

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月 30日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21604004

研究課題名（和文） ハーモニック加速電圧を用いたサイクロトロン of 新たな加速手法の研究

研究課題名（英文） Research on the new acceleration technique for the cyclotron using the harmonic acceleration voltage

研究代表者

福田 光宏 (FUKUDA MITSUHIRO)

大阪大学・核物理研究センター・准教授

研究者番号：60370467

研究成果の概要（和文）：本来サイクロトロンが有する最高性能（質量数と価数の比 $M/Q \approx 2$ のイオンを最大エネルギーで加速）を発揮させるとともに、従来の $M/Q$ 分解能を10倍以上に向上させるため、サイクロトロンの正弦波型基本波電圧とその整数倍の周波数のハーモニック電圧を同時に発生させる新しい共振空洞システムの高周波電場解析計算とモデル共振空洞の設計・製作・性能試験を行い、世界最高の $M/Q$ 分解能（ $1/3000$ 以下）の実現に必要とされる共振空洞システムの開発の目処を得た。

研究成果の概要（英文）：A new resonant cavity of the cyclotron generating the fundamental and harmonic acceleration voltage simultaneously has been developed to achieve the highest  $M/Q$ -resolution less than  $1/3000$  and to realize the acceleration of fully-stripped ions at the maximum energy of the cyclotron. Performance of the newly-designed model cavity, confirmed by the high-frequency electric field analysis and the model test, fulfilled the requirements of the acceleration voltage waveforms that improve the  $M/Q$  resolution more than ten times higher than ever before.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：時限

科研費の分科・細目：量子ビーム科学

キーワード：加速器、サイクロトロン、ハーモニック加速電圧、 $M/Q$ 分解能、共振空洞

## 1. 研究開始当初の背景

サイクロトロンは、MeV～GeV級のイオンビームを発生させる加速器として今や幅広い分野の量子ビーム科学研究に利用されており、加速器技術としてはかなり成熟していると思われる。しかしながら、サイクロトロンには元来有する性能を最大限生かせずに宝の持ち腐れと化している弱点がある。

それは、最大価数のフルストリップイオン（質量数と価数の比がほぼ $M/Q \approx 2$ のイオン）の加速により本来実現されるはずの最高エネルギーのイオンビームが、Heイオンを除いてほとんど利用されていないということである。その最大の原因は、Caまでのフルストリップイオンの $M/Q$ 値の差が $\Delta(M/Q)/(M/Q) = 1/2000 \sim 1/30000$ であるのに対し、一般的

なサイクロトロン・の最高M/Q分解能が1/3000であるため、イオン源などから混入した異種イオンをサイクロトロンで分離できず、加速ビームの純度を低下させてしまっていることにある。このM/Q分解能の限界は、通常の重イオン加速やカクテルビーム加速法（M/Q値が近い複数のイオンを同時に入射させ、M/Q値の差に比例して加速周波数または磁場を変更して短時間で加速イオン種・エネルギーを切り替える方法）などにおいてもビームの質を劣化させ、余計なバックグラウンドを増やしたり、実験の精度を低下させたりする要因になっている。

## 2. 研究の目的

通常用いられる正弦波型の基本波電圧にその整数倍の周波数のハーモニック電圧を複数重ね合わせた加速電圧波形を作り、従来分離が不可能であったM/Q値の差が1/3000以下の異種イオンが減速され易いRF位相で加速してサイクロトロン・のM/Q分解能を従来の10倍以上に向上させ、世界最高のM/Q分解能の達成を目指す。具体的には、異種イオンがサイクロトロン・の中でN回転する間にRF位相が $\Delta\phi = 2\pi h N \Delta(M/Q)/(M/Q)$ （hは加速ハーモニクス数）だけ進んだり遅れたりする性質を利用して1回転当たりのエネルギー利得がゼロになる位相に異種イオンを早く追い込み、減速・消滅させる。従来の正弦波電圧波形では $\phi = 0^\circ$ 付近で加速するため、M/Q値の差が小さい場合には分離する前に異種イオンビームも引き出されていたが、 $\phi = -60 \sim -80^\circ$ の領域で十分な加速電圧を確保して正規のイオンを加速することにより、異種イオンが減速されるまでの回転数を大幅に少なくして分離能力を高めるという全く新しい加速手法の実現を目指す。（理想的な加速電圧波形は後述の図2を参照）この3倍及び5倍のハーモニック電圧を利用した加速電圧形成法を、 $0^\circ$ 付近の電圧波形を平坦化して加速エネルギーを均一化するフラットトップ加速法に応用することにより、 $\Delta E/E \leq 0.01\%$ の高均一なエネルギーが得られる位相領域を従来の2倍の $\phi \leq \pm 15^\circ$ に拡大することができ、極めてエネルギーの揃った質の高いイオンビームをより多く生成することが可能となる。本研究では、汎用性及びコンパクト性に優れたGeV級超電導AVFサイクロトロン・を想定し、従来技術では実現されていない、加速電極に3倍や5倍などのハーモニック電圧を同時に発生させる新しい共振空洞システム・の要素開発研究を目的とする。

## 3. 研究の方法

最終的な開発目標として重粒子の核子当たりの最高エネルギーが400MeV/nの超電導AVFサイクロトロン・（K=1600MeV）を想定し、

加速周波数を30~60MHz、加速ハーモニクス数を2、3、4と設定する。加速電極及び共振空洞の形状・構造・サイズの決定に当たっては、超電導サイクロトロン・の汎用性向上とコンパクト化を図るため、ビーム引出半径が1~1.5mになるようにスパイラル・セクター磁極の形状を決定する。図1に4セクター磁極形状とその磁場分布を示す。この磁極のバレー部分のスペースに整合するように加速電極を想定し、3次元高周波電磁場解析コードHFSSを用いて基本波電圧を生成する $\lambda/2$ 波長定在波モードの共振空洞を最初に設計する。加速電極面に垂直な方向から $\lambda/4$ あるいは $3\lambda/4$ 波長定在波モードの共振空洞を結合させ、加速電極に3倍波或いは5倍波等のハーモニック電圧を発生させるように共振空洞の配置、形状、構造、サイズなどを3次元高周波電磁場解析コードにより最適化する。加速電極の入口・出口ギャップに沿った半径方向の電圧分布や電場の向きは一様ではなく、全ての半径においてM/Q分解能を高められる理想的な加速電圧波形（図2）を生成することは困難であることから、電圧分布が極端に変化しないように共振空洞の結合位置を最適化する。また、3次元高周波電磁場解析コードで計算する際には、計算時間の短縮や使用メモリの制限などから共振空洞の細かな形状や構造などは近似して設定することが多く、また構造材同士の接触抵抗や温度変化による変形などは無いものとして理想的な共振空洞を想定することから、実際に測定して得られた特性と計算結果にはズレが生じる場合が多い。そこで、計算による設計を基に1/4スケールの加速電極及び共振空洞などを製作し、ネットワークアナライザーなどを用いてローレベル信号による特性試験を行い、共振空洞の実性能を明らかにする。特に加速電極面に平行な方向には電極の形状やサイズに依存した定在波が特定の周波数で励振され易いため、その共振モードを回避する方法も併せて検討する。計算及びロ

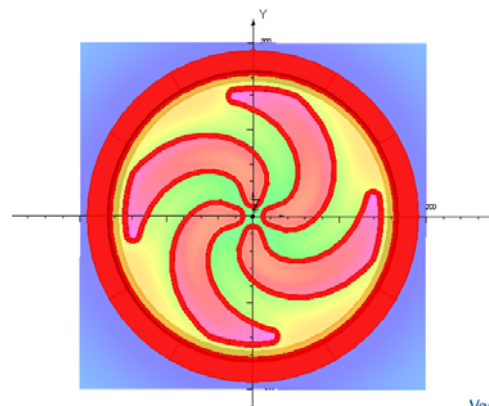


図1 超電導AVFサイクロトロン・のスパイラル・セクター磁極形状と磁場分布

一レベル信号特性試験で得られた加速電極ギャップでの半径方向の電場分布を基にビーム加速軌道シミュレーション計算を行い、ビーム軌道の安定性やM/Q分解能、エネルギー幅などを評価する。M/Q分解能が向上するように高周波電磁場解析、ローレベル信号特性試験、ビーム軌道シミュレーション計算を繰り返し実施し、共振空洞の配置や形状・構造などの最適化を行っていく。

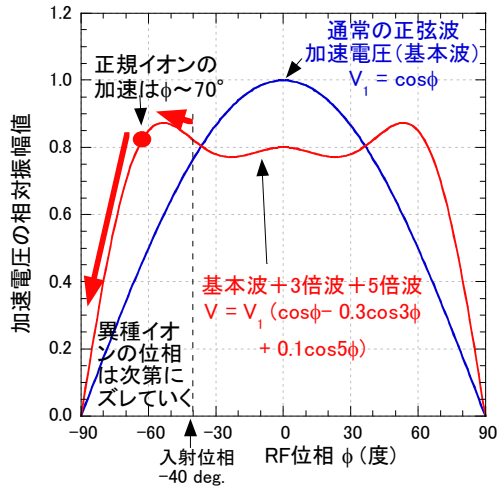


図2 基本波電圧に3倍波・5倍波ハーモニック電圧を重畳した加速電圧波形

#### 4. 研究成果

##### (1) モデル共振空洞の設計と製作

加速電極面に対して上下の垂直な方向から基本波電圧発生用共振空洞を直結させ、加速電極で電圧振幅が最大となるλ/2波長モードの定在波が励振されるように、高周波電磁場解析HFSSを用いて加速電極、ライナー、加速箱、同軸型共振空洞などの形状・構造・サイズ等を最適化した。開発目標として想定した超電導AVFサイクロトロン (K=1600MeV) の1/4スケールの加速電極及びダミー電極 (ライナー) の形状を図3に示す。

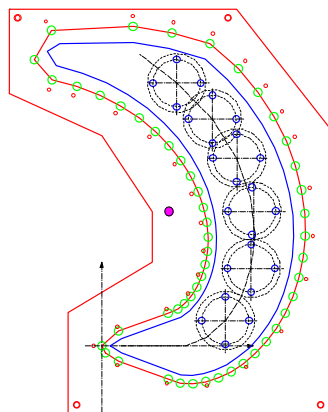


図3 加速電極及びダミー電極 (ライナー) のモデル形状

加速電極には、基本波発生用共振空洞や、3倍波・5倍波などのハーモニック電圧発生用共振空洞の結合位置を半径方向に6箇所設定できるように複数の固定用ネジ穴を設けている。加速電極とライナーの間隙 (加速ギャップ) は、方位角で3度の幅になるように半径方向に連続的に変化させている。上下に向かい合わせに配置した加速電極のギャップは±5 mmに設定している。

モデル共振空洞の組立図を図4に示す。同軸型共振空洞のショート板の位置を50mmピッチで変更することにより加速周波数を10点程変えることができる。内筒の外径はφ40 mm、外筒の内径はφ95.6mmであり、ショート板を固定できるように内筒に溝を設け、それに合わせて異なる長さの外筒も用意した。加速電極との結合位置を変更できるように、アース板にも複数の開口部を設け、使用しない開口部には蓋をして対処するなど、機械設計に柔軟性を持たせた。また、共振空洞にパワーを入力させるためのループカップリング電極をショート板に取り付けられるようにし、モデル共振空洞の性能評価を行うための加速電圧ピックアップ電極及びローレベル信号線等も設置できるような構造とした。

前述の設計を踏まえ、無酸素銅やアルミニウム材等を用いてモデル共振空洞の製作・組立を行った。図5に加速電極、ライナー、内筒、外筒、ショート板を示す。

##### (2) モデル共振空洞の固有励振モードと電場分布

高周波電磁場解析コードHFSSで得られたモデル共振空洞の固有励振モード及び加速電極上の電場分布の解析を行った。図6に加速電

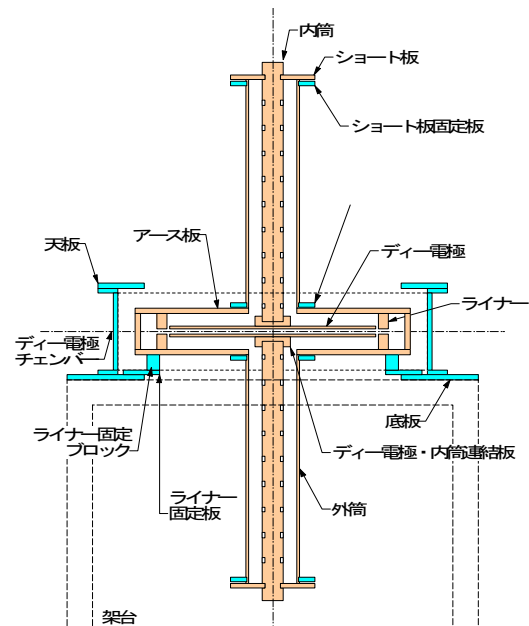


図4 モデル共振空洞の組立図

極上の半径240mmの位置に内筒及び外筒を結合させ、ショート板を加速電極から75mmの位置に設置したときの加速電極表面における電場分布を示す。この条件では、周波数197 MHzの基本波が励振され、Q値は5000程度と見積もられる。半径方向の電場分布は、端部で強くなる傾向はあるものの、加速領域においてはほぼ一様であることを示している。このとき、 $3\lambda/2$ モード (Q値 $\sim 8000$ ) や $5\lambda/$

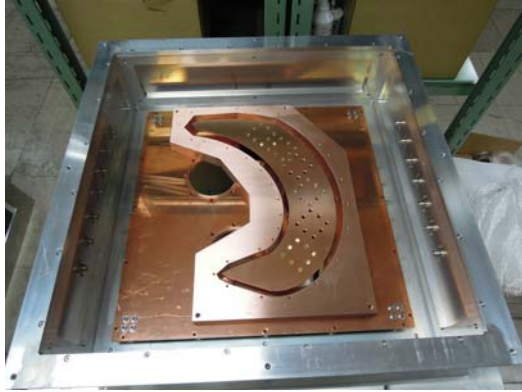


図5 モデル共振空洞の加速電極とライナー (上図)、外筒とショート板 (下図)

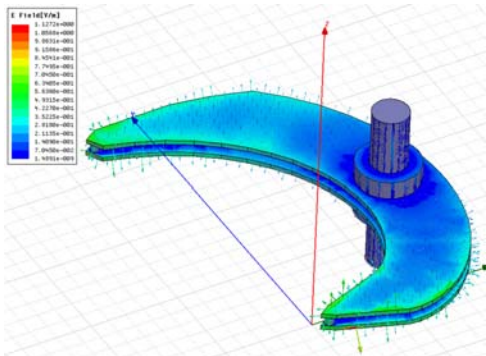


図6 半径 240mm の位置に内筒と外筒を結合させ、加速電極から 75mm の位置にショート板を設置したときの基本波の加速電極上の電場分布

2モード (Q値 $\sim 18000$ ) などの3倍や5倍の周波数に近いハーモニック電圧も同時に励振することが可能であるが、電場分布が局所的に基本波と異なることから、ハーモニック電圧の振幅調整が必要とされる。

一方、加速電極面に平行な励振モード (横共振モード) も複数見られ、内筒・外筒の結合位置に依存することが明らかになった。図7に440MHz付近に存在する横共振モードの電場分布の例を示す。

### (3) モデル共振空洞の性能試験

3次元高周波電磁場解析結果を踏まえたモデル共振空洞でのローレベル信号特性試験の結果から、加速電極面に平行な励振モードが加速ギャップでの半径方向の加速電圧分布に影響を与えることが明らかになり、加速粒子のエネルギー利得分布の調整自由度を高めるためには、加速電極の分割、或いはハーモニック電圧用共振空洞の結合位置を基本波加速電圧用共振空洞と同一にするなどの工夫が必要であることが判明した。図8にショート板の位置と共振周波数の関係を示す。

基本波加速周波数 (30 $\sim$ 50MHz) の3倍及び5倍のハーモニック電圧の定在波波長が1 $\sim$

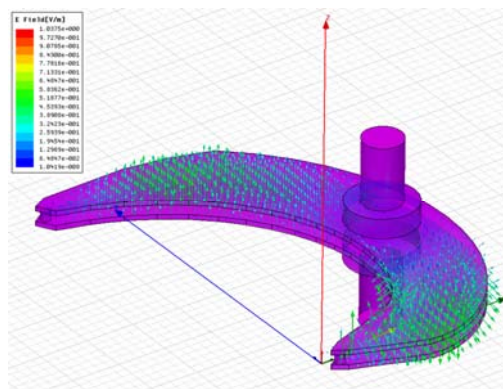


図7 周波数 440MHz 付近に存在する横共振モード

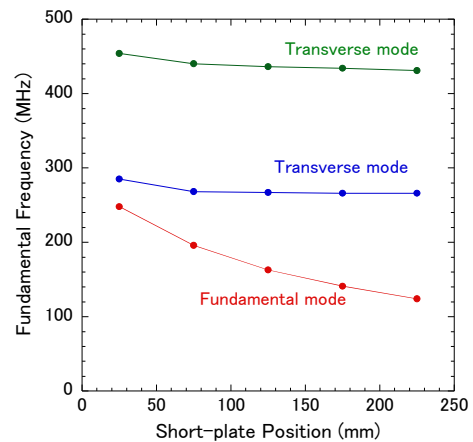


図8 基本波と横共振モードのショート板位置依存性

3mであることから、長さ1~1.5mの加速電極における半径方向の横モード励振を回避するため、加速電極上に方位角方向のスリットを複数設けて線路長を長くする、或いはハーモニック加速電圧専用の小さな電極を基本波加速電極内に設置してハーモニック電圧加速を個別に行うなどの対策を講じることにより、加速粒子の最終的なエネルギー利得分布が制御可能であることを3次元高周波電磁場・軌道解析コードなどを用いて明らかにした。この手法の有用性を実証するため、1/4スケールのモデル共振空洞の改良を行い、加速ギャップに沿った電圧分布の周波数依存性に関するデータを取得した。

#### (4) 本研究の意義

本研究成果により、GeV級超電導AVFサイクロトロンコンパクト化と世界最高のM/Q分解能の実現に必要なとされる基本波電圧及びその整数倍のハーモニック電圧を同時励振できる共振空洞システムの開発の見通しを得ることができたことから、学術的な意義は極めて大きい。これにより、サイクロトロンにおいて最高エネルギーの高純度イオンビームが短時間で多種類利用可能になるだけでなく、超高分解能の原子核質量分析等への応用の道も切り開かれ、大きな波及効果が期待される

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計8件)

- ①N. Miyawaki, M. Fukuda 他、Realization of a phase bunching effect for minimization of beam phase width in a central region of an AVF cyclotron, Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res., 査読有、636、(2011)、41-47
- ②Y. Iwamoto, M. Fukuda 他、Evaluation of the white neutron beam spectrum for SEE testing at the RCNP cyclotron facility, Nuclear Technology, 査読有、173、(2011)、210-217
- ③T. Kamiya, M. Fukuda 他、Microbeam complex at TIARA: Technologies to meet a wide range of applications, Nucl. Instrum. Methods B, 査読有、268、(2011)、2184-2188
- ④ M. Fukuda 他、Developments of high-quality intense beam at the RCNP cyclotron facility, Proceedings of IPAC'11, 査読無、San Sebastian, Spain, (2011)、2694-2696
- ⑤ S. Kurashima, M. Fukuda 他、Useful technique for analysis and control of the acceleration beam phase in the AVF cyclotron, Rev. Sci. Instrum., 査読有、81、(2010)、033306-1~7

⑥ M. Fukuda 他、Developments for beam intensity increase and beam quality improvement in the RCNP cyclotrons, Proceedings of IPAC'10, 査読無、Kyoto, Japan, (2010)、546-548

⑦ S. Kurashima, M. Fukuda 他、Single-turn extraction from K110 AVF Cyclotron by flat-top acceleration, Rev. Sci. Instrum., 査読有、80、(2009)、033302-1~9

⑧ S. Kurashima, M. Fukuda 他、Quick change of ion species of heavy-ion microbeam by cocktail beam acceleration technique with the JAEA AVF cyclotron, Nucl. Instrum. Methods B, 査読有、267、(2009)、2024-2027

[学会発表] (計3件)

① M. Fukuda 他、Developments of high-quality intense beam at the RCNP cyclotron facility, IPAC'11, 2011年9月7日、San Sebastian, Spain

② M. Fukuda 他、Development of Flat-top Accelerated Beam and Analysis of Harmonic Voltages for the RCNP AVF Cyclotron, 第19回サイクロトロンとその応用に関する国際会議、2010年9月6日、蘭州、中国

③ 福田光宏 他、サイクロトロンにおける高調波電圧を用いた加速とその応用、日本物理学会第65回年次大会、2010年3月21日、岡山大学

[産業財産権]

○出願状況 (計2件)

①  
名称：空芯型サイクロトロン  
発明者：石山敦士、福田光宏 他  
権利者：早稲田大学、中部電力  
種類：特許  
番号：特願 2010-132256  
出願年月日：2010年6月9日  
国内外の別：国内

②  
名称：空芯型サイクロトロン  
発明者：石山敦士、福田光宏 他  
権利者：早稲田大学、中部電力  
種類：特許  
番号：特願 2010-252226  
出願年月日：2010年11月10日  
国内外の別：国内

[その他]

ホームページ等

<http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/~mhfukuda/Workshop/NuclearConv/Welcome.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

福田 光宏 (FUKUDA MITSUHIRO)

大阪大学・核物理研究センター・准教授

研究者番号：60370467

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

倉島 俊 (KURASHIMA SATOSHI)

日本原子力研究開発機構・高崎量子応用研究所放射線高度利用施設部・副主任研究員

研究者番号：50370391