原子力

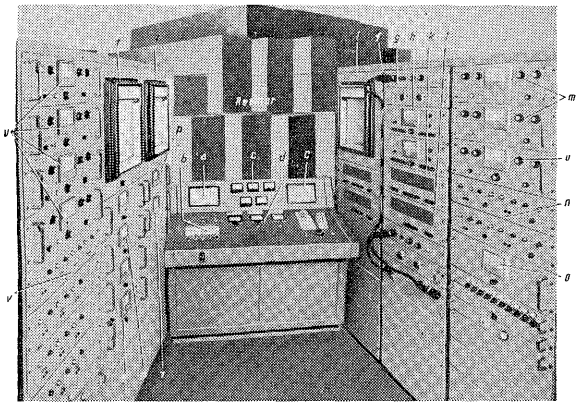
シーメンス アルゴノート 原子炉の計装制御および安全装置

Measuring, Control and Safety System of SIEMENS ARGONAUT Reactor

I. まえがき

シーメンスにおいては1959年6月熱出力 1kW(最高10kW)の熱中性子炉を完成した．これは濃縮ウラニウム(20%)，軽水および黒鉛減速であり，その構造においても，また計測制御方面でも従来と異なったいろいろな着想が試みられている．以下は計測制御の大要をのべたものである。

シーメンス，アルゴノート原子炉(SAR)の計測制御および安全系の計画にあたって最も大切なことは，高い安全性を保証することである．またその構成は簡単でしかも誤動作があってはならない。



a. 起動可能信号用の照明盤
b. 操作ハンドル
c. 中性子束密度用の指示計
d. 制御棒用操作ハンドル
e. 異状々態信号用の照明盤
f. 計数信号用主増幅器
g. 波高選別器
h. 計数信号用平均波高値指示計
i. 計数信号用平均波高値記録計
k. 計数器
l. 電子管式時計
m. 計数管用高圧電源装置
n. 限界値設定器
o. 直線形直流増幅器
p. 対数形直流増幅器
q. 対数率記録計
r. 微分形増幅器
s. 直線形直流増幅器
u. 電離箱用高圧電源装置
v. 限界値設定器
w. 増幅器試験装置

第1図 シーメンスアルゴノート原子炉の計測パネル(制御机および計測盤)

Fig. 1. Measuring panel of Siemens Argonaut reactor (Control desk and measuring panel)

いろいろな計測点から生ずる信号は原子炉のパネルに集中される(第1図)．これらの信号はこのパネルで安全系統と結びつけられる．安全系統の目的は，まず第一に原子炉の起動はすべて必要な準備を遂行した後に行なうことができるようにすること，および定められた安全限界を超過する場合は，炉の運転に無関係に炉を停止することである．これらの計測はまた炉の制御のために必要である．この測定値中最も重要なものは中性子束密度である。

II. SARの中性子計測装置

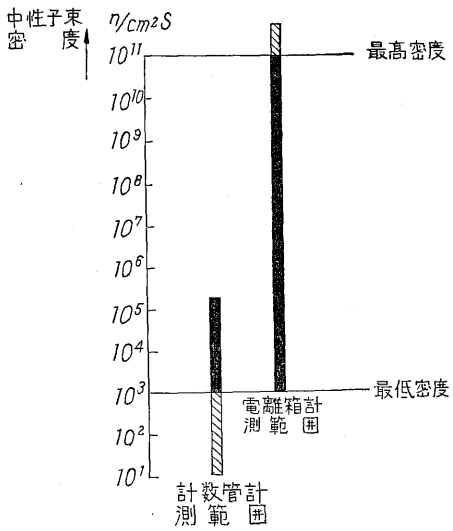
中性子束密度はただ一つの測定値として直接に原子炉の分裂度数，したがって，炉の熱出力に対する一つの指示を与える。

中性子束密度の最低の値は原子炉の起動に必要な中性子源の強さによって与えられ，SARの場合は約 10^3 n/cm^2 s であり，最高の値は全出力の場合約 10^{11}n/cm^2 s である．このことは8デカードの全計測範囲が，中性子計測装置によってギャップなく覆われていなければならないことを意味する(第2図)．普通の計測装置の場合はこのような広い計測範囲に対して正確な計測を要求することは無理である。

とくに中性子束密度の下限では信号電流はわずか約 10^{-12}A に相当することになる。

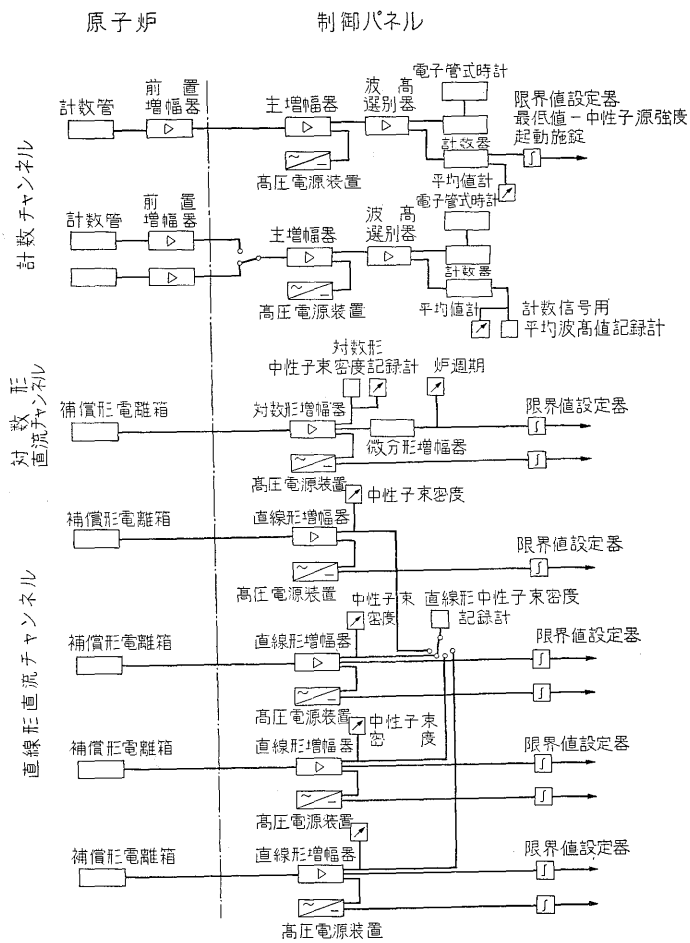
SARの場合は研究目的のために燃料要素の配列を変えることができる．中性子束密度の空間分布もしたがって変わる．これらのあらゆる場合に確実に計測できるために，全体で8個所の計測点を有する七つの計測チャンネルがある(第3図)．これによって8デカードの全計測範囲が連続的に捕えられる．その際この計測範囲の上方の部分(約 10^5～10^{11} n/cm^2 s)は直線形増幅チャンネル

および対数形増幅チャンネルで計られ，下方の部分（約 10^3～10^5 n/cm² s）は計数チャンネルで捕えられる。



第2図　中性子密度計測チャンネルの計測範囲

Fig. 2.　Ranges of neutron flux measuring channels



第3図　計測チャンネルの概観（ブロック線図）

Fig. 3.　Outline of measuring channels (block diagram)

下方の計測範囲に対しては計数管で中性子源の強さに相当する毎秒 10^3 インパルス，すなわちそれに相当する 10^{-12} A の電離箱電流を正確に計れることである．このような微弱電流の計測に対しては外乱の影響の除去が特に必要であるが，すでに解決された。

外乱のインパルスがガンマ線に原因する場合は，次に接続されている波高選別器で選別される．電離箱の場合は一方はガンマ線のみに感じ，他方はガンマ線と中性子線に感ずる二つの電離箱を差動式に接続することによって，ガンマ線に起因する電流の部分を補償する．この二つの電離箱は1個のいわゆる補償形電離箱にまとめられている．この種の電離箱はドイツではまだ入手できなかったので，SAR に対しては英国製の電離箱 RC 6 が使われた。

SAR では外部の黒鉛反射体の部分に3個の BF_3 比例計数管が前置増幅器とともに備えられている．前置増幅器からケーブルを通して送られるインパルスは，もう一度主増幅器で増幅される。計測インパルスより強度の小さい外乱インパルスを，次に接続されている波高選別器で除去するためには，主増幅器の増幅は直線的でなければならない．また，よい分解能力を持つためには，上記の増幅器は広い周波数範囲を包含しなければならない。

インパルスの周波数が平均値形成によって単位時間ごとのインパルスの数により，決定できるようにするために，計測インパルスは，波高選別器から平均値計と電子管式計数器に導かれる．平均値計に組み込まれた拡声器はいろいろ異なった計数段階と関係を保たせることによって，高いインパルスの継続がある時は音で聞こえるようにしてある．ただ定められた最も低いインパルスの場合，したがって定められた低い中性子束密度の場合は調整可能の限界設定器が安全系に信号をだす．この場合において中性子源がまだ充分強い場合には原子炉を起動し得る状態となる。

SAR では合計して二つの計数装置（インパルス計数装置）があり，三つの計数管の中の二つを選んで接続できる．計数率が 10^5 Imp/s の値を越えると中性子束密度の計測は五つの補償形電離箱のみに移される．このうち4個は外側の反射体の外側肋材に置かれてあり，第5のものは熱中性子柱の下の移動可能の車のなかにある。

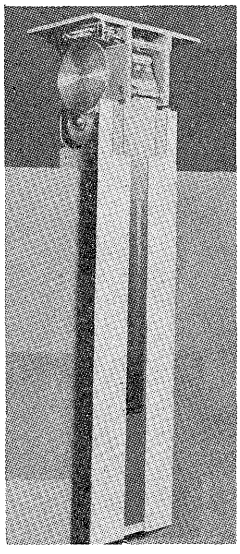
電離箱の電離電流は直流増幅器で増幅される．この直線形直流増幅器の計測範囲は8デカードに

わたり切り換えられる．この計測用増幅器の零点の定数には重要な要求が行なわれる．すなわちこの増幅器には自動的なドリフト補償が行なわれている．四つの直流増幅器のうちの三つにはそれぞれ限界値設定器が接続されており，ある定められた調整可能の計測値の超過が起る場合は停止信号が安全系に与えられる。第4の増幅器にはこのような限界値設定器はない．これは安全系が原子炉を停止することなくその時調整された全範囲を計測し得るためである．これら四つの増幅器の計測値はいずれも選択的にコンペンゾグラフ（KOMPENSOGRAPH登録商標）で記録できる．他の一つの直流増幅器は対数特性を持っている．それは，デカードの全計測範囲が一つの目盛上に便利に集められるためである．この計測値を付属コンペンゾグラフに記録させることによって原子炉運転の経過と一義的な関係を求めることができる。

中性子束密度を微分増幅器において微分することによっていわゆる炉周期の逆数信号が得られる．この値は中性子束密度のその時々の変化速度を示すものである．この変化速度の大きい場合は限界設定器が働き，炉は安全系により停止される。

III. 中性子束密度の制御

SARの場合には中性子束密度の制御に対しては三つの制御要素が用いられる．これは炉中のカドミウム板の位置により熱中性子を多く，あるいは少なく吸収することによって連鎖反応に影響を及ぼすものである．このうちの1個でも炉を臨界以下にすることができる．この外にさらに三つの炉停止用要素がある．後者は位置表示用の一機構を除いて前者の制御要素に同じものである（後述の第5図を参照）．第4図に一つの制御要素の構成を示す．直流駆動電動機が磁気結合によって円筒に作用する．この円筒上に板ばねが巻き取られる．その板ばねにカドミウム板がピンでとめられており，それが案内板の中を走る．制御要素は50 cmの移動行程内の任意の位置を取ることができるが，停止要素は全部引き抜かれて，止めておかれる．それは炉の異状々態に対して常にその全吸収能力を発揮できるよう，待機させるためである．磁気結合をはずした場合はこの要素は0.4秒以内に最下位置まで落ちて炉を安全に停止させる。



第4図 制御要素
Fig. 4. Control element

SARはこれ以外に上記の停止系と完全に独立した二つの系統すなわち最小の時間内の水の放出と窒素の吹き込み装置を持っている．これらの装置は安全系の系列と結合されており，その運転は常に監視されている。

IV. 安 全 系

SARの全体の構想の場合は最高の安全性がまず第一に取り上げられるということは最初に述べた．安全系は次の三つの観点から企てられる。

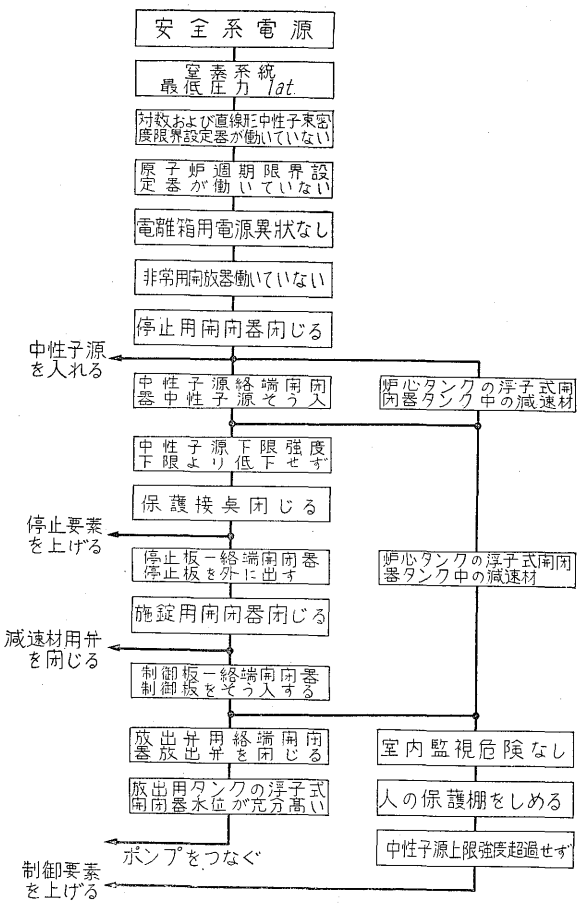
1) 原子炉の安全になんらかの影響をもつあらゆる量の警報は安全系を通じて捕えられる。
2) それが自動的に与えられるものでも手動で与えられるものでも，炉の停止統括はあらゆる事故時と同様いかなる運転状態においても有効でなければならない。
3) 炉がすでに安全に停止された場合でも，またこれらの安全系のうちのただ一つが機能を発揮できる場合でも，互に独立したすべての安全系は停止命令を同時にだす。

第5図に示した安全系の計画図は，図中のおのおののわくのなかに記された個々の構成要素の相互の関係を示している．これら個々の構成要素はまた多くの停止用要素から構成されている。

電流の供給によって施錠の有効範囲は窒素の監視装置中性子束密度と炉周期用危険警報接点，ならびに電離箱電圧監視装置と手動危険停止装置を通じて錠を有する接点にまで及ぼされる．この錠のある開閉器の動作によって第一歩として中性子源が分裂域に導入される．前述の異状々態が何一つ存在しない場合に限ってこの導入命令は有効である．最初の起動の条件すなわち三つの停止板を上げることは，中性子源が正しく導入されたこと，およびそれが終端開閉器の閉塞によって固定されていることである．さらに起動可能信号の存在が必要である．すなわち中性子源の強さはある定められた値以下に下ってはならないし，さらにいろいろな位置に調整される接点の保護が完了していなければならない。

それからただ1個の停止板が引き上げられる．それに相応して次の起動順序“減速材弁閉塞”と“ポンプ接続”が行なわれる。

長いポンプ駆動の後，炉心タンク中に正しい水位が得られた時，浮子式開閉器の接点を閉じ広範な安全装置によって制御板を上げることができる状態になる．全く同様に停止板もただ1個動かされる．この最後の段階は原



第5図　安全系接続の検閲図解

Fig. 5.　Check diagram of safety system's connection

子炉を臨界までもっていくことである．起動の全体は約30分を要する．ここで運転状態の変化を許容できる範囲に納めるように起動用信号がだされる。

ある要素によって異状々態が警報されると，全体的に作用系列において次の起動段階が固定されるか，あるいは後退させられる。

たとえば中性子密度が設定した最高値を越えれば第5図に示すように動作系列は中断される．それについで停止板および制御板は落下し，ポンプは停止し，放出弁は開放され，中性子源は分裂域から外へだされる。

すでに述べたように SAR では互に独立した三つの停止系があり，そのおのおのが炉を臨界以下にすることができるようになっている．この三つのいずれの系においても炉を直接に監視しているその系の計測装置が異状々態を警報できるようになっている。

原子炉の運転において直接には関与していない異状々態警報のある場合は制御板のみが落下する．これだけで炉は安全に停止される．このことはたとえば原子炉を保護するため停止する権限はないが，この状態では困るという場合に起る。

この場合には再起動は30分間の起動条件の下で可能である．さらに上述の形式の停止系はただ1個の停止用要素で安全に運転できるという前提を与える点において最高度の安全性を示すものである．しかし自動的にこれら個々の要素に異状々態が入った場合は，危険な運転状態が少しでも起きないように（フェールセーフの原理）全体の系列のわく中の要素が作用する。

この原理は直線的中性子束密度計測チャンネルにおいて説明される．すべての他のチャンネルと同時このチャンネルは三つの独立した限界設定要素を有する．その第1の要素は単に予告だけに役立ち安全系には用いられない．第2の要素はある定められた調整可能の中性子束密度の場合に感じ，この場合には全体の安全系を作用させる．第3の要素は装置の故障の監視のみに使われる．多くの場合計測チャンネル中の予期される異状々態に対し増幅器の出力は正または負の最高の電圧を引き起す．中性子束密度が実際に設定された最高の価以下になると第2の限界値の要素が働き，負の電圧の偏差がそこで第2の要素と共にある第3の限界値要素すなわちその接点に働き，安全系の作用要素を働かせる．安全系はすべての限界値要素の接点電圧のない状態で開放になるが，一方運転用の接点はこの状態において閉じ，異状々態警報の場合に開く．これは限界値要素が接続された場合にのみ原子炉が起動できるようにするためである。

この結線方法による安全性は個々の停止機器の最高の安全性により安全なものにされる．前述のこれらの停止用機器の機能から次のことが容易にわかる．すなわち導線の破損，結線の脱落または短絡のようなすべての外部からくる電気的な障害は，停止系の機能に害を与えないばかりでなく，さらに強制的な停止機構を作用させる。

この原理の首尾一貫した方法は確かに一般の装置と比べてある程度支出超過を強いられる．

研究用原子炉の場合の計測装置と安全系は小さい場所のなかにあっても，それは本質的には動力炉の場合と同じである．それゆえ SAR の建設と運転中に得られた経験は，今後建設されるより大きな原子力プラントに対して非常に価値がある．得られた構想が目的にかなったものであったことは，すでに臨界実験の計画通りの結果ならびに SAR の今までの運転経験が示している。

（原著者：Ditterich Reik u. Seguin
原　書：Siemens Z. Dez. 1959 Heft 12
抄訳者　豊田工場設計開発課　吉　江　　充）

e-Front runners

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。