成果報告書

「超伝導加速による次世代小型高輝度光子ビーム源の 開発」 (高電圧DC電子源開発)

平成23年5月

株式会社日立ハイテクノロジーズ

本報告書は、文部科学省の科学技術試験研究委 託事業による委託業務として、株式会社日立ハイ テクノロジーズが実施した平成22年度「超伝導 加速による次世代小型高輝度光子ビーム源の開 発」(高電圧DC電子源開発)の成果を取りまと めたものです。 1. 委託業務の目的

超伝導高周波加速器技術とレーザーパルス蓄積技術の融合によって、ポストゲノム時代の 生命科学研究、ナノ構造解析、創薬、医療診断、マイクロリソグラフィへの利用を画期的に 飛躍させる軟X線から硬X線領域の小型高輝度X線発生装置(10m × 6m 程度)を実現 する。本装置実現のために、高品質大強度電子ビーム生成装置、大強度・高電界超伝導高周 波加速装置、高品質短パルス大強度レーザー蓄積装置、ミクロン精度での電子ビーム軌道制 御技術及び、レーザー光路精密調整といった技術の実用化を図る。よって、超伝導高周波加 速器技術を使った 5 nm~0.025 nm 波長領域の小型高輝度X線発生装置の開発とその実用 化に必要な基幹技術の確立を行うことを目的とする。

さらに大強度安定化に必要な次の技術開発を行う。500~750kV数十mAの高電圧DC電 子源開発、高性能光L-band RF Gun開発、小型高信頼性L-band高周波源開発および3次 元4枚ミラーリング光蓄積装置開発を行う。これにより、生成するX線輝度を格段に高くす ると同時に、レーザー光の偏光を高速で制御することによってのみ可能な世界でも特筆すべ き高速可変偏光小型軟X線源を実現し、「軟X線領域における円二色性光源」として実用化 を図る。

このため、大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構、国立大学法人東京大学、 独立行政法人日本原子力研究開発機構、国立大学法人広島大学、学校法人早稲田大学、東芝 電子管デバイス株式会社及び株式会社日立ハイテクノロジーズは共同で業務を行う。

株式会社日立ハイテクノロジーズでは、高電圧DC電子源に関わる研究開発を実施する。

- 2. 平成22年度(報告年度)の実施内容
- 2.1 実施計画
 - ① 絶縁碍子評価技術の開発

平成21年度に製作した高電圧試験装置を用いて、試験碍子の耐電圧特性を測定する。真空の 質と耐電圧の関係を解明し、高耐電圧碍子設計の基礎データを得る。

本基礎データを用いて、250kV絶縁碍子を設計・製作する。引き続き、本高電圧試験装置 を用いて耐電圧特性を評価する。

2.2 実施内容(成果)

将来の小型高フラックスX線源用要素技術開発のために、本プロジェクトによって直流高圧電 子源の研究開発を進めている。日立ハイテクノロジーズのグループは、500 kV DC 電子銃の高電 圧導入部を小型化・高信頼化するために必要な絶縁碍子と高電圧ケーブルの特性評価を目的に、 高電圧試験装置を開発した。平成22年度は真空排気系を強化し実機の電子銃と同レベルまで到 達真空度を改善した。300kV電源の調整を実施し、1ppm以内の電圧安定度が確認できた。高電圧 試験装置の真空排気に1週間を要する課題が残り、並行して改造を進めた電子顕微鏡電子銃用の 段間試験装置を利用して、試験用の低抵抗碍子の耐電圧特性を評価した。評価結果に基づき高耐 圧絶縁碍子の構想設計に着手した。

2.2.1 はじめに

電子源は高輝度光子源(コンプトン光源)の性能を決める重要な構成機器である。光子源 の輝度、フラックスを大きくするためには、電子ビームのエミッタンスを小さく、かつ、平均 電流を大きくしなければならない。日本原子力研究開発機構のグループは、このような電子ビ ームの生成を目指して直流高圧電子源(DC 電子銃)の開発を行っている。われわれは、DC 電 子銃の小型化・高信頼化に取り組んでいる。小型化・高信頼化のポイントは以下の2点である。

- (1) 導電性を制御した高耐電圧セラミックス管を採用し、電子付着起因の電位分布変 動による絶縁破壊を回避する。
- (2) 電子銃と高圧電源を高耐電圧ケーブルで接続することで、装置配置の自由度を確保する。

日本原子力研究開発機構のグループが開発中の 500kV DC 電子銃は、ガードリングを採用し てセラミックス管表面への電子付着を防止することで、従来の 250kV から 500kV へと耐電圧が 大幅に向上した。ただし、ガードリングは組み込みの煩雑性と表面積増大に伴う真空排気性能 の低下が懸念されている。近年開発が進んでいる導電性を制御した高耐電圧セラミックスは、 体積抵抗率を 10^{7~12}Ω・cm に制御することで、電子付着による帯電の防止と 4.5kV/mm の沿面 耐電圧を実現できている。ガードリング無しでも耐電圧の安定化が期待でき寸法を最小化でき る。

これまでのDC電子銃とCockcroft-Walton型の高電圧源はセラミックス管を介して直付け した一体型構造が一般的であった。電子顕微鏡でも加速電圧400kV以上では一体型構造が一般 的であった。しかし、近年の1MV 超高圧電子顕微鏡では顕微鏡本体と高電圧源を高耐電圧ケ ーブルで接続する方式が実現できているが、地絡放電時に発生する倍電圧の減衰振動に耐える 高コスト設計となっている。

このように優れたポテンシャルを有する関連技術が存在するが、次世代光子源のDC電子銃 に採用するまでには多数の技術的な課題を解決しなければならない。最先端のセラミックスメ ーカは単純形状の試験片において体積抵抗率の高精度制御を実現している。しかし、高耐電圧 セラミックス管への組立てには、機械加工やロウ付けなどの接合技術、洗浄や加熱脱ガス処理 技術の確立が必須である。高耐電圧ケーブルでは特に端末部の構造と材質によって耐電圧が大 きく変動する。従って、部品レベル、処理レベルでの耐電圧評価により詳細な基礎データを蓄 積するとともに、実体系の高耐電圧セラミックス管にて耐電圧評価をする必要がある。

平成22年度は、高電圧試験装置の真空排気系を強化した。並行して試験用の低抵抗碍子を 評価し、評価結果に基づき高耐圧絶縁碍子の構想設計に着手した。これらの成果を以下に述べる。

2.2.2 高電圧試験装置の排気系強化

高電圧試験装置の概念図を図1に示す。平成21年度、日本原子力研究開発機構のグループ が開発済みの250kV DC電子銃に準拠して設計したが、目標圧力5×10⁻⁹Paを未達であった。



図1 高電圧試験装置の概念図

その大きな原因は、IP がガス放出源になっていることと推定し、IP 取外し、TMP タンデム化、 NEG ポンプ追加の真空排気構成とすることで到達圧力改善を狙った。表2に主な使用機器一覧 を示す。

図2に改善後の高電圧試験装置の外観写真を示す。初期構成での IP の替わりに NEG ポンプ を取付けてある。TMP-1は GV に直付けとし、これまで使用していた TMP-2と GV の間に設置 しタンデム化した。また、高電圧印加用のセラミック管とテストピースを載せるための直線 導入機を取付けた最終仕様となっている。

図3に排気系強化後の真空圧力の時間変化を示す。排気開始 60hr 後に 180℃×20hr のベー キングを行っている。NEG ポンプの活性化はベーキング終了後の降温時にチャンバ温度が 100℃まで下がったときに 450℃×1hr の条件で行った。ベーキング後の到達圧力は、装置の リークを停止した後、 3.8×10^{-9} Pa の圧力に到達し、目標であった 5×10⁻⁹Pa を達成すること ができた。本試験で 3.8×10^{-9} Pa に到達するまでに要した時間は、約 180hr (およそ1 週間) だが、ベーキング開始まで 60hr データ収集しており、この時間を短縮すれば、5~6 日程度で 5×10⁻⁹Pa の目標値は達成できると推定する。図 4 には 3.8×10^{-9} Pa 到達時のマススペクトル を示す。NEG ポンプ使用時で特徴的なガスとして、質量数 12 (C:炭素) のガスが僅かではあ るが常時検出された。

部位	品名	끄	メーカー	
真空 排気系	Ti製真空チャンバ	胴部(TP340) フランジ(KS100)	内表面積 1.244m ² 内容積 0.103m ³	新光産業(株) (株)神戸製鋼所
	ゲートバルブ (GV)	オールメタルゲートバルブ (48244-CE01)	オールメタル製(ボディ SUS316L) フランジサイズ : ICF203	VAT(株)
	ターボ分子ポンプ ① (TMP-1)	TMP-803M	吸気ロサイズ : ICF203 N2排気速度 : 800 L/s	(株)島津製作所
	ターボ分子ポンプ ② (TMP-2)	STP1003	吸気ロサイズ:ICF253 N2排気速度:1000 L/s	エドワーズ(株)
	NEGポンプ (NEG)	CapaciTorr D2000 MK5	取付フランジサイズ :ICF203 H₂排気速度 :2000 L∕s	サエスゲッターズ
	粗引き用ドライポンプ (DRP)	ESDP12	排気速度: 208 L/min 到達圧力: 1.6 Pa	エドワーズ(株)
真空 測定系	真空計	エクストラクタゲージ	測定子 : IE514 コントローラ : IM540	日本エリコン ライボルト(株)
	四重極質量分析計 (QMS)	MicroVision Plus (639–221–031)	UHV対応 トリアコートフィラメント	MKS(株)

表1 排気系強化後の仕様機器一覧



図2 排気系強化後の高電圧試験装置外観



図4 3.8×10⁻⁹Pa 到達時の主な残留ガス

2.2.3 低抵抗碍子の評価

試験装置の電源には透過電子顕微鏡用の 300kV 電源を使用する。調整を実施し、図5の測

定結果のように 1ppm 以内の電圧安定度が確認できた。



図5 300kV 電源の安定度測定結果(約10分間)

高電圧試験装置の一回の真空排気に1週間を要し、複数試料を入れ替えた試験に数ヶ月を 要する課題が残ったため、並行して改造を進めた電子顕微鏡電子銃用の段間試験装置を利用 して試験用の低抵抗碍子(京セラ製 TA070)の耐電圧特性を評価した。図6に段間試験装置の 概要、表2に代表的なセラミックスの物性値を示す。



図6 電子顕微鏡電子銃用の段間試験装置

型式	アルミナ 含有量	体積抵抗率 [Ω・cm]	円筒碍子抵抗 [GΩ]	線膨張係数 [×10 ⁻⁶ /℃]	ヤング率 [GPa]	備考
A479	99%	>10 ¹⁴	>20000	7.2	360	現行品
A445	89%	10^{11}	20	7.3	320	低抵抗 セラミックス
TA070	不明	>10 ⁸ (研削により調 整可能)	>0.02 (研削により調 整可能)	6.9	370	低抵抗 セラミックス

表2 セラミックスの物性値



図7 抵抗値の印加電圧依存



表3

低抵抗碍子の抵抗値 (GΩ)





結論は以下の通りである。

(1) 抵抗値仕様 2GΩの TA070 における抵抗値個体差は±10%であった(図7、表3)。温 度係数が大きく分割抵抗の代替は困難である(図8)。

(2) 電圧印加に伴い碍子表面からガスが発生し真空度が劣化した(図9)。表面電流による局所加熱が原因と推定した。分割抵抗の設置と低抵抗碍子の抵抗値を20GΩとすることにより表面電流量を1桁下げる方式を採用する。



2.2.4 高耐圧絶縁碍子の構想設計

高電圧 DC ケーブルは、絶縁材料の破壊絶縁強度ばらつきに対する安全係数2と地絡放電時



の電圧振動に対する安全係数2を考慮し、安全係数4で設計してきた。電圧振動を回避する 分圧器(CR+Damping Diodeの並列回路)を導入することにより安全係数を緩和した設計が可 能となり、250kV以上の高耐圧の見通しを得た。1段50kVのドーナツ状の分圧器を10段重ね として、低抵抗絶縁碍子とケーブル間に同軸上に配置する図10の構成を提案した。ケーブル 長3mでの静電容量300pFとインダクタンス1µHから電圧振動周波数は約10MHz、ピーク電 流10⁴Aとなるため使えるDamping Diodeが限定される。ファインメットカットコアを追加す ることで電圧振動周波数を1MHz以下に抑えられ、実用的設計が可能となる。

2.2.5 まとめ、平成 23 年度の予定

高電圧試験装置の真空排気系を強化し、実電子銃と同程度の到達真空度 3.8×10⁻⁹Pa を達成 した。並行して改造を進めた電子顕微鏡電子銃用の段間試験装置を利用して試験用の低抵抗 碍子の耐電圧特性を評価し、本評価結果に基づき高耐圧絶縁碍子の構想設計に着手した。平 成 23 年度は、500kV 絶縁碍子の詳細設計を進め、高電圧試験装置を用いて試作検証する予定 である。

2.3 成果の外部への発表

なし。

 2.4 活動(運営委員会等の活動等) なし。

2.5 実施体制

別表1の通り。

別表1 平成22年度に於ける実施体制

業務項目	担当機関等	研究担当者
 絶縁碍子評価技術の開発 	研究開発本部 主管技師	◎ 小瀬 洋一
	研究開発本部 第一部 主任技師	○ 渡辺 俊一
	研究開発本部 第一部 主任技師	橘内 浩之
	研究開発本部 第一部 主任技師	村越 久弥
	研究開発本部 第一部 技師	佐藤 修
	研究開発本部 第一部 研修員	金田 実
	ナノテクノロジー製品事業本部	大橋 利幸
	那珂事業所 新事業開発センタ	

注1. ◎:業務主任者、○:実施責任者 (業務計画書のⅡ.2章の2.業務項目別実施区分の業務項目と担当責任者に対応)

注2. 本業務に携わっている方(参加者リストに記載されている方)を、全て記入。