

インドのSAMEER（応用マイクロ波電子工学・研究協会）における線形電子加速器の開発について本論文で概説する。ムンバイセンターのSAMEERでは、Sバンド小型側結合定在波電子線形加速器を開発する技術が確立されている。6MVから15MVの線形加速器が、所定の仕様で開発されている。放射線治療用途向けの国産6MV線形加速器は既に開発に成功しており、国内の主要な癌病院で使用されている。SAMEERは現在、放射線治療用途向けに、電子と光子のデュアルモード、およびデュアルエネルギー線形加速器の開発に取り組んでいる。本論文では、6MeV線形加速器管の開発と試験結果について説明する。SAMEERは、癌治療向けの6MeV Sバンド定在波側結合小型線形加速器を開発した。線形加速器の主要なパラメータは表1に示されている。設計開発は、6MeVのエネルギーで1分間に300ラド（RMM）を達成することを目的として行われた。本装置は患者治療用に設計されたため、線形加速器管を垂直方向のガンツリーに収容できるよう、小型の線形加速器が好まれた。線形加速器の電子銃からターゲットまでの長さは42.25cmである。3GHzの周波数で動作する2.6MWマグネトロンがRF電源として使用されている。線形加速器管は試験ベンチで正常に試験され、現在病院で使用されている。本論文では、当研究所における線形加速器管の設計と開発について説明する。線形加速器管の基本的な設計パラメータを表2に示す。線形加速器管用に設計されたキャビティを図1に、単セルのSuperFishプロファイル図を図2に示す。キャビティは社内で製作された。初期周波数は3017MHzに設定され、その後スロットを切削して最終周波数を2997MHzとした。その後、キャビティは水素雰囲気中で側部キャビティにろう付けされた。キャビティの機械加工は、ダイヤモンドチップを用いたCNC機械で行われた。表面粗さは2ミクロン未満に維持され、Q値は15000と測定された。図3に示すように、6つのセルをろう付けして長さ32cmの線形加速器管を作成した。線形加速器管には、2つのバンチャキャビティと5つの加速キャビティがある。線形加速器管は水冷式で、本体温度を5℃以内に維持する。

（表1、表2、図1、図2、図3は論文本文中に含まれるが、本文の理解に必須ではないため、翻訳には含めていない。）

この研究は、インド政府のJai Vigyanプロジェクトによって支援された。

製作したリニアック管は、 $\pi/2$ モードで動作する側方結合定在波構造です[4]、[5]、[6]。この構造の無負荷Q値は約15000、シャントインピーダンスはビード摂動法を用いて測定したところ87MΩ/mでした[7]。このような構造の製作には極めて高い精度が求められます。製造工程における重要な実践的知見として、スタックろう付けとRF給電スロットがあります。

****スタックろう付け**** キャビティは、日立製の純度99.998%のOFHC銅で作られています。形状加工はCNC機械で行われます。スロット切削とダウエルピン挿入はCNCフライス盤で行われます。ダウエルピンの精度は0.005mmです。不正確なダウエルピン挿入は、深刻なアライメント問題や、最初のろう付け後のリークにつながることに注意することが重要です。私たちの経験では、スタックろう付けのためにスタックをロードする際、ダウエルピン挿入が適切であれば、外部治具は必要ありません。自己治具機構は、外部治具による応力を回避するため、最適です。 ****RF給電スロット**** 電力をリニアック管に結合する点は非常に重要です。スロット寸法は電力結合に重要な役割を果たし、寸法のばらつきは、結合不足の加速構造につながる可能性があります。スロットが大きいと、その接合部にある主キャビティの周波数が低下します。最終スタックのVSWRはほぼ1.4になるように設計され、11.35mmの深さに22.98×17.12mmの楕円形スロットが最終的に決定されました。スロット切削は、DROベースのフライス盤で行われました。管の最終的なVSWRは1.5となり、給電キャビティの周波数は2998.6MHzでした。図3：SAMEER製側方結合リニアック管 ****その他のサブアセンブリ**** 電子銃は、直径6mmのディスペンサーカソードを用いたピアス型ダイオードガンです。使用されたカソードは、Spectramat製Type MディスペンサーカソードSTD.250で、電流密度は2A/cm²です。設計されたターゲットは、銅ハウジングに収められた高原子番号Zターゲットペレットです。ペレットの厚さは1.5mmで、すべての電子を阻止するのに十分です[8]、[9]。ターゲットアセンブリは水冷され、温度を設定温度から5℃以内に保っています。使用されたRF窓は、SAMEER製で3MWの電力処理能力を備えています。窓は空冷されています。窓に使用されたセラミックディスクの厚さは3.00mmでした。8l/秒の容量のスパッタイオンポンプがリニアック管に取り付けられ、ピンチオフ後の運転中の残留ガス放出に対応しています。 ****試験と測定**** すべてのサブアセンブリを取り付けた後、リニアック管を325℃でベーキングし、オンライン真空システムから切り離す前に達成された真空度は4×10⁻⁶ torrのオーダーでした。ベーキング後のモードスペクトルを図4に示します。測定された $\pi/2$ 周波数は2998MHz、VSWRは1.5でした。高出力リニアック管の特性評価は、腫瘍学システムへの統合前に実施されました。その後、リニアックはRF脱ガス処理されました。4.5μsのパルス幅を与える2.6MWのe²Vマグネトロンを備えたライン型変調器を使用して、2998MHzでRF電力をリニアック管に供給しました。3ポートサーキュレータは、マグネトロンを反射電力から保護します。リニアック管は2番目のポートに接続され、Sバンド30dBの水冷負荷が3番目のポートに接続されています。試験は最終的に200P RF、2.6MWのフルRF電力で行われました。図4：モードスペクトル 線量率は、Wellhoffer製セカンダリ標準線量計を使用して測定されました。イオン化チェンバーの容積は0.6ccでした。測定された平坦化された線量率は240 RMMでした。記録されたターゲット電流は130mA（パルス）でした。

結果 図5に示す深部線量曲線は、3D水のファントムにおいて15 mmで最大ビルドアップを示し、これは6 MeVのエネルギーに対応します。平坦化されていない線量率は300 RMMであるのに対し、平坦化された線量率は240 RMMでした。測定されたビーム対称性は中心最大値の3%以内でした。試験データは表3に示されています。結論 SAMEERは、4、6、および15 MVの線形加速器管の製造技術を既に成功裏に実証し、確立しました。時間に関する線量安定性と再現性、ならびに装置間の再現性は、SAMEER線形加速器管の重要な特徴です。放射線治療用途向けの国産6 MV線形加速器が成功裏に開発され、国内の主要な癌病院で使用されています。SAMEERは現在、放射線治療用途のための双モード（電子および光子）および二重エネルギー線形加速器の開発に取り組んでいます。謝辞 モードプロットのスキャン画像を提供してくれたG. Gaikwad氏に感謝いたします。

(図5と表3の内容は本文に反映済みです。参考文献は省略しました。)