

電子ビーム冷却技術サイクロトロンメーザークーリング(CMC)

長谷川 崇^{1,A)}、佐藤 勇^{B)}、早川 建^{B)}、田中 俊成^{B)}、早川 恭史^{B)}、横山 和枝^{B)}、
石渡 謙一郎^{A)}、中尾 圭佐^{A)}、稲垣 学^{A)}、城所 明生^{A)}

A) 日本大学大学院理工学研究科量子理工学専攻

〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1 日本大学理工学部船橋校舎

B) 日本大学量子科学研究所 電子線利用研究施設

〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1 日本大学理工学部船橋校舎

概要

加速器においてビームのエミッタンス、運動量の広がりには重要なパラメーターであり、これらは一般に小さいことが望ましい。これは、近年の電子銃の開発にもみられ、特にFELなどの発振や、貯蔵リングにはもっとも重要なパラメーターであるとされている。ビームのエミッタンスや運動量広がりを小さくする操作(位相空間内の粒子密度を上げる操作)をビーム冷却(Beam Cooling)と呼んでいる。現在、確率冷却やイオンレーザー冷却等の方法がよく知られているが、数秒から数十秒にかけて繰り返し冷却しなければならず、エネルギーなどにも制約がある。一方、今回の方式であるサイクロトロン・メーザー・冷却では、従来よりも100万倍以上はやい数十nsでの冷却が可能とされ、冷却操作の繰り返しも必要ではない。つまり、冷却粒子線の種類、強度、パルス状であるか等の制約が一切ないという特徴がある。本研究はこの実証実験装置の現状と今後の計画を報告する。

1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設(LEBRA)では、東京電子株式会社と「サイクロトロン・メーザー・冷却に関する開発研究」に関して共同研究を実施することとなった。Cyclotron Maser Cooling(CMC)とは誘導放射によってビームを一気に冷却する方法である^[1]。1993年にCMCを示唆する現象が大阪大学核物理センターで確認され、低速電子ビームについては、この原理でビームの冷却と加熱が制御できる可能性が判明している^[2]。熱電子を加速してソレノイド磁石内に投射し、ソレノイド軸に垂直な面内の運動成分を旋回運動に変えたうえで、高周波空洞に導きTEモードの共鳴rf電場をビームに垂直に印加することによって、熱運動エネルギーを誘導放射で一気に取り除く強制冷却の現象である^[3]。CMCの実験装置は、住友重機械工業株式会社と池上栄胤(大阪大学名誉教授、ウプサラ大学客員教授)が共同研究にて製作したものであるが、このプロジェクトの終了と共に2003年度からLEBRAに移設され、実験が行われることとなった。

2. CMCの基本原則

CMCは荷電粒子線の熱エネルギーを相対論的なランダウ順位エネルギー

$$n\omega_c/\omega$$

ω_c : サイクロトロン周波数

ω : 相対論的エネルギー因子

に量子化した上で、周波数 ω_{rf} の高周波による誘導放射で取り除くという基本原理の元に成立している。旋回周波数である ω_c/ω は、 ω に依存し、非線形の放射特性のため $\omega_c/\omega < \omega_{rf}$ の粒子は旋回エネルギーを放出し、 $\omega_c/\omega > \omega_{rf}$ の粒子は高周波エネルギーを吸収する。この結果、粒子のエネルギーは $n\omega_{rf}$ に収束し、旋回位相はバンチする。高周波の強度が臨界値より小さいと、位相バンチはするが、エネルギー幅は増加し過熱(heating)する。一方、高周波の強度が臨界値より十分大きいと、位相バンチとエネルギー幅の減少すなわち冷却(Cooling)が起こる。また、ウプサラ大学(スウェーデン)の実験では、これと符号するラーモアパターンが実際に観測されている^[4]。しかし、旋回電子を取り出して特性を調査することはできなかった為、CMC実験装置を製作し、より詳細なデータを集めることになった。



図1 電子銃

¹ E-mail: t-hasegawa@lebra.nihon-u.ac

3. CMCの装置概要

3.1 電子銃および電子銃用電源

電子銃は東芝ホクト電子株式会社製のブラウン管用電子銃FM440L-A3(図1)を使用している。カソードにはBaを使用しており、低電圧でもエミッションが得られるようになっている。このタイプの電子銃には5段のグリッドがついており、フォーカスの均一性がすぐれているので、扱いやすい。

また、この電子銃用電源の仕様は表1のようになっている。この電子銃を用いた実験装置では発生電子線エネルギーは最大100keVでビーム電流100 μ Aを実現している。

表1 電子銃用電源の仕様

加速電源	DC0 ~ 100kV
加速電源安定度	5 \times 10 $^{-4}$ 以下
ヒーター電源	DC9V
グリッド1 電源	DC-100V
グリッド2 電源	DC+400V
グリッド3 電源	DC+10kV
グリッド4 電源	DC+500V

3.2 高周波電源

本実験装置では一般的なLinacのようにrf場による加速は行っていない。しかし、rf空洞内で電子に高周波による誘導放射を行わせるため、rf増幅器として数種類のアンプを使用している。装置の性質上、使用される高周波源には、その周波数および出力が安定でなければならない。今回、巡回電子を取り出して評価を行う為、以前実験が行われていたウプサラ大学の結果から算出すると、2GHz~2.2GHzでの帯域でrfパワーは500W以上が望ましい。高周波増幅装置の仕様は表2のようになっている。

表2 高周波増幅装置の仕様

中心周波数	2.1 GHz
周波数可変範囲	\pm 0.1 GHz
最大出力	1kW/CW
出力可変範囲	0.01 ~ 1.0kW
主増幅管	クライストロン (Varian:4K3SL)
利得	40dB 以上

3.3 RF空洞

ソレノイドコイルの定常な磁場中に入射した電子はサイクロトロン周波数で巡回運動を行う。CMCを

実現するうえで、ソレノイドコイルの磁場は重要なキープポイントになっており、そのためソレノイドコイルを励磁する電源にも強力かつ安定なものを使う必要がある。本実験装置ではDANFYSIK社(デンマーク)製のModel1853を使用している。この仕様は表3に示した。rfキャビティには、電子にTEモードのrf場をあたえるため、長さ20cmの矩形型導波管が6本入っており、その周りをソレノイドコイルが取り囲むという形になっている。(図2および図3)

表3 ソレノイドコイルと電源の仕様

最大出力電流	110A
最大出力電圧	67V
電流安定度	\pm 3 \times 10 $^{-4}$ (30分間) \pm 1 μ A~10 $^{-4}$ (8時間)
最大磁場	0.12T

3.4 ステアリングコイル、Qマグネット

電子銃からでた電子がソレノイドの磁場に絡みつきやすくするために電子の軌道を少しずらしてキャビティ内に入射させる必要がある。そのため、rf空洞に入る直前にステアリングコイルを置き、ある程度の入射角をもたせるようにしている。また、電子ビームが本体を通過して、実験に支障なくモニター系まで到達できるように、Qマグネットやステアリングコイルを本体通過後にも設置している。

3.5 電子線モニター系

電子線がCoolingまたはHeatingしているのかを容易に観測する為に、ソレノイド空洞内に可動式のスクリーンモニター(蛍光板)を設置している。これを下流側の窓から見ることで、ラーマー円を観測することができ、電子ビームのCooling状態を知ることができる。

空洞から取り出した電子ビームはマグネット等で曲げ、通過後の軌道変化を用いて、ビームのエネルギースペクトルを評価する。

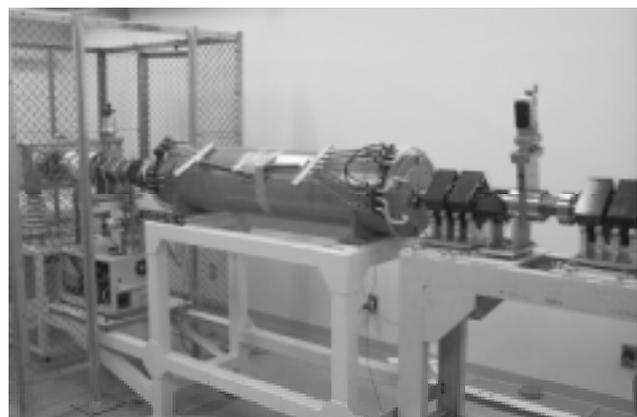
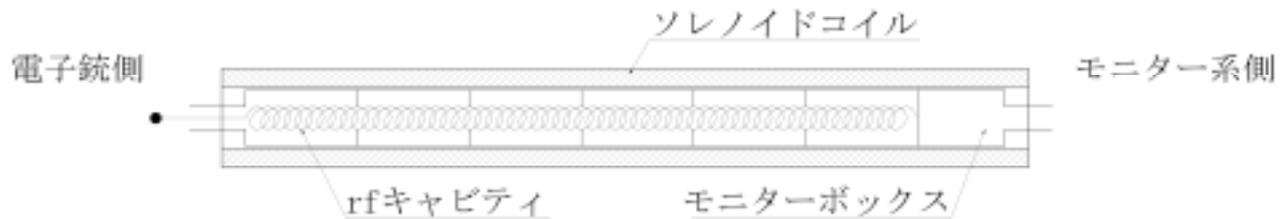


図2 CMC実験装置



4. 実験装置の現状

実験装置が移転されてきたばかりなので組み立てを中心に行っている。現状は装置全体のアライメントおよび電子銃のカソードの活性化を終了し、実際に電子を加速し、モニターボックス内にあるスクリーンモニターの発光を確認した。さらに、rf系統や各種電源系統の配線、冷却システムの整備などを行っている。現段階でのCMC装置は図2のように設置されている。

5. まとめと今後の計画

ビーム冷却を誘導放射の観点から実験的に検証した研究は、国内外においても論文数が少ない。そのため、この物理現象を明確にする決定的な実験的検証が不十分であり、CMC装置の実用化を目指した研究開発はあまり行われていないのが現状である。

今後、実験を進めていくうえでまずは理論の構築と観測事実を正確に把握することが最重要となる。特に冷却が完了するCMC条件の正確な値を見つけることがこのプロジェクトを成功させる最大の鍵となるだろう。

参考文献

- [1] H.Ikegami, "Cyclotron maser cooling of electron and ion beams", *phys.Rev.Lett.*64, 1737(1990)
- [2] F.Kullander, "Cyclotron Maser Cooling", PhD Thesis, Osaka University, 1993
- [3] 池上栄胤, "メーザー冷却とコヒーレントビームー量子力学的確定性の世界ー", *パリティ*,13,65(1998)
- [4] H.Ikegami et al., "Cyclotron Maser Cooling Towards Coherent Particle Beams", *Nuclear Instruments and Methods in Phys. Res.*, to be published.