話　題

東海短寿命核ビーム施設 TRIAC の現状

新井　重昭*1・TRIAC 共同研究グループ*2

Status of the Tokai Radioactive Ion Accelerator Complex (TRIAC)

Shigeaki ARAI*1, for the TRIAC collaboration*2

Abstract

Tokai Radioactive Ion Accelerator Complex (TRIAC) constructed by High Energy Accelerator Research Organization (KEK) and Japan Atomic Energy Agency (JAEA) started to supply the 0.178 to 1.1 MeV/u radioactive nuclear beams (RNBs) for experiments since November 2005. The TRIAC facility is an Isotope Separator On Line (ISOL) based RNB facility, and uses a tandem accelerator (primary accelerator), an ISOL, a charge-breeder of electron cyclotron resonance type, and a heavy-ion linac complex (post accelerator). Several experimental studies have been performed successfully using ^{8}Li beams with various energies. In order to increase the beam energy up to 5–8 MeV/u, it is planned to connect the heavy-ion linac to the superconducting linac existing at JAEA tandem facility.

1. はじめに

TRIAC（Tokai Radioactive Ion Accelerator Complex）[1]は高エネルギー加速器研究機構（KEK）と日本原子力研究開発機構（JAEA）の共同研究施設として2005年度から稼動している．現在，荷電質量数比（q/A）が1/9以上の短寿命核イオン・ビームが，0.178～1.09 MeV/uの任意のエネルギーで供給され，天体での元素合成の研究や物質中でのイオンの拡散現象の研究等で使われている．短寿命核ビーム施設には，1)高エネルギー重イオン・ビームを標的原子核に衝突させ，入射核破砕反応で生成したRIビームから目的のビームを分離し利用する飛行分離型施設と，2)陽子や重イオン・ビームを厚い標的に当てて生成した短寿命核をイオン化し，質量分離した後加速し利用するISOL（Isotope Separator On Line）加速型の二種類がある．本施設は後者に該当し，高品質，高強度，エネルギー可変の短寿命核ビームを供給できるという特徴を持っている．

当初計画完成後のTRIACの鳥瞰図を図1に示す．TRIACを構成するSCRFQ[2]（Split Coaxial RFQ）とIH（Inter-digital H）リニアックは，大型ハドロン計画E–アレナのプロトタイプ（短寿命核分離加速実験装置）の加速器として旧東大原子核研究所（INS，後のKEK田無分室）で開発され，1996～2000年まで短寿命核ビーム開発実験に使われた．KEK田無分室のつくば移転後，短寿命核分離加速実験装置はKEKと旧日本原子力研究所（原研）の共同研究として2001～2003年度に掛けて原研タンデム施設に移設され，TRIACとして再生し，現在に至っている．

TRIAC施設には経済的・学問的に次のような利点がある．1)両機関の研究設備・研究成果が有効利用され，少ない予算で短寿命核ビームによる科学研究推進の目的が達成される．2) JAEAに設置されている事によりウラニウムが研究に使え，ウランの陽子誘起核分裂反応による中性子過剰核ビームの供給が可能となる．3)タンデム・ブースターである超伝導リニア

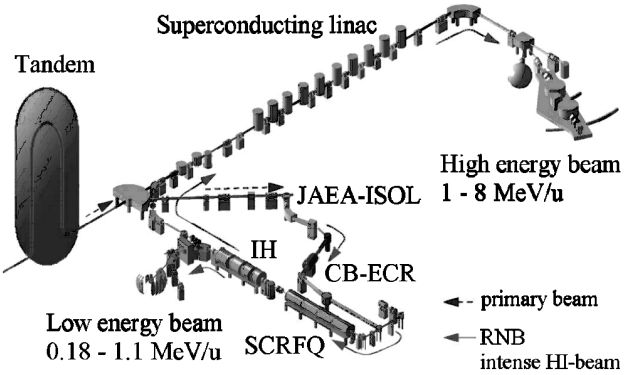

図1　当初計画完成後のTRIACの鳥瞰図．

*1 高エネルギー加速器研究機構　KEK　E-mail: shigeaki.arai@kek.jp）
*2 TRIACでの研究を進めるKEKとJAEAの共同研究グループ

ック[3,4]に接続すれば，クーロン障壁を越えるエネルギーが得られ，中性子過剰核による核反応機構の研究や超重元素の研究等が可能になる．

今までに，エネルギー 1.09 MeV/u までの短寿命核ビームを供給するという TRIAC の第 1 段階は達成したが，TRIAC と超伝導リニアックを接続し，エネルギーを 5～8 MeV/u まで増強するという第 2 段階の計画はまだ達成されていない．現在，その実現に向けた作業（ビーム光学の計算，既存の電磁石の改造，リバンチャー空洞のモデル・テスト等）が重点的に進められている．ここでは，施設の概要，得られた物理実験の成果，第 2 段階の計画を紹介する．

2. 施設の概要

TRIAC 施設では厚い標的に当てる一次ビーム（陽子や重イオン・ビーム）を，タンデム加速器が供給している．JAEA-ISOL[5]は核分裂反応などで作られた短寿命核をイオン化・質量分離し，荷電増幅器[6,7]（CB-ECR）は 1 価のイオンを荷電質量数比が 1/9 以上の多価イオンに変換する．このように作られた短寿命核ビームは，現在 SCRFQ と IH リニアックで最大 1.09 MeV/u まで加速され物理実験に使われている．近い将来には，IH リニアックからのビームが超伝導リニアックに入射されクーロン障壁を越えるエネルギーまで加速される予定である．更に，タンデム加速器では得られない大強度安定核ビームも SCRFQ，IH リニアック，超伝導リニアックで加速され実験に供給される予定である．

2.1 JAEA-ISOL

表 1 の性能を持つタンデム加速器からの一次ビームと標的核との衝突反応（核分裂，核変換，核融合）によって色々な短寿命核が作られる．作られた短寿命核は，ガス（Ne, Kr, Xe 等）や蒸発し易い元素（Sn, In 等）に適した FEBIAD（Forced Electron Beam Induced Arc Discharge）型と，イオン化ポテンシャルの低い元素（Li 等）に適した表面電離（Surface Ionization）型の 2 種類のイオン源によって，1 価のイオンとして引き出される．標的として，厚さ 330 mg/cm^2 の炭化ウラン（UC_x）を使い，エネルギー 34 MeV の陽子ビームを当てた時，今までに 19 元素の 102 放射性同位体が中性子過剰の核分裂片として質量分離された．**図 2** に分解能 1200，アクセプタンス 10 πmm・mrad を備えた JAEA-ISOL で質量分離された各同位体の陽子ビーム強度 1 μA に対する生成強度の測定値が示されている．

表 1　タンデム加速器の主な仕様

加速可能イオン	水素からビスマスまで
負イオン入射エネルギー	50～350 keV
端子電圧	2.5～18 MV
ビーム電流例	陽子　3 μA 塩素，ヨウ素　0.5 pμA

2.2 KEK 荷電増幅器

ISOL から 1 価のイオンで引き出された，質量数 9 以上の短寿命核を後段加速器（SCRFQ/IH リニアック）で加速するためには荷電質量数比が 1/9 以上になるように何らかの方法で荷電増幅しなければならない．効率の良い荷電増幅器の開発は，ISOL 加速型の短寿命核施設にとって，最重要課題の一つである．KEK の荷電増幅器開発グループは ECR（Electron Cyclotron Resonance）型の荷電増幅器（Charge Breeder）を開発し，世界で初めて実用化に成功した．KEK-CB の主な仕様と概念図を**表 2** と**図 3** にそれぞれ示す．ISOL から引き出された 1 価のイオン・ビームはプラズマ容器の入口で十分細く集束され，ほとんど 0 keV/u に減速され，ECR プラズマ中に入射される．ソレノイド磁場と 6 極磁場で保持されているプラズマ中で，目標とする多価イオンに変換された短寿命核は2 keV/u のエネルギーで引き出され加速器に送られる．ガスと金属の両方の元素を使って，今まで荷電増幅効率の改善のための研究が進められて来た．代

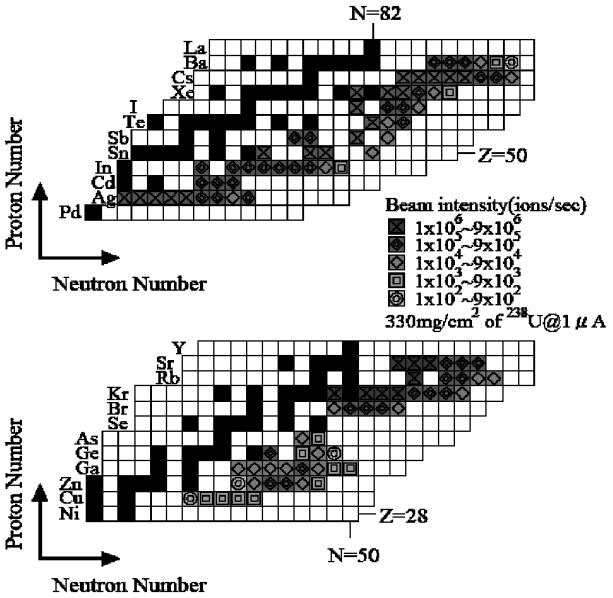

図 2　厚さ 330 mg/cm^2 の UC_x 標的と 34 MeV，1 μA 陽子ビームで作られた核分裂片同位体の測定強度．

表 2　KEK–CB の主要仕様

マイクロ波	Freq.：18 GHz, P_{max}：1 kW
2 台のソレノイド	B_{max}：1.5 T，B_{min}：0.5 T
補正コイル	B：0～0.5 T
6 極永久磁石	壁面での Brad：1.1 T
プラズマ容器	内径：75 mm，軸長：300 mm
共振領域	軸長：約 100 mm
引き出しエネルギー	T_{out}：2 keV/u

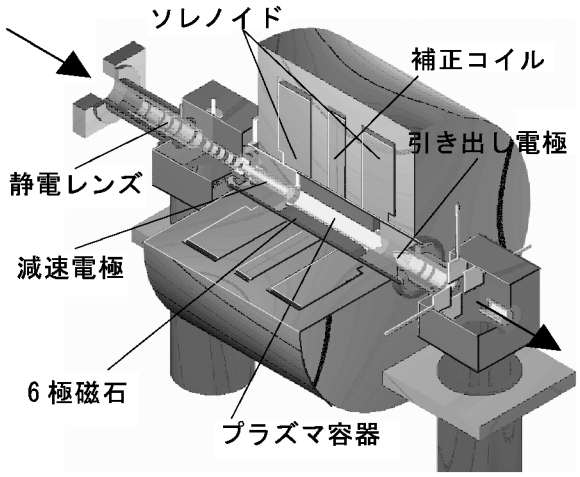

図 3　KEK–CB の構造概略図.

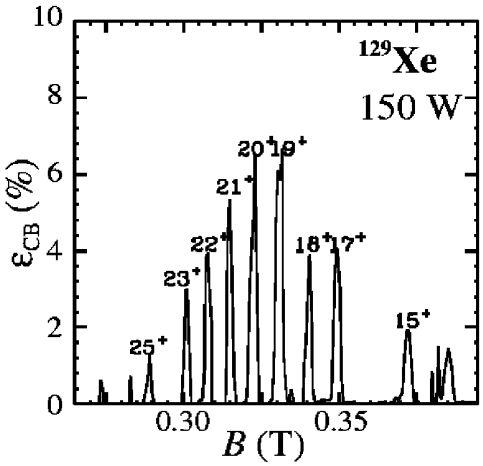

図 4　$^{129}Xe^{1+}$ が荷電増幅された後の荷電分布.

表的な測定結果として，希ガス元素 ^{129}Xe の荷電スペクトルが図 4 に示されている．縦軸は入射イオン強度に対する割合で横軸は分析磁石の磁場強度である．目標とする 20 価の荷電増幅効率は 7 %で，全ての価数の総和である全荷電増幅効率は 50% 程度である．この装置では，プラズマで荷電増幅されたイオンの半分は上流側に運ばれると考えられるので，Xe の場合には入射イオンの殆どが多価に変換された事を示している．今までに得られている結果が表 3 にまとめられている．

表 3　KEK–CB で得られた荷電増幅効率

入射イオン	目標価数	荷電増幅率	半減期
$^{129}Xe^{1+}$	20＋	7.4%	Stable
$^{92}Kr^{1+}$	12＋	8.2%	1.8 s
$^{138}Ba^{1+}$	22＋	2.4%	Stable
$^{126}In^{1+}$	16＋	2.3%	1.6 s

表 4　KEK リニアックの主要緒元

	RFQ	IH	
Frequency (f)	25.96	51.92	MHz
Synchronous phase (ϕ)	−30	−25	deg.
Charge-to-mass ratio (q/A)	≥1/28	≥1/9	
Input energy (T_{in})	2.07	178.4	keV/u
Output energy (T_{out})	178.4	178.4–1090	keV/u
Normalized emittance (ε_n)	0.6π		mm·mrad
Energy spread ($\Delta T/T$)*	1.03	≤2.8	%
Duty factor	30–100	100	%
Repetition rate	20–1000		Hz
Total length	8.6	5.6	m

* ΔT is defined by 2-rms of the spectrum containing 90 % ions.

2.3　KEK SCRFQ/IH リニアック

KEK リニアックは 25.96 MHz の SCRFQ と 51.92 MHz の IH リニアックから構成されている[8]．このリニアックの主な仕様が表 4 にまとめられている．長さ 8.6 m，直径 0.9 m の SCRFQ は荷電質量数比（q/A）が 1/28 以上のイオンを 2 から 178 keV/u まで加速し，全長 5.6 m の IH は q/A が 1/9 以上のイオンを最高エネルギー 1.09 MeV/u まで加速する．TRIAC では ISOL からのイオンの q/A が 1/9 以下の場合，荷電増幅器で 1/9 以上にするので，現在は SCRFQ も IH も q/A が 1/9 以上のイオンをデューティ 50% 以上で加速している．

SCRFQ は次のような特徴を持っている．1) 25.96 MHz という低い周波数で運転できるので，$\beta = 0.002$

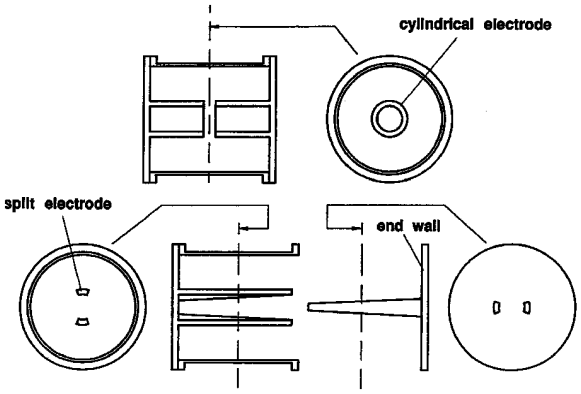

図 5　TEM 空洞から SC 空洞への展開図.

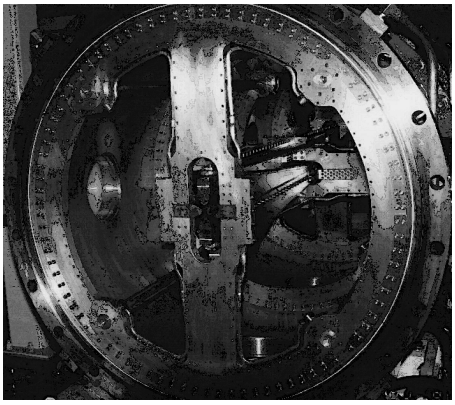

図 7　SCRFQ の内部．水平ヴェインは垂直ステム，垂直ヴェインは水平ステムによって支えられる.

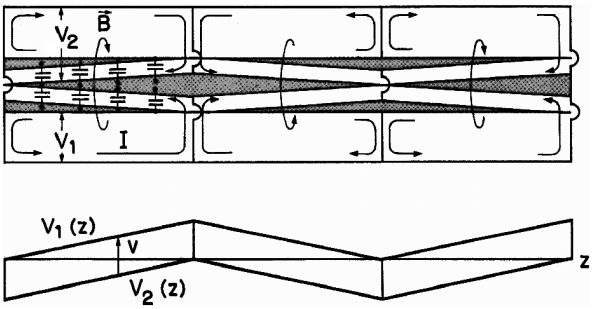

図 6　INS で開発された 3 モジュール単位空洞の RF 励振概念図.

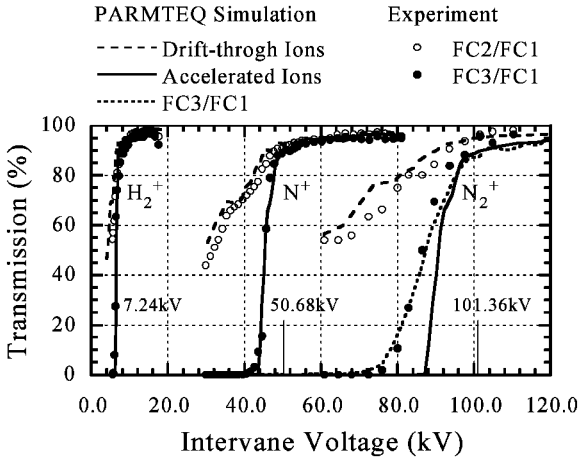

図 8　SCRFQ のヴェイン間電圧と伝送効率の関係.

という低速度のイオンを 90% 以上の高い伝送効率で加速できる．2)低い周波数にもかかわらず，加速空洞は同一周波数の 4 翼型 RFQ に比べ非常にコンパクトである．このような特徴を生み出す，SC（Split Coaxial）空洞は，図 5 に示すように，$2\times\lambda/4$ TEM 空洞から出来ていると理解できる．両方の対向電極を径方向に 2 分割し，お互いの電極を方位方向に 90°ずらしてはめ込む事によって，4 極電極が作られる．軸方向に長い電極を空洞端の一点だけでなく，2 点で支える為に，図 6，7 に示すような機械的に安定な構造が INS で開発された．高周波（RF）電圧は隣り合う電極間に発生し，RF 電流は，電極から隣の電極に向かって空洞内面を流れる．RF 磁場は 4 本の電極の周りを回転し，4 本の電極で囲まれた空間には 4 極電場が作られ，隣り合う電極間の電位差はビーム軸に沿ってほとんど平坦になる.

理想的な RFQ 電極の横方向断面の輪郭は双曲線である．SCRFQ では，電極間の耐電圧を上げるためと加工コストを下げるために，双曲線ではなく双曲線先端の曲率半径（ρ_T）による円で近似された 2 種類のヴェイン型電極が採用されている．1 つは，ρ_T が軸に沿って変化している 3 次元加工されたヴェインで，入口から 76 セルの中心までの低エネルギー部で使用され，2 つ目は，ρ_T が r_0（平均開口半径）に等しく一定である 2 次元加工されたヴェインで，残りの高エネルギー部で使用されている．理想的な RFQ 電極からのずれの影響は，加速電場に最も顕著に現れるので，それに対する補正が行われている.

SCRFQ のヴェイン間電圧と伝送効率の関係が図 8 に示されている．図から分かるように，q/A が 1/2 から 1/28 までのイオンが，適正なヴェイン間電圧によって，90% 以上の伝送効率で加速されている.

一方，IH リニアックは次のような特徴を持っている．1)ドリフト・チューブの静電容量を減らし高シャント・インピーダンスを実現するため，集束用 4 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 の電圧と位相を調節する事によ

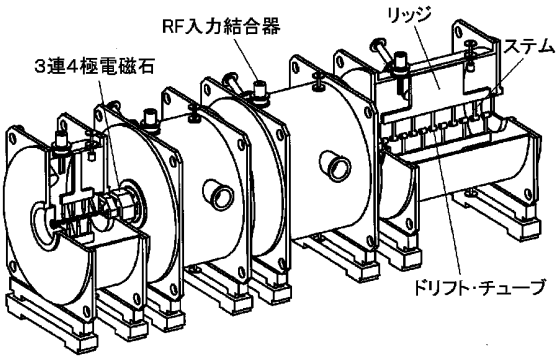

図9　4タンクから成るIHリニアック.

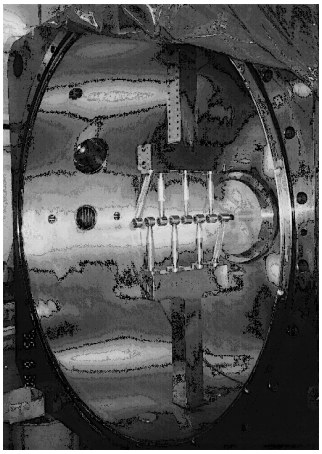

図10　IHリニアック・タンク1の内部.

って連続的に変える事ができる．図9から分かるように，IHリニアックは4台のタンクから成り，各タンク間に3連4極電磁石が設置されている．タンク1の内部構造が図10に示されている．各タンクの加速ギャップ数は十分な軸方向のアクセプタンスが得られるように，ビーム・シミュレーションによって決められた．タンク1〜4のギャップ数はそれぞれ，9, 10, 11, 12である．加速ギャップ電圧はキルパトリック・ファクターの80％を超えないように決められた．タンク1〜4の値はそれぞれ，200, 250, 315, 370 kVである．加速モードはπ-πで，同期位相は−25°である．

色々な運転モードで測定されたIH出力ビーム（$^{14}N^{2+}$イオン）のエネルギー・スペクトルが図11に示されている．矢印で指定されたスペクトルの頂点は各タンクの公称エネルギーを示し，他のスペクトルはRFの電圧と位相を適当に変えて得られたものである．得られたエネルギーはシミュレーションの結果と良く一致している．設計伝送効率はSCRFQで91.4％，IHで100％である．$^{14}N^{2+}$ビームを1 MeV/uまで加速した時の測定結果が図12に示されている．RFQ出口の95％の中には加速されてないビームも含まれているので，RFQからの有効なビームはほぼ100％IHに伝送されていると考えられる．リニアック全体としては設計どおりの90％に達している．

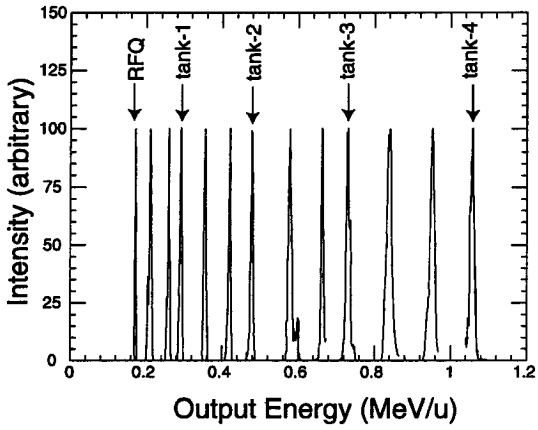

図11　IH出力ビームのエネルギー・スペクトル.

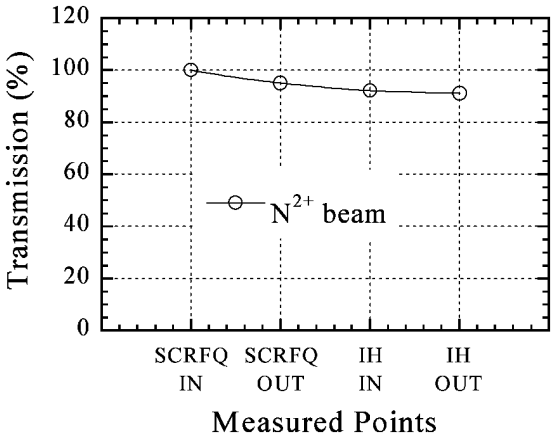

図12　SCRFQ/IHリニアックの伝送効率.

3.　短寿命核ビーム実験

TRIAC施設での共同利用実験は2005年度の後期から始められた．最初の主要な研究課題として採択された，1)リチウム・イオン導電体中での拡散の研究，2)初期宇宙での元素合成の研究，3)傾斜薄膜法によるスピン偏極短寿命核ビームの生成，に関連する実験が10^5 ppsのビーム強度を持つ^{8}Liビームを使って行われて来た．共同利用開始から2年足らずで，これらの研究は関連分野で大きな話題になるような成果を出している．

3.1　拡散の研究

パソコンの電池等で使われるリチウム電池の性能

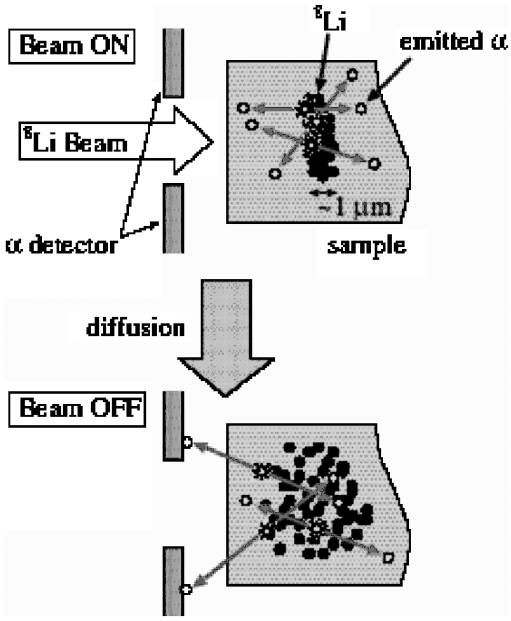

図13　試料中での Li イオンの拡散係数の測定．TRIAC ビームによって 1 μm 程度の分解能で打込み深さが決められる．

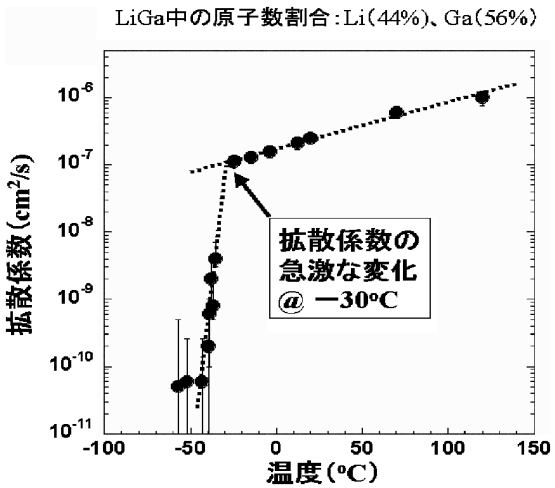

図14　試料（LiGa）中での Li イオン拡散係数の温度依存性．約 5 桁に及ぶ拡散係数の変化をとらえる事が出来た．

は，電池内でのリチウム・イオンの拡散速度に大きく依存している．新しい電池材料の開発にとって，リチウム・イオン導電体中での拡散係数の測定は重要である．この研究の中で，物質中のリチウム・イオンの拡散係数をオンラインで非破壊的に直接測定する実験手法が初めて開発された[9]．測定概念が図 13 に示されている．拡散トレーサーとしての ^{8}Li は，TRIAC でエネルギー約 500 keV/u に加速され，試料に注入される．拡散の様子は，^{8}Li の β 崩壊に伴い放出される α 粒子を半導体検出器で数える事により測定される．試料の表面から一定の深さに打ち込まれたリチウムは試料中に拡散し，表面に近いリチウムからの α 粒子は試料から外に放出され検出されるが，表面から遠いリチウムからの α 粒子は試料中で止まり，検出されない．α 粒子検出数の時間依存性から物質中でのリチウム・イオンの拡散係数が求められる．この方法で LiGa（Li 原子数割合 44%）中でのリチウム・イオンの拡散係数が −30℃ 辺りで急激に変化する様子が直接測定された．得られた拡散係数の温度依存性が図 14 に示されている．この現象は，LiGa 試料中の Li の空孔状態が無秩序相から秩序相に転移したためと考えられている．電気抵抗の測定でも，この温度で変則的に変化している様子が観測されているが，これは超イオン伝導の急激な変化によるという事がこの研究による拡散係数の直接測定により初めて明らかにされた．

3.2　天体核物理の研究

リチウムまでの軽い元素は，宇宙誕生の最初の 3 分間にビックバンにより生成されたと考えられている．観測された水素，重水素，ヘリウムの宇宙での存在比は，バリオン密度が一様とする標準模型からの予測値とよく一致する．しかしリチウムの存在比が説明出来ないため，バリオン密度非一様なビックバン（非一様ビックバン模型）の可能性も指摘されている．これらの模型で軽い元素の存在比を定量的に検討するためには，^{8}Li を経由する核反応率の測定値が必要となる．この研究では，TRIAC から供給された ^{8}Li ビームを使用して非一様ビックバン模型での元素存在比予測に必要な ^{8}Li(d, x)（x = p, t, α）反応断面積を測定した．実験ではビックバンの環境温度に対応する 0.18～0.75 MeV/u の低エネルギー・ビームを用いた．図 15 に測定された ^{8}Li(d, t)^{7}Li 反応断面積が示されている．重心系のエネルギー 0.8 MeV 近辺に今まで予想されていなかった大きな断面積ピークが発見された．この巨大断面積により，初期宇宙における ^{8}Li(d, t)^{7}Li 反応は，従来よりも約一桁速い速度で進む事が示唆される．最終的な軽元素存在比がどのように変化していくのか，実験結果を含めた非一様ビックバン模型による計算が進んでいる[10]．

3.3　偏極短寿命核ビームの生成

β 崩壊する短寿命核の核スピンを偏極する事により，短寿命核の核構造研究や，β 線−核磁気共鳴法による物性研究などが可能となる．これまでにもレーザーを用いた核スピン偏極生成などが，幾つかの核種について行われてきたが，汎用性のある生成法は確立されていない．この研究では，核スピン偏極ビームの

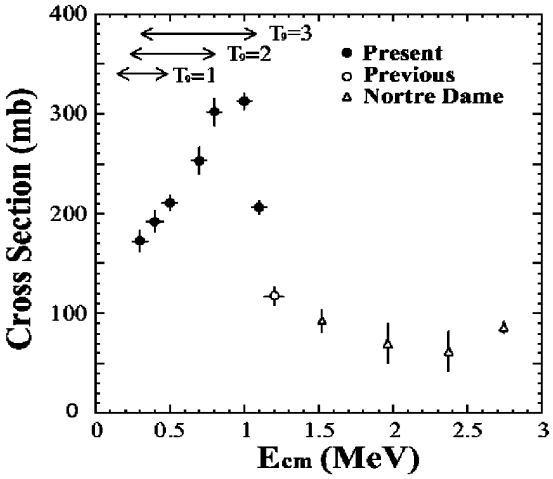

図15　^{8}Li(d, t)^{7}Li 反応の励起関数．黒丸が今回の結果．白丸は JAEA 反跳核質量分離器による結果．白三角はノートルダム大学による測定結果[11]．

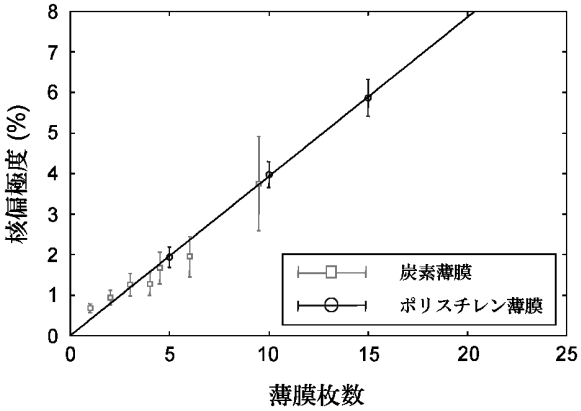

図16　^{8}Li ビームを用いて，偏極度の薄膜枚数依存性を測定した結果．誤差棒は統計誤差を示す．

生成に，元素に依存せず偏極生成が可能な傾斜薄膜法を用いている．傾斜薄膜法とは，ビーム軸に対して傾けた薄膜からビームが飛び出す際に，薄膜表面の原子と非対称に電子を交換することで生じる原子偏極を利用し，その偏極が超微細相互作用により核に移行することで核偏極ビームを生成する方法である．^{8}Li ビームを用いた開発実験では，核スピン偏極度の薄膜枚数依存性の測定を行った（図 16）．薄いポリスチレン膜（～30 nm）15 枚をビームに対して 70 度に傾けた場合には，6 % の核スピン偏極度が得られる事が分かった．今後，陽子数と中性子数が共に魔法数であることから，その核構造に関心がもたれている ^{132}Sn 近傍核の核スピン偏極ビームによる核モーメント測定，励起状態の分光研究や，偏極した ^{8}Li ビームによる時間反転対称性の破れ探索のための基礎実験が行われる予定である．

4.　短寿命核ビームのエネルギー増強

短寿命核ビームのエネルギーを 5～8 MeV/u まで増強し研究領域を更に拡大するため，JAEA タンデム施設の超伝導リニアック（SCL）と SCRFQ/IH リニアックを結合する計画が進められている．理想的な計画では，輸送・加速効率を上げるため，IH リニアックからのビームを IH2 リニアックによって適当なエネルギーまで加速し SCL に入射する事が考えられて来た[12]．しかし，早期にエネルギー増強を実現するための暫定的な計画として，現在，IH2 無しで，IH からのビームを直接 SCL に入射して加速する事が考えられている．51.92 MHz IH リニアックの通常運転では，最大エネルギーは 1.09 MeV/u である．IH からのビームを SCL へ入射する場合，SCL のエネルギー利得効率（図 17）を考えると，入射エネルギーは 2.0 MeV/u ぐらい高い値が良い．IH リニアックを特別な条件で運転した場合どこまでエネルギーが上がるかビーム・シミュレーションによって調べられた．荷電質量数比（q/A）が大きいイオンに対してほど設計値より高い加速電圧が掛けられるので，$q/A = 1/4$ イオンの加速が検討された．計算によると，第 4 タンクのギャップ電圧と加速位相によって，ほとんど上限エネルギーは決まる．タンク 1～3 までの電圧と位相を設計値に，タンク 4 のギャップ電圧を設計値より約 2.3 倍高い値に，加速位相を第 1 ギャップで 55°に合わせた時，出射エネルギーの最大値は 1.4 MeV/u と計算される．

129.8 MHz SCL 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，広い速度領域のイオンを加速する事ができる．SCL に $q/A = 1/4$，エネルギー 1.4 MeV/u のイオンを入射した時の加速特性がビーム・シミュレーションによって調べられた．SCL の 2 ギャップ空洞のギャップ電圧は 375 kV に，軸方向アクセプタンスを決める 2 ギャップでの平均加速位相はエネルギー利得も勘案して－20°に，横方向のアクセプタンスを決める 2 連 4 極電磁石の磁場勾配は位相前進が 90°になるように設定された．結果は，横方向アクセプタン

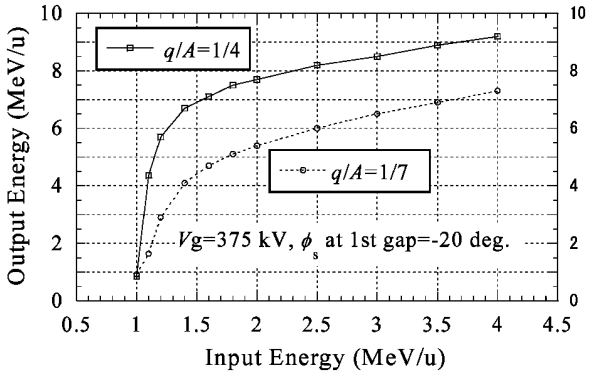

図17　SCL の入射と出射のエネルギーの関係.

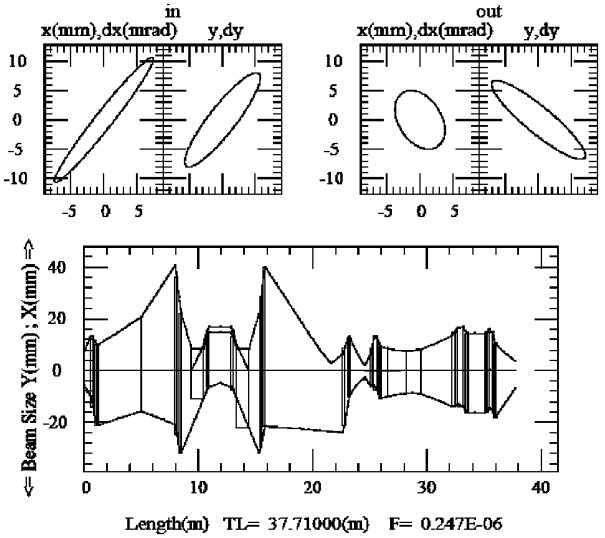

図18　IH から SCL までのビーム輸送ライン.

ス（A_x, A_y）が（0.0053, 0.0078）π cm·rad で，軸方向実効アクセプタンスが 0.4 π deg.·MeV/u である．横方向アクセプタンスは IH の設計エミッタンスの約 5～7 倍で，軸方向実効アクセプタンスは，IHの通常運転で得られるエミッタンス 0.25 π deg.·MeV/u（SCL の周波数で換算した値）の 1.6 倍である．

TRIAC と SCL は図 1 に示すように直角に配置されている．その交点にはタンデムからのビームを各実験室に分配する電磁石が置かれているので，それを避けるように 2 台の 45°偏向電磁石を置き，TRIAC からのビームラインをタンデムから SCL への既存の入射ビームラインに合流させる．IH からのビームを SCL に効率良く入射するために，2 台の偏向電磁石の他に，ビームの横方向集束用 4 極電磁石 19 台と軸方向集束用リバンチャー空洞 2 台が配置される．輸送ラインは軸方向整合システム，アクロマチックな機能を持たせた 90°偏向部，それに SCL のアクセプタンスにビームを合わす横方向整合部に分けて設計されている．90°偏向部はほぼ対称構造に成っている．IH のビームが SCL のアクセプタンスに整合された時の光学結果が図 18 に示されている．

5. ま と め

TRIAC の共同利用は 2005 年度（平成 17 年度）後期から始まり，共同利用研究課題として，平成 17 年度には 4 課題，18 年度には 5 課題，19 年度には継続・更新を含め 7 課題が採択され，短寿命核ビームによる実験が行われて来た．共同利用開始から 2 年間で，拡散実験と天体核実験においては，予想されていなかった重要な物理現象を初めて観測できた．TRIAC で Xe や In 等の重い短寿命核を加速するのに不可欠である荷電増幅器の開発においては，高効率な ECR 型を開発し，世界で初めて実用化に成功した．ISOL から物理実験標的までの輸送効率は，概算すると，荷電増幅器を使わない場合は 30～50％ で，荷電増幅器を使った場合は数％位である．施設の運転は非常に安定していて，ビーム調整後には，各機器のパラメータを殆んど変更する必要がない．今後の課題として，短寿命核生成のための一次ビーム強度の改善と，研究範囲を更に広げるためのエネルギーの増強，即ち，超伝導ブースター・リニアックとの早期接続が期待される．

謝辞

本稿を作るに当たって資料提供や文章表現に対する助言をして頂いた，拡散，天体核，偏極ビームの各実験グループの方々に深く感謝致します．

参 考 文 献

1) H. Miyatake et al., Nucl. Instr. Meth. B204 (2003) 746.
2) S. Arai et al., Nucl. Instr. Meth. A390 (1997) 9.
3) S. Takeuchi, T. Ishii, H. Ikezoe and Y. Tomita, Nucl. Inst. Meth. A287 (1990) 257.
4) S. Takeuchi et al., Nucl. Instr. and Meth. A 281 (1989) 426.
5) S. Ichikawa et al., Nucl. Instr. Meth. B204 (2003) 372.
6) S. C. Jeong et al., Nucl. Instr. Meth. B204 (2003) 420.
7) S. C. Jeong et al., Rev. Sci. Instr. 75 (2004) 1631.
8) S. Arai et al., Proc. 1996 Int. Linac Conf., Geneva, Switzerland, 1996, p. 575.
9) S. C. Jeong et al., Nucl. Phys. A746 (2004) 293.
10) H. Ishiyama et al., Oral presentation at INPC2007, Tokyo, Japan.
11) M. J. Balbes, et al., Nucl. Phys. A584 (1995) 315.
12) 富澤正人，KEK Report 99–6, 1999.