

サイクロトロン電磁石の高安定化

斎藤高嶺^{A)}、二宮史郎^{A)}、大成善之助^{B)}

^{A)} 大阪大学核物理研究センター 〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 10-1

^{B)} 住重加速器サービス

概要

大阪大学核物理研究センター (RCNP) のサイクロトロン施設では高いエネルギー分解能のビームと高分解能スペクトログラフ グランドライデンを用いた高分解能実験が行われている [1]。高エネルギー分解能のビームを長時間安定に加速するためにフラットトップ加速と共に磁場の安定度が重要な要素であることが明らかになっている。RCNPサイクロトロンではAVFサイクロトロン及びリングサイクロトロンの磁場に関して鉄心温度の安定化によって 10^{-5} / 週以上の安定度が実現され高精度ビーム加速の重要な条件となっている。

この報告では温度安定化の方法と現状を報告する。

1 磁場安定化の条件

電磁石の磁場はコイルの電流、鉄心の形状及び透磁率によって決まる。安定化のためにはこれらを安定化する必要がある。鉄心の形状と透磁率を一定に保つためには温度の安定化を行う必要がある。したがって電磁石を安定に作動させるためには電流の安定化と共に鉄心温度の安定化が必要となる。電磁石の主要な機能は磁場発生領域の大きさと磁束密度であるがそれら以外にも複雑な磁場の空間分布がありパラメータは多数でしかもサイクロトロン等の加速器においては粒子ビームが繰り返し数百回周回することもあり変動の影響は加速電圧等よりはるかに大きく、磁束密度に関しても 10^{-6} 程度の安定度が要求さる。磁場発生領域の大きさの変化はビーム偏向用の電磁石の場合無視できない。ビームの偏向量は磁束密度と磁場中の軌道の長さの積によって決まる。鉄心の温度が上昇すると磁極間隙と磁場発生領域は増加する。磁束密度は磁極間隙に反比例して減少し、磁場中の粒子軌道長は磁場発生領域と共に増加する。磁場中の粒子軌道長の増加率と磁束密度の減少率はともに鉄心の線膨張率と温度変化の積となるので一様な温度変化の場合その影響は打ち消しあうことになる。サイクロトロンの電磁石のような大きな電磁石では全体の温度が一様に変化することはほとんど無く温度分布の状態が変化するため鉄心形状の変化は非常に複雑になり局所的に大きな変形を生じることもある。

AVFサイクロトロンの電磁石では運転時の鉄心の比透磁率は十分大きく磁気抵抗の約98%以上が磁極間隙に依り鉄心の寄与は2%以下なので透磁率の温度係数が鉄材の線膨張率の10倍としても温度変化による磁束密度の変化に対する透磁率変化の寄与は20%以下となる。

AVFサイクロトロンは温度変化が十分小さい状態では磁極温度とリターンヨーク温度はそれぞれ独立に異なる温度変化をしていると考えられる。この仮定で磁極間隙の変化は図1のような構造の電磁石では次のようになる。

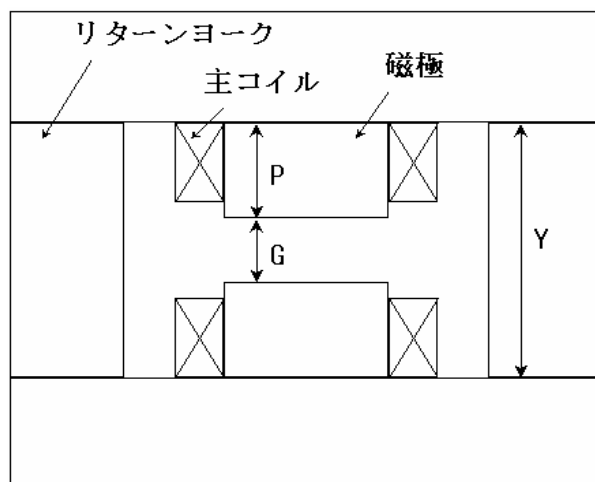


図1 AVF電磁石模式図

磁極間隙

$$G=Y-2P \quad (1)$$

鉄心の線膨張率を α 縦ヨークの温度変化を dy 磁極の温度変化を dtp とすると

磁極間隙の変化 dG は

$$dG=dY-2dP=\alpha Ydy-2\alpha P dtp \quad (2)$$

$$dG/G=\alpha /G(Ydy-2Pdtp) \quad (3)$$

AVFサイクロトロンのバレー部では

$Y/G=5.33$, $2P/G=4.33$ なので

$$dG/G=\alpha (5.33dy-4.33dtp) \quad (4)$$

磁極温度とリターンヨーク温度の実測データから磁極間隙の熱膨張による磁束変化を計算し磁束密度の実測値と比較したものが図2である。これから磁場の温度による変動は鉄心の熱変形によるものであることが確かめられた。図に示されている様に測定を行っていた間の温度変化は 0.1°C 以下に保たれていたにもかかわらず磁極間隙は大きく変化して、それに従って磁場変化が生じている。構造物の温度変化では温度変化が一様でないパイメタルのように膨張率から求まる変形量より遙かに大きい変形を生じることもある。この様に 10^{-6} 以下の磁場変化を実現するためには 0.01°C 以下に温度変化を押さえる必要があることが分かる。リングサイクロトロンのセクター電磁石は鉄心が大きくて磁極間隙が小さく設計されており、磁気抵抗に対する鉄心の寄与がAVFサイクロトロンより大きく約10%になる。このため温度変化による磁束密度の変化に対する鉄心の透磁率変化の寄与は熱変形の寄与と同程度の大きさとなり温度変化と磁場変化の関係は更に複雑になる。いずれにしてもビームに対する電磁石の総合

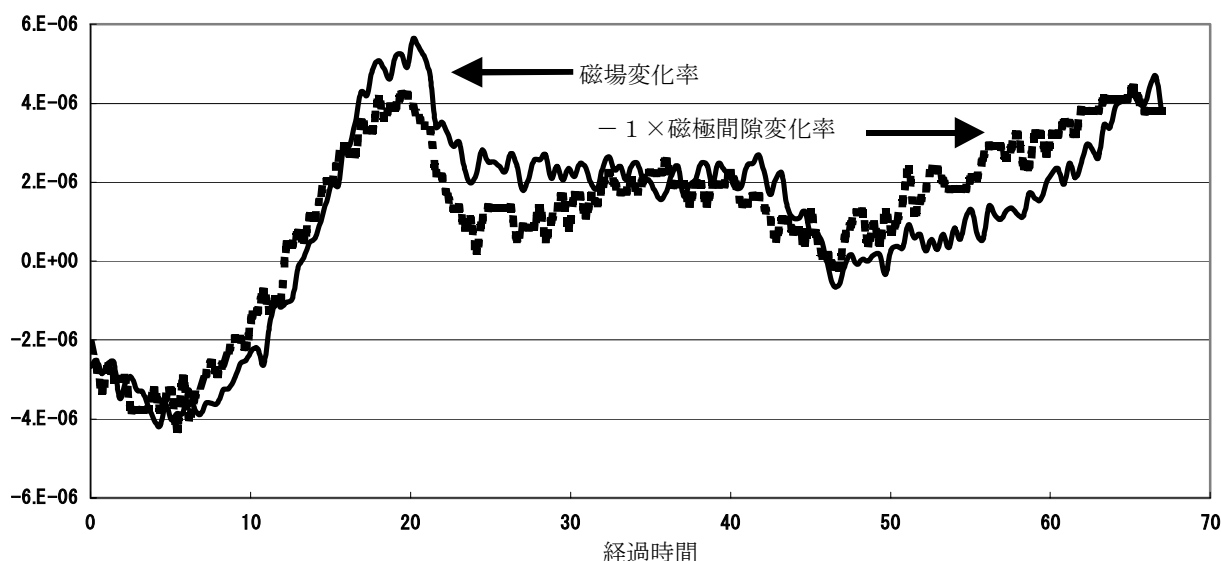


図2 温度による磁極間隙変化と磁場変化

的な効果は温度変化によって複雑な影響を受けるので電磁石磁場の完全な安定化は鉄心の温度変化を防ぐことによつてのみ可能となる。

2 温度変化の要因

R C N Pサイクロトロンでは鉄心温度及び磁束密度をNMRによって運転中モニタしている。A V Fサイクロトロンでは磁場勾配補正用のコイルを用いることでNMRによる磁場測定が可能になった。磁場補正領域は狭い範囲なので補正コイル磁場の加速ビームに対する影響は見られない。温度及び磁場モニタの結果磁場変化の原因となる温度変化をもたらしている要素として次のものが確認されている。

主コイル

トリムコイル

室温

高周波空洞

その他（入射・引出し磁気チャネル、フラットトップ空洞からの漏れ電場等）

これらの中で主コイル、トリムコイル及び室温の影響が重要である。高周波空洞は運転による空洞の温度変化が真空容器を介して鉄心に影響を与えるが問題になるほどの大きさではない。電磁チャネルは影響が局所的で鉄心全体の熱流状態が定常状態になるまでの磁定数が前三者に比較して短いため対策としては独立に温度制御された冷却システムの導入だけを行った。フラットトップ装置は周波数が高いため共振器に上下非対称があると電磁波がビームアパーチャから漏れ出して他の機器を加熱する。磁場に影響するのは磁極間隙を保つために入れてあるスペーサの温度に影響を与えることで、スペーサ温度のモニタによつても確認されている。電磁波の漏れはトリムコイル末端の真空シールの破壊を引き起こすので共振器の調整は注意深く行われており漏れは最小に押さえる運転が行われており通常の運転では磁場に対して影響するほどの漏れは無い。

3 温度安定化

サイクロトロンの電磁石は直流電磁石なので運転中铁心が発熱することは無い。したがって鉄心の適当な個所に高精度で温度安定化されたサーマルアンカーを設置した上でコイル温度や室温の影響を受ける部分の熱絶縁を行えば簡単に鉄心温度は安定化できる。鉄心自体の発熱は無いのでサーマルアンカーの温度制御に必要な冷却システムは熱絶縁を介して交換されるわずかな熱を処理する容量で済む。しかし既設の加速器に対しこのような装置を設置すること殆ど不可能である。そこで次善の策として冷却水温度の温度制御によって温度を安定化することになった。電磁石温度に影響を与える要素の中でトリムコイルの影響はA V Fサイクロトロンとリングサイクロトロンでは異なっている。A V Fサイクロトロンのトリムコイルは銅版上にロー付けによって一体に作られたコイルがスペーサを介して磁極に取り付けられており磁極との間の熱抵抗は大きく温度変化の影響は小さい。しかし温度が変化するとトリムコイルの位置及びこのベース板上に取り付けられたNMRプローブの位置が変化し磁場モニタ値に影響を与えるためトリムコイル温度を一定に保つことは重要である。リングサイクロトロンのトリムコイルはアルミナ溶射層とカプトンシートを介してトリムコイルが磁極表面に直接取り付けられているため温度変化の影響が直ちに磁場変化となって現れる。トリムコイルの影響は加速条件によらず冷却水温度を一定値に保つことによつてほぼ取り除ける。リングサイクロトロンのトリムコイル自体の電流による発熱は僅かでコイル全体の温度の一意性も問題ない。

R C N Pサイクロトロン電磁石の場合トリムコイルや主コイルに温度変化が生じた時熱流状態が定常状態になって鉄心の温度変化が収まるまでの時定数がA V Fでは約40時間、リングでは約100時間になることが簡単なモデル計算や実測で確かめられている。リングの場合加速粒子やエネルギーを変えたためコイル温度が例えば1℃変わったとすると鉄心温度の変化が磁場安定度から要求

されるような 0.1°C 以下の変化に落ち着くまでに約 10 日間、 0.01°C になるには更に 10 日を要することになる。このため主コイル等の鉄心に熱接触している部分の温度を加速条件によらず一定に保つ様に冷却水温度を制御することで温度を安定化することができる。サイクロトロン主コイルは純水を通水して直接冷却するホローコンダクタが用いられており、パンケーキは外側から内側に向かって巻かれコンダクタのほぼ中点で逆に内側から外側に向かって巻かれたものが絶縁物によって一体に形成されている。このような構造のパンケーキが上下の磁極に各 8 組ずつ取り付けられている。パンケーキの構造上コイルの往復経路間に熱伝導があるためコンダクタの経路に沿った温度分布は経路の midpoint よりやや外側で最高になる 2 次曲線の分布になる。この温度最高点の付近が最も鉄心に近いのでコイル電流によらずこの部分の温度が一定になるようにコイル冷却水温度を設定する必要がある。この設定温度は出口温度の荷重を大きくした出入り口水温の平均値になる。実際に設定温度を決定するためのパラメータは実測データに基づいて求めた。

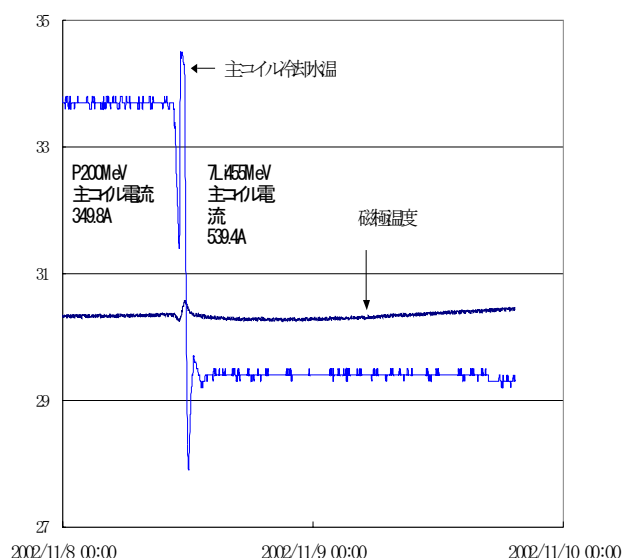


図3 主コイル冷却水温度と磁極温度

RNPサイクロトロンの主コイル冷却水の温度上昇は約 5°C 程度という低めに設計されているので季節変化にかかわらず電磁石温度をほぼ一定に保つような冷却水温度の設定が可能である。

図3にリング主コイル電流を陽子 200 MeV 加速の値から $Li-7$ 455 MeV 加速の値に変えた時この方法で冷却水温度を設定して磁極温度を一定に保っているトレンドデータを示す。後半で磁極温度が僅かに上昇して

いるのは室温等他の条件の影響によるもので主コイルの影響はほぼ取り除かれ設定変更後 2 時間程度で $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ 程度の温度変化になっている。磁場も安定していて直ちにビーム調整に移ることができる。

電磁石主コイル、トリムコイル、電磁チャネル及び高周波空洞の冷却水はそれぞれ独立の系統になっていて温度設定分解能は 0.1°C である。鉄心温度変化の磁定数が大きいことで温度制御装置が安定で長時間の平均変化率が十分小さければ 0.1°C の分解能でほぼ十分である。

電磁石鉄心温度は主コイルと室内空気という 2 つの熱源との間の熱のやり取りで温度分布が決まるというモデルが良く成り立っている。主コイルから熱が鉄心を経由して室内空気に伝わりこの熱流が定常状態になっていれば鉄心温度が安定に保たれる。従って室温の制御が重要であるが、室内空気との熱交換を制御するのは困難で最終的な対策はとれていない。室温は空調機器の性能だけでなく室内の空気の流れや温度分布が影響するため建物の構造まで含めた総合的な対策が必要となる。現在行っている対策は室内空気との熱交換を安定させると共できるだけ小さくするために空調機の空気吹き出しの方向を調整し電磁石の周囲の空気の動きを極力押さえる対策を取っている。空調機の温度設定分解能は 1°C であるが鉄心空気間の熱抵抗が大きく鉄心温度変化時定数が大きいので短時間の空調温度の微小変化は電磁石の安定度に影響しない。室温を常時モニターし必要に応じて設定温度を調節することにより長時間の平均変化を管理して温度の安定化を図っている。

4 結論

サイクロトロンで高精度ビームを安定に加速するために磁場の安定度が非常に重要である。磁場の安定度はコイル電流と鉄心によって決まり鉄心の寸法と透磁率は温度に依存する。この温度依存性は非常に複雑で電流を制御して磁束密度だけを補正しても電磁石の総合的な働きを一定に保つことは不可能である。従って電磁石の鉄心温度を安定化することが必要となる。RCNPサイクロトロンでは冷却水温度の制御により鉄心温度変化を温度 $0.01^{\circ}\text{C}/\text{週}$ 台におさえ、 $10^{-5}/\text{週}$ 以上の磁場安定度を実現し高精度ビームの加速を行っている。

参考文献

- [1] S. Ninomiya et al., Cyclotrons and their applications 2001, 94(2001) East Lansing, Michigan