

3 MeV カスケード形電子加速器

Cascade Generator Type 3 MeV Electron Accelerator

大島 裕之助* 末松 茂**
 Yunosuke Ōshima Shigeru Suematsu
 杉本 光昭** 菅ノ又伸 治***
 Mitsuaki Sugimoto Shinji Suganomata

要 旨

日本原子力研究所高崎研究所の中間規模試験工場に使用される大容量のカスケード形電子加速器が完成した。高電圧発生回路としては対称インバース形を使用し、段数は20段で高圧ガス絶縁である。最大加速電圧は3 MeV、最大加速電流は5 mAである。電圧効率を向上させるため複数コイル補償方式を使用している。41年9月に予定の最大放射線出力15 kWに達したので、本器の各部の構造および試験結果について報告する。

1. 緒 言

放射線を利用しての高分子物質の特性改善も近年に至りようやく研究の域を脱し、工業化が試みられるようになってきた。たとえば電子線照射による耐熱性ポリエチレン、ポリプロピレンの着色性の改善などはそのよい例である。これらの工業化にともない大容量の加速器の開発が急がれてきた。

日立製作所としては、セレン整流方式のカスケード形加速器（以下CDG加速器と略称する）に着目し、これを大容量化する方向に進んだ。39年9月に日本原子力研究所より照射用加速器を受注し、41年9月に現地試験において最大出力15 kWに達し、引渡しを完了したので、ここに各部の構造および性能について述べる。

2. カスケード電源回路

カスケード形直流高電圧発生装置（以下CDGと略称する）でよく知られているのは、コッククロフト-ウォルトン形（以下C-Wと略す）のものである。しかしながら、CDGは負荷電流が大きく段数も多いと電圧降下やリップル電圧が大きくなる。これを改善するために、対称形が考案されているが⁽¹⁾、これは図1に示すようにC-W形を2個重ね合わせたものである。このほかに、インバース形、対称インバース形と呼ばれる回路⁽²⁾があり、図1(c)(d)に示すように、押上げコラムのコンデンサと最初の整流器を省略した形をとっている。

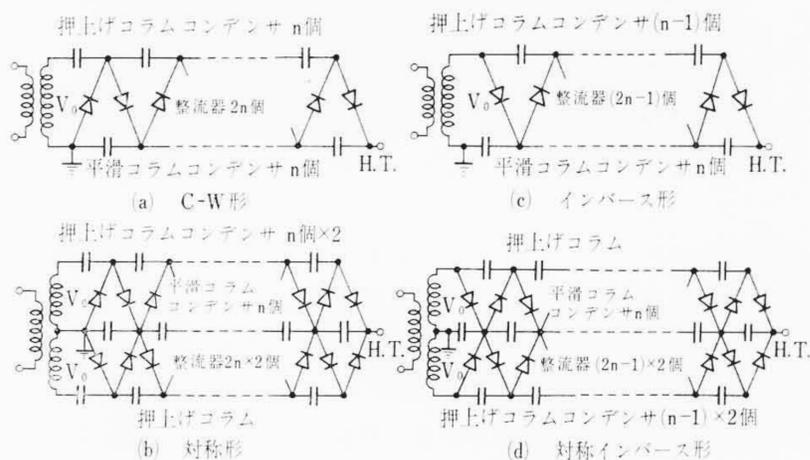


図1 カスケード形電源回路

インバース形、または対称インバース形においては押上げコラムが1個少ないために負荷時の電圧降下が小さい。段数nが同じでも有効段数が1/2段少なく、したがって出力電圧が若干低くなることを考慮しても、電圧変動率 $\Delta V/V$ はインバース形にしたほうが有利である。リップル率 $\delta V/V$ はインバース形にすると悪くなるが、段数が10~20段にもなるとほとんど差がなくなる。これらCDGの比較を表示したのが表1である。

一般にCDGでは、コンデンサコラム間に存在する浮遊容量を通過して交流循環電流が流れ、このため電圧降下を生ずる。この電圧降下は、段数が大きいほどまた容量比 C/C_s が小さいほど大きい。これを補償するために複数個の補償コイルを接続したときの電圧効率

表1 カスケード回路の比較

	C-W 形	インバース形	対 称 形	対称インバース形
出力電圧 V	$2nv_0$	$(2n-1)v_0$	$2nv_0$	$(2n-1)v_0$
電圧降下 ΔV	$\frac{I}{fc} \left(\frac{2}{3}n^3 + \frac{n^2}{2} + \frac{n}{3} \right)$	$\frac{I}{fc} \left(\frac{2}{3}n^3 - \frac{n^2}{2} + \frac{n}{3} \right)$	$\frac{I}{fc} \left(\frac{n^3}{6} + \frac{n^2}{4} + \frac{n}{3} \right)$	$\frac{I}{fc} \left(\frac{n^3}{6} - \frac{n^2}{4} + \frac{n}{3} \right)$
リップル δV	$\frac{I}{fc} \cdot \frac{n(n+1)}{2}$	$\frac{I}{fc} \cdot \frac{n(n+1)}{2}$	$\frac{I}{fc} \cdot \frac{n}{2}$	$\frac{I}{fc} \cdot \frac{n}{2}$
$\Delta V/V$	$\frac{I}{fcv_0} \cdot \frac{4n^2+3n+2}{12}$	$\frac{I}{fcv_0} \cdot \frac{4n^3-3n^2+2n}{(2n-1)6}$	$\frac{I}{fcv_0} \cdot \frac{2n^2+3n+4}{24}$	$\frac{I}{fcv_0} \cdot \frac{2n^3-3n^2+4n}{12(2n-1)}$
$\delta V/V$	$\frac{I}{fcv_0} \cdot \frac{n+1}{4}$	$\frac{I}{fcv_0} \cdot \frac{n(n+1)}{2(2n-1)}$	$\frac{1}{fcv_0} \cdot \frac{1}{4}$	$\frac{I}{fcv_0} \cdot \frac{n}{2(2n-1)}$
電圧効率 F	$\frac{Mb}{n} \tanh \frac{n}{Mb}$	$\frac{2Mb}{(2n-1)} \tanh \frac{(2n-1)}{2Mb}$	$\frac{\sqrt{2} Mb}{n} \tanh \frac{n}{\sqrt{2} Mb}$	$\frac{1}{2n-1} \left(1 + 2\sqrt{2} Mb \tanh \frac{(n-1)}{\sqrt{2} Mb} \right)$
コイルインダクタンス (高圧端 M 番目) L_M	$\frac{1}{\omega^2 b C_s} \cot h \frac{2n}{2Mb}$	$\frac{1}{\omega^2 b C_s} \cot h \frac{(2n-1)}{2Mb}$	$\frac{\sqrt{2}}{\omega^2 b C_s} \cot h \frac{n}{\sqrt{2} Mb}$	$\frac{\sqrt{2}}{\omega^2 b C_s} \cot h \frac{(n-1)}{\sqrt{2} Mb}$

v_0 : 入力電圧波高値, n : 段数, C : コンデンサ容量, f : 周波数, I : 負荷電流, M : 補償コイルの数, $L_1 = \dots = L_{M-1} = L_M/2$, $b^2 = C/C_s$, C_s : コラム間浮遊容量 (整流器1本あたりに換算)

* 日本原子力研究所高崎研究所 理学博士
 ** 日立製作所国分工場
 *** 日立製作所日立研究所

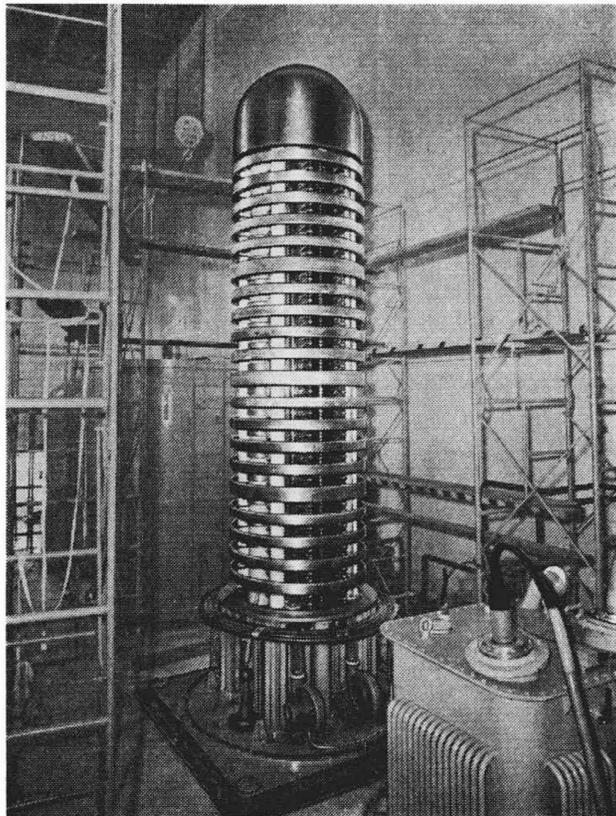


図2 カスケード形加速器

と必要なコイル、インダクタンスも表1に示されている⁽³⁾。表1の式からわかるように、電圧効率はコイル数とともに増加する。またインバース形または対称インバース形は押し上げコラムのコンデンサが1個少ないために電圧効率がよい。

カスケード回路は入力端より見て容量性であるが、補償コイルの数とともに入力インピーダンスは増加する。しかし $C_s=10\sim 15\text{ pF}$ を仮定すると、入力電圧数十kVでは相当な入力電流となるので、入力端にも高圧端と同じインダクタンスを接続し共振回路とした。ここで対称形の場合の入力インピーダンスは(M 等分の場合)

$$\left. \begin{aligned} Z_0 &= \frac{\omega L_M}{j} = \frac{1}{j\omega C_0} \\ C_0 &= \frac{bC_s}{\sqrt{2}} \tanh \frac{n}{\sqrt{2}Mb} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 C_0 : 入力端から見た等価静電容量である。対称インバース形では(1)式の C_0 に $C_s/2$ が加わる。しかし段数 n が大きいとこの違いはわずかであり、共振系とするためには入力端にも表1の高圧端と同じ L_M なるインダクタンスを接続すればよい。

3. 装置の構成

3.1 直流高圧発生装置

直流高圧発生装置は20段の対称インバース形のカスケード回路を使用しており、電源周波数は10kc/sである。10kc/sの電力は高周波発電機(HFG)で発生され、変圧器で最大75kV rmsまで昇圧される。平滑コンデンサコラムは最下段の0.02 μF 以外は全部0.01 μF である。図2はタンクを取り去ったCDGである。平滑コンデンサコラムに結ばれているフープコラムによって、コンデンサコラム、加速管、プリー発電機駆動用ベルトは全部おおわれている。フープコラムは4分割になって積み重ねられており、その上部には、高圧電極によってシールドされた電装品がのっている。

電装品の電源は1kVA, 200c/s, 100Vのプリー発電機である。駆動は、フープコラム内にある絶縁ベルトを介してタンクベースにある電動機によって行なわれる。セレン整流器としては逆耐電圧190kVp平均電流5mAのものを使用した。

この高圧発生装置は、前述のように組立解体を容易にするために、フープコラム、加速管を4分割している。このため4本の補償コイ

ル(表1の $M=4$ に相当する)を接続して電圧効率を補償する方式とした。

CDG組立後浮遊容量を測定した結果、1段当たり12.5pFであり、表1の式よりコイルのインダクタンスは最上段が8.6H、中段では4.3Hとなる。補償コイルは空心で製作し、長さ約700mm外径95mmで、ハネカム巻きのコイル素子を直列につないだものである。表1の電圧効率の式から補償なし($M=1/2$ に相当する)の場合の値は $F=0.78$ であるが、4分割補償によって0.98に改善される。さらにこの補償によってカスケード回路の入力インピーダンスが増加し、変圧器よりの進相電流を減らすことができる。

圧力タンクは高さ約7mであり、真空乾燥を行なったのち N_2 と CO_2 の混合ガスを封入する。絶縁ガスの圧力は定格10kg/cm²である。ガスはタンク下部のクーラによって冷やされ、これがさらにアクリルパイプを通してセレン整流器、補償コイルあるいは電装品などに吹き付けられるようになっている。

3.2 電子銃および加速管

電子銃はピアス形のもので、直流ビーム、パルスビームいずれの運転も可能なように二つの陽極をもっている。ビーム電流は第1陽極の電圧およびフィラメント電流によって変えられる。パルス運転の際には第1陽極にパルス電圧を印加する。第2陽極から加速管へはいるときのビームの集束半角を5度とすると、第1陽極電圧2kV、第2陽極電圧6~8kVでパービアンスは 3.7×10^{-8} となる。

加速管は皿形電極とガラス管を接着したもので、フープコラムの4分割に対応して加速管も4分割になっている。加速電極は、外部の電磁界のビームに対する影響を防ぐためミューメタルで製作され、さらに電極は互いにオーバーラップする構造を有ししゃへい効果を上げている。加速段数はCDGの段数と6対1の対応をなしているので、加速電極の電位は分圧抵抗によってきめられる。分圧抵抗を流れる電流は加速電圧3MeVのとき約1mAである。

加速管全長は約4mであり、加速電圧3MeVにおいても1段当たりの分担電圧は25kVを越えないようにしてある。加速管のビーム通路は、電子ビームの軌道に関する計算およびローディングなどの現象や排気速度を考慮してきめられ、上部より1/4の付近が最小径50mm ϕ で、その上と下に行くに従って口径が大きくなっている。

加速管からスキャンナまでを含めた全体の真空系は、水冷パッフル付6B油拡散ポンプ、4Bブースタポンプおよび300l/min油回転ポンプの組合せによって排気される。加速管内の真空は、ビームダクトの途中で測って、 $1\sim 2\times 10^{-6}$ Torrであり、3MeV 5mAで運転するときでも $3\sim 4\times 10^{-6}$ Torr程度にしか落ちない。

3.3 ビームスキャンナ

各種試料や材料の電子照射を行なうため、加速された電子ビームは200c/sの三角波磁界で走査され、空気中に取り出される。三角波磁界を発生する走査コイルは変形くら形のものである。中心の磁束密度は最大90Gで、長さ300mm、幅150mmの範囲にわたってほぼ一様磁界となっている。この三角波磁界によって3MeV電子ビームを最大幅600mmまで走査する。ビーム取出し窓には厚さ200 μ のアルミニウムハクを使用し、電子の透過の際に生ずる熱は水冷空冷の併用によって取り除かれる。この冷却法により5mAのビームの長時間運転が可能になった。図3はスキャンナの写真である。

3.4 制御保護装置

加速器を円滑に運転するために各種の制御回路を備えているが、これらは大別して、(1)CDG制御、(2)高圧電極内電子銃用諸電源およびパルス発生回路、(3)走査電源、(4)保護装置によって構成される。図4は制御系のブロック図を、図5は制御盤の写真を示している。図からわかるように、加速器の運転に必要な操作および測定はすべて制御盤において遠隔操作で行なわれる。

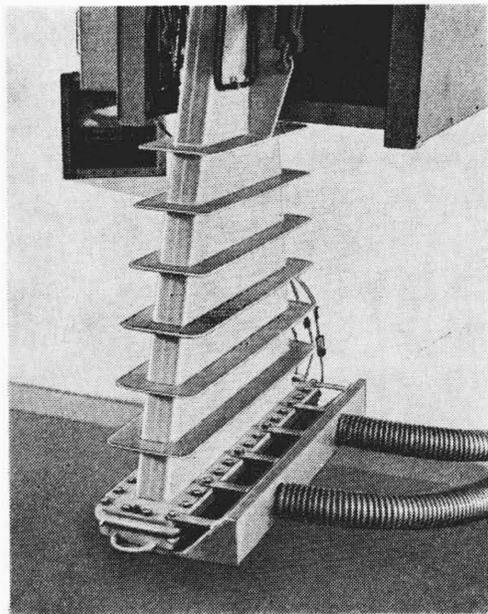


図3 スキャンナ

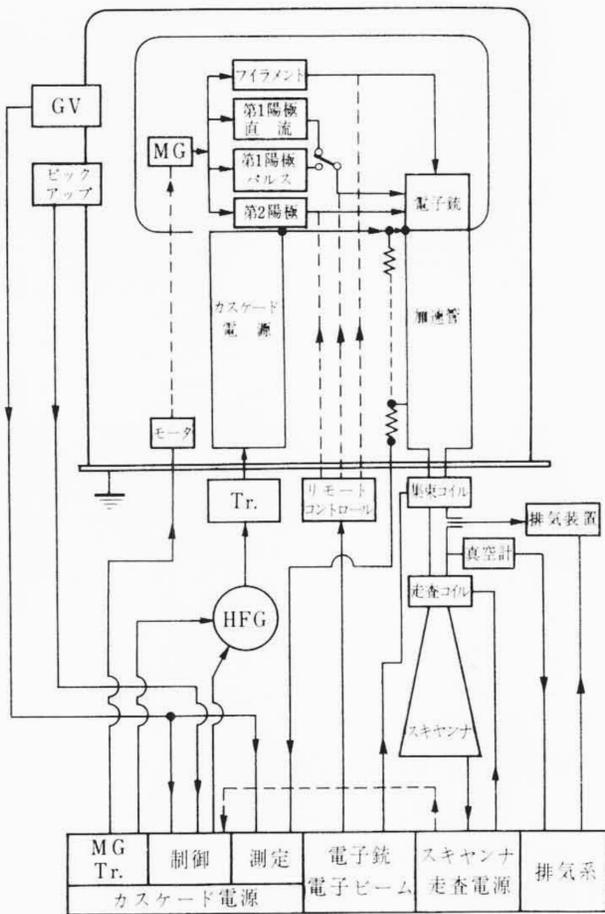
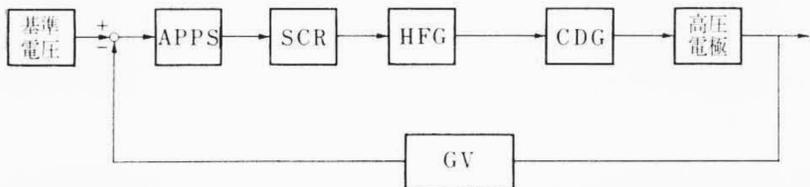


図4 制御系ブロック図



図5 制御盤



APPS: 自動パルス移相器
 SCR: 制御極付シリコン整流器
 HFG: 高周波発電機
 CDG: カスケード形直流高圧発生装置
 GV: 回転電圧計

図6 加速電圧の定電圧制御系ブロック線図

加速電圧は、10 kc/s HFG の励磁を変えて調整され、回転電圧計によって測定される。また加速管分圧抵抗を流れる電流からも電圧を知ることができる。回転電圧計の出力の一部は自動パルス位相器 (APPS) に送られ、基準電圧と比較してその差電圧に比例した位相のゲートパルスでサイリスタを点弧し、HFG の励磁電流を制御する。この加速電圧安定系をブロック図で示すと図6 のようになる。

加速器運転中に電子ビームを走査しないとスキャンナ窓が局部的に加熱され、窓材の破壊から大事故になる。これを防ぐため、走査コイルの励磁電源が動作しなければ加速電圧が発生しないようなインターロック回路を備えている。

前にも述べたように、電子ビームは直流、パルスいずれでも発生

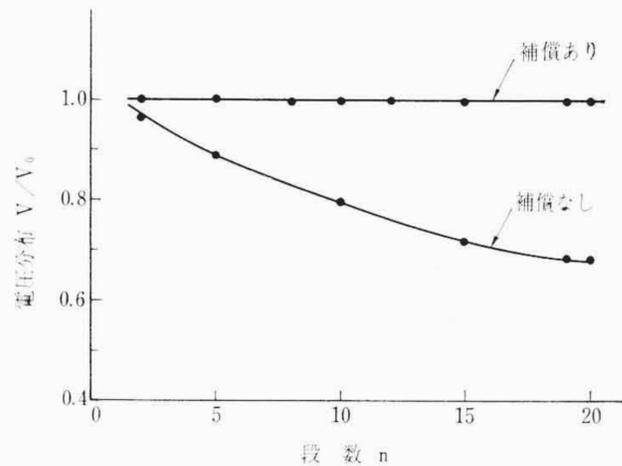


図7 各段の電圧分布

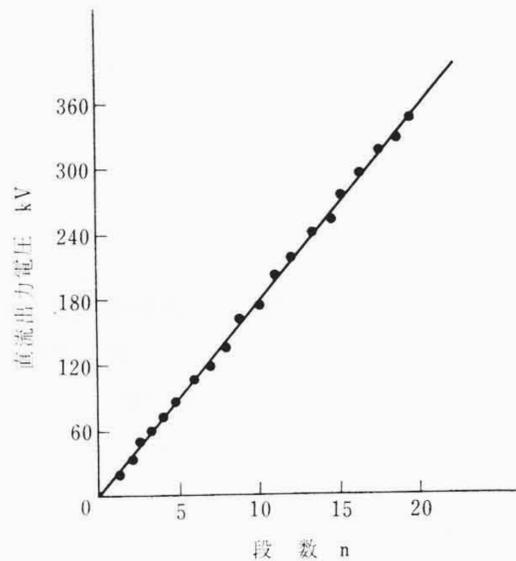


図8 段数と直流出力電圧の関係

できる。このため電子銃第1陽極の直流電源とパルスとは制御盤から遠隔操作で切り替えができるようになっている。パルス運転においてビームのパルス幅は 10 μs, 100 μs, 1 ms, 10 ms, 100 ms の5段切換であり、それぞれのパルス幅に対応してパルス間隔はパルス幅の2, 10, 50 倍の3段切換ができ、制御盤上に表示される。ビーム電流はフィラメント電流または第1陽極の電圧で変えられ、パルス運転の際には第1陽極に印加されるパルス電圧の波高値が変えられる。

3 MeV の電圧では、通常放電は起こらないが、加速管のフォーメーションの場合など万一放電が起こったときに備え、ピックアップ電極を用いた保護回路がある。ピックアップ電極は高圧電極と対向して圧力タンク内壁に取り付けられた電極で、一種の容量分圧器を形成する。絶縁ガス中のコロナ放電や加速管内のマイクロ放電が起こると高圧電極の電圧が変動し、この電圧変動をピックアップ電極で検出する。このようなサージ信号が検出されると HFG の界磁回路が開放され、加速電圧が下がる⁽⁴⁾。このほかタンク内ガス圧の低下、スキャンニング窓過熱、断水などによる事故を防止するための保護回路がある。

4. 特性

4.1 電圧効率

本装置は、電圧効率改善のために複数補償コイル法が採用されているので、まずこの補償効果を調べた。各段の押上コラム間の交流電圧は補償なしでは図7のように最上段(高電圧端)では入力電圧 v_0 の約70%に低下し、このときの電圧効率は80%である。しかし4分割の補償を行なうと各段の電圧分布は図のようにほぼ一様となって入力電圧と等しくなり、電圧効率はほぼ100%となる。さらにこれを確認するために、大気圧中で電圧を発生し、各段の直流電圧がどのようになっているかを調べた。その結果は図8のように、出力電圧は段数とともに直線的に上昇し、補償が有効に行なわれてい

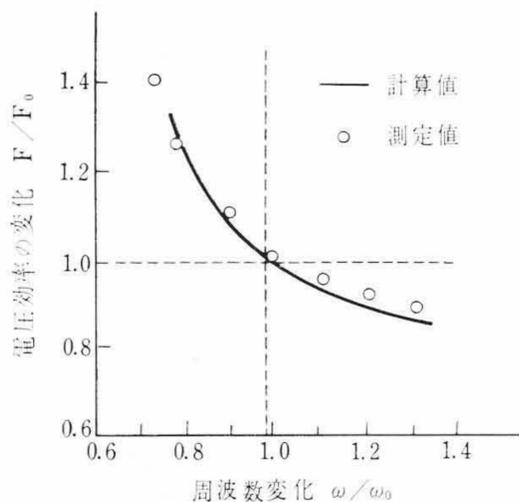


図9 周波数変動による電圧効率の変化

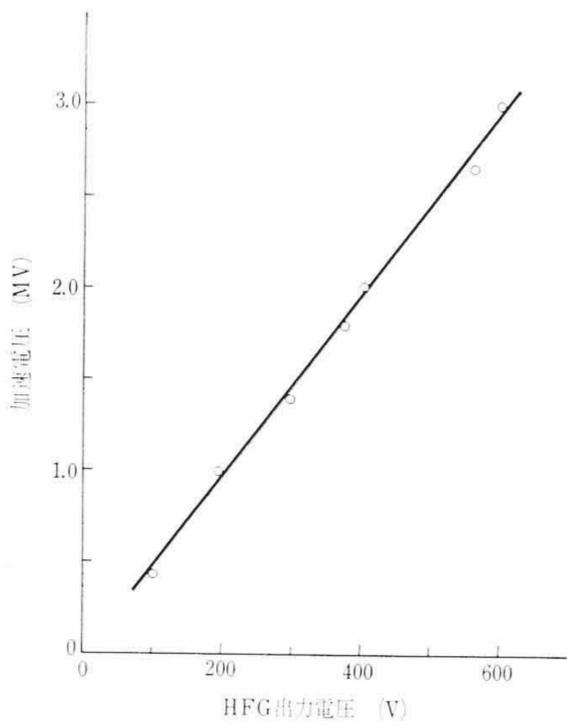


図10 加速電圧とHFG出力電圧の関係

となる⁽⁵⁾。本装置では $M=4$ であるので、他の数値も入れて上式から電圧効率の変化を計算すると図9のようになる。同図で○印は実測値であるが計算値とよく合っている。これからわかるように、周波数変動2%を考えると、低周波側へ動くと電圧変化+2%、高周波側へ動くと電圧変化-1%となり著しい変化は起こらない。とくに本装置のようにHFGを電源としているときには、この変動はHFGの特性からある程度自動的に補償されていると考えてよい。

4.2 加速電圧

カスケード形の直流電源はパン・デ・グラーフ形などに比べて静電容量が著しく大きく、ラジアルスパークをとばして発生電圧の限度を見ることは部品の破損などを招くので危険である。この点を考え本装置の試験ではできるだけラジアルスパークをとばさないよ

ることを示している。

これまで述べた補償は装置の運転周波数で最適条件をみたまうようにきめられている。したがって周波数の変動があれば電圧効率も変化することになる。いま運転周波数を ω_0 、このときの電圧効率を F_0 、周波数 ω での電圧効率を F とし、補償コイル数を M 、 $\mu = \omega/\omega_0$ とすると、

$$\left. \begin{aligned} \frac{F}{F_0} &= \frac{\tan M\beta}{2M \tan \frac{\beta}{2}}, & \mu \leq 1 \\ &= \frac{\tanh M\alpha}{2M \tanh \frac{\alpha}{2}}, & \mu \geq 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

となり、 μ と α 、 β との関係は、

$$\left. \begin{aligned} \cos \beta &= \cosh m\gamma - \frac{\cosh m\gamma - 1}{\mu^2}, & \mu \leq 1 \\ \cosh \alpha &= \cosh m\gamma - \frac{\cosh m\gamma - 1}{\mu^2}, & \mu \geq 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

$$m\gamma = \sqrt{2} n/Mb$$

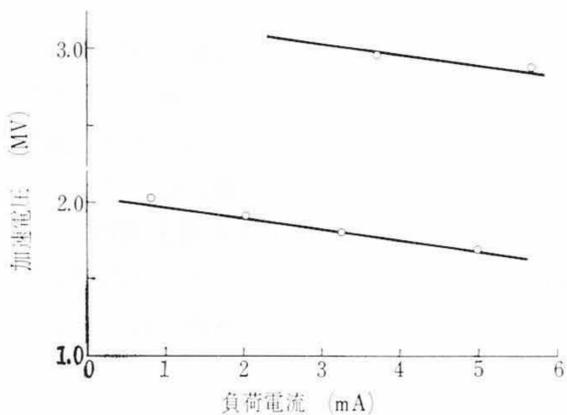


図11 負荷特性曲線

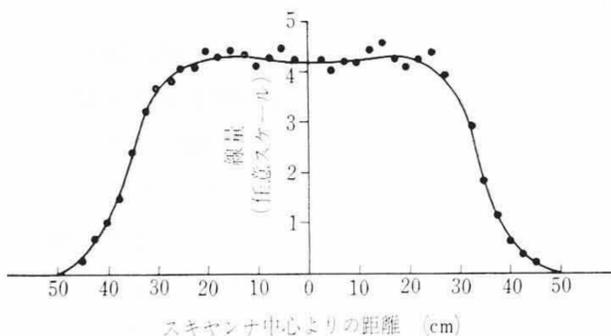


図12 スキャンナ窓より25cm下での電子ビームの分布

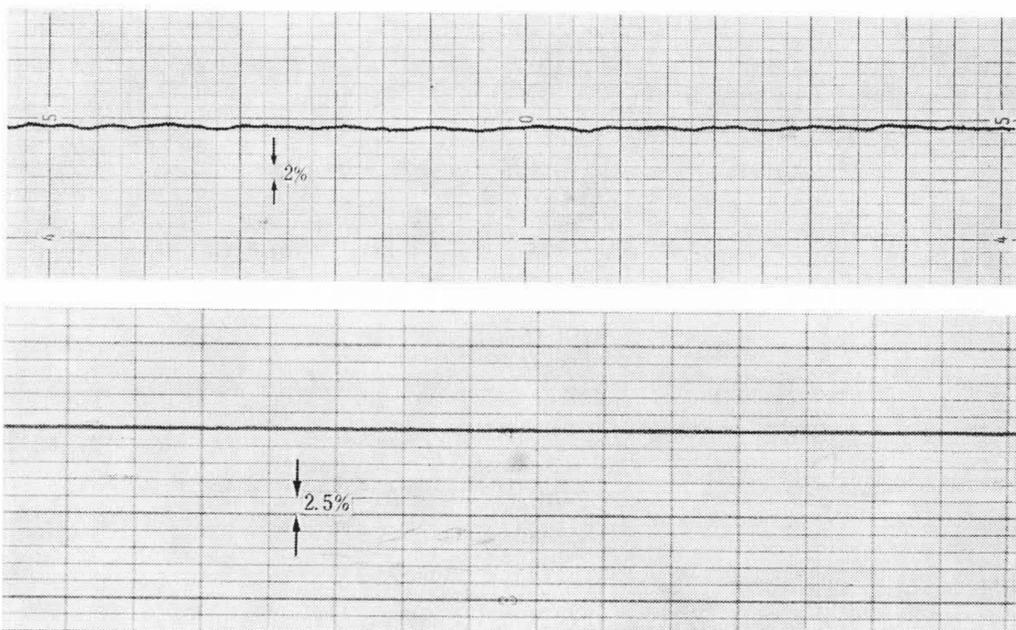
うにした。電圧を上げるときには通常加速管の微小放電あるいはローディングなどが問題になるが、本装置ではこの点について重大な欠陥はみられなかった。ローディング現象は1週間程度のフォーメーションで問題にならない程度に減少した。

加速電圧はHFGの出力を変えて調整されるが、この関係の一例を図10に示した。これは負荷電流が加速管の分圧抵抗を流れる電流だけの場合である。ビームを加速して負荷電流を増したときの電圧変化は図11のようになり、電圧変動率は75 kV/mAである。この電圧変動の大部分はセレン整流器と変圧器のインピーダンスによる電圧降下に基づくものである。

4.3 電子ビーム

電子ビームの走査は照射加速器の重要なポイントであり、照射むらを生じないために一様な走査が望まれる。さらに不均一な走査ではスキャンナのアلم窓の過熱破壊が起こる。走査された電子ビームの分布をアلم窓より25cmの位置で測定した結果は図12のようであり、60cmの幅にわたって走査が均一に行なわれていることがわかる。

加速電圧は、電子ビームのアクリル板中の透過深さの観測やマイラのDepth-Dose曲線から、その値が確認されている。照射加速器としての総合性能は2.5 MeV, 5 mA, 3 MeV, 5 mAの連続照射試験で調べられたが、加速電圧、電子ビーム電流いずれもその変動は



(2.5 MeV 4 mAの長時間記録の一部)

図13 ビームエネルギーとビーム安定度

±1%以内であり、安定な照射を行なうことができる。図13は長時間運転における加速電圧とビーム電流の記録の一部である。

5. 結 言

照射用加速器はその出力の大きいものが望まれるが、それに加えて、運転が安定で操作が容易であることが必要である。このような観点から考えると、カスケード形の直流加速器はすぐれた照射用加速器といえる。本稿にて報告した3 MeV 加速器は装置を圧力形としてコンパクト化したカスケード形の加速器としてはわが国初めてのものであり、その性能は照射装置として満足すべきものと考えられる。今後この種の加速器が高分子材料関係の各分野で

広く利用されることが期待される。

終わりに、本装置の完成までに終始ご指導ご激励賜わった日本原子力研究所高崎研究所宗像所長はじめ関係者のかたがたに深く感謝の意を表す。また、ご協力いただいた日立製作所日立研究所赤津氏ほか関係者のかたがたに深く感謝する。

参 考 文 献

- (1) E. Baldinger: Kaskadengeneratoren, "Handbuch der Physik" XLIV, Springer-Verlag, 1959
- (2) G. I. Kitaev: Soviet Atomic Energy, 14 (1963) 205
- (3) 菅ノ又伸治: 応用物理 34 (1965) 733
- (4) 菅ノ又, 赤津, 末松, 杉本: 応物学会講演会 1965年 10月
- (5) 菅ノ又伸治: 応用物理 36 No. 2 (1967)

Vol. 28

日立造船技報

No. 1

目 次

- ・形鋼材における曲線ケガキのデジタル化
- ・外板自動塗装装置
- ・Tビーム自動組立溶接装置
- ・新工法による因島工場3号ドック拡張工事

- ・操縦性より見たかじ面積決定法
- ・甲板荷重が船こく重量に及ぼす影響
- ・鉄骨ラーメン構造の復元力特性
- ・パルプ用木がま(釜)ヒータ拡管部の超音波探傷

……本誌に関する照会は下記に願います……

日立造船株式会社技術研究所
大阪市此花区桜島北之町 60

第29巻

日

立

第7号

目 次

- ・随筆 霧雨のある日……岸田 衿子
- ・炎のミステリー
- ・世界へ羽ばたけ若い技能 —第五回技能五輪全国大会—
- ・死なず…ただ消えゆくのみ —会津若松に機関車をたずねる—
- ・明日にかける産業四国
- ・ただいま不良ゼロ —かんビールのお目付役—

- ・きのうの夢がもうここに
- ・未知に挑む<7> 蛍光体の研究
- ・カラースポット <色をきわめる>
- ・話のロビ— <記者と女性の間で>
- ・H. S. F. <応接室> 星新一
- ・サイエンス・ジョッキー

発行所 日立評論社

東京都千代田区丸の内1丁目4番地

取次店 株式会社 オーム社書店

振替口座 東京71824番

東京都千代田区神田錦町3丁目1番地

振替口座 東京20018番