U.D.C. 539.125.5.076 : 621.384

可搬式中性子発生装置

Portable Neutron Generator

末松　茂*　小田切　亘*　菅ノ又　伸治**
Shigeru Suematsu　Wataru Odagiri　Shinji Suganomata

内容梗概

核分裂による原子力の解放は中性子によってなされる。したがって中性子と物質の相互作用を研究するには，単色中性子源が必要欠くべからざる条件である。この中性子源として開発，製作されたのが本可搬式中性子発生装置である。加速電圧は 150 kV で，重水素イオンビーム 1 mA である。ターゲットには三重水素吸着ターゲットを使用している。放射される中性子は，14.1 MeV のエネルギーを持ち，発生量は 10^{10} n/s である。

1. 緒言

原子炉設計の際に必要な各種の炉物理パラメータの測定や，臨界集合体や，原子炉の動特性測定のために，パルス状中性子が使用されている。ある周期をもってパルス状中性子を発生させ，これを中性子の減速材や，増殖物質に打ち込み，その媒質中での中性子密度変化を時間分析器で測定して，減衰曲線を求め理論的な減衰曲線を，これに一致させ理論式中の各種パラメータを決定するものである。

このほかに，最近その発展が期待されるようになってきたものの中に，放射化分析がある。これは単色中性子で物質を照射し，その中に含まれている微量不純物を放射化して，出て来る放射線を測定し，その純度を決定する方法である。高純度を要求される金属中での，酸素，窒素，炭素の定量，石油中に含まれる酸素の定量，原子炉用黒鉛中に含まれる硼素の定量分析などはそのよい例である。

単色中性子を発生させるために，バン・デ・グラーフ，線形加速器，サイクロトロンなどが用いられるが，いずれも設備費が高く，ビーム電流の小さい欠点がある。最近ではコッククロフト形加速器を小形軽量化し，mA 級のビームを取り出す方法が開発され，原子炉実験，放射化分析にさかんに使用されるようになった。

今回製作した本器は，切り換えによりパルス中性子も，連続単色中性子も発生できるようになっており，原子炉実験，放射化分析の両方に使用することができる。

2. 中性子発生の原理

中性子の発生には，いわゆる D-T 反応を利用する。すなわち，重水素イオンを 150 keV 程度に加速し，三重水素に当て，中性子を発生させる方法で，これを反応式で書けば，

$$D^2+T^3 \rightarrow He^4+n+14.1\ \mathrm{MeV}$$

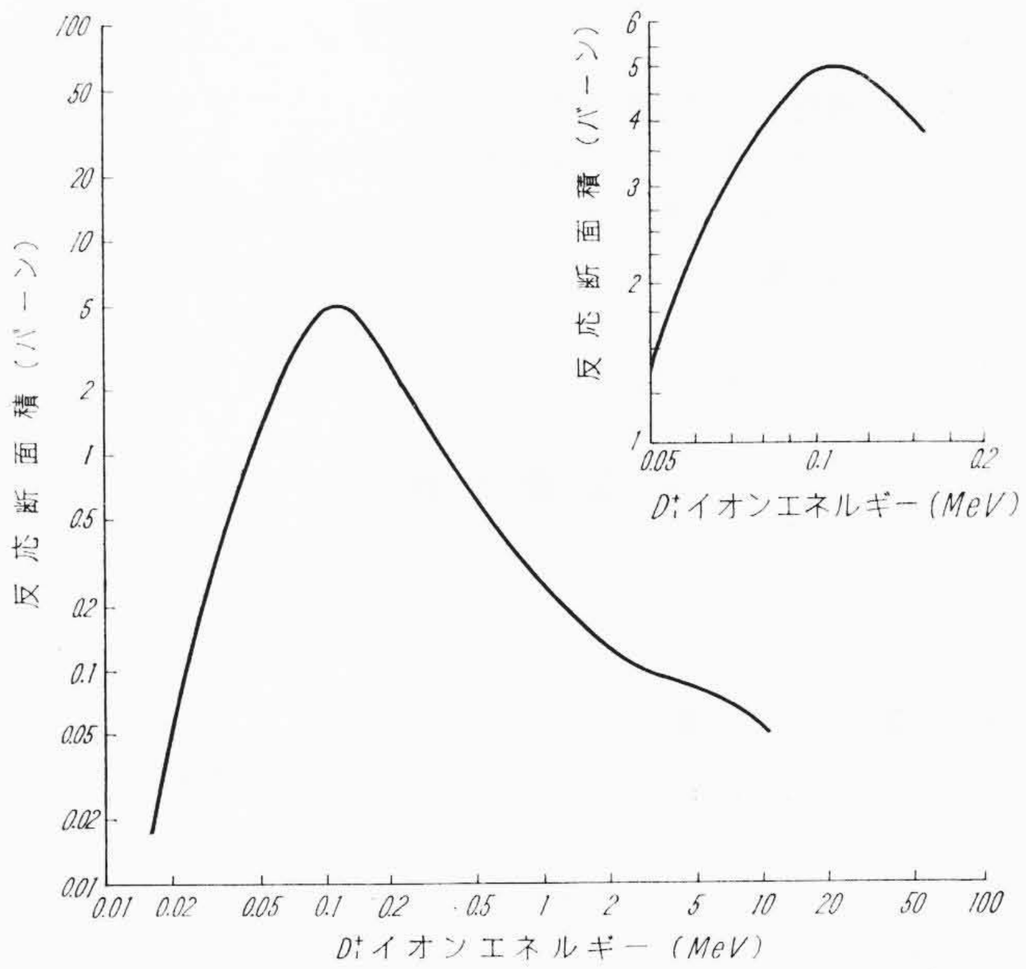
となる。ターゲットは三重水素を多量に吸着した銅基板チタニウムターゲットである。

D-T 反応の反応断面積は，第 1 図に示すように加速エネルギー 108 keV で最大になり，約 5 バーン[1]である。中性子のエネルギーは約 14.1 MeV で，加速エネルギーおよび中性子の放出角でいくぶん異なるが，これは無視して単色中性子と見てよい。

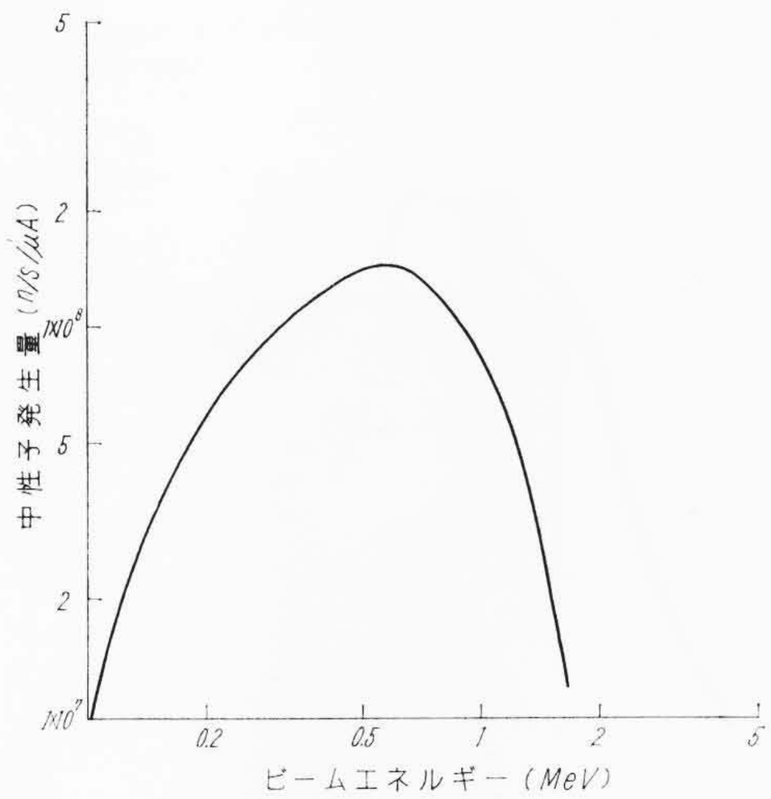
反応断面積は 100 keV 付近で最大であるが，実際に使用するターゲットは厚いターゲットであり，ターゲット表面からイオンの到達厚さまでの間で反応が起こるので，実際の中性子発生量は 1 μA 当たり第 2 図[2]のようになっている。最大発生量は加速エネルギー 600 keV 程度で，約 1.5×10^8 n/s/μA である。

中性子実験に使用する中性子発生量は通常 10^9～10^{10}n/s であり，この目的のためには，加速エネルギー 150 keV，加速電流 1 mA で十分であり，いたずらに加速エネルギーを高くすることは装置の大形化をまねき，可搬性を失う結果となる。

パルス状中性子は，ビームをパルス化して，ターゲットに当てれば容易に発生させることができる。



第 1 図　T(d, n)He⁴反応における反応断面積と加速エネルギーの関係



第 2 図　Ti-T ターゲットを使用した場合の D-T 反応における中性子発生量

*　日立製作所国分工場
**　日立製作所日立研究所

3. 可搬式中性子発生装置の仕様

本中性子発生装置の仕様はつぎのとおりである。

形　　式　屋内コッククロフト・ウォルトン式

仕　　様　加速電圧　150 kV

　　電圧安定度　±1.5 kV

　　加速電流　1 mA

中性子発生量

（1） 連続運転の場合　10^{10} n/s

（2） パルス運転の場合

パルス幅 (μs)	立上り時間 (μs)	減衰時間 (μs)	くり返し周波数 (c/s)
500	15	20	1～ 10
100	3	5	1～ 100
10	1.3	2	1～ 1,000
1	0.13	0.2	1～10,000

このほか，運転に必要な条件は，

油拡散ポンプ，ターゲット冷却水	5 l/min
拡散ポンプトラップ用ドライアイス	3 kg/day
周囲温度	27℃ 以下
相対湿度	70% 以下

であり，必要電力は5 kW である。

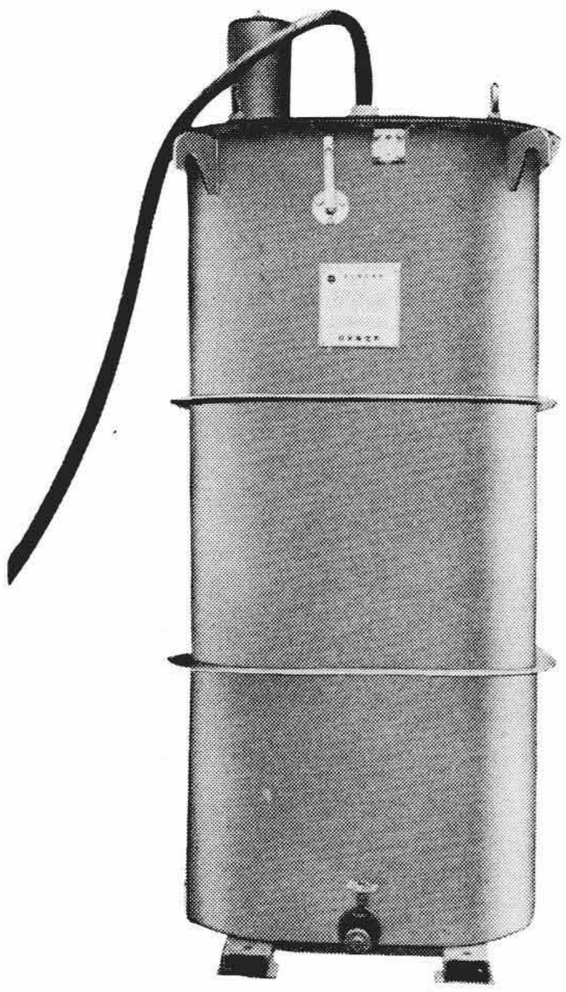
4. 装置の構成

中性子発生装置は，イオンを作り，これを高電圧で加速し，ターゲットに当てるのが目的であり，装置は大別して電源部，イオン加速器，制御装置に分けられる。以下これらについて述べる。

4.1 電　　源

イオンを加速する 150 kV の高圧電源の外観は，**第3図**に示すとおりで，内部には多段式のコッククロフトが収納されている。従来は半波形のものが多かったが本器は全波形コッククロフトとしてリップルを少なくしている。コンデンサは0.1 μF で，整流器にはセレンを使用している。励磁変圧器は，コッククロフト下部に取り付けられている。

励磁電源は高周波発電機で，出力側にはコッククロフトの容量性負荷による，進相電流を補償するためのリアクトルを取り付けている。



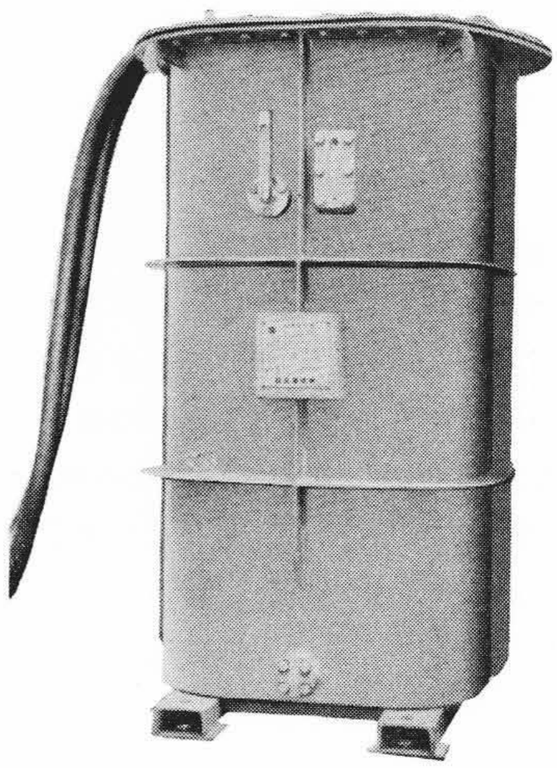
第3図　150kV 高圧電源

このほか，イオンソースの電源諸機器に電力を供給する絶縁変圧器があり，その出力は 100 V，2 kVA で，入力は前記の高周波発電機より供給される。その外観を**第4図**に示す。

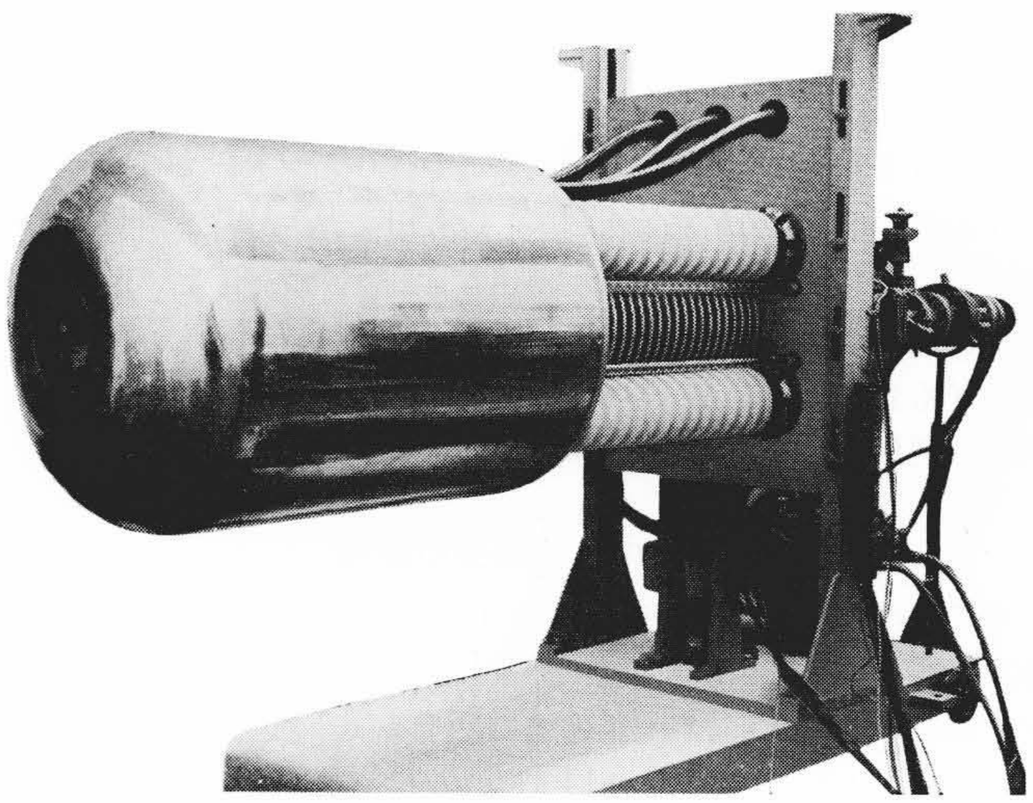
高圧電源および絶縁変圧器の出力は，150 kV の使用に十分耐える防電撃高圧ケーブルにより，高圧電極に導かれる。

4.2 イオン加速器

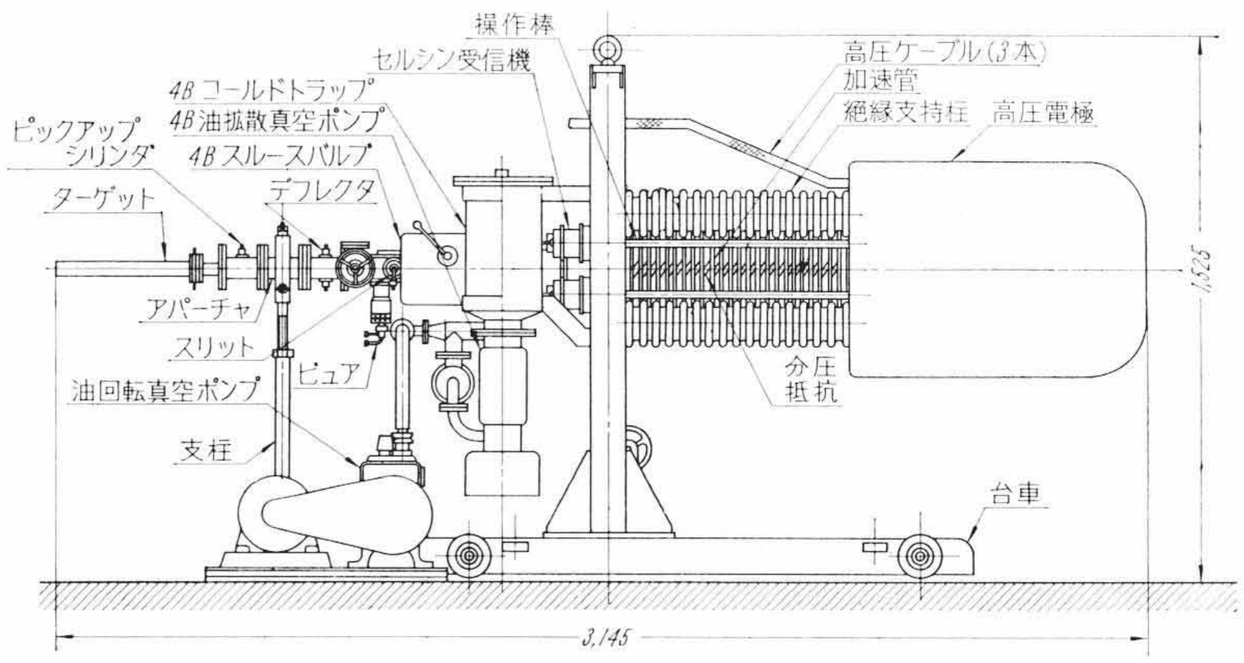
本器は，中性子発生装置の心臓部を形成するもので，その外観を**第5図**に，寸法図を**第6図**に示す。高圧電極内には，イオンソースに必要な電源およびパルサ電源がある。イオンソースに続く加速管は，多段式で電極にはビームに対し遮へい係数の良い灰皿形を使用



第4図　絶縁変圧器



第5図　イオン加速器



第6図　加速器寸法図

している。

加速管の排気には4インチの油拡散ポンプを使用しており，その頂部にはドライアイスコールドトラップがある。油回転ポンプは300 l/min である。

ターゲットは，0.2 mm の銅基板にチタニウムを蒸着しそれに三重水素を吸着せしめたもので，三重水素0.25 cc（標準状態）に相当し，その強度は約1キュリーである[3]。ターゲットは炉実験などに使用する空冷用と，放射化実験などに使用する水冷用があるが，両者は外観は全く同じで，**第7図**に示すとおりである。

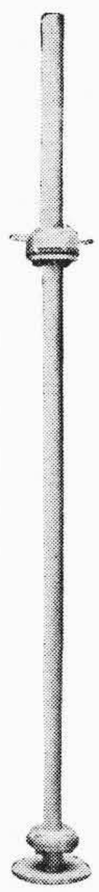
排気ダクトとターゲットの間には，ビームの収束状況を見るビュアと，ビームをパルス化するデフレクタおよびパルスビームを検出するピックアップシリンダがある。このほか，加速電極間には抵抗が取り付けられ，これにて加速管の分担電圧を均一化すると同時に，その電流値で発生電圧を測定している。

本装置を運転する場合，いかにしてイオンを発生させ，ビームとして取り出しパルス化するかを説明する。**第8図**は説明に必要な機能図である。

4.2.1　イオンソースパルサ

イオンソースでパルスビームを作る方法は，プローブにパルス電圧を印加する方法と，本器で採用しているデフレクタにパルス電圧を印加する方式がある。前者にはビームパルス波形が鈍る欠点がある。以下本器のデフレタ方式について述べることにする。

溶融石英で作られたエンベロープ内に，パラジウムリークを通して重水素ガスを入れ，真空度が 10^{-2}～10^{-3} Torr になると，出力70～80 W の発振器によりエネルギーが供給されプラズマが形成される。プローブにより，カナールを通って押し出されたビームはアインツェルレンズによりいったん加速され，つぎに減速されてデフレクタにはいる。この間アインツェルレンズの収束作用により10 mmϕ 程度に絞られる。デフレクタの一方の電極にバイアス電圧を印加して置けば，ビームは静電力によってまげられ，加速管内には出てこない。この時，ほかの一方のデフレクタ電極に方形波電圧を**第9図**のように印加すれば，両方のデフレクタ電圧は同じ値となり，電極間の電界は零となる。したがってビームは曲げられることなく，直進してアパーチャを通り加速管内にはいる。管内のビームは，加速電極の収束作用を受けてターゲット上に収束する。ビーム直径の調節は，アインツエルレンズ電圧を変えて行なう。



第7図　ビームダクトを取り付けたターゲット

連続ビームを出す場合は，バイアス電圧を零にし，パルス電源を切って置けばよい。本器ではパルス幅10 μs 以上のものをイオンソースでパルス化する。

4.2.2　ビームダクトパルサ

ビームダクトパルサは，立ち上がり，減衰時間の短いものを発生させるときに使用する。原理は前記のイオンソースパルサのデフレクタ方式と全く同様である。しかしこの方式は，D-D 反応による中性子バックグラウンドが多いのが欠点である。本器では幅10 μs 以下のパルスビームの発生に使用している。

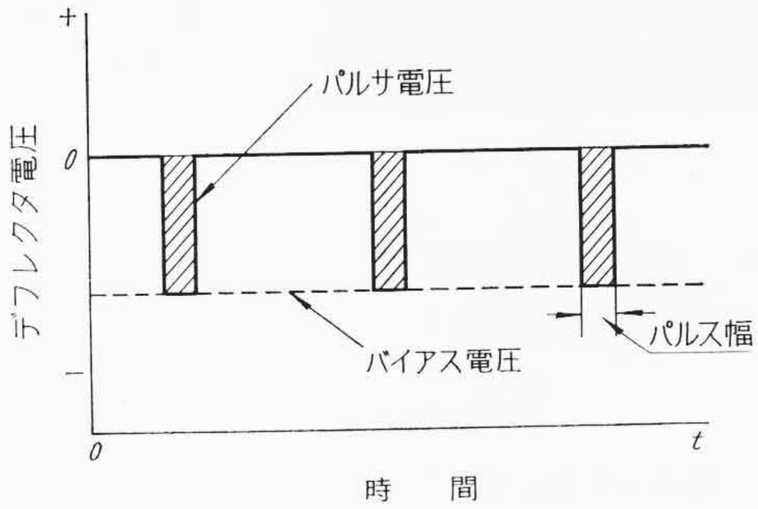
4.2.3　ピックアップシリンダ

ピックアップシリンダは，パルスビームの通過信号を取り出すものである。その構造は，**第10図**に示すとおりで，ビームダクト内部にシリンダを置き，抵抗を通して接地している。パルスビームがシリンダ内を通過する時，静電誘導により電圧を誘起するので，これを信号として外部に取り出せば目的は達せられる。

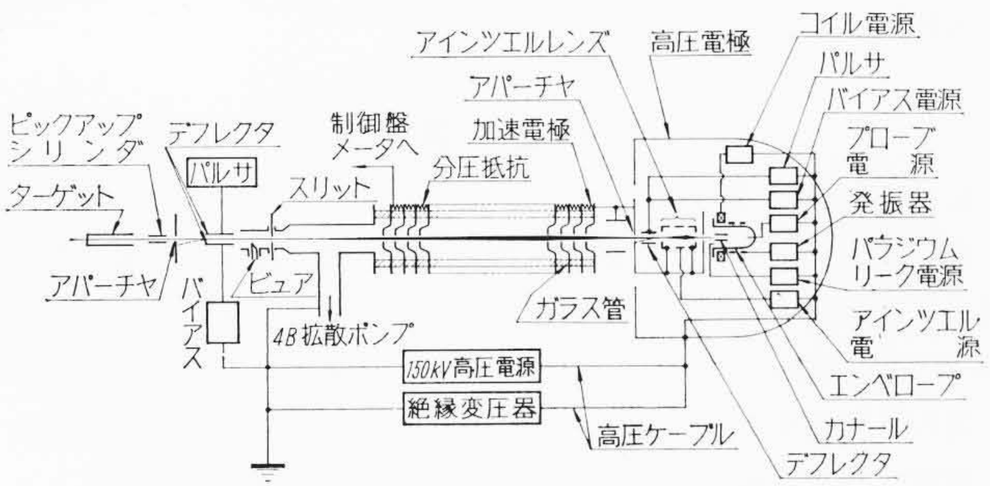
信号波形は，パルス幅T，シリンダの大地容量C，接地抵抗Rによって種々変化する。いまパルスビームを完全な方形とし，加速エネルギーを150 keV 程度とすれば，パルスビームがシリンダの一端に達し，他端に達するまでの時間は，T, RC に比べ非常に小さく無視しても差しつかえない。

ビームがシリンダ内にある時は，シリンダの内面，外面にそれぞれ $-Q$，$+Q$ なる電荷を誘起する。したがってこれを大地側から見れば，シリンダは $+\dfrac{Q}{C}$ なる電圧となる。しかし外側の $+Q$ は RC の時定数によって放電するので，ビームが通過し終わって，内外側の電荷が合体した場合は，シリンダは負の電荷を持ち，負電圧となる。この負電荷はまた時定数 RC にしたがって放電する。**第11図**は $T \ll RC$，$T \simeq RC$，$T \gg RC$ の場合のピックアップシリンダの理想的な電圧波形を示したものである。

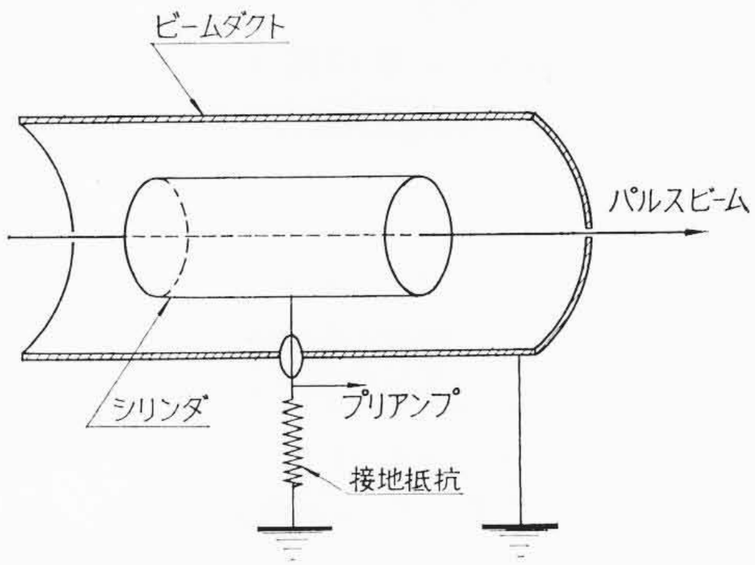
パルスビームの信号を取り出す場合はその目的に応じていずれ



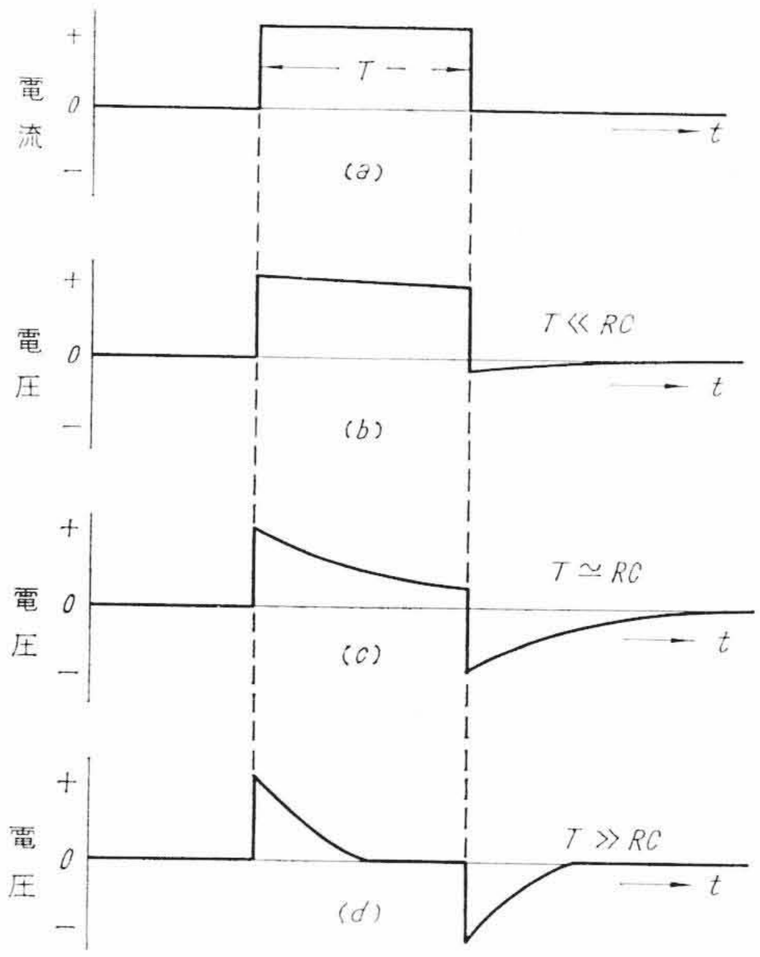
第9図　デフレクタ電圧と時間の関係
斜線部の時間のみビームが出る。



第8図　中性子発生装置機能図

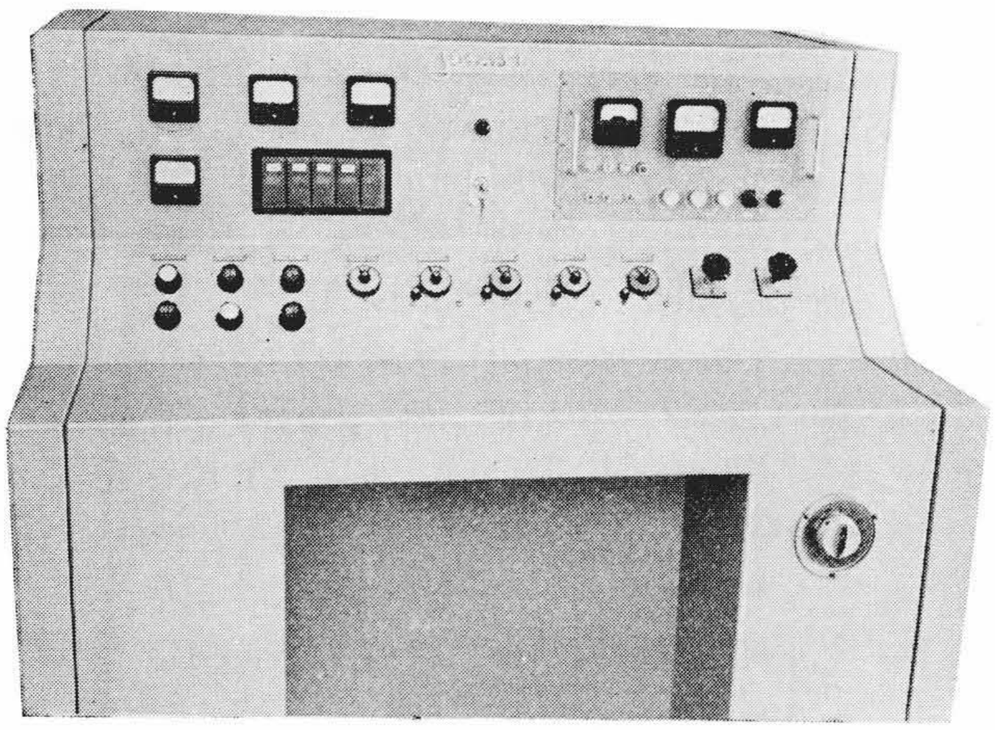


第10図　ピックアップシリンダ構造図



(a)図はパルスビームの電流波形，(b)(c)(d)はピックアップシリンダの出力電圧波形である。

第11図　ピックアップシリンダの出力波形



第12図　制　御　盤

の条件にして使用しても差し支えないが，本器で使用しているものは，大地間静電容量が約10 pFのものである。

5. 制御および保護

本装置の制御は大別して次の4項目から成り立っている。

(1)　パ　ル　サ

(2)　イオンソースおよび収束系の制御

(3)　加速電圧の制御およびスタビライザ

(4)　各部動作の監視，保護

第8図は，その機能図をまた**第12図**は制御盤を示している。以下その概要について説明するが運転監視はすべて制御室から行なえるようになっている。

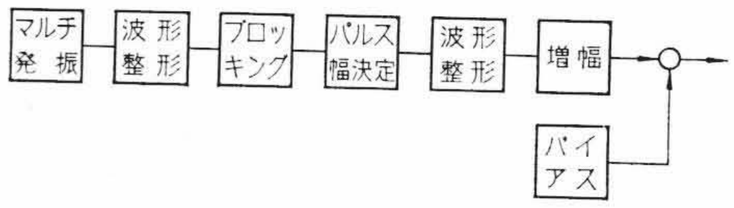
5.1 パ　ル　サ

イオンソースパルサおよびビームダクトパルサはいずれも電子管パルス発生器およびバイアス電源から構成されている。

パルス電圧の波高値は，偏向電極の長さおよびこれとアパーチャ間の距離，およびビームエネルギーによって決定される。

第13図はパルス発生装置のブロック線図を示す。

パルスのくり返し周波数はマルチバイブレータの *CR* 定数の切り替えにより可変とすることができる。なおパルス幅整定回路の *CR*



第13図　パ　ル　ス　発　生　回　路

定数を調整することにより任意の幅のものが得られる。

パルス回路設計上考慮すべき点は，パルスの立ち上がりと減衰時間である。イオンビームには，わずかであるが分子イオンビームが含まれているので，原子イオン速度と分子イオン速度の差に起因するパルスビームの波形くずれを考慮し，印加パルスの波形は可能な限り理想的な方形波とすることが望まれる。パルサの出力増幅部には低いプレート抵抗とピーキングコイルとにより，周波数特性に10 Mc 以上の周波数帯域をもたせ，立ち上がり，減衰時間を著しく改善してある。

5.2 イオンソースおよび収束系の制御

本装置では高周波イオンソースを使用している。その高周波電力は高周波特性のよい双ビーム管2B29の自励発信回路により得ている。また，ビーム電流の制御はプローブ電圧により行なわれる。

イオンソースから押し出されたビームは，アインツェルレンズを経て収束するが，レンズ用電源には4段の倍電圧整流方式を使用している。レンズ電圧の最適値は加速電圧，プローブ電圧，ビーム電流などにより異なるので，セルシンにより制御室から遠方調整され常に最適運転が可能となっている。このほかガスリーク量を調整するパラジュームリーク用ヒータ電源があり，同様にセルシンによって遠方調節ができるようになっている。

5.3 加速電圧の制御およびスタビライザ

加速電圧は，コッククロフト形電源の電源変圧器の入力側に設けられたすべり抵抗器によって制御室から調整される。また安定な加速電圧をうるために，ブリーダ電流を基準値と比較しその差を増幅する直流増幅器と，変圧器入力回路にそう入した可飽和リアクトルとにより，加速電圧のドリフトを ±1% 以内に押えている。

5.4 各所動作の監視，保護

制御盤には加速電圧を監視するブリーダ電流計，高圧電源入力電流計，ビーム電流計などを取り付けている。このほかビーム波形観測用のシンクロスコープを備え，ピックアップシリンダ出力でトリガーして，ビーム波形を観測するようになっている。

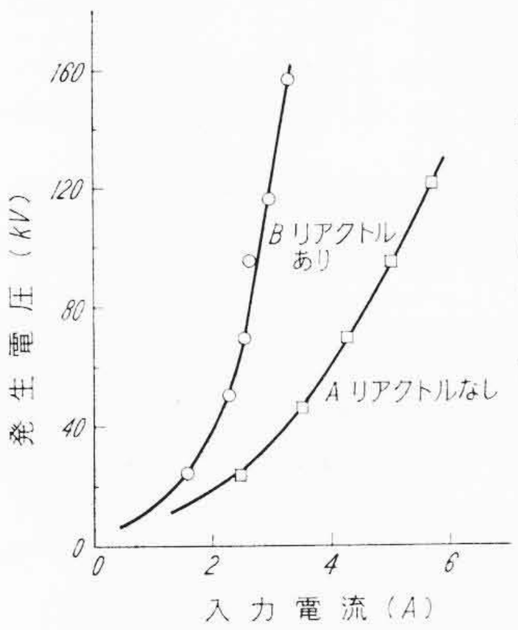
加速管の真空度の監視は制御盤上に設けた電離真空計によって行なわれる。停電や，なんらかの故障により真空度が低下すれば自動的に圧縮空気作動バルブが働き，真空系を保護するようになっている。

このほかの保護装置としては，過電圧（加速電圧），過電流（加速電源入力），停電，断水（ターゲット冷却水），真空低下（加速管）などがあり，故障の種類はすべて制御盤上に表示される。また，放射線防護のために，本装置の設置室の入口には赤色回転表示灯を設け運転表示を行ない，かつ加速電圧操作回路には厳重なインタロック装置を設けている。

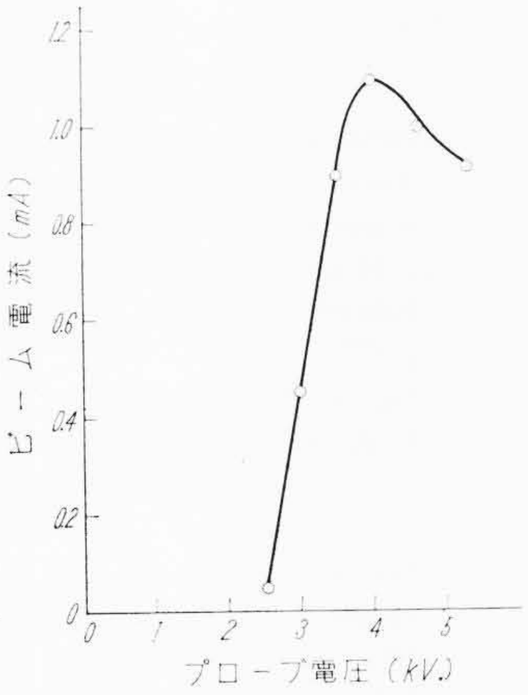
6. 装置の諸特性

6.1 高　圧　電　源

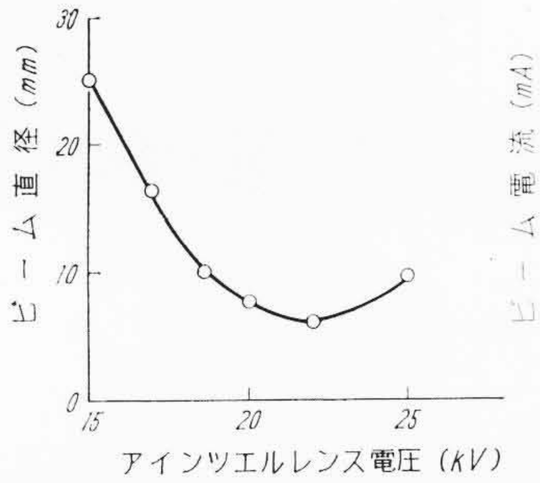
前に述べたとおり，電源変圧器一次側には二次側の容量負荷を補償するためのリアクトルを接続している。リアクトルがない場合は**第14図**の曲線Aに示すように，150 kV を発生するためには7～8A程度の入力電流を必要とするが，リアクトルを取り付けて容量負荷を補償すれば曲線Bのように3A程度で150 kV を発生することができる。



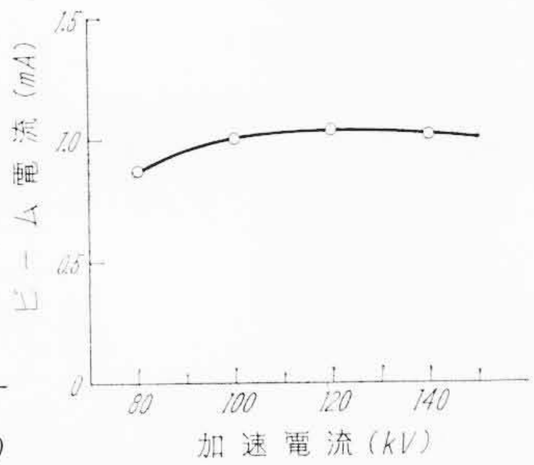
第14図　入力電流と発生電圧の関係
（負荷 1mA の場合）



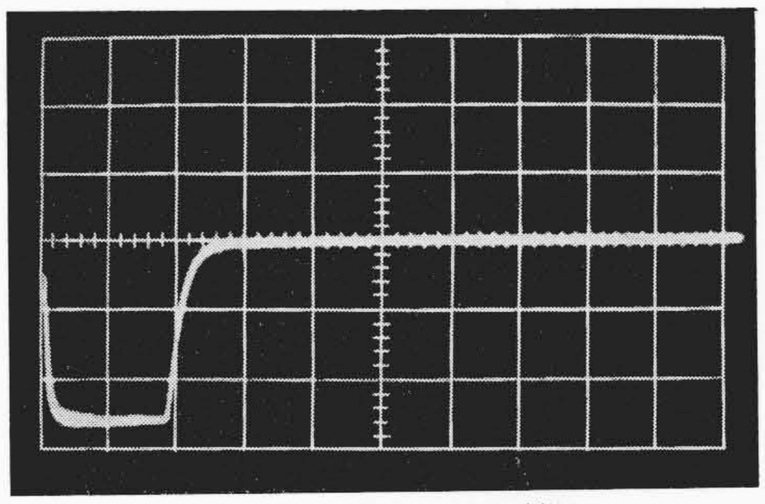
第15図　プローブ電圧によるビーム電流の変化



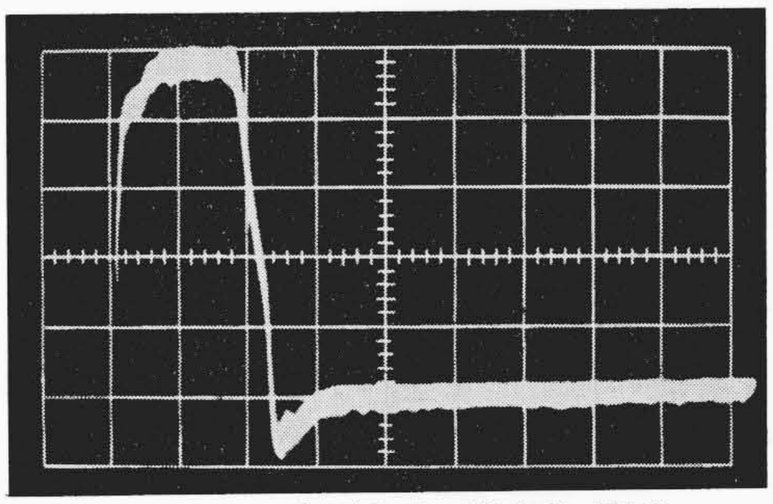
第16図　アインツエルレンズ電圧とビーム収束の関係



第17図　加速電圧とビーム電流の関係

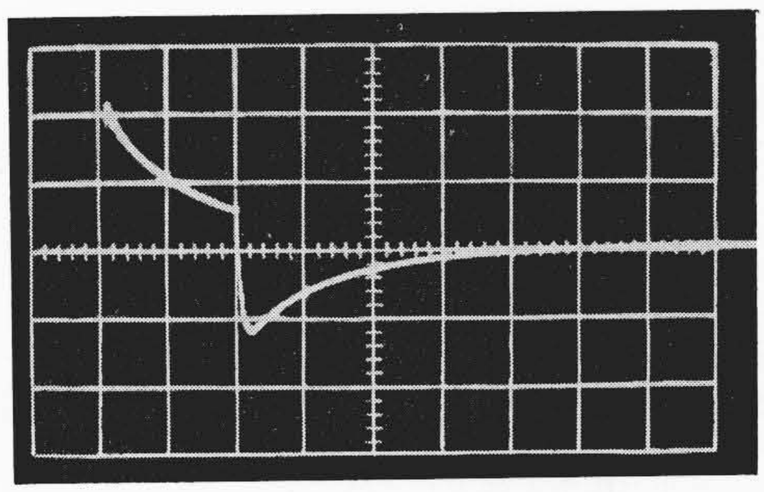


印加パルス　(1 V/div 5 μs/div)



パルスビーム　(2 V/div 5 μs/div) $R=10\,\mathrm{k\Omega}$

第18図　パルスビーム波形
ビーム電流 1 mA，パルス幅 10 μs



第19図　ピックアップシリンダ信号波形

6.2 イオンビーム

イオンソース内の真空は 10^{-2}～10^{-3} Torr であるが，実際の運転に際しては加速管出口における値を目安としガスリークを調整する。通常加速管の真空が 2×10^{-6} Torr のときにガスをリークし 1×10^{-5} Torr 程度にした場合がイオンソース動作に最適である。このような動作条件におけるイオンソースプローブ電圧とビーム電流との関係は**第15図**のようになり，ビーム電流は最大1.1 mA である。ビーム電流を変化させるにはプローブ電圧のみによって行ない，イオンソース磁束は最良の条件に固定して（約 3,500 AT）可変とする必要はない。

ビームの収束はアインツエルレンズの電圧によって変えることができる。この関係を**第16図**に示した。ビーム直径は，加速管を出たあとで10 mmφ以下にすることができるが，中性子を発生するときはターゲットに合わせて10 mmφにする。

ビーム電流はすべての加速電圧の範囲で一定であることが望ましい。しかし実際上は，加速管前の収束系と加速管自身の収束作用との組み合わせによってビームが収束されるため，一般に電圧の上限下限付近ではビーム電流が減少する傾向にある。本装置の場合もこのような傾向を示し，**第17図**のように加速電圧 80 kV では 100 kV の場合より 10% 程度ビームが減少することが認められた。

6.3 パルス運転

パルスビームはデフレクタ方式によって発生するので，ピーク電流は，直流ビームの電流と同じになる。ビームをパルス化するときは，まずバイアス電圧を印加してビームが完全にカットされるよう調整し，しかるのちパルス電圧を印加する。直流ビーム 1 mA のときにパルス運転を行なうとビームのピーク電流は，パルス幅や，くり返しにほとんど関係なく常に 1 mA である。ビームのパルス波形を測定した例を**第18図**に示した。図からわかるようにビーム波形は印加波形にほぼ忠実に従っている。

ピックアップシリンダの出力信号は，回路の時定数によって波形をいろいろと変えることができる。幅 10 μs のビームの場合，シリンダを 1 MΩ の抵抗で接地したときの出力波形は**第19図**のようになり，やや微分波形に近い流形が得られる。回路の時定数を小さくすれば早い信号を取り出すことができるので，トリガーパルスとして使う場合には抵抗を小さくしておく必要がある。

T-D 反応で発生する中性子は約14 MeV のエネルギーをもち，いわゆる速い中性子である。このような速い中性子を測定するには，ロングカウンタ，プロトンリコイル比例計数管，シンチレーションカウンタ，原子核乾板，放射化法などいろいろの方法がある[4]。

中性子発生量を測定するときに，相対値だけでなく絶対値も知りたい場合には，基準になる中性子源を用意し，測定器の感度更正を行なわなければならない。しかし放射化法を使用すれば β 線または γ 線の測定器を更正すればよいので，比較的手軽に行なうことができる。放射化法を用いる場合は，できるだけ放射化断面積の大きい物質を選び，かつ試料の純度を上げておかなければならない。また試料の厚さは，β 線の後方散乱や自己吸収を考慮して適当な厚さにする必要がある。

速い中性子の測定には Cu^{63}（存在比 69.1%）や Ag^{107}（存在比 51.35%）の $(n, 2n)$ 反応が利用される。$Cu^{63}(n, 2n)Cu^{62}$ の放射化断面積は 500 mb，$Ag^{107}(n, 2n)Ag^{106}$ は 550 mb，Cu^{62} の半減期は 9.8 分 (β^+)，Ag^{106} は 24.3 分 (β^+) である[5]。銀の放射化によって中性子

の発生量を測定したところターゲットから約15cmのところで10^{10} n/sであった。パラフィンまたは水中における熱中性子分布を測定するようなときには，$Au^{197}(n, \gamma)Au^{198}$ (96 b, β^-, 2.7日) や $Ag^{107}(n, \gamma)Ag^{108}$ (45 b, β^-, 2.3分) などの反応が利用されている。

7. 結　言

高電圧発生回路，イオンソース，収束系および加速管などの研究，改良を行なうことによりmA級のイオンビームを加速する中性子発生装置を可搬式にまとめることができた。また，パルス中性子を発生するためのビームのパルス化やパルスビームの信号検出も比較的容易に行なうことができることがわかった。本装置の特性，性能は満足すべきものである。

終わりにのぞみ，本装置の製作に有益なるご助言をいただいた東海大学石田教授，中土井助教授に厚くお礼を申しあげる。

参　考　文　献

(1) Brolley & Fowler, Fast Neutron Physics Part I: Techniques, Edited by Marion & Fowler (1960, Interscience Publisher) p. 49

(2) J. H. Coon, Fast Neutron Physics Part I: Techniques, Edited by Marion & Fowler (1960, Interscience Publisher) p. 677
Burrill & Mac Gregar, Nucleonics., 18, No. 12, 64 (1960)

(3) U. K. AEA より購入

(4) たとえば Marion & Fowler, Fast Neutron Physics Part I: Techniques (1960, Interscience Publisher), Sectior II, Section III

(5) Hughes & Schwartz, BNL-325 Neutron Cross Sections., 1958
Gillespie & Hill, Nucleonics., 19, No. 11, 170 (1961)

特　許　の　紹　介

特許 第231635号

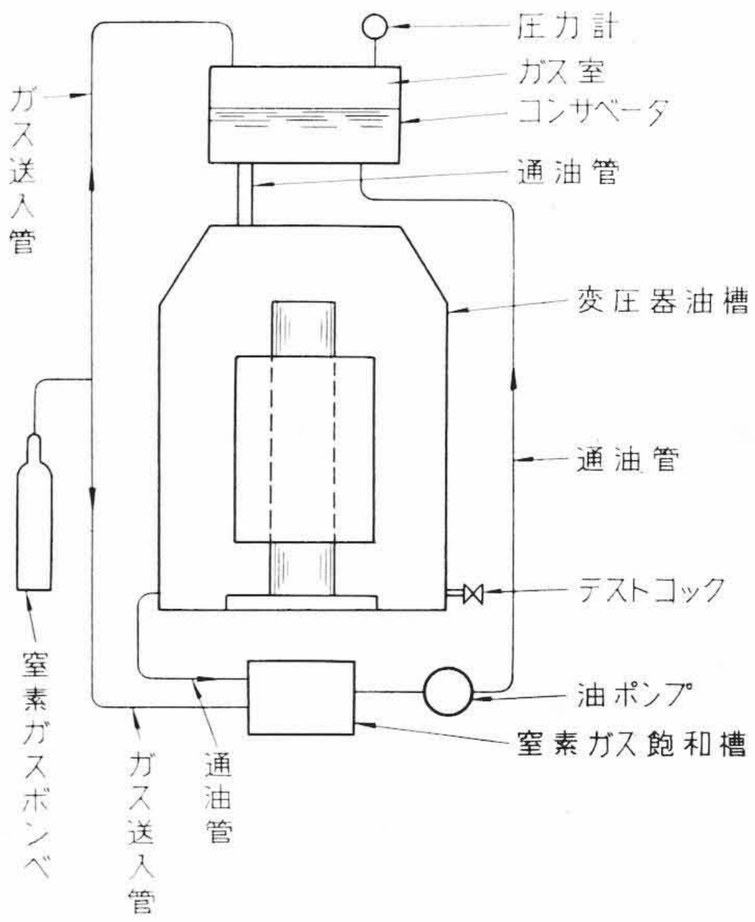
佐藤龍司・宮沢寿郎

変圧器絶縁油処理方法

一般に油入変圧器においては負荷の変動による油槽内の圧力調整のためコンサベータを設け，しかも絶縁油の劣化防止のためコンサベータの空室に窒素ガスを封入することが行なわれている。この種変圧器においてコンサベータ内へ封入した窒素ガスが絶縁油内へ溶解吸収されコンサベータ内の窒素ガスの圧力低下を招く。このため油槽内の絶縁油の圧力も低下して絶縁耐力の低下あるいはコンサベータの変形などを招くため，従来窒素ガスを補給するためのボンベを変圧器とともに据え付けていたため，保守点検に手数を要し好ましくなかった。

そこで最近窒素ガスボンベを取り除くために変圧器油槽内に充てんした絶縁油に窒素ガスをあらかじめ飽和させることが行なわれるようになってきた。この発明は窒素ガスを絶縁油へ飽和させる処理方法に関するもので図に示すように油槽の底部より抽出した絶縁油を窒素飽和槽を通してコンサベータに注入しコンサベータ内で油と遊離ガス（窒素ガス）を分離しガス泡を含まない窒素飽和絶縁油を通油管を通して油槽内に環流させるようにしたものである。窒素飽和槽には窒素ガスボンベより窒素ガスをガス送入管を通して圧入するのであるが，もしガス送入管を通して圧入された窒素ガスが飽和槽内で気泡を発生したとしてもこれら遊離ガス泡はコンサベータ内の油流速度が通油管内に比べて著しく低下するため，コンサベータ内で油より分離しガス室に放出されるため油槽内へはいる恐れはない。このため抽油は油槽底部より行ない飽和槽，通油管を通してコンサベータ内に送入することが処理上効果的である。なお油槽内絶縁油の窒素飽和度はテストコックより試料を抽出して判定することができる。

この発明によれば油槽内の絶縁油の窒素含有量を漸増しついに飽和せしめうるもので，この処理中コンサベータ内で遊離ガスを分離しガス泡を含まない油を油槽内に環流することができるから変圧器の運転中でも安全に窒素飽和処理を行なうことができる。またこの



発明により窒素飽和処理を施した絶縁油はコンサベータ内の空室に封入した窒素ガスを溶解吸収することがないから封入窒素ガスの圧力低下をきたすことなく，したがって変圧器の運転中長年月にわたり窒素ガスの補給を必要としないから変圧器の保守が容易となる効果がある。

(諸角)