

## RILAC OPERATION FOR RESEARCH EXPERIMENTS ON THE HEAVIEST ELEMENTS

Eiji Ikezawa <sup>A)</sup>, Daiya Kaji <sup>A)</sup>, Masayuki Kase <sup>A)</sup>, Osamu Kamigaito <sup>A)</sup>, Takahide Nakagawa <sup>A)</sup>,  
 Naruhiko Sakamoto <sup>A)</sup>, Hiroki Okuno <sup>A)</sup>, Naohito Inabe <sup>A)</sup>, Masanori Wakasugi <sup>A)</sup>, Nobuhisa Fukunishi <sup>A)</sup>,  
 Misaki Kobayashi-Komiyama <sup>A)</sup>, Masanori Kidera <sup>A)</sup>, Yoshihide Higurashi <sup>A)</sup>, Hiromichi Ryuto <sup>A)</sup>,  
 Shigeo Kohara <sup>A)</sup>, Masaki Fujimaki <sup>A)</sup>, Makoto Nagase <sup>A)</sup>, Tadashi Kageyama <sup>A)</sup>, Shigeru Yokouchi <sup>A)</sup>,  
 Tamaki Watanabe <sup>A)</sup>, Akira Yoneda <sup>A)</sup>, Toshimitsu Aihara <sup>B)</sup>, Tomonori Ohki <sup>B)</sup>, Hiromoto Yamauchi <sup>B)</sup>,  
 Akito Uchiyama <sup>B)</sup>, Kazuyuki Oyamada <sup>B)</sup>, Ryo Koyama <sup>B)</sup>, Akira Goto <sup>A)</sup>, and Yasushige Yano <sup>A)</sup>

A) RIKEN Nishina Center for Accelerator Based Science

2-1 Hirosawa, Wako-shi, Saitama, 351-0198

B) SHI Accelerator Service, Ltd.

2-1 Hirosawa, Wako-shi, Saitama, 351-0198

### Abstract

The RIKEN heavy ion linac (RILAC) is a main linear accelerator, and has two different types of ECR ion sources (an 18 GHz ECR ion source and a superconducting ECR ion source), a variable-frequency folded-coaxial RFQ linac (RFQ) as a pre-injector, and a Charge-State Multiplier system (CSM) as a booster. The RILAC started to supply ion beams for experiments in 1981. The RFQ and CSM were installed in 1996 and in 2000, respectively. The maximum beam energy, boosted by the CSM, became 5.8 MeV/nucleon. A GAs-filled Recoil Isotope Separator (GARIS) was moved from the E1 experiment room of the RRC to the No. 1 target room of the RILAC in 2000. Research experiments on superheavy elements began in March 2002 with the GARIS. As a result, convincing candidate events for the isotope of the 113th element were observed for the first time on July 23, 2004 and for the second time on April 2, 2005. The present status of the RILAC operation for research experiments on the heaviest elements and the future plan are reported.

## 超重元素探索実験のための理研重イオンリニアック運転

### 1. 理研重イオンリニアック

理研重イオンリニアックは、これまでにいくつもの改良や増強がなされ、現在では、前段入射器のRFQリニアック (RFQ)、主線形加速器のRILAC、ブースターの重イオン荷電状態増幅装置 (CSM) で構成されている。イオン源としては、当初PIG型が使用されていたが、1990年にECR型が導入され、現在では、常伝導電磁石の18GHz ECRイオン源 (18G-ECRIS) と18GHzの超電導ECRイオン源 (SC-ECRIS) が並列に設置されている。加速粒子として、ヘリウムからウランまでの元素を取り扱っている。今日までに、40種類以上の元素をイオン化し加速して様々な実験に供給してきた。RILAC実験室には6つの実験ライン (e1~e6ライン) が用意され、また、理研リングサイクロトロン (RRC) への入射ラインが設置されている。図1にこれらの構成図を示す。

RILACは、周波数可変型 (18~40MHz) で6台の加速キャビティー (#1~6) で構成され、1981年に単独運転が開始された<sup>[1]</sup>。1986年には、RRCの入射器

としての利用も始まった。

RIビームファクトリー (RIBF) 計画に伴い、新たな前段入射器として開発された18G-ECRIS<sup>[2]</sup>と周波数可変型 (18~39 MHz) で折り返し同軸共振器構造のRFQ<sup>[3]</sup>が、1996年に追加設置された。2004年には、18G-ECRIS及びRFQのビームラインの改良及びRILACイオン源室の整備が行われ、SC-ECRISが追加設置された。

一方、RIビームファクトリー (RIBF) 計画では、RILACのエネルギー増強が計画され、RILACの後段にブースターとしてのCSMが、東京大学原子核科学研究センター (CNS) との協力により、2000年に設置された。CSM<sup>[4]</sup>は、周波数可変型 (36~76 MHz) の第1ユニット (CSM-A1, -A2, -D1)、周波数固定型 (75.5MHz) の第2と第3ユニット (CSM-A3~A6) で構成される。加速時は、CSM-A1~A6が使用される。これによりRFQ+RILAC+CSMの運転で、最大加速エネルギーが5.8 MeV/nucleonとなり、原子核実験が可能となった<sup>[5], [6]</sup>。

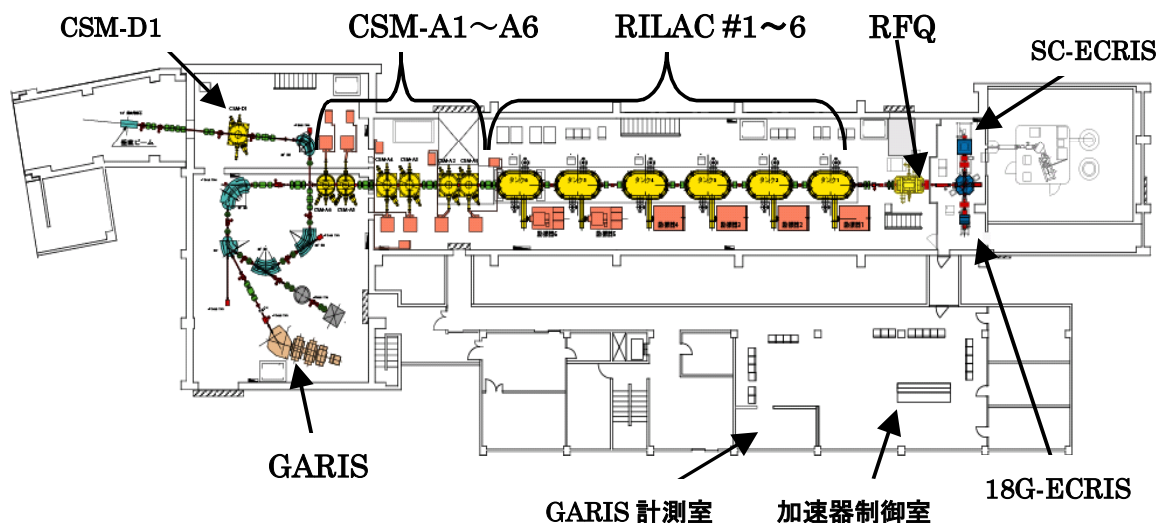


図1 理研重イオンリニアックの構成図

## 2. 実験装置概要

理研における超重元素探索実験は、森田浩介氏が気体充填型反跳分離器 Gas-filled Recoil Ion Separator (GARIS) をRRCのE1実験室に設置し、RRC完成直後の1987年に始まった。そこでは、GARISそのものの研究や周辺実験装置の改良が行われ、また加速器の改良や増強を行い、86番元素ラドン (Rn)、87番元素フランシウム (Fr) の新同位体の発見が成された。

しかしながら、RRCのE1実験室で行われていた超重元素探索実験にとって、RILACから入射しRRCで加速したイオンビームの強度は満足行くものではなかった。また、その実験装置であるGARISは、RIBF計画に伴う新たなビームライン建設のため、2000年には他の実験室への移設を余儀なくされた。だが、RIBF計画に伴いエネルギー増強されたRILACを利用する事が非常に有効であると判断され、2000年に始まったRILACエネルギー増強のための改造工事と共に、RRCのE1実験室からRILACの第1実験室のe3ラインへのGARISの移設工事が行われた。図1にGARISの配置を示す。

GARISは、イオンビームの偏向及び収束用として、双極電磁石のD1とD2及び四極電磁石のQ1とQ2で構成されている。図2にGARISの概略図を示す。GARISの直前には大強度ビーム照射に耐え得るための回転式標的が設置されている。標的部及び電磁石部の真空容器内は100Pa程度のヘリウムガスで満たされている。これは、この実験装置の特徴で、ガス中を飛行するイオンに平均平衡電荷を与えることで、反応生成核の収集効率を向上させる効果がある。入射イオンビームは回転式標的を通過した後、D1内のタンタル製ビームダンプで止められる。回転式標的で合成

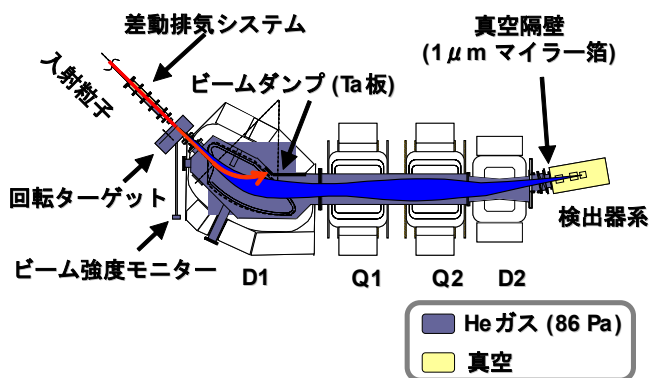


図2 GARISの概略図

が起きた場合、その合成されたイオンは、D1で偏向され、Q1とQ2で収束され、検出器系に導かれる。またD2では、目的外のイオンを除去している。検出器系として、マイクロチャンネルプレートを用いた2台の飛行時間測定用検出器と位置感応型半導体検出器が、この順に設置されている。これらの検出器において、生成核およびその娘核に固有なアルファ線を観測することで核種同定を行った。

## 3. これまでの実験経緯と加速器運転状況

2000年に行われたRILACのエネルギー増強工事及びGARIS移設工事の後、加速器は2001年春にRFQ+RILAC+CSMの試運転を始め、所定の性能を確認した。また、18GECRISでは、安定で大強度なイオンビームを生成するための試運転が行なわれた。

RILAC第1実験室における森田氏チームの超重元素探索関連の実験は、2002年3月から、18GECRIS

+RFQ+RILAC+CSMの運転で加速したイオンビームを利用して始まった。初めは、4.6~4.9 MeV/nucleonの<sup>40</sup>Ar、<sup>48</sup>Caイオンビームを供給しGARISの調整などが行われた。同年7月からは、超重元素合成の追試実験を始めた。その7月には約4.9 MeV/nucleonの<sup>58</sup>Feイオンビームを利用した追試実験で108番元素である<sup>265</sup>Hs(ハッシウム)を10原子観測した。同年7月、9月、11月には、約5.0 MeV/nucleonの<sup>64</sup>Niイオンビームを利用した追試実験が行われ、110番元素である<sup>271</sup>Ds(ダームスタチウム)を14原子観測した<sup>[7]</sup>。2003年2月、4月、5月には、約5.0 MeV/nucleonの<sup>64</sup>Niイオンビームを利用した追試実験が行われ、111番元素である<sup>272</sup>Rg(レントゲニウム)を14原子観測した<sup>[8]</sup>。この後、2003年9月から12月にかけて約5.0 MeV/nucleonの<sup>70</sup>Znイオンビームを利用した113番元素の合成実験が行われた。しかしながら、このときは新元素合成現象の観測には至らなかった。このため実験条件再確認と言う目的も含め、翌年の2004年4月から6月にかけては、約5.0 MeV/nucleonの<sup>70</sup>Znイオンビームを利用した112番元素の追試実験が行われ、112番元素を2原子観測した<sup>[9]</sup>。そして、113番元素の合成実験が2004年7月から再開され、2004年7月23日に世界で初めて113番元素を1原子観測するに至った<sup>[10]</sup>。さらに、2005年3月から4月にかけて行われた113番元素の合成実験では、2005年4月2日に、再び113番元素を1原子観測した<sup>[11]</sup>。そして、この後も113番元素の合成追試実験が続けられている。図3に合成実験で観測された<sup>278</sup>113からの壊変連鎖を示す。

2002年3月から2006年3月までの間に、理研重イオ

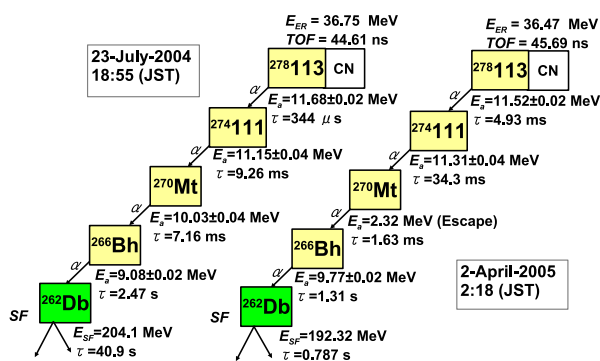


図3 観測された<sup>278</sup>113からの壊変連鎖  
CN:複合核<sup>278</sup>113, α: アルファ壊変,  
SF: 自発核分裂

ンリニアックは18,800時間の運転を行い、この内の延べ14,651時間に渡って各種実験にイオンビームを供給してきた。そして、超重元素探索実験に対しては、延べ10,366時間の加速器運転を行ない、延べ8,424時間に渡ってイオンビームを供給した。表1に

これまでに行った超重元素探索実験及びその他の実験(RILAC実験室での実験及びRRRCへの入射)に供給したビーム照射時間を示す。この内、約6割が、超重元素探索実験に供給したビーム照射時間であった。

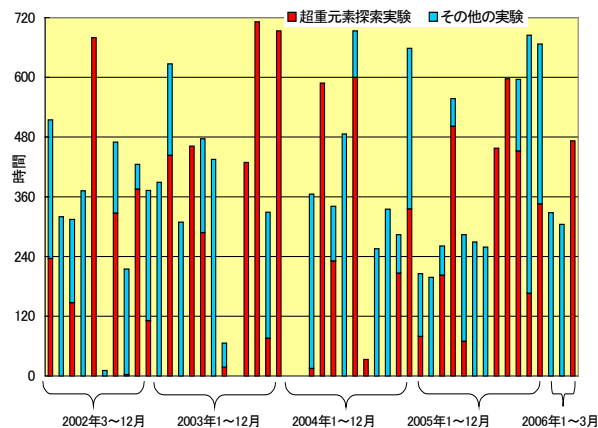


表1 ビーム照射時間

#### 4. 今後について

今後の超重元素探索実験に関して、森田氏チームは、113番元素を合成する追試実験を繰り返し、再現性の確認とデータの信頼性を高めていくことを考えている。また、<sup>208</sup>Pb標的と<sup>76</sup>Geイオンビームを用いた114番元素を合成する実験も視野に入ってきたと考えている。

我々は、これまでの実験に対して、安定で必要十分な強度のイオンビームを供給してきた。そして、これからも理研重イオンリニアックの装置改良や運転技術開発を行い、超重元素探索実験及びこの他の各種実験等に、よりいっそう安定で大強度なイオンビームを供給できるように努めて行く。

#### 参考文献

- [1] M. Odera, et al., Nucl. Instr. & Meth. 227, 187 (1984)
- [2] T. Nakagawa, et al., The 12th Sympo. on Accel. Sci. and Tech., 206 (1999).
- [3] O. Kamigaito, et al., The 22nd Linear Accel. Meeting, 47 (1997)
- [4] O. Kamigaito, et al., The 13th Sympo. on Accel. Sci. and Tech., 229 (2001).
- [5] E. Ikezawa, et al., The 13th Sympo. on Accel. Sci. and Tech., 169 (2001).
- [6] E. Ikezawa, et al., The 2nd Annual Meeting of Particle Accel. Society of Japan and The 30th Linear Accel. Meeting in Japan, 519 (2005).
- [7] K. Morita, et al., Eur. Phys. J. A 21, 257 (2004).
- [8] K. Morita, et al., J. Phys. Soc. Jpn. 73, 1738 (2004).
- [9] K. Morita, et al., RIKEN Accel. Prog. Rep. 38, 69 (2005).
- [10] K. Morita, et al., J. Phys. Soc. Jpn. 73, 2593 (2004).
- [11] K. Morita, et al., RIKEN Accel. Prog. Rep. 39, 76 (2006).