

# 短寿命核ビーム KEK・原研共同研究施設に於ける重イオンリニアック

新井重昭<sup>1,A)</sup>、新垣良次<sup>A)</sup>、仁木和昭<sup>A)</sup>、岡田雅之<sup>A)</sup>、武田泰弘<sup>A)</sup>、竹内末広<sup>B)</sup>、富沢正人<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> 高エネルギー加速器研究機構

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

<sup>B)</sup> 日本原子力研究所東海研究所

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

## 概要

短寿命核ビーム KEK・原研共同研究施設の建設が本年度から3年計画でスタートした。本施設では、短寿命核ビームや安定核大強度ビームによる核物理、核化学、物質科学などの研究が行われる。計画では、原研のタンデム施設に田無で建設した短寿命核分離加速実験装置を導入し、両者の加速器を有機的に結合し、短寿命核ビームや安定核大強度ビームを創る。当初はビームのエネルギーは 1.05MeV/u であるが、近い将来にはKEK リニアックに  $q/A \geq 1/7$  のイオンを加速する IH2 リニアックを加え、超伝導ブースター・リニアックと連結しビームのエネルギーを 6 MeV/u 以上にする予定である。

## 1. はじめに

KEK の短寿命核分離加速実験装置は大型ハドロン計画 E-アレナのプロトタイプとして田無キャンパスに建設された。建設の目的は短寿命核用リニアックの R&D と短寿命核ビームによる開拓研究を推進する事であった。1999 年秋の田無分室の移転に伴う運転停止までの間、物理の研究においては、主に天体核物理の研究が行われ<sup>1)</sup>、加速器の研究においては、リニアックの性能試験<sup>2)</sup>、加速性能の改善、ビーム診断装置の開発等が行われて来た。

1999 年秋の運転停止後、短寿命核施設の移転計画がいろいろ検討されて来た。その結果、1) 我々のリニアックを既存の超伝導ブースター・リニアック<sup>3)</sup>に接続すれば、短寿命核ビームをクーロン障壁を越えるエネルギーにまで加速する事ができる、2) ウラニウムを研究に使える、と言う理由で原研東海研究所のタンデム施設に移転する事になった。そして、KEK と原研の合意により、短寿命核ビーム共同研究施設の第1段階の建設が本年度から3年計画でスタートした。

計画の内容は次のとおりである。1) 第1段階として、原研のタンデム施設に田無で建設した短寿命核分離加速実験装置を導入し、エネルギー1.05MeV/u の短寿命核ビームを創る。2) 第2段階として KEK リニアックを IH2 リニアックで増強し、超伝導リニアックと接続しビームのエネルギーを原子核のクーロン障壁を越えるエネルギーにまで加速する。ここでは、施設の概要、加速器の構成、等を報告する。

## 2. 施設の構成

短寿命核ビーム研究施設の配置を図1に示す。完成後の施設はタンデム加速器、オンライン同位体分離器 (ISOL)、荷電増幅器 (CB)、分割同軸型 RFQ (SCRFFQ)、インターデジタル-H 型 (IH) リニアック、IH2 リニアック、超伝導リニアック、それに各種実験装置から構成されている。上記加速器は有機的に結合され、色々な使い方が可能である。タンデムからの 36 MeV、3μA 陽子ビームを厚い標的に当てて創られた短寿命核は、ISOL イオン源でイオン化され、ISOL で質量分離され、荷電増幅され SCRFFQ に入射される。一方、安定核大強度ビームはローカル・イオン源 (ECRIS) で創られ SCRFFQ に入射される。

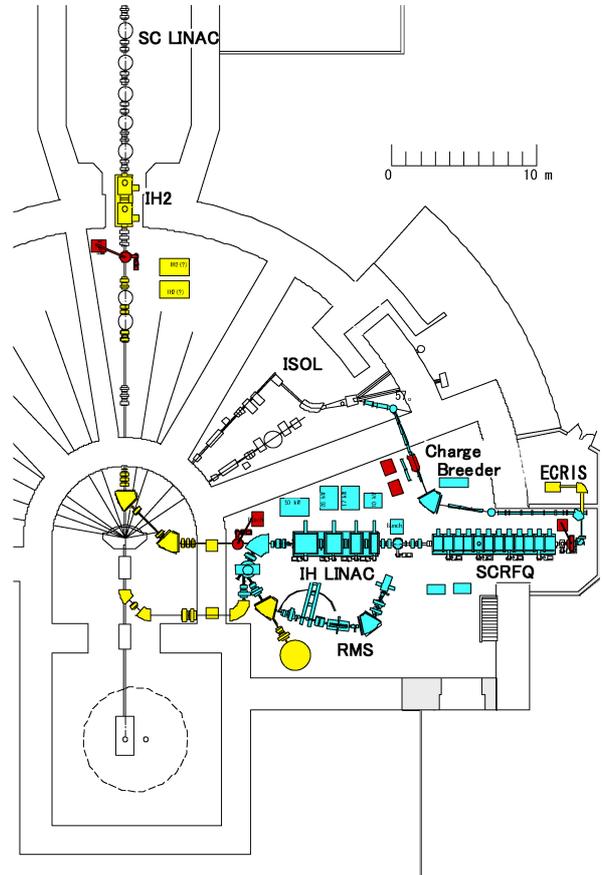


図1：短寿命核ビーム共同研究施設の配置

<sup>1)</sup> E-mail: shigeaki.arai@kek.jp

SCRFQ と IH リニアックで 2 keV/u から 1.05 MeV/u まで加速されたビームは、1) そのまま RMS 実験室へ、2) 振り分け電磁石を通してタンデムビーム標的室へ、3) IH2 と超伝導リニアックで更に加速され高エネルギー実験室へ送られ実験に使われる。

### 3. 重イオン複合リニアック

#### 3.1 KEK SCRFQ/IH リニアック

KEK リニアックは 25.5 MHz SCRFQ (Split Coaxial RFQ) と 51 MHz IH (Interdigital-H) リニアックから構成されている。このリニアックの主要緒元が表 1 にまとめられている。長さ 8.6 m、直径 0.9 m の SCRFQ は  $q/A$  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。SCRFQ の特徴は、1) 同一周波数の 4 翼型 RFQ に比べ非常にコンパクトである、2) 非常に重いイオンを非常に低いエネルギーから 90% 以上の高い伝送効率で加速できる、という事である。一方、IH リニアックの特徴は、1) 集束用四極電磁石を空洞タンク間に集中的に配置した、加速と集束の機能分離型リニアック (SDTL: Separated Function Drift-Tube Linac) である、2) ビームのエネルギーを各空洞の RF 電圧と位相を調節する事によって連続的に変える事ができる、という事である。これらの優れた性能が加速試験によって確かめられた。ここでは、SCRFQ の伝送効率、IH ビームのエネルギースペクトルの測定結果をそれぞれ図 2、図 3 に示す。

加速器の設計伝送効率は SCRFQ で 90%、IH で 100% である。測定の結果、加速器全体としては設計どおりの 90% に達している。エネルギースペクトルの左上に書かれた加速構造名はどの加速構造からの

表 1 : KEK リニアックの主要緒元

	RFQ	IH	
Frequency ( $f$ )	25.5	51	MHz
Synchronous phase ( $\phi$ )	-30	-25	deg.
Charge-to-mass ratio ( $q/A$ )	$\geq 1/30$	$\geq 1/10$	
Input energy ( $T_{in}$ )	2	172	keV/u
Output energy ( $T_{out}$ )	172	172-1053 keV/u	
Normalized emittance ( $\epsilon_n$ )	$0.6\pi$		mm•mrad
Energy spread ( $\Delta T/T$ )*	1.03	$\leq 2.8$	%
RIB intensity	$10^7-10^{10}$		atoms/s
Duty factor	30	100	%
Repetition rate	20-1000		Hz
Total length	8.6	5.6	m

\*  $\Delta T$  is defined by 2-rms of the spectrum containing 90% ions.

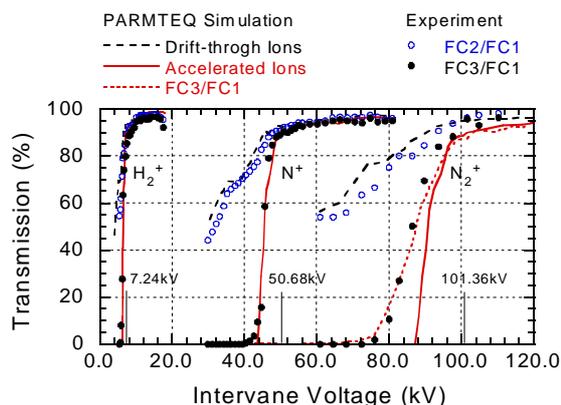


図 2 : SCRFQ の伝送効率

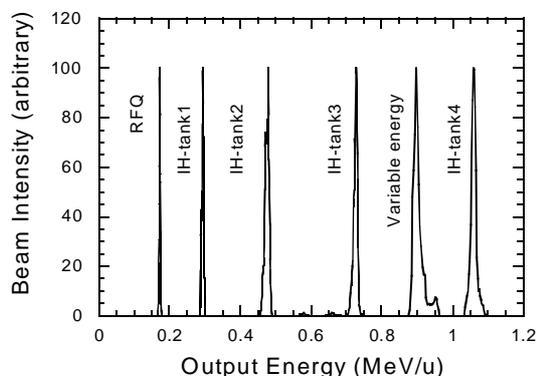


図 3 : SCRFQ/IH の異なる運転モードでのエネルギースペクトル

出射スペクトルを示している。図中の可変エネルギーは IH タンク 4 の位相と振幅を変えて得られた。

このリニアックを原研の 129.8 MHz 超伝導リニアックにつなぐためには、SCRFQ と IH の周波数をそれぞれ 25.96 MHz と 51.92 MHz に変えなければならない。SCRFQ の周波数変更は空洞の基本構造を変えずに、周波数とヴェインの電圧分布を調整する既存の固定チューナーを変える事によって可能である。IH の周波数を変えるためには、ドリフトチューブのギャップ間隔を広げる必要がある、ドリフトチューブを作り変えなければならない。

#### 3.2 IH2 リニアック

KEK リニアックと JAERI 超伝導リニアックの間に置かれる IH2 リニアックの設計中の主要緒元が表 2 に示されている。全長 3.1 m の IH2 は  $q/A$  が 1/7 以上のイオンを最高エネルギー 2 MeV/u まで加速する。このエネルギーは次節で述べるように、超伝導リニアックの現実的な最低入射エネルギーである。周波数は超伝導リニアックと同じ 129.8 MHz である。共振空洞の基本構造は KEK IH と同じで、シャントインピーダンスを高めるためにドリフトチューブ内には集束要素を入れずに、横方向の集束はタンク間に置かれた三連四極電磁石で実現する。

表 2 : IH2 リニアックの主要諸元

	Tank 1	Tank 2	
Frequency (f)	129.8		MHz
Synchronous phase ( $\phi$ )	-25		deg.
Charge-to-mass ratio (q/A)	$\geq 1/7$		
Normalized acceptance	$\geq 1.4 \pi$		mm $\cdot$ mrad
Input energy ( $T_{in}$ )	1.05	1.54	MeV/u
Output energy ( $T_{out}$ )	1.54	2.03	MeV/u
Number of cells	19	19	
Gap voltage	250	250	kV
Tank length	1.15	1.35	m
Magnetic-Q triplet length	0.6		m
Duty factor	100		%

### 3.3 JAERI 超伝導リニアック

129.8 MHz 超伝導リニアックは 10 台のクライオスタットと、クライオスタット間に配置された 9 台の二連四極電磁石から構成されている。1 台のクライオスタットにはニオブ製の 4 個の超伝導加速空洞が入っている。空洞は 2 ギャップ  $\lambda/4$  共振器で、最適ビーム速度は光速の 10% で設計されている。このリニアックの特徴は、最適ビーム速度が同じ空洞の位相を粒子と同期させる事によって、広い速度領域の重イオンを加速する事ができるという事である。空洞の主要諸元が表 3 に示されている。空洞あたりの rf 消費電力が 4W で 6MV/m 以上の加速電界が発生する。加速電界は空洞あたりのエネルギー利得を与える次式によって定義されている。

$$\Delta E = qE_a L_a (T(\beta)/T(\beta_0)) \cos \phi \quad (1)$$

ここで、 $q$  は電荷、 $E_a$  は加速電界、 $L_a$  はビーム軸に沿った空洞内径 (加速長)、 $T(\beta)$  は速度  $\beta$  の粒子に対するトランジット・タイムファクターで  $T(\beta_0)=0.9$ 、 $\phi$  は平均加速位相である。

次に、このリニアックの入射エネルギーに対する

表 3 : 超伝導空洞の主要諸元

Frequency (f)	129.8	MHz
Resonator	$\lambda/4$	type
Optimum ion velocity ( $\beta_{opt}$ )	0.10	
Rf stored energy ( $U/E_a^2$ )	0.046 J/(MV/m) <sup>2</sup>	
Peak surface fields / $E_a$		
electric ( $E_p/E_a$ )	4.6	
magnetic ( $H_p/E_a$ )	7.5 mT/(MV/m)	
Reference acceleration length ( $L_a$ )	0.15	m
Acceleration gap length	0.04	m
Drift tube length	0.07	m
Outer conductor interior length along beam axis	0.15	m
Duty factor	100	%

出力エネルギー特性を示す。トランジット・タイムファクターは 2 ギャップ空洞に対する次の近似式によって求められる。

$$T(\beta) = \frac{2}{\pi} \frac{\beta}{\beta_0} \left[ \cos \frac{\pi \beta_0}{4 \beta} - \cos \frac{3\pi \beta_0}{4 \beta} \right] \quad (2)$$

ギャップ電圧 : 0.375 MV、平均加速位相 : -25 度で計算した入射エネルギーと最大出力エネルギーの関係が図 4 に示されている<sup>[4]</sup>。 $q/A$  が 1/4 と 1/7 の場合について描かれている。入射エネルギーが 1.2 MeV/u 以上あればこのリニアックはイオンを加速できる事を示している。我々は安い予算でこのシステムを実現させるために、IH2 の出力エネルギーを 2 MeV/u に設定した。この時、 $q/A=1/7$  のビームでは 6 MeV/u まで、 $q/A=1/4$  のビームでは 9 MeV/u まで加速できる。

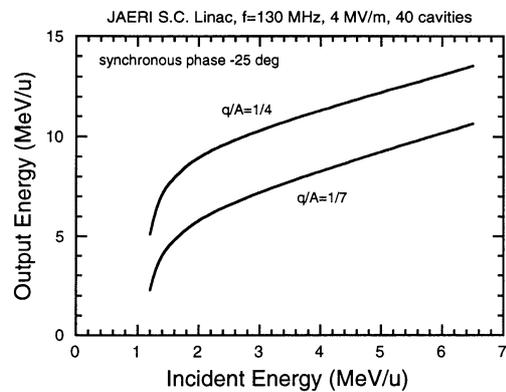


図 4 : 超伝導リニアックの入射エネルギーと出力エネルギーの関係

## 4. まとめ

上記複合リニアック建設には幾つかの課題がある。1) 超伝導リニアックの周波数 129.8 MHz に合わせ、SCRFO と IH の周波数をそれぞれ 25.96 MHz と 51.92 MHz に変えなければならない。2) IH の最大出力ビームエネルギーは 1.05 MeV/u であるが、超伝導リニアックの入射エネルギーは 2 MeV/u ぐらい必要である。それ故、1.05 から 2 MeV/u まで加速する IH2 を建設しなければならない。3) SCRFO/IH リニアックの伝送効率約 90% である。貴重な短寿命核を無駄にしないために、この高い伝送効率を超伝導リニアックとつないだ後でも維持しなければならない。

## 参考文献

- [1] H. Miyatake et al., 98 年 1 月分 SF サイクロトロン共同利用申込書、1997.
- [2] S. Arai et al., "Beam Test Results of the INS RFQ/IH Linac", Proc. 1996 Int. Linac Conf., Geneva, Switzerland, 1996, p. 575.
- [3] S. Takeuchi et al., "Niobium Superconducting Quarter-Wave Resonator as a Heavy Ion Accelerating Structure", Nucl. Instr. and Meth. A 281 (1989) 426.
- [4] 富澤正人, "KEK 田無重イオンリニアックと原研タンデムブースター超伝導リニアックの接続の可能性について", KEK Report 99-6, 1999