

氏 名 来 島 裕 子

学位（専攻分野） 博士(理学)

学 位 記 番 号 総研大甲第572号

学位授与の日付 平成14年3月22日

学位授与の要件 数物科学研究科 加速器科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学 位 論 文 題 目 超伝導空洞用大電力入力カプラに関する研究

論文審査委員	主 査 教授	絵面 栄二
	教授	黒川 眞一
	助教授	赤井 和憲
	助教授	細山 謙二
	助教授	齊藤 芳男
	教授	松田 七美男（東京電機大学）
	助教授	古屋 貴章（高エネルギー加速器研究機構）
	助教授	光延 信二（高エネルギー加速器研究機構）

## 論文内容の要旨

本研究は、超伝導空洞へ大電力を入力できるカプラ開発を行い、超伝導空洞の大電流加速応用への道を開くことを目標とする。大電流を安定に加速・運転できるように、カプラ内でのマルチパクタリングや放電の要因を解明するとともに、表面処理方法、コンディショニング方法についてその手法を確立する。

大電力用のカプラの開発を進めるにあたり、KEKB B-factory (以下、KEKBと略す)の超伝導空洞用入力カプラの実用化をそのターゲットとした。KEKBは、8GeV 電子 (HER) と 3.5GeV 陽電子 (LER) の衝突型リングを加速器でB中間子の大量発生が目的であり、電子は 1.1A、陽電子は 2.6A の大電流をリングに蓄積する必要がある。超伝導空洞は、1.1A の電子加速に使用され、300kW 級のパワーをビームに供給することになる。超伝導空洞用のカプラにおいて、KEKB 以前には 200kW 以上のパワーを入力し安定にビーム加速を行った例は無く、KEKB では全反射 300kW 級の大電力用カプラの開発が必要であった。さらに、窓破損などの事故を防止することに加え、トリップの少ない長期安定な運転を実現することが望まれる。特に 4K 低温運転中は空洞がクライオポンプの役割を果たし、カプラ近傍で真空圧力が上昇するとその放出ガスが空洞 Nb 表面に凝縮し、空洞性能を劣化させる可能性がある。また空洞のウォームアップ時には逆に空洞 Nb 表面の凝縮ガスが放出されカプラを含め空洞内は  $10^{-2}$ Pa 台の高い圧力となり、カプラ表面のコンディショニングが必要になる。このように、表面状態が空洞性能に及ぼす影響が大きく、低温であるという超伝導特有の問題が発生する。したがって、安定な運転のためには放電やマルチパクタリングによる放出ガスを抑え、表面を清浄に保つことが要求される。そこで、マルチパクタリングや放電のメカニズムを解明するとともに、表面処理、コンディショニング方法を確立することが重要になる。

以上のような要請をふまえて本論文は以下の研究内容について述べている。

まず大電力カプラの開発を行いそのパワー試験を実施した。加速の運転条件からカプラの結合係数、運転時の入力パワーなどの基本パラメータを設定し、トリスタン用のカプラを出発点とし、電界および発熱について検討、その形状を決定した。また、カプラのコンディショニング用スタンドを整備しハイパワー試験を行い、最大 870kW まで入力できることを確認すると共に、発熱、表面処理とコンディショニング状況等の基礎実験を実施した。その結果、開発したカプラは大電力用カプラとして運転可能であると判断し実運転に採用した。

次に、安定なビーム運転を目標として、カプラ形状に起因するマルチパクタリング現象をシミュレーション解析より評価した。KEKB の同軸構造では 300kW 以下の入力パワーでマルチパクタリングの発生するパワーレベルがある事がわかった。また窓部でも低いパワー領域でマルチパクタリングが発生する可能性がある。

大電力のパワーを入力した時のカプラ内の現象を研究するため、超高真空でモニタを強化したカプラのテストスタンドを新たに製作し、シミュレーション結果と概ね一致する結果を得た。窓付近での放電現象はセラミック窓表面でのマルチパクタリングにより誘起され、放電の光発生と同時に大きなエネルギー吸収が起こり、破損につながる可能性があることがわかった。

マルチパクタリングの発生するパワーレベルが存在することから、表面状態を把握するためカプラに使用した内表面の二次電子放出係数の測定を行い、マルチパクタリングを抑制する方法について考察する。カプラのコンディショニングでは電子発生後に真空悪化が観測されることから、電子による表面のクリーニング効果があると考えた。そこで、金属表面に電子を照射したときの二次電子放出係数の測定を行い電子の照射量  $10^{-3}\text{C}/\text{mm}^2$  で二次電子放出係数が70%に減少する結果を得た。二次電子放出係数の大きいセラミック窓はTiNコーティングにより二次電子放出係数が2以下に下がることを確認し、またその後のロウ付け工程で表面が汚染され、その除去のためにはオゾン水洗浄が効果的であることを示した。

さらに、マルチパクタリングの抑制とコンディショニング方法について検討を進めた。電子照射によるコンディショニングの効果を利用し、マルチパクタリングを誘起するバイアス電圧を印加したコンディショニング方法を考察した。これまではCERNでマルチパクタリングを抑制するのに用いていたが、これをコンディショニングに利用するものである。シミュレーションの結果から全反射状態では、マルチパクタリングを発生するのは軸上ノーズと腹の狭い領域に限られており、バイアス電圧を印加することにより広い領域が電子照射される事がわかった。カプラ内の全領域にマルチパクタリングを誘起し効率的にコンディショニングするにはバイアス電圧印加した方法が効果的である事が明らかになった。このようなコンディショニングを行った後は、カプラ内の真空圧力上昇は見られず安定に運転することができる。

本研究結果よりカプラの製作、表面洗浄およびコンディショニングを実施し、KEKBのビーム運転を行っている。KEKBの超伝導空洞は安定にビームを加速し、ビーム電流870mA、ビーム運転での最大入力パワーは380kWに達している。これは超伝導空洞用のカプラとしては、世界でも最高の水準であり、安定なビーム運転を実現することに成功している。

## 論文の審査結果の要旨

来島裕子氏の博士論文の内容は、Bファクトリーのような大強度電子ビーム加速器用の超伝導加速空洞のための入力カプラ（以下カプラと略称）に関するものである。大強度ビーム電流をリング内に蓄積するためには、カプラを介して高周波大電力を加速空洞に供給せねばならない。高エネルギー加速器研究機構のB-ファクトリーの場合、空洞あたり300 kW以上の電力をビームに与えねばならない。超伝導空洞用カプラーは、(1) 実質的クライオポンプでもある超伝導空洞の汚染源になり得る、(2) 運転条件により空洞からの高周波電力反射率が0%から100%まで変化する、(3) カプラーの場所的温度分布は室温から4Kに亘る、等常伝導空洞用カプラと比較してより困難な状況で動作せざるを得ない。大電流加速用の超伝導空洞システムの安定運転には、カプラー動作の安定化が不可欠であり、カプラー内部でのマルチパクタリングを解明し、カプラの効果的なコンディショニングの方法、条件を求めることが重要な課題となっている。

来島氏はまずカプラ同軸部に生ずるマルチパクタリングをシミュレーションによって解析し、同軸構造に起因するマルチパクタリングの種類、次数、強度、それが生じる高周波電力レベル等を、空洞からの電力反射率を0%から100%まで変えて詳細に洗い出した。また高周波窓部のチョーク構造を平行平板と仮定して、2ポイント・マルチパクタリングのシミュレーションを行い、反射がない場合に200 kW以下の入力でマルチパクタリングが発生するという結果を得た。次に実験的検証のために、各種のモニターを取り付けた高真空大電力カプラテストスタンドを組立てて測定を行い、シミュレーション結果と実験結果が良く合うことを初めて示した。

次にマルチパクタリングの発生と密接な関係のある表面の二次電子放出係数を同軸部の材料である無酸素銅、ピロリン酸鍍金銅、ニオブ、および高周波窓の材料であるアルミナ・セラミックについて測定した。その結果、金属表面の電子照射量を増していくと二次電子放出係数が70%程度まで下がることが分った。これは今まで経験的に行っていた高周波コンディショニングの有効性を裏付けるものと評価できる。また高周波窓の製作工程上、放出係数低減用のTiN膜を付けた後にロウ付け工程が入る。各工程後の二次電子放出係数を測定した結果、TiNコーティングで放出係数は減少するが、ロウ付け工程でまた増加すること、その後オゾン水で表面を洗浄することにより、ロウ付け前の放出係数の値まで戻せることを明らかにした。これはカプラにおいて最も重要な部分である高周波窓の製作に関して知見を加えたものと言える。

超伝導空洞の場合、ビーム加速運転中以外では入射高周波は空洞でほぼ全反射されて定在波状態となり、カプラの特定の部分しか効果的にコンディショニングを行うことができない。従って、電力が透過するようになるビーム加速運転中にカプラがコンディショニングされることになり、その結果、空洞の表面を汚染してしまう。来島氏はこの問題を解決するために、コンディショニング時に同軸の内外導体間にDCバイアス電圧を印加し、マルチパクタリングを積極的に誘起して表面のクリーニングを行う方法を提案した。バイアス電圧値を連続的に変化させることにより、内外導体上の広い範囲に亘ってマルチパクタリングを誘起できる事をシミュレーションで示し、実測によって、バイアス電圧印加がコンディショニングを確実に促進することを確認した。この結果は大電流加速用超伝導空洞

の安定運転への道を拓いたものと高く評価できる。

以上のように本研究では、超伝導空洞用大電力カプラの安定運転の障害となっているマルチパクタリングに焦点を当て、詳細なシミュレーションと大電力実験からカプラ内部で生じている現象を定量的に捉えることに成功している。この研究結果は今後の大電力カプラ研究の基礎となり得るものと評価できる。また独創的かつ効果的なバイアス電圧印可高周波コンディショニング法の開発は超伝導空洞用大電力カプラの安定化にとって重要な成果である。このような判断に基づき、本審査委員会は、申請者来島裕子氏の学位申請論文を全員一致で合格と判定した。