

Table I. Summary of all correlated decay chains detected in this work. No.: Number of the chain. E_{ER} : Kinetic energy of ER. E : Decay energy of individual events. TOF: Time-of-flight in the 0.295-m flight path measured by the timing counters. P : Position measured from the bottom of the detector. τ : Time difference between events. Assignments for each decay event of $\alpha 1$, $\alpha 2$ or SF, $\alpha 3$ or SF, and $\alpha 4$ are given in the table. The energies are given in MeV, and the kinetic energy of ER and energy of fission fragments are not corrected for pulse height defects.

No.	ER			$\alpha 1$			$\alpha 2$ or SF			$\alpha 3$ or SF			$\alpha 4$		
	E_{ER} (MeV)	TOF (ns)	P (mm)	^{263}Hs			^{259}Sg			^{255}Rf (or ^{255}Lr)			^{251}No		
				E (MeV)	τ (ms)	P (mm)	E (MeV)	τ (ms)	P (mm)	E (MeV)	τ (ms)	P (mm)	E (MeV)	τ (ms)	P (mm)
$^{206}\text{Pb}(^{58}\text{Fe},n)^{263}\text{Hs}$ reaction															
1	21.89	53.6	38.2	10.53	0.16	37.6	9.63	747	37.9	200	2313	38.1			
2	21.09	54.4	36.0	10.53 ^{a)}	0.42	35.9	9.58	379	35.8	8.76 ^{a)}	1473	35.5	8.59	498	36.3
3	20.60	54.5	53.0	10.80	0.44	53.1	9.40 ^{a)}	453	48.5	8.70	208	53.4			
4	18.74	56.9	32.7	3.52 ^{b)}	0.24	32.0	9.70 ^{a)}	87	35.5	198	758	32.8			
5	20.93	57.3	50.1	10.62 ^{a)}	1.99	51.4	9.64 ^{a)}	625	49.5	168	1923	49.9			
6	22.42	55.0	17.7	10.43	0.80	17.4	9.59	1097	17.0	220	717	17.7			
7	19.61	44.3	32.3	10.54	0.63	32.3	9.73 ^{a)}	325	31.6	162	1109	32.1			
8	22.45	52.4	26.5	10.32 ^{a)}	2.79	28.7	194	2805	26.5						
$^{208}\text{Pb}(^{56}\text{Fe},n)^{263}\text{Hs}$ reaction															
9	19.59	54.2	49.3	10.84	0.24	49.2	9.46	173	48.8	8.44	6195	49.1			

a) Sum of PSD and SSD signals.

b) Partial energy deposition is expected in the case of escape event emitted under shallow angles.

Table II. Summary of the decay data obtained in this work.

	E_{α} (MeV)	$T_{1/2}$ (ms)	Branching
^{263}Hs	10.82 (25%)	$0.60^{+0.30}_{-0.15}$	$\alpha = 100\%$
	10.55 (50%)		
	10.37 (25%)		
^{259}Sg	9.64 (75%)	520^{+260}_{-130}	$\alpha = 89\%$
	9.40 (25%)		SF = 11%
^{255}Rf	8.73 (100%)	840^{+510}_{-230}	$\alpha = 25\%$
			SF = 63%
			EC = 12%
^{251}No	8.59 (100%)	350^{+1650}_{-160}	$\alpha = 100\%$

10.55, and 10.37 MeV, respectively. The half-life of ^{263}Hs is determined to be $0.60^{+0.30}_{-0.15}$ ms.

In this experiment, the total beam doses of the ^{58}Fe and ^{56}Fe were 4.1×10^{17} and 6.2×10^{17} ions, respectively. The production cross sections corresponding to the 8 decay chains and 1 decay chain were evaluated to be 21^{+10}_{-8} and $1.6^{+3.7}_{-1.3}$ pb by assuming the transmission of the system to be 80%. The large difference in the deduced cross sections for the $^{206}\text{Pb} + ^{58}\text{Fe}$ and $^{208}\text{Pb} + ^{56}\text{Fe}$ reactions can be qualitatively explained by considering the following. The interaction barriers B_{int} defined by Bass¹⁶⁾ for the $^{206}\text{Pb} + ^{58}\text{Fe}$ and $^{208}\text{Pb} + ^{56}\text{Fe}$ reactions are calculated to be 226.5 and 227.0 MeV, respectively. On the other hand, the reaction energies in the centre of mass frame (E_{cm}) have been set to 222.1 and 218.4 MeV for the $^{206}\text{Pb} + ^{58}\text{Fe}$ and $^{208}\text{Pb} + ^{56}\text{Fe}$ reactions, respectively, in order to populate the common compound nucleus, ^{264}Hs , at the same excitation energy of 16 MeV. For the $^{206}\text{Pb} + ^{58}\text{Fe}$ reaction, the value of $B_{\text{int}} - E_{\text{cm}}$ is 4.9 MeV, while that for the $^{208}\text{Pb} + ^{56}\text{Fe}$ reaction is 8.6 MeV. In these sub-barrier energy fusion reactions, this energy difference can affect the ER cross section significantly. Consequently, the cross section for the $^{206}\text{Pb} + ^{58}\text{Fe}$ reaction is larger than that for the $^{208}\text{Pb} + ^{56}\text{Fe}$ reaction.

However, it is difficult to discuss this matter quantitatively because the measurements were carried out only at one energy level for both reactions. The measurement of excitation functions is necessary for further discussions.

Acknowledgments

This experiment was carried out at the RI Beam Factory operated by the RIKEN Nishina Center and CNS, University of Tokyo. The authors are extremely grateful to Professors Y. Yano and M. Ishihara for their continuous support, encouragement, and useful suggestions. The authors would like to thank Dr. M. Kase and Dr. T. Suda for their support and arrangement of the beamtime and Professor T. Chihara and Dr. N. Suzuki for synthesizing ferrocene for the ion-source material. The authors are also grateful to all accelerator staff for their excellent assistance during the experiment. This research was partially supported by a Grant-in-Aid for Specially Promoted Research, 19002005, 2007, from the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, Japan.

- 1) G. Münzenberg *et al.*: Z. Phys. A **317** (1984) 235.
- 2) G. Münzenberg *et al.*: Z. Phys. A **324** (1986) 489.
- 3) S. Hofmann *et al.*: Eur. Phys. J. A **10** (2001) 5.
- 4) Yu. A. Lazarev *et al.*: Phys. Rev. Lett. **75** (1995) 1903.
- 5) S. Hofmann *et al.*: Z. Phys. A **354** (1996) 229.
- 6) J. Dvorak *et al.*: Phys. Rev. Lett. **97** (2006) 242501.
- 7) J. Dvorak *et al.*: Phys. Rev. Lett. **100** (2008) 132503.
- 8) Yu. Ts. Oganessian *et al.*: Z. Phys. A **319** (1984) 215.
- 9) A. Ghiorso *et al.*: Phys. Rev. C **51** (1995) R2293.
- 10) L. C. Northcliffe and R. F. Schilling: Nucl. Data Tables A **7** (1970) 233.
- 11) G. Audi and A. H. Wapstra: Nucl. Phys. A **565** (1993) 1.
- 12) W. D. Myers and W. J. Swiatecki: Nucl. Phys. A **601** (1996) 141.
- 13) G. Münzenberg *et al.*: Z. Phys. A **322** (1985) 227.
- 14) F. P. Heßberger *et al.*: Eur. Phys. J. A **30** (2006) 561.
- 15) *Table of Isotopes*, ed. R. B. Firestone and V. S. Shirley (Wiley, New York, 1996) 8th ed.
- 16) R. Bass: Nucl. Phys. A **231** (1974) 45.

Decay Properties of ^{266}Bh and ^{262}Db Produced in the $^{248}\text{Cm} + ^{23}\text{Na}$ Reaction

Kosuke MORITA^{1*}, Kouji MORIMOTO¹, Daiya KAJI¹, Hiromitsu HABA¹,
Kazutaka OZEKI¹, Yuki KUDOU¹, Nozomi SATO^{1,2†}, Takayuki SUMITA^{1,3},
Akira YONEDA¹, Takatoshi ICHIKAWA^{1‡}, Yasuyuki FUJIMORI⁴, Sin-ichi GOTO⁵,
Eiji IDEGUCHI⁶, Yoshitaka KASAMATSU^{7§}, Kenji KATORI¹, Yukiko KOMORI⁸,
Hiroyuki KOURA⁷, Hisaaki KUDO⁹, Kazuhiro OOE⁸, Akira OZAWA¹⁰, Fuyuki TOKANAI⁴,
Kazuaki TSUKADA⁷, Takayuki YAMAGUCHI¹¹, and Atsushi YOSHIDA¹

¹Nishina Center for Accelerator-Based Science, RIKEN, Wako, Saitama 351-0198

²Department of Physics, Tohoku University, Aoba-ku, Sendai 980-8578

³Faculty of Science and Technology, Tokyo University of Science, Noda, Chiba 278-8510

⁴Department of Physics, Yamagata University, Yamagata 990-8560

⁵Center for Instrumental Analysis, Niigata University, Ikarashi, Nishi-ku, Niigata 950-2181

⁶Center for Nuclear Study, University of Tokyo, Wako, Saitama 351-0198

⁷Japan Atomic Energy Agency, Tokai, Ibaraki 319-1195

⁸Department of Chemistry, Osaka University, Toyonaka, Osaka 560-0043

⁹Department of Chemistry, Niigata University, Ikarashi, Nishi-ku, Niigata 950-2181

¹⁰University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki 305-8571

¹¹Department of Physics, Saitama University, Saitama 338-8570

(Received March 26, 2009; accepted April 7, 2009; published May 25, 2009)

Decay properties of an isotope ^{266}Bh and its daughter nucleus ^{262}Db produced by the $^{248}\text{Cm}(^{23}\text{Na},5n)$ reaction were studied by using a gas-filled recoil separator coupled with a position-sensitive semiconductor detector. ^{266}Bh was clearly identified from the correlation of the known nuclide, ^{262}Db . The obtained decay properties of ^{266}Bh and ^{262}Db are consistent with those observed in the $^{278}113$ chain, which provided further confirmation of the discovery of $^{278}113$.

KEYWORDS: ^{266}Bh , ^{262}Db , α -decay, spontaneous fission, gas-filled recoil ion separator, position-sensitive focal plane detector

DOI: 10.1143/JPSJ.78.064201

1. Introduction

The identification of the heaviest nuclides is very difficult because of their extremely small production cross sections. Very heavy nuclides usually form an α -decay chain, and they can be conclusively assigned based on a genetic link to known nuclide(s). A nuclide, ^{266}Bh , is the great-granddaughter of $^{278}113$ that is produced in the $^{209}\text{Bi} + ^{70}\text{Zn}$ reaction.^{1,2)} Thus far, only five atoms have been assigned to ^{266}Bh by direct production.^{3,4)} Most of the heaviest odd-odd nuclei exhibit rather complicated decay properties. Their main decay modes are α -decay, electron-capture (EC) and spontaneous fission (SF). In many cases, these modes coexist in one nucleus. Furthermore, α -decay energies widely distribute because many low-lying states exist in their daughter nuclei. Therefore, it is difficult to obtain a clear assignment of heavy odd-odd nuclides such as ^{266}Bh . Wilk *et al.*³⁾ reported the production of ^{266}Bh in the $^{249}\text{Bk} + ^{22}\text{Ne}$ reaction by the use of a helium gas-jet technique. They observed one decay chain assigned to one originating from ^{266}Bh ($^{266}\text{Bh} \rightarrow ^{262}\text{Db} \rightarrow ^{258}\text{Lr} \rightarrow$). Qin *et al.*⁴⁾ studied the decay properties of ^{266}Bh produced in the $^{243}\text{Am} + ^{26}\text{Mg}$ reaction by the use of the gas-jet technique. They observed four α -decay chains originating from ^{266}Bh . In the present work, we performed an experiment with the aim of obtaining

an unambiguous assignment of ^{266}Bh by a genetic link. For this purpose, we used a gas-filled recoil ion separator (GARIS) coupled to a position-sensitive focal plane detector (PSD). Using a rotating target of ^{248}Cm , ^{266}Bh was produced for the first time in the $^{248}\text{Cm} + ^{23}\text{Na}$ reaction. The main purpose of this work is to provide further confirmation of the production and identification of the isotope $^{278}113$.

2. Experimental Procedure

The experiment was performed at the RIKEN Linear Accelerator (RILAC) Facility. A schematic view of the experimental setup is shown in Fig. 1.

A $^{248}\text{Cm}_2\text{O}_3$ target having a thickness of $350\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$ was prepared by electrodeposition onto a titanium backing foil having a thickness of $0.91\ \text{mg}/\text{cm}^2$. Six pieces of the target were mounted on a rotating wheel having a diameter of 10 cm. During irradiation, the wheel was rotated at 1000 rpm. Although a maximum of eight pieces of the target could be mounted on the wheel, we used only six pieces because of a lack of the curium material.

A ^{23}Na beam was extracted from RILAC. Beam energies of 126, 130, and 132 MeV were used. The corresponding beam energies at the middle of the target were 121, 124, and 126 MeV, respectively. The ^{23}Na beam was pulsed with micro- and macro-pulse structures. The micro-pulse structure was used to prevent the irradiation of the target frame and the two vacant target positions of the wheel. The micro-pulse structure was synchronized to the rotation of the wheel. In the macro-pulse structure, the beam was ON for 3 s and then OFF for 3 s independently of the micro-pulse

*E-mail: morita@ribf.riken.jp

†Present address: Japan Atomic Energy Agency.

‡Present address: Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University.

§Present address: Nishina Center for Accelerator-Based Science, RIKEN.

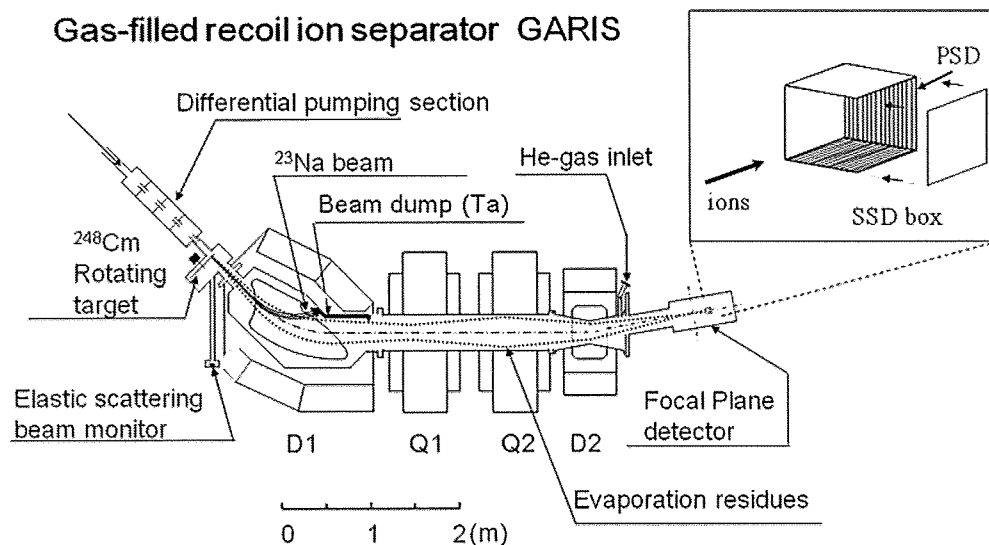


Fig. 1. Schematic view of the experimental setup.

structure. A logical AND signal of the micro- and macro-pulse structures was sent to the beam pulsing system of the accelerator. All the measurements were performed only in the beam OFF period. The counting duty in the macro beam OFF period was 100%, while that in the macro beam ON period was 45%. The beam duty factor was 27.5%. The typical beam intensity was 1 particle- μA on average, and it was 4.4 particle- μA in the micro beam ON period.

GARIS was used to collect evaporation residues (ERs) and separate them from the beam particles and other unwanted charged particles. GARIS was filled with helium gas at a pressure of 33 Pa. Prior to the present experiment, we measured the optimum magnetic rigidity ($B\rho$) for ^{265}Sg produced in the $^{248}\text{Cm}(^{22}\text{Ne}, 5n)^{265}\text{Sg}$ reaction, which differs by only one proton from ^{266}Bh . The highest yield of ^{265}Sg was obtained at 2.07 Tm. Thus, $B\rho$ of GARIS was set at 2.07 Tm for beam energies of 132 and 130 MeV. At beam energies of 126 MeV and a part of 132 MeV, $B\rho$ was set at 2.19 Tm to reduce the counting rate of the focal plane detector to one half.

ERs were transported to the focal plane of GARIS where the PSD was set. The arrangement of the focal plane detector is shown in Fig. 1. The effective area of the PSD is $60 \times 60 \text{ mm}^2$. It comprises sixteen strip detectors having a width of 3.75 mm each, and each strip detector has position sensitivity. At a backward of the PSD, semiconductor detectors (SSDs) having the same effective area as the PSD were set in a box shape to detect particles emitted in backward angle from the ERs and their decay daughters.

Because the mass of the projectile is much smaller than that of target for the reaction studied in the present work (asymmetric reaction), the kinetic energy of the ERs is as low as 10 MeV at the focal plane. Consequently, the depth of the implantation into the detector is approximately $1.5 \mu\text{m}$. Therefore, if an α -particle is emitted at a backward angle, the energy deposition to the PSD is very small, i.e., a few hundred keV depending on the angle of emission. The position resolving power of the PSD is proportional to the energy deposited in it when the total energy of the α -particle is measured by the sum of PSD and SSD (PSD + SSD event); therefore, in this case, the position resolution

becomes poor. A position window should be selected carefully when searching for a correlation event.

The total counting rate of the focal plane detector was approximately $3 \times 10^4/\text{s}$ in the beam ON period, while that was 5–10/s in the beam OFF period. Because of the high implantation rate to the PSD in the beam ON period, the PSD was gradually damaged during the measurement. Therefore, the energy resolution of the PSD gradually worsened with time. We replaced the PSD three times during the long experimental period of one and a half months to remove this problem. Energy calibration of the focal plane detectors was performed using long-lived transfer products implanted in the PSD simultaneously with the ERs of interest. The alpha lines used in the calibration were 6.258 MeV (^{248}Cf), 7.039 MeV (^{252}Fm) and 7.192 MeV (^{254}Fm). The energy resolution was measured simultaneously. Occasionally, we also used an ^{241}Am source to check the energy calibration and resolution. An example of a singles spectrum is shown in Fig. 2. The spectrum was obtained from one strip in one run (run161) with a beam dose of 3.1×10^{17} . The measurement time was 16.4 h. In the energy region below 8 MeV, α lines from long-lived transfer products are observed, while in the region from 8 to 12 MeV, only one event that was assigned to an α decay of ^{266}Bh was detected.

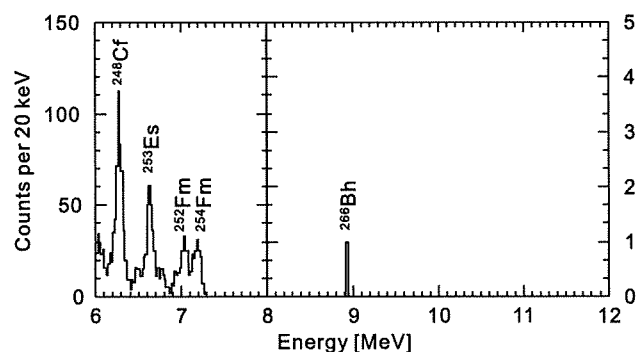
Fig. 2. Example of a singles spectrum for run161. The 7th strip among 16 (0–15) in the PSD was used. The measurement time was 16.4 h for a beam dose of 3.1×10^{17} .

Table I. Summary of decay chains observed in the reaction of ^{23}Na on ^{248}Cm .

ID	E_{beam} (MeV)	Strip	$E(M)$ (MeV)	FWHM (MeV)	$E(D)$ (MeV)	FWHM (MeV)	dPos (mm)	$\tau(D)$ (s)	$E(GD)$ (MeV)	FWHM (MeV)	dPos (mm)	$\tau(GD)$ (s)	Group	Assignment
1	126 ^{a)}	2	9.05	0.11	8.71 ^{s)}	0.18	-0.45	54.91	8.71	0.11	0.98	9.23	AC	$^{266}\text{Bh} \rightarrow ^{262}\text{Db} \rightarrow ^{258}\text{Lr}$
2	130 ^{b)}	11	9.12 ^{s)}	0.16	8.74 ^{s)}	0.16	3.53	13.76	8.60	0.09	-7.16	9.36	AC	$^{266}\text{Bh} \rightarrow ^{262}\text{Db} \rightarrow ^{258}\text{Lr}$
3	132 ^{a)}	7	9.20	0.07	8.67	0.07	0.86	13.71	8.70 ^{s)}	0.14	-0.22	4.72	AC	$^{266}\text{Bh} \rightarrow ^{262}\text{Db} \rightarrow ^{258}\text{Lr}$
4	132 ^{a)}	7	8.82	0.07	8.54 ^{s)}	0.14	1.45	95.45	8.69	0.07	-1.45	3.94	BC	$^{266}\text{Bh} \rightarrow ^{262}\text{Db} \rightarrow ^{258}\text{Lr}$
5	132 ^{b)}	13	8.84 ^{s)}	0.12	8.42	0.05	-0.12	11.95	169.5 ^{s)}		-0.53	27.22	DGI	$^{267}\text{Bh} \rightarrow ^{263}\text{Db} \rightarrow ^{259}\text{Lr}$
6	130 ^{b)}	3	9.14	0.12	8.70	0.12	-0.06	66.23					A	$^{266}\text{Bh} \rightarrow ^{262}\text{Db}$ or ^{258}Lr
7	132 ^{a)}	6	9.23	0.07	8.65	0.07	0.43	22.04					A	$^{266}\text{Bh} \rightarrow ^{262}\text{Db}$ or ^{258}Lr
8	132 ^{a)}	8	9.14 ^{s)}	0.13	8.60	0.06	3.50	7.29					A	$^{266}\text{Bh} \rightarrow ^{262}\text{Db}$ or ^{258}Lr
9	132 ^{b)}	12	9.22 ^{s)}	0.11	8.61	0.04	-0.66	60.40					A	$^{266}\text{Bh} \rightarrow ^{262}\text{Db}$ or ^{258}Lr
10	130 ^{b)}	10	8.60 ^{s)}	0.17	8.70	0.10	-1.72	6.93					C	$^{262}\text{Db} \rightarrow ^{258}\text{Lr}$
11	130 ^{b)}	6	8.55	0.09	8.57	0.09	0.12	2.53					C	$^{262}\text{Db} \rightarrow ^{258}\text{Lr}$ tentative
12	130 ^{b)}	10	8.40	0.11	8.80 ^{s)}	0.18	2.99	3.73					C	$^{262}\text{Db} \rightarrow ^{258}\text{Lr}$
13	132 ^{a)}	4	8.43	0.10	8.69	0.10	-0.08	5.69					C	$^{262}\text{Db} \rightarrow ^{258}\text{Lr}$
14	132 ^{b)}	8	8.84	0.04	8.51	0.04	0.77	82.15					B	$^{266}\text{Bh} \rightarrow ^{262}\text{Db}$ tentative
15	126 ^{a)}	1	9.07	0.07	154.6 ^{s)}		0.52	5.67					E	$^{266}\text{Bh} \rightarrow ^{262}\text{Db}$
16	130 ^{b)}	9	9.09 ^{s)}	0.15	157.9		-0.56	5.34					E	$^{266}\text{Bh} \rightarrow ^{262}\text{Db}$
17	132 ^{b)}	8	9.23	0.06	180.4		1.89	121.53					E	$^{266}\text{Bh} \rightarrow ^{262}\text{Db}$
18	126 ^{a)}	7	8.99	0.09	185.8 ^{s)}		0.16	8.42					F	$^{266}\text{Bh} \rightarrow ^{262}\text{Db}$ tentative
19	126 ^{a)}	11	8.97	0.05	157.1		1.53	141.86					F	$^{266}\text{Bh} \rightarrow ^{262}\text{Db}$ tentative
20	126 ^{a)}	12	8.95 ^{s)}	0.13	162.8		-1.56	68.35					F	$^{266}\text{Bh} \rightarrow ^{262}\text{Db}$ tentative
21	126 ^{a)}	7	8.93	0.08	173.9 ^{s)}		0.61	84.30					F	$^{266}\text{Bh} \rightarrow ^{262}\text{Db}$ tentative
22	130 ^{b)}	7	8.97	0.08	131.1		-1.20	43.99					F	$^{266}\text{Bh} \rightarrow ^{262}\text{Db}$ tentative
23	132 ^{a)}	1	8.95	0.06	107.5		-0.06	151.36					F	$^{266}\text{Bh} \rightarrow ^{262}\text{Db}$ tentative
24	132 ^{b)}	13	8.98	0.04	162.8		-0.72	156.99					F	$^{266}\text{Bh} \rightarrow ^{262}\text{Db}$ tentative
25	132 ^{b)}	10	8.95 ^{s)}	0.14	133.8		3.05	26.85					F	$^{266}\text{Bh} \rightarrow ^{262}\text{Db}$ tentative
26	126 ^{a)}	4	8.76	0.10	124.3 ^{s)}		0.14	112.21					H	$^{267}\text{Bh} \rightarrow ^{263}\text{Db}$ tentative
27	130 ^{b)}	10	8.71	0.08	68.2		0.26	5.38					H	$^{267}\text{Bh} \rightarrow ^{263}\text{Db}$ tentative
28	132 ^{b)}	11	8.75	0.07	139.9 ^{s)}		-0.49	55.57					H	$^{267}\text{Bh} \rightarrow ^{263}\text{Db}$ tentative
29	132 ^{b)}	10	8.44	0.07	89.4		0.64	35.96					I	^{263}Db or ^{258}Lr
30	130 ^{b)}	12	8.84	0.04	173.8 ^{s)}		0.76	176.77					G	$^{267}\text{Bh} \rightarrow ^{263}\text{Db}$ or ^{259}Lr
31	132 ^{a)}	7	8.09	0.07	161.7 ^{s)}		-1.52	294.39					J	not assigned
32	132 ^{b)}	14	8.09 ^{s)}	0.13	164.8 ^{s)}		0.28	208.30					J	not assigned

a) $B\rho$ of GARIS was set to 2.19b) $B\rho$ of GARIS was set to 2.07

s) Sum of PSD and SSD signals

We performed offline analyses to search for mother-daughter correlations, i.e., α - α and α -SF events, based on the position in PSD, energy, and time difference. Because we only considered data from the beam OFF period, a signal indicating the implantation of ER was not recorded. Therefore, the time difference between the ER implantation and its decay event was not obtained.

The average counting rate of particles having energies greater than 50 MeV for each strip of the PSD was 2.7×10^{-4} /s. Considering a positional window of 2 mm, which is a typical position resolution for a true coincidence event for a full energy deposited α -particle and SF, ± 1 mm, the counting rate in the positional window is calculated to be 9.3×10^{-6} /s. Considering a time window of 300 s, the probability of an accidental correlation is calculated to be 2.8×10^{-3} per event. This low value of accidental probability was realized by using a combination of GARIS and the PSD. The reduction in the number of transfer products and target recoils at the focal plane that is achieved using the physical pre-separator, GARIS and the high spatial resolving power of the PSD enables a low background α -SF

correlation measurements. The α -SF correlation measurement would be difficult to perform using only the gas-jet technique.

3. Results and Discussion

We have assigned total of 32 correlations to true ones. All the correlated events are listed in Table I. The event ID#, beam energies from the accelerator, strip number of the PSD, decay energies and the energy resolutions (in full width at half maximum, FWHM), position difference (in mm), grouping in correlation map mentioned below and assignments for each event are listed. Four of the events are α_1 - α_2 - α_3 correlations (ID#1-ID#4), one is an α_1 - α_2 -SF (ID#5), nine are α_1 - α_2 (ID#6-ID#14) and eighteen are α_1 -SF correlations (ID#15-ID#32). The maximum correlation time was set to 300 s. The position window was set to ± 2 mm for the correlation events measured only in the PSD (PSD events). The position window was properly selected for every PSD + SSD event. The superscript "s" in the energy indicated that the event was a PSD + SSD event. A two-dimensional representation of the time- and position-corre-

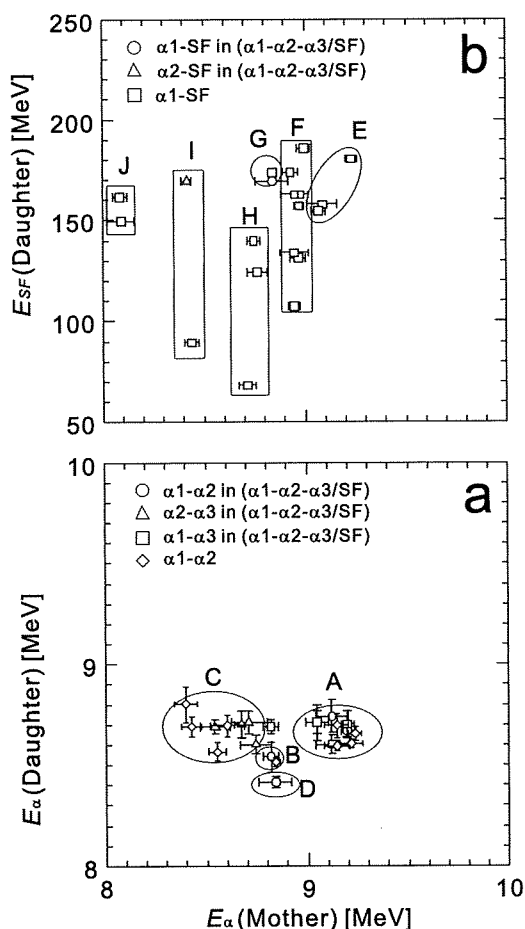


Fig. 3. Two-dimensional representation of time- and position-correlated events. The lower panel (a) shows the α - α correlations. The upper panel (b) shows the α -SF correlations. The time window was set to 300 s.

lated events is shown in Fig. 3. The horizontal and vertical axes represent the mother and daughter energy, respectively. The lower and upper panels [Figs. 3(a) and 3(b)] show the α - α and α -SF correlations, respectively.

The excitation energies of the compound nucleus, ^{271}Bh , at the middle of the target were calculated to be 44.4, 48.1, and 49.9 MeV for beam energies of 126, 130, and 132 MeV, respectively, by using a theoretical mass for ^{271}Bh .⁵⁾ The energies were selected to maximize the $5n$ evaporation channel in the $^{248}\text{Cm} + ^{23}\text{Na}$ reaction in order to produce the isotope ^{266}Bh . Because the ER cross sections of these asymmetric reactions in the heaviest region exhibit a broad peaks around the optimum energies that produce the maximum yields, the isotope ^{267}Bh , which is a product of the $4n$ evaporation channel of the reaction, could be produced in considerable amounts, especially at lower excitation energies. We focused on these two isotopes in the analyses. The direct productions of ^{262}Db and ^{263}Db , which are the α -decay daughters of ^{266}Bh and ^{267}Bh by the $\alpha + 5n$ and $\alpha + 4n$ evaporation channels, respectively, were not considered because of the reaction in the sub-barrier energy region.

3.1 α - α correlations

In the correlations shown in Fig. 3(a), eight points are plotted in Group C (ID#1-ID#4, ID#10-ID#13). The mother energies of these events range from 8.40 to 8.74 MeV, and

those of the corresponding daughters range from 8.57 to 8.80 MeV. We assigned these events to the $^{262}\text{Db} \rightarrow ^{258}\text{Lr} \rightarrow$ decay. The average time differences between mother and daughter decays, i.e. the mean life of the daughter nuclide, was calculated to be $5.8^{+3.2}_{-1.5}$ s. The half-life $T_{1/2}$ is deduced to be $4.0^{+2.2}_{-1.0}$ s. The obtained $T_{1/2}$ in this work agrees very well with the adopted value of ^{258}Lr , $3.92^{+0.35}_{-0.42}$ s.⁶⁾ The adopted α -decay energies of ^{262}Db are 8.45 ± 0.02 , 8.53 ± 0.02 , and 8.67 ± 0.02 MeV, and those of ^{258}Lr are 8.565 ± 0.025 , 8.595 ± 0.010 , 8.621 ± 0.010 , and 8.654 ± 0.010 MeV.⁶⁾ It should be noted that the α energies obtained in this work are approximately 40–60 keV higher than the adopted energies. This is most probably attributable to the summing of α -energy and a conversion electron or γ -ray energy, which is emitted simultaneously with the α -decay in the cases of odd and odd-odd nuclei.⁷⁾ In all previous studies to determine the α -decay energies of ^{262}Db and ^{258}Lr , atoms of these isotopes were collected on a plate or a film by using, for example, the gas-jet technique, and they were not implanted in the detector used. The sources of α -decay were thus outside the detectors. Therefore, this summing effect was not very serious in the previous studies. Because of a shift in energy and the limited energy resolution caused by the summing effect, event ID#11 in Group C could be assigned to the decay of $^{263}\text{Db} \rightarrow ^{259}\text{Lr} \rightarrow$ as well as that of $^{262}\text{Db} \rightarrow ^{258}\text{Lr} \rightarrow$. The energies of α_1 and α_2 were measured to be 8.55 (0.09) and 8.57 (0.10) MeV, respectively. The numbers in parentheses indicate the energy resolutions in FWHM. The time difference between the two was 2.5 s. The reported half-life and α -decay energy of ^{263}Db are 27^{+10}_{-7} s and 8.36 MeV⁸⁾ and those of ^{259}Lr are $6.34^{+0.46}_{-0.42}$ s and 8.45 MeV,⁹⁾ respectively.

Three of the eight correlations in Group C (ID#1, ID#2, and ID#3) are the second part (α_2 - α_3) of the triple correlations (α_1 - α_2 - α_3). All the preceding correlations (α_1 - α_2) are in Group A, as shown in Fig. 3(a), along with four additional α_1 - α_2 correlations (ID#6-ID#9). Because of the genetic correlation to the $^{262}\text{Db} \rightarrow ^{258}\text{Lr} \rightarrow$ decay, these three triple correlation events in Group A are conclusively identified as the correlations of $^{266}\text{Bh} \rightarrow ^{262}\text{Db} \rightarrow ^{258}\text{Lr} \rightarrow$ decays. The other four correlations are identified as those of the $^{266}\text{Bh} \rightarrow ^{262}\text{Db} \rightarrow$ decay or the $^{266}\text{Bh} \rightarrow (^{262}\text{Db} \rightarrow \text{missing}) ^{258}\text{Lr} \rightarrow$ decay partly because the daughter energies, which range from 8.60 to 8.66 MeV, agree well with the adopted decay energies of ^{262}Db and ^{258}Lr considering the above mentioned summing effect. The mean time differences between the α_1 and α_2 decays of the seven correlations in this group are calculated to be 34^{+20}_{-10} s. The corresponding $T_{1/2}$ is 24^{+14}_{-7} s. This value is attributable to a mixture of the $^{266}\text{Bh} \rightarrow ^{262}\text{Db} \rightarrow$ and $^{266}\text{Bh} \rightarrow (^{262}\text{Db} \rightarrow) ^{258}\text{Lr} \rightarrow$ decays. Including this mixture effect, the value agrees well with the adopted half-lives of ^{262}Db (34 ± 4 s) and ^{258}Lr ($3.92^{+0.35}_{-0.42}$ s). The observed α -decay energies of ^{266}Bh range from 9.05 to 9.23 MeV. The correlations observed and assigned here agree well with those reported by Wilk *et al.*³⁾ and Qin *et al.*⁴⁾

One α_1 - α_2 correlation of the triple α correlation (ID#4) exists in Group B, as shown in Fig. 3(a). The corresponding α_2 - α_3 correlation (ID#4) exists in Group C, suggesting that

the correlations in Group B also correspond to the decay $^{266}\text{Bh} \rightarrow ^{262}\text{Db} \rightarrow ^{258}\text{Lr} \rightarrow$. The energies of α_2 and α_3 were 8.54 (0.14) and 8.69 (0.07) MeV, respectively. These energies agree well with the reported values for ^{262}Db and ^{258}Lr mentioned above. The observed α energy of ^{266}Bh assigned here is 8.83 MeV. Although the value just coincides with the decay energy of ^{267}Bh reported by Wilk *et al.*,³⁾ because of the observed decay characteristics, we assigned the correlated event to the decay of $^{266}\text{Bh} \rightarrow ^{262}\text{Db} \rightarrow ^{258}\text{Lr} \rightarrow$.

One additional correlation (ID#14) exists in Group B, as shown in Fig. 3(a). This could be also assigned to the decay of $^{266}\text{Bh} \rightarrow ^{262}\text{Db} \rightarrow ^{258}\text{Lr} \rightarrow$ because of the similarity with the energies and decay times of the correlation assigned above. However, based on the α_1 - α_2 correlation analysis, assignment to the decay of $^{267}\text{Bh} \rightarrow (^{263}\text{Db} \rightarrow)^{259}\text{Lr} \rightarrow$ is also possible if the summing effect is considered. Therefore, this correlation could not be assigned conclusively.

α_1 - α_2 of one α_1 - α_2 -SF triple correlation (ID#5) is classified in a circle marked by D in Fig. 3(a). Here, the mother and daughter energies are 8.84 and 8.42 MeV, respectively. The time difference between these decays was 12.0 s. These values, along with the followed SF decay with a decay time of 27.2 s, are fully consistent with the decay of $^{267}\text{Bh} \rightarrow ^{263}\text{Db} \rightarrow ^{259}\text{Lr}$ (SF).^{3,9)} The reported $T_{1/2}$ values of ^{263}Db and ^{259}Lr are 27_{-7}^{+10} s and 6.2 ± 0.3 s, respectively. We then assign this correlation to the decay originating from ^{267}Bh .

3.2 α -SF correlations

The three correlated events (ID#15, ID#16, and ID#17) in Group E in Fig. 3(b) correspond to the α_1 energies of Group A (9.05–9.23 MeV). The corresponding half-life $T_{1/2}$ deduced from the three events is 31_{-11}^{+41} s, which agrees well with that of ^{262}Db , i.e., 34 ± 4 s. Therefore, we assign these correlated events to SF decays of ^{262}Db fed by 9.05–9.23 MeV α -decays of ^{266}Bh .

Eight correlations (ID#18–ID#25) are observed in Group F in Fig. 3(b). The α -decay energies of the mother range from 8.93 to 8.99 MeV. $T_{1/2}$ of the SF decay is 59_{-15}^{+32} s. No α -decays are observed in the α_1 - α_2 correlations in this energy range, as shown in Fig. 3(a). The observed $T_{1/2}$ is slightly longer than the reported $T_{1/2}$ values of both ^{262}Db , 34 ± 4 s, and ^{263}Db , 27_{-7}^{+10} s. Two α -decay events having an energy of around 8.96 MeV were reported by Qin *et al.*,⁴⁾ and these are assigned to the decay of $^{266}\text{Bh} \rightarrow ^{262}\text{Db} \rightarrow$. However, their experimental setup was not sensitive to the α -SF correlations. The α -decays having an energy of around 8.96 MeV observed in the present work fed a state in the daughter that decays mainly by SF with $T_{1/2}$ of 59_{-15}^{+32} s. This α -decay could be tentatively assigned to the $^{266}\text{Bh} \rightarrow ^{262}\text{Db}$ (SF) decay. However, the possibility of assignment to the $^{267}\text{Bh} \rightarrow ^{263}\text{Db}$ (SF) decay could not be excluded. It should be noted that half the correlations were observed at the lowest incident energy.

One correlation (ID#30) exists in Group G, as shown in Fig. 3(b), along with the α_1 -(α_2)-SF correlation (ID#5) that was assigned to the decay of $^{267}\text{Bh} \rightarrow ^{263}\text{Db} \rightarrow ^{259}\text{Lr} \rightarrow$ in the present study. The α_1 energy was 8.84 MeV, and the SF decay time was measured to be 176.8 s, which agree well with those of the correlation ID#5. Then,

it is natural to assign this correlation to the decay of $^{267}\text{Bh} \rightarrow ^{263}\text{Db}$ (SF) or $^{267}\text{Bh} \rightarrow ^{263}\text{Db} \rightarrow ^{259}\text{Lr}$ (SF). However, we have assigned one correlation having almost the same α_1 energy to the decay of ^{266}Bh [Group B in Fig. 3(a) (ID#8)], suggesting that the correlation might still be assigned to the decay of ^{266}Bh .

Three correlations (ID#26, ID#27, and ID#28) exist in Group H in Fig. 3(b). The α -decay energy of the mother ranges from 8.71 to 8.76 MeV. The deduced $T_{1/2}$ of the SF decay is 44_{-15}^{+55} s. One decay chain having a decay energy of 8.73 MeV was assigned to the decay of ^{267}Bh by Wilk *et al.*³⁾ These correlations can possibly be assigned to the decay of $^{267}\text{Bh} \rightarrow ^{263}\text{Db}$ (SF) or $^{267}\text{Bh} \rightarrow (^{263}\text{Db} \rightarrow)^{259}\text{Lr}$ (SF).

Two correlations exist in Group I in Fig. 3(b). The α -decay energy of the mother is approximately 8.43 MeV. One of these correlations is the α_2 -SF part of the triple α_1 - α_2 -SF correlation (ID#5). We have assigned this correlation to the decay of $^{267}\text{Bh} \rightarrow ^{263}\text{Db} \rightarrow ^{259}\text{Lr}$ (SF). The other correlation (ID#30) could also be the decay of $^{263}\text{Db} \rightarrow ^{259}\text{Lr}$ (SF). The mean decay time of the two event is 31.6 s. The corresponding half-life is 22_{-9}^{+53} s. We could tentatively assign these correlations to the decay mentioned above although the deduced SF half-life of ^{259}Lr is slightly longer than the adopted value, 6.2 ± 0.3 s.

Two correlations (ID#31 and ID#32) exist in Group J in Fig. 3(b). The α -decay energy of the mother is approximately 8.09 MeV. The mean value of the decay times is 251 s. Because the maximum correlation time of this analysis is 300 s, we could not determine the decay time of these correlations, and therefore, we could not assign these correlations.

3.3 9.05–9.23 MeV α decay of ^{266}Bh

An isotope of the 107th element, ^{266}Bh , which decays by α -emission with an energy ranging from 9.05 to 9.23 MeV, was conclusively identified by the present study. A state in the daughter nuclei ^{262}Db , fed by the α -decay, decays by α -emission and SF. In the observed decay chains of the isotope of the 113th element, $^{278}\text{113}$, studied by the RIKEN group,^{1,2)} one of the great-granddaughters decayed by α -emission with a decay energy of 9.08 MeV and decay time of 2.47 s, followed by SF. The assignment was based on an experimental result of the work done by Wilk *et al.*³⁾ that reported one atom of ^{266}Bh assigned by the sequential α -decays $^{262}\text{Db} \rightarrow ^{258}\text{Lr} \rightarrow$. The present work provided further confirmation of the assignment of ^{266}Bh observed in a decay chain originating from $^{278}\text{113}$ by demonstrating the observation of SF decays following the relevant α -decay of ^{266}Bh .

Although a decay time analysis was performed in the macro beam OFF period, because of the small counting statistics, we could only state that the half-life is longer than 1 s.

3.4 Cross section

We calculated an energy-averaged, inclusive cross section for the 30 correlated events assigned to the decays of ^{266}Bh and ^{267}Bh . The counting efficiencies for different correlation types differed from each other. The efficiency is unity for the

α -SF (4 events) correlations, 0.7 for the α - α (12 events) and α - α -SF (one event) correlations, and 0.5 for the α - α - α (16 events) correlations. The counting duty was 0.725. The total beam dose was 1.9×10^{19} , and the target thickness was $7.7 \times 10^{17}/\text{cm}^2$. Assuming the transmission efficiency of GARIS to 0.08, we calculated the cross section to be 50 pb.

4. Conclusion

An isotope of the 107th element, ^{266}Bh , that is produced by the $^{248}\text{Cm}(^{23}\text{Na},5n)$ reaction was clearly identified. The identification was based on a genetic link to the known daughter nucleus ^{262}Db by α -decays. The isotope ^{267}Bh , which is a reaction product of the $4n$ evaporation channel, was also produced and identified. A state in ^{266}Bh , which decays by an α -emission with the energies ranging from 9.05 to 9.23 MeV, feeds a state in ^{262}Db , which decays by α -emission and by SF with a previously known half-life. The result provided a further confirmation of the production and identification of the isotope of the 113th element, $^{278}113$, studied by a research group at RIKEN, Japan.

Acknowledgements

We are grateful to Dr. Y. Yano and Dr. M. Kase for their continuous support, encouragement and useful suggestions. We also thank Dr. O. Kamigaito and all accelerator staff members for their excellent operation for a long period of time. Many thanks are also due to all members of RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science, for their encouragement and support. We thank all members of RIKEN Headquarter headed by Dr. R. Noyori for their warm support. One of the authors (K. M.) thanks his late wife. This research was partly supported by a Grant-in-Aid for

Specially Promoted Research, 10992005, from the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, Japan.

- 1) K. Morita, K. Morimoto, D. Kaji, T. Akiyama, S. Goto, H. Haba, E. Ideguchi, R. Kanungo, K. Katori, H. Koura, H. Kudo, T. Ohnishi, A. Ozawa, T. Suda, K. Sueki, H. S. Xu, T. Yamaguchi, A. Yoneda, A. Yoshida, and Y. L. Zhao: *J. Phys. Soc. Jpn.* **73** (2004) 2593.
- 2) K. Morita, K. Morimoto, D. Kaji, T. Akiyama, S. Goto, H. Haba, E. Ideguchi, K. Katori, H. Koura, H. Kikunaga, H. Kudo, T. Ohnishi, A. Ozawa, N. Sato, T. Suda, K. Sueki, F. Tokanai, T. Yamaguchi, A. Yoneda, and A. Yoshida: *J. Phys. Soc. Jpn.* **76** (2007) 045001.
- 3) P. A. Wilk, K. E. Gregorich, A. Türler, C. A. Laue, R. Eichler, V. Ninov, J. L. Adams, U. W. Kirbach, M. R. Lane, D. M. Lee, J. B. Patin, D. A. Shaughnessy, D. A. Strellis, H. Nitsche, and D. C. Hoffman: *Phys. Rev. Lett.* **85** (2000) 2697.
- 4) Z. Qin, X.-L. Wu, H.-J. Ding, W.-S. Wu, W.-X. Huang, X.-G. Lei, Y.-B. Xu, X.-H. Yuan, B. Guo, W.-F. Yang, Z.-G. Gan, H.-M. Fan, J.-S. Guo, H.-S. Xu, and G.-Q. Xiao: *Nucl. Phys. Rev.* **23** (2006) 400 (Chinese journal in English).
- 5) P. Möller, J. R. Nix, W. D. Myers, and W. J. Swiatecki: *At. Data Nucl. Data Tables* **59** (1995) 185.
- 6) R. Dressler, B. Eichler, D. T. Jost, D. Piguet, A. Türler, Ch. Düllmann, R. Eichler, H. W. Gäggeler, M. Gärtner, M. Schädel, S. Taut, and A. B. Yakushev: *Phys. Rev. C* **59** (1999) 3433.
- 7) M. Asai, K. Tsukada, M. Sakama, S. Ichikawa, T. Ishii, Y. Nagame, I. Nishinaka, K. Akiyama, A. Osa, Y. Oura, K. Sueki, and M. Shibata: *Phys. Rev. Lett.* **95** (2005) 102502.
- 8) J. V. Kratz, M. K. Gøber, H. P. Zimmermann, M. Schädel, W. Brühle, E. Schimpf, K. E. Gregorich, A. Türler, N. J. Hannink, K. R. Czerwinski, B. Kadkhodayan, D. M. Lee, M. J. Nurmia, D. C. Hoffman, H. Gäggeler, D. Jost, J. Kovacs, U. W. Scherer, and A. Weber: *Phys. Rev. C* **45** (1992) 1064.
- 9) K. E. Gregorich, H. L. Hall, R. A. Henderson, J. D. Leyba, K. R. Czerwinski, S. A. Kreek, B. A. Kadkhodayan, M. J. Nurmia, D. M. Lee, and D. C. Hoffman: *Phys. Rev. C* **45** (1992) 1058.



核医学で新手法
 複数分子同時イメージング法とは、疾病に關与する生体分子を標的として複数の分子プローブを投与し、同時画像化することで病態を分子レベルで見極め、高度な診断を可能にする技術である(図)。放射性同位元素(RI)を標識したプローブを複数用いるため、現在の核医学の主流である

創 研 理 研 の 最 前 線

▶▶117

次世代医療技術の創出をめざす

分子イメージング科学研究センター・メタロミクスイメージング研究ユニットリーダー

榎本 秀一

る単一のプローブによるイメージングをさらに発展させた新手法となる。研究ユニットでは、複数分子同時イメージング法を実用化するために、ゲルマニウム半導体検出器によるコンプトンカメラ

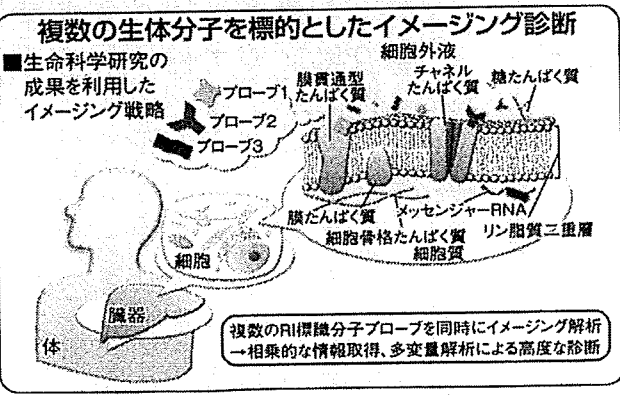
そのアイデアが発案されて30年余りになるが、これまで既存の画像診断装置に対して優位性を示すことができず、核医学の分野では目の目を見ることとがなかった。ところが2003年に、当研究ユニットが、世界で初めて

そのアイデアが発案されて30年余りになるが、これまで既存の画像診断装置に対して優位性を示すことができず、核医学の分野では目の目を見ることとがなかった。ところが2003年に、当研究ユニットが、世界で初めて

複数分子を同時画像化 病態を分子レベルで見極め

内という高精度でガンマ線を(すなわち複数分子を)識別することが可能である。コンプトンカメラ コンプトンカメラは、小動物(マウス)と植物をコンプトンカメラで複数分子同時イメージングに成功し、一躍、次世代の医療技術として注目を浴びるようになった。わが国では、当研究ユニットが

神戸を本拠地に 現在、実用化のために 特に関心を注いでいる研究 開発がデジタル信号処理である。従来、ガンマ線の波高だけを情報としてとらえていた検出器 信号の波形を、デジタル化して取り込む点が開発のポイントで、取り込んだ波形を基に、複数の分子プローブの高度な情報



を引き出そうとしている。研究ユニットは、その起原が和光研究所の加速装置研究部(現仁科加速器研究センター)にあり、基幹技術は理研オリジナルの技術である。08年10月の分子イメージング科学研究センター設立

立とも に、本拠地を和光から神戸に移した。同研究センターは、薬剤合成、イメージング、機能評価のエキスパートがそろっており、実用機開発に理想的な国内有数の機関である。こ

(火曜日掲載)

患者負担かけず

「分子イメージング」技術

がん細胞「追跡」

榎本・岡山大教授ら研究

がん細胞の位置や体内に注射した薬剤の動きなどを生体を傷つけることなく3次元画像で映し出す「分子イメージング」技術の研究に、岡山大学院医歯薬学総合研究科の榎本秀一教授が取り組んでいる。新薬開発やがんの早期診断などにつながる技術として、世界的に注目を集める研究だ。(内田圭助)



榎本秀一教授

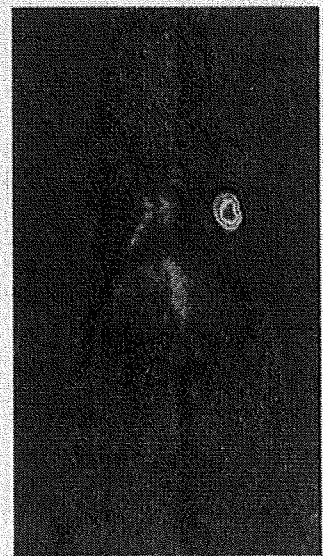
分子イメージングは陽電子放射断層撮影装置(PET)などの特殊機器を使用する。追跡したいプローブという分子に放射性元素を付加して生物に投与。放出されたガンマ線を特殊機器がとらえ、分子の動きや位置などをリアルタイムで映像化する。

榎本教授は北海道大大学院で薬学博士を取得後、理化学研究所(理研)に入り核医学分野で研究。2008年には複数のプローブを同時に追跡するカメラの開発に世界で初めて成功した。同年、岡山大に赴任、理研神戸研究所(神戸市)分子イメージング科学センターで研究ユニットのリーダーも務めている。

岡山大では現在、医歯薬学総合研究科の宮地弘幸教授らが行っている、潰瘍性大腸炎やクローン病といった原因不明で治療が難しい腸疾患の治療薬開発に協力。これらの疾患患部に付着しやすいプローブを作り出し、分子イメージングで新薬候補物質の動き目を

特殊機器使い3次元画像化

マウスの分子イメージング画像。がんの発生部位が赤く見える



検証しているという。さまざまながんや動脈硬化、糖尿病の早期診断などにつながるプローブ開発を進める。

榎本教授は、がん治療薬の研究開発を目指し岡山県内の産学官連携グループが11年までに岡山県大鹿田キャンパス(岡山市北区鹿田町)に設ける「おかやまメディカルイノベーションセンター(OMIC)」にも中心的メンバーとして参画する。

OMICには岡山大にはないPETなどの特殊機器が導入される予定で、榎本教授は「設備がそろえば研究はさらに加速する」と期待している。

ただ、分子イメージング技術の研究は、政府の「事業仕分け」で国からの事業費が削られるなど理解されにくいのも事実。榎本教授は「世界的に競争が激しい分野。理研などと連携して世界一の技術水準を保ち、機運を岡山に根付かせるよう努めたい」としている。

糖尿病

PETで兆候早期発見

年内めど治験 理研など 膵臓の検査薬開発

岡山大学の榎本秀一教授らと理化学研究所は、糖尿病の早期発見に役立つ画像検査用の薬剤を開発した。

インスリンを作る膵臓(すいぞう)の細胞を検出する薬剤で、糖尿病の前段階とされる細胞の減少を早期に見つけられる。年内をメドに検査薬として臨床試験を目指す。



「スタチン受容体」に結合するペプチドを作製。加速器で発生した銅の放射性同位体と結合し、薬剤を作った。ペプチドは体内に入れても安全という。ラットを使った実験で開発した薬剤の性能を確かめた。ラットに血液中に薬剤を注射したあとPETで観察したところ、膵臓のβ細胞だけを抽出できた。

糖尿病になると、インスリンの効きが悪くなり血糖値が上がる。糖尿病の検査は、糖分を注射したあとの血糖値の上がり具合を調べているが、インスリンの効きが悪くなると、血糖値の上がり具合が鈍くなる。早期発見の手法は確立していない。一方、糖尿病の症状が出る前にβ細胞が減ることがある。開発した薬剤の早期診断向けの検査薬として実用化を目指す。

小児科学会 ワクチン制度協議会設置

日本小児科学会など感染症にかかわる10前後の学会・団体が、日本国内のワクチン制度の課題について議論するため、共同協議会を設置する。各学会がそれぞれ委員を出し合い、導人が必要なワクチンについて協議。共同で政府に要望などを送る。米国ではワクチンに関する公的な諮問委員会を始めた。

帯電受信 デジ携帯 信号回路面積1/3

富士通研 裏番組録画に応用

富士通研究所(川崎市)は、携帯電話などで地上デジタル放送を受信するのに必要な小型の半導体回路を開発した。特定の帯域の電波を受ける際に使う「調皮共振ヒューズ」

開発したのは陽電子放射断層撮影装置(PET)向けの薬剤で、あらかじめ血液中に注射すると細胞にくっつく。PETで放射性物質を検出する際に薬剤が光り、β細胞の分布や量がわかる。まずβ細胞の表面にありインスリンの産生に必要なたんぱく質「ソマト

東京理科大学の友岡康弘教授らの研究チームは、人などの動物の胚(はい)から組織や臓器が分化するメカニズムを解明した。胚を構成する細胞が分泌するたんぱく質が、別の種類の細胞の分化を促していることを突き止めた。胎児の発生異常やがんの病態の解明につながる。米科学アカデミー紀要(電子版)に掲載された。

胚の組織・臓器への分化

促進たんぱく質特定

結合組織の一種の間充織(ちゆうしゆ)からなり、相互作用をしながら心臓や腎臓などの組織に分化していく。ただ、どのように相互作用をしているのかわかっていなかった。

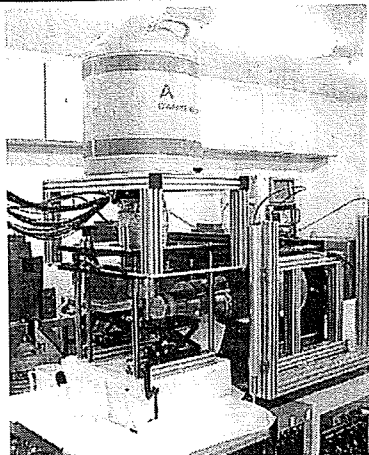
東京理大 胎児発生異常解明に道

間充織をそれぞれ取り出し、培養液を入れた培養皿内やマウスの体内で接触させずに培養した。数週間後に上皮は、通常通り繊毛細胞と呼ばれる細胞に分化をした。間充織の細胞を詳しく調べるなどして、Fst11が分泌されていた。



ベルギー企業 日本企業 撲滅に真入するよ

「ACIP」があるが、日本はワクチンについて議論する場がなく、課題として指摘されていた。新型インフルエンザを巡るワクチン行政の混乱を受け、厚生労働省も昨年12月に厚生科学審議会に予防接種部会を設置。制度の見直しについて議論を始めている。



ネズミの実験向けに試作した検査装置 (理化学研究所提供)

がん・炎症...

理研、ネズミ実験

理化学研究所の榎本秀一チームリーダーらの研究チームは、がんや炎症など異なる病気を同時に診断できる検査装置を開発し実用化のメドをつけた。宇宙航空研究開発機構(JAXA)などと組み、天文分野で使う検出器の技術を応用。病気に応じて目印に使う放射性薬剤を、何種類でも1度の撮影で同時に検出できる。ネズミを使った実験で性能を確認した。

異なる病気 同時診断

一括で放射性薬剤撮影

天文技術を応用

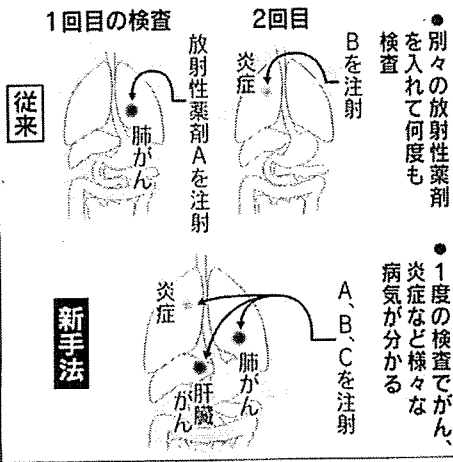
新装置はがんの検査で普及している陽電子放射断層撮影装置(PET)などで使われる複数の放射性薬剤を、一度の撮影で検出できる。従来はがんを調べるには、ある放射性薬剤を入れて検査し、炎症を見るには別の放射性薬剤を使って再度検査していた。新装置なら両方が同時にわかる。天文分野で宇宙の放射

線を検知するのに使うのと同じ「半導体コンプトンカメラ」を組み込んだ。エネルギーが200〜2000KeV(電子束)の広い範囲に渡って放射線の一種、ガンマ線をとらえることができる。このため、複数の放射性薬剤に対応できる。一般的なPETは511KeVのガンマ線のみしかとらえられない。

放射線の検出器の心臓部はゲルマニウム半導体で作製した。幅3ミリのスリットが入った直方体の検出器を2つ平行に並べた構造。約30分の撮影で、がんや炎症部位の範囲を0.5〜1ミリのきめ細かさで特定できる。データの計算方式などを工夫し、短い検査時間と高精度を実現した。

ネズミに異なるエネルギーの放射線を出す2種類の放射性薬剤を注射して新装置を試した。一方の薬剤はがん細胞に、もう一方は炎症が起きた部分に集まりやすいものを使用。検査の結果、がんと炎症の部位を見分けることができた。がんの種類に応じた放射性薬剤の開発が進めば、将来は様々なタイプのがんを一度の検査で判別できるようになる可能性がある。

新装置の利用法のイメージ



神戸研究所
分子イメージング科学研究センター

平成 19 年度～平成 21 年度成果報告書

分子イメージング機器研究開発プロジェクト

悪性腫瘍等治療支援分子イメージング機器
研究開発プロジェクト(先導研究)

半導体コンプトンカメラによる複数分子同時
イメージング機器の研究開発に係わる先導研究

平成22年3月

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構

(委託先) 独立行政法人理化学研究所

独立行政法人宇宙航空研究開発機構

目次

まえがき	3
I. 研究開発の成果と達成状況	4
1. 研究開発の成果	4
(1) 要約（和文）	4
(1) 要約（英文）	5
(2) 本文	6
1. Ge 半導体コンプトンカメラの研究開発	6
2. Si/CdTe 半導体コンプトンカメラの研究開発	11
3. Ge 半導体コンプトンカメラと Si/CdTe 半導体コンプトンカメラの性能評価	15
2. 目的に照らした達成状況	17
II. 研究発表・講演、文献、特許等の状況	19
(1) 研究発表・講演	19
(2) 論文発表	25
(3) 特許等	27
(4) その他の公表（プレス発表等）	28

まえがき

がんや生活習慣病などのさまざまな疾患の発症機序や病態には、複数の因子が複合的に関与することが明らかになってきている。複数分子同時イメージングの実現によってこれらの因子を特異的に観察することの出来る複数の分子プローブの同時画像化解析が可能になれば、それら因子の総合的な動態や分布から疾患の病期や病態を分析する高度な診断が可能になると考えられる。

本先導研究事業では、シリコン・ゲルマニウム・テルル化カドミウム等の半導体を検出器素材として開発されたコンプトンカメラをさらに高度化し、厚生労働省による共同事業で新たに創薬する新核医学核種を用いた分子プローブ等との組み合わせで複数分子同時イメージングを可能にする、臨床用半導体コンプトンカメラの高度実用化技術開発を行っている。

複数分子同時イメージングの実現により、疾患に関与するそれぞれの因子を特異的に観察することの出来る複数の分子プローブの同時画像化解析が可能になれば、それら因子の総合的な動態や分布から疾患の病期や病態を分析する高度な診断が可能になり、分子イメージングを用いた創薬・疾患診断研究に革新的な手法をもたらすことが期待される。

I. 研究開発の成果と達成状況

1. 研究開発の成果

(1) 要約（和文）

本先導研究事業では、理化学研究所が研究開発実績を持つゲルマニウム（Ge）半導体検出器を用いたコンプトンカメラと、JAXA が研究開発実績を持つシリコン（Si）半導体検出器およびテルル化カドミウム（CdTe）半導体検出器を用いたコンプトンカメラをさらに高度化し、厚生労働科学研究費補助金による共同事業で新たに創薬する新核医学核種を用いた分子プローブ等との組み合わせで複数分子同時イメージングを可能にする、医療用半導体コンプトンカメラの高度実用化技術開発を行ってきた。がんや生活習慣病、脳神経疾患などを含むさまざまな疾患の発症機序や病態には、複数の因子が複合的に関与することが明らかになってきており、複数分子同時イメージングの実現によってこれらの因子を特異的に観察することの出来る複数の分子プローブの同時画像化解析が可能になれば、それら因子の総合的な動態や分布から疾患の病期や病態を分析する高度な診断が可能になり、分子イメージングを用いた創薬・疾患診断研究に革新的な手法をもたらすことが期待される。

これまでに、高エネルギー γ 線放出核種である Fe-59、Mn-54、Zn-65、Sr-85 や、PET 用核種である F-18、Ga-68、Cu-64、SPECT 用核種である I-131 など、10 種類以上の標識核種を用いた撮像実験に成功しており、半導体コンプトンカメラによる複数分子同時イメージングの実証にも世界で初めて成功した。この成果の学術論文誌上での発表に併せてプレスリリースを行い、研究成果の周知を図った。この内容は各社報道メディアで取り上げられ、広く一般に向けて情報発信することが出来た。

また、宇宙ガンマ線観測のためにコンプトンカメラを開発してきた JAXA が、分子イメージングにおけるコンプトンカメラ応用に深い経験と実績を有する理研グループと共同研究を行うことにより、Si/CdTe コンプトンカメラを分子イメージング実験に適用するために必要な改良点が明らかとなった。小動物等を用いた撮像実験では、Si/CdTe コンプトンカメラの撮像性能の実証に成功し、特に近接したコンプトンカメラによって対象物を高い分解能でイメージングするための最適な検出器の配置等の検討が進んだ。この成果は、JAXA が保有する宇宙技術シーズの異分野への展開の好例であり、JAXA 主導の記者発表を行って一般に向けた情報発信も行った。

これまでに行ってきた撮像実験の結果から、実用化の妨げとなる問題点が抽出され、さらに高度化が必要な研究開発内容を、(1)Ge コンプトンカメラの空間解像度向上、(2)Ge コンプトンカメラの感度向上、(3)Si/Ge コンプトンカメラの開発、(4)デジタル波形処理手法の開発、(5)アレイ型半導体コンプトンカメラの開発、(6)小型 Si/CdTe 半導体コンプトンカメラの実証実験、(7)大面積、高効率 Si 半導体検出器モジュールの開発、(8) Si 半導体検出器モジュールの Si/Ge コンプトンカメラへの技術展開、および(9)Ge と Si/CdTe による小動物実験と既存モダリティとの比較、臨床用装置開発のための先導研究の 9 つの項目に切り分け、それぞれの項目について、実用化のための高度化開発を行ってきた。それぞれの項目に関する成果のうち特に重要な技術については、民間企業等の意向も考慮しつつ、特許の国内および国際出願を行い、研究成果の普及にも努めた。また、開発を行った要素技術を現在使用している撮像システムへに実装することにも成功し、実際に撮像実験を行ってその有効性の実証を行った。

(1) 要約 (英文)

In this R&D project, further sophistication of the component technologies of the germanium (Ge) semiconductor Compton camera that had been being developed at RIKEN, and the silicon (Si) and cadmium telluride (CdTe) semiconductor Compton camera that had been being developed at JAXA, have been performed to examine the feasibility of proposed multiple molecular imaging technology with the semiconductor Compton camera, in combination with the new nuclear medical imaging agents developed in the joint R&D project administered by the Ministry of Health, Labour and Welfare. Recent progress in life science research has revealed that various common diseases, including cancer, cranial nerve disease, and other lifestyle-related diseases, are multi-factorial diseases that are complicatedly related to some genetic factors and environmental factors. If we can realize simultaneous imaging of multiple molecular probes that specifically trace each factor that related to the diseases, and make simultaneous use of these factors for advanced imaging analysis, ultimately accurate and specific medical diagnosis is possible, and this will cause innovative advancement in new drug development and study of diagnosis of diseases by use of molecular imaging technology.

We have succeeded in Compton camera imaging of more than ten radionuclides for labeling at RIKEN: for example, high-energy gamma-ray emitting nuclides of Fe-59, Mn-54, Zn-65 and Sr-85; PET nuclides of F-18, Ga-68, Cu-64; and SPECT nuclide I-131. Moreover, we have achieved the world's first successful demonstration of multiple molecular simultaneous imaging by use of our Ge semiconductor Compton camera. We held a press briefing on the results along with publication in a scientific journal, to expedite the circulation of the results, and the news was appeared on several news media.

By the joint research of RIKEN and JAXA, the problems of Si/CdTe Compton camera when it is applied to molecular imaging, which had been originally developed for astronomical study, have been clearly extracted and analyzed. We have succeeded in showing the imaging performance of the Si/CdTe Compton camera by small animal imaging experiments, and valuable information has been obtained that is especially useful for near-field high-resolution imaging. This achievement has shown a good example of outspread application of aerospace technology seeds, and a press briefing was held by the lead of JAXA.

Through the results of the imaging experiments and other investigation, nine component technologies were extracted for further improvement. Further R&D on each component technology has been carried out in this project, and important technologies were applied for domestic and international patent. Furthermore, we were able to implement some improved component technologies in our Compton camera imaging system, and have succeeded in demonstrating their effectiveness through some imaging experiments.

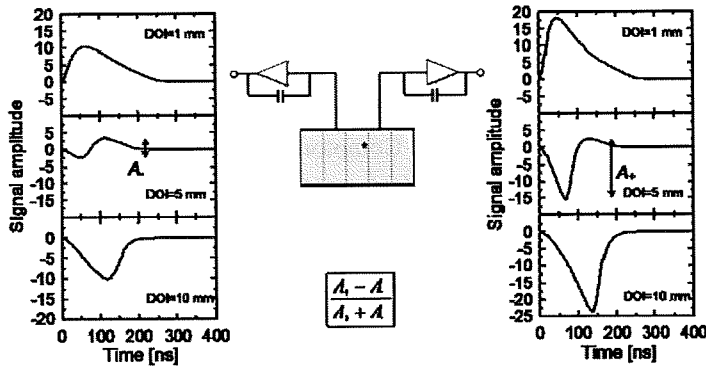
(2) 本文

1. Ge 半導体コンプトンカメラの研究開発

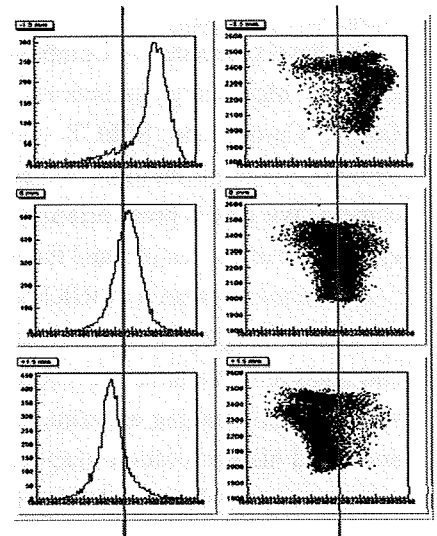
理化学研究所が研究開発を行ってきた Ge 半導体コンプトンカメラをさらに改良し、複数分子同時イメージングの実現可能性を評価するため、次に示す開発項目に切り分け、それぞれの要素技術の高度化開発を行った (①- ⑤)。

① Ge コンプトンカメラの空間解像度向上

両面直交ストリップ電極式 Ge 半導体検出器における検出信号処理法の高度化により、 γ 線相互作用位置の高精度測定法の開発を進めた。信号波形解析の結果から、信号波高を比較と信号積分値を比較する方式を考案した。電子回路シミュレーション結果と比較しながら信号処理回路を試作し、現有装置と組み合わせた実証実験を行った。その結果、1 mm 以下の分解能が得られることが明らかになり、実際に撮像装置に組込んで実証実験を行うための試作回路の作製を行った。

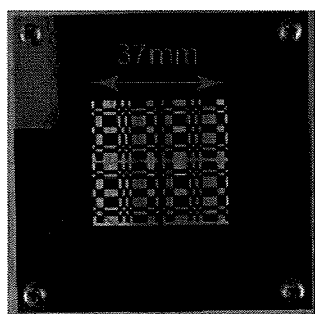


γ 線の相互作用位置に依存した信号波形の変化

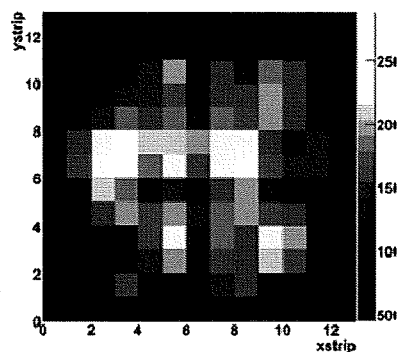


試作回路を用いた相互作用位置の検出

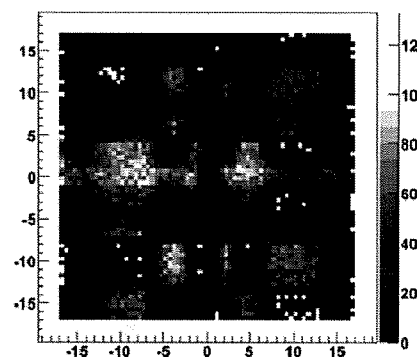
平成 21 年度には、GREI の全ての信号出力に対して試作回路を接続し、撮像システムへの組み込みを完了した。この撮像システムの固有空間分解能を確かめるため、厚さ 0.8 mm のタンゲステン製のマスクを GREI の全面に設置し、そのマスクを通して ^{57}Co の 122 keV の γ 線を計測した。この計測で得られたデータを解析した結果、従来のシステムでは確認できなかったマスクパターンを明確に描出することが可能になり、ミリオーダーの固有空間分解能の実証に成功した。



タンゲステン製マスク



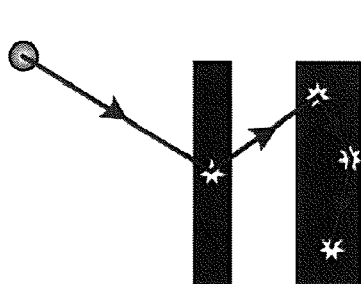
位置検出法実装前の投影像



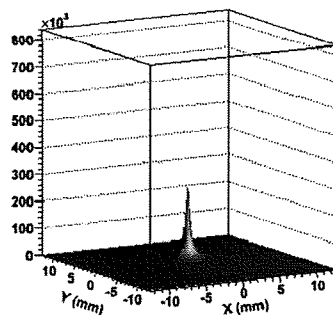
位置検出法実装後の投影像

② Ge コンプトンカメラの感度向上

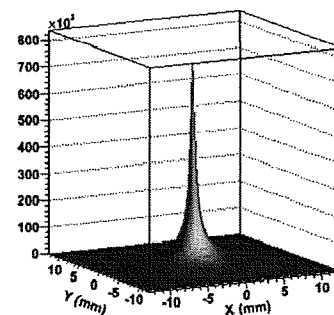
入射 γ 線が検出器内で複数回相互作用した事象を有効なデータとして処理し、検出感度を向上させるための γ 線トラッキング法の開発を行った。まずモンテカルロシミュレーションを行い、 γ 線トラッキング法を用いた場合の感度の向上率を評価した。GREI の後段検出器 (39×39×20 mm) に、500keV の γ 線が入射した場合、現 GREI に γ 線トラッキング法を採用すると最大約 3.4 倍の測定効率の向上することが判明した。また、同シミュレーションにより、デジタル波形処理等による信号分解を適用した場合、 γ 線トラッキング法により最大約 7.6 倍の測定効率向上が可能と試算した。このシミュレーションデータに基づいて γ 線トラッキング法のアルゴリズム開発を行い、実測データに適用した結果、現段階でもエネルギーに依存して 3~5 倍程度の感度の向上に成功した。



入射 γ 線の複数散乱事象



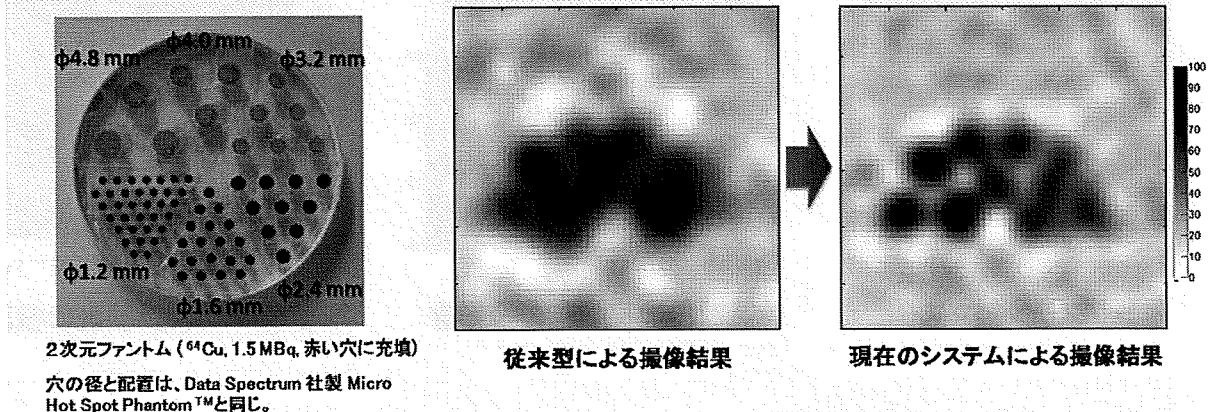
トラッキング法適用前



トラッキング法適用後

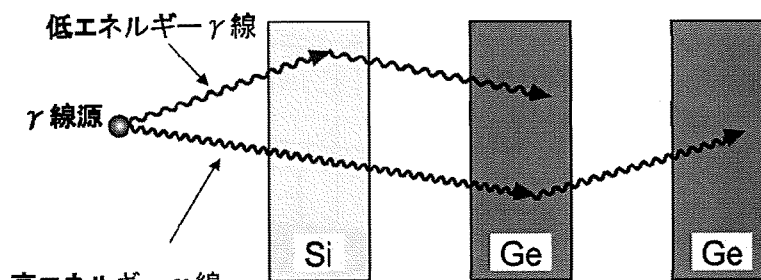
平成 21 年度には撮像システムの改良も行い、このトラッキング法の実装により感度と計数率特性が大幅に向上した。この撮像システムの性能を示すため、Data Spectrum 社製 Micro Hot Spot Phantom™ と同じ穴の径と配置を有する 2 次元の RI ファントムを作製し、この撮像実験により従来の撮像システムとの性能の比較を行った。その結果、従来は 10 時間程度の撮像時間を要して得られていた画質の画像を 2 時間で取得する事に成功し、実用性能が大幅に向上した事が示された。

線源: ^{64}Cu (511 keV)、ファントム図の赤い穴のみに充填
 総放射線量: 1.5 MBq、撮像時間: 2時間



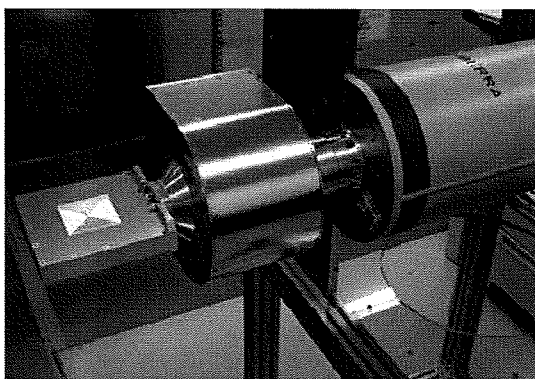
③ Si/Ge コンプトンカメラの開発

現有の Ge コンプトンカメラの前面に位置感応型 Si 検出器を追加することにより、SPECT 核種、PET 核種および新核医学核種の同時撮像を可能にする新しい撮像装置の創出を推進している。これまでにこの装置の原理の検証と設計のためのモンテカルロシミュレーションを行い、100 keV 程度の低エネルギーの γ 線に対して、感度が約 6 倍に向上することが明らかになった。この技術を適用することで、広いエネルギー範囲の γ 線に対して高い感度を保持した撮像装置が実現されることが期待され、積極的にこの技術の普及を図るため、特許の国内および国際出願を行った。



Si/Ge コンプトンカメラ

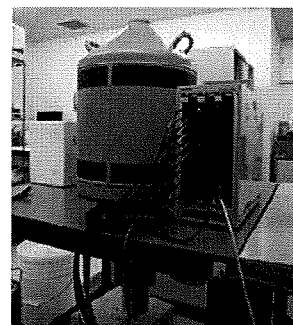
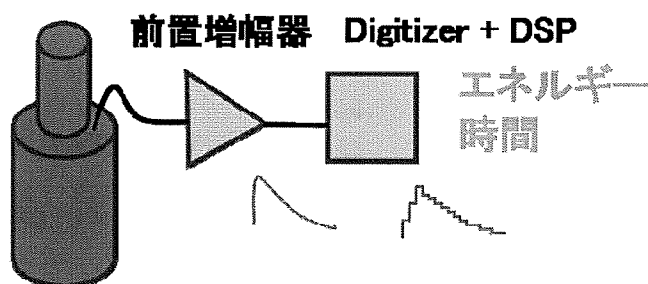
平成 21 年 4 月より、JAXA で大学院博士課程の研究を行っていた研究者が理研の任期制研究員として着任し、JAXA が保有する宇宙用センサー技術の導入が本格化した。JAXA が開発を行ってきた、室温でも動作可能な Si-Pad 検出器が GREI に組込可能なシステムとして作製され、その正常な動作を示す実証データの取得に成功した。また理研でも、両面ストリップ電極式のリチウムドリフト型 Si 検出器が準備され、当該技術の実装が可能になった。この検出器は特に低エネルギーの γ 線に対して極めて優れたエネルギー分解能と高い検出効率を有しており、1 つのコンプトン散乱事象に対しては散乱角推定精度の理論限界である、ドップラーブロードニングの影響も補正することが可能になると考えられ、コンプトンカメラを用いた低エネルギーガンマ線イメージングのブレークスルーとなる事が期待される。



両面ストリップ電極式リチウムドリフト型Si検出器

④ デジタル波形処理手法の開発

①の空間解像度向上のためには連続する3本のストリップ電極を必要とするため、②のトラッキング事象の大部分は信号が重なり合う。現在実装されているアナログベースの信号処理系では、重なり合った信号を処理することは不可能であるため、解像度と感度の両方を同時に最大限向上させることは困難である。この問題の解決策として、デジタル波形処理による信号分解法を考案した。この手法は、信号波形をAD変換器でデジタル化して取り込み、複数信号の重りを波形解析により分解するものである。既にこの手法を実装するための試作機の作製を進めており、この手法の有用性の実証に成功した。この技術の普及を促進させるため、国内特許の出願を行った。



デジタル波形処理

平成21年度は、理研でGREIの全ての信号出力数分のデジタル波形取得装置を準備した。この装置を用いて信号波形解析手法の実装に成功し、これまでに例のない、リアルタイム波形解析を実現したデジタル半導体コンプトンカメラシステムの構築に成功した。この撮像システムを用いて実際にRIファントムの撮像実験を行い、デジタルシステムで初の画像の取得に成功した。