

特集 (日本の加速器の歴史)

電子線形加速器の発展 I

佐藤 勇*

Looking-Back on the Development of Accelerators in Japan
Progress at the Dawn of Electron Linear Accelerators in Japan

Isamu SATO*

1. はじめに

日本に於ける電子線形加速器 (Electron linear accelerator: 電子リニアック) の黎明期は、今から約半世紀前の 1950 年代の半ばであった。

日本における電子リニアックの開発研究は、大学、研究所、企業などでバラバラに始められたが、この時点で既に欧米に約 20 年の遅れを取り、欧米の研究、工業、医療用電子リニアックは実用化の域に達していた。又、欧米における加速器技術が、日本の電子リニアックの進展に大きい役割を果たしたことも、間違いない事実である。

日本では、この 20 年の遅れをどのようにして取り戻そうとしていたかを、欧米における電子リニアック発展の歴史を辿りながら、1950 年代半ばからの約 20 年間に焦点を絞り、日本の電子リニアック技術の進展を眺めることにする。

電子リニアックの 20 年の遅れは、日本の原子核、高エネルギー物理実験にも共通する問題であった。この原因は、第 2 次世界大戦の影響と混乱、並びに、戦後の加速器施設や核エネルギー施設の廃棄、これらに関連する研究の一時的停止にあるが、しかし、科学予算の縦割り行政、或いは、研究体制に対する研究者の不信と考え方の大きな相違、2 度の原爆投下の洗礼を受けた日本国民の核エネルギーに対する極度のアレルギーなどもその要因である。

2. 欧米における電子リニアック発展の経過

線形加速器 (リニアック) をどう定義するかによるが、日本では、リニアックを、線型加速器、線形加速器、直線加速器とさまざまな名称を使っており、又、

リニアックを直線加速器と統一して呼んでいる学会もある。

リニアックの起源を何時にするかは、欧米の研究者間でも議論がある。

ブルックヘブン国立研究所の J. P. Blewett は、1924 年に提案したスウェーデンの G. Ising がドリフト管を用いた「高電圧のカナル線 (イオン) 発生方法の原理」を世界最初の線形加速器の発想であると言っている。一方、Ising は、このアイデアの提案が早すぎたことを悔やんでいた。

この発想は R. Wideröe¹⁾によって、1 個のドリフト管を少しずつ長くなる数個のドリフト管を直線状に置き換えた加速システムに改良された。1928 年には、このドリフト管に高周波を供給してイオン加速を試みていた。これがリニアックにおける世界初の加速である。

1931 年頃に、GE 社の K. H. Kingdon は、バージニア大学の L. B. Snoddy に G. Ising の概念に近い加速器設計を持ちかけた。Snoddy は J. W. Beams と 2 年後に、高周波進行波を使って電子ビームを連続的に加速する方法を共同で考案した。更に 1933 年には 15 個のドリフト管を用いて、28 keV のエネルギーで入射した電子ビームを約 90 keV に加速することに成功²⁾している。これが電子リニアックの原型とみることができる。

この研究は、Beams と H. Trotter に引き継がれ、1934 年には電子ビームを 1.3 MeV³⁾、1935 年には 2.5 MeV⁴⁾に加速した。電子リニアックの加速効率を高めるには、より短波長で大出力の高周波源を必要とすることに気づいた。

一方、1935 年頃、米国のスタンフォード大学では、

* 日本大学大学院総合科学研究科
Advanced Research Institute for the Sciences and Humanities in Nihon University
(E-mail: isato@lebra.nihon-u.ac.jp)

W. W. Hansen が高エネルギー X 線を得る方法の開発研究に取り組んでいた。彼は少ない高周波電力で高電界が得られる空洞共振器を製作し、電子を数 MeV のエネルギーに加速することに挑戦していた。

この頃、電子の速度変調によるマイクロ波電力増幅のメカニズムが熱心に研究されていた。独の A. A. Heil と O. Heil は 1937 年にクライストロン（速度変調管）を発明したと発表した。

Hansen は、1938 年、電子加速の研究を一時中断して、スタンフォード大学の R. H. Varian, S. F. Varian 兄弟とクライストロンの改良に没頭した。GE 社の W. C. Hahn, G. F. Metcalf と Varian 兄弟は、1939 年に速度変調管の入力と出力に高周波空洞を採用したクライストロン⁵⁾を考案した。この方式によって、クライストロンの電子ビームと高周波の相互作用は大幅に改善された。

この研究には、J. R. Woodyard と E. L. Ginzton が学生として参加し、クライストロンで学位を得ている。

マグネトロンは 1921 年、米国の A. H. Hall によって発明されたが、不安定で且つ効率も悪く、なかなか普及しなかった。英国の K. Posthumus は、1935 年、結合共振空洞に遅延回路を採用することにより、効率を劇的に向上させた。更に第二次世界大戦中に出現した矩形導波管はレーダー技術を飛躍的発展させ、マグネトロンの用途は急激に拡大した。又、矩形導波管はマイクロ波の分配、合成を容易し、リニアック技術の発展を促した。更に 1940 年代の後半、大電力マグネトロンが実現したことから、電子リニアックの実用化は急速に進展した。

米国では、大戦末期に幾つかの研究所が再びリニアックの開発研究を開始していた。

加速器のエネルギー利得を高めるには、電子の進行方向と高周波電場が同方向（縦波高周波）に同速度で進み、電子は高周波で常に加速される必要があった。即ち、電子の波乗り運動である。円形導波管中を通過する横波高周波の波長を導波管の直径に近づけていくと、高周波は次第に縦波成分が多くなる。しかし、円形導波管中で高周波を縦波で進行させると、高周波の波面速度（位相速度）が光速より大きくなり、この位相速度を光速より小さくする必要があった。

Hansen らは、縦波高周波の位相速度を遅くするために、図 1 に示すように、円筒（シリンダー）に穴が開いた円板（デスク）を挿入した構造の進行波型加速管（デスク負荷型進行波加速管、或いは、デスク装荷型進行波管とも呼ぶ）を考案した。

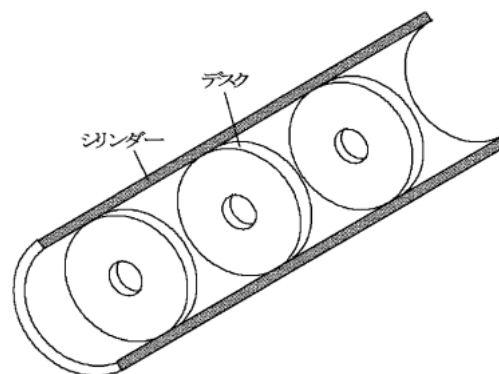


図 1 デスク負荷型進行波加速管の概念図

Hansen が最初に製作した加速管は、長さが 3 feet であった。研磨した金属円筒の中に円板を挿入して半田付けした後、ドリルで円板に孔をあけたお粗末なものであった。又、接触抵抗や表面抵抗が大きいため、デスクとシリンダーで構成される高周波空洞の利益係数 (Q) は 1000~3000 と低く、即ち加速管の高周波電力損失が大きくて実用的ではなかった。

次にスタンフォードグループは、14 feet 加速管 (Mark II) を設計した。デスク負荷構造には、チューブの中に冷やしたデスクを嵌め込む方法（冷嵌め）を試みた。又、接触を良くして高周波損失を小さくするために、鍛造した真鍮パイプの内部と真鍮デスクの表面に、厚さ 25 μm の銀メッキと金メッキをして、暖めた真鍮パイプに液体窒素で冷やしたデスクを挿入して長さ 2 feet の小加速管を組み立てた。更に、2 feet 加速管 7 本のそれぞれの突き合わせ部分を O リングでシールして、14 feet 加速管に仕立て、ボルトで締め付けていた。又、最後の 2 feet 加速管は無反射終端になるように、加速管内部表面に高周波損失の大きいニッケルをメッキしていた⁶⁾。

1946 年、0.9 MW マグネトロンを用いて電子ビームを 4.5 MeV のエネルギーに加速することに成功した。その後、マグネトロンは改良されて性能が向上し、1947 年にはその出力電力は数 MW に達していた。多数の大電力マグネトロンと多数の加速管を併用すると、電子ビームを数十 MeV に加速できると大きな期待が寄せられたが、しかし、この期待は見事に裏切られた。その理由として、マグネトロンは自励発振管であり、個々の発振管の高周波位相を同期させることが技術的に困難であることがあげられ、この方式による進行波型電子リニアックの高エネルギー化は非常に難しいことが明らかになった。

そこで、高周波増幅管（クライストロン）は位相制

御が容易であることから、クライストロンの大電力化と多数のクライストロンと多数の加速管による電子ビームの高エネルギー化に期待が寄せられた。

1948年にスタンフォード大学の E. L. Ginzton らは、高出力クライストロン^{7,8)}の開発に成功した。この成功を受けて1949年に、Hansen らは GeV 級電子リニアックの建設計画を提案した。

一方、Hansen と Chu は加速空洞の構造寸法を求める理論的方法⁹⁾を発表し、この建設計画を積極的に推進した。GeV 級電子リニアック計画は Mark III 計画と称され、1949年に着工し、1953年12月には10ft 加速管21本とクライストロン14本を用いて400 MeV 電子加速に成功した。この加速管には、素材に加工が容易で電気伝導度が純銅とほぼ等しい合金(銅:99.4%, セレニウム;0.6%)が用いられ、デスクの外周は金メッキされていた。シリンダー管には無酸素銅を用いて、加速管の高周波空洞は7000~10000のQ値を得ていた。スタンフォード大学の K. B. Mallory¹⁰⁾は、完成した加速管の出力側から金属棒を挿入し、加速管の入力側からインピーダンスを媒介してマイクロ波特性を測定する方法(Plunger法)を考案し、加速管の良否を検証した。

Mark III 計画の内容は、1955年に M. Chodorow らによって詳細に Review¹¹⁾された。Mark III では、更に、10ft 加速管9本を付け加え、1964年4月に、加速エネルギーは1.2 GeV に達した。

スタンフォードの J. A. Pope は、電鍍法による加速管製造¹²⁾を開発した。最初に製作した加速管はスタンフォード大学医学部の電子リニアックに用いられた。

一方、バリアン社では、当初、スタンフォード大学から供給されたデスク負荷進行波管を電鍍して製作した加速管を用いて電子リニアックを製造していた。しかし、1959年以降は、**図2**に示すような無酸素銅のデスクとシリンダーを水素炉で銀ロー溶接する技術を採用し、加速管を製作するようになった。

英国では、D. W. Fray, W. Walkinshaw, L. B. Mullett, R. B. R-Shersby-Harvie らが Telecommunications Research Establishment (T.R.E) で、スタンフォード大学が進めていた進行波加速管の開発と併行して同様な加速管構造の設計に取り組んでいた。彼らの研究結果はスタンフォードの結論とほぼ同じであったが、幾つかはスタンフォードより進んでいた。

このグループは Atomic Energy Research Establishment (A.E.R.E) に移動し、数台の電子リニアックを建設した。1948年頃には加速管にマイクロ波電力を

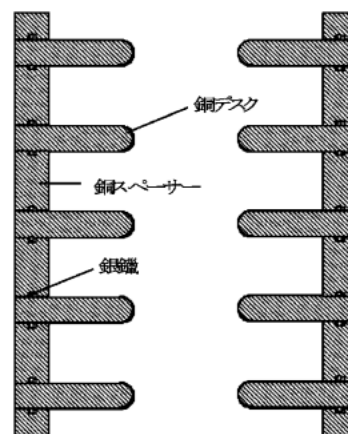


図2 銀付け溶接による加速管の形成

同軸状に入出力する方法(ドアノブ型)を考案していた。又、2m 加速管¹³⁾と2 MW のマグネトロンを用いて3.5 MeV 電子リニアック¹⁴⁾を設計し、更に、加速管を通過したマイクロ波電力を再び加速管に入力する方式(フィードバック型)を考案し、加速効率の向上¹⁵⁾を試みていた。一方、メトロポリタン ビッカー社¹⁶⁾では、高周波空洞の部品を ± 0.0003 inch ($\pm 1 \mu\text{m}$) の寸法精度で加工し、この銅部品を不活性ガス雰囲気の中でロー溶接する技術を確立していた。

一方、M.I.T では、J. C. Slater はビーム運動や高周波空洞内のマイクロ波の振る舞いを徹底的に分析し、ビーム輸送や高周波空洞理論を完成¹⁷⁾させた。更に、Slater 指導の下に、A. Kip, W. Bostick, P. Demosus などが190 kW マグネトロン21個と π モードの20 feet 定在波加速管を用いて、18 MeV 電子リニアック¹⁸⁾を建設し完成させた。

定在波加速管は、6 デスクと6 シリンダーを水素炉で銀ロー溶接した高周波空洞を製作し、これを一単位としてマッチングをとり、高周波空洞をOリングシールで連結して製作していた。又、高周波空洞の利益係数Qは非常に高く、17000~18000を記録していた。この電子リニアックでは、複数のマグネトロンを同位相で稼働させる技術を確立していた。これは小マグネトロンによる大電力マイクロ波源化に成功した例である。

英国で工業用に製作された電子リニアックでは、1957年頃に加速ビーム電流がある値を超えると急に不安定になる現象(Beam Breakup: BBU)が観測されていた。

この報告を受けて、方々の電子リニアックでは電子ビームが注意深く観察された。すると多くの電子リニ

アックでBBUが観測された。J. W. BoagとC. W. Miller¹⁹⁾は、この結果を1959年にCERNで開催された第2回国際会議で報告した。当時は、この原因を理解できずに、「不安定な空間電荷の乱れ」のせいにしていた。

しかし、この現象は、加速管1本の電子リニアアックで発生したことから、再生型ビーム発散 (regenerative beam blowup) と呼ばれた。又、この現象は、加速管の長さやビームパルス持続時間が長いほど、低いビーム電流で不安定性が発生していた。

その後、BBUには、ビームが暴れる現象とビームパルスが短くなる現象があることが明らかになった。前者は、短い電子リニアアックで発生し、ビーム電流が数百 mA を越えると不安定になる現象であった。これは電子ビームが加速管の高次パスバンドの後進波高周波を誘起することにより、後進波の横波成分が次第に増幅され、この高周波が電子ビームに作用して変更することが原因であった。

1963年、P. B. Wilson²⁰⁾は、この後進波発振ビーム発散 (Backward-wave oscillation breakup) を理論的に解析した。

後者は、長い電子リニアアックで発生し、ビーム電流が数 mA から数十 mA の範囲であるしきい値を越えると、急にビームがパルスの後方部分から欠落する現象であった。

発散現象は1962年にドイツの電子シンクロトロン (DESY) の0.5 GeV入射器²¹⁾、1963年にソ連の2 GeV電子リニアアック (Kharkov)²²⁾などで観測されていた。このビーム発散は、電子ビームが多数の加速管で加速される過程で、偏向力を受け、それが次第に増幅されて行くことから、蓄積型のビーム発散 (cumulative beam blowup) と呼ばれている。

一方、スタンフォードでは、Mark IIIで数百 MeV の電子ビーム加速に成功すると、Hofstadterは、Mark IIIより20倍長い電子リニアアック計画を提示した。

この計画は、新プロジェクトM (Monster 或いは Multi-BeV) と名付けられ、1955年に非公式に検討をはじめていた。プロジェクトMの公式会合は、1956年4月10日、W. K. H. Panofskyの自宅で開かれた。この会合にはHofstadter, Ginzton, R. B. Nealとスタンフォード大学の物理学者らが集まり、最初15 GeV電子リニアアックを建設し、最終的には45 GeVに増強することを合意していた。1957年に、Panoskyらは、「2哩電子リニアアックの提案」を政府機関に提出した。

計画の基本的な設計はGinztonの指導の下に進められていた。加速器計画は10 ft進行波型加速管960本を一直線に並べ、20 MWクライストロン240本からマイクロ波電力を供給し、電子ビームを20 GeVに加速する壮大な提案 (2哩電子リニアアック計画) であった。準備作業では、デスク負荷型進行波加速管に加速効率を少しでも高めるため色々な工夫が凝らされた。例えば、同じ寸法の穴の開いたデスクとシリンダーを溶接した (定インピーダンス型) からデスク穴の寸法を少しずつ小さくした (定電界型) や1波長当たりのデスク数を少なくした $2/3\pi$ モードデスク負荷加速管などが開発された。

この建設計画は、1962年、原子エネルギー局 (AEC) によって承認され、スタンフォード線形加速器センター (Stanford Linear Accelerator Center: SLAC) が設立され、2哩電子リニアアックはスタンフォード大学の近傍に建設が開始された。建設開始当時は170名のスタッフが在職し詳細設計を行っていたが、SLACが加速管やパルス電源などの加速器要素を直接製造するようになると、スタッフ数は約1000名に達した。最終的にSLACは自前でクライストロンの開発や製造まで行っていた。

1966年5月に電子リニアアックが完成し、すぐに電子ビーム加速を開始した。加速器全長の半分の地点までは容易にビームを輸送できたが、しかし、電子ビームがその先の18 GeVの地点まで届くのに約2週間、加速器の終端まで届くには更に9ヶ月を要した。

当時、定電界加速管では、個々の加速空洞の構造寸法が異なるために、定インピーダンス型加速管に発生する再生型ビーム発散 (regenerative beam blowup) とは無関係とあると考えられていた。

これは、新しい型のBeam Breakup現象によることが明らかになり、SLACはパニックに陥った。Panoskyらはその対応策に苦慮した。このビーム発散は、電子ビームが多数の加速管を通過する過程で加速管の極一部と相互作用して偏向を受けて次第に偏向が増幅され、やがて加速管に衝突して電子ビーム電流がパルスの後方から減少することから、このビーム発散を多段型ビーム発散 (multi-section-type)²³⁾ と呼ばれた。この計画の詳細や問題点は「The Stanford Two Mile Accelerator」(Benjamin, New York) に詳細に記述されている。

一方、フランスでは、1949年から1953年までの4年間、パリのP. Grivetの研究室で電子リニアアックと陽子リニアアックの研究が行われていた。数台の電子リニアアックが建設され、3 GHzマグネトロンを使って

運転していた。進行波型加速管は J. Vastel²⁴⁾によって、定在波型加速管は A. Sarazin²⁵⁾によって研究されていた。5 MeV 進行波電子リニアックは、X-ray therapy 用として病院に納入されていた。

オルセーでは 2.3 GeV 電子リニアックの建設は 2 段階で行われた。6 m の組立式進行波型加速管を 22 本用い、1959 年に 1.2 GeV 電子ビーム加速²⁶⁾に成功した。その後、6 m 加速管を更に 15 本増設し、1967 年、2.3 GeV 電子ビーム加速²⁷⁾に成功した。

3. 日本における黎明期の電子リニアック

日本における電子リニアックの基礎研究は、既に述べたように、欧米より約 20 年遅れ、1950 年代半ばから企業、大学、国公立の研究機関などが各所管省庁の助成金を頼りに、ばらばらに開発研究を進めていた。

1955 年に文部省は、全国の大学共同利用研究施設を建設するために、東大演習林（田無）の一角に、東京大学原子核研究所（初代所長：菊池正士）を設立した。東京大学原子核研究所（核研）には、日本が戦後初めて建設するサイクロトロンと 1 GeV 電子シンクロトロン（INS-ES）が計画されていた。

電子シンクロトロンの入射器は 6 MeV 電子リニアックであった。電子リニアックを建設する上で、最大の問題点は、加速管と大電力高周波源をどのようにして調達するであった。即ち、これらを自前で開発するか或いは外国から製品として輸入するかを選択であった。又、加速管は、欧米でもその製作に苦労したように、所定の加速周波数で動作するものを「どのような方法でどのように製作するか？」であった。更に、製作された加速管の特性を「どのような方法で測定するか？」であった。

特に、電子シンクロトロンの入射器である電子リニアックには、所定の電子ビーム電流を 6 MeV のエネルギーに確実に加速し、且つ、安定に供給することが絶対条件であった。これは単に電子リニアックを開発することとは異なる厳しい制限であった。この制限条件を補償するには、電子銃から放出された電子ビームが加速管を通過中に集束され効率良く加速される状態を追究（ビームトレース）する必要があった。電子計算機がまだ普及していない当時、この数値計算は非常に根気のいる作業であった。クライストロンのビームトレースについても同様であった。

熊谷、西川、田中、宮原は、6 MeV 電子リニアックを日本独自の方法で設計し製作することに拘りをもって挑戦していた。熊谷らは組立式 3 MW クライストロンの製造を、又、西川らは電鍍法による加速管製

作を試みていた。

西川は、デスクやスペーサーの大まかな寸法を手計算で見当つけることを試みていた。まず、穴付きデスクとスペーサーで構成される高周波空洞の共振周波数と加速モード、並びに加速管の減衰パラメーターを設定し、次に供給電力に対する加速電界を決めて、デスク穴径²⁸⁾を計算した。更に、高周波空洞の電気的特性をサセプタンスとアドミッタンスに置き換えて 4 端子ネットワークを構成し、これを解析的に解いてスペーサー内径²⁹⁾を計算で求めた。

一方、田中らは、高周波空洞の寸法を実験的に確かめるために、加速モードを $\pi/2$ に設定し、高周波空洞を組み立て、デスクの穴径寸法とスペーサー内径寸法をパラメーターにその共振周波数を測定し、加速周波数におけるデスク穴径とスペーサー内径寸法を推定で求めていた。

しかし、もう一つの大きな問題点は、加工精度の確保であった。歯車で回転速度を変える通常の精密旋盤では、切削物の表面にギヤマークが析出し、更に、3 方爪のチャックで固定すると切削物に変形し加工精度が確保出来なかった。即ち、デスクやスペーサーを高精度に加工するには、工作機械や切削工具の選定治具の開発が必要であった。

スイスからベルト位置の移動で回転速度を変える超精密旋盤を輸入し、デスクやスペーサーの精密加工を開始した。この旋盤のチャックはターレット式で加工物は全面で固定するために加工物の変形は非常に小さかった。デスクやスペーサーはダイヤモンド刃物を使って、微細に切削し変形に配慮しながら慎重に加工された。

このようにして切削された高周波空洞のデスク穴径と厚さの寸法精度は $1\ \mu\text{m}$ 、スペーサー内径と長さの寸法精度は $1.5\ \mu\text{m}$ を確保していた。又、驚くことに切削表面は鏡面に仕上がっていた。

次の課題は、デスクやスペーサーの寸法精度を保った状態で、加速管に仕上げる方法であった。図 2 に示すように、高精度に加工したデスクやスペーサーを積み重ねて、高温の水素炉で銀ロー溶接する方法では、加速空洞（高周波空洞）の構造寸法が狂い、共振周波数が大きくずれることは明らかであった。そこで、低温でデスクとスペーサーを一体にする電鍍法^{12,30)}が検討された。

電鍍法は、図 3 に示すように、銅のデスクとアルミのスペーサーを交互に積み重ね、ステンレスの心棒で締め上げ、外周に 5~10 mm の厚さの銅メッキを施した後、心棒を外してから、加速管にアルカリ溶液を

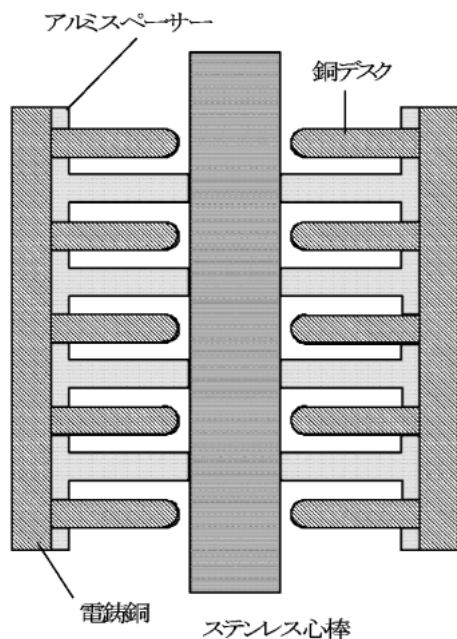


図3 電鍍による加速管の形成

注入し、アルミスペーサーを溶出する方法である。これらの作業は三菱重工と共同で進められた。

三菱重工の名古屋航空機製作所では、1957年池田らがデスク試作に着手し、バンチャー部、テーパー部、定インピーダンス部を一体化したドアノブ型電鍍加速管³¹⁾を完成させ、1960年に核研に納入した。

組立式クライストロンは、油拡散ポンプを用いて排気していたが、クライストロンを高真空度を保つことが困難であり、稼働すると残留ガスがイオン化し、カソードを損傷するために、クライストロンの劣化を早め、その対策に悩まされていた。

核研の6 MeV 入射器³²⁾は、1961年2月に完成し、同年12月に電子シンクロトロンのビーム加速運転を開始し、750 MeV エネルギーの電子ビーム加速に成功した。

一方、日本で最初の電子リニアックは、東芝が1956年に科学技術庁の原子力平和利用補助金をうけて、1959年に自前で製作した4 MeV 電子リニアック³³⁾であった。電子リニアック³⁴⁾は、スタンフォード大学で発行した文献を頼りに設計、製作したが、全般にわたり東芝で独自に開発したものであった。又、輸入品は一切使用していなかった。特に加速管の寸法は、計算機がない時代であり、手計算で求めている。加速器の製作は、核研と同様にアルミニウム・スペーサーを用い電気メッキ法で製作した。又、旋盤加工は東芝で行い、メッキは最初外注で、最後は小向工場にメッキ設備を新設して実施した。又、電子銃は独自に

設計した。クライストロンも組立型を独自に開発し、後に核研で用いられたものと同様に、Ba 酸化物陰極劣化に悩まされた。クライストロンのドライバーには、マツダ研の蛸崎賢治が開発した進行波管 (TWT) を用いていた。このように日本で始めて電子リニアックを製造した貴重な経験は、次の電子リニアックの製造に活かされていった。

名古屋工業技術試験場 (名工試) は、東芝に6 MeV 電子リニアックを発注し、1960年6月に完成した。これが日本初の商用電子リニアックの国産第一号であり、又、日本初の電子リニアックによる電子ビーム加速であった。

東芝は、1959年度に通産省 (現経済産業省) の補助金を受け、電子リニアック用パルスクライストロンを開発、更に、1960、1961年度にわたり通産省から助成金を受けて、25 MeV 電子リニアックを東芝中央研究所に建設し、1962年6月に完成させた。

一方、日本原子力研究所は、原子核実験用として20 MeV 電子リニアックの製作を米国の High Voltage Engineering Corp. に依頼し1960年12月に完成した。

この電子リニアックは外国から輸入した加速器第1号であった。

一方、東北大学では、鳥塚、小島らがユニークな帰還型電子リニアックの開発に挑戦していた。加速管は三菱重工に製作を依頼し、1961年8月には、2 MW マグネトロンを高周波源とする帰還型電子リニアックが完成し、5 MeV ビーム加速を行った。

1961年になると、表1に示すように、日本のあちこちの電子リニアックが競うように次々に稼働しはじめ、1962年6月までに11台の電子リニアックが運転³⁵⁾を開始していた。

このように日本の黎明期における電子リニアック技術は、欧米で開発された電子リニアック技術を文献、或いは、欧米の企業が製造した加速器をお手本に、大学や研究機関が企業と協力し、独自に試作、或いは独自の手法で製作して、電子リニアック国産化の道を開拓していた。又、ここで、積み上げられたマイクロ波技術や製造技術は、次の学術研究用、工業用、医療用などの電子リニアックの設計や製作に活かされ、段階的ではあるが企業は商用生産へ移行していた。

当時、私は大学生として、加速器に興味を持ち勉強を始め、大学の学生寮に住んでいた。寮の隣の部屋から、手動のタイガー計算機を動かす、ガラガラ、チンという音が聞こえ、深夜から明け方まで毎晩のように約半年間続いていた。

この計算は、東北大、電子リニアックのビーム集群

表 1 日本の黎明期における電子線形加速器の建設状況

研究機関・設置場所	東芝中央研究所	名古屋工業技術試験場	日本原子力研究所	東京原子力研究所	第一原子力グループ放射線研究所	三菱電機研究所	日立製作所中央研究所	東芝中央研究所	北海道大学工学部	東北大学理学部	三菱重工名航製	大阪府立放射線研究所
用途	研究開発	照射実験	原子核実験	入射器	電子線, γ線照射	工業応用	研究開発	開発研究 照射実験	放射線	原子核実験	研究開発	γ線 照射原子核
最高エネルギー (MeV)	6	8.5	24	7.5	13	4	8	11	4.6	5.7	5.2	15
公称エネルギー (MeV)	4	6	20	6	7	3	7	8.5	2.5	5	4	8.5
エネルギー幅 (%)		±4	±3	3.5~5	±8	±6	±8			±1.7		±3.8
ビーム電流 (mA)	75	100	80	80	100	150	150	185	100	80	100	360
パルス幅 (μs)	4	4.8	4	4	6	1		5	2	2	2	5.5
繰り返し (CPS)	100	60~600	50~300	20	300	540	400	360	200	500	750	500
高周波源・個数	Kly.1	Kly.1	Kly.2	Kly.1	Kly.1	Mag.1	Mag.1	Kly.1	Mag.1	Mag.1	Mag.1	Kly.1
高周波電力 (MW)	3	2.5	3	2.7	4	0.5	4	6	2	2	2	6
周波数 (Ghz)	2.810	2.810	2.856	2759	2.7~2.8	2.76	2.8018	2.810	2.998	2.998	2.998	2855
加速管型式 (V=C)	定インピ	定インピ	?	3.0	定インピ		定インピ	定インピ	定インピ	定インピ	定インピ	定インピ
加速管の長さ (m)	2.6	2.84	1.0×6	Ta B 型	3.5	2.0	1.2	1.8	2.6	1.5	1.8	1.5
電子銃の種類	Ta, B 型	直熱 P 型	直熱式	Ta B 型	W, P 型		3 極管	Ta, B 型	W, P 型	Ta, B 型	W, P 型	Oxide
電子銃電流 (mA)	80	230	50	120	300	500	200	300	150	170	250	1000
電子銃電圧 (kV)	東芝	50~80	ハイボル (USA)	80	80	80	80	80	80	50	80	80
製造会社	東芝	東芝	ハイボル (USA)	(加速管) 三菱重工	富士電機 神戸工業	三菱電機	日立	東芝	富士電機 日本電気	(加速管) 三菱重工	三菱重工	ハイボル アルコ
完成年月	1959	1960・6	1960・12	1961・2	1961・3	1961・3	1961・4	1961・6	1961・8	1961・8	1962・2	1962・3

1962年度：電気学会粒子加速装置専門委員会資料より

定インピ：定インピータンス, Ta：タンタル, W：タングステン, B 型：ボンバード型, P 型：ピアス型

状態を把握するために、小島が数値計算（ビームトレース）を学生にアルバイトとして依頼していたもので、このことは20年後の彼との会話でわかった。

電子計算機のない1960年時代の、ビームトレースは、非常に忍耐のいる仕事であったと思う。又当時、少し高速の電動計算機（当時：60万円）を購入するより、安い手動計算機（10万円）を買い、学生アルバイト（1300円/日）で半年間計算する方が少ない経費ですむと云う発想であった。約10年後の1970年代には、自分自身が核研電子リニアックの設計するためにビームトレースを行う羽目になった。この頃は核研にも小型電子計算機が導入され、これを使ってビームトレースを行なったが余り、満足な結果は得られなかった。更に、10年後の1980年代には、2.5 GeV 入射器の設計をすることになり、大型計算機を使ってビームトレースを行ったが、不満足であったことを思い出し、ビームトレースには何か因縁めいたものを感じている。

4. 黎明期後の電子リニアック技術の発展

東芝は、通産省の助成を受けて、1962年6月に東芝中央研究所に25 MeV 電子リニアックを完成させた。又、電子リニアックの国産化を積極的に進め、特に6 MW クライストロン（M-4628）や高周波損失が少なく加速効率が高い $2/3\pi$ モード加速管などの要素開発を行った。

電気試験所（後の電子総合技術研究所）では、中村^{36,37}が電子リニアックを建設するために、電子ビームの位相集群とエネルギー集群の両方を同時に満足するバンチャー加速管を設計していた。1962年に25 MeV 電子リニアックを東芝に発注した。この電子リニアックはプリバンチャーと1.2 m 加速管3本に7 MW クライストロン2本で構成され1963年に完成した。中村は、完成した加速管の入出力側からPlungerを挿入して高周波空洞を磁気短絡させ、個々の $2/3\pi$ モード加速空洞の特性を測定する方法を開発³⁸した。

その後、富増らは、この加速器の真空を向上させ、1968年には電子ビームを25 MeV から33 MeV に上昇させた。又、中村は加速管のデスクとスペーサーの形状寸法を指定すると、高周波空洞の共振周波数が高精度に求められる計算機コード³⁹を開発した。このコードは後に開発されSuper Fishより、高周波空洞の共振周波数を高精度で求めることができたが、甚だ残念なから日本では、重要視されず、中国で普及していた。

東大核研では、組み立て式クライストロンの真空が

油拡散ポンプに依存していたので、その性能維持が困難なため、1963年にトムソン社製の7 MW クライストロンに置き換えられた。その結果、電子シンクロトロンに入射エネルギーが約10 MeV に上昇し、電子シンクロトロンビーム強度も改善された。その後、三菱電機はトムソンバリアン製クライストロンをライセンス生産して核研に納入するようになった。

1966年3月、電子シンクロトロン（ES）では、シンクロトロンに直流磁場を加え、加速エネルギーを1.3 GeV に増強することに成功していた。

この頃、世界中のあちこちで、電子リニアックの加速ビーム電流を増強すると、電子ビームが不安定になる現象（ビームブローアップ：BBU）が観測され、このビーム発散を抑制する方法が電子リニアックの最大テーマであった。

東芝中研の25 MeV 電子リニアックでも、大電流ビーム加速時には電子ビームのパルス幅が短くなる現象（パルスショートニング）が観測^{40,41}されていた。

一方、東北大学では、1961年に、5 MeV 帰還型電子リニアックの電子ビーム加速に成功すると、木村、鳥塚等らによって、3本のビームラインを含む、原子核、生物・物性、中性子発生などの多目的実験用として300 MeV 電子リニアックの建設計画が提案された。

この電子リニアックは三菱電機が受注し、そのテスト加速器として30 MeV 電子リニアックが製作された。加速管は三菱重工が製作を担当することになり、2 m 電鍍加速管が試作された。

一方、小島、小山田は、定インピーダンス型加速管に発生するBBU現象が、電子ビームが加速管に誘起する高次マイクロ波の後進波と相互作用すると発生することに注目し、高次後進波が加速電子ビームと相互作用しない構造の加速管を開発⁴²した。東北大の300 MeV 電子リニアックは、加速周波数が2856 MHz で1 m 加速管8本と2 m 加速管12本に20 MW クライストロン5本（トムソンバリアン社製）で構成され、ビームパルス幅が $2.5 \mu\text{s}$ と $2 \mu\text{s}$ 、繰り返し数が300 ppsの高性能加速器であった。1963年に建設を開始し1967年に完成した。試運転では電子ビームの加速エネルギーは280 MeV に達し、又、加速管のBBU抑制策が効果を発揮して、電子ビーム電流は120 mA に到達⁴³した。

1968年10月にクライストロンは、核研と同様に、トムソンバリアン社製から国産（三菱電機製：PV-2014B）に切り替えられた。

理化学研究所では、炭素や酸素より質量数の大きい

元素を確実に 1 MeV/核子以上のエネルギーに加速することを第 1 目標とする重イオン加速器計画として、1971 年に小寺は AVF や Separated Sector Cyclotron の入射器として周波数可変の軽い重粒子を加速できるリニアック (RILAC)⁴⁴⁾を設計していた。このリニアックは可変波長を特長とするウィドレ型で 3 m 共振タンク 6 台によって構成され、加速モードは第 1 タンクが $\pi/3$ 、第 2 タンク以降は π で、最大利得電圧は約 16 MV であった。

日本原子力研究所の東海研究所では、1960 年に完成した 20 MeV 電子リニアックを 1972 年に炉物理実験や中性子回折実験用として、電子ビームを最大 190 MeV に加速できるように改造した。この加速器はブリバンチャー、バンチャー、2 m 加速管 5 本に 20 MW クライストロン 6 本 (Litton 製) からマイクロ波電力を供給する構成であった。このグループは、加速器部品をメーカーにオーダーして購入し、自前で組み立てていた。バンチャー加速管は 1977 年 10 月に第 1 加速管を 1978 年 6 月に三菱電機製に交換し、更に同年 11 月には入射部を改造し、性能向上を図った。

電気試験所では、更に、加速エネルギーを増強するため、富増らが東芝と共同で、クライストロン効率の向上をテーマに共同研究を行い、10 MW クライストロンは 49%、20 MW クライストロンは 53% まで効率を向上させた。改善したクライストロンを使い、1970 年には、電子ビームのエネルギーが 40 MeV に上昇した。

1971 年、北海道大学工学部では、4 MeV 電子リニアックを 45 MeV 電子リニアックの改造に着手し電子照射、 γ 線、中性子発生用として、1974 年に完成させた。この電子リニアックは、バンチャーを含む 1.8 m 加速管 1 本と 1.6 m 加速管 2 本に 5 MW クライストロン 3 本 (三菱電機製: PV-2012 W) で構成され、電子ビームのパルス幅が 0.01~3 μ s、繰り返しは 10~200 pps であった。更に、ピコ秒パルスラジオリシス実験を目標にピコ秒単パルス電子ビーム発生を試みていた。

電総研では、1971 年 12 月、筑波移転が決定し、富増らは、SOR、 π 中間子発生と利用、大強度放射線による放射線損傷などの研究目的とするビーム出力 100 kW の 500 MeV 電子リニアックの建設計画⁴⁵⁾を提案し、1972 年に概算要求を行った。又、1973 年に起った、オイルショックはクライストロンに省エネルギー化を要請した。電子リニアックは、1.892 m 加速管 4 本と 2.945 m 加速管 16 本に 20 MW クライストロン 10 本で構成され、又、BBU を避けるために 4 種類の

定勾配テーパー加速管が用意され、加速器から低、中、高エネルギーの電子ビームを供給する計画であった。

この頃、日本でも、ピコ秒パルスラジオリシス実験用として、特殊用途の電子リニアックが検討され始めた時代であった。東京大学工学部原子力工学研究施設の田畑は、35 MeV 電子リニアックの建設計画を提案し高速中性子炉「弥生」をパルス化すると同時にピコ秒パルスラジオリシスの実験を計画した。1974 年に建設を開始し、1977 年 4 月に完成した。これは、サブハーモニックバンチャー (476 MHz)、プレバンチャー、S バンド (2.856 GHz) で稼働する世界最初のピコ秒単パルス用電子リニアックであった。

又、大阪大学産業科学研究所では、数十ピコ秒の短寿命活性種の挙動を解明 (パルスラジオリシス) することを目的に、L バンド (1.3 GHz) 電子リニアックの導入計画を提案した。1975 年に着工し、1978 年に完成した。

一方、パルスショートニング現象の BBU は東北大でも発生していた。東北大の BBU について、小山田がその理由を高次後進波と電子ビームが相互作用する結合関数の高次項効果⁴⁶⁾であることを明らかにした。

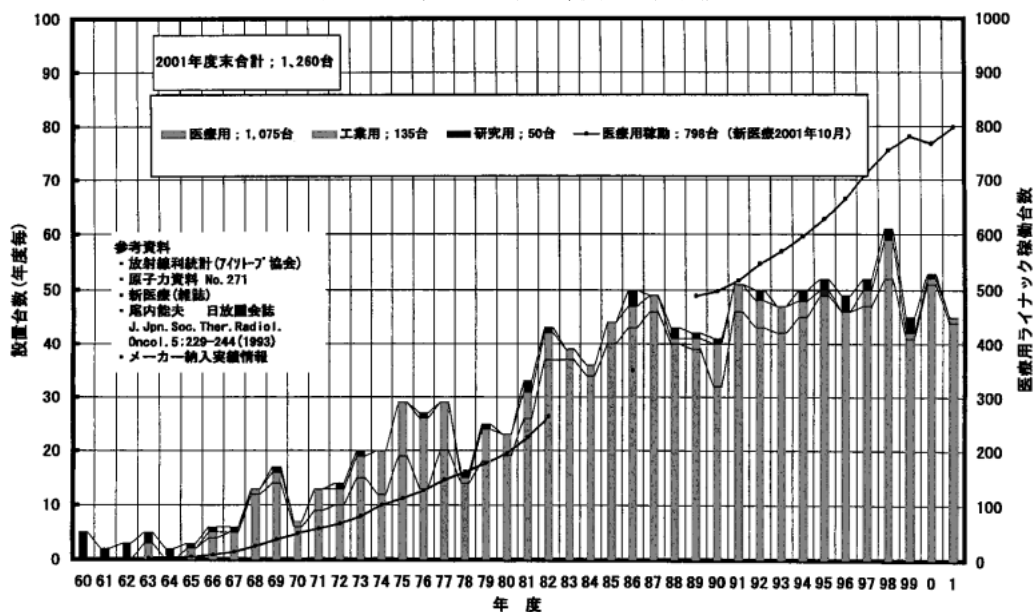
この頃、東北大学の小山田が中心に、電子リニアックを保有する色々な研究機関の協力を得て、日本の電子リニアックに発生する BBU を系統的に調査しようということになった。このことが動機になり、リニアックに係わる研究者や技術者が、加速器に共通な問題点、或いは個々の加速器に固有な特異現象に関する情報を交換するために一堂に集まろうという機運が生まれた。

一方、1964 年 4 月、核研に素粒子研究所準備室が設置され、陽子シンクロシロンの準備研究が始められた。

1971 年に、高エネルギー物理学研究所 (KEK) が筑波学園都市に設立されて、8 GeV 陽子シンクロトロン建設が開始された。この加速器は、入射器、ブースター、主リングからなり、入射器は 15 MeV 陽子リニアック、ブースターは 500 MeV 陽子シンクロトロン、主リングは 8 GeV 陽子シンクロシロンであった。入射器とブースターシンクロトロンは 20 Hz、主リングは 0.5 Hz で運転するように設計された。

陽子リニアックは 1974 年 8 月に 15 MeV 陽子ビーム加速に成功した。その後、前段加速器の改良により、1976 年 5 月にはビーム電流が 100 mA を越え、138 mA に達した。

表2 電子ライナック年度別設置台数



日本に電子リニアックと陽子リニアックが出揃ったので、1975年7月にリニアックを保有する研究機関の関連者がKEKに集まり、加速器に派生する色々な現象や故障を中心に、その対策や解決策の成功例や失敗例を率直に報告し、色々な問題点を参加者が共有して加速器発展に繋げることが目的に技術研究会を開くことを話し合った。

更に、KEKでは、陽子シンクロトロンが完成し、ブースターから陽子ビーム取りだしに成功したことから、1975年8月21日から3日間、第1回加速器科学シンポジウムを国立教育会館筑波分室で開催することになった。

一方、第1回リニアック技術研究会は1976年7月22日から3日間、東北大学川渡合同セミナーセンターで親睦と交流も兼ねて開かれ、予稿集⁴⁷⁾も発行された。又、この研究会では、西川⁴⁸⁾、木村⁴⁹⁾、熊谷⁵⁰⁾が特別講演を行い、25件の口頭発表があり、更に、「加速器の運転と保守」をテーマにパネルディスカッション(コーディネーター:竹腰秀邦)が行われた。

その後、リニアック技術研究会は毎年開催され、加速器の日常業務から派生する加速器技術の向上が加速器の改良・改善に繋がり、新しい加速器技術を生み出す基盤であることが次第に浸透して、加速器実学の重要性が認識されるようになった。又、大学や研究機関に企業も参加して研究会を主催するようになり、その裾野は次第に広がって行った。

このようにして、その後、表2に示すように、日本

の電子リニアックは確実に増加し、1975年には100台を越え、1990年代には、年間約50台増加し、20世紀末には総数約800台、世界第二位の保有国となった。

1975年以降の電子リニアックの発展については、次の機会に述べることにする。

5. おわりに

特集を依頼されたが、私の手元には1975年以前の資料が皆無であることに気が付いた。限られた時間内にこれらの資料をどのようにして集めるかに苦慮した。特に、日本における電子リニアック黎明期である50年前の動向を知る手がかりはなかった。

唯一の手掛かりは、1971年7月22～24日に東北大学川渡共同セミナーセンターで開催された第1回リニアック技術研究会であった。この研究会で、竹越秀邦(京大化研)氏がコーディネーターになって「加速器の運転と保守」をテーマにパネルディスカッションが開かれ、竹越氏が、大阪府立放射線研究所(大放研)と名古屋工業技術試験場(名工試)の運転状況を問い、大放研の津守邦彦氏と名工試の武田道彦氏がともに、運転を開始して大体15年になるというコメントを記憶していたことでした。又、この時、日本では名工試の電子リニアックが最初にビーム加速したという認識でした。この微かな記憶を唯一の手掛かりに、調査を開始しましたが、名工試は現在、「独立行政法人 産業技術総合研究所 中部産学官連携センター」と名称が変わり、又、建設当時の事情を知っている方々も退

職されており、現在は廃棄されてないとのことでした。敢えて退職された方にお尋ねして頂きました。名工試に納入された電子リニアックは国産の工業用第一号機として、東芝より購入したもので、当初 6 MeV だったが直後に 12 MeV に増強され、産総研に移行する直前まで稼働していたとのこと。KEK の高田耕治氏に依頼し、当時の東芝関係者をお願いして資料を提供して頂いた。

その当時、ここに記述されていない大学、研究機関、病院、企業には、電子リニアックの利用、開発、製造に関して、優れた研究能力、卓越した開発技術、真似の出来ない高い技能を持った方々が多数居られると思われるが、時間的制約と紙面の制限及び資料の収集能力の低さや勉強不足から記述できなかったことは、非常に残念であり、今後、機会があればできるだけ紹介できればと思っている。

参考文献

- 1) R. Wideröe, 1928, Archiv für Elektrotechnik 21, 387.
- 2) J. W. Beams and L. B. Snoddy, Phys. Rev. 44 (1933) 784.
- 3) J. W. Beams and H. Trotter, Phys. Rev. 45 (1934) 849.
- 4) H. Trotter and J. W. Beams, Phys. Rev. 47 (1935) 641.
- 5) R. H. Varian and S. Varian, J. Appl. Phys. 10 (1939) 321.
- 6) E. L. Ginzton, W. W. Hansen and W. R. Kennedy, Rev. Sci. Instr. 19 (1948) 89.
- 7) R. F. Post, 1950, A 50 MeV Linear accelerator, Stanford University, Stanford, California.
- 8) R. F. Post and S. Shiren, Rev. Sci. Instr. 26 (1955) 255.
- 9) E. L. Chu and W. W. Hansen, J. Appl. Phys. 20 (1949) 280.
- 10) K. B. Mallory, Ph.D. Thesis, Stanford Univ. (1955).
- 11) M. Chodorow, E. L. Ginzton, W. W. Hansen, R. L. Kyhl, R. B. Neal, W. K. H. Panosky and The Staff W. W. Hansen Laboratories of Physics, Stanford University, "Stanford High-Energy Electron Linear Accelerator (Mark-III)", Rev. Sci. Instr. 26 (1955) 134.
- 12) J. A. Pope, Plating 44 (1957) 1291-1296.
- 13) D. W. Fry, R. B. R-S-Harvie, L. B. Mullett and W. Walkinshaw, Nature 160 (1947) 351-353.
- 14) D. W. Fry, R. B. R-S-Harvie, L. B. Mullett and W. Walkinshaw, Nature 162 (1948) 859.
- 15) D. W. Fry, "The Linear Electron Accelerator", Philips Technical Review, 14 (1952) 1.
- 16) W. Miller, Inst. Elect. Eng. Proc. 101 (1954) 207-219.
- 17) J. C. Slater, Rev. Mod. Phys. 20 (1948) 473.
- 18) P. T. Demos, A. F. Kip and J. C. Slater, J. Appl. Phys. 23 (1952) 53-65.
- 19) J. W. Boag and C. W. Miller, 1959, "Technical Aspects of a High-Current Electron-Pulse Generator", Proceedings of the Second International Conference, Geneva, Switzerland.
- 20) P. B. Wilson, 1963, A Study of Beam Blowup in Electron Linacs, HEPL-297 (Rev. A), High Energy Physics Laboratory, Stanford University, Stanford, California.
- 21) M. C. Crowley-Milling, T. R. Jarvis, C. W. Miller and G. Saxon, 1961, Nature 191, 483.
- 22) A. K. Valter, et al., 1965, 2-GeV Traveling Wave Electron Accelerator, Fifth International Conference on High Energy Accelerators, Frascati, Italy: p233-238.
- 23) R. B. Neal and W. K. H. Panofsky, Science 152, (1966) 1353.
- 24) J. Vastel, 1952, Ann. de Radioélectricité 6, 20.
- 25) A. Sarazin, 1953, Ann. de Radioélectricité 8, 134 and 228.
- 26) l'ond Electrique, 1963, L'Accélérateur Linéaire D'Orsay, Vol. 43, No. 435.
- 27) L. Meland, 1967, Note Technique No. 83. A. 8, Sections Accélétrces D'Orsay, LM/MLN No, 016/67, Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire Service "Faisceau", Orasy, France.
- 28) E. L. Chu and W. W. Hansen, J. Appl. Phys. 8 (1947) 996.
- 29) 西川, 田中, 宮原, INS-TH-28 (1957).
- 30) J. Tanaka, et al., 応物 31 (1962).
- 31) S. Ikeda, Y. Otsubo and Y. Iino, 1968, Mitsubishi Denki Giho 42, 287-292.
- 32) J. Tanaka, J. Phys. Soc. Japan 16 (1961) 2081-2090.
- 33) 波多野寿一, 岡田 勉, 平田信二, 大島厚太郎, 25 MeV リニアックセラレーター 東芝レビュー, 18 巻 5 号 (1963) 576-582.
- 34) KEK 高田耕治氏との Private Cominucation 共立出版の「加速器」p82 (西川) を参考.
- 35) 電気学会粒子加速装置専門委員会資料 1962 年 5 月末日現在に於ける国内線型電子加速器の運転状況 (1962-6-20).
- 36) 中村正郎, 日本物理学会, 1962 年秋の分科会講演予稿集 1 (1962) 61.
- 37) M. Nakamura, Int. Conf. M.C.T.T. (1964) M14-8.
- 38) 中村正郎, 電気試験所研究報告, 第 637 号 電子線型加速器加速管のマクロ波測定 (1967).
- 39) M. Nakamura, A Computational Method for Disk-Loaded Waveguides with Rounded Disk-Hole Edges, J.J.A.P. Vol. 7, No. 3 (1968) 257-271.
- 40) 大島厚太郎, 占部和英, 繁村 直, 海野陽一, Linac の Pulse Shortening, 昭和 37 年度電気通信学会予稿集, 1962-11, 398.
- 41) 平川浩正, 線形加速器におけるパルスショートニング効果, 1962 年物理学会分科会予稿 (1962-11).
- 42) 小島, 小山田, TE-Report 102 (1963).
- 43) 庄田勝房他, 核理研研究報告 1, 1 (1968) 12.
- 44) M. Odera, "Symposium of the Heavy Ion Accelerator Orojects in Japan", 17 June 1971, Tokyo, Spring Meeting of Japan Phys. Soc.

- M. Odera and T. Tonuma, "A Variable Frequency Linac for Acceleration of the Low Energy Ions and its use as a Prestripper Accelerator for a Separated Sector Cyclotron", Proc. Sixth International Cyclotron Conference, 1972, Vancouver Canada. Eds. J. J. Burgerjon and A. Strathdee, AIP Conf. Proc. No. 9 (1972) 283.
- 45) 高エネルギー大出力電子リニアックに関する調査報告, 1976年3月, 電子技術総合研究所.
- 46) 小山田, 他, ビームブローアップ現象の測定, Proceedings of the 1977 Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, November 30—December 1, 1977, 39–42.
- 47) リニアック技術研究会報告集, 昭和51年7月22日～24日, 東北大学川渡共同セミナーセンター 核理研研究報告 第9巻 増刊号.
- 48) 西川哲治, 「Normal Mode Analysis of Linac Structure」, 核理研研究報告 第9巻 増刊号, 86–96頁.
- 49) 木村一治, 「加速器の応用—明日へ展望を主として」, 核理研研究報告 第9巻 増刊号, 97–102頁.
- 50) 熊谷寛夫, 「 π -中間子によるガン治療その他」核理研研究報告 第9巻 増刊号, 103–107頁.