

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24510124

研究課題名(和文)次世代型不安定核反応実験に向けたRI生成・加速の新技术開発

研究課題名(英文)Development of a new method of RI beam production and acceleration for the next generation reaction experiments of unstable nuclei.

研究代表者

寺西 高(Teranishi, Takashi)

九州大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10323495

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：RIビームによる原子核実験は通常大規模施設で行われているが、これと相補的な小規模・低コストのRIビーム発生器が実現すれば有用である。我々はタンデム型静電加速器の特長(低運転コスト、核種・エネルギーを短時間で変更可、小エミッタンス等)を生かした、RIビーム発生器のための「ガス輸送・単一加速器再加速ISOL法」を開発している。本手法のため、RI生成ガス標的管およびガス導入可能な負イオン源のテストを行った。今回のテスト結果から将来得られるRIビーム強度を大まかに見積もった。炭素11に対しては370個/s、三重水素に対しては6200個/sという結果が得られ、本手法の実現可能性が示された。

研究成果の概要(英文)：Nuclear physics experiment using RI beams are usually performed at large scale experimental facilities. We are studying a possibility to construct a small-scale low-cost RI beam generator, as a complementary tool for RI beam experiments. For the RI beam generator, we are developing the "gas-transport single-accelerator post-acceleration ISOL" method, utilizing advantages of a tandem electrostatic accelerator (low operation cost, capability of quickly changing beam nuclide and energy, small beam emittances, etc.). For the present method, we tested an RI production gas target tube and a negative ion source which can accept gasses. From the present test results, RI beam intensities, expected in the future, were roughly estimated. The result were 370/s for carbon-11 and 6200/s for tritium, which demonstrated the feasibility of the present method.

研究分野：原子核物理(実験)、量子ビーム科学

キーワード：RIビーム タンデム加速器 不安定核 量子ビーム イオンビーム

1. 研究開始当初の背景

(1) 本研究にいたる経緯

現在、放射性同位体(RI)すなわち不安定核をビームとして用いた原子核実験が盛んに行われており、宇宙における元素合成や不安定核に特異な核構造の解明が目標となっている。国内では、世界最高強度の RI ビーム施設「RI ビームファクトリー」(RIBF)が理研で本格的に移動しはじめたところである。RIBF でのビーム生成にはウランなどの入射核破砕反応や飛行核分裂による破砕片を電磁石で分離してそのままビームとして使用する「飛行分離法」が用いられており、そのため、ビームエネルギーは 200 MeV/u 以上となる。一方、原子核構造の精密測定や天体核反応の直接測定に適した 10 MeV/u 以下の低エネルギービームを生成する方法として、生成された RI を加速器で再加速する「再加速 ISOL 法」(ISOL = Isotope Separation On Line)や低エネルギー逆運動学核反応を利用する「低エネルギー飛行分離法」が用いられており、それぞれ国内では KEK/JAEA の TRIAC と 東大 CNS/理研の CRIB が開発された。これらの大規模な実験施設での実験計画と平行して、我々は、マシンタイムや実験コストの制約が少ない、小規模なホームマシンを用いて、不安定核実験に関する先進的な手法の開発を目指している。現在、九州大学ではキャンパス移転にともない、タンデム型静電加速器の更新・ビームライン整備を進めている。この新施設計画を検討する中で、我々は、タンデム加速器の特長(低運転コスト、核種・エネルギーを短時間で変更可、小エミッタンス等)を生かした、新しい RI ビーム生成・加速法「ガス輸送・単一加速器再加速 ISOL 法」の着想に至った。この概要を(2)で説明する。

(2) 新手法の概要

タンデム加速器による 10 MeV の陽子/重陽子 1 次ビームをガス標的に照射し、寿命が 2 分以上の中・長寿命核を生成する(図 1、RI 生成モード)。生成核種は「陽電子断層診断法(PET)」で使用される核種( $^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$ ,  $^{15}\text{O}$ ,  $^{18}\text{F}$  等)と長寿命核( $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$  等)の 2 つに大別できる。例えば  $^{11}\text{C}$  は  $\text{N}_2 + \text{O}_2$ (数%) のガス標的と  $^{14}\text{N}(p, \alpha)^{11}\text{C}$  反応により生成される(表 1)。

次に 1 次ビーム照射を中断し、標的ガス中に蓄積された RI をガス分子(例:  $^{11}\text{CO}_2$ )の形で、ガス輸送管を経由して、RI イオン源部まで戻し、RI イオンを同じ加速器により加速する(図 1、RI 加速モード)。PET 核種は半減期程度の周期で RI 生成モードと RI 加速モードを繰り返して実験を行う。一方、長寿命核種の場合、各モードは一度だけでよい。1 次ビーム用・RI ビーム用の 2 つのイオン源はどちらも稼働させておき、入射分析電磁石によりモードに応じて切替えられる。また加速器後のビーム分析電磁石はビーム照射先を切替える役割を担っており、RI 加速モードの場

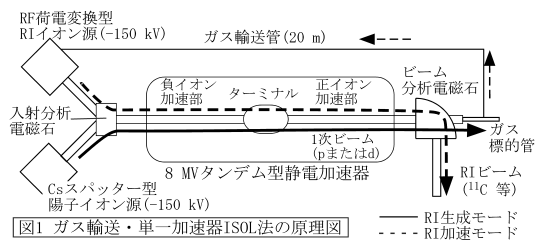


図1 ガス輸送・単一加速器ISOL法の原理図

表1 中・長寿命RIと生成反応・標的・RIガス分子の例

RI	半減期	生成反応	標的ガス	RIガス分子
$^{11}\text{C}$	20分	$^{14}\text{N}(p, \alpha)^{11}\text{C}$	$\text{N}_2 + \text{O}_2$	$^{11}\text{CO}_2$
$^{13}\text{N}$	10分	$^{16}\text{O}(p, \alpha)^{13}\text{N}$	$\text{N}_2 + \text{O}_2$	$^{13}\text{NN}$ , $^{13}\text{NO}_x$
$^{15}\text{O}$	2.0分	$^{14}\text{N}(d, n)^{15}\text{O}$	$\text{N}_2 + \text{O}_2$	$^{15}\text{OO}$ , $\text{N}^{15}\text{O}$
$^{18}\text{F}$	1.8時間	$^{18}\text{O}(p, n)^{18}\text{F}$	$^{18}\text{O}_2$	$^{18}\text{O}^{18}\text{F}_2$
$^3\text{H}$	12年	$d(d, p)t$	$\text{D}_2$	DT
$^{14}\text{C}$	5730年	$^{13}\text{C}(d, p)^{14}\text{C}$	$^{13}\text{CO}_2 + \text{O}_2$	$^{14}\text{CO}_2$

合、RI ビームを実験室に導く。

長寿命核については原理的にはマクロな量の放射性物質(例: トリチウム)を用意してイオン源に投入すれば、RI ビームを生成できるはずであるが、放射線安全の点からそのような実験は事実上許されない。汚染が問題にならない程度の非常に弱い強度の  $^3\text{H}$  や  $^{14}\text{C}$  ビームでも原子核反応実験のためには有用である。そのために、必要最低限の微量 RI 分子をガス中に生成し、その場でただちに利用するという本方式は適している。

2. 研究の目的

ガス輸送・単一加速器再加速 ISOL 法の各要素について以下の研究・開発を行う。

- (1) タンデム加速器ビームのために使用可能な RI 生成ガス標的管の開発を行う。
- (2) RI を含んだガスを注入可能な負イオン源として RF-荷電変換型イオン源の開発を行う(タンデム加速器には、その加速原理から、負イオンを入射する必要がある)。
- (3) (1), (2) の結果から各種 RI ビームの強度を予測し、本手法の実現可能性を示す。
- (4) 標的ガス中における RI を含んだ分子の挙動を調べる。

3. 研究の方法

(1) RI 生成ガス標的管の開発

今回は主に  $^{11}\text{C}$  ビームの生成を想定し、 $\text{N}_2(90\%) + \text{O}_2(10\%)$  の混合ガスに 10 MeV 陽子ビームを照射して、 $^{14}\text{N}(p, \alpha)^{11}\text{C}$  反応による  $^{11}\text{C}$  の生成・測定テストを行った。長さ約 80 cm のガス標的管の中に標的ガスを 1 気圧で封入し、Havar 膜を通して陽子を入射させた(図 2)。陽子は標的中でエネルギーを落としながら進み途中のどこかで反応を起こすか、核反応を起こさずに管の終端に達する。5 MeV 以下では反応断面積が小さくほとんど反応が起きないので、管の終端に達したときに工

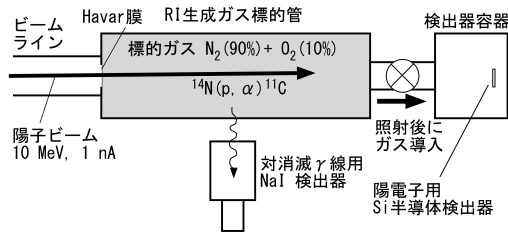


図 2: RI 生成ガス標的管実験セットアップ

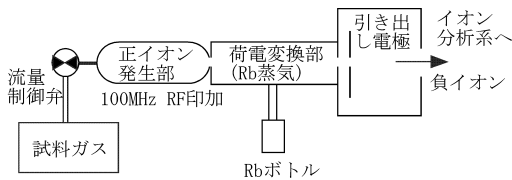


図 3: RF・荷電交換イオン源の概念図

エネルギーが 5 MeV になるように設計されている。これにより、ガスの量を最小限にし、ガス中の RI 濃度をできるだけ高くする工夫をした。ビームを  $^{11}\text{C}$  半減期(20 分)よりやや長い 30 分間照射し(それ以上照射しても生成量は飽和してしまう)、照射直後にバルブを通して接続された測定容器にガスを移し、半導体検出器により  $^{11}\text{C}$  崩壊により放出される陽電子線を測定した。また、陽電子消滅に伴う 511 keV 線を NaI 検出器により測定し、ビーム照射中でも標的管の外から  $^{11}\text{C}$  の生成をモニターすることを試みた。

## (2) ガスを導入可能な負イオン源の開発

本研究では RI ガス分子( $^{11}\text{C}$  や  $^{14}\text{C}$  を想定した  $\text{CO}_2$ ,  $^3\text{H}$  を想定した  $\text{H}_2$  ガス)を微量に含むガスを導入可能な負イオン源の開発をめざしている。その候補として、 $\text{He}^-$  イオン生成用に開発された RF-荷電交換型イオン源を用い、非放射性  $\text{CO}_2$  および  $\text{H}_2$  ガスを注入しビーム電流を測定するテストを行った。

RF-荷電交換型イオン源の概念図を図 3 に示す。まず、ガスを 100 MHz の高周波(RF)により電離し目的とする核種の正イオンを生成する。RF 部から引き出された正イオンはルビジウム蒸気が存在する領域を通過し、荷電交換反応により負イオンに変換される。荷電交換部から引き出された負イオンはその後、電磁石により質量分析されファラデーカップにより電流量が測定される。

## 4. 研究成果

### (1) RI 生成ガス標的管のテスト結果

$^{14}\text{N}(p, \alpha)^{11}\text{C}$  反応を想定し、 $\text{N}_2$  (90%) +  $\text{O}_2$  (10%) の混合ガスに 10 MeV, 1 nA の陽子ビームを 30 分照射した実験を行った。図 4 は標的管の外部に設置した NaI 検出器による、陽電子消滅 511 keV 線の計測率のビーム照射中の時間変化を示している。ビーム照射中に標的中に  $^{11}\text{C}$  が蓄積されていくモデル(実線)で計数率変化をよく再現することができ、

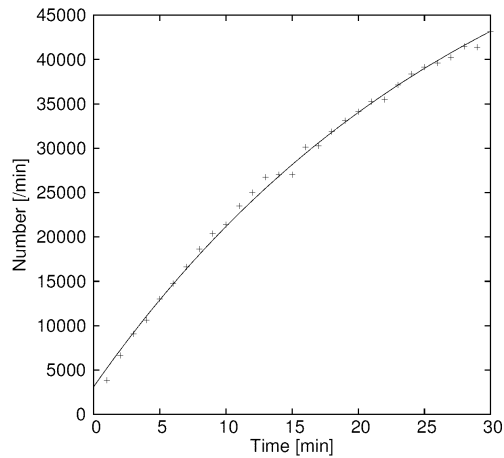


図 4 NaI 検出器による 511 keV 線計数率のビーム照射中の時間変化。実線は  $^{11}\text{C}$  の半減期 20.3 分を考慮した増加曲線。

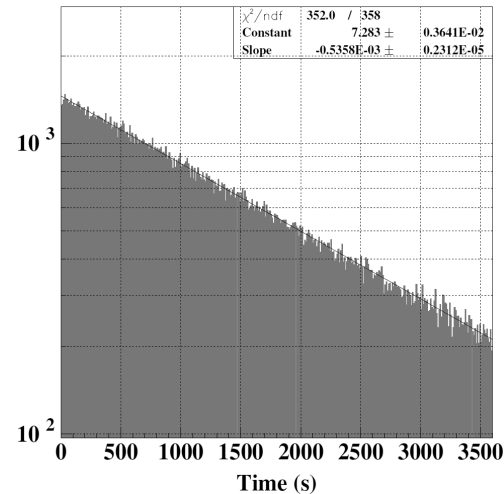


図 5: Si 半導体検出器による + 線計数率の時間変化(ビーム照射直後)。実線は半減期 22 分に対応。

表 2: ビーム照射直後の標的容器中の  $^{11}\text{C}$  原子数  $N(^{11}\text{C})$

ビーム強度	1 nA
照射時間	30 分
$N(^{11}\text{C})$ (本実験結果)	$8.5 \times 10^8$ 個
$N(^{11}\text{C})$ (断面積から予測)	$3.2 \times 10^9$ 個

$^{11}\text{C}$  が生成されていることの一つの証拠となった。このように NaI 検出器は + 崩壊する核種の非接触モニターとして有効であることが実証された。

図 5 は、ビーム照射停止直後にガス標的管に接続した検出器容器中の Si 半導体検出器による、陽電子計数率の時間変化を示したものである。照射直後の計数率から検出効率(シミュレーションにより決定)を考慮して、ガス中に生成された  $^{11}\text{C}$  の生成数  $N(^{11}\text{C})$  を見積もった。表 2 に示すように、実験で決定した  $N(^{11}\text{C})$  は、断面積から予測される値の 1/4 程度でしかなくことがわかった。この原因と

しては、検出器シミュレーションで仮定したガス中での一様な  $^{11}\text{C}$  分布が実際には成立していない可能性が挙げられる。例えば、 $^{11}\text{C}$  が  $\text{CO}_2$  気体分子の形になっておらず、検出器容器まですばやく拡散できないために検出数が想定より少なくなっているという可能性も考えられる。実際、計数率の半減期が 22 分(図 5 の実線)と  $^{11}\text{C}$  の物理半減期 20.3 分より若干長くなっており、これは  $^{11}\text{C}$  の拡散がゆっくり起きていることに対応している可能性がある。いずれにしても  $^{11}\text{C}$  の標的ガス内の挙動を調べるのに、ガス中に設置した半導体検出器が有用であることがわかった。

### (2) RF-荷電交換型イオン源による負イオン生成テストの結果

負イオンの最大電流は  $\text{CO}_2$  ガス注入により引き出した  $\text{C}^-$  に対して 270 nA、 $\text{H}_2$  ガス注入に対して引き出した  $\text{H}^-$  に対して 80 nA であった(表 3)。今回用いたイオン分析系のイオン透過効率が 15%と低かった(原理的には 100%にすることが可能)ことを考慮すると、本来得られる最大電流はこれらの約 7 倍になり、当初想定していた数 100 ~ 1  $\mu\text{A}$  程度の電流は達成できそうである。

### (3) 将来の RI ビーム強度予想

将来実現され得る RI ビーム強度を以下の式で大まかに見積もった

$I$  (RI ビーム強度) =  $I_0$  (非放射性ガスときのビーム強度)  $\times R$  (ガス中の RI 原子数/安定同位体原子数の比)

$I_0$  としては表 3 の理想最大電流を 1 秒あたりの個数に換算した値を用いた。 $R$  を見積もる際に、生成ガス標的の容積は 1000  $\text{cm}^3$  とし、1 次ビーム強度は 1  $\mu\text{A}$  と仮定した。また、このときの  $^{11}\text{C}$  生成量として、表 2 の 1 nA ビームによる実験結果の 1000 倍の値を用いた。 $^3\text{H}$  生成量は既知の断面積データと照射時間  $10^5$  秒(28h)を仮定した計算値を用いた。

RI ビーム強度の見積結果を表 4 に示す。 $^{11}\text{C}$  は 370 個/s、 $^3\text{H}$  は 6200 個/s 得られることがわかり、これだけでも弾性散乱の測定や、RI を物質ヘインプラントする応用実験等に十分使用可能である。本格的な原子核反応実験のために、例えば、1 次ビーム強度をさらに 10 倍程度 (~ 10  $\mu\text{A}$ ) 増強することは、おそらく可能である。また、小型サイクロトロンを別に用意するなどすれば、1 次ビームを 100 倍以上に増強することも考えられる。また、 $^3\text{H}$  は寿命が長く、生成収量が事実上飽和しないので、1 次ビームの照射時間を延ばせば延ばすほど 2 次ビーム量を増強することが可能である。

今回の大まかな見積もりでは媒質の非放射性ガスと RI ガスが同じ種類の分子であると仮定しているが、実際には例えば  $^{11}\text{CO}_2$  を微量に含んだ  $\text{N}_2$  媒質ガスをイオン源に注入す

表 3:  $\text{C}^-$ ,  $\text{H}^-$  生成テストの結果

注入ガス	引き出しイオン	最大電流
$\text{CO}_2$	$\text{C}^-$	270 nA (1.8 $\mu\text{A}$ ) <sup>*</sup>
$\text{H}_2$	$\text{H}^-$	80 nA (530 nA) <sup>*</sup>

\* ( )内は実測値をイオン分析系透過効率 0.15 で割ったもので、透過効率が 1 の場合の電流。

表 4: RI ビーム強度の見積

	$I_0$	$R$	$I = I_0 R$
$^{11}\text{C}$	$1.1 \times 10^{13}/\text{s}$	$3.3 \times 10^{-11}$	370/s
$^3\text{H}$	$3.3 \times 10^{12}/\text{s}$	$1.9 \times 10^{-9}$	6200/s

る場合のように、異なる種類のガス分子の組み合わせが用いられることがある。その場合、より正確な見積もりのためには混合ガスを用いた実験を行うべきである。

### (4) まとめ

RI 生成ガス標的管の原型機を開発し、 $^{11}\text{C}$  の生成テストを行った。 $^{11}\text{C}$  のように崩壊する核種に対しては、非接触型モニター検出器として NaI 検出器が有用であることが示された。ガス中での RI 濃度分布をモニターするためには Si 半導体検出器が有用であることが示された。

ガス導入可能な負イオン源の一つの候補として RF-荷電交換型イオン源のテストを行い  $\text{CO}_2$  ガスから  $\text{C}^-$ 、 $\text{H}_2$  ガスから  $\text{H}^-$  を生成し、それぞれ最大電流を測定した。特に  $\text{CO}_2$  のデータは他施設による実験結果がほとんど公開されていないため RI ビーム強度見積りに有用なデータとなった。

将来の RI ビーム強度予測を行い  $^{11}\text{C}$  と  $^3\text{H}$  に対して、 $10^{2-4}$  個/秒のオーダーの RI ビーム強度が得られることが示された。今後の発展的研究のための展望としては、負イオン生成効率のより正確な見積、ビーム強度を改善する方策の検討、ビーム強度の条件が有利な長寿命核( $^3\text{H}$  や  $^{14}\text{C}$ )を実際に生成・加速するテストの実施等が挙げられる。

### 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 1 件)

1. T. Teranishi 他 14 名(1 番目),  
“Resonant Scattering Experiments with Radioactive Nuclear Beams - Recent Results and Future Plans”,  
AIP Conf. Proc. 1525 (2013) 552-557,  
DOI コード: 10.1063/1.4802389 (査読無).

[学会発表](計 8 件)

1. 牛尾国久、寺西高、林慶大、郭儷怡、則松恭彰、秋山陽平、榮大輔、福多貴大、「タンデム加速器による RI 生成テスト」, 第 120 回日本物理学会九州支部例会、2014 年 12 月 6 日、崇城大学

2. 則松恭彰、寺西高、牛尾国久、林慶大、郭儷怡、榮大輔、福多貴大、秋山陽平、「タンデム加速器における RF 荷電交換型イオン源の開発」, 第 120 回日本物理学会九州支部例会、2014 年 12 月 6 日、崇城大学

(2)研究分担者

(3)連携研究者

3. 郭儷怡、寺西高、牛尾国久、林慶大、則松恭彰、福多貴大、榮大輔、秋山陽平、「タンデム加速器のターミナル電圧制御系の開発」, 第 120 回日本物理学会九州支部例会、2014 年 12 月 6 日、崇城大学

4. 林慶大、寺西高、牛尾国久、則松恭彰、「タンデム加速器における RF 荷電交換型イオン源の開発」, 第 119 回日本物理学会九州支部例会、2013 年 11 月 30 日、久留米工業大学

5. 野呂哲夫、寺西高 他、「九州大学加速器・ビーム応用科学センターにおける 8MV タンデム加速器建設計画の現状」, 第 10 回日本加速器学会年会、2013 年 8 月 3 日~5 日、名古屋大学東山キャンパス

6. 野呂哲夫、寺西高 他、「九州大学加速器・ビーム応用科学センターにおける 8MV タンデム加速器建設計画の現状」, 第 9 回日本加速器学会年会、2012 年 8 月 8 日~11 日、大阪大学豊中キャンパス

7. T. Teranishi et al.,  
“Resonant Scattering Experiments with Radioactive Nuclear Beams - Recent Results and Future Plans” ,  
The 22nd International Conference on the Application of Accelerators in Research and Industry (CAARI 2012),  
5-10th August 2012, Fort Worth, Texas, USA.

8. 寺西高 他、「九州大学原子核実験室の現状報告と加速器・ビーム応用科学センターにおける 8MV タンデム加速器建設計画」, 第 25 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会、2012 年 07 月 20 日~21 日、名古屋大学

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

寺西 高 (TERANISHI TAKASHI)  
九州大学・大学院理学研究院・准教授  
研究者番号：10323495