金属磁性体装填型高周波加速空胴の片面間接冷却

杉浦彰則、三須敏幸、北條　悟、宮原信幸、金澤光隆、岩田佳之、村上健、山田聰
放射線医学総合研究所　〒263-8555 千葉県千葉市稲毛区穴川 4-9-1

概要

放射線医学総合研究所で現在検討中の FFAG 加速器では、繰り返しが速いため高加速勾配を有し、かつ広い加速周波数帯域の空胴が必要になる。そのため、Q 値が低く高透磁率を有する金属磁性体を装填した無同調加速空胴を予定している。しかし、高加速勾配を実現させるためには加速空胴に大電力を投入する必要があり、コアから発生する熱の除去が問題になる。本報告では、空胴のインピーダンス特性を低下させずに、コアの冷却を可能とする片面間接冷却について報告する。

1　はじめに

現在検討している FFAG 加速器では、200Hz の繰り返しで 0.2MHz から 3.1MHz といった広帯域での周波数掃引、約 40kV/m の加速勾配を必要とする[1]。そのため放医研の FFAG では、無同調かつ高加速勾配の空胴を実現する為に高透磁率磁性体ファインメットコアを空胴内に装填予定である。このコアは、金属リボンを巻いた特有の構造(図 1)をしており、各リボン層間をSiO_2により絶縁をとることによって、高周波特性を得ている。又、使用限界磁束密度が高く、キューリー点も 500℃程度と高い。

加速勾配を得るために、この加速空胴には少なくとも 0.1W/cc の電力密度で電力を投入する必要がある。そのほとんどがコアでの発熱となるため、コアの冷却が必要不可欠となる。

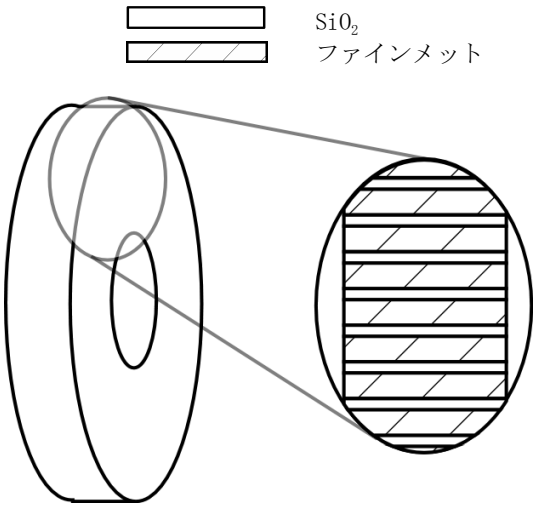

図１：ファインメットの断面構造
18μｍ厚のファインメットリボンと 2μｍ厚のSiO_2の絶縁層が交互に積層している構造有する。

冷却方法としては、直接冷却水の中にファインメットコアを入れる直接冷却と、中に冷却水が流れる金属の板をファインメットコアに接触させる間接冷却が試されている。しかし、直接冷却方式では、空胴内部を水で満たすため、冷却水の誘電率により空胴自身の特性が下がる等を考慮して、放医研の FFAG では、間接冷却を用いることにした。

2　間接冷却におけるコアインピーダンスの低下

間接冷却の場合、コアを両面から冷却板で挟む方法が考えられる。この場合、冷却板とコアを接触させる際に、コアと冷却板間の絶縁を確保する必要がある。これは、コア内部を周方向に通る磁束に対して、ファインメットコアの軸方向とコアを両面から挟む金属の冷却板に電流が流れることにより、コアの周方向に流れる磁束を打ち消し、コアのインピーダンスの低下を及ぼすからと考えられる。この絶縁が比誘電率 2.8 のﾎﾟﾘﾌﾟﾛﾋﾟﾚﾝｼｰﾄ 2mm ずつであっても冷却板がない状態と比べると、図２ ③’で示すようにコアのインピーダンス（Z=Rs＋ｊXs）の虚数成分 Xs が低下する。この Xs の低下は、コアのインピーダンスを加速空胴の等価回路である並列共振回路の R 及びωL とみなすと、空胴のシャント抵抗の低下につながる。また、この様な絶縁材では熱伝導率も低いため、冷却効率の低下も避けられない。

一方、コアの片面だけに冷却板を接触させ反対側を開放した（片面間接冷却）場合では、冷却板がない状態に比べてインピーダンスの低下を抑制できることがわかった。（図２ ②及び②’）[2]。

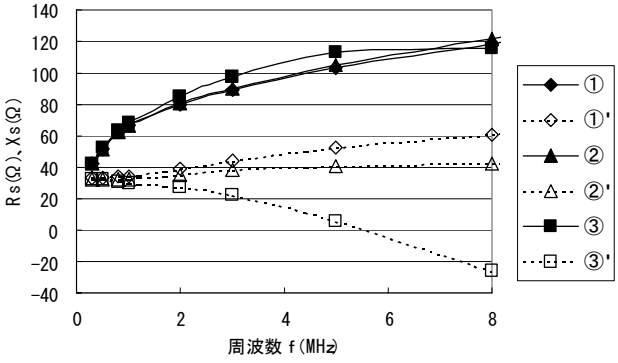

図２：冷却方法の違いによるコアインピーダンス（Rs＋ｊXs）の変化　ファインメットコア（FT-3M,外径Φ650ｍｍ,内径 290mm,厚さ 25mm）を用いて測定した。

① ファインメットコア単体の Rs
①’ ファインメットコア単体の Xs
② コア片面に冷却板を接触させた（片面間接冷却）時の Rs

②’ コア片面に冷却板を接触させた（片面間接冷却）時の Xs
③ コアを両面から冷却板で挟み、コアと冷却板間に比誘電率 2.8 のﾎﾟﾘﾌﾟﾛﾋﾟﾚﾝｼｰﾄ 2mm ずつを入れた時の Rs
③’ コアを両面から冷却板で挟み、コアと冷却板間に比誘電率 2.8 のﾎﾟﾘﾌﾟﾛﾋﾟﾚﾝｼｰﾄ 2mm ずつを入れた時の Xs

3 コアと冷却板の接合方法

コアと冷却板間の絶縁を確保しなくてもインピーダンスの低下を抑えることができることから、コア片面と冷却板との間を埋める接合材に導電体を使用することが可能である。

接合材を金属にすれば、接合時に溶かして塗ることができるため、コア接合面の 0.3ｍｍ程度の凹凸から生じる、コアと冷却板間の空気層が埋まり、熱接触を上げられる。また、金属的強度ををを利用することにより、接合強度を上げることもできる。

コアの片面と冷却銅板を以下の方法で接合させた。ファインメットコア（FT-3M,外径Φ230ｍｍ,内径 85mm,厚さ 25mm）及び冷却用銅板を用意し、コアの片面にイオンプレーティングで 10μm 程の銅の膜を作った。この面と冷却用銅板の接合面を 210℃に熱して、濡れ性及び拡散性がよいインジウムにて接合させた。このインジウム接合後のコアとコア単体を測定して比較した（図３）。

金属による接合によって、コアと冷却板が電気的に導通していると考えるが、接合前のコアと接合後のコアのインピーダンスの虚数成分 Xs で低下を抑えることができている（図３）。

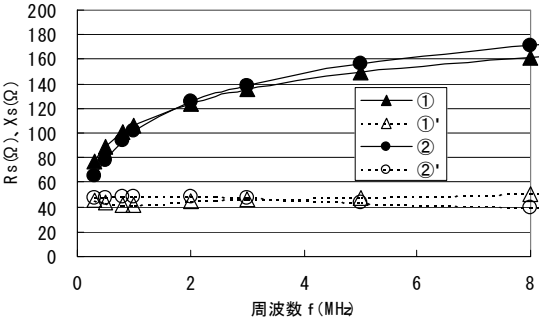

図３：コア単体とインジウム接合後のコアとのインピーダンスの比較（Rs＋ｊ Xs）
① インジウム接合前のファインメットコア単体の Rs
①’ インジウム接合前のファインメットコア単体の Xs
② コア片面と冷却板をインジウム接合した時の Rs
②’ コア片面と冷却板をインジウム接合した時の Xs

コアと冷却板間を接触させた時と金属接合した時のコアインピーダンスが変化しないことが確認できた。よって、熱接触が良く、接合強度を上げられる金属で接合する方法をとることにした。

4 冷却試験

前章のインジウム接合されたコアを使用して、コアの冷却能力と接触のムラを調べた。冷却用銅板に 3ℓ/min で 30℃の冷却水を流しながら、１MHｚ、400W の RF 電力を 25 分間投入し、冷却板が接合している面とは反対側のコア表面最高温度の温度上昇を２次元赤外線サーモグラフィーで１分ごとに測定した。

設計した加速空胴ではコアの体積当り、平均で 0.1W/cc の電力密度を用するが、冷却試験では条件を厳しくして平均で 0.4 W/cc の 400W にて測定した。

図４にコア表面最高温度の時間変化、図５に電力投入から 25 分後に撮影した画像を示す。

図４より、インジウムにて接合させたコア表面の最高温度は 70℃に抑えられている。図５のコア内側の表面温度が高くなっているが、コアの内側に向かって磁束密度が高くなっているからと考えられる。空気の層などによる接触のムラが生じた場合にはコア表面に斑点状に温度差が生じるが、現れていないことが確認できる。

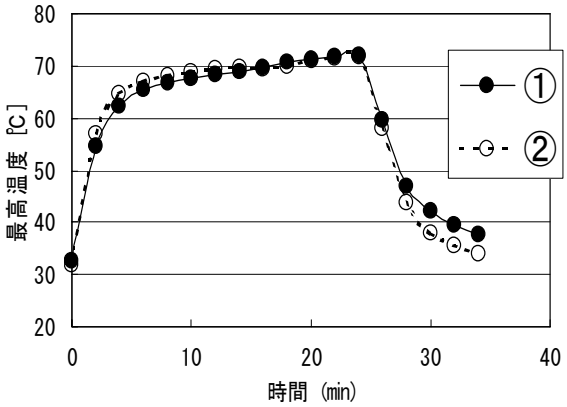

図４：冷却試験時のコア表面最高温度の時間変化（25 分に電力を off）
① インジウム
② インジウム熱サイクル試験後

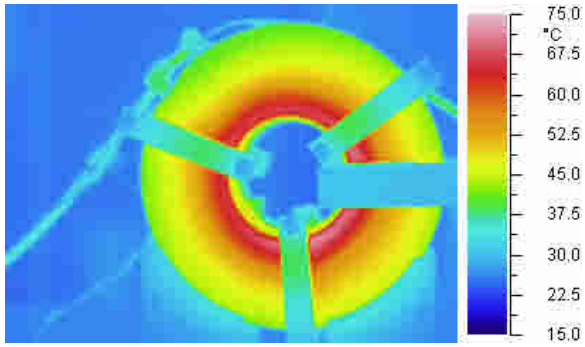

図５：コア表面温度（電力投入から 25 分後、熱サイクル試験前）
２次元赤外線サーモグラフィーを使い、インジウム接合させたコアの温度分布を測定した（熱サイクル試験前）。電力投入から 25 分後に撮影した画像。

コアと冷却板の接合部分の熱疲労等の劣化を調べるため、熱サイクルによる耐久試験も行った。前章の測定方法を利用して、400W の電力を 10 分毎に入り切りし、200 回の加熱と冷却を繰り返した。2 次元赤外線サーモグラフィーを用いて測定した、熱サイクル試験前のコアの表面温度と、熱サイクル試験後のコアの表面温度を図５， ６、に示す。共に 400W の電力を 25 分間投入した時のコア表面の温度分布である。共にコアの中心部分に熱が集中し、熱疲労等からくる温度上昇も見られない。耐久試験前と後で熱疲労などによる変化が無いことがわかる。

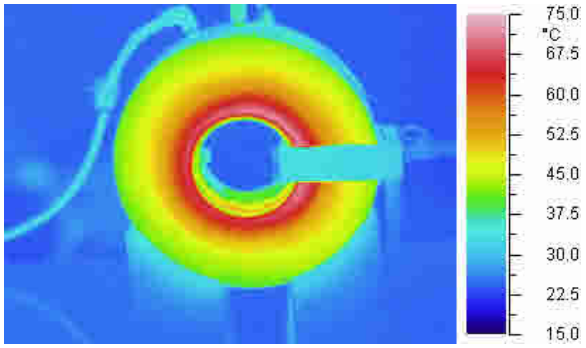

図６：熱サイクル試験後
2 次元赤外線サーモグラフィーを使い、熱サイクル試験後にインジウム接合させたコアの温度分布を測定した。電力投入から 25 分後に撮影した画像。

5　考察

今回検討中の FFAG では Q 値が低く高透磁率を有する金属磁性体ファインメットコアを装填した無同調加速空胴を予定しており、大電力投入によるコアの発熱が問題となる。間接冷却ではコアのインピーダンス特性の低下が避けられないが、本研究では、ファインメットコアを片面から間接冷却することにより、コアのインピーダンス特性の低下を抑えることにした。

また、接触面を金属で接合した場合でもコアインピーダンスは変化しないことが確認できた。そのため、熱接触を良くし、接合強度を上げることも可能である。

冷却試験ではコア片面と冷却板をインジウムを介してムラ無く接合することに成功した。また、インジウム接合部分の熱疲労等による劣化も危惧された事から、200 回の熱サイクル試験も行ったが、冷却能力に変化は見られなかった。コア片面と冷却板をインジウム接合した間接冷却方法が有効であることが示された。

今後は、金属接合に用いたイオンプレーティング及びインジウムが高価なため、接合材料の選定およびコアの大型化に伴う問題の抽出を行う予定である。

参考文献

[1] 三須敏幸他、「がん治療用小型 FFAG 加速器の開発研究Ⅰ」、Proceedings of the Linear Accelerator Meeting in Japan, 2003

[2] 北條悟他、「ファインメットコア片面の間接冷却構造を有する無同調キャビティ」、Proceedings of the Linear Accelerator Meeting in Japan, 2003