

医療用等ラジオアイソトープ製造・利用推進 アクションプランのフォローアップについて

理研におけるアスタチン-211の製造開発（2）



理化学研究所
仁科加速器科学研究センター

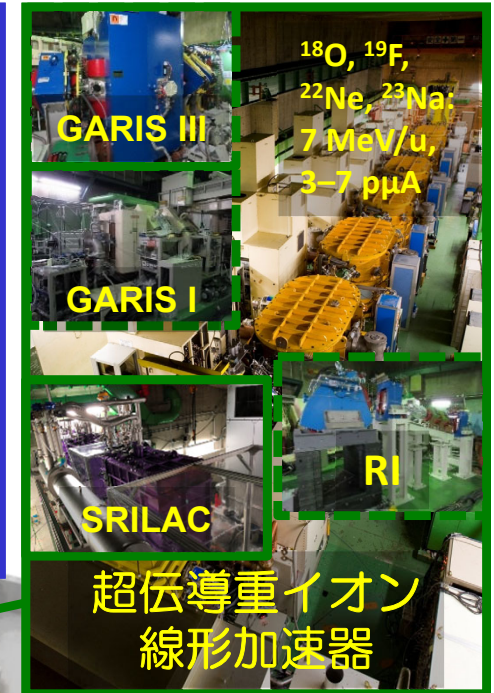
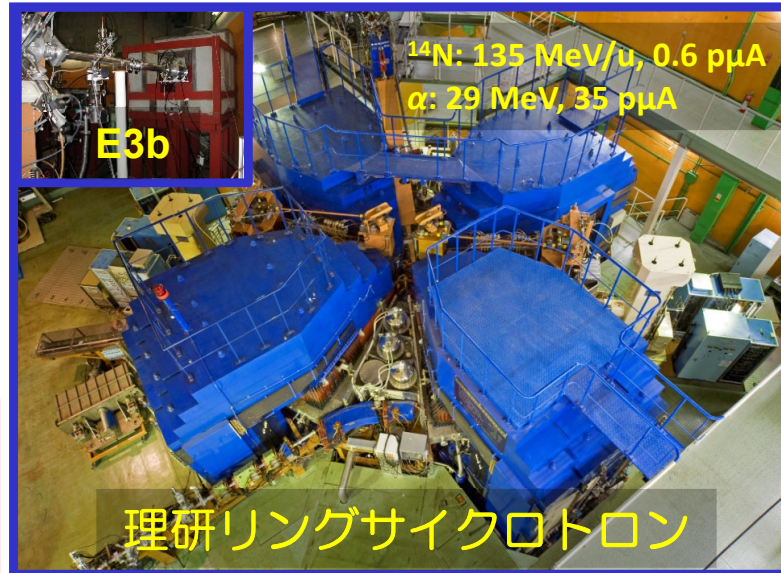
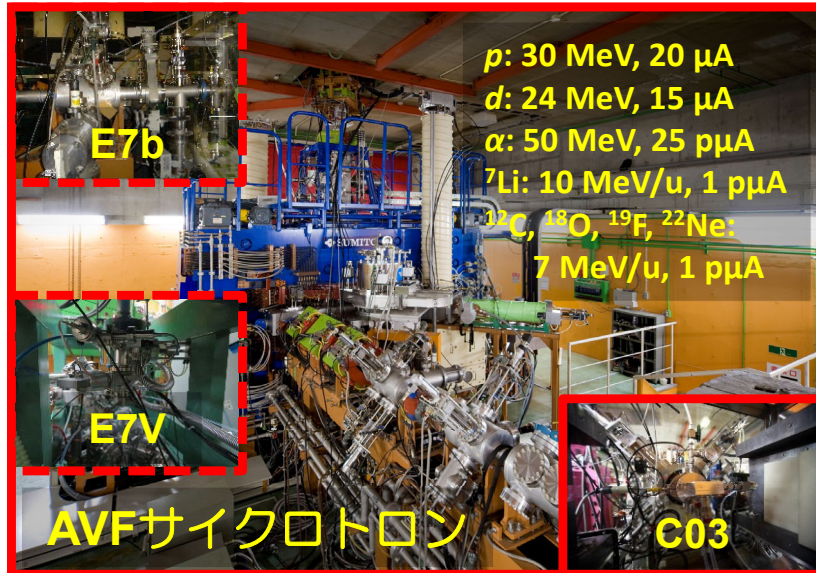


内容

1. 理研RIビームファクトリーにおけるRI製造
2. アスタチン-211の製造技術開発と供給
3. まとめ

1. 理研RIビームファクトリー におけるRI製造

RIBFにおける応用研究用RIの製造



0 50 m

理研RIBFが製造する応用研究用RI

Nuclides	Z	T _{1/2}	Accel.	Reactions	Research fields
⁷ Be	4	53.29 d	AVF	^{nat} Li(p,xn)	Ind.
²⁴ Na	11	14.9590 h	AVF	^{nat} Li(d,xn)	Ind., Med.
²⁴ Mg	12	20.91 h	AVF	^{nat} Mg(d,x)	Chem.
^{42,43} K	19	12.360 h, 22.3 h	AVF	^{nat,43,44} Ca(d,x)	Ind., Med.
^{44m,45} Sc	21	58.6 h, 3.927 h	AVF	^{nat} Ti(d,x)	Ind., Med.
⁴⁴ Ti	22	49 y	AVF	^{nat,44} Ca(d,x)	Ind.
⁴⁸ V	23	15.9735 d	AVF	⁴⁵ Sc(d,3n)	Pharm. sci., Med.
^{48,51} Cr	24	21.56 h, 27.702 d	AVF	^{nat} Ti(p,xn)	Phys., Chem.
⁴⁸ Cr	24	21.56 h	AVF	⁴⁵ Sc(α,n)	Ind.
^{52a,54} Mn	25	5.591 d, 312.3 d	AVF	^{nat} Ti(α,2n)	Pharm. sci., Med.
^{56,57,58} Co	27	77.27 d, 271.79 d, 70.82 d	AVF	^{nat} Cr(p,xn)	Med.
⁶¹ Cu	29	3.333 h	AVF	^{nat} Fe(d,xn)	Chem.
⁶⁵ Zn	30	244.26 d	AVF	^{nat} Zn(d,x)	Phys., Chem., Biol., Med., Pharm. sci., Ind., Environ. sci.
^{66,67} Ga	31	9.49 h, 3.2612 d	AVF	^{nat} Cu(d,xn)	Chem., Ind.
⁶⁷ Cu	29	61.83 h	AVF	^{nat} Zn(d,xn)	Pharm. sci., Med.
^{69m} Zn	30	13.76 h	AVF	⁷⁰ Zn(p,α)	Chem.
⁷³ As	33	17.77 d	AVF	⁷⁰ Zn(d,αn)	Biol.
⁷⁵ Se	34	119.779 d	AVF	^{nat} Zn(d,x)	Biol., Med., Pharm. sci., Environ. sci.
⁸⁵ Sr	38	64.84 d	AVF	⁷⁵ As(p,n)	Environ. sci., Chem.
^{89a,90} Zr ⁺	40	7.86 min	AVF/RILAC	⁷⁵ As(d,2n)	Chem.
^{88,88} Y	39	14.74 h/106.65 d	AVF	^{nat} Ge(α,xn)	Chem., Biol., Med., Pharm. sci., Ind.
^{88,89} Zr	40	83.4 d, 78.41 h	AVF	^{nat} Rb(p,xn)	Chem., Ind., Pharm. sci., Med., Environ. sci.
^{89m} Zr ⁺	40	4.18 min	AVF	⁸⁹ Y(p,xn)	Chem.
^{88m,88g} Nb ⁺	41	7.8, 14.5 min	AVF/RILAC	⁸⁹ Y(d,xn)	Chem.
^{90m,90g} Nb ⁺	41	18.81 s, 14.60 h	AVF	⁸⁹ Y(p,n)	Phys., Chem.
⁹⁰ Mo ⁺	42	5.67 h	AVF/RILAC	⁸⁹ Y(d,2n)	Chem., Environ. sci.
^{92m,95} Nb	41	10.15 d, 34.975 d	AVF	^{nat} Sr(α,xn)	Chem.
^{92,94} Tc ⁺	43	4.23 min, 293 min	AVF	^{nat} Sr(d,xn)	Chem., Environ. sci.
^{93m} Mo ⁺	42	6.85 h	AVF	^{nat} Ge(²³ Ne,xn)	Chem.
^{93a,94} Tc ⁺	43	2.75 h, 293 min	AVF	^{nat} Zr(p,xn)	Chem.
^{95,96} Tc	43	20.0 h, 4.28 d	AVF	^{nat} Zr(d,xn)	Phys.
^{95m} Tc	43	61 d	AVF	⁹³ Nb(p,n)	Environ. sci., Chem.
⁹⁹ Mo	42	65.94 h	AVF	⁹³ Nb(d,2n)	Chem.
⁹⁹ Rh	45	16.1 d	AVF	^{nat} Mo(d,xn)	Chem.
¹⁰³ Pd	46	17.000 d	AVF	⁹⁵ Mo(p,n)	Pharm. sci., Med.
^{109m} Pd	46	4.696 min	AVF	^{nat} Mo(d,xn)	Chem.
^{104m,105} Ag	47	33.5 min, 69.2 min	AVF	⁹³ Nb(α,2n)	Chem.
¹¹¹ Ag	47	7.45 d	AVF	⁹⁵ Ru(p,n)	Chem., Med.
¹⁰⁸ Cd	48	462.6 d	AVF	¹⁰³ Rh(d,2n)	Biol., Med., Pharm. sci., Ind., Environ. sci.
¹²⁴ Sb	51	60.20 d	AVF	^{nat} Ag(p,xn)	Chem.
^{121m} Te	52	154 d	AVF	^{nat} Ag(d,xn)	Environ. sci.
¹¹⁵ Te	52	6.00 d	AVF	^{nat} Sn(α,xn)	Chem.
¹²⁴ I	53	4.1760 d	AVF	^{nat} Sb(d,xn)	Ind., Pharm. sci., Med.
¹³³ Ba	56	10.551 y	AVF	¹¹⁶ Sn(α,2n)	Ind., Pharm. sci., Med.
^{135m} Ba	56	28.7 h	AVF	¹²⁴ Te(d,2n)	Chem.
¹³⁵ La	57	19.4 h	AVF	¹³³ Cs(d,2n)	Med.
¹³⁹ Ce	58	137.640 d	AVF	¹³³ Cs(α,x)	Chem.
				^{nat} La(d,x)	Chem.

* RIs produced with the gas-jet system.

Nuclides	Z	T _{1/2}	Accel.	Reactions	Research fields
¹⁴¹ Ce	58	32.501 d	AVF	^{nat} Ba(α,x)	Chem., Med.
^{141m} Nd ⁺	60	62.0 s	AVF	¹⁴¹ Pr(d,2n)	Chem.
¹⁴³ Pm	61	265 d	AVF	¹⁴¹ Pr(α,x)	Chem.
¹⁴² Sm ⁺	62	66 s	AVF	¹⁴⁴ Sm(d,p,2n)	Chem.
^{143,144} Eu	63	2.63 min, 10.2 s	AVF	¹⁴⁴ Sm(d,xn)	Chem.
¹⁴⁶ Gd	64	48.27 d	AVF	¹⁴⁴ Sm(α,2n)	Chem.
¹⁴⁹ Eu	63	93.1d	AVF	^{nat} Sm(α,xn)	Chem.
¹⁵⁶ Tb	65	5.32 d	AVF	^{nat} Eu(α,xn)	Med., Ind.
^{162,163} Yb	70	18.87 min, 11.05 min	AVF	^{nat} Gd(¹² C,xn)	Phys.
^{163,164} W	74	2.75 s, 6.0 s	RILAC	¹⁴⁴ Sm(²⁴ Mg,xn)	Chem.
¹⁶⁵ Er	68	10.36 h	AVF	¹⁶⁵ Ho(d,2n)	Med.
¹⁶⁸ Yb	70	32.018 d	AVF	¹⁶⁹ Tm(d,2n)	Ind.
¹⁶⁸ Hf ⁺	72	3.24 min	AVF/RILAC	^{nat} Gd(¹⁸ O,xn)	Chem.
¹⁷⁰ Ta ⁺	73	6.76 min	AVF/RILAC	^{nat} Gd(¹⁹ F,xn)	Chem.
¹⁷⁵ Re	75	9.2 s	RILAC	¹⁵² Gd(²² Na,5n)	Chem.
¹⁷¹ Hf ⁺	72	23.6 h	AVF	^{nat} Yb(α,xn)	Chem.
¹⁷¹ W ⁺	74	7.6 min	AVF/RILAC	^{nat} Gd(²² Ne,xn)	Chem.
¹⁷⁴ Re ⁺	75	2.40 min	RILAC	^{nat} Gd(²³ Na,xn)	Chem.
¹⁷⁵ Hf	72	70 d	AVF	^{nat} Lu(p,xn)	Chem., Environ. sci.
^{177,178a,179} Ta	73	56.56 h, 2.36 h, 1.82 y	AVF	^{nat} Lu(d,xn)	Chem., Environ. sci.
¹⁷⁷ W ⁺	74	135 min	AVF	^{nat} Hf(p,xn)	Chem.
^{178a} Ta ⁺	73	2.36 h	AVF	^{nat} Hf(d,xn)	Chem.
^{179m} W ⁺	74	6.40 min	AVF	^{nat} Hf(α,xn)	Chem.
¹⁸⁰ Re ⁺	75	2.44 min	AVF	^{nat} Hf(d,xn)	Chem.
¹⁸¹ W	74	121.2 d	AVF	^{nat} Ta(d,xn)	Chem.
¹⁸¹ Re ⁺	75	19.9 h	AVF	^{nat} Ta(α,xn)	Chem.
¹⁸² Ta	73	114.43 d	AVF	^{nat} Ta(p,xn)	Chem.
^{182a,183,184m,184g} Re	75	12.7 h, 70.0 d, 169 d, 38.0 d	AVF	^{nat} Ta(d,xn)	Chem.
¹⁸³ Re	75	70.0 d	AVF	¹⁸⁶ Re	Chem.
¹⁸⁵ Os	76	93.6 d	AVF	¹⁸⁶ W(p,n)	Med., Ind.
¹⁸⁶ Re	75	90.64 h	AVF	¹⁸⁶ W(d,2n)	Med.
^{188,189,191} Pt	78	10.2 d, 10.87 h, 2.802 d	AVF	^{nat} Os(α,xn)	Phys.
^{195,196} Au	79	186.01 d/6.1669 d	AVF	^{nat} Ir(d,xn)	Med., Ind.
²⁰³ Pb	82	51.873 h	AVF	^{nat} Ir(α,xn)	Med.
²⁰⁶ Bi	83	6.243 d	AVF	^{nat} Pt(d,xn)	Pharm. sci., Med.
²⁰⁶ Fr ⁺	87	15.9 s	RILAC	^{nat} Pb(p,xn)	Chem.
²⁰⁷ Fr ⁺	87	50.0 s	RILAC	^{nat} Pb(d,xn)	Phys.
²¹¹ At	85	7.214 h	AVF/RRC	¹⁶⁹ Tm(⁴⁰ Ar,3n)	Phys.
²¹² Fr ⁺	87	20.0 min	AVF	¹⁹⁷ Au(¹⁸ O,6n)	Pharm. sci., Med.
²¹⁴ Ac ⁺	89	8.2 s	RILAC	²⁰⁵ Bi(α,2n)	Chem.
²²⁵ Ac	89	10.0 d	RRC	^{206,207,208,209} Pb(¹¹ B,x)	Phys.
²²⁹ Pa	91	1.50 d	AVF	¹⁹⁷ Au(²² Ne,5n)	Chem., Med.
²³⁰ Pa	91	17.4 d	AVF	²²⁶ Ra(p,2n)	Chem.
²³⁰ Np	93	1.54×10 ⁵ y	AVF	²³² Th(¹⁴ N,xnyp)	Chem.
²⁴⁵ Fm ⁺	100	4.2 s	RILAC	²³² Th(d,4n)	Environ. sci.
²⁵⁰ No ⁺	102	3.1 min	AVF/RILAC	²³² Th(¹⁴ N,3n)	Phys.
²⁵⁶ Lr ⁺	103	22 s	RILAC	²³⁸ U(¹⁶ O,5n)	Phys., Chem.
²⁵⁷ Lr ⁺	103	0.646 s	AVF	²⁴⁰ Bi(¹⁸ Ca,2n)	Phys.
²⁵⁹ Lr ⁺	103	6.3 s	AVF	²⁴⁸ Cm(¹⁴ N,5n)	Phys.
^{261a,b} Rf	104	68, 1.9 s	AVF/RILAC	²⁴⁸ Cm(¹⁵ N,4n)	Phys., Chem.
²⁶³ Db ⁺	105	34 s	AVF/RILAC	²⁴⁸ Cm(¹⁸ O,5n)	Phys., Chem.
^{268a,b} Sg ⁺	106	8.5, 14.4 s	RILAC	²⁴⁸ Cm(¹⁹ F,5n)	Phys., Chem.
²⁶⁹ Bh	107	10.0 s	RILAC	²⁴⁸ Cm(²² Ne,5n)	Phys.
Multitracer	<22		RRC	²⁴⁸ Cm(²³ Na,5n)	Chem., Biol., Med., Pharm. sci., Ind., Environ. sci.
Multitracer	<29		RRC	^{nat} Ti(¹⁴ N,xnyp)	
Multitracer	<47		RRC	^{nat} Cu(¹⁴ N,xnyp)	
Multitracer	<72		RRC	^{nat} Ag(¹⁴ N,xnyp)	
Multitracer	<73		RRC	^{nat} Hf(¹⁴ N,xnyp)	
Multitracer	<79		RRC	^{nat} Ta(¹⁴ N,xnyp)	
Multitracer	<83		RRC	¹⁹⁷ Au(¹⁴ N,xnyp)	
Multitracer	<90		RRC	²⁰⁸ Bi(¹⁴ N,xnyp)	
				²³² Th(¹⁴ N,xnyp)	

理研RIBFが製造する応用研究用RI

Nuclides	Z	T _{1/2}	Accel.	Reactions	Research fields
⁷ Be	4	53.29 d	AVF	^{nat} Li(p,xn)	Ind.
²⁴ Na	11	14.9590 h	AVF	^{nat} Li(d,xn)	Ind., Med.
²⁸ Mg	12	20.9146 h	AVF	^{nat} Mg(d,x)	Chem.
⁴² K	19	12.36 h	AVF	^{nat} K(p,xn)	Chem.
⁴⁴ Ti	22	62.01 d	AVF	^{nat} Ti(p,xn)	Chem.
⁴⁸ V	23	8.0053 h	AVF	^{nat} V(p,xn)	Chem.
⁴⁸ Cr	24	21.6 h	AVF	^{nat} Cr(p,xn)	Chem.
⁵² Cr	24	27.7 d	AVF	^{nat} Cr(p,xn)	Chem.
⁵⁶ Fe	26	2.754 y	AVF	^{nat} Fe(p,xn)	Chem.
⁶⁰ Co	27	5.2714 y	AVF	^{nat} Co(p,xn)	Chem.
⁶⁴ Zn	30	48.14 d	AVF	^{nat} Zn(p,xn)	Chem.
⁶⁶ Zn	30	4.926 y	AVF	^{nat} Zn(p,xn)	Chem.
⁶⁷ Cu	29	61.83 h	AVF	^{nat} Cu(p,xn)	Chem., Environ. sci.
^{69m} Zr	40	77.01 d	AVF	^{nat} Zr(p,xn)	Chem., Environ. sci.
⁷⁴ As	33	17.77 d	AVF	^{nat} As(p,xn)	Chem.
⁷⁵ Se	34	119.779 d	AVF	^{nat} Se(p,xn)	Chem.
⁸⁵ Sr	38	64.84 d	AVF	^{nat} Sr(p,xn)	Chem.
⁸⁹ Zr	40	78.41 h	AVF	^{nat} Zr(p,xn)	Chem.
⁸⁶ Y	39	14.747 h	AVF	^{nat} Y(p,xn)	Chem.
⁸⁸ Zr	40	83.41 d	AVF	^{nat} Zr(p,xn)	Chem.
^{89m} Zr	40	77.01 d	AVF	^{nat} Zr(p,xn)	Chem.
^{88m} Nb	41	8.015 h	AVF	^{nat} Nb(p,xn)	Chem.
^{90m} Nb	41	90.00 d	AVF	^{nat} Nb(p,xn)	Chem.
⁹⁰ Mo	42	5.56 y	AVF	^{nat} Mo(p,xn)	Chem.
^{92m} Ni	41	6.08 s	AVF	^{nat} Ni(p,xn)	Chem.
⁹² Tc	43	4.386 d	AVF	^{nat} Tc(p,xn)	Chem.
⁹⁴ Tc	43	24.1 d	AVF	^{nat} Tc(p,xn)	Chem.
^{95m} Tc	43	6.01 h	AVF	^{nat} Tc(p,xn)	Chem.
⁹⁹ Mo	42	66.04 h	AVF	^{nat} Mo(p,xn)	Chem.
⁹⁹ Rh	45	10.47 y	AVF	^{nat} Rh(p,xn)	Chem.
¹⁰³ Pd	46	17.0 d	AVF	^{nat} Pd(p,xn)	Chem.
^{109m} Pd	46	4.47 s	AVF	^{nat} Pd(p,xn)	Chem.
^{104m} Ag	47	1.4 s	AVF	^{nat} Ag(p,xn)	Chem.
¹¹¹ Ag	47	7.46 d	AVF	^{nat} Ag(p,xn)	Chem.
¹⁰⁹ Cd	48	1.26 y	AVF	^{nat} Cd(p,xn)	Chem.
¹²⁴ Sb	51	60.28 d	AVF	^{nat} Sb(p,xn)	Chem.
^{121m} Te	52	2.14 s	AVF	^{nat} Te(p,xn)	Chem.
¹¹⁸ Te	52	2.12 s	AVF	^{nat} Te(p,xn)	Chem.
¹²⁴ I	53	4.18 y	AVF	^{nat} I(p,xn)	Chem.
¹³³ Ba	56	3.9 y	AVF	^{nat} Ba(p,xn)	Chem.
^{135m} Ba	56	28.7 h	AVF	^{nat} Ba(p,xn)	Chem.
¹³⁵ La	57	19.4 h	AVF	^{nat} La(p,xn)	Chem.
¹³⁹ Ce	58	137.64 d	AVF	^{nat} Ce(p,xn)	Chem.

Nuclides	Z	T _{1/2}	Accel.	Reactions	Research fields
¹⁴¹ Ce	58	32.501 d	AVF	^{nat} Ba(α,x)	Chem., Med.
^{141m} Nd	60	62.0 s	AVF	^{nat} Pr(d,2n)	Chem.
¹⁴³ Pm	61	265 d	AVF	^{nat} Pr(α,x)	Chem.
¹⁴³ Pr	60	320.11 d	AVF	^{nat} Pr(α,x)	Chem.
¹⁴⁷ Sm	62	1.06 y	AVF	^{nat} Sm(p,xn)	Chem.
¹⁴⁷ Eu	63	4.81 y	AVF	^{nat} Eu(p,xn)	Chem.
¹⁵¹ Eu	63	5.2 y	AVF	^{nat} Eu(p,xn)	Chem.
¹⁵³ Eu	63	4.81 y	AVF	^{nat} Eu(p,xn)	Chem.
¹⁵⁵ Eu	63	4.81 y	AVF	^{nat} Eu(p,xn)	Chem.
¹⁵⁷ Eu	63	4.81 y	AVF	^{nat} Eu(p,xn)	Chem.
¹⁵⁹ Eu	63	4.81 y	AVF	^{nat} Eu(p,xn)	Chem.

理研RIによる社会貢献

MTA（研究成果有体物を提供）



公益社団法人

日本アイソトープ協会

Japan Radioisotope Association



FY2007 – FY2024

RIIs	Orders	Users	Activity (MBq)
⁶⁵ Zn	120	32	634.9
⁶⁷ Cu	2	1	15
⁸⁵ Sr	25	12	86.2
⁸⁸ Y	16	3	14.13
¹⁰⁹ Cd	40	17	225.15
¹³⁹ Ce	0	0	0
Total	203	65	975.38



大阪大学

OSAKA UNIVERSITY



東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO

²¹¹At

FY	Orders	Activity (MBq)
2019	12	2,400
2020	16	3,200
2021	16	4,600
2022	18	6,550
2023	15	7,400
2024	15	7,100
Total	92	31,250

短寿命RI供給プラットフォーム

平成28年度「新学術領域研究（研究領域提案型）」
「学術研究支援基盤形成」リソース支援プログラム

共同利用・共同研究システム形成事業
学術領域展開ハブ形成プログラム

短寿命RI
供給プラットフォーム

RIIP
RIコラボラティブ
学際領域展開
プラットフォーム

QST
高崎研

QST
量医研

阪大RCNP

理研RIBF

東北大RARIS
青葉山・三神峯

FY2016 – FY2024 from RIBF

RIIs	Orders	Users	Activity (MBq)
⁷ Be	2	2	2.85
²⁸ Mg	7	4	8
^{44m} Sc	7	4	30
⁶⁷ Cu	7	5	290
⁸⁶ Y	2	1	5
⁸⁸ Zr	20	15	29
⁸⁹ Zr	2	1	20
⁹⁵ Nb	13	8	21
¹⁰³ Pd	1	1	20
¹¹¹ Ag	5	3	2.72
^{121m} Te	5	4	10
¹²⁴ Sb	2	2	4
¹⁴¹ Ce	6	2	1.242
¹⁷⁵ Hf	15	11	20
¹⁷⁹ Ta	8	6	8.5
¹⁸¹ W	1	1	1
²¹¹ At	146	30	8,333
Total	249	100	8,806

6

2. アスタチン-211の 製造技術開発と供給

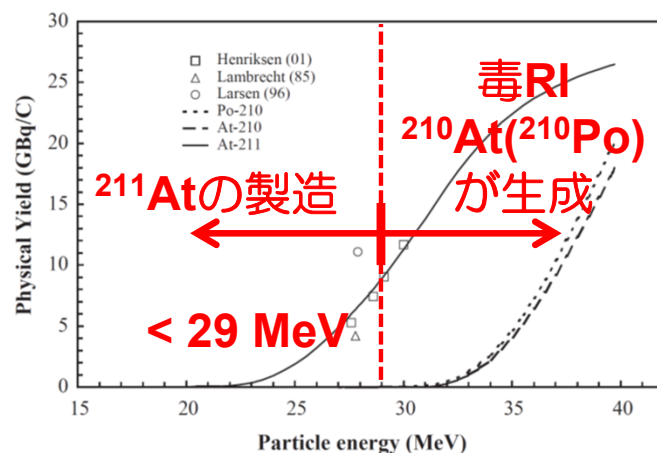
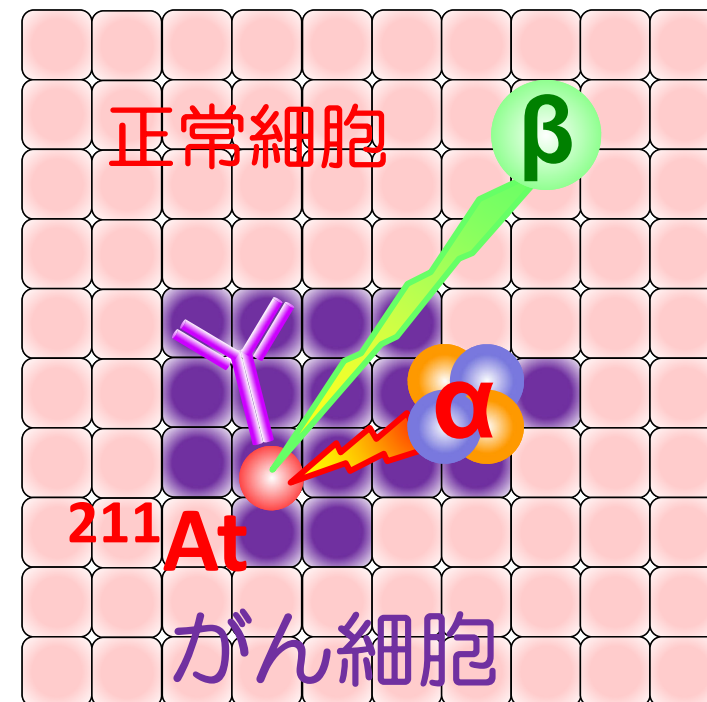
アスタチン-211 (^{211}At)

- α 粒子は飛程が短く、高い線エネルギー付与

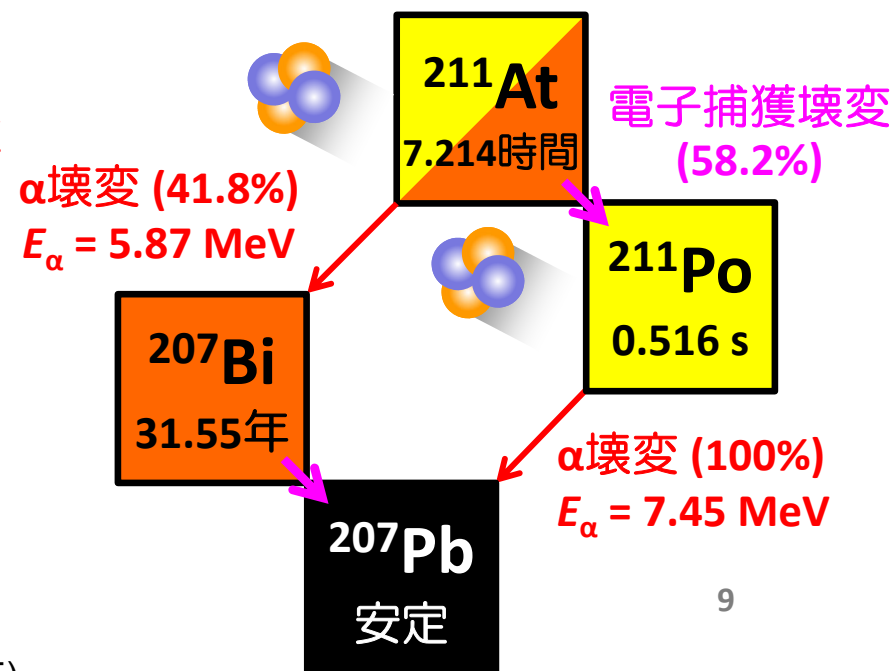
粒子	エネルギー (MeV)	組織内飛程 (μm)	線エネルギー付与 (keV/ μm)
α	5~9	40~100	80
β	0.05~2.3	50~12,000	0.2

鷺山幸信, Drug Deliv. Syst. **35**, 102 (2020).

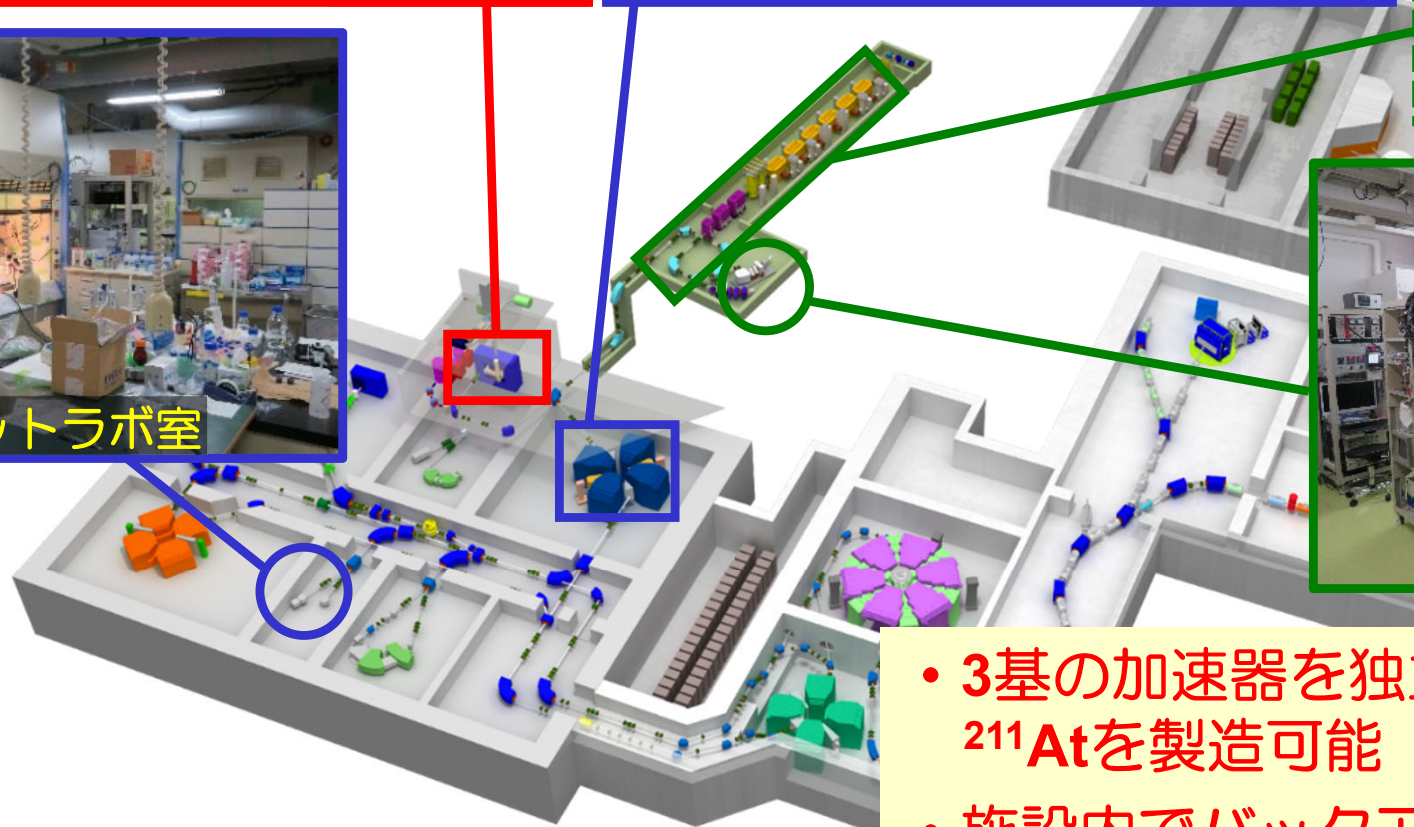
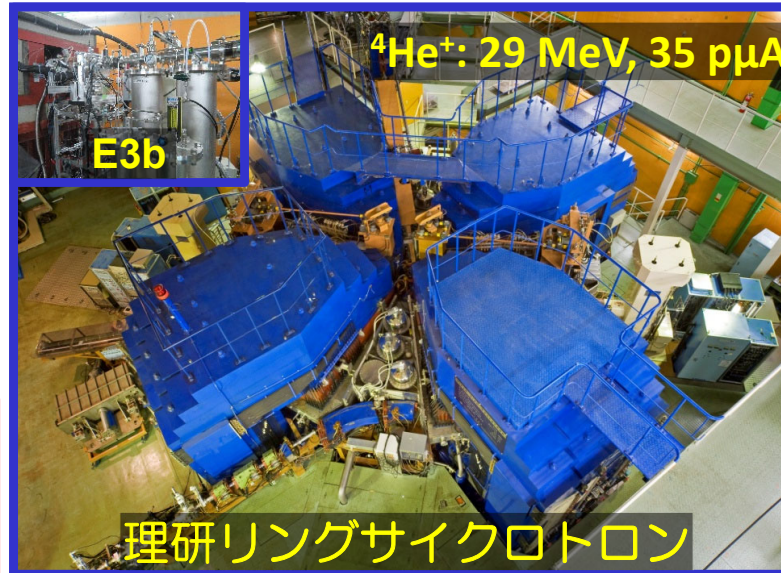
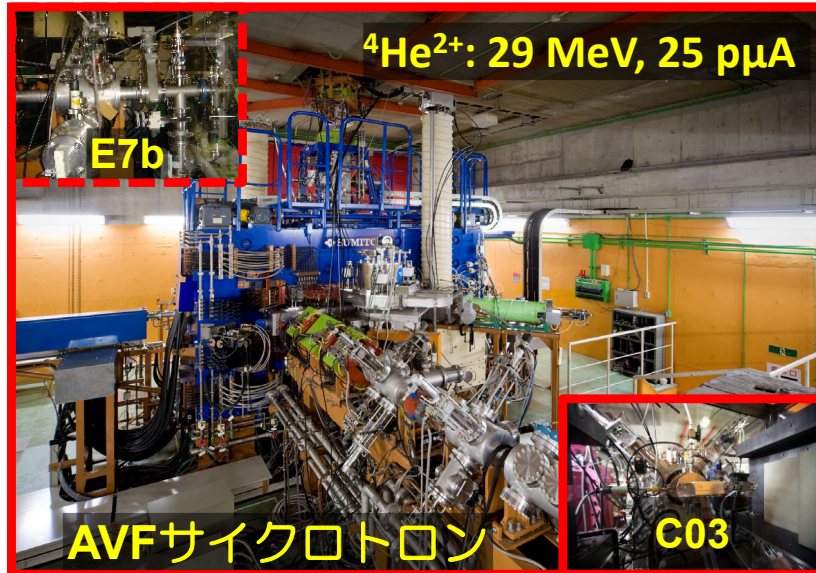
- 高い細胞毒性, 正常細胞への影響が低い
- 播種性のがん, 血液由来のがん, 微小転移がん, 手術後の部位に残存する微小がんの治療に期待
- ガンマ線放出が少ない $\rightarrow$ 外来治療が可能
- 加速器を用いて製造可能: $^{209}\text{Bi}(\alpha, 2n)^{211}\text{At}$
- 短寿命のため複数拠点での供給体制が重要



A. Hermanne et al., Appl. Radiat. Isot. **63**, 1 (2005).

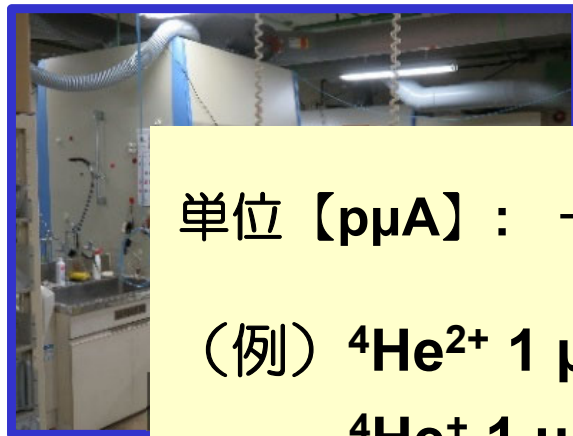
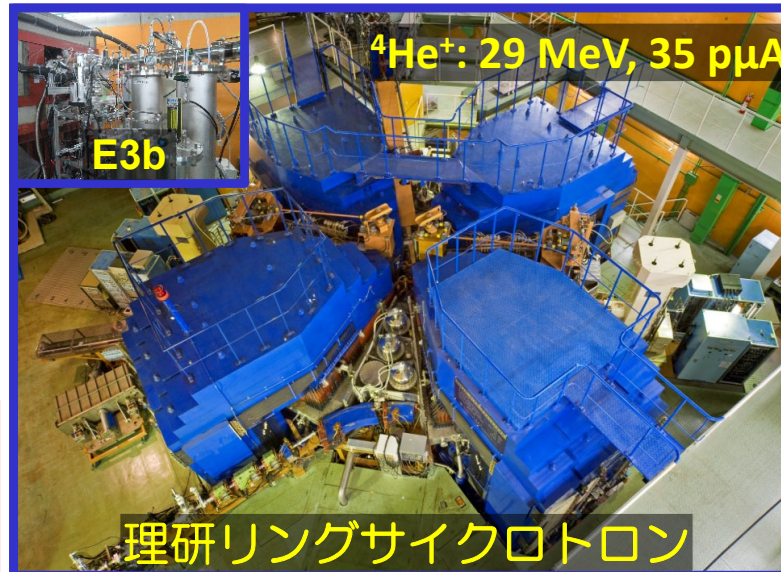
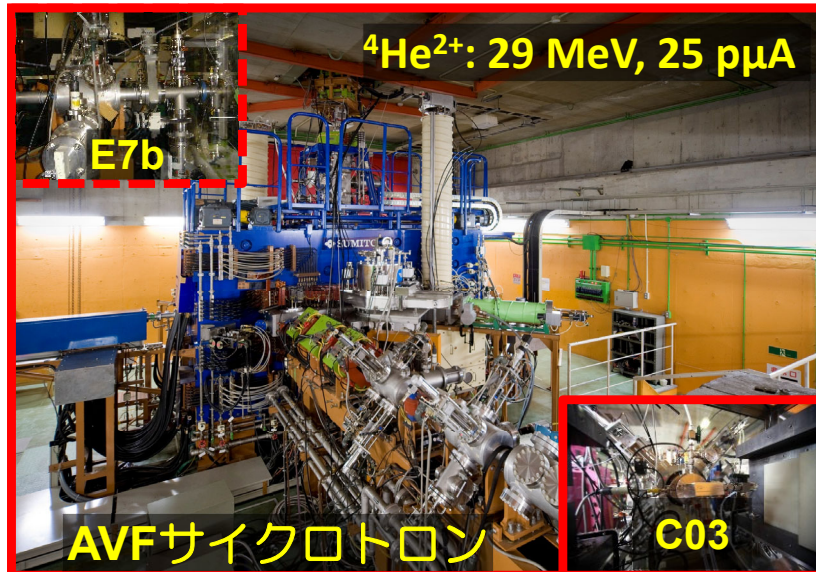


理研RIBFにおけるアスタチン-211の製造技術開発



- 3基の加速器を独立に運転して ^{211}At を製造可能
- 施設内でバックアップ体制を確保

理研RIBFにおけるアスタチン-211の製造技術開発



単位【pμA】： $\frac{\text{電流値}}{\text{価数}}$

(例) $^4\text{He}^{2+}$ 1 μA = 0.5 pμA
 $^4\text{He}^{+}$ 1 μA = 1 pμA

1 pμA = 6.2×10^{12} 粒子/s

- 3基の加速器を独立に運転して ^{211}At を製造可能
- 施設内でバックアップ体制を確保

世界の²¹¹At製造施設

Location	Facility	Accelerator		Beam		Yield (GBq/h)
				(MeV)	(pμA)	
North America	Duke Univ. Med. Ctr., Durham, USA	CS-30	Int.	28	50	max. 9.3/4
	Univ. Washington Med. Ctr., Seattle, USA	MP-50	Ext.	29.0	29	max. 4.3/4
	Univ. Philadelphia, USA	BC3015	Ext.	28.4	5	max. 0.395/5
	NIH, Bethesda, USA	CS-30	Int.	29.8	21.5	max. 1.71/1
	Texas A&M Univ., USA	K150 VEC		28.8	3.5	1.5/9
Europe	Copenhagen Univ., Denmark	MC-32	Int.	29	10	max. 3–4/4
	Arronax, Nantes, France	Cyclone 70		28	7.5	0.5–1
Asia	RCNP, Osaka Univ., Japan	K140 AVF	Ext.	28.2		3 (expected)
	QST, Takasaki, Japan	K110 AVF	Ext.	28.1	2.25	0.3/3
	QST, Chiba, Japan	AVF-930	Ext.	28.5	5–6.5	0.74–1.11/5
	RIBF, RIKEN, Wako, Japan	K70 AVF	Ext.	28	25*	1/1
		RRC*	Ext.*	28*	35*	1.4/1
	Fukushima Med. Univ., Japan	CYPRIS MP-30	Ext.	29	10	max. 2/4
	Sichuan Univ., China	CS-30		28	7.5–10	max. 0.2/2

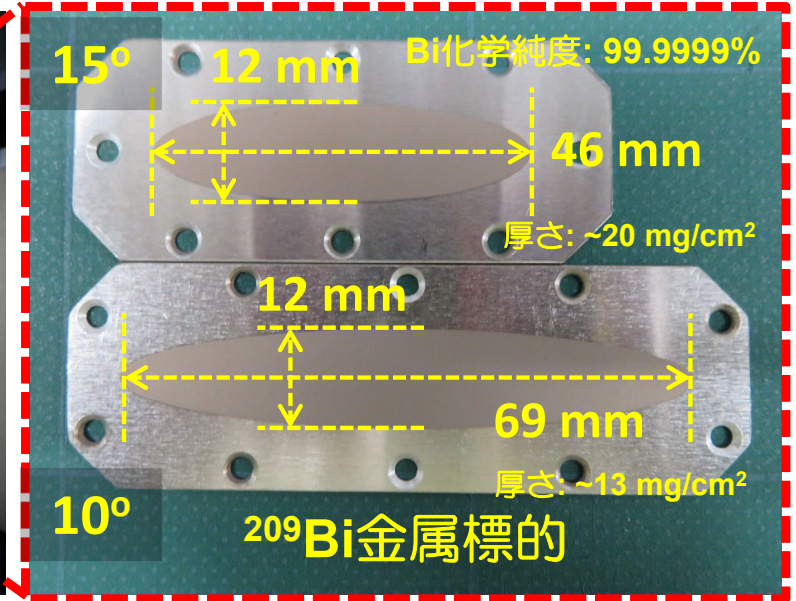
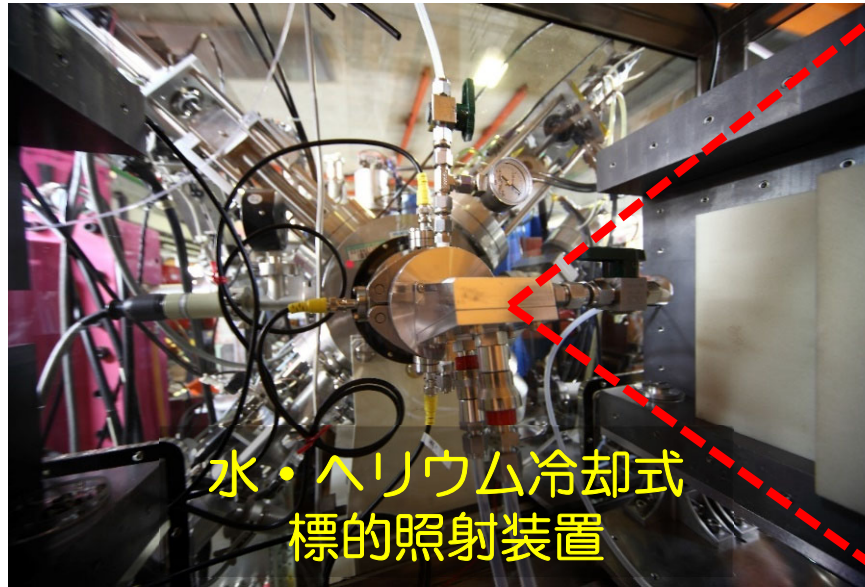
Y. Feng and M.R. Zalutsky, Nucl. Med. Biol. **100–101**, 12 (2021). *: Updated on Aug. 4, 2025 (H. Haba)

2.1. AVFサイクロトロン

AVFサイクロトロンを用いた ^{211}At の製造技術開発 (FY2015~)

理研AVFサイクロトロンを用いて、 $25\text{ }\mu\text{A}$ の $^4\text{He}^{2+}$ ビームによる ^{211}At 製造

➡ 1時間の照射で $\sim 1.2\text{ GBq}$ (照射直後) の ^{211}At を製造



29-MeV $^4\text{He}^{2+}$ ビーム
(25 μA)

Be真空窓
(15 μm)

静電型ピックアップ

ビーム軸回転
($\Phi 3\text{ mm}$, 2 Hz)

T. Watanabe et al., Proc. of
PASJ12, 1198 (2015).

FY2022 阪大RCNPに技術移転

^{209}Bi 標的 (融点: 271°C)
Al板 (t1 mm)上に真空蒸着

冷却ヘリウム (30 L/min)

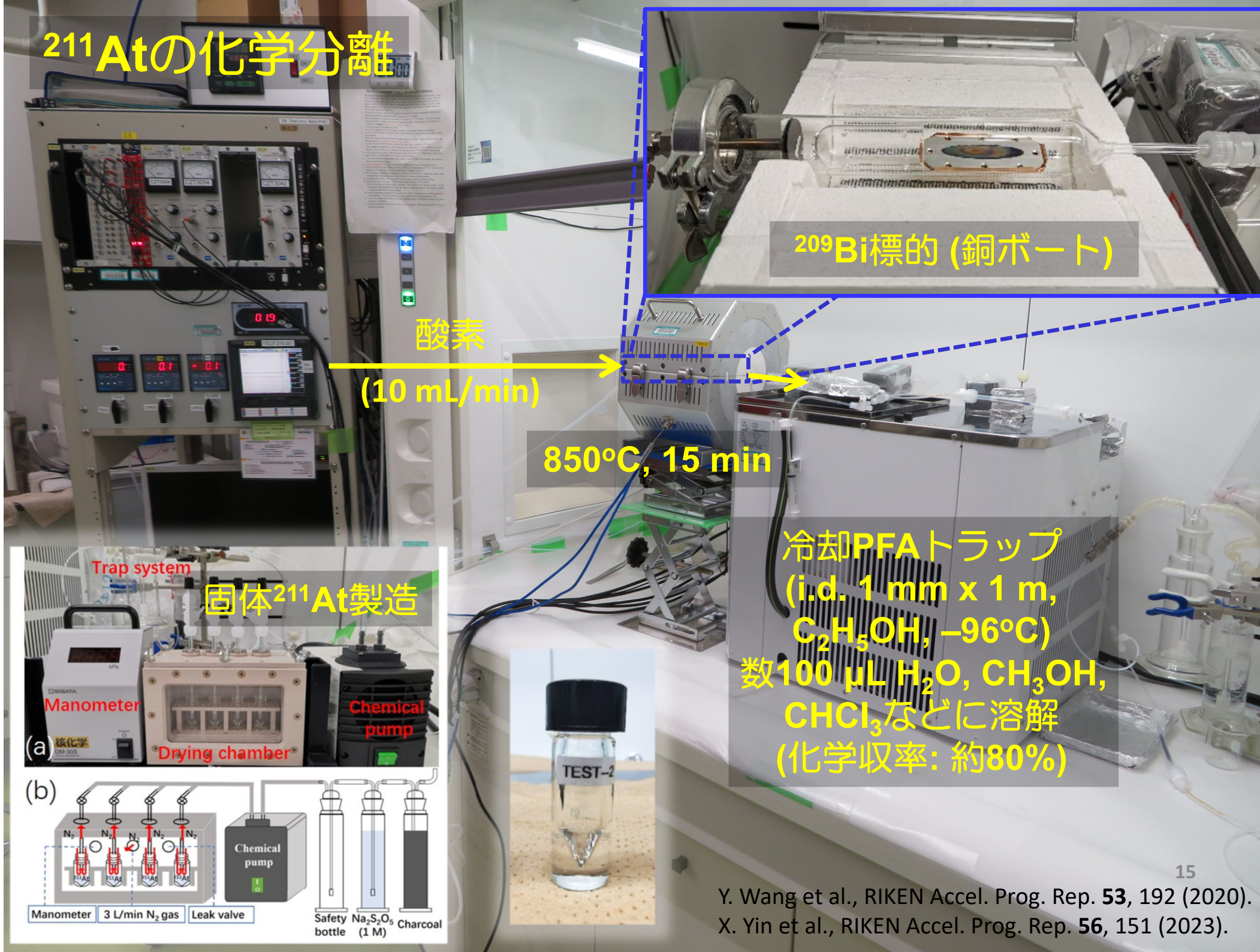
10° (15°)

0 50 [mm]

冷却水
(4 L/min)

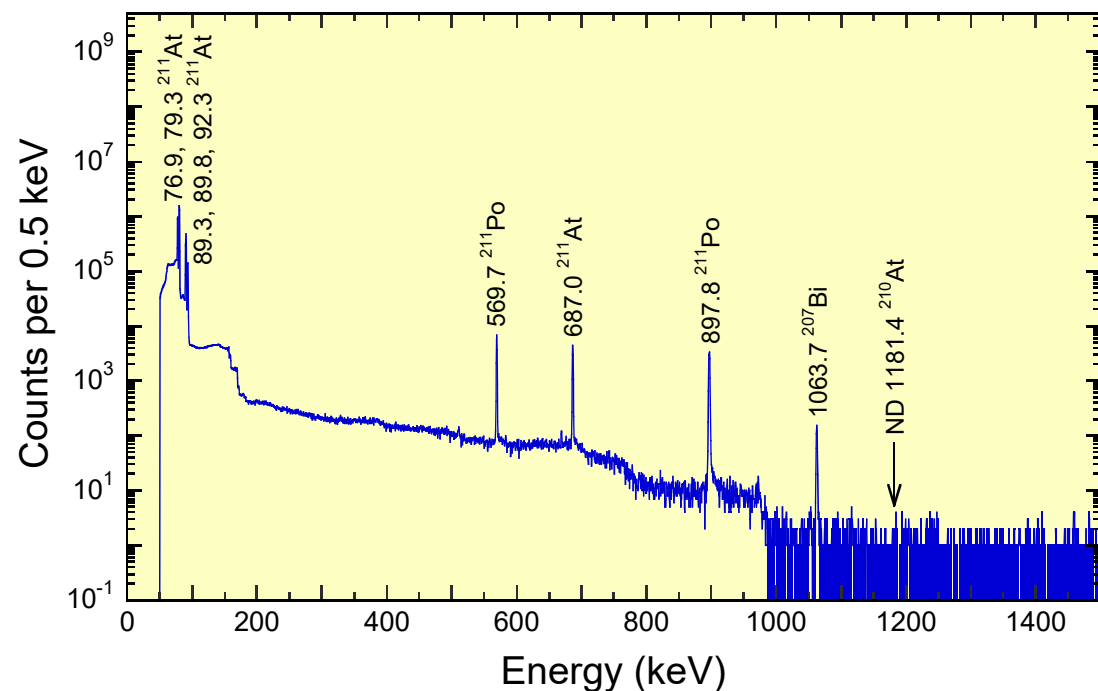
N. Sato et al., RIKEN Accel. Prog. Rep. **50**, 262 (2017). **10 μA**
Y. Wang et al., RIKEN Accel. Prog. Rep. **53**, 192 (2020). **16 μA**
X. Yin et al., RIKEN Accel. Prog. Rep. **56**, 151 (2023). **20 μA**
X. Yin et al., RIKEN Accel. Prog. Rep. **57**, 149 (2024). **25 μA**

^{211}At の化学分離

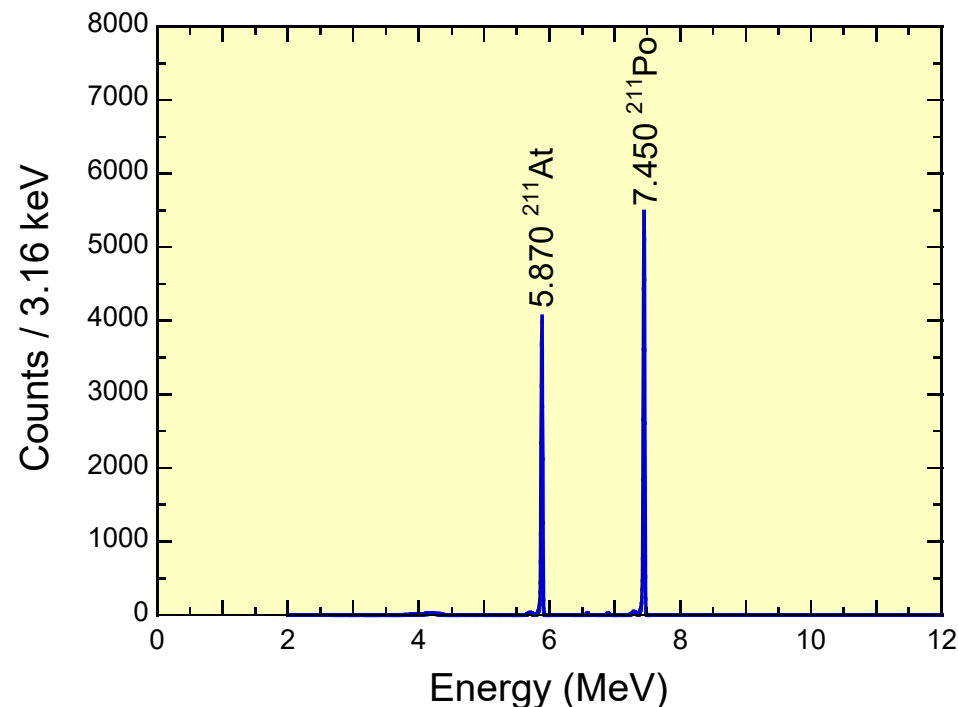


精製²¹¹Atの仕様

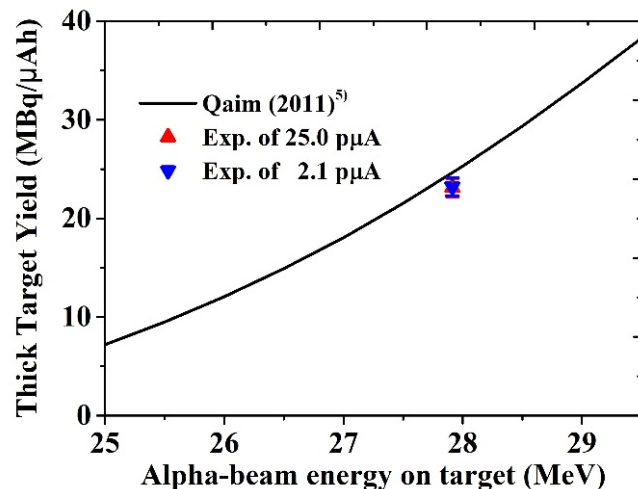
ガンマ線スペクトル



アルファ線スペクトル



²¹¹Atの生成収率



Qaim et al., IAEA Technical Report Series No.473, IAEA, Vienna, Austria (2011).

原子数比²¹⁰At/²¹¹At

参考文献	E_α (MeV)	²¹⁰ At/ ²¹¹ At (%)
Yin <i>et al.</i> (2025)	28.0	$<2 \times 10^{-3}$
Henriksen <i>et al.</i> (2001)	28.6	$<1.0 \times 10^{-2}$
Nagatsu <i>et al.</i> (2015)	28.5	$2.2 \times 10^{-3*}$

*5 h after EOB

X. Yin et al., RIKEN Accel. Prog. Rep. **57**, 149 (2024).

不純物元素¹⁾

元素 ²⁾	重量 [ng]
Cu	13
Mg	13
Al	59
Fe	12
Zn	22
Bi ³⁾	1.5
Pb	8.9

1) ICP-MSで測定

2) >1 ng重量で定量された元素

3) D.F. (Bi): $>1 \times 10^7$

理研²¹¹Atの供給

国内25グループに供給実績

2024年度：57回（10グループ）



MTA (2022~)



東京大学

- ・大学院工学系研究科
- ・アイソトープ総合センター
- ・医学部附属病院
- ・埼玉医科大学

金沢大学

理工学域物質化学類

MTA (2019~)



- ・放射線科学基盤機構
- ・大学院理学研究科
- ・医学部附属病院

渡部直史先生ら, 医師主導治験

[²¹¹At]NaAt (2021–2024)

[²¹¹At]PSMA5 (2024–)

量研機構
(高崎)

RIBF

近畿大学原子力研究所

理研神戸

- ・健康・病態科学研究チーム

平成28年度「新学術領域研究（研究領域提案型）」
『学術研究支援基盤形成』リソース支援プログラム

短寿命RI

供給プラットフォーム

2016年度～

共同利用・共同研究システム形成事業
学際領域展開ハブ形成プログラム

RIIP

RIコラボラティブ
学際領域展開
プラットフォーム

2023年度～

P-PROMOTE

AMED 次世代がん医療加速化研究事業

先進的技術支援と効率的推進マネジメント
薬物動態イメージング・DDS化のための
技術支援（2023年度～）

国立がん研究センター

東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構

日本アイソトープ協会

千葉大学大学院薬学研究院

理研和光

- ・田中生体機能合成化学研究室
- ・低速RIビーム生成装置開発チーム
- ・安全業務室
- ・健康・病態科学研究チーム
- ・非天然型アミノ酸技術研究チーム

長崎大学生命医科学域

東京大学大学院薬学系研究科

東北大学RARIS青葉山事業所

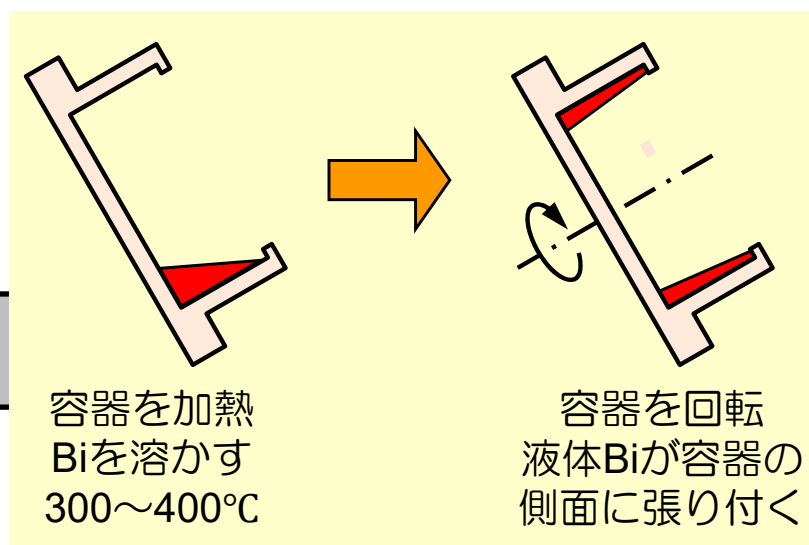
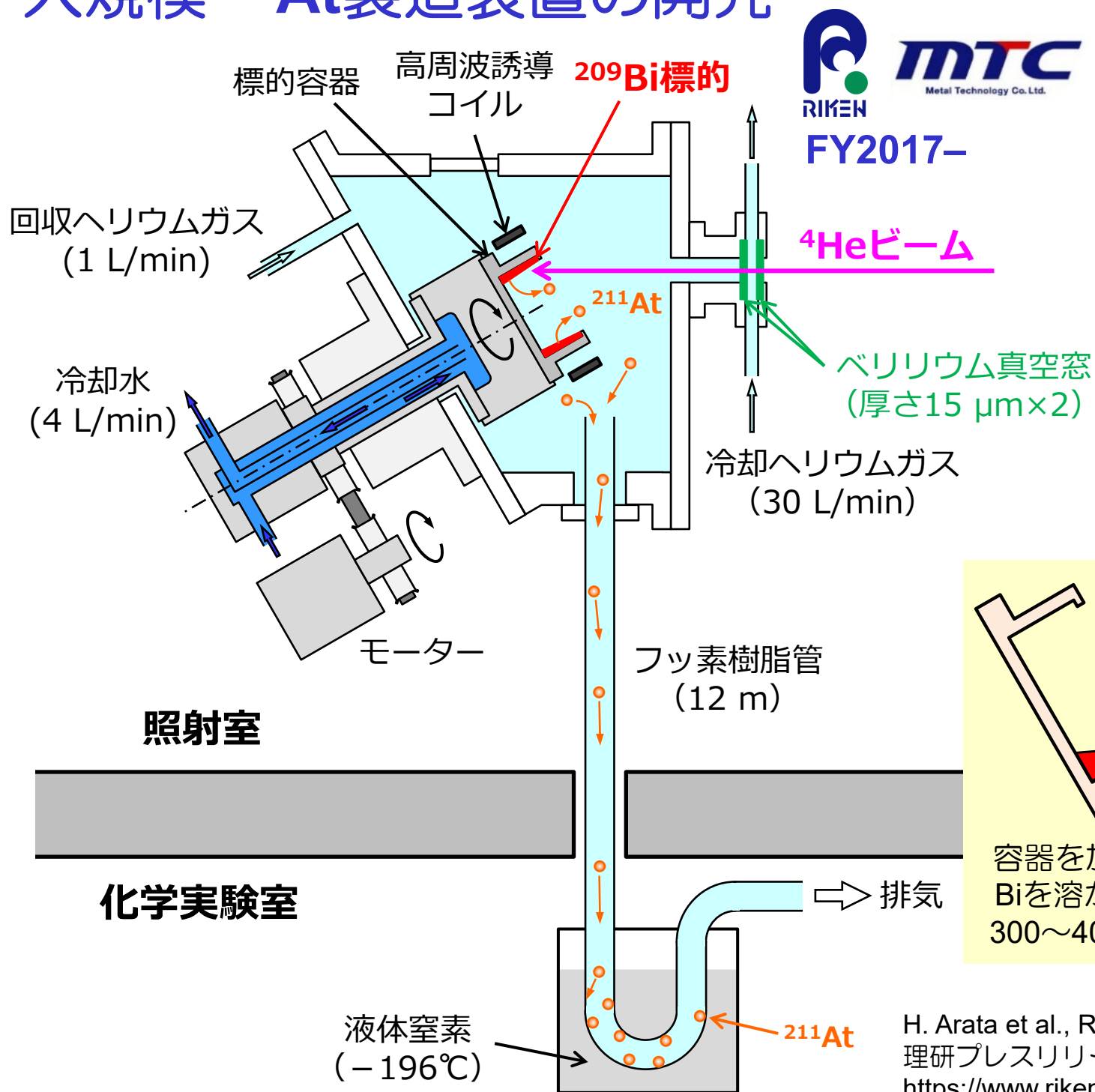
星薬科大学薬学部

PDRファーマ

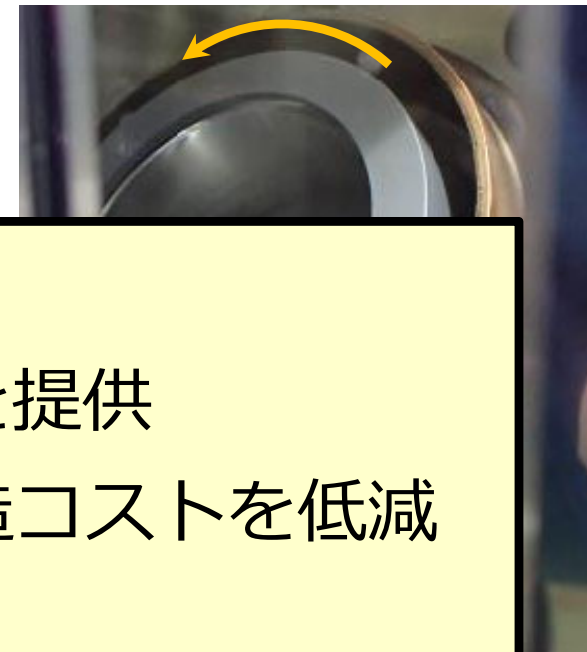
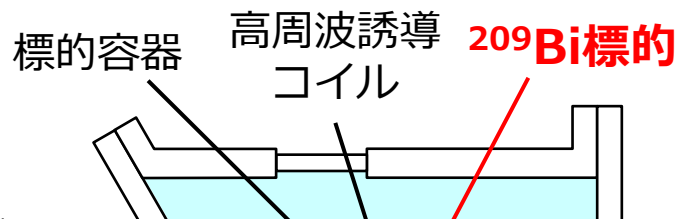
金属技研株式会社

2.2. 理研リングサイクロトロン

大規模 ^{211}At 製造装置の開発



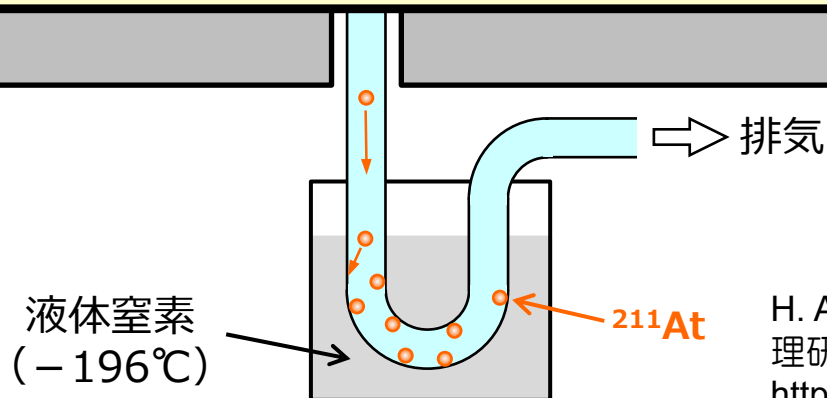
大規模 ^{211}At 製造装置の開発



製造効率増大の利点

1. より多くの利用者に、より多くの ^{211}At を提供
2. 加速器の運転時間を短縮し、 ^{211}At の製造コストを低減
➡ ^{211}At 薬剤の開発費や薬価の低減化
3. ^{211}At 原料の純度が高まり、薬剤の合成効率の向上や高品質化が期待
4. より遠隔地において ^{211}At を利用可能

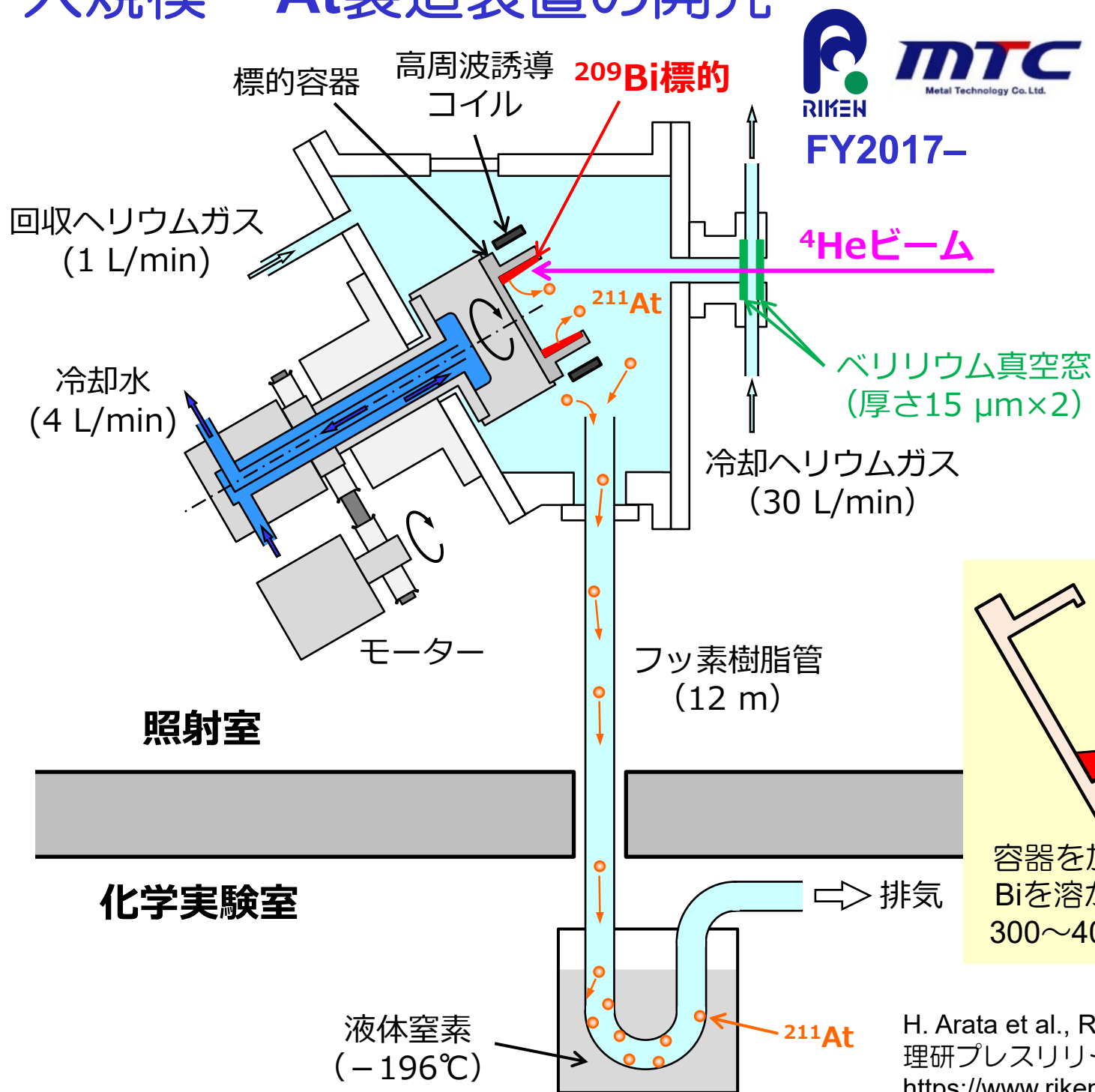
化学実験室



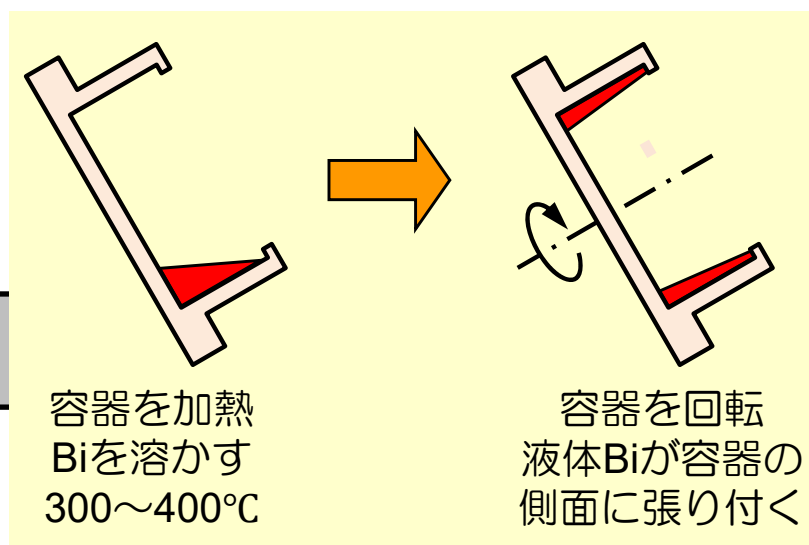
容器を加熱
 Bi を溶かす
 $300\sim 400^{\circ}\text{C}$

容器を回転
液体 Bi が容器の
側面に張り付く

大規模 ^{211}At 製造装置の開発



RIKEN
MTC
Metal Technology Co. Ltd.
FY2017-



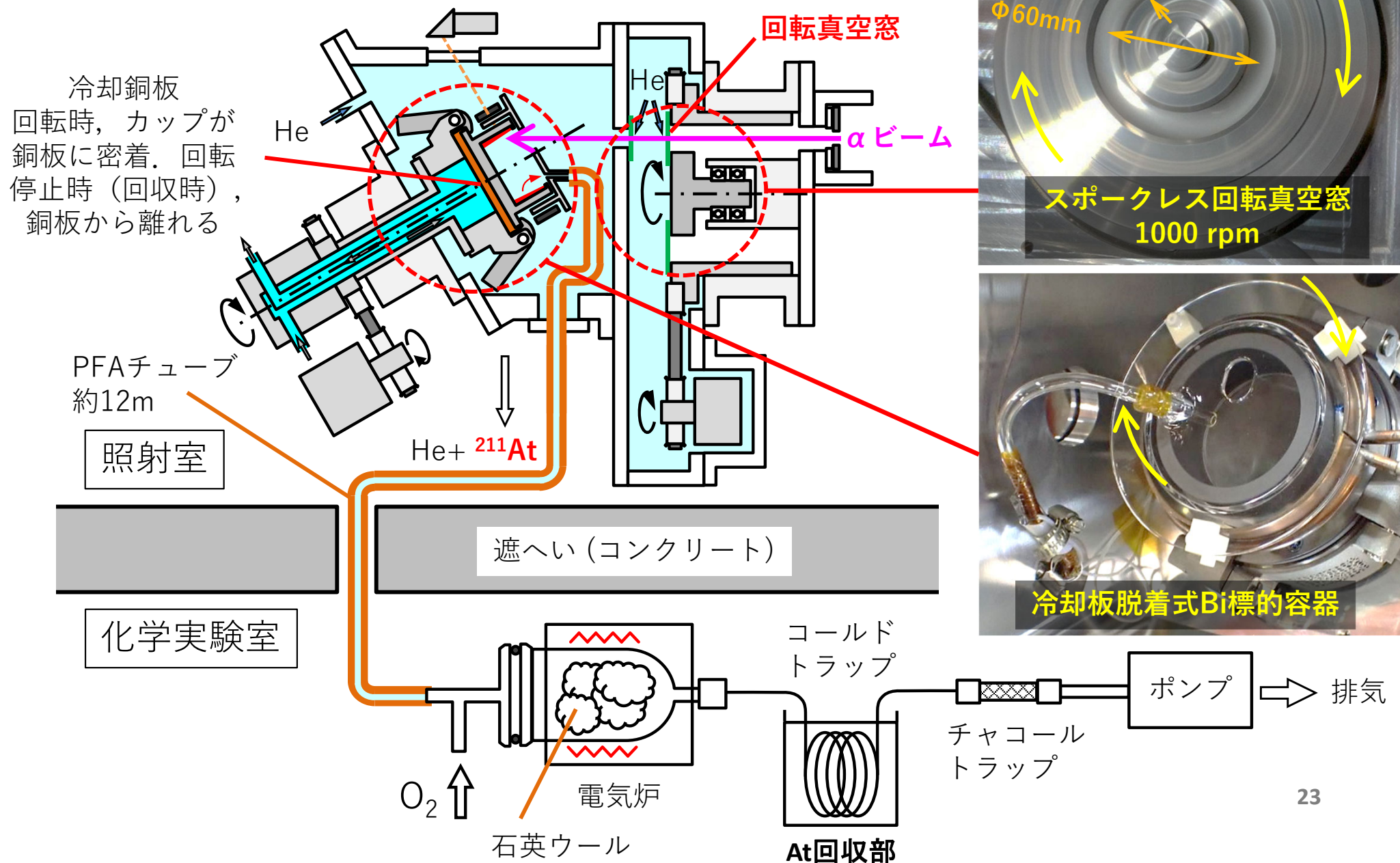
本装置の特徴

1. 標的容器を高速で回転させることにより、熱負荷を分散
2. ビーム照射によってBi標的が融けても遠心力によって標的の形状を維持させ、確実にビームを標的に命中させて安定的かつ大量に ^{211}At を製造
3. 高周波誘導加熱装置を用いて標的容器を昇温することにより、 ^{211}At を標的から化学分離し、ヘリウムの気流に乗せ、化学実験室まで運んで回収
4. 照射中または直後に化学分離し、 ^{211}At の放射壊変による損失を低減
5. Bi標的は容器内に置いたまま、繰り返して使用可能
6. 建設コストのかかる垂直ビームラインが不要

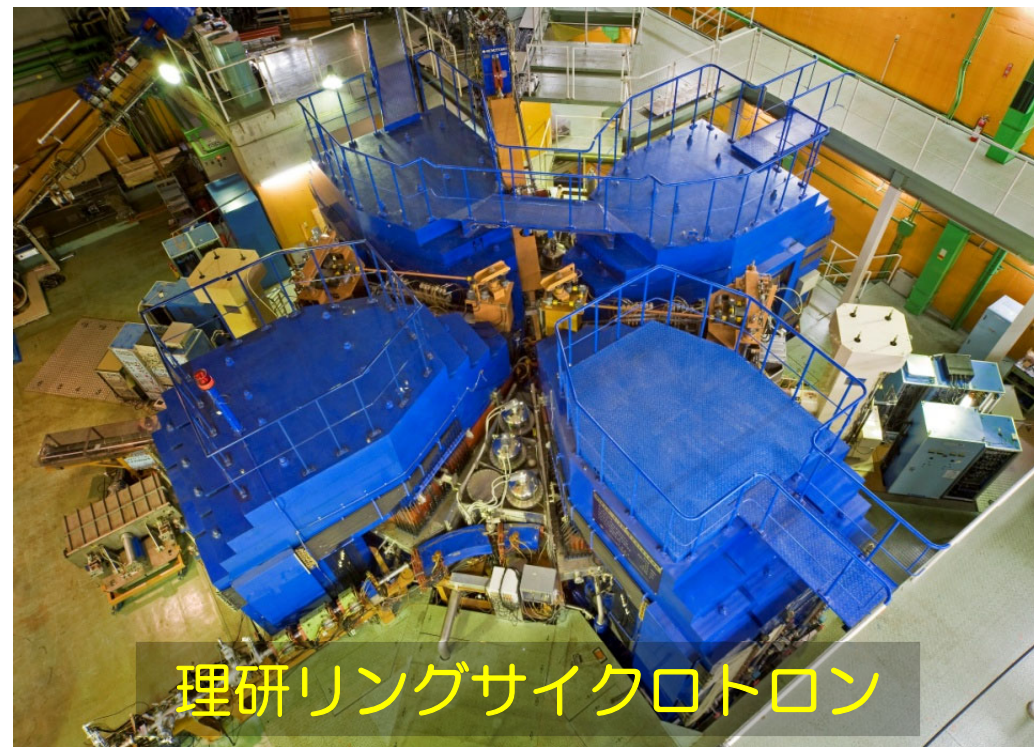


大規模 ^{211}At 製造装置の改良

- ・ スパークレス回転真空窓の開発
- ・ 冷却板脱着式Bi標的容器の開発



大規模 ^{211}At 製造装置の性能試験



- 28 MeV×35 pμAの $^4\text{He}^+$ ビーム照射（約1 kW）を実施（従来比：**+40%**）
※R7年9月，50 pμAでの試験を予定
- **650 MBq**の精製 ^{211}At を製造（照射時間2.7 h）
- 最大回収率: 約80%，安定化が課題

不純物元素

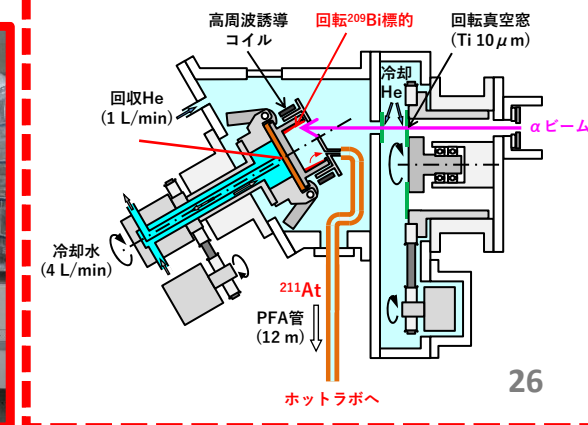
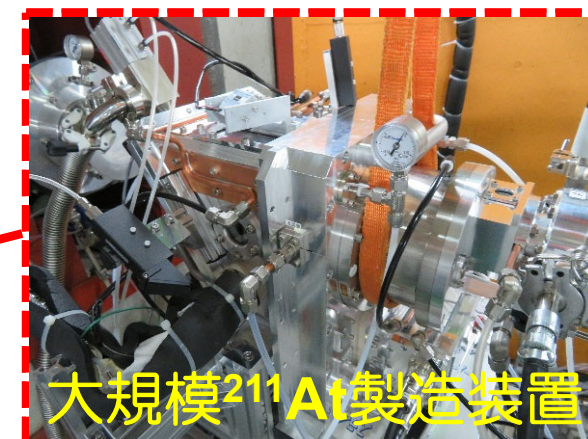
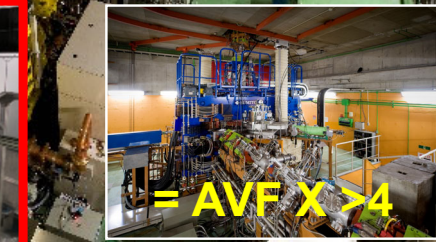
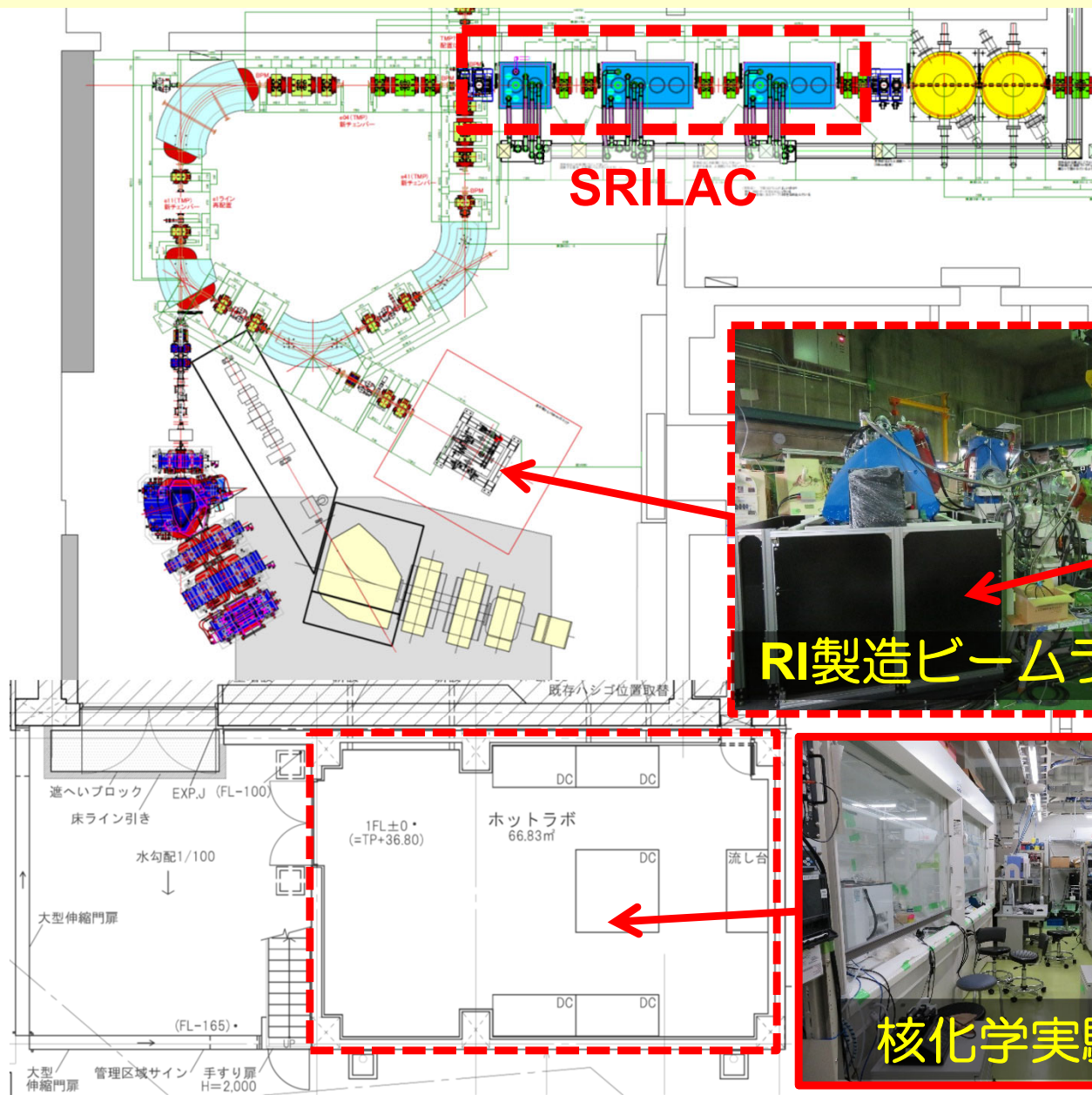
元素	1/バッチ当たりの重量 [ng]	
	固定式Bi標的	回転式Bi標的
Na	<1	41
Mg	13	<1
Al	59	33
Fe	12	2.1
Cu	13	<1
Zn	22	<1
Bi	1.5	<1
Pb	8.9	1.4

*>1 ng重量で定量された主な元素

2.3. 理研超伝導重イオン線形加速器

SRILACを用いた大規模 ^{211}At 製造を計画

- $>100\text{ ppA}$ の $^4\text{He}^{2+}$ ビームによる ^{211}At 製造を計画
- 2024年12月, $29\text{ MeV } ^4\text{He}^{2+}$ ビームの初加速に成功

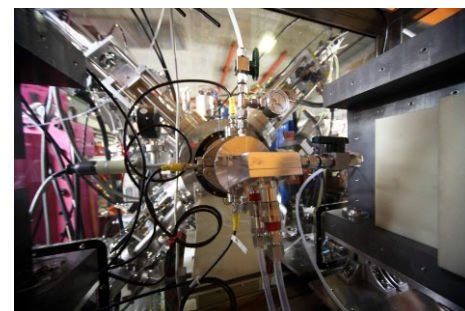


3. まとめ

理研RIBFの3基の重イオン加速器を用いて，アスタチン-211の製造技術開発と頒布を実施

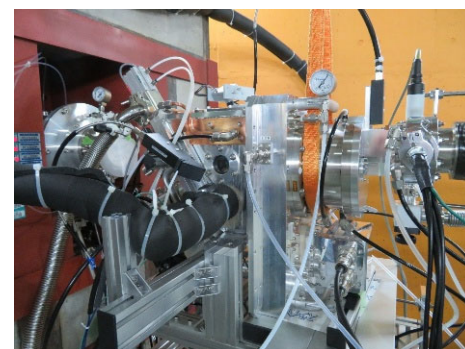
1) AVFサイクロトロン

従来装置を活用し， ^{211}At を安定製造・供給
2024年度：10グループに57回供給



2) 理研リングサイクロトロン

大規模 ^{211}At 製造装置の開発：真空窓，冷却機構
ビーム強度：25 pμA → **35 pμA** (+40%)
実用量 (>**600 MBq**) の精製 ^{211}At の製造



3) 理研超伝導重イオン線形加速器

^{211}At 製造ビームラインの建設完了

^{211}At 製造に必要な**29 MeV $^4\text{He}^{2+}$** イオンの初加速



謝辞

理研仁科加速器科学研究センター

佐藤望, 南部明弘, 重河優大, 渡邊慶子, 金山洋介, 清水弘道, 富塚知博,
渡邊環, MITRA Sayantani



金属技研株式会社

安良田寛, 栗原嵩司, 中村伸悟, 荒井秀幸, 長澤豊



2017-2021年度JST産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム
「安全・安心・スマートな長寿社会実現のための高度な量子アプリケーション技術の創出」
(中野貴志 代表)



研究成果展開事業
産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム
Program on Open Innovation Platform with Enterprises, Research Institute and Academia (OPERA)

2022-2028年度AMED次世代がん医療加速化研究事業
先進的技術支援と効率的推進マネジメント (野田哲生 代表)



2023-2029年度福島国際研究教育機構「加速器を活用したRIの安定的かつ効率的な製造技術の開発」委託事業のうち, 「加速器を活用した有用RIの製造技術開発」 (羽場宏光 代表)



2023-2032年度文部科学省共同利用・共同研究システム形成事業学際領域展開ハブ形成プログラム「RIコラボラティブ学際領域展開プラットフォーム」 (中野貴志 代表)

