

Outline of the Heavy Ion Linac Complex for Unstable Nuclei Beams

Shigeaki ARAI, Heavy Ion Linac Working Group

Institute for Nuclear Study, University of Tokyo
Midori-cho, Tanashi-shi, Tokyo 188

ABSTRACT

As an R&D for the exotic nuclei arena in the Japanese Hadron Project, the construction of a test facility for the RI-beam acceleration has started this fiscal year at INS. The accelerator complex, about 17 m in total length, consists of a split coaxial RFQ, a beam-matching section, and interdigital-H linacs. The input RI-beam from an isotope separator on-line has a charge-to-mass ratio greater than 1/30 and a kinetic energy of 2 keV/u. The output energy is variable between 0.17 and 1.05 MeV/u.

短寿命核用重イオン線型加速器の概要

1. はじめに

大型ハドロン計画の四つの研究施設の一つであるEアレナ (Exotic Nuclei Arena) では、短寿命核を加速し、中性子過剰核、超重核など極限領域の核物理や宇宙における元素合成過程の研究などの新しい核物理、天体核物理の研究を目指している¹⁾。このEアレナの開拓研究として、短寿命核分離加速実験装置を1992年度から核研(原子核研究所)現キャンパス内に建設する事が認められた。本施設は、短寿命核の生成のために使用する既存のSFサイクロトロン、 q/A (荷電質量数比)1/30以上のイオンを生成分離するISOL、それに2keV/uから約1MeV/uまで加速する重イオン線型加速器から構成される。開拓研究の具体的内容は、1) ISOL (Isotope Separator on Line)、重イオン線型加速器等の技術開発と2) 短寿命核ビームによる先駆的物理実験である。

短寿命核ビームを生成する方法としては、1) 中高エネルギー重イオン衝突に於ける入射核破碎反応を用いる方法と2) 生成された短寿命核を質量分離し、更に加速する方法の二種類がある。我々の施設は後者の方法を採用したもので、本格的な施設としては世界で最初のものである。新ルーバン大学(ベルギー)では二台のサイクロトロンを使って窒素13の生成と加速を既に行っているが、ISOLがないため加速できる核種に制限がある。その他CERN、ORNL、LANL、LBL、TRIUMF、GANIL等の研究所では、施設の建設を提案又は検討中である。ここでは、本施設の基幹部分である、SCRFQ (Split Coaxial RFQ)、荷電変換部、それにIH (Interdigital H) リニアックから成る重イオン線型加速器の概要を報告する。

2. 全体構成

施設の全体構成を図1に示す。サイクロトロンからの40MeV、10 μ Aの陽子ビームを厚い標的に当て造られた短寿命核は表面電離型、ECR型イオン源等でイオン化され、ISOLで質量分離され、デューティ・ファクター30%で稼働する重イオン線型加速器に2keV/uで入射される。SCRFQによって170keV/uまで加速されたイオンは、炭素薄膜で $q/A \geq 1/10$ に荷電変換され、更にIHによって最高エネルギー1.05MeV/uまで加速される。出力ビームのエネルギーはIHの色々な運転モードによって連続的に変えることができる。加速器の主な仕様を表1にまとめる。

表1 加速器の主な仕様

出射エネルギー (可変)	170~1046keV/u
入射エネルギー	2keV/u
規格化エミッタンス	$0.6\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$
荷電質量数比	$\geq 1/30$
短寿命核ビーム強度	$10^7 \sim 10^{11} \text{ pps}$
デューティ・ファクター	30%
繰り返し	20~1000Hz
全長	17m

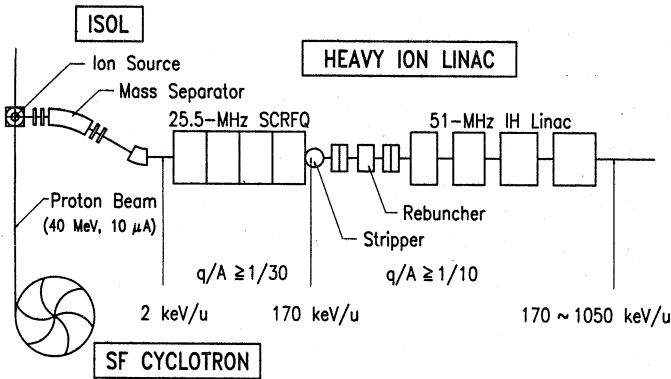


図1 短寿命核分離加速実験装置の構成

3. SCRFAQ

SCRFAQの特徴は、非常に小さな q/A を持つ非常に低いエネルギーのイオンを高い伝送効率で加速できるという事である。核研では、SCRFAQの実用化を目指して 25.5MHz 原型モデルを製作し、1991年1月には窒素分子イオン ($q/A=1/28$) の最初のビーム加速に成功した。その後の高電力試験、ビーム加速試験を通じ空胴の構造とベーンの形状について改良すべき点が見つかった²⁾。空胴構造に関する最も大きな改良点は、高デューティ運転の障害となる結合リングを取り外すことである。一方、ベーン形状に関しては、二次元切削法でベーンを作る場合にはK-T (Kapchinskii-Teplyakov) の電位関数の高次の項を考慮すべきであるという事である。これらの問題への対策は特に難しい事では無いので、現在の 2.1m 長の原型モデルを 8.5m に延長して、この施設の実用器として使用する目処が立った。この実用器は原型モデルでの研究成果に基づいて設計されたが、主な設計方針をまとめると次のようになる。1) 入射エネルギーは、原型モデルでは 1keV/u であったが、ISOLからのビーム輸送を容易にするため 2keV/u に上げる。2) 空胴は、原型モデルと同じ構造の空胴三台を新たに製作し、転用する原型モデルの空胴と合わせて四台から成る。3) ベーンは全長に亘って新規に製作する。第一空胴のベーンは三次元切削法で作る、残りのベーンは二次元切削法で作る。どちらのベーンもK-Tの電位関数の高次の項を考慮して形状の補正を行う。4) ベーン表面の最大電場強度を 180kV/cm (2.5キルパトリック) 程度にする。5) 高デューティ運転のために、結合リングを外し、更に、冷却水の流量を増やす。ベーン的主要パラメーターを表2に示す。

表2 SCRFAQの主なパラメーター

周波数	25.5MHz	ベーン間電圧	108.6kV
運動エネルギー	2→172.1keV/u	平均アパーチャー半径	0.985cm
荷電質量数比	$\geq 1/30$	集束強度	5.5
規格化エミッタンス	$0.6\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$	rf 発散強度	-0.17
ベーン長	858.46cm	最大表面電界強度	178.2kV/cm
セル数	172	透過効率 (微少電流)	91%

4. IHリニアック

IHリニアックは、粒子速度 (対光速比) β が数%から 10%ぐらいの領域ではシャントインピーダンスを非常に高くできるという特徴を持っている。しかし、我々の考えているような低速イオンを

加速する場合には、この特徴を活かせるビームの集束方法を探すことが非常に重要である。更に、我々の場合には、出力ビームのエネルギーを連続可変にして欲しいというビームを使う側からの要請がある。当初、エネルギー可変用の空洞を考えたが、コスト等を考えると、できればIH本体にその機能を持たせたい。そこで、次のような新しい型のIHを設計した。周波数はシャントインピーダンスを高くし、建設費を安くするためには高い方が良いが、軸方向のビームのアクセプタンスを考慮してSCRFAQの二倍である51MHzに選んだ。加速タンクを短めに4分割し、ドリフトチューブには集束要素を入れず、ビームの横方向の集束はタンク間に設置した三連の四重極電磁石によって行う。軸方向の集束は安定位相を -25° 付近にとり実現する。こうする事により、ドリフトチューブを小さくでき、 π モード加速が可能となりシャントインピーダンスを高くする事ができる。ビームのシミュレーションにより得られた横方向の規格化アクセプタンスは $1.7\pi\text{ mm}\cdot\text{mrad}$ 、軸方向のアクセプタンスは $200\pi\text{ keV/u}\cdot\text{deg.}$ であり、それぞれSCRFAQの出射ビームのエミッタンスの約3倍である。タンクを分割した結果、ギャップ電圧と位相を調節することによりIHリニアック本体でエネルギーを連続的に変えることが可能になった。

表3 IHリニアックの主なパラメーター

タンク番号	1	2	3	4	
周波数	51	51	51	51	MHz
運動エネルギー	170→292	292→471	471→721	721→1046	keV/u
荷電質量数比	$\geq 1/10$	$\geq 1/10$	$\geq 1/10$	$\geq 1/10$	
タンク長	58.9	83.9	115.3	153.2	cm
タンク径	134	134	134	134	cm
実効シャントインピーダンス	1262	883	587	408	M Ω /m
三連四重極電磁石用スペース	47.5	47.5	47.5		cm

5. 荷電変換部

ビームの q/A を上げてIHの加速効率を高めるために、SCRFAQとIHの間に厚さ $5\sim 10\mu\text{g}/\text{cm}^2$ の炭素薄膜の荷電変換器を置く。これをビームが通過すると、ビームの中心エネルギーが下がると同時に、エネルギーの広がりや横方向のビームのエミッタンスも大きくなる。更に、IHの周波数がSCRFAQの2倍であるために、SCRFAQからのビームバンチの位相幅は、短い自由空間を飛行する間にもIHの安定位相領域よりもすぐに大きくなってしまふ。そこで、荷電変換部にはSCRFAQとIH間の軸方向のビーム整合のために、リバンチャー空洞を置く。また横方向のビーム整合のためには、二連の四重極電磁石を二組使う。

6. まとめ

SCRFAQの建設は今までの研究成果に基づいて順調に進んでいる。IHに関しては、基本設計がほぼ完成した段階で、今年度中に縮小モデルを製作し電場調整法の確立や実器の空洞寸法の決定等を行う。その他、25.5MHzで稼働するリバンチャー空洞の検討も始めた。

参考文献

- 1) T. Nomura, Exotic Nuclei Arena in Japanese Hadron Project, INS-Rep.-780, Oct. 1989.
- 2) N. Tokuda et al., Performance Characteristics of the INS 25.5-MHz Split Coaxial RFQ, INS-Rep.-920, April 1992.