

DEVELOPMENT OF AN RF CAVITY FOR AN ATMOSPHERIC SCANNING POSITRON MICROSCOPE

Noriyosu Hayashizaki^{A)}, Nagayasu Oshima^{B)}, Ryunosuke Kuroda^{B)}, Ryoichi Suzuki^{B)}

^{A)} Research Laboratory for Nuclear Reactors, Tokyo Institute of Technology
2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550, Japan

^{B)} National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)
1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8568, Japan

Abstract

An atmospheric scanning positron microscope has been developed for obtaining a positron annihilation imaging of a sample mounted in the atmosphere. Then, positron microbeam has to be accelerated up to 50-100 keV to extract it from the vacuum chamber to the atmosphere through a thin film. Therefore, we have developed an RF acceleration cavity and the single-gap type was fabricated as the first phase.

大気陽電子顕微鏡用高周波加速空洞の開発

1. はじめに

産業技術総合研究所（産総研）と東京工業大学原子炉工学研究所（東工大）は、大気陽電子顕微鏡の共同開発を進めている。陽電子は物質中で電子と出会ると、 γ 線を放出して消滅する性質をもつ。その消滅時の陽電子寿命や γ 線エネルギーのドップラー拡がり、極微欠陥のサイズ（原子～nm サイズ）や濃度（ $10^{-5} \sim 10^{-7}$ ）に依存し、この原理を利用した陽電子消滅分光は、試料中の極微欠陥等を非破壊的に評価する最も有効な手法である[1]。

産総研では、電子線形加速器を利用して発生した高強度低速陽電子ビームをマイクロビーム化することにより、真空中に設置した試料に対して高い位置分解能で陽電子消滅分光を行う手法を開発した[2-7]。この測定装置は、陽電子プローブマイクロアナライザー、あるいは陽電子顕微鏡と呼ばれる。しかし、現時点では真空中への試料設置が必須となっており、測定可能な試料が限られてしまうことから、我々は陽電子マイクロビームを大気に取り出して、陽電子

寿命や消滅ガンマ線ドップラー拡がりを計測する装置（大気陽電子顕微鏡）の開発に取り組んでいる。これが実現すると、真空環境への設置が容易でない試料（液相や粉末、あるいは応力・熱などの外部負荷を与えられた試料等）に対しても、陽電子消滅分光による極微欠陥イメージング評価が可能になる。

2. 大気陽電子顕微鏡システムの構成

大気陽電子顕微鏡システムは図2に示すように、①陽電子マイクロビーム源、②ビーム加速部、③ビーム取り出し真空窓、④試料走査部から構成される。そして今回は、①および②の内容について以下に述べる。

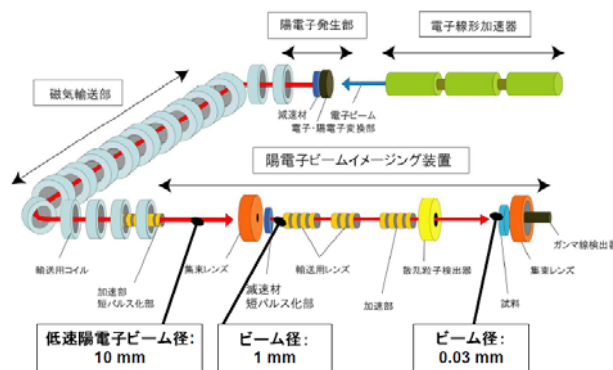


図1 産総研の高強度低速陽電子ビーム実験施設

要素技術の開発 → 融合 → 大気中陽電子顕微鏡の実現

- (1) 陽電子ビーム集束部(マイクロビーム源)
- (2) 陽電子ビーム加速部
- (3) 陽電子ビーム取り出し真空窓
- (4) 試料走査部

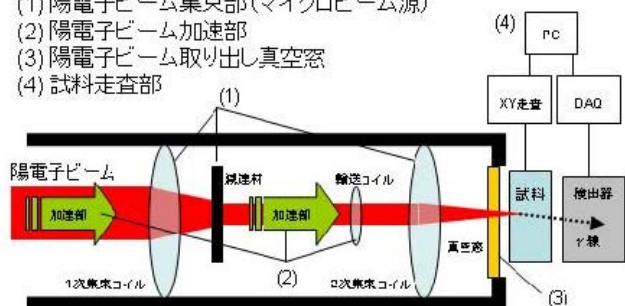


図2 大気陽電子顕微鏡の構成と要素技術

①陽電子マイクロビーム源

これまでの研究成果として、電子線形加速器を用いて発生した低速陽電子ビーム（ビーム径 10 mm）は、減速材を通過して輝度が増強され、末端の試料測定部では 0.03～0.1 mm のビーム径が得られてい

る。本装置でも同システムを利用する予定である。

②陽電子ビーム加速部

陽電子ビームを大気中に取り出すとき、真空窓に対して高い透過率を得るためには、ビームの加速エネルギーが大きいほうが望ましい。そして、幾つかの真空窓材料の阻止能を検討した結果、加速エネルギーは50~100 keV程度で実用上十分であるとの結論に至った。

加速方式としては、静電タイプと高周波タイプが考えられる。高周波タイプの場合は、陽電子消滅分光の測定時間を短くするために、CW運転が理想となる。また、静電タイプの場合には、産総研の既存システムでは、試料測定部に高電圧を印加する必要があるが、絶縁上の問題から十部な加速が得られない可能性がある。

本研究では、これらの点を総合的に考えて、試料設置部に制約条件のない、CW運転が可能な小型高周波加速空洞を開発することにした。

3. 高周波加速空洞の開発

3.1 設計コンセプト

陽電子大気顕微鏡用高周波加速空洞の開発は、利用可能なリソースの関係から、段階的に進めることにした。すなわち、CW運転が可能な小型高周波加速空洞を最終目標とするが、まずは製作が簡単な常伝導キャビティを初号機として製作し、高周波増幅器(既存のパルス型クライストロン)と組み合わせることで原理実証試験をおこない、必要技術の蓄積をおこなう。

今回開発する常伝導キャビティは低コスト・簡便性を重視して、以前に東工大で開発実績のあるシングルキャビティと同じタイプにすることにした。ただし、その採用にあたっては、次の条件に留意しておかなければならない。

- ①高周波電力の供給はN型同軸ケーブル利用
- ②オリジナルタイプでは冷却構造が空冷になる
- ③Oリングとボルトによる組み立て
- ④各部での発熱を考慮したパルス運転になる

なお、計算誤差や加工誤差などの影響や、実験時の温度環境などによって共振周波数は変化する。そこで前者に関しては、キャビティ内面を切削加工することで共振周波数の調整をおこない、必要があれば銅ロッドを用いたチューナーにより補正することにした。そして後者については、実験室の基準温度を27°Cと仮定して、可能な範囲でクライストロンの運転周波数の調整(2856 ± 3.5 MHz)により制御するものとした。

3.2 全体設計

全体寸法は東工大シングルキャビティに準拠し、直径160 mm、全長140 mm程度とした。構造的には、前述のようにキャビティ中央部における分割構造となり、組み立てはOリングとボルト締結によりおこなう。RFコンタクトにはインジウムワイヤを用いる。また、高周波カップラーやチューナーを取り付けるためのポートをハーフセル毎に2ヶ所ずつ、合計4ヶ所設けている。真空排気はビームポートを通じておこなう。

材料および加工方法については“無酸素銅製の本体にステンレス製ポート部品のロウ付”を採用した。そして、既存装置との取り合いの関係から、フランジ類は全てコンフラットタイプとした。

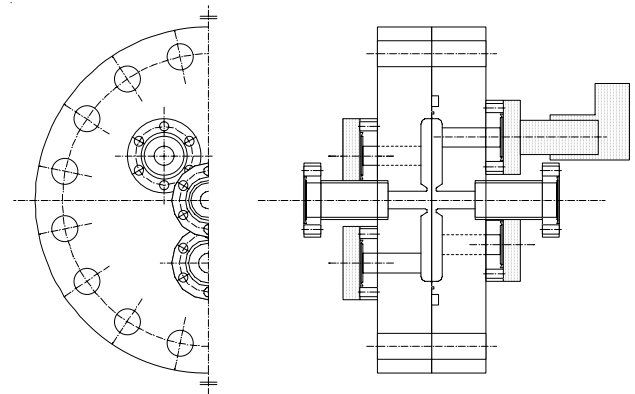


図3 陽電子大気顕微鏡用加速空洞初号機の形状

3.3 高周波設計

今回の高周波加速空洞ではTM₀₁₀モードによって励振される高周波電場をビーム加速に使用する。その共振周波数は空洞寸法によって変化するため、電磁場解析ソフトウェアSUPERFISH(2次元)およびMW-Studio(3次元)によって設計をおこなった。当然ながら、前者のほうが計算メッシュサイズを細かくできるので精度がよい。このため基本設計にSUPERFISHを使用し、ポートの影響などはMW-Studioで評価した。

加速空洞の長さや各部のカーブ半径の高周波特性に対する影響について評価した結果、空洞直径が64~66 mm付近でQ値が8600と比較的大きくとれることがわかった。しかし、ビームポートフランジとの取り合いから、高周波ポートの中心位置を一定以上小さくできず、そのままの空洞直径では採用することが難しいことがわかり、これを解決するためにQ値は当初案よりも小さくなってしまったものの、最終的な空洞直径は76 mmにした。また、高周波ポートの影響はMW-Studioにより-11 MHz程度と予想した。

前述したように各種の要因によって、加速空洞に

は周波数調整が必要となる。しかし、その完成後に我々が選択できる調整手段は少なく、チューナーを使用するか、形状の追加工をおこなう程度である。加速空洞への高周波ポートへの銅ロッド挿入による周波数チューニングは Q 値を減少させるため、念のため準備はしておくものの使用しないことを基本とした。また、使用する場合においても、これは共振周波数を上昇させる方向に作用するため、加速空洞完成時の共振周波数が運転周波数よりも低いことが条件となる。

したがって現実的には、加速空洞形状の追加工による調整が最も効果的な方法となるが、共振周波数への影響の大きさや空洞性能保持の観点から、加工可能な領域は限定されてしまう。過去の例などを参考に、今回のキャビティでは空洞の赤道部付近を切削することを考え、設計段階から周波数調整のための突起部を設けておくことにした。その切削は共振周波数を低下する方向に作用するため、設計時には共振周波数を 2856 MHz よりも高く設定しておいた。

3.4 製作と高周波特性測定

高周波加速空洞の基本加工後、ネットワークアナライザを用いて共振周波数と Q 値を測定した。加速空洞の所定位置に O リングとインジウムワイヤを配置し、トルクレンチを使用して 5 N/m の強さでボルト締めをおこなった。また、測定時の温度環境は、なるべく実験室と同じになるように 25~27 °C 程度とした。

そして、加速空洞の初期状態を確認するために、高周波カップラーの結合度を小さくして、なるべく周波数に影響がない状態で、透過法により共振周波数を測定した。その結果、予定通りに共振周波数は運転周波数よりも若干高めの 2860.65 MHz (大気)、 Q 値は 4900 (計算値の 87.5 %) が得られた。また、加速空洞内部を真空状態にして共振周波数を測定したところ、大気状態に比べて約 0.8 MHz 高くなることが確認された。

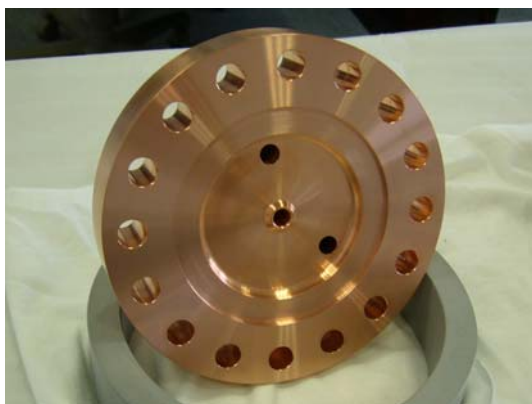


図 4 大気陽電子顕微鏡用加速空洞初号機

その後、前述の調整用突起部を切削することで共振周波数を微調整し、結果的に 2 回の調整削りによって 2855.39 MHz (大気) の状態が得られ、真空状態において所定の周波数になった。

3.5 現在の状況

完成した高周波加速空洞は、大電力予備試験として半導体アンプによってパルス高周波電力 (10 Hz, 4 μ s) を最大 240 W まで投入し、問題なく動作することを確認した。また、最終的な陽電子ビーム加速試験は、並行して開発が進められている他の要素技術とあわせておこなう必要があるため、現在は電子ビームによる加速空洞単独での性能試験を計画し、電子銃やクライストロンなど実験システムの準備を進めている。

4. まとめ

大気陽電子顕微鏡装置の実現に向けて、産総研と東工大は共同で要素技術の開発をおこなっている。そのひとつである陽電子ビーム加速用高周波加速空洞については、これまでに初号機の製作を完了し、現在は性能試験に向けて準備を進めている。なお、本装置の高周波加速空洞の製作にあたり、タイム(株)の皆さまには大変お世話になりました。

参考文献

- [1] 陽電子計測の科学, 日本アイソトープ協会, 丸善 (1993).
- [2] R. Suzuki, Y. Kobayashi, T. Mikado, H. Ohgaki, M. Chiwaki, T. Yamazaki and T. Tomimasu, Jpn. J. Appl. Phys., Part 2 30, L532 (1991).
- [3] N. Oshima, R. Suzuki, T. Ohdaira, A. Kinomura, T. Narumi, A. Uedono, and M. Fujinami, J. Appl. Phys. 103, 094916, (2008).
- [4] N. Oshima, R. Suzuki, T. Ohdaira, A. Kinomura, T. Narumi, A. Uedono, and M. Fujinami, Mater. Sci. Forum, 607, 238 (2009).
- [5] N. Oshima, R. Suzuki, T. Ohdaira, A. Kinomura, T. Narumi, A. Uedono, and M. Fujinami, Appl. Phys. Lett. 94, 194104, (2009).
- [6] 産総研プレスリリース「陽電子を用いた実用的な3次元極微欠陥分布イメージング法の開発」2008年8月
- [7] N. Oshima, R. Kuroda, C. He, A. Kinomura, T. Ohdaira, H. Toyokawa, R. Suzuki, N. Hayashizaki and T. Hattori, Phys. Stat. Sol.(c)4, 4023 (2007).