

氏 名 飯野 晃弘

学位(専攻分野) 博士(工学)

学位記番号 総研大甲第 1914 号

学位授与の日付 平成29年3月24日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 加速器科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 低温化による低損失高純度銅材加速管の研究

論文審査委員 主 査 教授 肥後 壽泰
教授 山口 誠哉
教授 紙谷 琢哉
教授 道園 真一郎
准教授 松本 修二
専任研究員 稲垣 隆宏 理化学研究所

論文の要旨

Summary (Abstract) of doctoral thesis contents

当初電子リニアックは、様々な学術用加速器に用いられてきたが、近年は滅菌、排煙、非破壊透過装置等の産業分野や医療分野に利用される小型電子リニアックとしての需要が高まっており、更なる発展が期待されている。平均電力の低いパルス運転の場合には常温で運転する常伝導加速管が用いられるが、様々な応用で期待される平均電力の高いパルス運転や CW（連続運転）の場合には、空洞内壁で生じるジュール熱が問題となるため、常伝導加速管を適用出来ず、超伝導加速管が用いられている。しかし超伝導加速管は極低温への冷却や磁場対策等から常伝導加速管と比較して装置の巨大化や製作及び運転費用が増大することが難点である。

本論文では、常伝導電子リニアックにおいて高電界、高電力化を図る上で重要な指標である電力効率を示す Q 値の大幅な増大を目的として、従来常温で運転しているところを、低温（20 K 程度）で運転する高純度銅製加速管の実用化に向けて行った研究開発について述べる。具体的には 20 K におけるテスト空洞の高周波特性試験と加速管を冷却するクライオスタットの冷却試験、及び開発で得られた低温における加速管特性について述べる。これまで低温で常伝導加速空洞に大電力を投入し高周波特性を測った報告はあるが、実用化に向けた研究開発や低温環境下での加速管から発生する暗電流及び放射線に関する報告については筆者らが初めてである。

本加速管は、日本大学、佐藤勇博士が考案した医療応用向パラメトリック X 線（PXR）源を構成するエネルギー回収型クライオ小型電子リニアックに利用することを目的として開発された。この加速器には以下の 3 つの特徴がある。1 つ目は、クライストロンより投入される RF 電力を還流させることで増幅して加速管の加速電界強度を高くすることである。2 つ目は、ビーム加速に使用された RF 電力を利用して減速管で電子ビームのエネルギーを低下させることで、放出される電子ビームがビームダンプと衝突した際に発生する放射線量を低減することである。3 つ目は、加減速管を 20 K 程度まで冷却することにより、電力損失を大幅に低減させて還流システムのエネルギー利得を高めることである。加速管ではより高いビームエネルギーが得られ、減速管では入射エネルギー付近までビームエネルギーを低減できるようになる。このような高電界化や放射線量低減の観点から、医療向け等の小型電子リニアックにおいて加減速管を低温で運転するメリットが非常に大きいことがわかる。

本論文で示した実験により、高純度銅製加速管の 20 K 程度での運転が実証され、大電力試験期間内に、RF パルス幅 1.0 μ s、繰り返し 50 Hz で、加速電界強度 E_{acc} は 31 MV/m を達成でき、実用化への目処を得ることができた。また本研究を通じて、高純度銅を用いた常伝導加速管に関する下記の低温特性を得た。

- ① TM₀₁₀ モードの高純度銅製ピルボックス空洞を用いた低電力高周波特性試験から、常温から低温 20 K に冷却すると空洞の Q 値が 5 倍程度高くなることが明らかとなった。高純度銅材には、一般的に常伝導加速管材として使用される純度が 99.99% である無酸素銅（クラス 1）と、さらに高純度な粒子加速器用に開発された銅材（純度 99.99998%、

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

以下 6N8 銅) の 2 種類があり、これらを比較評価した。残留抵抗比 (RRR : Residual Resistivity Ratio) は熱処理条件にもより、700°C のアニール処理を施した時に最も高くなることがわかった。実際には空洞は拡散接合で組立したが、その接合温度である 900°C でアニール処理した 6N8 銅及びクラス 1 の RRR は、それぞれ 2000 及び 300 程度であった。RRR 500 以上では、低温での異常表皮効果により材料純度や RRR の違いによらず空洞の Q 値は飽和し、C-バンドでは 5.4 倍程度となる事が、実験及び理論計算による Q 値の挙動により示された。

- ② 加速管に大電力を投入すると、トンネル効果によって空洞内壁より電界放出電子が発生する。この電子は暗電流として観測されるが、本来ビーム加速に使用されるはずの RF エネルギーを奪ってしまう事や、バックグラウンド増加による衝突点での物理実験への影響等が問題となる。また電界放出電子が空洞内壁等に衝突すると放射線が発生して遮蔽の必要性も高まってしまう。これらは密接に関係しているが、実用的加速器には放射線発生量が少ないほど望ましいといえる。20 K における高純度銅製加速管の大電力試験で観測された放射線量については、RF パルス幅依存性、加速電界強度 E_{acc} 依存性、加速管長さ依存性を測定した。タングステンを用いた実験的に得られている暗電流量の温度依存性を考慮しても、常温加速管の放射線量と比較して 80 倍程度少ないことが得られた。また暗電流量については、放射線量に比例すると仮定して算出した結果、検出限界 (100 fA) 以下の 2 fA であることが推定された。
- ③ 大電力試験でのコンディショニングについては、RF パルス幅 0.5 μ s 程度までは常温の加速管と同程度のスピードであることが明らかとなった。

実用化に向けた今後の課題は、還流システム形成時の増大する入力電力量を考慮した加減速管の冷却強化である。引き続き研究開発によって、還流システムを用いた低温における高純度銅製加減速管による低損失高電界加速が実証されると考えられる。

Summary of the results of the doctoral thesis screening

干渉性の良い X 線源が、今や現実的になってきた 50MV/m 級の高電界加速を生かして、小型だが大きいエネルギーゲインを得ることができる電子加速器システムとして提案されていきました。飯野氏はこの様な加速器の概念設計ができたタイミングでプロジェクトに参加されました。

加速器要素として重要になるのは、1. 低損失の加速管、2. 還流型のエネルギーゲイン増倍、3. 電子エネルギーを減速管で低減してからのダンプへの入射、4. これらの小型ハードウェアでの実現、等です。このうち第 1 項を実証できればシステム実現への見通しがつくので、本論文ではこれに集中しています。低損失性を小型で実現するために、当初から無酸素銅を 20K で動作させる加速管が想定されていましたが、材料の選定や材料特性を損なわずに製作し、低温で想定した性能を実証するという課題が残されており、その全工程を飯野氏が中心となって進め、本論文へまとめました。

まず飯野氏は、標準的に用いる無酸素銅クラス 1 材と低温での RRR が高い 6N 高純度銅を実験的に比較し、異常表皮効果が支配する低温での Q 値は RRR が 500 以上では飽和して、6N 程の高純度材料を用いる必要が無いことを発見しました。またこの Q 値の温度依存性について、拡散反射モデルを仮定して材料の熱伝導データから導かれることを示し、理解を深めました。

加速管の製作にあたっては、3 セルモデルを用いて低温での熱収縮による寸法変化を精密に計測し、材料特性から推定できることを確認して加工寸法に反映しました。製造最終工程の電子ビーム溶接で周辺の形状が変化してしまうアクシデントに遭いましたが、加速管の高周波チューニングを駆使し、本論に必要な高電力を投入できるレベルにまで粘り強く補正しました。熱伝導のみを用いる冷却システムについても、20K まで冷却する時の過渡特性を丹念に調べ、高電力試験が可能であることを確認すると共に、将来加速器で重要になるアラインメントの変化も把握しました。この冷却システムを用いて加速管の低温での高周波特性を計測し、高電力運転が可能であることを確認しました。

最後に残る最重要評価は、安定に高電力が加速管に入力されるかどうかであり、これを見極めるため、飯野氏は本論文の最終段として高電力試験を遂行しました。このためには、高電力高周波の伝送、低温環境の維持、プロセッシングと呼ぶ加速管の初期ならし運転、等が必要であり、飯野氏は全てを自ら進めて実証しました。この過程で、高電界運転時に加速管周辺の放射線量を計測し、それを基に暗電流が非常に小さいことを導いて、電流が測定限界以下であることを説明しました。更に低温にすることにより電界放出が 2 桁下がる理論的背景をふまえて、放射線の実計測データがある S バンド加速管と比較することにより、運転温度、加速管長、周波数、の違いを考慮しても更に 2 桁程暗電流が低いことに気が付きました。これは、低温常伝導の高周波特性に関する未知の効果を予想させる新しい知見です。小型加速器として実現するには放射線シールドなどの軽量化が求められており、その点からも低放射線・低暗電流を確認した意義は大きいものと思われます。これらの新しい知見に関して飯野氏は Journal 論文 (NIMA-D-17-00085R1-170405) に投稿し、受理

(別紙様式 3)
(Separate Form 3)

されています。

飯野氏は今後の課題として、低温での放射線量低減に関わる比較での誤差評価を進めた科学的知見の確証と、冷却性能改善を進めた加速器システムの実現をあげ、的確な展望を持っています。

以上により飯野氏には、段階を追って適切な実験により確証を得て進める能力、困難に遭遇した時に粘り強く対処して解決まで至る能力、実験結果に対して理論的な解釈を試みて理解を深める能力、説明しきれない実験データから未知のメカニズムの存在を見出す能力、が備わっており、加速器に付随した物理現象に対する基礎、知見を持ち、また実現までこぎ着ける判断力と解決に至らしめる能力を獲得していることがわかり、博士にふさわしいと判断しました。