

Present Status of the SCRFQ/IH Linac for Unstable Nuclei

S. Arai, Y. Arakaki, A. Imanishi, K. Niki, M. Okada, Y. Takeda,
E. Tojyo, and M. Tomizawa

Tanashi Branch of High Energy Accelerator Research Organization
3-2-1 Midori-cho, Tanashi, Tokyo 188, Japan

An SCRFQ/IH linac for short-lived nuclei has been constructed at KEK-Tanashi. We have conducted beam tests for examining linac performance with many stable nuclear beams. Results of the beam tests show the performance of the SCRFQ/IH linac is close to the designed one. In March, 1997, we succeeded in the short-lived nuclear-beam acceleration with a $^{19}\text{Ne}^{2+}$ beam.

短寿命核用リニアックの現状

1. はじめに

大型ハドロン計画 E-アレナのプロトタイプである、短寿命核分離加速実験装置が KEK 田無分室 (旧原子核研究所) ではほぼ完成した。本施設は SF サイクロトロン、ISOL (Isotope Separator on Line)、それに重イオン・リニアックからできている。サイクロトロンからの 40 MeV、数 μA の陽子ビームを厚い標的に当て生成された短寿命核は ECR イオン源等でイオン化され、ISOL で質量分離され 60 m ビーム・ラインを通して、重イオン・リニアックに運ばれる。重イオン・リニアックは図 1 に示すように 25.5 MHz の SCRFQ (Split Coaxial RFQ) と 51 MHz の IH (Interdigital-H) リニアックからできている。長さ 8.6 m、直径 0.9 m の SCRFQ は q/A (荷電質量数比) が 1/30 以上のイオンを 2 から 172 keV/u まで加速する。全長 5.6 m の IH は q/A が 1/10 以上のイオンを最高エネルギー 1.05 MeV/u まで加速する。SCRFQからのビームの q/A が 1/10 以下の時には

炭素箔膜で荷電変換し、 q/A を 1/10 以上にして IHリニアックで加速する。出力ビームのエネルギーは連続的に変えることができる。デューティ・ファクターはイオンの q/A に依存し、 $q/A \geq 1/16$ のとき 100%で、 $1/17 \geq q/A \geq 1/30$ のとき $270 \times (q/A)^2 \times 100\%$ で与えられる。

今までに、SCRFQ の性能試験[1]、SCRFQ/IH の総合試験[2]、荷電変換器を使った加速試験[3]、短寿命核の加速試験[4]等が行われて来た。

2. リニアックの概要

2.1. SCRFQ

核研で開発した SCRFQ は次のような特徴を持っている。1) 小さい q/A を持つ低速イオンを高い伝送効率で加速できる。2) マルチ・モジュール空洞構造を採用する事によって長いベーン電極を複数の点で安定に支える事ができる。3) 電極とそれを支えるステム・フランジを 12 本の支柱によって一体構造物として組み立てる事によって、

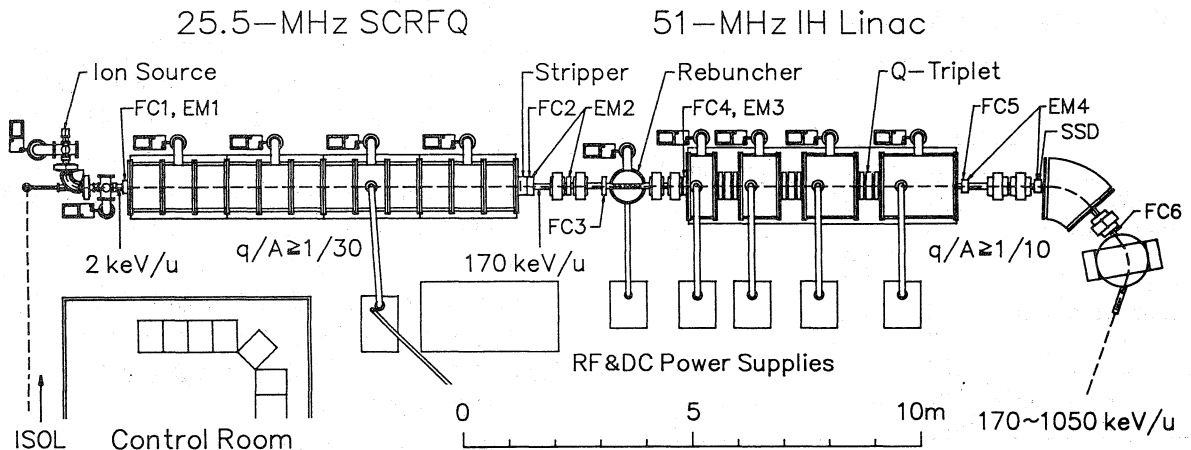


図 1 短寿命核用重イオン・リニアック。

ベーン電極を簡単に、精度良く据え付ける事ができる。4) ベーン先端の横方向の曲率半径 ρ_T はバンチ形成部分では軸に沿って変化しているが、加速部分では平均開口半径 r_0 に一定である。5) どちらのベーン形状に於いても、 A_1 補正 (実際の加速電場がカプチンスキーとテプリヤコフの二項電位関数によって与えられる加速電場と同じになるように、開口半径パラメーター a と変調パラメーター m を補正する) がなされている。

表1 SCRFQ の主なパラメーター

Normalized emittance (ϵ_n)	0.6 π mm·mrad
Vane length (l_v)	8.585 m
Number of cells (radial matcher)	172(20)
Intervane voltage (V)	108.6 kV
Max. surface field ($E_{s, max}$)	178.2 kV/cm (2.49 Kilpatrick)
Mean aperture radius (r_0)	0.9846 cm
Minimum aperture radius (a_{min})	0.5388 cm
Max. modulation index (m_{max})	2.53
Margin of bore radius (a_{min}/a_{beam})	1.2
Final synchronous phase (ϕ_f)	-30°
Focusing strength (B)	5.5
Max. defocusing strength (Δ_b)	-0.17
Transmission efficiency at 0(5) mA input	91.4(86.0)%

2.2. IH リニアック

IH リニアックは次のような特徴を持っている。
1) シャント・インピーダンスを高くするために、集束要素を持たない小さなドリフト・チューブと、 π モード加速が採用されている。2) 加速空胴は短めに4分割され、ビームの集束はタンク間に置かれた三連の四極電磁石によって、エネルギーの連続可変は空胴の RF 電圧と位相の調節によって行われる。集束用の三連四極電磁石を設置する空胴間の距離は、軸方向のアクセプタンスの減少を極力抑えるように、四極電磁石の実現可能な磁場勾配を考慮し、できるだけ短くした。各空胴の軸方向の電圧、電場分布は両端を除いて空胴全域に渡って平らである。加速位相は -25° である。

表2 IH の主なパラメーター

	Tank1	Tank2	Tank3	Tank4
Energy (keV/u)	294	475	725	1053
Tank length (cm)	68	90	115	153
Tank diam. (cm)	149	149	149	134
Bore radius (cm)	1.0	1.2	1.4	1.6
Drift tube diam. (cm)	3.8	4.4	4.6	5.2
No. of cells	9	10	11	12
Gap voltage (kV)	200	250	315	370
Ef. shunt imped. (M Ω /m)	264	289	268	218
Power loss (kW)	10.5	15	25	39

軸方向のアクセプタンスと横方向の規格化アク

セプタンスは、それぞれ 200π keV/u·deg と 1.7π mm·mrad である。これらの値は SCRFQ からのビームのエミッタンスの約3倍に相当する。

3. ビーム輸送系

図1で見られるように、ISOL からのビームラインの他に、安定核用ビームラインも用意された。安定核用の LEBT (Low-Energy Beam Transport) は 2.45 GHz ECR イオン源、90° 偏向電磁石、二台の四極電磁石、それに四台のアイントゥエル・レンズからできている。異なる q/A を持つイオンを分離する偏向電磁石の運動量分解能は 0.65% である。MEBT (Medium-Energy Beam Transport) は荷電変換器 (10 μ g/cm² の炭素箔膜)、リバンチャー、それに二台の二連四極電磁石からできている。MEBT の全長は 3.76 m である。リバンチャーに必要な全加速電圧は 200 kV である。消費電力を小さくするためと、空胴をコンパクトにするために、加速ギャップ数が6の二重同軸型共振空胴を開発した。HEBT (High-Energy Beam Transport) の運動量分析系は二連四極電磁石、50° 偏向電磁石、4 mm 幅の垂直スリット、それに集電板からできている。この分析系は設計エミッタンスを持つ 1 MeV/u イオン・ビームに対して 1% 以下のエネルギー分解能を持っている。SCRFQ と IH の入口、出口には、それぞれ二連スリット型のエミッタンス・モニターとファラディ・カップが置かれている。

4. ビーム・テスト

RFQ の出力ビームのエネルギーを確認するために、ファラディ・カップ FC2 と FC3 の間のビーム・バンチの TOF (飛行時間) を測定した。FC2、FC3 間の距離とバンチ信号の時間差から、平均エネルギーを求めた。結果は設計値に近い 170.9 ± 1.3 keV/u である。

SCRFQ/IH リニアックの性能が N^{2+} ビームを使って調べられた。SCRFQ への入射電流はピークで約 1μ A、SCRFQ/IH の RF デューティは 1.2 ms \times 100 Hz、リバンチャーの RF デューティは 100% であった。SCRFQ からの出力ビームは荷電変換器を使わず直接 IH へ入射された。IH の出力ビームのエネルギーとその広がりには各 IH タンクのギャップ電圧と RF 位相に非常に敏感であるので、それらの値をまず設計値に合わした。IH の伝送効率が最大になるように集束要素の調整を行った後、ビーム性能を測定した。

六つの運転モードで得られた出力ビームのエネルギー・スペクトルが図2に、1.05 MeV/u まで加速した時の伝送効率が図3に、RFQ と IH の入口、

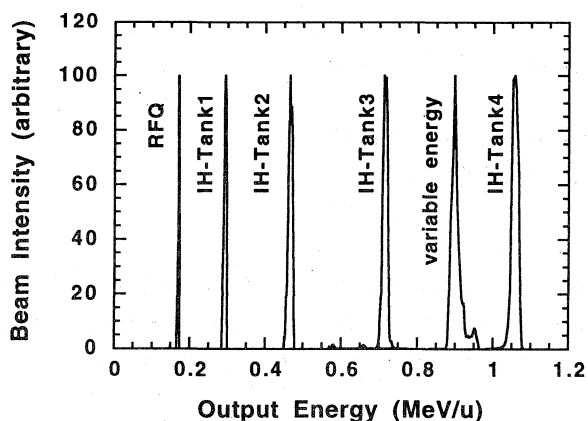


図2 六つの運転モードで得られたエネルギー・スペクトル。

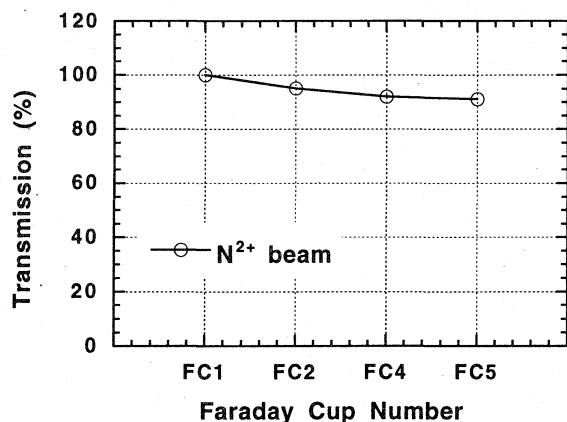


図3 測定された伝送効率。

出口で測ったエミッタンスが図4に示されている。MEBT/IHの伝送効率ほとんど100%であった。図2の中の”IH-Tank3”はSCRFAQとIHの第一、第二、第三タンクが運転され、第四タンクだけ運転されていない時に得られた結果を示している。”IH-Tank4”から分かるように、ビームは最大設計エネルギー1.05 MeV/uまで加速されている。測定されたエネルギー T と、その広がり $\Delta T/T$ が表3にまとめられている。ここで、 ΔT は90%イオンを含むスペクトルの 2σ で定義されている。

今年3月、短寿命核 $^{19}\text{Ne}^{2+}$ (半減期17.3秒)の初加速に成功した。 ^{19}Ne ビームは $^{19}\text{F}(p,n)$ 反応で創られた。ターゲットはLiF+Cの約 $1\mu\text{m}$ の粉末で 400°C に熱せられた。ターゲットでの生成率は30 MeV陽子で 2×10^9 aps/ $1\mu\text{A}$ であると概算される。微弱ビーム強度は、ビームを止めて、 β^+ 崩壊による511 keV γ 線の強度をGe又はCsI検出器で測定し求めた。現在、ISOLグループが最初の実験に向けてビーム強度を上げる努力をしている。

表3 エネルギーとエネルギー幅

	RFQ	Tank1	Tank2	Tank3	Tank4
$T(\text{keV/u})$	172	293	476	726	1059
$\Delta T/T(\%)$	1.56	1.65	1.97	1.15	1.12

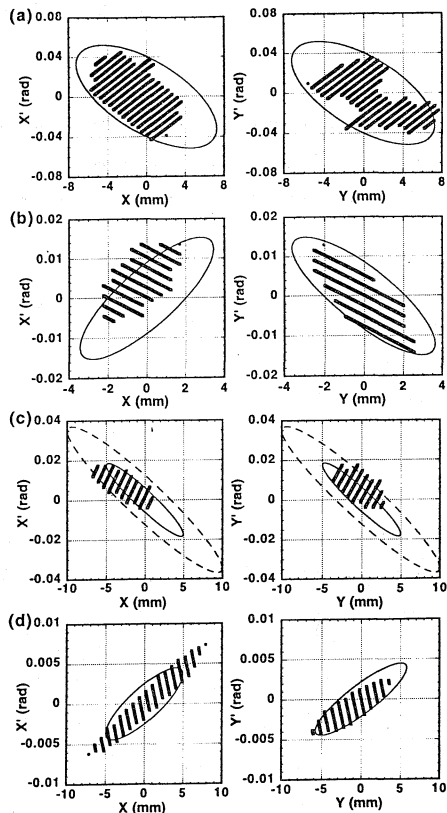


図4 RFQの入口(a)、出口(b)とIHの入口(c)、出口(d)のエミッタンス形状。

5. まとめ

SCRFAQの伝送効率は90%以上で、IHリニアックの伝送効率は約100%であった。SCRFAQ、IH共にビームテストの結果は予定通りの性能を示している。高電力試験では最大電圧でデューティー20%までテストした。今後の課題としては、ビームの安定化、目標デューティの達成、それに運転制御系の整備等がある。

参考文献

- [1] M. Okada et al., these Proceedings.
- [2] S. Arai et al., Beam Test Results of the INS RFQ/IH Linac, Proc. of the 18th Int. Linac Conf., Geneva, Switzerland, 1996.
- [3] K. Niki et al., these Proceedings.
- [4] M. Tomizawa et al., Acceleration Test of Radioactive Nuclear Beam at INS, Proc. of the 1997 Particle Accelerator Conf., Vancouver, Canada, 1997.