

## 特集（日本の加速器の歴史）

## 日本の静電加速器の歴史

磯矢 彰

## History of the Electrostatic Accelerator in Japan

Akira ISOYA

日本の静電加速器の歴史を述べるためには、この分野の先進国である欧米における静電加速器の歴史を知っておく必要がある。そのため先ず第1部でその発達の経過、特に大型静電加速器の技術について纏めを行う。第2部で日本における静電加速器の設置状況と静電加速技術の研究の経過を概説する。

## 1. 静電加速器誕生の経緯

## 1.1 原子核物理学の黎明期（1930年代）の静電加速器

加速器の歴史は自然界に存在する放射能の実体が明らかにされて、極微の世界のベールが外された20世紀初頭に溯る。当時放射能からの $\alpha$ 線を物質に当てると、入射粒子の散乱と同時に二次的に放射線が放出されることが認められていた。この現象は原子核の破壊によると考えられた。そこで人工的に加速したイオンによって同様の原子核破壊が起るか否かが問題になり、これを確かめるための実験が計画されるようになった。1930年にはサイクロトロンが発明があり、同じ年に Van de Graaff (米) は荷電ベルトによる静電高圧発生機の製作を行った。1932年になって Cockcroft と Walton の両名 (Cavendish Lab. Cambridge 英) は今日この名前と呼ばれている高電圧発生用の整流回路を考案し、これを用いて最初の原子核破壊の実験に成功した。

この実験では水素ガス放電管の陰極板の小孔から吹き出して来る陽イオン (Canal ray と呼ばれていた) を加速してリチウムのターゲットを照射したところ、高速の $\alpha$ 粒子の放出が認められた。最高 800 kV までの電圧で実験が行われたが、100 kV 程度の低い電圧においても同じエネルギーの $\alpha$ 粒子が得られることが分った。この実験で観測された高エネルギー $\alpha$ 粒子はリチウムのアイソトープ  ${}^7\text{Li}$  についての反応

${}^7\text{Li} + p \rightarrow {}^8\text{Be}^* \rightarrow 2\alpha$  から発生するもので、エネルギーの等しい ( $\sim 8$  MeV) 2 個の $\alpha$ 粒子が互いに反対方向に放出される。反応過程を特定するために多くの研究グループが当時の粒子検出手段を駆使していろいろの実験を行っている。反応の過程がこのように簡単で明確なものであったことが、実験結果の解釈を容易にし、原子核物理学の基礎を固めるのに役立った。

当時原子核のまわりに存在するクローン障壁を透過して $\alpha$ 粒子が飛び出してくると云う量子力学の考えが定着しており、観測される $\alpha$ 粒子のエネルギーは一般に MeV のオーダーのものであった。その関係で上記のように高い電圧の装置が用意されたのであるが、800 kV の電圧を大気中で発生することは容易ではない。発電装置本体は勿論のこと、これを収納するための建屋が非常に大きいものになる。

原子核の研究はそれまでヨーロッパの諸国、主に英・佛・独で進められて来たが、上記の実験の成功は米国内に加速器開発の機運をもたらした。その後ヨーロッパの状況が悪化して研究の中心は急速に米国に移った。

Wisconsin 大学の物理学教室では MV ボルト級の高電圧の発生を通常規模の実験室の中で実行可能にするため、イオンの発生と加速に必要な装置を高圧タンクの中に収めた今日のいわゆる **Van de Graaff 加速器** を製作した (1934)。ベルトを用いたのは、これが MV レベルの高電圧発生のもっとも簡単な手段であったからである。試作されたのは電圧 400 kV の小型のもの

本稿を纏めるに当たって下記の解説文献を参考にした。原論文引用についてはこれを見られたい。

1. 実験物理学講座 28, 加速器 (共立出版社 1975)  
II.7. バンデグラーフ型加速器 (今村 元・磯矢 彰)
2. 加速器物理学その 2 (フィジックス 1984 年 12 月号)  
タンデム加速器—最近の静電加速器の進歩について (磯矢 彰)

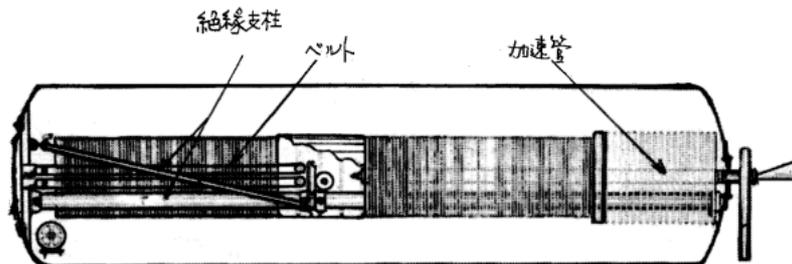


図1 Wisconsin大学の2.5 MV Van de Graaff 加速器(1937年)—これが最初に作られた典型的な静電加速器であった。

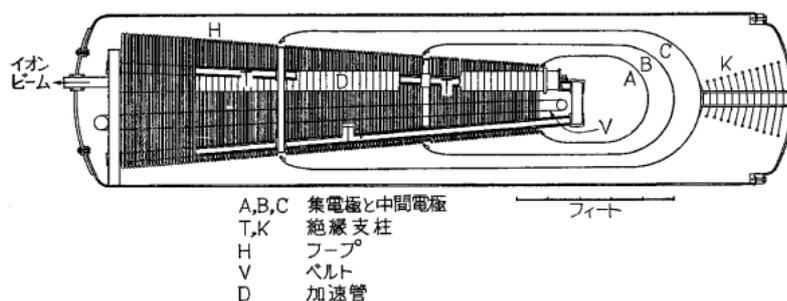


図2 Wisconsin大学の4.5 MV Van de Graaff 加速器 (1940年)

であった。この製作を行った R. G. Herb は当時大学院の学生であったと云う。Herbはこのマシンを用いて Ph.D. の論文の仕事を行った。

Wisconsin 大学ではひきつづき 1937 年に 2.6 MV の Van de Graaff 加速器 (2 号機) を製作した (図 1)。この加速器の成功が刺激になって国内の多くの研究室において同様の Van de Graaff 加速装置が製作された。この加速器は発生電圧を連続的に自由に変えることが可能であり、加速粒子のエネルギーが均一であるという特長をもっていた。当時核反応の励起に共鳴が現れるか否かが問題になっていた。その解明にこの加速器が役立ったのである。

Wisconsin 大学ではさらに 1940 年に 4.5 MV の Van de Graaff 加速器 (3 号機) を完成させた (図 2)。この加速装置は前の 2 号機の圧力タンクをそのまま用いて内容物を取替えたものである。コラムの長さを稼ぐためにベルトと加速管を片持ちの一つの絶縁コラムの中に収め、ターミナル電極のまわりに 2 重の中間シエル電極をとりつけることによって、小さいタンク (内径 1.7 m, 長さ 6.9 m) で高い電圧の発生を可能にした。またタンクに詰める高圧の絶縁ガス(空気)にフレオン (CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub>) を混ぜることによってガスの絶縁耐力を高めることを試みている。その結果、8 気圧の空気だけでは 3.3 MV が限界であったのが、フレオンを 3% 混ぜるだけで 4.5 MV まで上昇させるこ

とができた。

この時期 Van de Graaff 加速器は  $\gamma$  線または中性子の強力な発生源としても重要な役割を果たした。 ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$  反応 (しきい値 1.85 MeV の吸熱反応) を用いれば単色で連続的にエネルギー値を変えることのできる中性子源が得られる。また  $d+d$  反応 (発熱) を用いることによって数 100 kV の電圧で最も強力な簡便な中性子源が得られた。これらの中性子源はその後に来たる原子力開発において不可欠なものになった。

以上は第 2 次世界大戦が始まる 1930 年代末までの静電加速器の発達とその利用の歴史の概略であるが、この時期における Van de Graaff 加速器の開発の仕事は主に Wisconsin 大学の物理教室で行われた。上記の 3 号機では静電加速器技術の数々の可能性が試され、この方式の加速装置のほぼ完成された姿をそこに見ることができる。この 3 号機が作られた 1940 年に戦争が始まり、まもなく原子爆弾の開発 (Manhattan Project) のためこの加速器が Wisconsin から大陸を横断してニューメキシコの Los Alamos まで輸送された事実は周知のことだと思う。戦後この加速器は Wisconsin 大学に戻され、原子核の研究に使用された。

## 1.2 原子核物理学の発展期 (1940, 1950 年代) の静電加速器

第 2 次世界大戦の終結後米国において Van de

Graaff 加速器の製造会社 **High Voltage Engineering Corp. (HVEC)** が設立された。当初は滅菌と高分子化合物の重合のための電子加速器の製造が目的であったが、間もなく原子核研究のための需要が高まり、米国において 5 MV までの装置が多数製造された。当時この型の加速器は原子核の研究に用いられた殆ど唯一のもので、その後の 10 年間はこれが研究の主役になった。Van de Graaff 加速器の建設は英国でも行われた。英国には Cockcroft-Walton 以来の静電加速器に対する伝統が存在した。今日方々の加速器実験室で見られる標準的なビーム系の設備（ビーム分析電磁石、振り分け電磁石、ビーム収束用レンズ系、など）はこの時期に最初のモデルが作られている。

加速イオンビームによる照射実験の場所は放射線のバックグラウンドを減らすために加速器本体からある程度離すことが望ましい。Van de Graaff からの加速ビームは細くて平行性が良いので、この目的に合致している。この種のビームトランスポート系の設計のためのイオン光学の公式体系も漸次整備された。

しかし当時 Van de Graaff 加速器の技術は十分なレベルに達していたわけではなく、一般には 5 MV の発生が容易でなかった。Wisconsin 大学に最初に作られた Van de Graaff 加速器では高い電圧が得られたが、他所の研究室で同様のものをスケールを拡大して製作しても Wisconsin 大学のレベルに達しなかったようである\*1。その困難の原因が主に加速管の放電にあることが判り、1950 年代を通して多くの加速器実験室において問題の解決のための研究が行われた。この時期に、より高い電圧（ $\geq 10$  MV）の発生を目指して大型の Van de Graaff 加速器の建設が Los Alamos National Lab.(米)その他で始められていたが、いずれも加速管の困難に直面した。

この加速器の性能はいつも放電のトラブルと表裏の関係にあり、その原因の解明なしには性能の向上はありえなかった。次に少し詳しくこの問題を眺めて見よう。Van de Graaff 加速器の放電の原因は大別すると次のようになる：

- 1) ターミナル電極とタンク壁との間のスパーク放電

\*1 Wisconsin 大学の VdG 3 号機が初期のものであるにも拘わらず、例外的に高い電圧を発生し得た理由について後年 Herb 自身が述べている。それは加速管の真空度があまり良くなかったことが幸して、管内にイオン交換による放電（後出）を抑制するに十分な高さのガスが存在したが、プロトンビームを通すには支障ない程度のものであったと云うことである。

- 2) 絶縁コラム内の各種絶縁物の沿面放電、または固体中の絶縁破壊
- 3) 加速管の真空中の放電

1), 2) の放電は、タンクの大きさを増し、電極の形状の最適化を計ること、またタンクガスの絶縁耐力を増すことによって抑制することができた。しかし 3) にはまだ理解されていない問題が存在した。電圧を上げると、管内に電子流とこれに伴う X 線が発生して、タンクガスの電離によってロス電流が流れた。電圧の増加につれてこの現象（電子ローディング）は急速に立上り、加速器の発生電圧を制限した。

初期の加速管は大気中で使用されたために長い絶縁管が用いられ、その軸に沿って円筒形の電極が一定のピッチで配列されていた。このような電極配置は二次電子倍增管と同じ原理で電極表面を擦めて電子なだれが発生しやすい。Van de Graaff 加速器になると短い加速管が使用されて電極は平板形になった。リング状の絶縁物の内壁を遮蔽するために皿状の電極が使用された。これによってローディングは起こり難くなったが電圧が上るとビームを通すための孔の縁に沿って電子なだれが生じた。これを止めるために電極の孔径を少しずつテーパ状に変えたコーン型加速管、また一定間隔で小さい孔のダイアフラム電極を挿入したバツフル型加速管が作られた。これによって 5 MV 程度までの電圧では電子ローディングの発生が抑制されるようになった。

電子ローディングの抑制に最も有効な方法は磁場を使用することであるがこれが実現したのは 1960 年代である（後出）。

電子流発生の源としては、電極の孔の縁やそこに附着しているゴミなどからの電界放射がある。絶縁性のゴミの場合にはこれに陽イオンが附着して電極との間に発生する強い電場によって定常的に電子が引き出される (Malta effect)。しかしこの種の電子流は電流を流し続けるとひとりりで終息する。また電場の強さと共に増大して発生電圧を降下させるが、自発的に放電に転化することはない。加速器電圧の完全なブレイクダウンにつながる放電が起こるためには何らかの再起的な過程が必要なのである。その可能性として陰極よりの負イオンの放出を指摘したのは McKibben\*2 であった。

\*2 McKibben は Wisconsin 大学において前述の VdG 3 号機の製作を担当した。戦後 Los Alamos の研究所において 10 MV 以上の大型 Van de Graaff 加速器の建設計画に携わり、その間にローディングを起こさない加速管を製作した。5 MV の壁を初めて大幅に

負イオンは陰極面から陽イオンによってスパッターされて出てくる。この負イオンは加速されて陽極を叩き陽イオンをスパッターする。この陽イオンが陰極に戻って来て再び負イオンをスパッターする。この一連の過程によって再帰過程が形成される（正負イオンのスパッター交換過程）。電極が有機のコンタミネーション（炭化水素）で蔽われている場合にはこの放電は起こりやすく、 $H^-$ ,  $H^+$  イオンがその発生に関与する。この過程は加速管内の相待時する二つの電極間に発生するもので（図 19）、その間の電圧が高いほど再帰確率は大きい。再帰確率が 1 に達する電圧で放電が起こる。もしこれが加速管の両端の電極間で起れば加速管の長さに関係なく一定電圧において自発的に放電が生起することになる（total effect）。

加速管内のガス圧がイオン交換過程の再帰確率に影響する。ガス圧が高くなると、低エネルギーイオンに対する散乱確率が増すために再帰確率が減少する。ガス圧をイオン化による放電が生起しない程度に高めることによって、イオン交換を抑制して放電開始電圧を向上させることができる。

加速管の電圧を放電開始電圧に近づけると放電の前ぶれとして前述のメカニズムによって小放電が発生する。小放電を繰り返すことによって電極面のクリーンアップが進んで、放電開始電圧は少しずつ上昇してゆく（コンディショニング）。小放電の発生は X 線バーストまたは加速管の真空ゲージに現れる小さなキックによって検知できる。放電現象の常として放電開始電圧はそのときの電極面の状態に対応して極めて鋭く定まるものである。コンディショニングによって一旦達成された安定状態はイオンビームを発生しても破れることはない。このようにして到達された最高電圧の状態は電圧を放電開始電圧以下に保って放置すると、時間の経過と共に放電が再発するようになる。元の電圧に復帰するにはその都度コンディショニングを行う必要がある。このようなディコンディショニング効果はクリーンアップされた電極面が管内に残存する有機物ペーパーによって再び汚染されるためである。

コンディショニング処理は静電加速器の運転にとって極めて重要である。過大の電圧をかければ加速器に回復不能の損傷を与える。しかしこれを怖れて処理を控えていたのでは電圧を上限まで持ってゆくことが出来ない。HVEC では新しい加速管をとりつけたあとその電圧を規格の最高値にもっていくために充分長い

時間をかけてスケジュール的にこの処理を行った（例えば 1 ヶ月）。HVEC の加速管は絶縁物と電極の接合に有機接着剤を使用していたためにこれ以外に有効な脱ガス処理の手段を持たなかったのである。

以上のようにして加速管の放電の実態が次第に解明されたが、放電の原因が何であれ、その長さに比例して発生電圧を増大させることを可能にするには、管内の局所に発生した放電がその部分で終息して管全体に波及することがないようにしなければよいわけである。上述のバツフル管はこの考えに副うものである。

放電の拡散を抑えるための強力な方法として傾斜電場型加速管が考案された。加速管の電場の向きを管軸から傾けておけば、局所に発生した二次粒子は管壁に衝突して失われる。傾斜の向きを一定のピッチで反転することによってイオンビームが軸から外れることを防いだ。この場合、傾斜の反転部において抑制能力が低下する。これを避けるために傾斜の向きを軸のまわりに回軸させる Screwed-Field 型加速管も作られた（Oxford 大学（英））。

### 1.3 タンデム型 Van de Graaff 加速器

上述のように 1950 年代のはじめ頃には Van de Graaff 加速器の電圧は僅かなコンディショニングを施すだけで 5 MV が確実に発生できるようになっていたが、原子核の研究にはクーロン障壁の存在は厳しく、5 MV の加速粒子による原子核励起の可能な範囲は軽い核 ( $A \leq 20$ ) に限られていた。この範囲を広げるには発生電圧を高くするしかない。また入射粒子をターゲット核と直接作用させるためにはクーロン障壁よりも充分高い入射エネルギー (10~20 MeV) を必要とした。そのためにはサイクロトロンしかなかったのである。この段階で Van de Graaff 加速器の有用性は衰えたかに見えたが、これを一気に回復させたのはタンデム加速器の実現である。この加速器の考案は静電加速器の発足当初から存在していた。前述の Wisconsin 大学では既に小型の設備が試作されていたが、本格的な装置として実現したのは HVEC による EN タンデムである (1958)。この型の最初の加速器は Chalk-River 研究所 (カナダ) に設置され、原子核物理の研究にめざましい成果をあげた。HVEC はひきつづきターミナル電圧 7.5 MV の FN タンデム、さらに 10 MV の MP タンデムを製造した (1965)。MP タンデム (図 3) では加速管の困難を予想して、かなり余裕をみた大型のタンクが使用されており、前述の傾斜電場型加速管を用いることによって 10 MV の壁を突破した。このタンデム加速器の完成により

---

越えたのもこの加速器である。また Lamb-Shift 方式の偏極イオン源を考案したことで知られている。

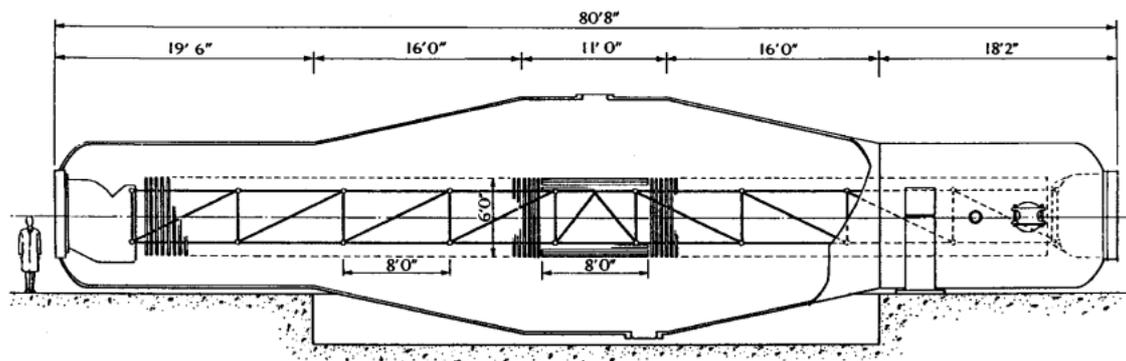


図3 MP タンデム (HVEC)

20 MeV のプロトンビームの発生が可能になり、原子核研究の範囲は原子番号の全域をカバーすることになった。それ以後新しく建設される大型静電加速器はすべてタンデム方式のものになった。1970年代初期までに世界をとおして10基のMPタンデムが設置されている。

タンデム加速方式のメリットをさらに追及した加速器として3段タンデムが作られた。これは通常のタンデム加速器の入射負イオンビームを別の充分高い電圧の静電加速器を用いて発生するものである。

タンデム加速器の効用は重イオンの加速において最大に発揮された。この加速器の強味はイオン源がタンク外のアース電位に設置されている点にある。今日負イオン源の研究が進んだ結果、稀ガスを除くすべての元素について、負イオンを必要な強さで発生することが可能になっている。ターミナル電極における電子はぎとり効率はイオンの速度が増すにつれて加速的に増大するので、ターミナル電圧を上げるとそれに比例する以上の加速エネルギーを獲得することができる(例えば硫黄 S ( $A=32, Z=16$ ) の原子イオンに対して10 MVでは平均の加速ビームエネルギーは85 MeVであるが、20 MVでは210 MeVになり、 $^{32}\text{S}$ 核に対する $^{238}\text{U}$ のクローン障壁の高さに達する)。このことが大型のタンデム加速器の建設を促進する理由になった。この方式の加速器は超小型の重イオン加速器としても魅力あるものである。

#### 1.4 Wisconsin 大学における新しい様式の静電加速器 Pelletron

Wisconsin 大学では、加速管の放電を無くするためには管内より放電の種と考えられる有機物の汚染を完全に除去すればよいとの認識の下に1950年代から硬

質セラミックスとチタン金属の接合のための独自の技術を研究開発し、これによってクリーンな真空を保持することの可能な加速管を製作した。このセラミック加速管は、加熱による電極の脱ガス処理を行うことによって、1ユニット(長さ6吋)単体に対して優に500 kVの電圧をかけることが出来た。

またこれと平行して従来のベルトに代わる電荷搬送体としてペレットチェーンを考案した。この研究室では1950年代頃より上記の基本的部品を柱にする小型の静電加速器の試作を行っていたが、1965年に到ってHerbは新しい様式の静電加速器 Pelletronの製造のためにNational Electrostatics Corp. (NEC)を設立した<sup>\*3</sup>。上記のセラミック加速管、同じ接合法による絶縁コラムの支柱、そしてペレットチェーンはいずれも1 MV/footの高電場の中での使用に堪えるものである。電圧の上昇につれて局所に蓄積される静電エネルギーが高くなるために放電のサージによる絶縁破壊の危険度が急速に高まる。上記の部品はいずれも絶縁部を保護するために環状スパークギャップを積み重ねた構造に作られている。この加速器設備は元来小型の超高電場用に開発されたものであるが、10 MV以上の高電圧の加速器を構築する際にも不可欠である。

#### 1.5 大型静電加速器のプロジェクト

1970年代に入って静電加速の技術が成熟して装置のスケールに比例して発生電圧を高めることが可能であるとの見通しが附いた時点で、20~30 MVを目指す巨大タンデムの建設計画が実行に移された。HVECとNECはそれぞれ20 MVの計画を実行し、ほぼこ

<sup>\*3</sup> ペレットロンの絶縁コラムは規格化された同じ構造のユニット(1U)を積み重ねることによって構成される。1Uは3ヶの加速管ユニットを含み、長さ約60 cmで1 MVの電圧に対応する。

の目標を達成した。さらに 30 MV またはそれ以上を目標にする計画は Daresbery (英) と Strasbourg (佛) において始められた。これらの加速器では高電圧ターミナルの囲りに多重の**中間シェル電極**を配置している。後者では閉じた曲面ではなく帯状の電極を縦に並べているだけであるが、これによって目標の最高発生電圧 35 MV において電極間の電場の強さが到るところ 160 kV/cm を越えないにしている。実際 Strasbourg の MP タンデムではこの形の間電極を使用して 12 MV の電圧を 18 MV に上げること (即ち 50% の増加) を可能にした。この中間電極は、高電圧の囲りに蓄えられている静電エネルギーを外側に分散させることによって、スパーク放電発生時の高電圧電極部への衝撃を柔らげる効果が期待される。

しかしこの二つの計画はいずれもテスト実験の段階で中止されるに到った。その原因は定かでないが、装置の大きさが限界を越えたために計画に無理があったのかもしれない。時代の流れとして大型静電加速器の効用が疑問視されるようになったことも事実であろう。それにしてもこれによって静電加速器の夢が絶たれてしまったことは残念である。それ以後大型静電加速器の新しい計画は世界のどこにも行われていない。

## 2. 日本における静電加速器

### 2.1 戦前・戦後の日本の静電加速器事情

1930 年代加速器による原子核破壊の実験が出初めた頃日本においても加速器設置の要望が急速に高まった。当時物理部門を擁していた研究機関 (理化学研究所及び東京大学、京都大学、大阪大学、九州大学などの理学部物理学教室) では何らかの粒子加速装置の設置を計画した。本稿の著者に課せられた仕事はこれらの計画の進行状況、特に初期の事情を概観することであると思うが、資料に基づいて正確な記述を行うことは必ずしもその主旨でないと考え、ここでは著者自身の経験、ないし見聞の範囲に止めることを許して頂きたい。

私の少年時代に“子供の科学”と云う雑誌があり、それに原子核破壊の実験装置の記事がのっていたのを憶えている。実際の装置を初めて見たのは、京大物理教室の Cockcroft-Walton 型の加速装置であった。太平洋戦争が始まる直前のことである。実験室一ぱいに広がる巨大な設備は見学者を圧倒するに充分のものであった。当時これと同様の設備が理化学研究所と大阪大学に稼動していたはずである。

私はその後、研究者の卵になってから何回かこの実験室を訪問する機会があった。そこではビームによって励起された共鳴レベルからの高エネルギー  $\gamma$  線を検出する実験が行われていた。その研究者から上記の装置の運転に関する苦労話も聞かされた。トラブルの原因はいろいろあった様であるが、このタイプの設備に共通のものとして絶縁物の沿面放電があった。湿気の高い夏場にはリークのために高い電圧が掛からなくなり、実験が出来なくなる。ヨーロッパとちがって日本の風土は多湿であるので、この種の装置は一般に良い性能が得られなかった。

1930 年代は原子核に関する重要な発見が相次ぎ、原子核の実体がほぼ明かにされた時期である。研究に使用された実験設備はエンジニアリングとしては素朴であったが、技術上の創意工夫が施されていた。

当時加速器に限らず物理の研究者を悩ませた共通の問題は**真空技術**である。初期の加速管はガラスまたはポーセレン硝子の絶縁物をピースワックスとかシェラックなどのシール材を用いて金属プレートに張り合わせることによって作られていた。真空チェンバーの中に電極を挿入するのにも同様のシール材が使用された。また大きな真空容器がソフトハンダによって組立てられていたので、接合部の強度が充分でなく、しばしば亀裂を生じて**真空洩れ**を起こした。金属素材の巣などの欠陥をとほしての洩れはもっとも厄介なものであった。洩れ箇所を探しこれを止めるのに実験者は多大の時間と労力を費した。

1 Torr 以下  $10^{-3}$  Torr までの低真空領域の真空計として専ら**ガイスラー管**が使用されていた。これは原子物理学始まって以来の実験道具で、グロー放電の陰極面に現れるダークスペースの厚さやガラス管の蛍光が真空度の優れたメジャーになった。それだけではなく放電の色が残留ガスの種類に関する情報を与えた。アルコールのような溶剤を真空洩れの箇所かけると、放電の色が真白に変わるので、洩れ探しに大いに役立つ。真空のストップバルブを閉じて一晩放置した後のガイスラー管の放電状況を見ることによって、洩れの大きさと同時に真空容器の汚れの有無を確実に判断することができた。

$10^{-6}$  Torr 以下の高真空を得るためには **Hickmann 型油拡散ポンプ** (蒸気圧の低い油の成分を自動的に分溜しながら排気を行う優れた性能の真空ポンプ) が使用された。この型のポンプはパイレックスガラス細工の容器に収められており取扱いには慎重を要したが、これが当時高真空を得るのに利用できた唯一の強力ポンプであった。真空管製造工場の生産ラインにおいて

もこの方式の大型ポンプが用いられていた。これに **Ba** ゲッターを併用することで強力排気系を構成した。ゴムパッキングを使用する金属製の油拡散ポンプが普及したのは戦後復興期に入ってからである。この大戦を期にして真空技術は格段に進歩した。特筆すべきはヘリウムリーク検出機であろう<sup>\*4</sup>。

しかし当初の真空容器（ポンプ、ダクト、実験チェンバーなど）はすべて鉄（軟鋼）製であったので、錆のため  $10^{-6}$  Torr 代の真空を得ることは容易でなかった（残留ガスの主成分は  $H_2O$  である）。溶接技術が発達して一般の研究室において SUS 製の真空容器が使用されるようになるのは 1970 年代に入ってからである。

油拡散ポンプを使用していると油の拡散によって容器内のすべてのものの表面が油の被膜で蔽われる。高電圧の装置においてはこの被膜が放電の原因になるので極めて有害である。これを阻止するには液体空気（後には窒素）トラップの使用が不可欠であった。また油の汚染を嫌う物理実験には昔から水銀拡散ポンプと液体空気のトラップの組合せによる排気系が使用されて来た。HVEC の加速器にはこの方式の巨大な排気系が用いられていた。固体の表面物理などの超高真空を必要とする研究には早期からゲッターが使用されている。これを液体空気トラップと組合せることにより窮極の真空が得られた。今日のスパッターイオンポンプの前身である。

東大物理教室では 1940 年代のはじめ頃より Van de Graaff 加速器の建設に着手し、戦争が始まった時点では 2 MV 強での運転が可能になっていた。その頃既に陽子ビームによって軽い原子核を励起する精密実験（原子核スペクトロスコーピー）を行っている。この加速器は、材料検査のための 100 万ボルト超硬 X 線発生機として使用する計画があった。しかし戦禍が拡大するにつれてその必要はなくなり、実験室は閉鎖された。私は戦争の末期この大学を卒業し、原子核物理の実験を専攻した。そして戦後日本で原子核研究が再開されたときこの加速器に深くかかわることになった。

大阪および九州大学でも戦争によって Van de Graaff 加速器の建設計画が中断され完成は戦後にもちこされた。それぞれ 2 MV と 3 MV を発生し原子核の実験に使用されたが、当時の若い研究者は物質の

乏しい状況の中で悪戦苦闘を強いられた。それだけにビームが得られたときの喜びは格別のものがあった。その事情は東大の場合も含めて似たようなものであったろう。

**東大物理教室の Van de Graaff 加速器** この教室に設置された Van de Graaff 加速器は Wisconsin 大学の 2 号機（図 1）をモデルにして、その大きさを一回り大きくしたものであった（この設備の製作は東芝による）。横型タンク（直径～2 m）の中に軸にそって一本の太い絶縁支柱が渡してあり、その中央部に高電圧電極が、その両側に絶縁コラムがとりつけられている。一方のコラムには発電用のベルト、反対側には加速管が据え付けられているが、ベルトと加速管とが互に分離されたこのような配置は加速器の安定運転のためには好ましいと云える<sup>\*5</sup>。絶縁支柱には一定のピッチでリング状の分割電極がクランプされ、コロナ針によって電圧が均等に配分されるようになっている。この絶縁支柱はもともと電力用の大型トランスの組立に用いられるもので（紙を棒状に巻き締めシェラックを浸透させて固めてある）、油タンクの中に浸した状態で使用されるものである。Van de Graaff のコラムにこの絶縁物を用いたのは、Wisconsin 大学の前例に倣ったためで、当時の技術として唯一の選択であったが、このような作りの絶縁物は紙の層に沿って絶縁耐力が落ちる嫌いがある。またシェラックは吸湿性であるので大気中に絶縁支柱を長時間曝しておくとう湿気を吸って使用できなくなる。この加速器は建設当初は 2 MV 以上の電圧を発生したが、戦争中放置されていた間に劣化し、運転が再開された時点には全く電圧がかからなくなっていた。そのあとコラムを解体して加熱による乾燥処理が行われたが、絶縁を回復させることは出来なくて、再組立後に得られた電圧は 1.5 MV どまりであった。

加速管は、同筒状のレンズ電極を並べた旧式の構造のもので、各段のポーセレン碍子の絶縁リングと分割電極板は角のゴムパッキングによってシールされていた。

<sup>\*5</sup> 戦後間もなく量子力学の教科書でおなじみの Prof. Schiff が GHQ の科学官としてこの Van de Graaff 加速器実験室の査察にやって来た。そのあと原子核研究の現状についての講演があり、その中で東大の加速器のコラム配置はタンデム型の静電加速器を作るのに適していることを指摘した。丁度その頃米国においてこの方式の加速器の提案が行われていたのである。これは我々がタンデム加速器の考えを知った最初の機会であった。その後 10 年して HVEC のタンデム加速器が実現した。

<sup>\*4</sup> 後述の東大の Van de Graaff 加速器の再建に際して東芝で試作された日本で最初のヘリウムリーク検出機が使用された。

た。加速電極の口径は大きく ( $\sim 10\text{ cm}\phi$ )、非常に強いイオンビームを通すことができた (1 MVにおいてプロトン  $100\ \mu\text{A}$ )。絶縁コラムは重大な損傷を受けていたが、低い電圧で運転されていたために、加速ビームの安定性は良く原子核の実験に有効に使用された。この加速器は日本において活動した最初の Van de Graaff 加速器であった。

Single-stage Van de Graaff では高電圧ターミナルの中にイオン源が設置されるために、運転に使用する電力の制限はさることながら、イオン源から加速管に放出されるガス量に対する制限は非常に強い。加速管内にガスのイオン化による放電が生起しないために許容される加速管のガス圧は  $1 \times 10^{-4}\text{ Torr}$  の程度である。太い口径の加速管であればガスの流れに対するコンダクタンスは充分大きくとれるが、後述のような細い加速管の場合にはこれが大きな問題になる。またイオン源の出力ビームの強度は小さくてよいが、質の高いこと (高いプロトン比, エネルギーの一様性, 小さいエミッタンス) が望まれる。このような理由によって高性能のイオン源を準備することが加速器実験室の重要な仕事であった。東大の実験室ではこのための非常に性能の高いプロトン源を研究開発した: 使用電力  $200\text{ W}$  で、プロトン比  $\sim 50\%$  のプロトン電流  $100\ \mu\text{A}$  を与えた (この場合の流出水素ガスの分子数に対するプロトン数の比  $\sim 10\%$ )。

**九大物理教室の Van de Graaff 加速器** 1939 年この大学に理学部が設置されたとき、物理教室に原子核研究グループが発足し Van de Graaff 加速器の建設に取り組むことになった。計画された Van de Graaff の圧力タンクは縦型 (内径  $\sim 2.7\text{ m}$ , 高さ  $\sim 7\text{ m}$ ) で当時としては異例に大きなスケールのものであった。地元の鉄工所で製作され、1940 年のはじめ頃現地に据えつけられた。しかしその直後に戦争が始まったので、工事は中断され完成は戦後になった。

九大の実験室ではこの加速器の建設に入る前にベルト起電機のモデルを作り、ベルトの電荷搬送機構の実験を行っている。ベルトは Van de Graaff 方式の静電加速器の生命とも云うべき構成部品で、その運転時の機械的安定性無しには加速器は成立しない。特に張力による伸び率の一様性が要求される。しかしこの技術はかなり特殊のもので、専門のメーカーへの特注によって製作されたが、良品を得るのはかなり難しかったようである<sup>\*6</sup>。この加速器の建設作業は戦後再開され、苦労の末 1952 年 3 MV の電圧で重陽子の加速を行うことが出来た。これを用いて (d, n) 反応の研究

が行われた。

## 2.2 1960~1980年代における日本の Van de Graaff 加速器設置状況

戦後 15~20 年を経て日本の国力が回復して来た段階では Van de Graaff 加速器の製作をメーカーに依存するようになった。更に、専門メーカーによって製造された規格の装置を購入することが可能になり、研究者は加速器製作の労働から開放されることになった。1960 年代には原子核の研究に限らず原子物理・固体物理の研究用にいろいろの規格の静電加速器が各所の研究機関に導入された。大型の設備として下記のものがあげられる:

日本原子力事業	4 MV VdG (東芝製)
日本原子力研究所	5.5 MV VdG (HVEC)
阪大理・物理教室	4.75 MV VdG (HVEC)
東北大理・物理教室	5 MV VdG (日立)
東大原子力センター	4 MV タンデム (東芝)
京大理・物理教室	4.5 MV タンデム (三菱電機)
京大・工学部	4 MV VdG (三菱電機)
東工大	4.75 MV VdG (HVEC)

さらに 1980 年前後には大型ペレトロンが設置された:

筑波大理・物理教室	12 MV ペレトロンタンデム 12 UD (NEC (米)) <sup>*7</sup>
日本原子力研究所	20 MV 規格ペレトロンタンデム 20 UR (NEC (米)) <sup>*8</sup>

これらのメーカーの静電加速器本体、および関連機器の技術は第 1 部で解説したように当初はいろいろの問題をかかえていたが、製作の回数を重ねるにつれて次第に向上した。1980 年以降になると、PIXE (Particle Induced X-ray Emission) と  $^{14}\text{C}$  の検出による年

<sup>\*6</sup> この点 HVEC の Van de Graaff 加速器のベルトはよく研究されていて、この会社の技術の高さ、そしてその成功の理由をそこに見ることができる。HVEC の加速器ではベルトの機械的安定性を保つためにビーム加速を行わないときにもベルトの運転を止めないと云うようなことが実行されていた。

<sup>\*7</sup> 各々のコラムが 12 ヶのユニットで構成されているタンデム。

<sup>\*8</sup> 高電圧ターミナルの中でイオンビームを  $180^\circ$  偏向させることによって入射および出射イオンビームの加速を一つ絶縁コラムで行う方式のタンデム (folded tandem)。

代測定などこのマシンの本命とも云える応用の途が開かれた結果、数 MV 以下の小型タンデムが方々の施設において設置されることになった。これらは米国の専門メーカーからの輸入によるものである。

この時期に日本において独自の技術によって建設された静電加速器として下記のものがある：

- 九大理・物理教室 6 MV VdG  
ペレットチェーン方式
- 九大理・物理教室 10 MV タンデム  
ペレットチェーン方式

九大の研究室はこの二つの加速器を完成させることによって静電加速器技術に関する最新の知見を得た。次節以降にその経過を述べて静電加速器建設の実体に触れたい。

### 2.3 九大理物理教室の Single-stage Van de Graaff の改造計画<sup>\*9</sup>

本稿の著者は 1963 年に九大理学部物理教室に赴任した。そしてそこに存在する古い Van de Graaff の設備を詳細に観察した。タンク内部のコラムは更新されていたが、既に劣化が著しく電圧は 2 MV どまりであった。しかしタンクのサイズは大きく、内味を替えれば充分使えると考えて改造計画を立てた。当時の日本は原子核研究所が動き出して間もない頃であり、原子核物理学の研究は最盛期を迎えていた。中央から離れた九州の地に強力な研究設備が存在することは望ましいと考えての選択であった。それを可能ならしめたのは、この研究室には学部開設以来の静電加速器の伝統があり、加速器の建設を実行出来るだけの強力な若手研究者が育っていたからである。

この改造計画において最初に手を着けたことは、加速器タンクの修理であった。このタンクは鋸打ちによって造られた旧式のもので、気密性は極めて良くなかった。そこで張り合せた鉄板の隙間を溶接するか、または接着剤を注入することによってタンクを真空に排気することを可能にした。この作業は難行し半年の時間を費したが、最終的には 0.1 Torr 以下に引くことが出来た。タンクを真空にするのは絶縁ガスとして 100% のフレオンガスを使用すると同時に、タンク

内の絶縁物の完全な乾燥のためにこのことが不可欠であったからである。

100% のフレオン R12 の絶縁耐力は空気に数% のフレオンガスを混入したのと大差ないが、100% にした方がガスの回収がずっと簡単になる。このガスは当時家庭用の冷房機の冷媒として一般に使用されていたので入手が容易であった。タンクを飽和蒸気 (7.6 kg/cm<sup>2</sup> at 30°C) で満たすために必要な量のフレオン (~3 ton) の貯蔵タンクと回収のためのコンプレッサーが用意された。

当時静電加速器の技術として HVEC の加速器の技術が定着していたのであるが、九大の改造計画ではこれに囚われず独自の方法を開発しようと考えた。その大きな柱は、従来問題の多かったベルトの使用をやめてペレットチェーンを使用することであった。当時ベルトを使用していた多くの Van de Graaff 加速器はベルトの電荷搬送の異常に悩まされていた。ベルトに電荷をのせるためにはコロナ針が使用され、電流の安定化のためいろいろの工夫がされていたが、摩擦電気のような現象もからんで、これをコントロールすることは極めて難しかった。

怖いのは一発のスパークでベルトが焼けて使用不能に陥ることであった。そのトラブルの原因は殆んどがベルトが湿っていたためであると考えられる。初期の設備では絶縁ガスとして大気を圧縮して使用していたためにタンク内の湿度は予想以上に高かったのではないかと想像される。当時の実験室は空気を乾燥させるための充分強力な設備をもっていなかった。要するにタンク内部はカランカランに乾燥していることが大切なのである。本稿の著者は東大の Van de Graaff の苦い経験からこれが静電加速器の技術の基本であることを痛感していた。

ベルトを使用する従来の静電加速器では、コロナ針によってベルトに散布される電荷の分布が一様性を欠くと、コラム内に電位の動揺をひきおこす。これを抑えるためにコラムの各段の電極にベルトに近接して電位均等化電極 (ベルトフープ) がとりつけられた (図 6)。最も進んだ設計のものでは、ベルトとの隙間は数 mm の程度まで狭められた。ベルトがベルトフープに接触するのを避けるために、セラミック板で保護されたベルトフープを一定間隔で配置して、ベルトの横ゆれを制限した。これによって円滑で安定なベルトの運転が実現されたのである。セラミックスのような固くて摩擦に強い材料を使用することがかえってベルトの摩擦を最小に止どめる効果をもった。以上は HVEC によって最終的に到達されたベルトの技術であった

<sup>\*9</sup> この改造計画の詳細は次の文献に出ている：

MEMOIRS of the FACULTY SCIENCE, KYUSHU UNIVERSITY Series B Physics VOL. 4, SPECIAL ISSUE, May 1970

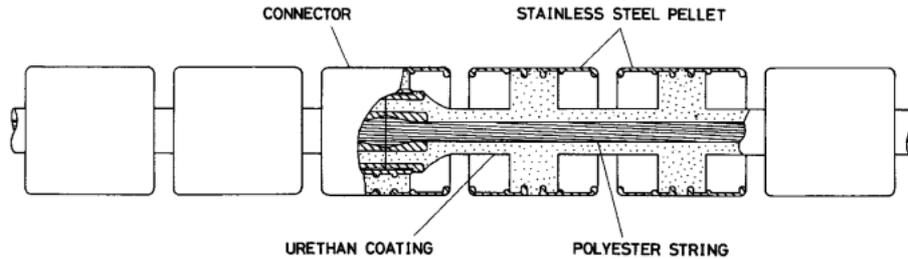


図4 九大の静電加速器に使用された電荷搬送体（ペレットチェーン）

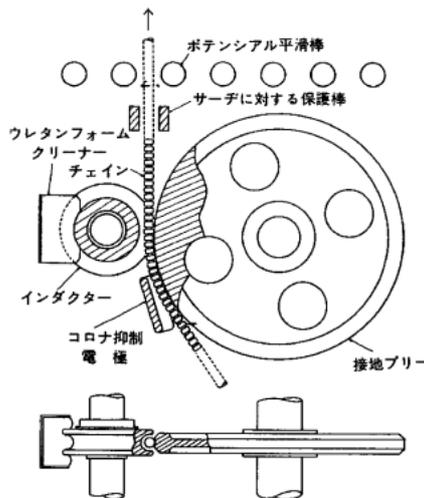


図5 ペレットチェーンに電荷をのせるためのインダクター。

インダクター電極の電場によって周辺よりゴミが集められコロナが発生する。これによってペレットチェーンの運ぶ電流に動揺がおこるのを防ぐため、インダクターをゆっくり回転させて、その表面をウレタンフォームによってぬぐうことによりクリーンアップしている。

電荷をもったペレットがブリーを外れる瞬間、ペレットとブリー間の電場が一点に集中してコロナが点火する。これを防ぐために、ペレットがブリーから充分離れるまでペレットに強い電場がかかっているようにインダクター電極が配置された。また同じ理由で、電荷をもったペレットがブリーに接触して放電する際に、接触点においてコロナが発生しないようにペレットが入ってくる側にもインダクター電極が設けられた。

が、難点はベルトの摩耗によってタンク内にゴミが発生することであった。これに対してペレットチェーンはゴミの発生が全く生じない設備であった。

開発されたペレットチェーンは熱可塑性のポリウレタンゴムで被覆したポリエステル製のひもにメタルリング（ペレット）を固定したものである（図4）。ベンチテストによれば、ペレット間のギャップはチェーン

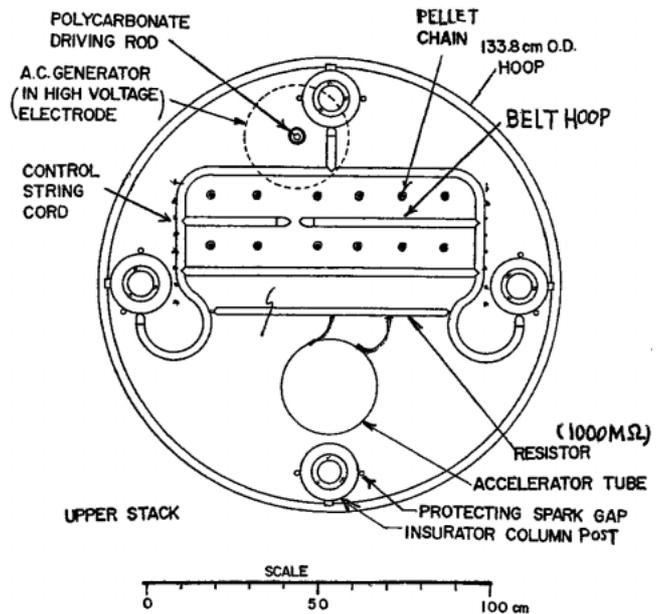


図6 絶縁コラムの断面図（上部コラム）。

絶縁支柱の各段の分割電極にはフープリングとAlパイプのフレームがとりつけられて、等電位面を形成している。このフレームは改造前のVan de Graaffに使用されていたものを修正して使用した。ベルトの通っていた位置にペレットチェーンが取り付けられた。ベルトフープは隣り合ったペレットチェーンが、互に引き合ったり反発したりするのを防ぐ役割をもつ。分割抵抗体が新たに取り付けられた。

コードをサージから保護するためのスパークギャップとして完全に作動する。しかしこのペレットチェーンも湿気に対して敏感である。ウレタンゴムが吸湿性であるために、乾燥が充分でないとコードに沿ってスパークが走り絶縁破壊を引き起こす。

図5はペレットチェーンに電荷をのせるための静電誘導の設備（インダクター）である。ベルトとちがって個々のペレットにのせられる電荷はインダクター電極の電圧によって一義的に定まり、ゆらぎは全く生じない。このペレットチェーンを装備した九大のVan

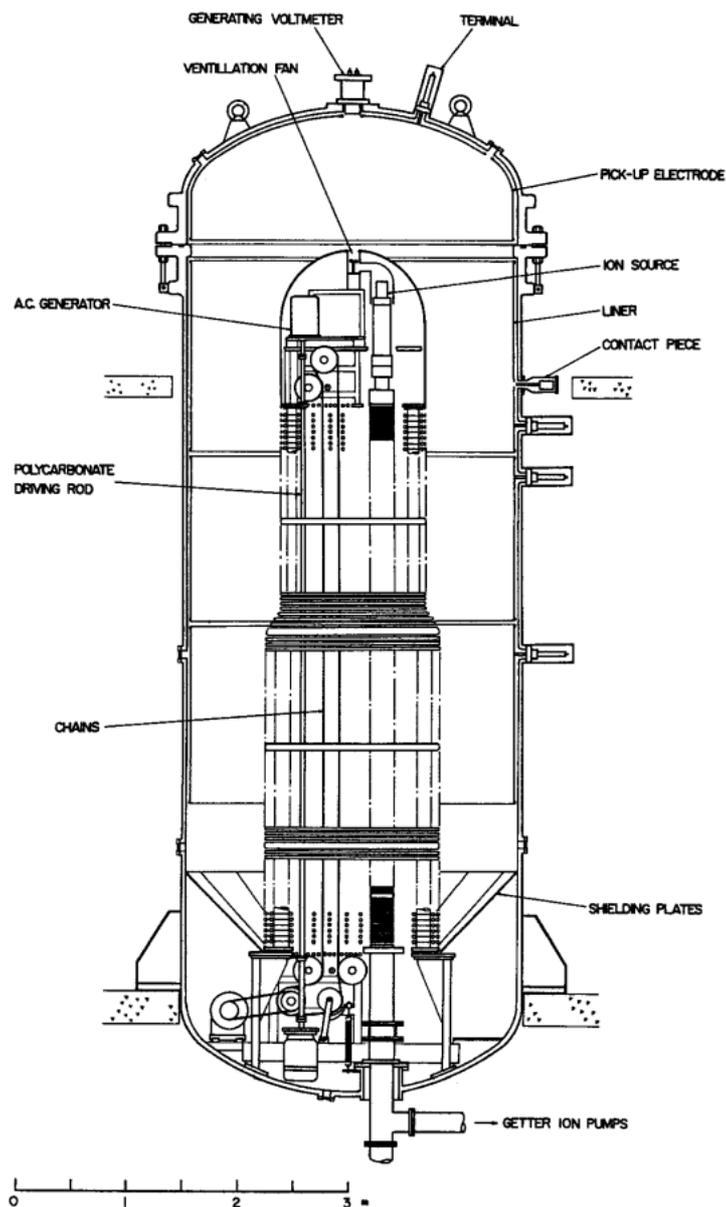


図7 九大 Single-stage Van de Graaff 加速器 (1970 年再建後)

de Graaff は世界で初めてのペレットチェーン方式の加速器となった (NEC の Pelletron はまだ実現していなかった)。

この Van de Graaff では絶縁コラムに沿っての電位勾配を一様に保つために、通常のコロナ針の代りに高抵抗体がいれた。これはフロンガスの分解を避けるための処置であった。また高電圧ターミナルの電圧制御をコロナフィードバックに依らずに、タンク内壁にとりつけた内張り電極を用いる静電誘導方式のものにした。以上の処置によってタンク内に全くコロナが存在しない状態で加速器の運転が行われた。上記の内張り電極はターミナル電極よりのコロナの存在を直接検知することを許した。コロナの無い運転時にはペ

レットチェーンによる荷電電流が抵抗体電流とビーム電流の和と一致することが確認された。この状態で抵抗体電流と同程度の強さのイオンビームを発生することが可能であった。加速器の電圧を極限まで高めようとする場合にはこのような原理どおりの単純な電流分布が実現されていることが条件である。

この Van de Graaff の絶縁物を含むすべての構成要素 (コラム支柱、ペレットチェーン、加速管) はサージに対する保護のための環状スパークギャップで包まれている。但し高抵抗体は剥き出しになっていて、しばしば損傷 (抵抗値の変化) を受けた。その取り付け位置が適当でなかったためにサージの電圧がまともに抵抗体の両端にかかった可能性がある (図6)。

以上の計画によって再建された Van de Graaff 加速器 (図 7) は, 加速管無しの発電テストで 8.9 MV の電圧が得られた. この実験で確認されたことは, タンク内のゴミが高電圧発生をはばむ唯一の原因であったと云う事実である. ゴミが導電性の場合には隣接する電極間を往復して電荷を運ぶために有意の電流ロスを生ずる. 上記の最高電圧値はタンク内のゴミ掃除を繰り返えしながら, 少しずつ放電開始電圧を高めていった後に達成された値である. この最高電圧を得るにはその都度タンク内の徹底したゴミ掃除を必要とする. この時点で一つの強力なゴミ掃除法の考案が行われた. それは液体フレオンのシャワーをタンクの上端より絶縁コラムに降り注いで, ゴミを洗い流すことであった. フレオンガスが飽和に近い圧力で使用されていたので, この方法の実施は容易であった.

フレオンガスの使用によってトラブルが起こった. タンク内に使用されているボールベアリングのグリースがフレオンを溶かし込んで膨張し, ケースから流出したのである. この困難は高粘度のグリースの使用, そして最終的にはグリースレスベアリングの使用によって一応解決された. しかしさらに生じた困難はフレオンが加速管の O リングシールや接着剤層を透過して管内に洩れて来たことである. この解決は難かかったが, 後に SF<sub>6</sub> を用いるようになった段階で解消した.

加速管として最初に傾斜電場型加速管が用意された. しかしこの加速管は 5 MV 附近の電圧で電子ローディングを取めることが出来ず, 結局使用を断念した. その代わりにリング状の永久磁石を管内にとりつけた磁気抑制型の加速管が試作された (図 8). この加速管は電子ローディングの抑制が非常に強力で, 5 MV までの電圧は最初のならし運転だけで殆んどコンディショニングなしに発生できた. タンク外壁における X 線は通常のレートメーターでは全く検出されなかった. ガイガーカウンターでも自然のバックグラウンド程度を出なかった. しかしこの加速器の電圧を 5 MV 以上に上げようとするとう不安定状態が現れた. これに対してはコンディショニングの効果が殆んど得られなかった. 磁気抑制のメカニズムはこの領域では全く無力だった. この時電極間の正負イオン交換による放電が始まっていたのである. その結果この加速器の電圧は約 6 MV に抑えられた.

この改造計画における各種部品の調達は大抵外注によって行われたが, 上記磁気抑制管と絶縁支柱の製作に必要なエポキシ樹脂接着作業は, その耐電圧性能を左右する問題であるので, すべて研究室で行っ

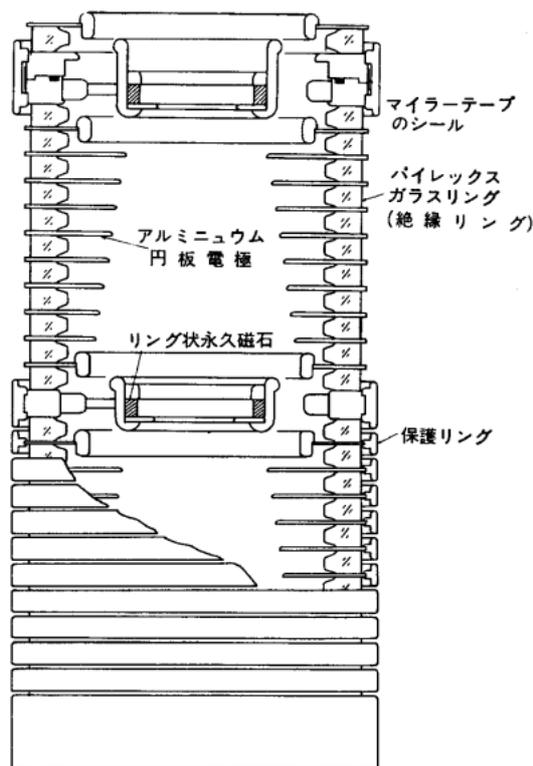


図 8 九大 Van de Graaff の磁気抑制型加速管加速管.

た. この改造には丸 5 ヶ年の歳月が費やされたが, 得られた成果は大きく, 静電加速器の技術に貢献出来たと考えている.

#### 2.4 九大物理教室における 10 MV タンデム加速器の研究開発<sup>\*10</sup>

九大物理教室では 6 MV Van de Graaff 加速器の完成後数年を経て再び加速器建設に係わることになる. この計画は既に完成されていた縦型 Van de Graaff を負イオン加速器として用い, これから得た高エネルギーの負イオンビームを新たに作る横型タンデム加速器に入射させる三段タンデムとして立案された (この計画はタンデム加速器の完成に時間が掛り過ぎたために実施に到らなかった). この九大のタンデム計画にゴーサインが出された背景には, この国が高度成長の時期を迎えていたと云う事情がある. 日本のメーカーの技術力が飛躍的に高まっていたので, この計画にはいろいろの新しい可能性が試みられた. しかし当時こ

<sup>\*10</sup> 1. Proc. 2nd Int. Conf. on Electrostatic Accelerator Technology 1977 (Revue de Physique Appliqué, Tome 12 (1977) p. 1315).  
2. Proc. 3rd Int. Conf. on Electrostatic Accelerator Technology 1981, p. 98.

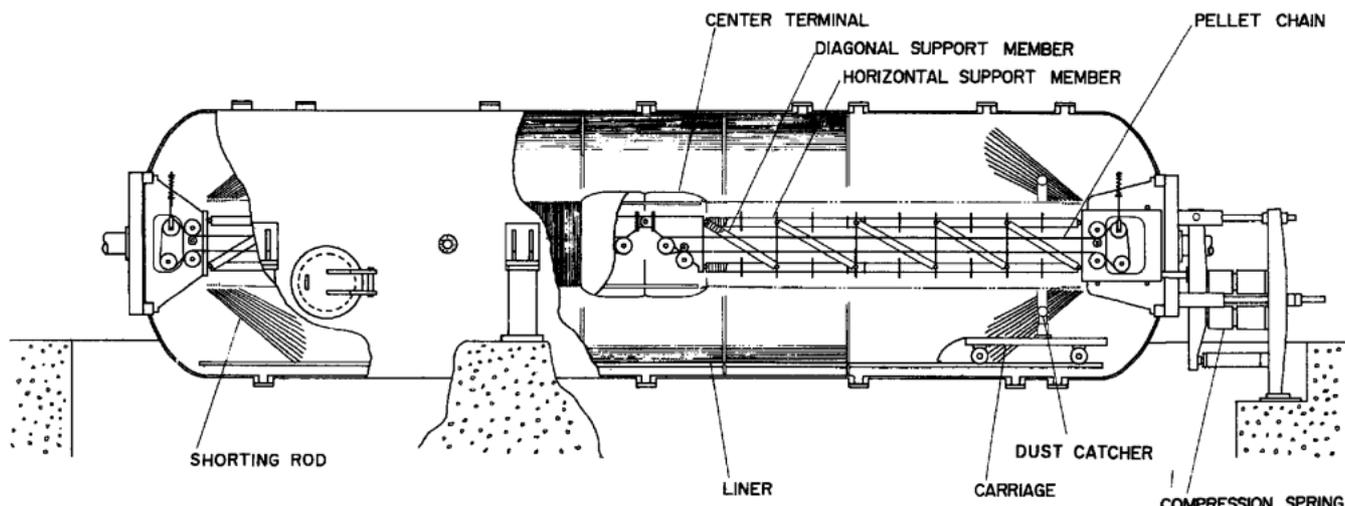


図9 九大タンデム加速器

の国では原子力事業が動き出したところで、静電加速器を手掛けた経験のある大きな企業はいずれも九大のこの加速器計画を引き受ける余裕をもたなかった。その結果、この計画は中小企業の協力を得て研究者の主導の下に実施されることになった。しかしこれは結果的には好ましいことであった。研究者の創意工夫を織り込んだ新企軸の加速器製作を試みる絶好のチャンスの到来であったのである。

このタンデム加速器の規模と構造は図9に示されている。この装置の前段および後段の絶縁コラムの長さは、先に作られた5 MVのSingle-stage Van de Graaffのものと同一5 mであるが、発生電圧は2倍(10 MV)にとられている。このことを許したのは、加速管の試作研究(後述)の結果、1 MV/50 cmの強電場に耐える加速管が実現可能であると判断したことによる。

このタンデム計画の主な柱は100%のSF<sub>6</sub>絶縁ガスの使用\*11と共に、ペレットチェーンを使用することであった。この実験室では先行したVan de Graaff改造以来、耐久力に富むペレットチェーンの製作法の研究を続けていた。タンデム計画の実施に先立って1 MVを発生するペレットチェーン方式の超小型発電機を製作し、これを用いてペレットチェーンの運転テストと同時に各種の加速器コンポーネントの絶縁破壊テ

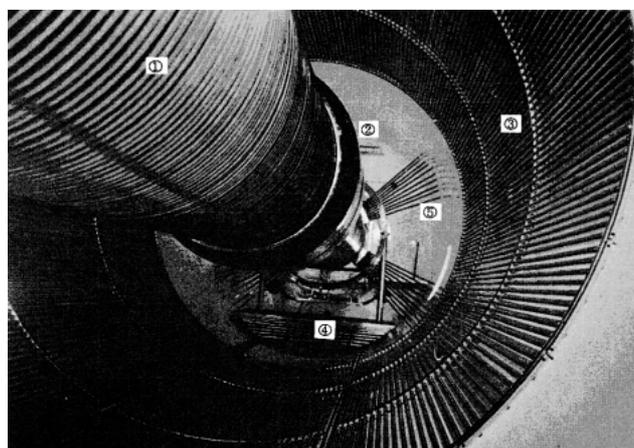


図10 タンデム加速器のタンク内部の光景。  
①水平絶縁コラム、②中央ターミナル電極、③タンク壁ライナー、④可動台車、⑤スパークロッド。

ストを実施した。

タンデム加速器の水平絶縁コラムはトラス構造のもので、タンクの端からスプリングで圧力をかけることによりその水平位置が保たれている。ビームの入射および出射側の各コラムは5個のセクションからなり、各セクションは4本の水平メンバーと1本の斜メンバーから構成される。斜メンバーの両端の接点には円滑(ball)ジョイントが用いられている。また上・下の水平メンバーとコラムベースおよびセンターターミナルとの結合にも円滑(回転)ジョイントが用いられた。この構造物のたわみの解析はその頃九州大学に導入された計算機センターのコンピューターを用いて行われた。

各段の斜メンバーのジョイント部には斜メンバーの

\*11 SF<sub>6</sub>ガス中の放電開始の電場の強さは  $E_s/P = 86.1$  [kVcm<sup>-1</sup>/kgcm<sup>-2</sup>] 但し P はガスの圧力 (P ~ 10 kg/cm<sup>2</sup> で使用)。これは N ガスの約 3 倍である。SF<sub>6</sub> はフロン R12 に比べて沸点が低く、常温において充分高い圧力が得られる。電子衝突による分解の確率が小さいことも有利である。

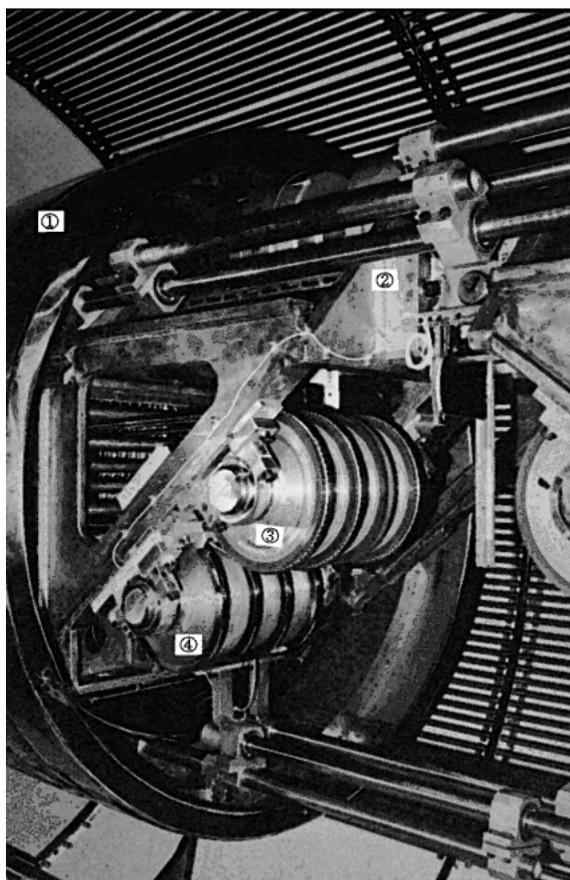


図11 タンデム加速器の中央ターミナル電極内部の光景。  
①シェル電極，②中央電極のフレーム，③ペレットチェーンとプリー，④インダクター用プリー。  
左右のコラムのフレームがピンで連結されており，タンクの外から圧縮スプリングによって加えられた約20トンの力によってコラムの水平が保たれている。

長さの微調整のための装置がとりつけられている。コラムのトラス構造体を組上げるに当たっては，この調整によってメンバーのたわみが発生しないようにした。個々のメンバーのたわみは常時歪計で監視された。コラムを組立てるには最初にコラムのすべての構成メンバーをスプリングで吊り下げて空に浮いた状態で互に結合した。その後徐々に圧縮スプリングの力を増していくと同時に吊り下げスプリングの力を緩め，最終的に圧縮スプリングの力だけでコラム全体の水平が保たれるようにした。組立の作業の間上記の斜メンバーの長さの調整は絶えず実行された。このようにして組上げられたコラムにおいて個々のメンバーに発生している曲げモーメントの大きさはメンバーの自重によるモーメントの程度を出でない。圧縮スプリングの力は，水平メンバーの軸圧力が負（即ち張力）になることのないように約20トンに設定された。このとき個

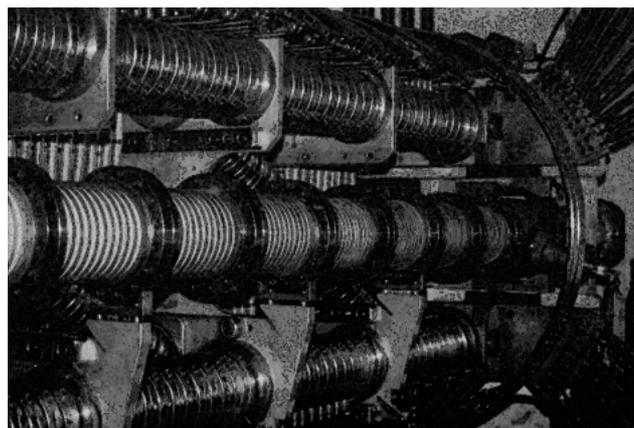


図12 タンデム加速器の絶縁コラム内部の光景。  
絶縁コラムの外側のフープは外してある。絶縁支柱の水平および斜メンバーなど，コラム内のすべての絶縁物は環状スパークギャップによって厳重に保護されている。手前の加速管にも環状スパークギャップが取り付けられる。

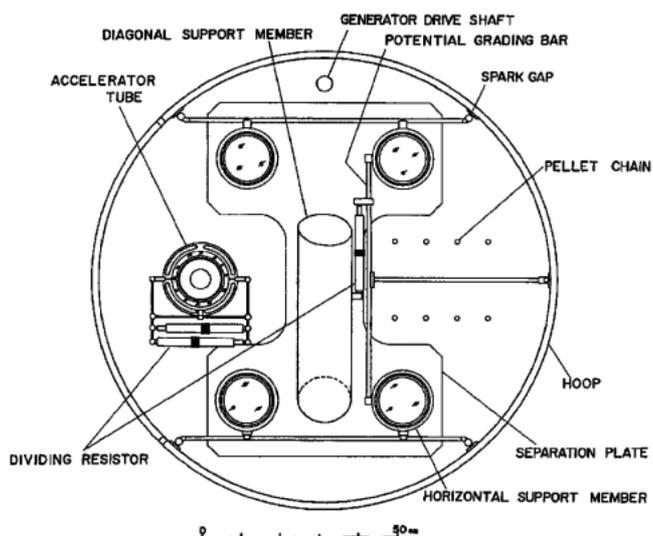


図13 九大タンデム加速器の絶縁コラムの断面図。  
コラム電極と加速管に沿う電位分布を均一にするためそれぞれに対して別個の分割抵抗体が設けられた。加速管は1mおきの支持点でのみコラムと繋がっている。これによりタンクスパーク発生時に加速管に直接サージが入る危険性は消去された。

々の水平メンバーの軸圧力は，センターターミナルに直結されている上部のメンバーで最大になる（9000 kg）。対応するガラス円壺の最大ストレスは，90 kg/cm<sup>2</sup>で破壊強度（430 kg/cm<sup>2</sup>）に比べて充分小さい。

地震発生時にコラムの軸方向のゆれに対しては安全性は充分高いと考えられる。コラムの両端には+または-の軸圧力が加えられる。これはコラムの自重に対

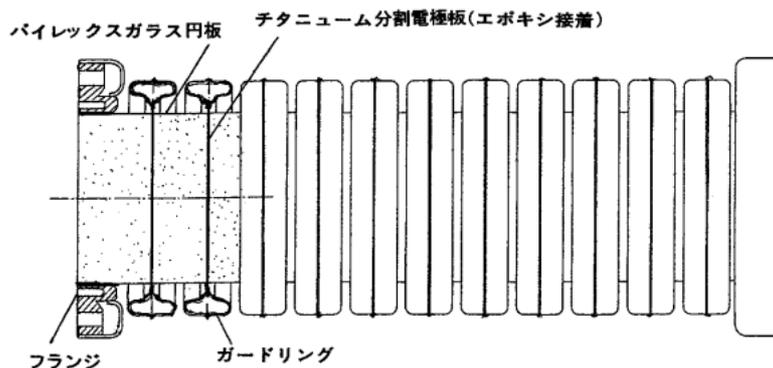


図14 タンデム加速器の絶縁コラムの支柱（水平メンバー用）

応する慣性力として表わされる。この圧力変化はガラス円壜内の縦波の弾性波としてコラムメンバーに沿って伝えられ、瞬時にコラム全体のストレスの平衡が達成される。予想される最大の地震加速度  $1g$  に対するコラムの軸圧力の変化は約  $\pm 7.3$  トンで、スプリングによる軸圧力  $20$  トンの約  $1/3$  となる。計算はこの程度的大幅の圧力変化に対しても、下部の水平メンバーおよび斜メンバーの軸圧力は一定に保たれ、上部の水平メンバーの軸圧力だけが変化する（このような状況が実現するのは斜メンバーの存在による）。各々のメンバーの曲げモーメントも当初の最小レベルを維持する。この際に問題になる唯一のことはコラム附根の上部水平メンバーの軸圧力が負にならないようにすることだけであるが、エポキシ接着力は充分強く、メンバー  $1$  本当り  $20$  トンの張力に堪える。

問題は横ゆれである。  $1g$  の加速度による慣性力が横方向に働いた場合のたわみの計算によれば、コラムの附根の上・下水平メンバーに発生する曲げモーメントの大きさは  $M = 24,000 \text{ kg} \cdot \text{cm}$  に達する。これによるガラス円壜の最大ストレスは  $\sigma_{\max} = M\pi/I = 160 \text{ [kg/cm}^2]$ （但し  $I = 857 \text{ cm}^4$  : ガラス円壜の断面  $2$  次モーメント,  $r = 5.75 \text{ cm}$  : 円壜の半径）となり、Borosilicate glass の破壊応力の約  $1/3$  である。これは安全性のほぼ限界である。横ゆれに関するもう一つの重大な問題は、コラムの横ゆれの固有振動数が約  $2$  [サイクル/秒] であって、地震の振動数の下限にかなり近い。これに関しては神の庇護を祈るしかない。

絶縁支柱メンバーは絶縁物ディスクとチタニウム円板のエポキシ接着によって作られている（図14）。絶縁物の材質として最初硬質ポーセレンが用いられたが、タンク内に組込んで発電を行っていたところ、約半年後に多数のポーセレンディスクの外側に割目が見い出された。調べてみるとポーセレンの素地を放電路が貫通していて、そこからの発熱によって割れ目が生じ

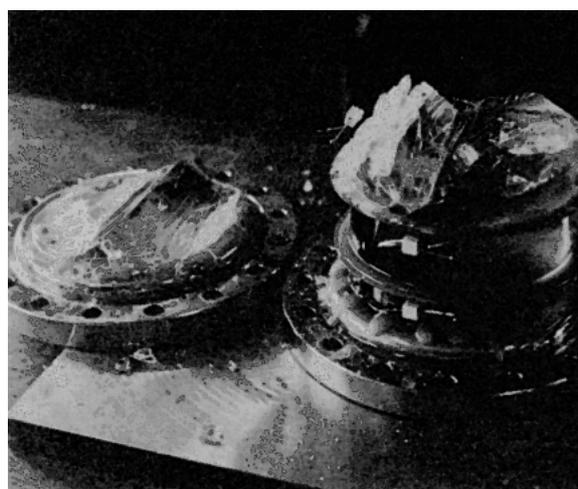


図15 絶縁支柱に使用されるパイレックスガラスのディスクと電極板 (Ti) のエポキシ接着による積層物の破壊テスト

テストサンプルの中心軸から数 cm 外れた着点に圧力を加えて、端面に軸圧力と同時に曲げモーメントを与えることによって破壊を起こさせたものである。圧力  $7.5$  トン、モーメントの大きさ  $45,000 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ （このときガラス円壜表面の張力の大きさがエポキシ接着層のひっぱり強度 ( $\sigma \sim 200 \text{ kg/cm}^2$ ) に達する) において破壊が発生した。この際圧縮側の応力は  $\sim 350 \text{ kg/cm}^2$  で規格の破壊応力値 ( $430 \text{ kg/cm}^2$ ) に比べて少し低かったが、写真のような全面的な破壊が起こった。このテストはエポキシ接着の強さがガラス素地に比べて充分大きいことを示している。絶縁支柱の接着作業は、気泡の発生を無くすことと接着強度の安定化のため、すべて真空中で実施された。

たことが判った。このような固体の絶縁破壊は材質中に存在する気泡の中で最初の放電が起こり<sup>\*12</sup>、そこから針のように放電路がじわじわ伸びていった結果と

\*12 絶縁物中に気泡が存在すると、その中の電場の強さは媒質中の電場の強さの  $\epsilon$  (誘電率) 倍になる ( $\epsilon$ (ポーセレン)  $\sim 5$ ,  $\epsilon$ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ セラミックス)  $\sim 10$ )

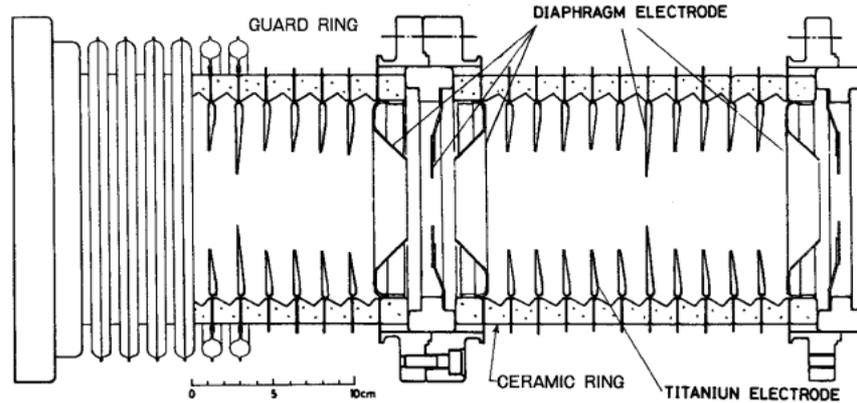


図16 タンデム加速器のセラミック加速管のユニット

考えられる (Tree 放電). 硬質ポーセレンの固有の絶縁耐力は充分高かったかもしれないが, 気泡が完全に存在しないと云う保証はない (全部で1100ヶのポーセレンディスクが使用されている). 検討の結果 **Borosilicate** ガラス (パイレックス) のディスクを用いてすべての支柱を作り替えることにした. パイレックスガラスは透明であるので, その材質中または接着層中の気泡の有無を確実に点検できた. また重量が小さい点でも優れていた. セラミックスの使用も考えられたが, テストの結果その絶縁耐力はポーセレンと同じ程度であった. 一方パイレックスガラスは厚さ37 mmのものが100万ボルトにおいても破壊されなかった.

加速管には Wisconsin 大学で開発されたのと同じ作りのベーキング処理可能なセラミック管 (図16) が製作された (但しセラミックスリングとチタン電極板の接合には旧来の工法 (ブレイジング法) が用いられた. - 京都セラミックス). この場合接合部コーナーの銀ローの流れをサンドプラストによって除去することが非常に重要である. この種の加速管に共通する弱点として次の問題がある. 若し上記コーナーに何らかの空隙が存在したとすると, そこから電子が引出されて絶縁物表面に沿ってフラッシュ放電が発生する. これによって表面がクリーンアップされるのであるが, 電場が強い場合には大量のガス出しが起り, 沿面ストリーマー放電が陰極と陽極間に走る. これによって電極がスパッターされ, 絶縁物表面を黒化させて加速管の絶縁破壊を決定的にする.

上記加速管ではこの沿面放電を抑えるために, 分割電極に厚目の SUS 円板を用いてコーナーを遮蔽している. また絶縁リングの内壁面を凹形にへこませることによってコーナー部の電場を弱めている. 図17, 図18はこの加速管を製作するに当たって実施されたテ

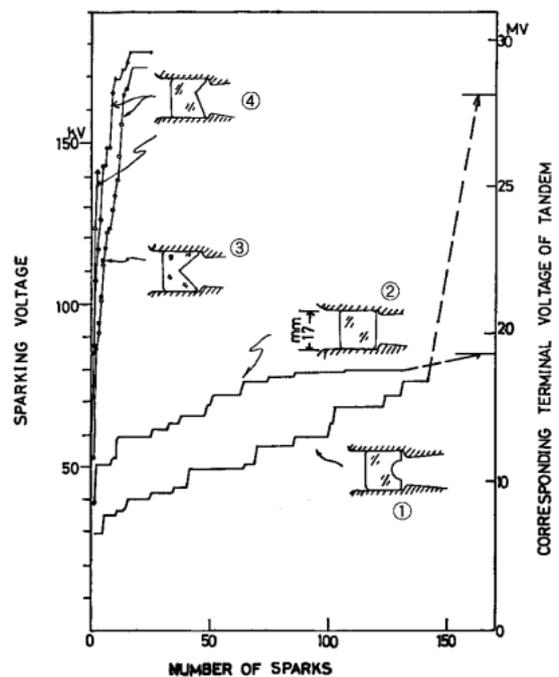


図17 加速管絶縁リング ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  セラミックス) の沿面放電に対するコンディショニング特性  
絶縁リングの内壁を凹ませた形状 (③, ④) の場合に沿面放電が非常に起こり難くなっていることが分る.

スト実験の結果である. 加速管ユニット単体では500 kVの近くまでは全く安全であるが, この電圧付近で沿面放電が始まる. しかしコンディショニングによって容易にこの電圧を乗り越えることが分る.

図19には加速管ユニット内の電極配置と電極表面からスパッターされたイオンの軌道が示されている. 当初この加速管ユニットのフランジ部分には, 前出の Van de Graaff 加速器の加速管に用いられたのと同様のリングマグネットがとりつけられていたのであるが, その加速管を用いて行われた発電テストにおいて

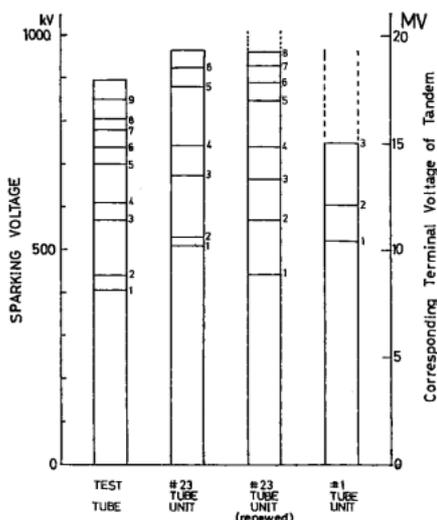


図18 タンデム加速器の加速管ユニットの耐電圧テスト

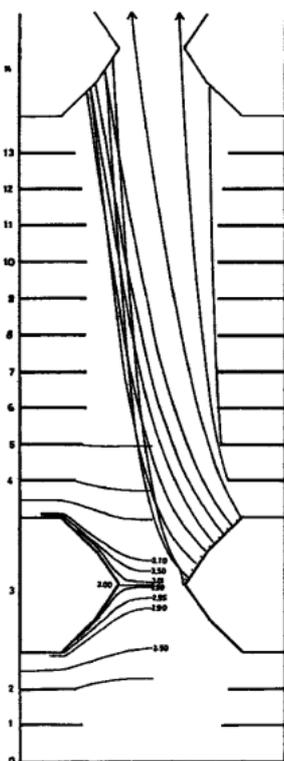


図19 加速管の電極間におけるスパッターイオンの軌道計算

ダイアフラム電極から0エネルギーで出発したイオンはすべて反対側のダイアフラムで止められている。このことからスパッターイオン交換による放電が一つのユニット内に閉じ込められることが分る。

5 MV 以上で放電の発生に対する抑止が効かないことが分った。このマグネットは後述のような高度の熱処理を実施する段階で撤去され、図に示されている形の

ダイアフラム電極がとりつけられた。その深く窪んだ形は一方のダイアフラム電極の表面からスパッターされたイオンが反対側の端のダイアフラムによって止められるように考えた結果である。

タンデム本体では両コラムにそれぞれ 20 個の加速管ユニットが用いられる。10 MV において個々のユニットに掛かる電圧は 500 kV であるから、上記の耐電圧性能は充分であると思われたが、実際には 5 MV を越える頃から加速管のブレークダウン放電が始まり、放電のたびに大量のガスが放出された。そこで加速管を幾つかのセクションに分け、セクションごとにコンディショニング処理を行って十分な電圧がかけられることを確認した後全体の発電テストを行ったが、6~7 MV 以上に上がらなかった。その後この加速器はこの状態で半年間イオンビームを出して使用されたが、電圧の向上は見られなかった。電圧が上がらない原因は、加速管の口径が小さ目に作られていたためにガスの流れに対するコンダクタンスが充分でなく、電圧をかけたときに生ずるアウトガスを完全に排除するのが難しかったことにあると考えられる。

この困難の壁は一つの革紀的なクリーニング法の考案によって打開された。それは加速管内に大量の水素ガスを流しておいて、その全長に亘って低電圧アーク放電を発生させて加熱し脱ガスを行うことであった。この際全管を同時に処理することが重要である。部分的に行ったのでは放出されたガスは放電の起こっていない部分に移動するだけである。低電圧放電を発生するために管内に大容量（エミッション~20 A）の熱電子源をとりつける必要がある。放電により各電極の内縁部は赤熱状態に加熱される。脱ガスの進行状況はタンクの外から加速管の内部を見通して、プラズマの色によって判断される。初め青白かったのが処理が進むにつれてさわやかな紅色に変わる。この処理の利点は加速管をコラムに据付けたままの状態で行える点にある。さらにタンクに SF<sub>6</sub> ガスを詰めたままでも実施できる（そのためには勿論ターミナル電極部にアーク放電の陽極電圧を供給するための接続装置を用意する必要がある）。処理が終わった後管内の水素ガスを排気し、2 時間以内に 10<sup>-8</sup> Torr 代の真空中に戻って発電テストを実施することが出来た。

この水素放電処理の効果はてき面であった。処理によって発生電圧が向上することを確認しながら処理を数回繰り返した結果、それまで 6~7 MV に抑えられていた電圧が一気に 10 MV を越えた。その後短時間のうちに 11 MV まで電圧を上げることが出来た。その効果は次の事実にも現れた。処理実施前には一た

び放電によって真空が破れると元の値に復歸するのに丸一日を要していたのが、処理後には30分以内で済むようになった。またディコンディショニングの速度が非常に遅く、加速器の運転を2~3日間停止していた後でも（但し加速管の排気ポンプは常時運転）コンディショニング無しに10 MVの電圧が再現できた。

その後の発電テストでこの加速器の安全に使用できる電圧の上限は約10 MVであることが判った。電圧を10 MV以上に上げていくと不規則なX線の発生が起こる。通常その強度は時間と共にゆっくりと減少するのであるが、ある瞬間に突然強度を増してスパーク放電に移る。この不安定な状況は管内のゴミに起因すると考えられた。実際に加速管はいろいろのゴミの発生原因をかかえている。例えば電極板を加速管にとりつけるに当たって細かい金属の屑が発生する。また絶縁リング面のフラッシュ放電によって $Al_2O_3$ の微細なかけらが電極面に散布される。後者は上述の連続または不規則なX線発生の主源であるかもしれない。

電極面についてのゴミが少しでも導電性を帯びていると電場によってその表面に電荷が誘起され、電気力によって電極から引き離される。若しこれが加速管全長

を通して加速されたとすると、そのときに獲得される運動エネルギーはゴミの塊りを気化させるに充分な大きさをもつ（Clump 仮説）。これによって相手方の電極表面に高密度の蒸気雲が発生し、これがアーク放電になって全系のブレークダウンが引き起こされる。電極表面に密接する高密度の放電プラズマによって電極は侵食され溶かされる。このような局所へのエネルギー集中はこれ以外には考えられない。

上述の水素のアーク放電は管内からゴミを除去する作用をもっている。放電によって作られる原子水素は微細なゴミ粒子の表面の触媒作用によって再結合する。その際発生する熱によってゴミは白熱化して消滅する。セラミックリングの沿面フラッシュによって作られた $Al_2O_3$ の細片がこの方法で消去されることは前述の実験において観察された。九大タンデム加速器の電圧の上限はこの種のゴミによってもたらされている可能性が強い。上述の方法でゴミ消去を行えば、確実に電圧を増加させることが可能であるが、電圧の増加と共にゴミの発生率が急速に高まるために多くは期待できない。

九大のタンデム加速器は1981年に完成して以来こ

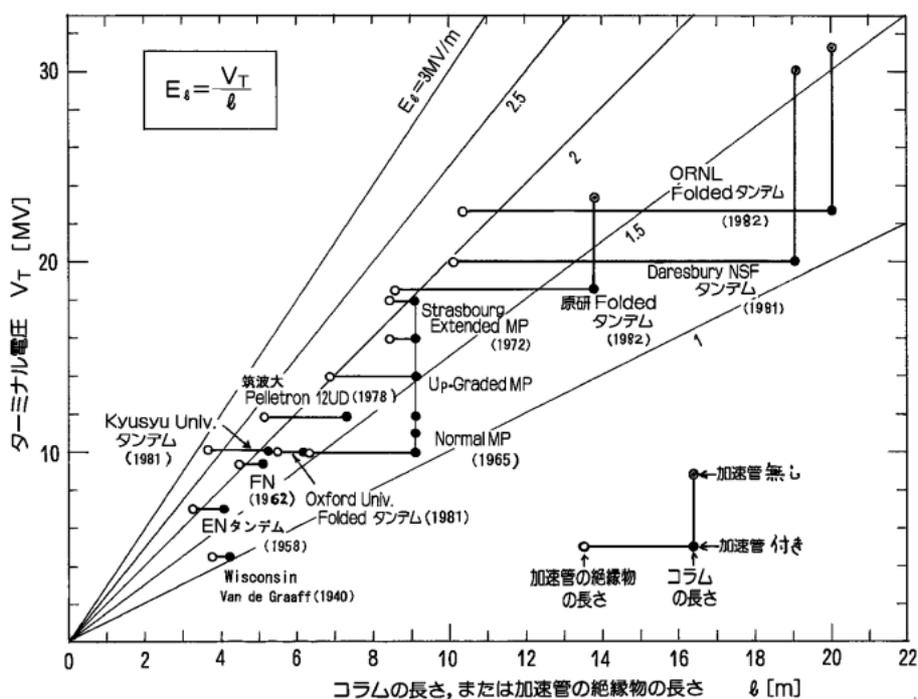


図20 本文でとり上げた世界の大型静電加速器の電圧性能。1980年頃までに得られた最高発生電圧と絶縁コラム（即ち加速管）の全長 $l$ 、および加速管の絶縁部分の長さの総和との関係。一般に加速管をとりつけない場合には、それをとりつけた場合に比べてかなり高い電圧が得られている。このことは電圧制限の原因が加速管にあることを示している。加速管の絶縁部の単位長さ当りの発生電圧（即ち加速管に沿う電位傾度）は、加速管の長さによらず略2 MV/mである。このことは加速管内の放電を局在化させるためのいろいろの工夫が功を奏したことを示すものである。1940年完成のWisconsin大学のV.d.G.に比べて1970年以降の装置では加速管に沿う電位傾度が2倍に増加している。九大タンデムにおける電位傾度は最も大きく2.5 MV/mに達している。

の25年間大きな故障なしに運転されて来た。入射負イオンビームとして重イオンと偏極イオンの二系統が用意されている。後者に対してこの研究室でLambシフト型偏極イオン源を製作した。このイオン源はタンデムによる加速後のターゲット上でのビーム強度として偏極度80%において記録的な値 $1\mu\text{A}$ を与えた。

## 2.5 九大における静電加速器研究のまとめ

九大理原子核研究室では1965～1978の10年余の期間に2つの静電加速計画、即ち既設のSingle-stage Van de Graaffの改造とタンデム加速器の建設を実施した。その頃静電加速器の技術に関して一応の標準が出来上がっていたが、九大の実験室では従来の形式に囚われることなく、その時点での最良の可能性を追求した。更新された加速器技術の要点は下記のとおりである：

- 1) 絶縁ガスとして100%のフロンR12、後には $\text{SF}_6$ の使用。
- 2) ベルトに代わる電荷搬送体としてペレットチェーンの使用。
- 3) タンク内のすべての絶縁物、および分割低抗体に対する環状スパークギャップの使用とコラム内部品の最適配置。これによって、ブレイクダウン時のサージによる絶縁破壊に対して強い加速器を実現した。

- 4) 放電抑制効果の高い加速管の使用。Single-stage Van de Graaffでは磁気抑制方式の加速管を試作した。この加速管は6MVの最高使用電圧までX線の発生なしに運転された。タンデム加速器ではベーキング処理可能なセラミック管を試作した。その長さは前者と同じく5mであったが、十分に処理された加速管は2倍近い電圧( $\geq 10\text{MV}$ )の発生を許した。
- 5) チタンゲッターポンプ、またはスパッターイオンポンプの使用によるクリーンな真空系の実現。タンデム加速器では有機物を完全排除。
- 6) 加速管の徹底したベーキング処理のための水素ガス低電圧アーク放電法の考案。この処理と発電テストを繰り返すことにより、短時間に安全に発生電圧の上限に到達する手順が確立された。この方法の有用性は必要に応じて何時でも即座に実施できる点にある。

図20は九大タンデム加速器が高電場の加速器として大きな成功を納めたことを示しているが、これは主に加速管の脱ガス処理の効果によるものである。

以上の諸点の多くは今日では静電加速器の標準技術となっているが、当時としては世界で殆んど最初の試みであった。