

機関番号：82118

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2011

課題番号：22654032

研究課題名（和文）誘導加速セクターサイクロトロン設計研究

研究課題名（英文）Induction Sector Cyclotron

研究代表者

高山 健 (TAKAYAMA KEN)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・教授

研究者番号：20163321

研究成果の概要（和文）：2006年に完全実証に成功していた誘導加速シンクロトロンでの加速方式、1対1のトランスである誘導加速セルに発生するパルス電圧でクラスターイオンの閉じ込めと加速が可能なセクターサイクロトロンのオリジナルなアイデアに基づき、具体的な加速器の設計を行い、コンセプトを具体化した。国内のサイクロトロン施設のエキパートとの議論を通じ、物理的課題、特に軌道安定性について理解を深め、セクターサイクロトロンの磁極勾配に関する安定軌道パラメーター領域を得た。又、キーデバイスである誘導加速システムの中の磁性体を内包する加速セルのプロトタイプ熱解析とこれを駆動するスイッチング電源の回路解析を行い、叩き台を提示した。予算化されればいつでもプロトタイプの製作が可能になった。平行して推進されている次世代スイッチング電源と要求される誘導加速サイクロトロン用のスイッチング電源の仕様の類似性から、SiC-JFETを用いたスイッチング素子パッケージが使用可能である事が判明したので、この素子をベースにしたシステム設計を行った。

研究成果の概要（英文）：In 2006, the concept of induction synchrotron had been demonstrated at KEK. Instead of RF acceleration, the induction acceleration method was employed there. A noble cyclotron employing the similar method had been already proposed. Details of cluster ion dynamics in a sector cyclotron have been investigated; especially a parameter region promising the orbit stability has been obtained. In addition, a prototype race-track shape induction cell, which is one of key devices, was designed based on thermal analysis and circuit analysis. It is ready to be assembled. A noble switching element package for the next generation of switching power supply is under development. The switching power supply driving the induction cell for the induction sector cyclotron belongs to the next generation. So, the induction acceleration system has been designed based on this next generation assuming the SiC-JFET switching element package.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,300,000	0	1,300,000
2011年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,800,000	450,000	3,250,000

研究分野：数物科学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：誘導加速、セクターサイクロトロン、クラスターイオン

## 1. 研究開始当初の背景

質量数  $A$  を電価数  $Q$  で割ったパラメーター  $A/Q$  が極端に大きなクラスターイオンを加速する手段として Cockloft-Walton 加速器、タンデム加速器、ペレトロンのような静電加速器が稼働していた。これらの静電加速器では、加速ギャップを一回しか通過しない。必然的に、得られるエネルギーはこれら静電加速器の持つ電圧  $V$  にイオンの電荷量  $eQ$  を掛けた  $eQV$  が限界であった。任意のパラメーター  $A/Q$  を持ったイオンを繰り返して加速可能なのは、原理的には高山等が提案し、内外で特許を取得している誘導加速シンクロトロンである全種イオン加速器しかないと考えられていた。即ち、加速周波数の制限を完全に解放した誘導加速シンクロトロンでの加速法がクラスターイオンの極めて低速での周回周波数からの加速を可能にすると理解されていた。

この全種イオン加速器が KEK デジタル加速器として建設中であった。これは 2006 年 3 月まで KEK 12 GeV 陽子シンクロトロンの入射器として 35 年以上に亘って稼働した 500MeV Booster シンクロトロンを改装した物である。当初、このデジタル加速器を用いたクラスターイオンの加速が検討された。得られるクラスターイオンの運動エネルギー  $E$ 、ガイドする偏向磁石の磁束密度  $B$ 、そこでの曲率半径  $\rho$  との間には以下の関係がある。

$$B\rho \sim (A/Q)E^{1/2}$$

高いエネルギーのクラスターイオンを得ようとするに磁束密度  $B$  を大きくするか曲率半径  $\rho$  を大きくするしかない。

デジタル加速器の主電磁石の最大磁束密度は 0.84 Tesla に制限されている。従って、得られる最大エネルギーは既存静電加速器のそれに比して、左程魅力的なものではない事が分かる。クラスターイオン専用のデジタル加速器を前提にした場合、常伝導電磁石を使用する限り最大磁束密度は 1.5 Tesla 程度であるので、せいぜい KEK デジタル加速器で期待されるエネルギーの 3.5 倍に留まる。

一方、超伝導電磁石を使用したスキームが成立する。現在、実用の加速器用超伝導電磁石の最大磁束密度は LHC 偏向電磁石の 8.6 Tesla である。得られる最大エネルギーの観点からは確かにこの磁束密度は魅力的である。しかしながら、超伝導電磁石の泣き所は使用可能な最低磁束密度の制限にある。極端に低い磁場では所謂 Persistent 電流の問題があり、磁石毎に磁場のばらつきが大きくなる。最低磁場は入射磁場に相当する。この入射磁場にばらつきがあると円形加速器内を

周回する荷電粒子の平衡軌道が大きく歪んでしまう。その補正を前提にしても、許される最低磁束密度は概ね 1 Tesla 程度である。従って、低速度で生成するクラスターイオンを超伝導電磁石で構成されたデジタル加速器に直接入射し、高速まで加速するのは原理的に不可能である。

これらの限界から、磁場を加速と共にランブさせるタイプの加速器はクラスターイオンの加速器には不向きであることが認識されていた。代わりに、可能な限り高磁場を維持し、周回半径を可変にして期待されるエネルギーを実現する手法が確実であると云う結論を得ていた。このタイプの加速器は結局サイクロトロンである。サイクロトロンでの周回周波数は当然通常の重イオン加速用のサイクロトロンで持ちいられる MHz オーダーの RF の共振周波数に比較すると極端に小さい。やはりここでも誘導加速方法を導入するしかない。その結果到った結論が、超伝導セクターサイクロトロンで誘導加速を行う「誘導加速セクターサイクロトロン」のアイデアであった。

しかし、誘導加速シンクロトロン実現のために開発した誘導加速セル構造が根本的に異なるのと、クラスターイオンの軌道理論がシンクロトロンとサイクロトロンでは相当に異なっている事が認識されていた。従って、このアイデアを加速器物理と加速器技術、特にパルスパワー技術の側面から詳細な検討が待たれる状況であった。

## 2. 研究の目的

実機建設には 3 段階程度のステップを踏むのがこの種の新型加速器を建設・運転する場合の常道であるが、この挑戦的研究では、アイデアの加速器物理と技術の観点から先ず成立性を理論的に机上で詰めることである。その上で、実機を実現する上で、種々の技術的課題を実際のクラスターイオンビームを加速してみた上で確認するためのプロトタイプの誘導加速セクターサイクロトロンを設計することである。

## 3. 研究の方法

クラスターイオンの入射から加速終了までの軌道安定性については、サイクロトロンの既存軌道理論と近似シンクロトロンの軌道理論を問題の系に適用し、安定性を与える収束パラメーター条件を得、且つ、軌道トラッキングコードでこれを確かめる方法がとられた。その結果を元に求められるセクター電磁石の磁極形状等の最適化を行うと云う戦略が構想された。これを研究分担者の安達 (KEK) と協力研究者の筒井 (住友重機) が担った。

クラスターイオンの周回半径が加速と共に大きくなるので、誘導加速セルの外部構造断面はRace-track形状になる。必然的に、誘導加速セル用磁性体も類似構造を持つことになるが、その物性評価は既存誘導加速シンクロトロン用の同心円構造の加速セル用磁性体の特性（磁化特性、コアロス特性）のデータから外挿する方法が取られた。使用を前提とする磁性体は誘導加速シンクロトロン用に使用した日立金属性のファインメットであるので、磁性体単体の特性はそのまま利用できるかと判断した。しかし、構造の違いから派生する、熱発生と、それを冷却する冷却媒体の流体と熱伝導の最適化の問題を同心円構造の誘導加速セルを設計の際に頼ったANSYS解析を構想した。以上を分担者の江偉華（長岡技術科学大学）が研究室院生の協力を得て実施した。

デジタル加速器と異なり、誘導加速セクターサイクロトロンでは誘導加速セルを駆動するスイッチング電源には以下の特徴がある。

- (1) 発生させる加速電圧が大きい
- (2) スwitching周波数が小さい
- (3) スwitchingアーム電流が大きい

この為、スイッチング電源に使用するスイッチング素子として従来のハイパワーMOSFETに代えて次世代スイッチング電源のスイッチング素子として研究代表者等がそれまで開発を進めていたSiC-JFETの使用を前提に全体をシナリオを構想した。これは高山（研究代表者）と研究協力者岡村勝也（KEK）が担った。

かくして、加速セルを駆動するスイッチング電源の設計に当たっては、負荷を含めたシステム全体の回路解析を行い、基礎回路パラメーターを決める手法が取られた。

国内のサイクロトロン研究施設での公式なセミナーを以下の日程で実施、サイクロトロン設計、軌道解析、運転のエキスパートそして生産現場の技術者との膝詰めでの討論会に臨んで、検討課題の指摘、アドバイスを得た。

- (1) 理化学研究所仁科加速器センター  
平成22年10月9日  
講演：高山
- (2) 住友重機械工業 新居浜事業所  
平成23年2月24日  
講演：高山、安達
- (3) 大阪大学核物理センター  
平成23年10月12日  
講演：高山
- (4) 東北大学RIサイクロトロンセンター  
平成23年11月10日

意見交換：高山

#### 4. 研究成果

典型的クラスターイオン C-60(7+) を入射エネルギー200keV から 3MeV まで加速する誘導加速サイクロトロンのプロトタイプを設計した。以下の仕様で成立する

セクター磁石数	4
平均周回半径	(1.85m->3.7m)
磁束密度	(0.67 T/1.34T)
加速電圧/ターン	30kV
ターン数	100
ベータートロン周波数	
Qx	1.889
Qy	0.229

安定軌道のためのパラメーター領域、誘導加速システムの回路解析結果等は各種研究集会のProceeding論文として公表した。

#### 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2件)

1. 江偉華, “講座 パルスパワー技術入門：2. パルスパワー技術の歴史とその仕組み”, プラズマ・核融合学会誌 87, 46-50 (2011).
2. 江偉華, 高木浩一, “講座 パルスパワー技術入門：3. パワー半導体デバイスの役割”, プラズマ・核融合学会誌 87, 106-111 (2011).

[学会発表] (計8件)

1. T. Adachi, “Induction Sector Cyclotron for Cluster Ions”, 3<sup>rd</sup> International Workshop on Recent progress in Induction Accelerators (RPIA2011), 2011年10月17日-21日, 中国、成都.
2. W. Jiang, “Numerical Simulation of Electromagnetic Flux Compression for Super-Intense Magnetic Field Generation”, 18th IEEE International Pulsed Power Conference, 2011年6月19日-23日, Chicago, USA.
3. W. Jiang, “Pulsed High-Voltage Generator for Atmospheric Discharge”, 8th IEEE International Pulsed Power Conference, 2011年6月19日-23日, Chicago, USA.
4. W. Jiang, “High-Power Charged Particle Beams and Their Applications”, The 8th Asian-European International

Conference on Plasma Surface Engineering, 2011年9月19日－22日, 中国、大連.

5. T.Adachi, “Induction Sector Cyclotron for Cluster Ions”, 2<sup>nd</sup> International Accelerator Conference, 2011年9月7日, Spain, San Sebastian.
6. W. Jiang, “Power Devices for Induction Accelerators”, 13th Japan-US Workshop on Heavy Fusion and High Energy Density Physics, 2011年10月12日－14日, 大阪大学(大阪府) .
7. K.Takayama, “Induction Sector Cyclotron for Cluster Ions,”, Cyclotrons 2010, 2010年9月7日, 中国・蘭州.
8. K.Takayama, “Induction Acceleration in Synchrotrons and Cyclotrons”, EAPPC2010, 2010年10月10日, 韓国・濟州島.

[図書] (計1件)

1. Takayama and R.J.Briggs, “Induction Accelerators”, Springer (2010).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

高山 健 (TAKAYAMA KEN)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・教授

研究者番号：20163321

### (2) 研究分担者

安達 利一 (ADACHI TOSHIKAZU)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・准教授

研究者番号：80141977

江 偉華 (Jiang, Weihua)

長岡技術科学大学・工学部・教授

研究者番号：90234682

### (3) 連携研究者

なし