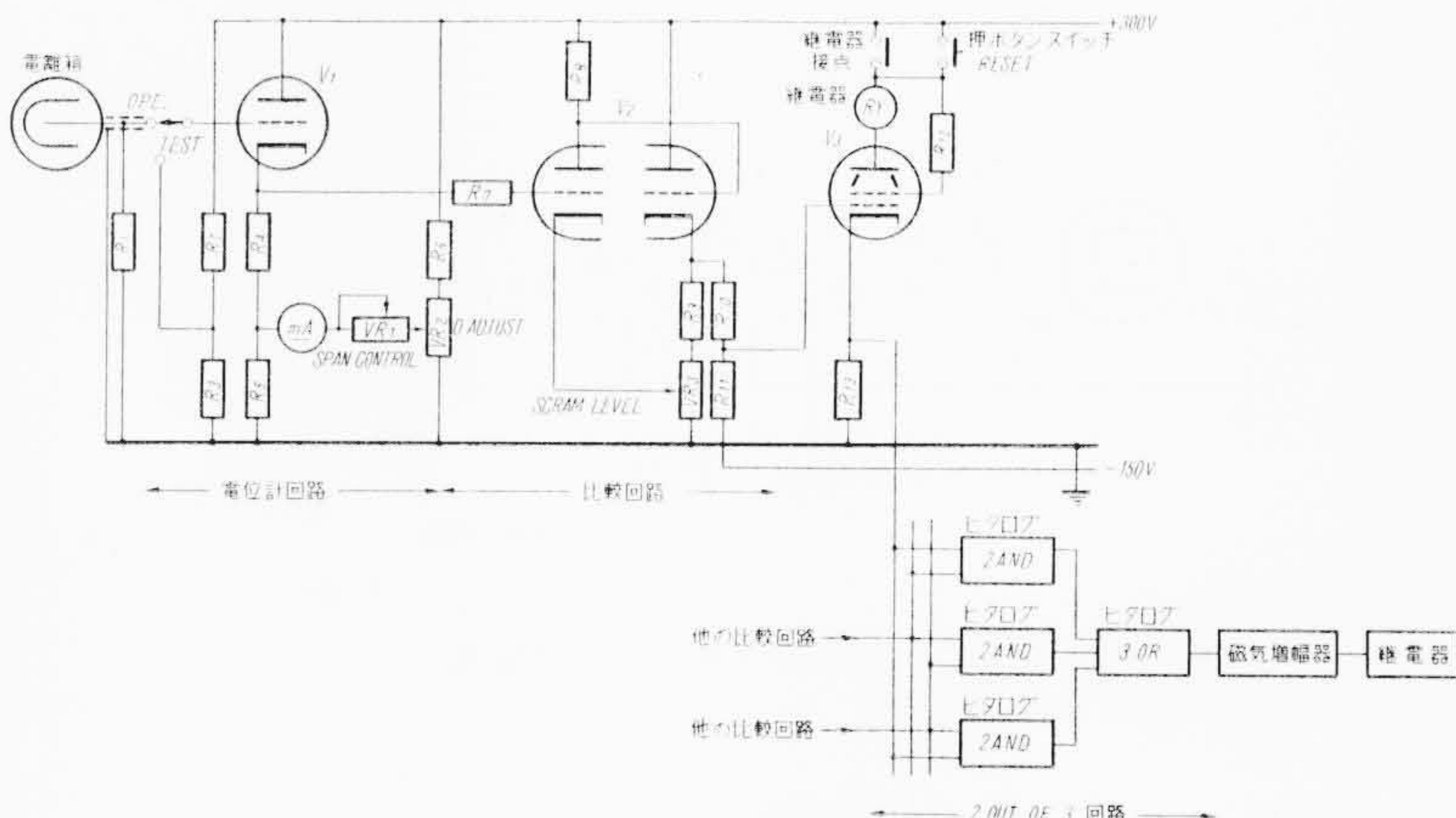
HTRにおいては2 OUT OF 3 同時回路方式を採用した。比較回路は真空管によって構成し、2 OUT OF 3 回路の論理回路にはヒタログ（磁気的論理要素の日立商品名）を用い、磁気増幅器と継電器によってスクラム動作をさせている。一方これとは独立に真空管によって2 OUT OF 3 回路を構成し電磁石用増幅器を働かせてバックアップをした。

第1図に安全増幅器の回路を示す。電位計回路ではmA計によって電離箱出力電流が読み取られる。真空管V2の比較回路では可変抵抗器VR3によってスクラムレベルを定格出力の40~200%に設定できる。

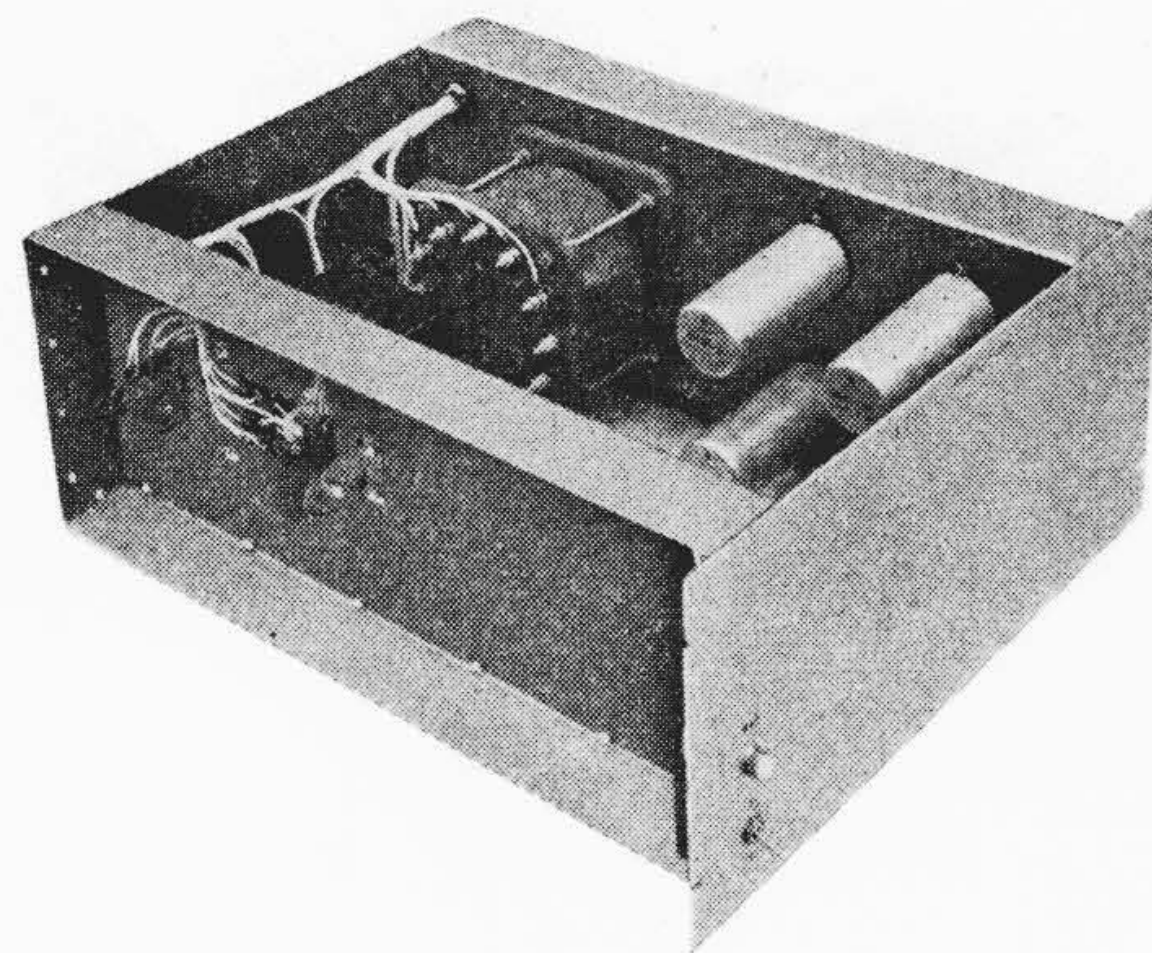
比較回路はその性能として

- (1) 動作が速いこと
- (2) 設定値が変化せず安定性があること
- (3) 入力信号の上昇率によって動作レベルが変化しないこと
- (4) 回路構成が簡単で回路部品が少なく、信頼度が高いこと

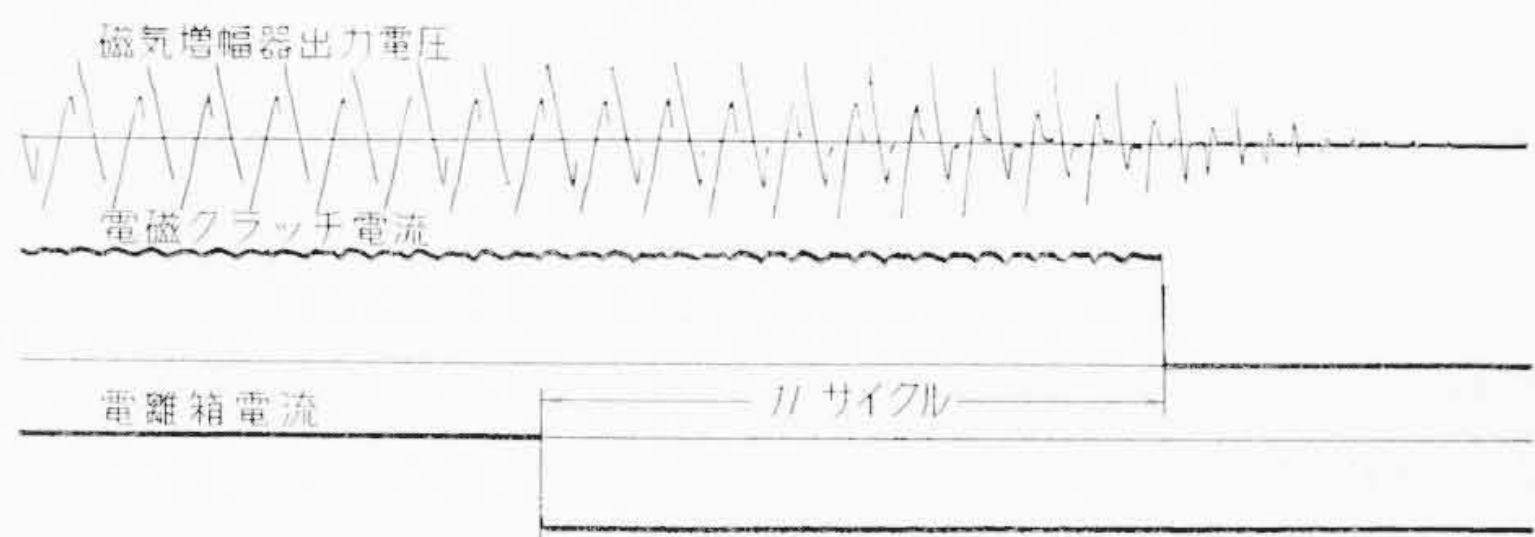
が要求される。この点から設計、製作、試験が行なわれた。HTRの警報レベルは定格出力の105%、スクラムレベルは110%であることから、比較回路の動作点のばらつきは±1%以内であればよい。試験結果は十分安定な性能を示した。この試験は徐々に上昇する入力や急激に上昇する入力で行なわれ、入力波形には関係しないことも確認された。また電源電圧の+10%、-15%の変動に対して



第1図 ヒタログを用いて構成された安全増幅器の単純化された回路

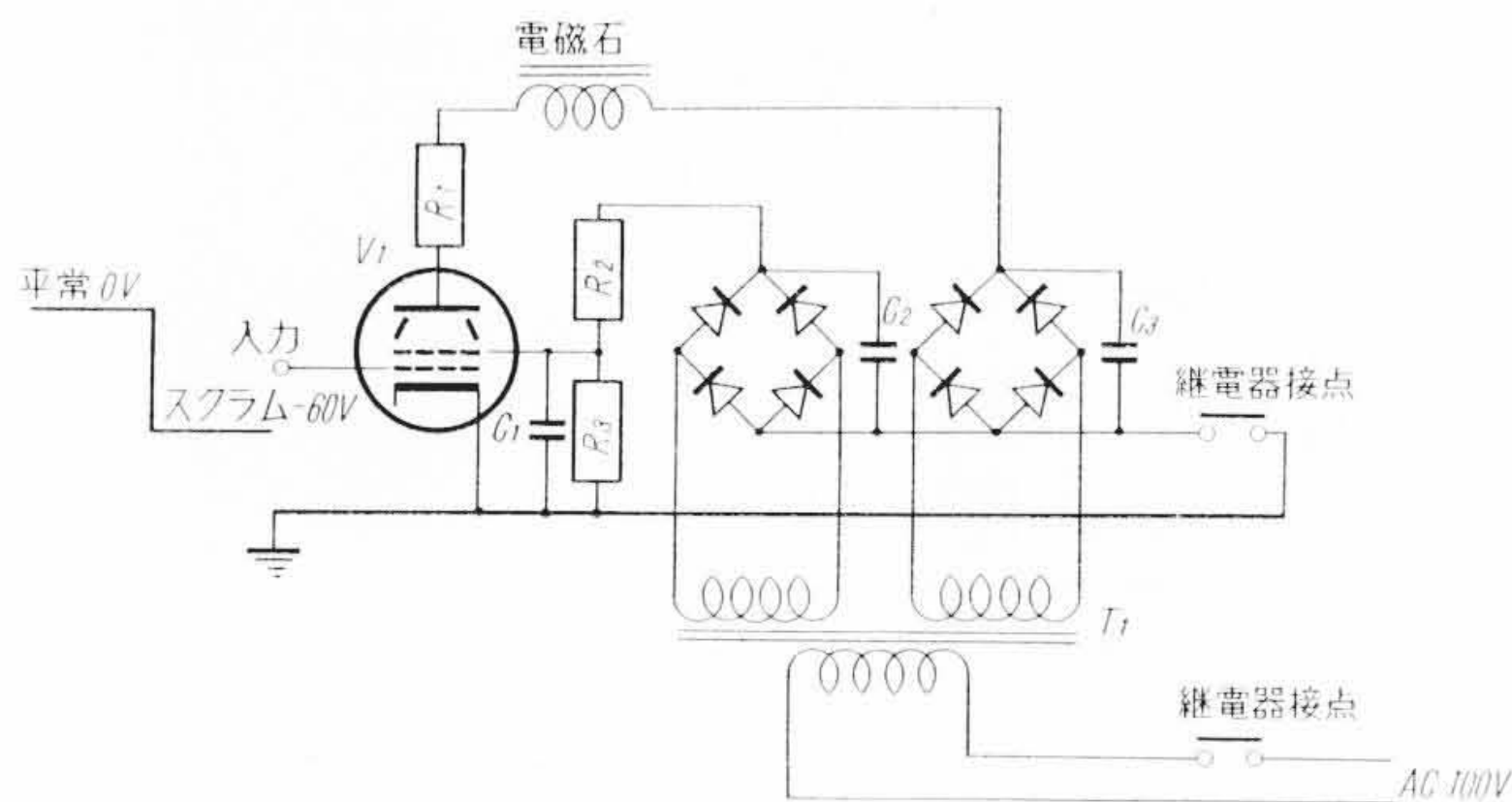


第2図 ヒタログ増幅器

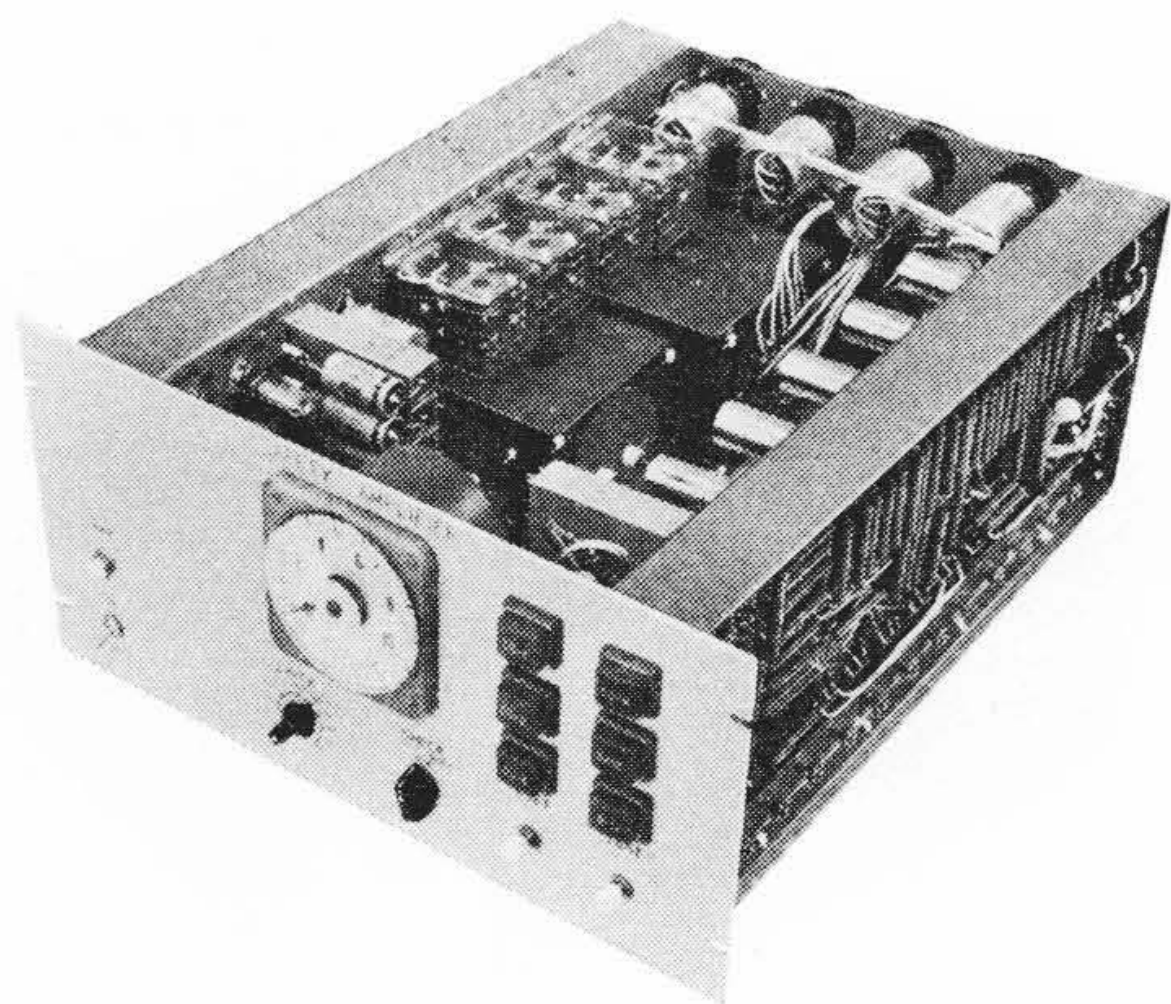


第3図 ヒタログ、磁気増幅器、継電器による電磁クラッチ電流遮断のオシログラム

も安定であり、使用される無停電電源の電圧安定度±1%を考えると十分に余裕がある。V3は電力増幅用で、ここに用いた継電器はスクラム動作の保持と表示燈用である。ヒタログというのは小形の自己帰還形磁気増幅器を用いた論理要素で、2個の鉄心と巻線および数個の固定抵抗器とシリコン整流器によって構成され、モールドされたものであるから、半永久的な寿命を持ち信頼度が高く動作時間も短い。ヒタログと磁気増幅器とをまとめて第2図に示すシャーシに納めた。この磁気増幅器で動作する継電器によって安全棒を保持した電磁クラッチの電流を遮断する。そのオシログラムを第3図に示す。遮断時間は11サイクルであり、ヒタログ、磁気増幅器の電源に400サイクル/秒を用いると約28msであって、十分短い時間で動作する。第4図は真空管を用いた2 OUT OF 3回路を示す。ヒタログ回路とは独立に比較回路、2 AND回路、OR回路を有しており、この回路の出力は電磁石用増幅器の真空管のグリッドをカットオフさせる。動作時間は40μs以下で、電磁石用増幅器と組み合わせて電磁クラッチ電流を切るに要する時間は1ms以下である。第1図の回路と同様の構成を持つ警報回路と継電器による2 OUT OF 3回路とを含めて一つのシャーシに組んだのが第5図である。他に内蔵電源の異常を検出する回路、各部の電流電圧を読み取る回路が付属している。このシャーシが3台で2 OUT OF 3回路



第4図 真空管を用いて構成された安全増幅器の単純化された回路



第5図 安全増幅器

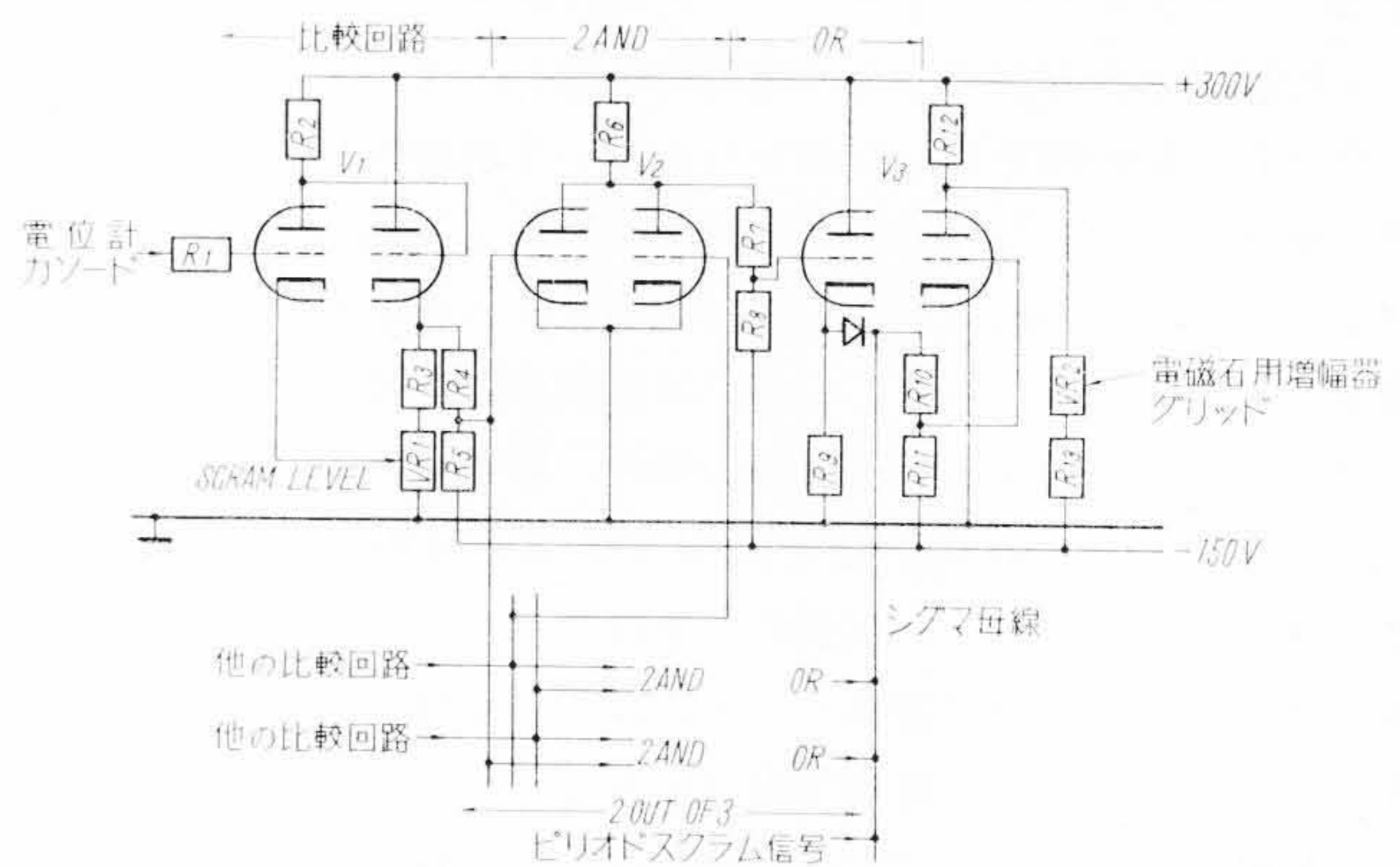
を形成するよう製作されており、1台を取り除くと自動的に2入力形の直列方式に切り換わる。運転中においても一台ずつ試験できることは2 OUT OF 3方式の利点の一つである。次に述べる電磁石用増幅器も全く同じであるが、これらの安全増幅器は高性能であると同時に高信頼度のものでなければいけない。振動、高温、高湿度などについても十分考慮して設計するとともに部品の選択、製作、試験にも十分の注意を払った。たとえば高温高湿試験では気温40℃、湿度100%の部屋で300時間試験され正常な動作を示した。

2.2 電磁石用増幅器

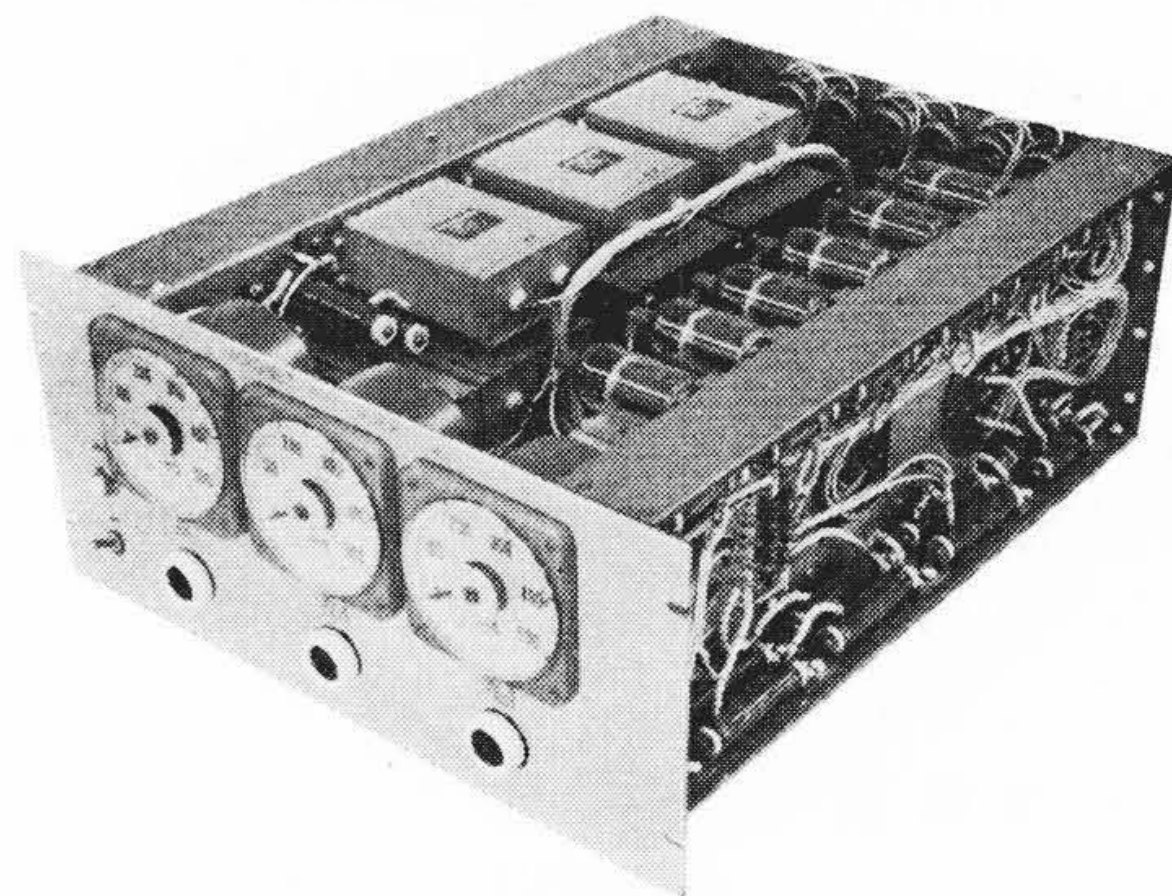
制御棒をスクラム時に炉内にそう入する機構には種々あるが、実験炉には電磁石で保持した制御棒を自然落下ないしはスプリング力の助けをかりて、炉内にそう入する機構が多く用いられている。電磁石用増幅器には

- (1) スクラム信号を受けてから電流遮断までの時間が短いこと
 - (2) スクラム信号を受けたとき確実に電流遮断を行なうこと
- の二点が要求され、この目的のため各種のくふうがされていて、真空管を使用した回路、トランジスタ、制御極付シリコン整流器などの半導体素子を使用した回路⁽¹⁾、高速度継電器を使用した回路などがあり、いずれも一長一短がある。真空管回路ではあまり大電流を取れないが、電磁石コイルの絶縁耐力によって制限される速度で電流を切れるので、動作時間は最も短い。制御極付シリコン整流器を使用した場合は大電流を制御できるが、交流電源の半サイクルの時間を要する。継電器を用いた場合は、動作時間は長い、従来から使用されて経験もつまれているので、適当な選定によって信頼度の高いものが得られる。HTRにおいては真空管によって電磁石（電磁クラッチ）に電流を供給し、継電器を併用した。

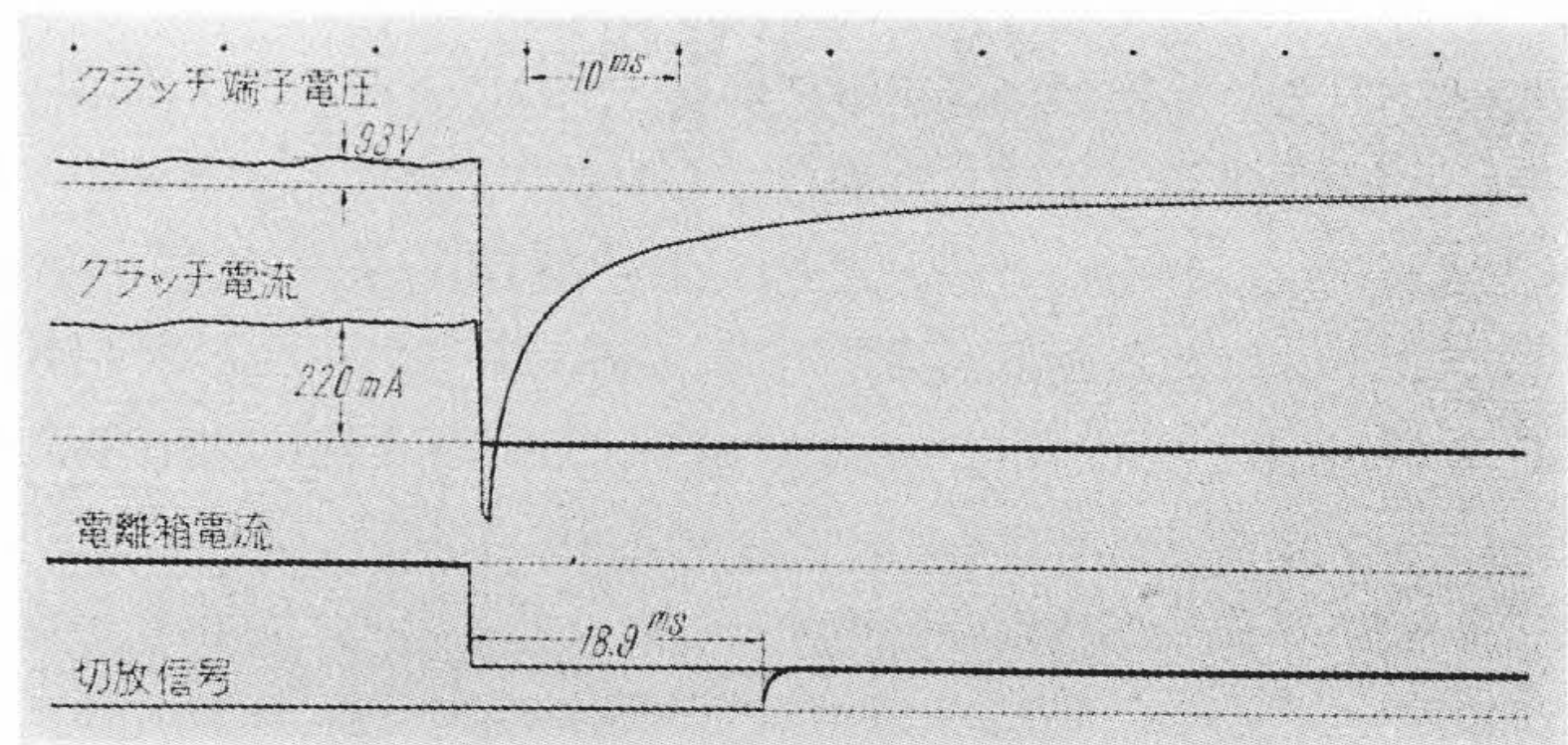
動作時間の特に短いことが要求されない要因については、継電器のみによりスクラムする。要因の数だけの継電器接点を直列にして、直接電磁クラッチ電流および交流電源を切る。ここに継電器を仲介させると、論理回路には電流容量の小さい小形の継電器を使用できるが、最終の継電器にすべての信号の伝達路が集中するので系



第6図 電磁石用増幅器の単純化された回路



第7図 電磁石用増幅器



第8図 電磁クラッチ切放し時間のオシログラム

全体としての信頼度が下がる。中性子束レベルと炉周期によるスクラムは高速度を要求されるので、真空管のグリッドをカットオフさせる方法を併用した。この場合の電流遮断時間は、コイル両端に現われるサージ電圧とコイル絶縁の面から制限を受ける。この時間はクラッチの機械的な運動に必要な時間が約20msであるのに比べて十分短い。使用した真空管は6DQ5の2本並列で、HTRには安全棒が3本あるから同様の回路を3系統入れた増幅器を製作した。

2.3 電磁クラッチ

HTRの制御棒駆動機構にはワイヤドラム方式が用いられ、スクラム動作は電磁クラッチの切り放しによって行なわれる。電磁クラッチを電磁石用増幅器、安全増幅器と組み合わせた場合、電離箱の出力電流が増加しスクラムレベルに達してから電磁クラッチが切り放され安全棒が落下を開始するまでの所要時間は実測の結果20ms以下であった。事故解析から要求された値が50ms以下であるからこの数値は十分な余裕を持っている。

3. プロセス計測による安全回路

原子炉では運転状態を正しくつかむために、多種の工業計器によって各部のプロセス量が測定され、その信号の大部分は警報やスクラムの信号源になっている。中性子束レベルによるスクラムには

2 OUT OF 3 方式が広く用いられているが、プロセス量によるスクラムにも 2 OUT OF 3 方式を採用すると非常に有用である。これはかなり費用がかかるけれども、大形の原子炉や発電炉では必要な停止は避けるべきである（炉を停止するのはその使用目的から不都合であり、また再起動にも時間を要し時には Xe のために再起動が困難になることもある）から、少なくともスクラム回路にこの方式を採用することは十分採算がとれるであろう。炉の運転中においても計器の試験ができることも、炉の運転率を上げるに役立つのである⁽⁴⁾。

HTR の場合には炉の特性から、再起動が容易であるために誤って停止されても被害が少ないことと、ほとんど毎日炉の起動前にプロセス計測器の点検ができることのために 2 OUT OF 3 回路は採用しなかった。しかしプロセス系の事故もその結果は重大である。そこで異なった二種類の検出端を用いて直列方式を採用することによって安全性を確保した。液面の場合を例にとると、HTR では炉心タンクおよび実験プールの液面によって警報とスクラムがなされている。この検出には、差圧発信器と自動平衡計器とを組み合わせた液面計によるものと、直接液面変化によって動作するフロートスイッチとが用いられていて、両者とも独自に継電器を動作させて電磁クラッチの電流を切っている。したがって一方が故障しても安全である。

4. その他の要因

今迄述べてきたもののほかにも原子炉にとって欠くことのできない重要な監視項目がある。

4.1 地 震

地震によって炉心容器、冷却系統、制御棒駆動機構が破損されたときそのもたらす被害は非常に大きい。それで大きな地震が検知された場合には炉を停止するのが安全である。特に日本では地震が多いので炉の耐震構造とともに地震の検知が重要である。感震器には震動が加わったときに接点が開く方式と閉じる方式と二種類ある。前者の方が構造は簡単であるが動作する加速度の値は不正確である。後者は地震がきて接点が閉じたときに確実に電流が流れるよう接点の保守が必要であるが、動作する加速度は正確な値となる。HTR には垂直動に感ずる振子と水平動に感ずる振子とを持った後者の形式のものを採用した。ここで問題にするような地震はめったに起きないために感震器はいつも待機状態にあり、地震がきた時に確実に動作するように保守するのが大事な仕事である。

4.2 実験孔プラグ、実験室ドア

運転中の炉の実験孔プラグや運転中放射線レベルの高い室へのドアをあけること自体は、炉の運転とは関係ないが、このようなことが起きないようにすることは、炉の運転者や実験者の安全を確保するという意味において重要である。プラグやドアに電気錠を付け、炉の運転中にはあかないようにインターロックすることと、鎖錠しておきかぎを炉管理者が管理することによって安全度が十分確保できる。逆にプラグにつけられたリミットスイッチによってプラグを抜いたままでは炉を運転できないようにインターロックしても安全は確保されるが、この際にはプラグを抜いた実験ができるように、このインターロックを炉管理者の管理したかぎでバイパスする回路をもうけないと不便である。HTR では各実験孔のそばでかぎによるバイパスが行なわれている。

4.3 電 源

原子炉には商用電源を始めとして、放射線計測器用無停電電源、電離箱用高圧電源など各種の電源が使用されていて、これらの電源が正常な状態にあることは、炉の運転には絶対に必要である。商用電源が停止したときには大体において炉を停止しなければいけない

が、スクラムに用いている継電器の電源を商用電源から取ることが多いので、特別な操作をしなくとも炉は停止する。放射線計測器用の電源には雑音の問題、安定した電圧の必要性、停電時においても炉の状態を測定する必要があるなどの理由から電動機、発電機、発電機を組み合わせた無停電電源が用いられるのが普通である。この故障によるスクラムも前の場合と同様に継電器を用いて行なわれる。

電離箱用高圧電源の電圧が降下すると電離箱が正しく動作しなくなり、たとえば中性子束が増大してもその検知ができなくなる。そこで電圧継電器などを用いて監視する必要があるが、通常は電離箱とその電源は多数組用意されているので、単に警報するだけで十分である。計測器や制御器には真空管やトランジスタが用いられており、それらの電源が正しく動作していなければその指示や、動作を信頼することはできない。少なくとも安全系統についてはその電源の監視が必要である。

4.4 保 健 物 理 量

原子炉に限らないが、放射性物質を取り扱う場所では必ずモニターシステムがあつて β 線、 γ 線など放射線の線量を測定し、運転者や実験者の安全を計っている。このような設備も安全系統として忘れてはならない。特に炉体に近く取り付けられたモニターによってはスクラムも行なわれる。炉室が気密に作られていて、万一炉が事故を起した際でも放射性物質が外部にもれないようになっている建物では、炉室内外の圧力差も監視すべき項目となってくる。

4.5 制御装置の動作

原子炉の制御装置が故障してその結果事故が起きるような場合、事故を検出するよりは故障を検出する方がよいことは明らかである。この故障検出はやろうとすれば際限がない。HTR では中性子束の定値制御系と、安全増幅器電磁石用増幅器について故障検出を行なった。中性子束の定値制御系では先に述べたように自動制御系の誤差が増大した場合と、調整棒が著しく端によった場合にスクラムが行なわれる。

5. 結 言

以上原子炉の安全系統について、HTR の場合を例に取りながら述べてきた。安全系統を設計する際には、安全に重点を置き、炉が暴走して危険な状態にならないよう計画すべきである。しかし安全を強調するあまりなにもかも故障は安全側という安易な考え方で設計すると、しばしばスクラムしてしまい使いものにならなくなるであろう。炉を停止する系統は高い信頼性を有するとともに一部分の故障が全体の機能を停止することのない回路構成、たとえば 2 OUT OF 3 方式をとるべきである。どの程度までこのような重複した回路方式を採用するかは、各要素の故障の確率、炉の誤停止によって起きる事態の評価、経済性などを考慮して決める必要があり、現在はいきりした基準はない。

終りに臨み HTR の安全系統の設計製作に際し、種々ご指導を賜わった日立製作所中央研究所、日立研究所ならびに日立工場のかたがたに厚くお礼申しあげる。

参 考 文 献

- (1) W. M. Trenholme: A Reactor Safety System Using Transistors and Silicon Controlled Rectifiers, I.R.E. Transactions NS-7 [4] 14-17 (1960)
- (2) R. V. Studley: Reactor Flux Monitors, Instrumentation Conference, AECL-801
- (3) 加藤, 鈴木, 片木: 日立評論, 別 34, 42 (昭 35-2)
- (4) Instrumentation at Chalk River Nuclear Reactor, Power Engineering 56 (1961-9)
- (5) H. W. Newson: The Control Problem in Piles Capable of Very Short Periods, Mon p-271, 1947