

研究ノート

# サイクロトロンによる超高精度ビームの加速

齋藤 高嶺\*

Ultra-Precise Beam Acceleration with the RCNP Cyclotron Facility

Key Words : Accelerator, Cyclotron, Nuclear Physics, Nuclear Reaction, Resolution

## 1. はじめに

1971年に発足した大阪大学核物理研究センター(RCNP)では原子核物理学の研究が理論を含む広い分野について行われている。核物理研究センターの主要施設としてサイクロトロンが設置されている。写真1がRCNPのリングサイクロトロンである。6台の扇型電磁石、3台の加速空洞と1台のフラットトップ空洞で構成されている。RCNPサイクロトロンでは加速粒子のエネルギーのばらつきを小さくし、高分解能の原子核反応生成粒子測定装置を備えることにより高精度の実験を行うことを目指してきた。

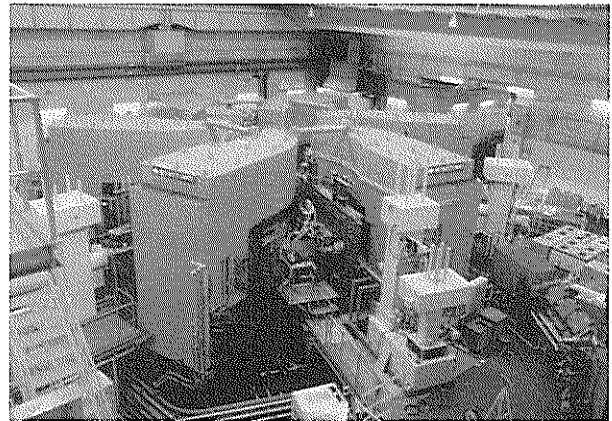


写真1 RCNPリングサイクロトロン

## 2. 高精密ビームによる実験

図1に核物理研究センターで行われた高分解能の実験結果を示す。エネルギー分解能を10倍以上向上させたことにより従来識別することが出来なかった単位を分別でき、非常に小さい反応確率の単位まで観測されている<sup>[1],[2]</sup>。このような測定を行うためには、標的を照射する粒子のエネルギーのばらつきが小さくさらにこの高いエネルギー分解能の状態が長時間一定に保たれることが要求される。別の高精度実験の例が図2に示されている<sup>[3],[4]</sup>。これはサイクロトロンで加速された粒子を標的に照射し放射される粒子のうち入射粒子の進行方向と同じ方向に出てくる粒子を観測したデータである。このような

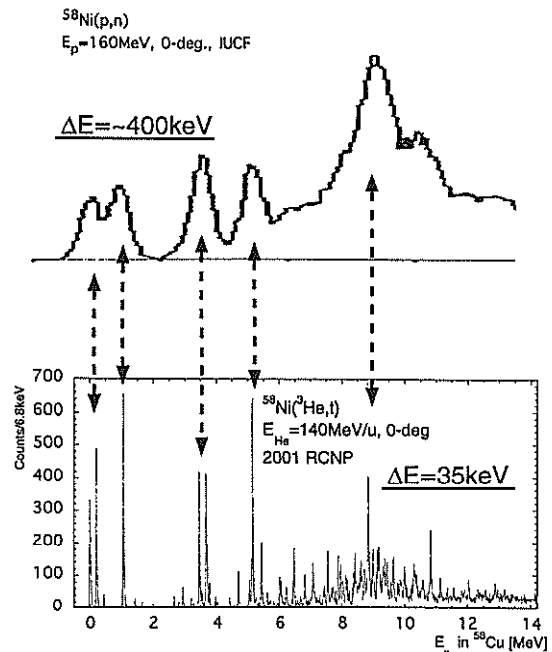


図1  $^{58}\text{Ni}$  陽子移行反応のスペクトル  
上 分解能 400keV, 下 分解能 35keV



\* Takane SAITO  
1942年10月生  
1968年京都大学大学院・理学研究科・  
修士課程修了  
現在、大阪大学・核物理研究センター・  
加速器部門、助教授、理学博士、原子  
核物理学  
TEL 06-6879-8830  
FAX 06-6879-8897  
E-Mail saito@rcnp.osaka-u.ac.jp

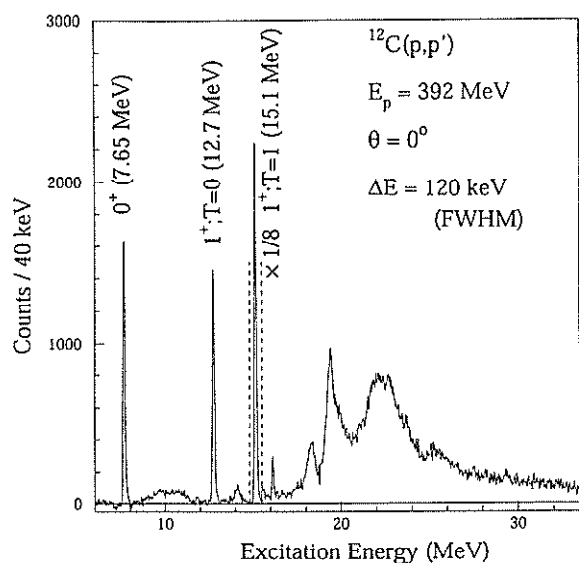


図2  $^{12}\text{C}$ による陽子非弾性散乱の  
0°の陽子エネルギースペクトル

実験を精度よく行うためには半値幅で定義される粒子ビームのエネルギーや空間的な広がり小さいだけでなくビームの周辺に低密度で広範囲に付随する粒子が1億分の1以下というような純度の極めて高い粒子ビームが要求される。

### 3. 超高精密ビーム加速

サイクロトロンを構成する基本要素は磁場と高周波電場である。粒子ビームに対する作用は電磁石の磁場と加速装置の電場であるがビームの軌道の振る舞いを決定しているのは主に磁場である。電場はビームにエネルギーを与える役割を担っている。サイクロトロンでは加速粒子とエネルギーが決まれば加速器のパラメータは原理的には時間的に変化しない一定値に決まるのでこれを運転中変化させないことが安定化の最終目標になる。高精度ビーム加速ではパラメータの許容範囲が狭いので非常に高い安定度が必要となる。粒子は加速されるにつれて回転半径が大きくなり予定された半径に達した粒子が引き出し装置で引き出される。サイクロトロンの磁場は複雑な空間分布を持っておりその中を運動する粒子の周回軌道は単純な円軌道や螺旋軌道でないため同一位置まで到達しても、周回数が一回でも異なる粒子は進行方向やエネルギーがわずかに異なり、引き出されたビームの持つエネルギーや時間的・空間的な分布状態がばらつく。そのため加速開始から引き

出しに至るまで軌道を完全に制御し一定の決められた周回数で加速されたビームのみを取り出すことが高精度ビームを得るために非常に有効な方法である。これはシングルターン引き出しと呼ばれる。

### 4. フラットトップ加速

シングルターン引き出しに対し有効な作用を行うのがフラットトップ装置である。正弦高周波の加速電圧のピーク時に加速電場を通過する粒子が最も大きいエネルギーを得、加速タイミングがずれた粒子は得られるエネルギーが小さくなる。たとえば500回転で目的のエネルギーに達する粒子に働く電場と501回転で同じエネルギーに達する粒子に働く電場の比率は $500/501=0.998$ となる。ピーク値の0.998倍になる位相角度はピーク位置 $\pm 3.62^\circ$ である。ピーク電圧位置よりこれ以上離れて加速された粒子はさらに周回を繰り返すことで引き出し半径に達するため引き出しビームに周回数の異なるビームが含まれることになる。加速電場の電圧ピーク値 $\pm 3.62^\circ$ 以内で加速電場を通過するビームのみを選別して加速すれば周回数が混じり合わずシングルターン引き出しが行える。加速過程において加速電圧の高調波周波数の電圧で減速作用を行うと正弦波のピーク近傍が平坦化され制限位相の幅を大幅に増大させられる。これがフラットトップの原理である。RCNPのリングサイクロトロンではフラットトップ空洞で三倍高調波電圧を発生させている<sup>[5]</sup>。フラットトップ装置は周波数が高く位相を高い精度で制御する必要があるためリングサイクロトロンのような大きな装置について加速条件に対応するあらゆる周波数範囲で運転することは困難で、すべての粒子すべてのエネルギーの加速に対してフラットトップ装置が使用されている例は核物理研究センター以外にはない。図3にフラットトップの効果を示す。加速電圧がピーク電圧の0.998倍になる位相幅が $\pm 3.6^\circ$ からフラットトップ装置を用いることで $\pm 15.5^\circ$ まで拡大される。もし位相幅を $\pm 7.5^\circ$ 以下に制限するとシングルターン引き出しに必要な条件を満たすだけでなく同一周回数のビームの受ける加速電圧の広がりを $10^{-4}$ 以下にすることができ引き出しビームのエネルギーのばらつきを小さくすることが出来る。フラットトップ装置では位相の精度が非常に重要で位相幅 $\pm 7.5^\circ$ の範囲で電圧変化を $10^{-4}$ 以下に押さえるためには

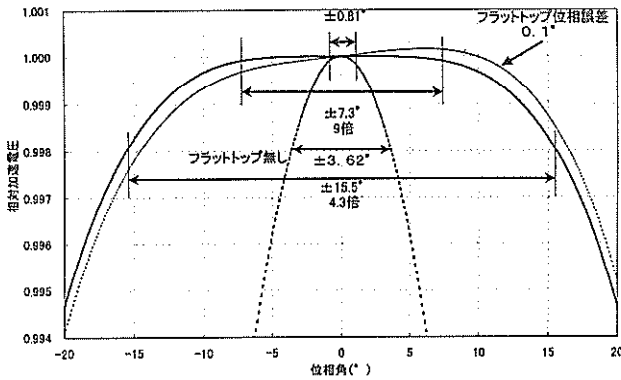


図3 フラットトップによる加速電圧波形の変化

設定誤差を0.1°以下にする必要がある。位相と減速電圧の最終的な値は加速ビームのエネルギーのばらつきを測定しそれが最も小さくなるように調整することで決められる。

### 5. 高安定化

サイクロトロン加速電場に関するパラメータは周波数、加速電圧、位相の三つで、これらをモニターして一定に保つことでビームに対する効果は一定に保つことができる。加速電圧の空間分布は共振器の形状によって決まる。共振器の電磁場は定在波なので周波数が一定であるだけでなく共振器内部のすべての場所で位相は同一である。従って位相は共振器相互間の値が調整パラメータになる。周波数は絶対値・安定度とも現在の技術レベルは加速器で要求されるレベルをはるかに超えており全く問題ない。加速高周波装置で加速電圧を除くパラメータは安定化回路でフィードバック制御を行うことで必要な安定度は確保できる。電圧安定化は加速空洞の温度を一定に保つことが必要である。絶対値についてはビームの加速状態を観測しながら調整するため電磁石のパラメータも含め周波数以外はそれほど高い精度は要求されない。調整の分解能と設定された値の安定度が最も重要である。電圧については一万分の一、位相については0.1°以下の分解能と安定度が必要とされる。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だけに

しても $10^{-6}$ 程度の安定度が要求されこれらの安定化のためには鉄心温度の安定化が不可欠である。

### 6. 温度制御

AVFサイクロトロンの電磁石では鉄心の比透磁率は十分大きく磁気抵抗の約98%以上が磁極間隙によっており磁場変化は鉄心の変形による磁極間隙の変化による。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4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。構造物の温度変化では温度変化が一様でないとき大きな変形を生じる。図4における測定でも70時間以上に亘って温度変化を0.1°C以下に保っていたにもかかわらず大きな磁場変化が生じている。これらの結果から $10^{-6}$ 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。図5に長時間の実験における磁場変化のビームエネルギー分解

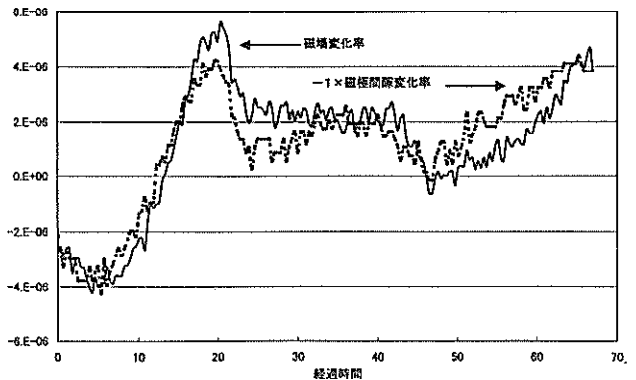


図4 鉄心の温度変化によるAVFサイクロトロン磁場の変化

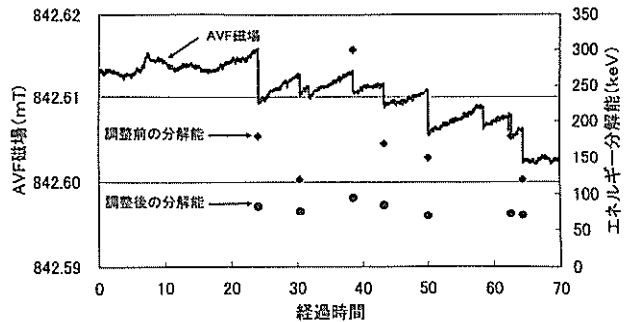


図5 リングサイクロトロン磁場変化と分解能  
図4と測定日時は異なる

能に対する影響を示す<sup>[6]</sup>。分解能の悪化が認められた場合まずコイル電流で磁束密度の変化を調整して元の状態に戻す。磁束密度の値だけを調整してもビームの分解能は完全には元に戻らないので更に高周波加速装置等のパラメータの微調整を併用する。加速中の磁場変化が $10^{-6}$ 以下になる程度に温度安定度を向上させれば実験中に加速器の調整を行う必要が無くなることが期待される。

## 7. おわりに

RCNPサイクロトロンで超高精度ビームを長時間安定に加速することで高分解能で原子核の準位を観測することができるようになった。高精度ビーム加速の条件はフラットトップ加速とサイクロトロンの安定性、特に磁場の安定性である。磁場の安定性は

電磁石鉄心温度の安定化によって実現された。

## 参考文献

- [1] J. Rapaport et al., Nuclear Physics A410 (1983)371
- [2] Y. Fujita, private communication.
- [3] A. Tamii, private communication.
- [4] A. Tamii et al., Phys. Lett. B 459(1999) 6
- [5] T. Saito et al., Proc. 14th Int. conf. on Cyclotrons and their Applications, 169(1995), Cape Town, South Africa
- [6] S. Ninomiya et al., Cyclotrons and their applications 2001, 94(2001) East Lansing, Michigan

