

113番元素発見：理研RIBFにおける超重元素合成

IUPAC INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY

CONTACT JOIN LOGIN

nihonium and symbol Nh, for the element 113;

49 In indium 114.8	50 Sn tin 118.7	51 Sb antimony 121.8	52 Te tellurium 127.6	53 I iodine 126.9	54 Xe xenon 131.3
81 Tl	82 Pb lead 207.2	83 Bi	84 Po polonium	85 At astatine	86 Rn radon
113 Uut ununtrium	114 Fl flerovium	115 Uup ununpentium	116 Lv livermorium	117 Uus ununseptium	118 Uuo ununoctium

Naming Four New Elements

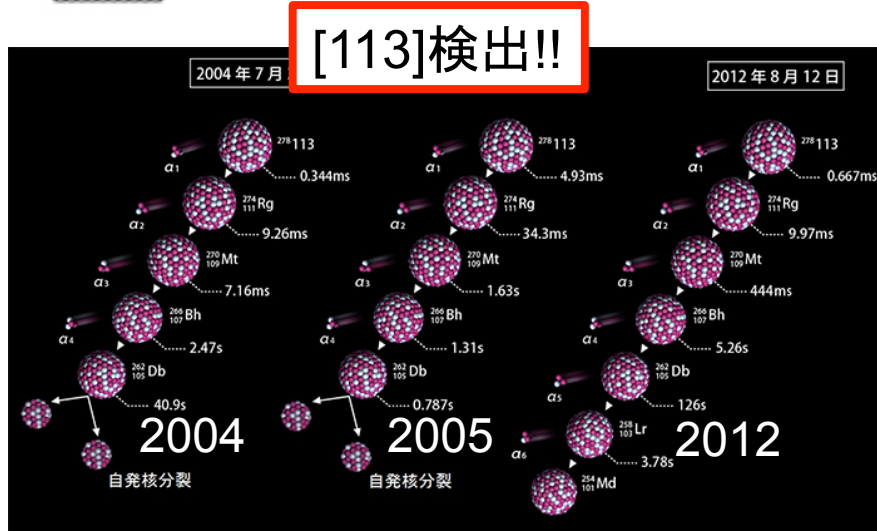
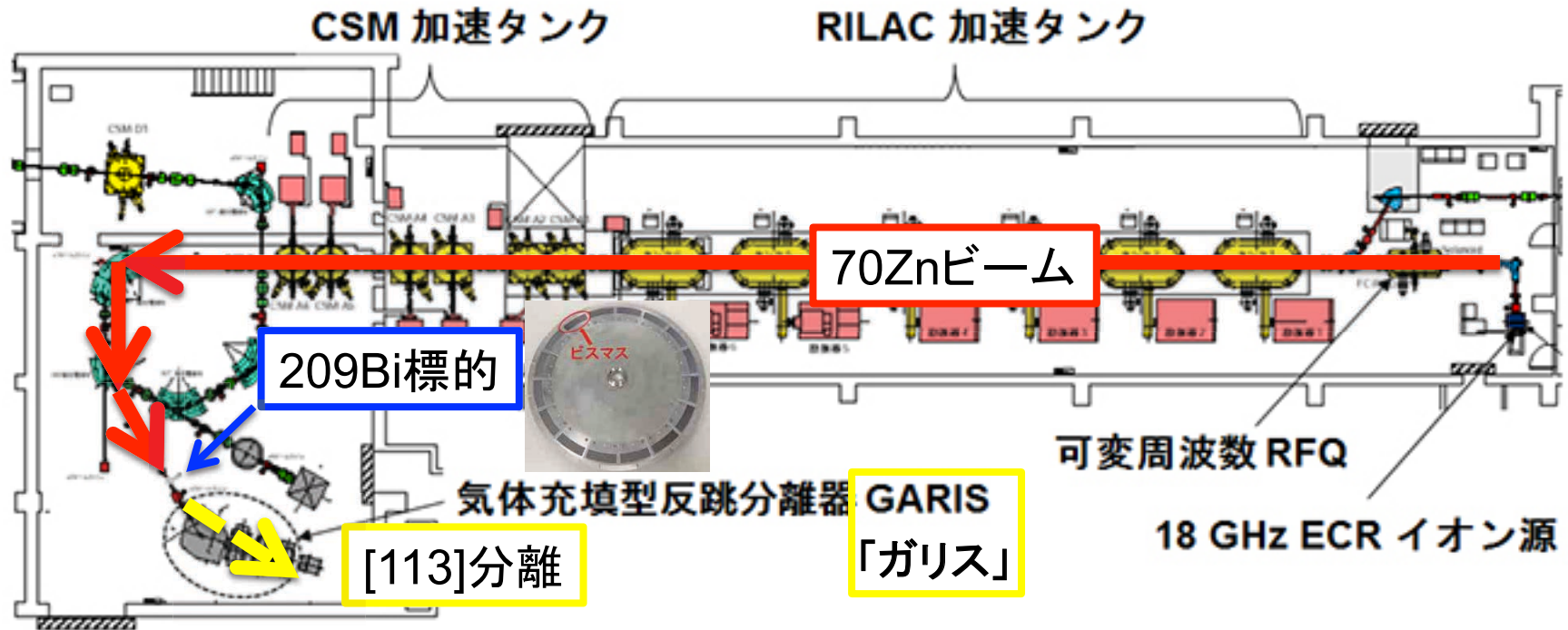
Following the earlier claims for discovery of elements 113, 115, 117, and 118, the discoverers have been invited to propose names. The following are now disclosed for public review:

nihonium and symbol Nh, for the element 113;
moscovium and symbol Mc, for the element 115;
tennessine and symbol Ts, for the element 117; and
oganeson and symbol Og, for the element 118.

READ MORE (IUPACホームページ)

理化学研究所 仁科加速器研究センター
加速器基盤研究部を代表して：上垣外修一

113番元素発見：理研RIBFにおける超重元素合成



内容

- ・超重元素とは
- ・海外での超重元素合成
- ・理研での超重元素合成
- ・展望

1935年まで: 全て欧州諸国が発見

族	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 水素 H																	2 ヘリウム He
2	3 リチウム Li	4 ベリリウム Be											5 ホウ素 B	6 炭素 C	7 窒素 N	8 酸素 O	9 フッ素 F	10 ネオン Ne
3	11 ナトリウム Na	12 マグネシウム Mg											13 アルミニウム Al	14 ケイ素 Si	15 リン P	16 硫黄 S	17 塩素 Cl	18 アルゴン Ar
4	19 カリウム K	20 カルシウム Ca	21 スカンジウム Sc	22 チタン Ti	23 バナジウム V	24 クロム Cr	25 マンガン Mn	26 鉄 Fe	27 コバルト Co	28 ニッケル Ni	29 銅 Cu	30 亜鉛 Zn	31 ガリウム Ga	32 ゲルマニウム Ge	33 ヒ素 As	34 セレン Se	35 臭素 Br	36 クリプトン Kr
5	37 ルビジウム Rb	38 ストロンチウム Sr	39 イットリウム Y	40 ジルコニウム Zr	41 ニオブ Nb	42 モリブデン Mo		44 ルテチウム Ru	45 ロジウム Rh	46 パラジウム Pd	47 銀 Ag	48 カドミウム Cd	49 インジウム In	50 スズ Sn	51 アンチモン Sb	52 テルル Te	53 ヨウ素 I	54 キセノン Xe
6	55 セシウム Cs	56 バリウム Ba	ランタノイド	72 ハフニウム Hf	73 タンタル Ta	74 タングステン W	75 レニウム Re	76 オスミウム Os	77 イリジウム Ir	78 白金 Pt	79 金 Au	80 水銀 Hg	81 タリウム Tl	82 鉛 Pb	83 ヒスマス Bi	84 ポロニウム Po		86 ラドン Rn
7		88 ラジウム Ra	アクチノイド															
				57 ランタン La	58 セリウム Ce	59 プラセオジム Pr	60 ネオジム Nd		62 サマリウム Sm	63 ユウロピウム Eu	64 ガドリニウム Gd	65 テルビウム Tb	66 ジスプロシウム Dy	67 ホルミウム Ho	68 エルビウム Er	69 ツリウム Tm	70 イットリビウム Yb	71 ルテチウム Lu
				89 アクチニウム Ac	90 トリアウム Th	91 プロトアクチニウム Pa	92 ウラン U											

元素周期表

Periodic Table of the Elements

発見国別

原子番号	
元素名	
元素記号	

核変換による元素の合成<=加速器の発展

族	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 水素 H																	2 ヘリウム He
2	3 リチウム Li	4 ベリリウム Be											5 ホウ素 B	6 炭素 C	7 窒素 N	8 酸素 O	9 フッ素 F	10 ネオン Ne
3	11 ナトリウム Na	12 マグネシウム Mg											13 アルミニウム Al	14 ケイ素 Si	15 リン P	16 硫黄 S	17 塩素 Cl	18 アルゴン Ar
4	19 カリウム K	20 カルシウム Ca	21 スカンジウム Sc	22 チタン Ti	23 バナジウム V	24 クロム Cr	25 マンガン Mn	26 鉄 Fe	27 コバルト Co	28 ニッケル Ni	29 銅 Cu	30 亜鉛 Zn	31 ガリウム Ga	32 ゲルマニウム Ge	33 ヒ素 As	34 セレン Se	35 臭素 Br	36 クリプトン Kr
5	37 ルビジウム Rb	38 ストロンチウム Sr	39 イットリウム Y	40 ジルコニウム Zr	41 ニオブ Nb	42 モリブデン Mo	43 テクネチウム Tc	44 ルテチウム Ru	45 ロジウム Rh	46 パラジウム Pd	47 銀 Ag	48 カドミウム Cd	49 インジウム In	50 スズ Sn	51 アンチモン Sb	52 テルル Te	53 ヨウ素 I	54 キセノン Xe
6	55 セシウム Cs	56 バリウム Ba	ランタノイド	72 ハフニウム Hf	73 タンタル Ta	74 タングステン W	75 レニウム Re	76 オスミウム Os	77 イリジウム Ir	78 白金 Pt	79 金 Au	80 水銀 Hg	81 タリウム Tl	82 鉛 Pb	83 ヒスマス Bi	84 ポロニウム Po		86 ラドン Rn
7		88 ラジウム Ra	アクチノイド															
				57 ランタン La	58 セリウム Ce	59 プラセオジム Pr	60 ネオジム Nd		62 サマリウム Sm	63 ユウロピウム Eu	64 ガドリニウム Gd	65 テルビウム Tb	66 ジスプロシウム Dy	67 ホルミウム Ho	68 エルビウム Er	69 ツリウム Tm	70 イットリウム Yb	71 ルテチウム Lu
				89 アクチニウム Ac	90 トリアウム Th	91 プロトアクチニウム Pa	92 ウラン U											

元素周期表

Periodic Table of the Elements

発見国別

原子番号	
元素名	
元素記号	人工元素

Segre (1937) Mo+d: Berkeley 27" cyclotron

人工元素

族	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 水素 H																	2 ヘリウム He
2	3 リチウム Li	4 ベリリウム Be											5 ホウ素 B	6 炭素 C	7 窒素 N	8 酸素 O	9 フッ素 F	10 ネオン Ne
3	11 ナトリウム Na	12 マグネシウム Mg											13 アルミニウム Al	14 ケイ素 Si	15 リン P	16 硫黄 S	17 塩素 Cl	18 アルゴン Ar
4	19 カリウム K	20 カルシウム Ca	21 スカンジウム Sc	22 チタン Ti	23 バナジウム V	24 クロム Cr	25 マンガン Mn	26 鉄 Fe	27 コバルト Co	28 ニッケル Ni	29 銅 Cu	30 亜鉛 Zn	31 ガリウム Ga	32 ゲルマニウム Ge	33 ヒ素 As	34 セレン Se	35 臭素 Br	36 クリプトン Kr
5	37 ルビシウム Rb	38 ストロンチウム Sr	39 イットリウム Y	40 ジルコニウム Zr	41 ニオブ Nb	42 モリブデン Mo	43 テクネチウム Tc	44 ルテチウム Ru	45 ロジウム Rh	46 パラジウム Pd	47 銀 Ag	48 カドミウム Cd	49 インジウム In	50 スズ Sn	51 アンチモン Sb	52 テルル Te	53 ヨウ素 I	54 キセノン Xe
6	55 セシウム Cs	56 バリウム Ba	ランタノイド	72 ハフニウム Hf	73 タンタル Ta	74 タングステン W	75 レニウム Re	76 オスミウム Os	77 イリジウム Ir	78 白金 Pt	79 金 Au	80 水銀 Hg	81 タリウム Tl	82 鉛 Pb	83 ヒスマス Bi	84 ポロニウム Po	85 アスタチン At	86 ラドン Rn
7	87 フランシウム Fr	88 ラザリウム Ra	アクチノイド	104 ラザホーシウム Rf	105 ドブニウム Db	106 シーボーギウム Sg	107 ボークリウム Bh	108 ハッシウム Hs	109 マイトネリウム Mt	110 ダームスタチウム Ds	111 レントゲニウム Rg	112 コペルニシウム Cn	113 ニホニウム Nh	114 フルロビウム Fl	115 モソバチウム Mc	116 リバモリウム Lv	117 テネシウム Ts	118 オガネソン Og
				57 ランタン La	58 セリウム Ce	59 プラセオジム Pr	60 ネオジム Nd	61 プロメチウム Pm	62 サマリウム Sm	63 ユウロピウム Eu	64 ガドリニウム Gd	65 テルビウム Tb	66 ジスプロシウム Dy	67 ホルミウム Ho	68 エルビウム Er	69 ツリウム Tm	70 イットリウム Yb	71 ルテチウム Lu
				89 アクチニウム Ac	90 トリアウム Th	91 プロトアクチニウム Pa	92 ウラン U	93 ネプツニウム Np	94 プルトニウム Pu	95 アメリシウム Am	96 キュリウム Cm	97 バークリウム Bk	98 カリホルニウム Cf	99 アインシュタイン Es	100 フェルミウム Fm	101 メンデレビウム Md	102 ノーベリウム No	103 ローレンシウム Lr

元素周期表

Periodic Table of the Elements

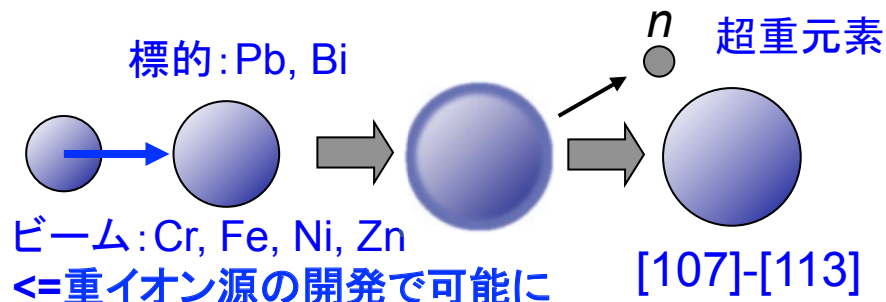
発見国別

29種(うち加速器で発見25種)

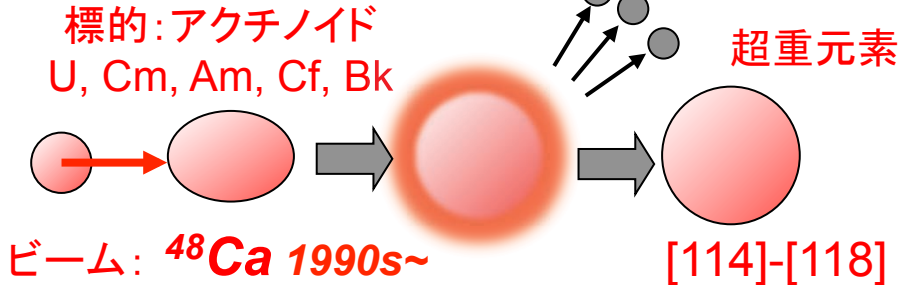
原子番号	
元素名	
元素記号	人工元素

超重元素の合成: 「Cold」と「Hot」

“Cold fusion”^{*1} 1980s~



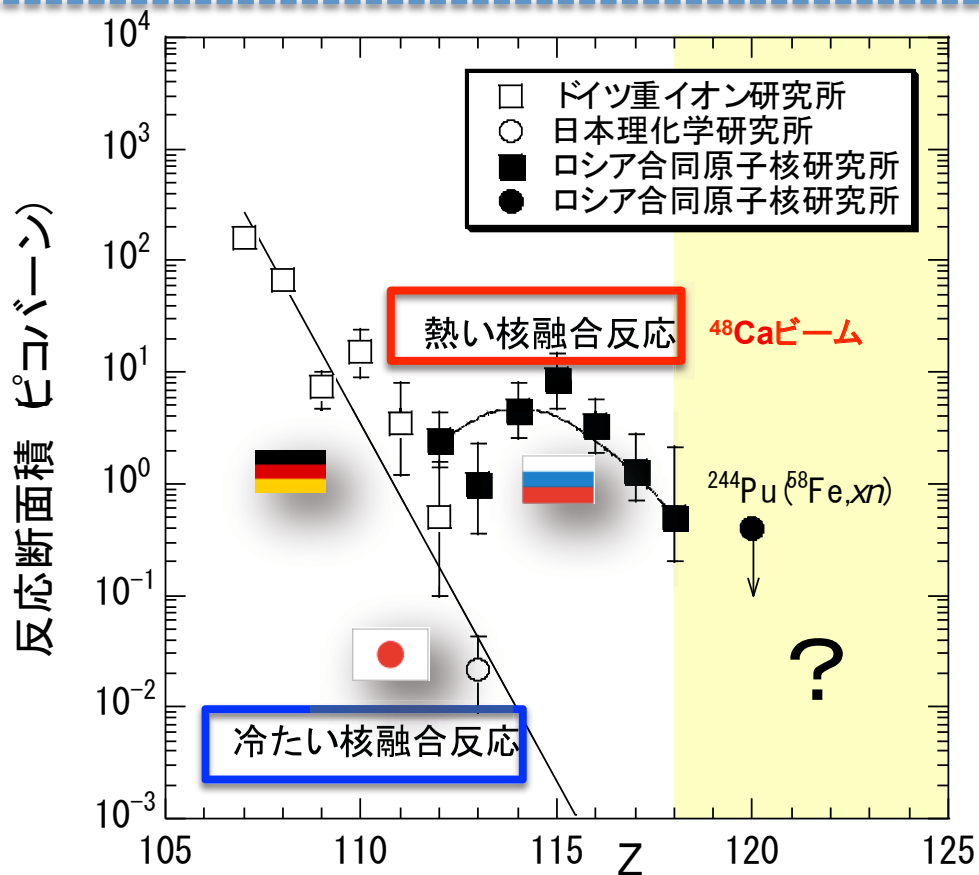
“Hot fusion” 1950s~



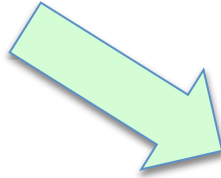
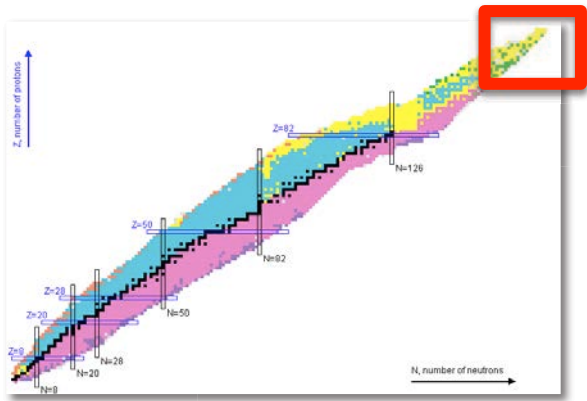
*1: Yu. Ts. Oganessian,
Lecture Notes in Physics 33, 221 (1974).

- × 標的困難,
- × 中性子数決まらない
- クーロン障壁($Z_1 \cdot Z_2$)小

- 標的容易
- 中性子数決まる
- × クーロン障壁($Z_1 \cdot Z_2$)大



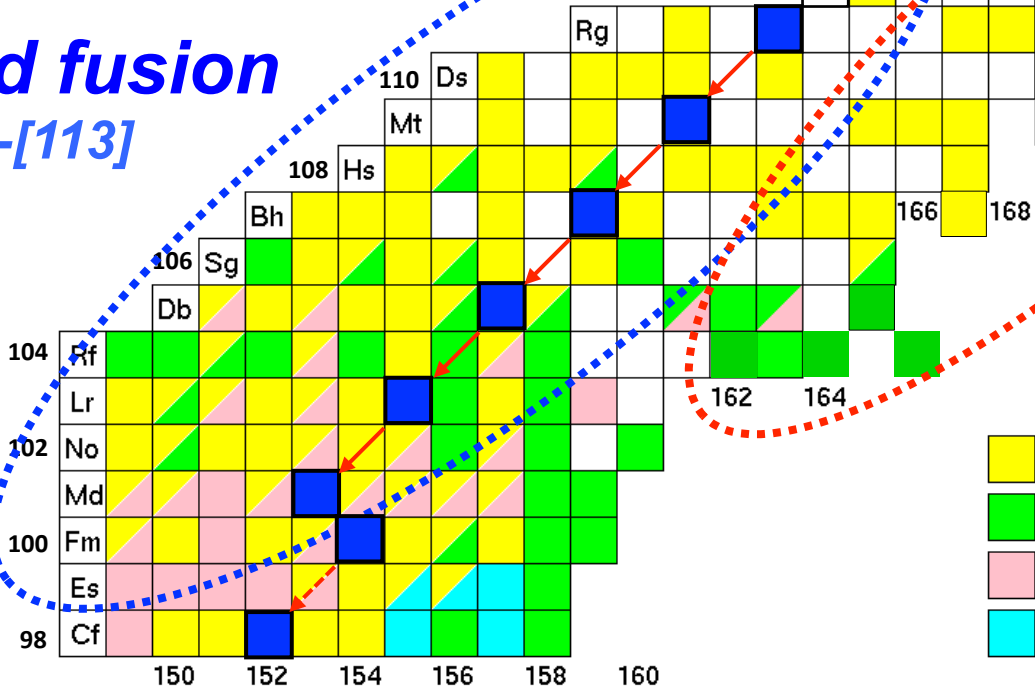
超重元素の合成: 「Cold」と「Hot」



◎既知核につながる!!

Cold fusion
[107]-[113]

陽子数Z
↑



→ 中性子数N



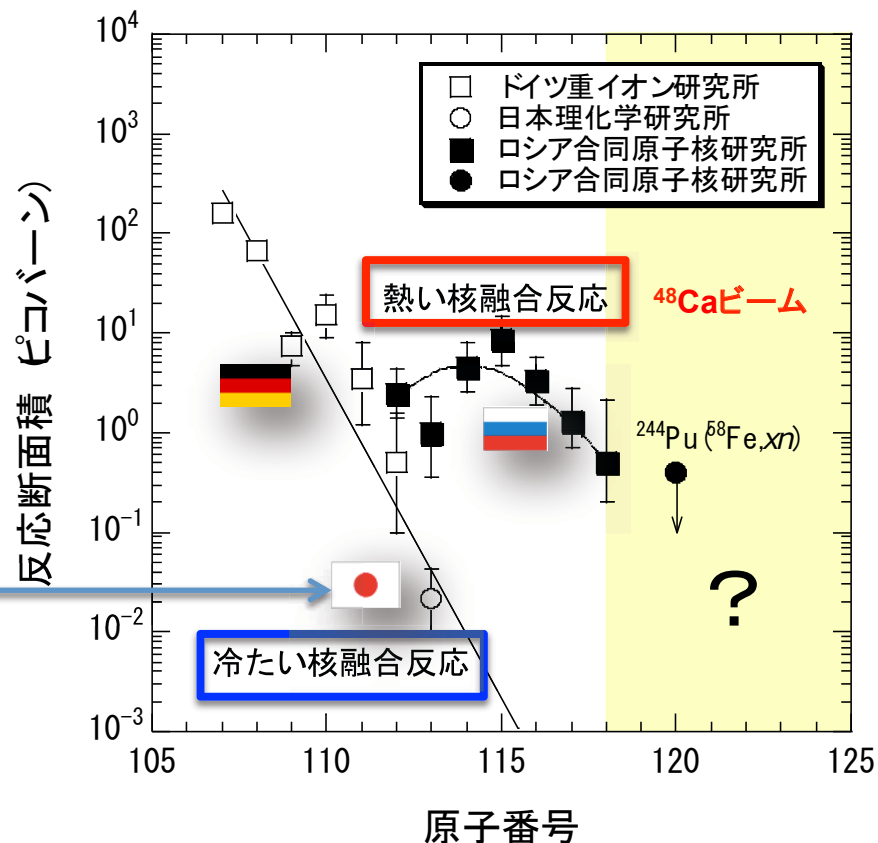
[114]-[118]
Hot fusion
(⁴⁸Caビームによる)

×既知核につながらない..

加速器の必要条件

超重元素の生成断面積は
非常に小さい

[113]の生成断面積: 22 fb
=> 1 イベント / 200日



大強度重イオンビームの長時間安定供給

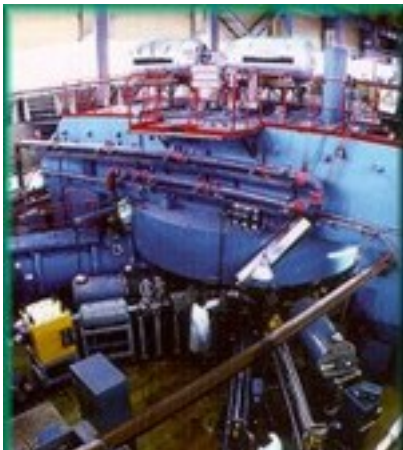
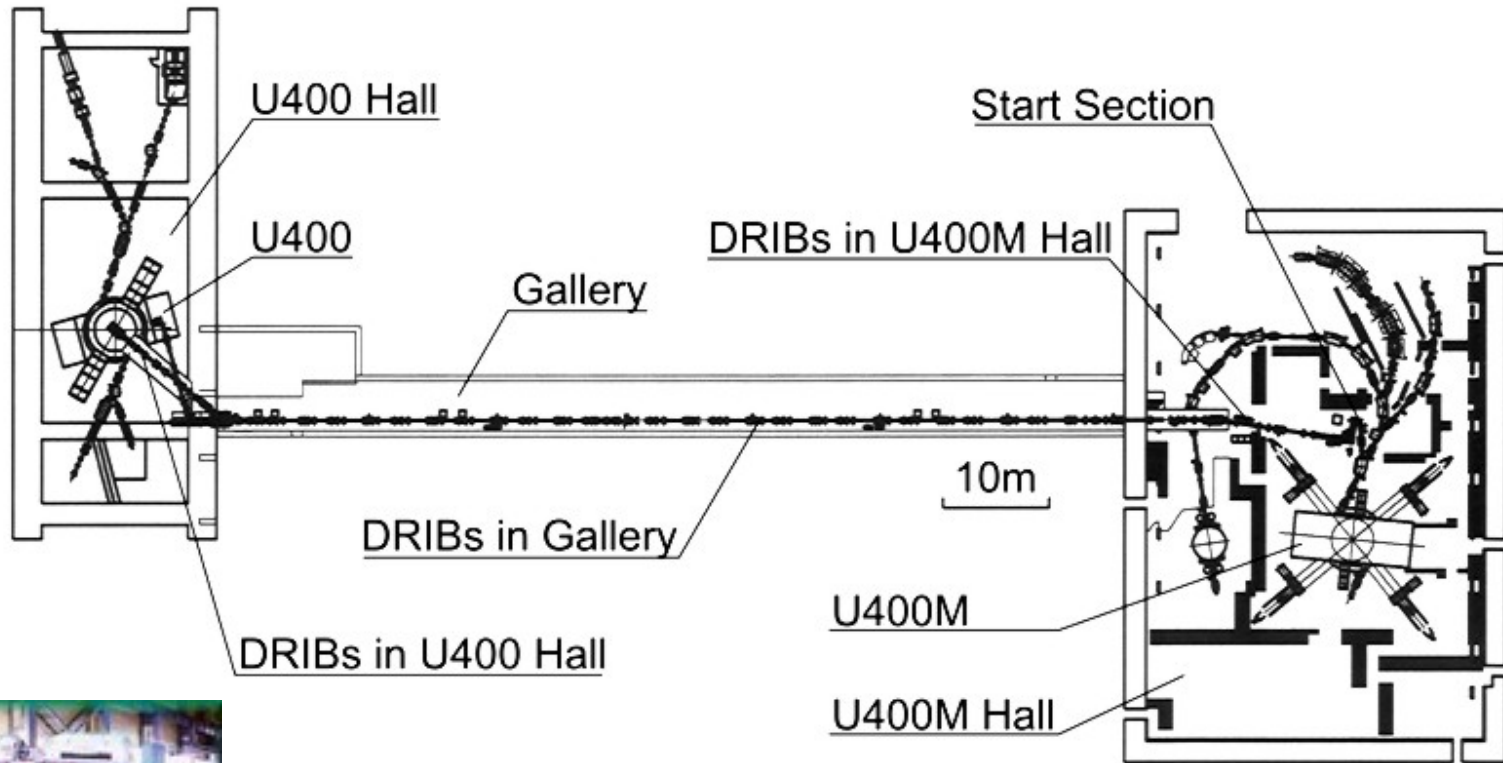
超重元素の加速器施設の比較

施設	FLNR (ロシア)	GSI (ドイツ)	理研RIBF (日本)
加速器	サイクロトロン U400	リニアック UNILAC	リニアック RILAC
Duty	100 %	25 %	100 %
イオン源	ECRIS (18 GHz)	ECRIS (14.5 GHz)	ECRIS (18 GHz)
用途	専用	入射器兼用	入射器兼用
分離装置	VASSILISSA GFRS ¹⁾	SHIP ²⁾ TASCA ³⁾	GARIS ⁴⁾ GARIS II

- 1) Gas-Filled Recoil nuclear Separator
- 2) Separator for Heavy Ion reaction Products
- 3) TransActinide Separator and Chemistry Apparatus
- 4) GAs-filled Recoil Ion Separator

青: Wien Filter型分離装置
紫: 気体充填型反跳躍核分離装置

FLNR (ロシア Dubna)

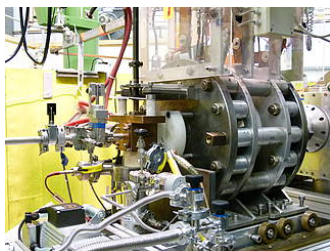


サイクロトロンU400

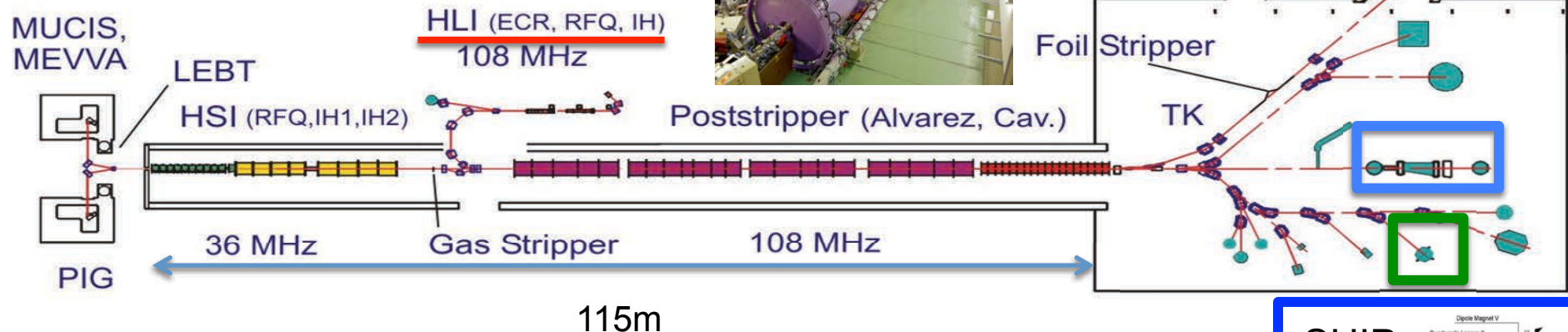
- ・1978年完成、1996年イオン源など増強
- ・ $^{48}\text{Ca}^{5+}$ 加速→荷電変換取り出し
- ・1.4 puAの $^{48}\text{Ca}^{18+}$

U400サイクロトロン

GSI (ドイツ Darmstadt)

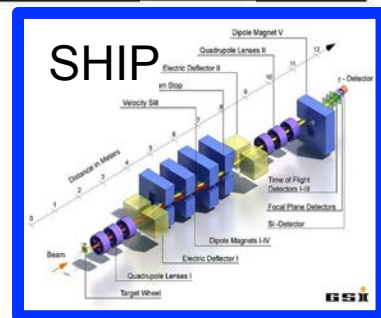


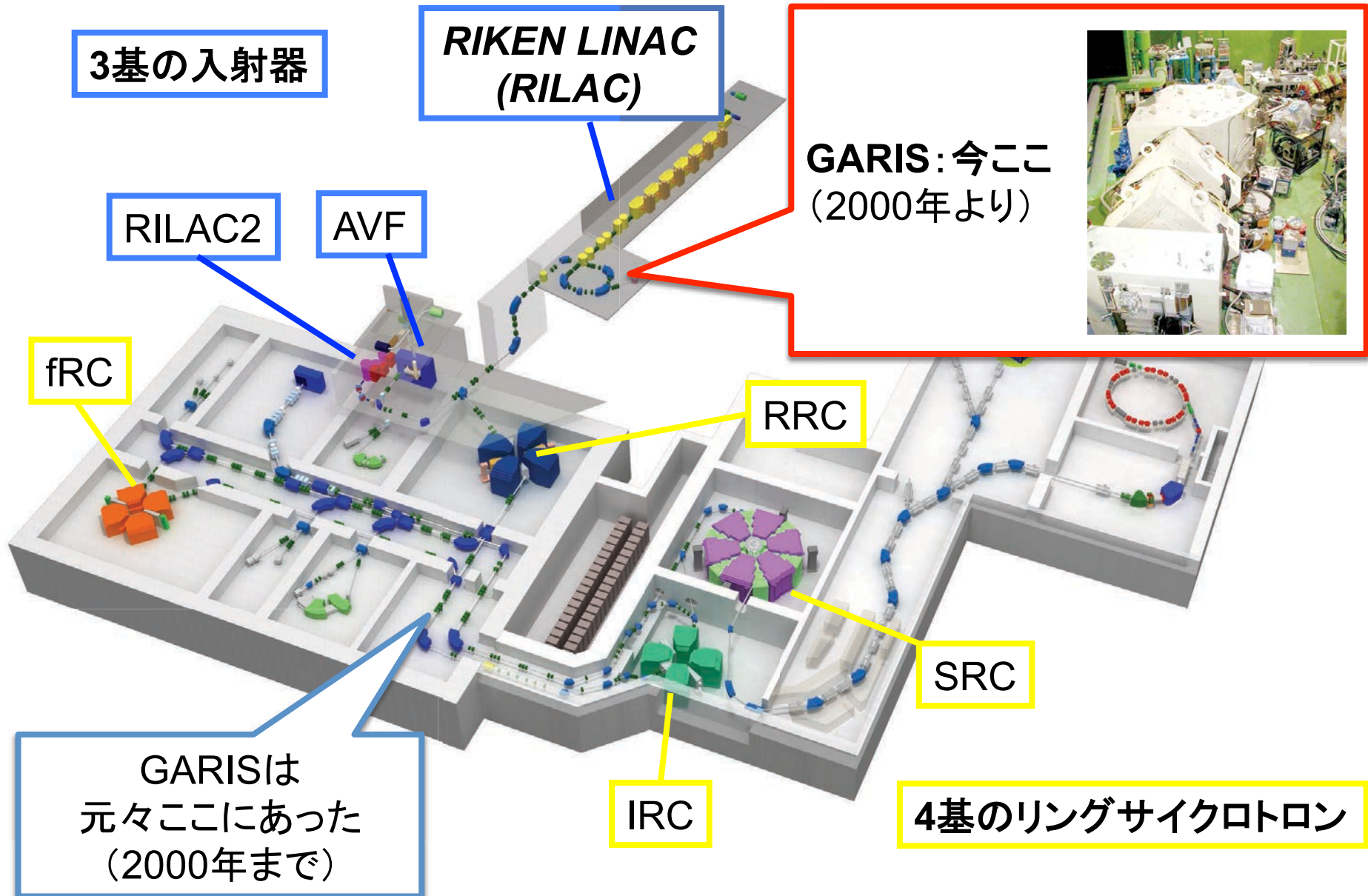
SIS18+FRS
RIビーム生成



UNILAC (UNiversal Linear ACcelerator)

- ・1976年完成
- ・単独利用+シンクロトロンSIS18への入射器
- ・1990年ECRイオン源装備のHLI建設。
- ・HLIの場合: Duty 25 %
- ・0.5 ~ 1 puAの ^{48}Ca , ^{50}Ti

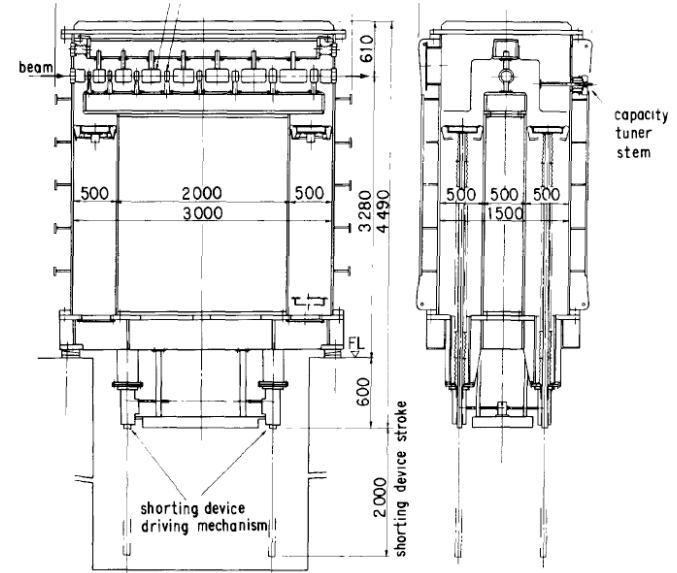
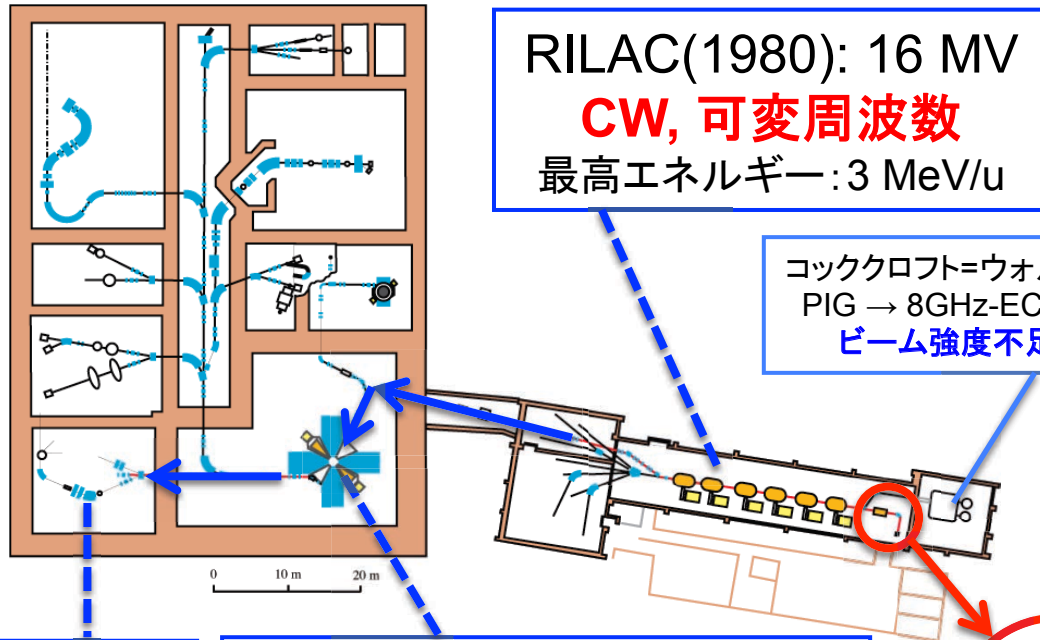




理研加速器研究施設 (RIBFの前身)

RILACの加速共振器

M. Odera et al., NIM A227 (1984) 187.



**GARIS
1988**

RRC(1986): K540 MeV
設計最低エネルギー 10.8 MeV/u

ビーム強度大幅増

e.g. ^{84}Kr 1.2 puA@RRC

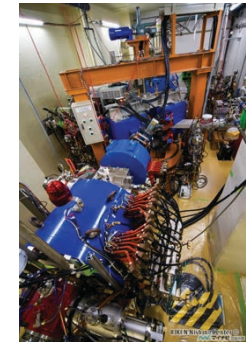
新元素実験に至らず。理由は..

- 1) RRCのエネルギーが高すぎた
(低くしたが当時はいろいろ不安定であった)
- 2) **RIBビームファクトリー計画の影響**

「金属イオン源」計画 (1992-1996)
矢野一後藤



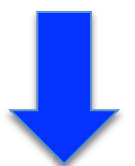
折り返し同軸型RFQ
O. Kamigaito et al.,
RSI 70 (1999) 4523.



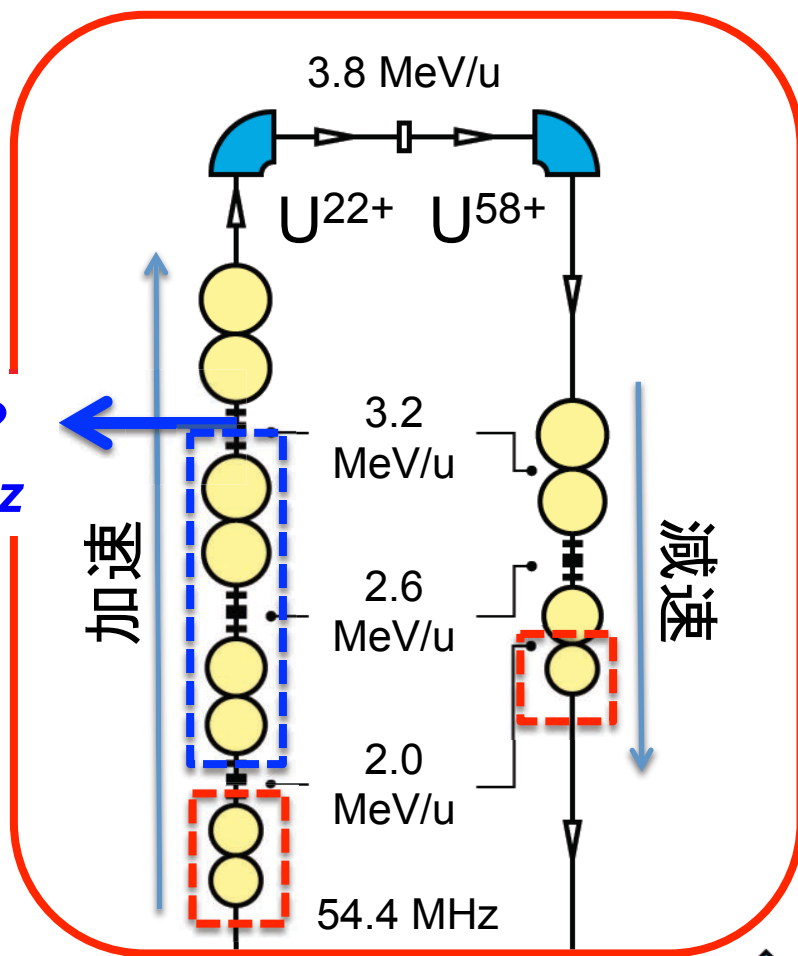
18GHz-ECRIS
T. Nakagawa et al.,
RSI 71 (2000) 637.

「多価化器 (Charge State Multiplier: CSM)」

GARIS!?
@75.5 MHz



実現!



 1998年(理研予算)

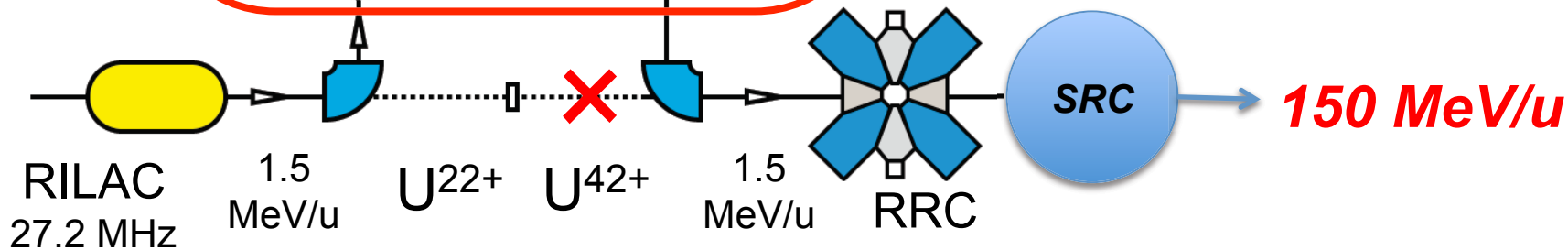


可変周波数3台
36-76.4 MHz

 1999年(東大CNS予算)

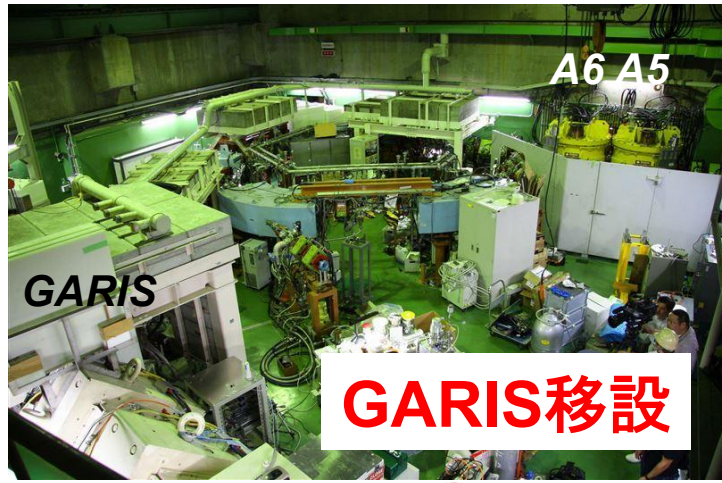


固定周波数4台
75.5 MHz





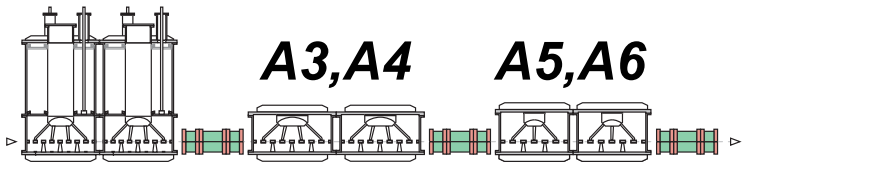
**CSM加速部
急ピッチで製作**



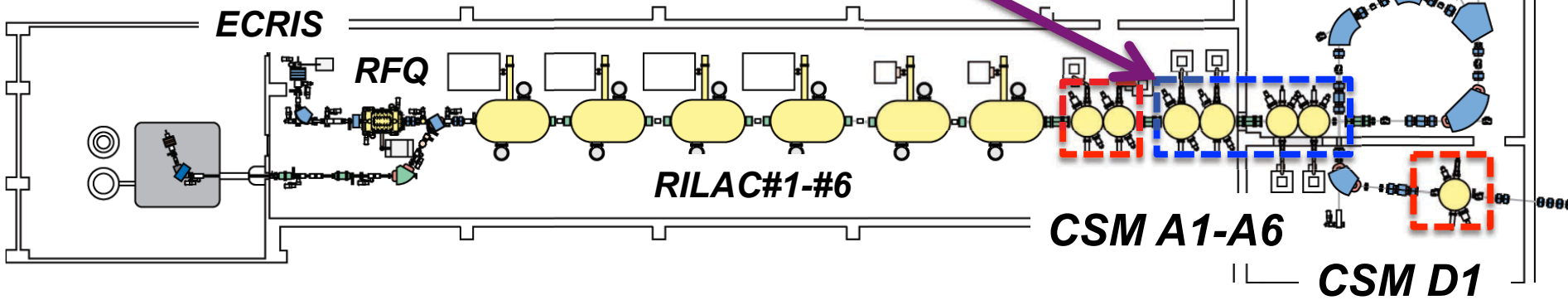
A1,A2

A3,A4

A5,A6



設置

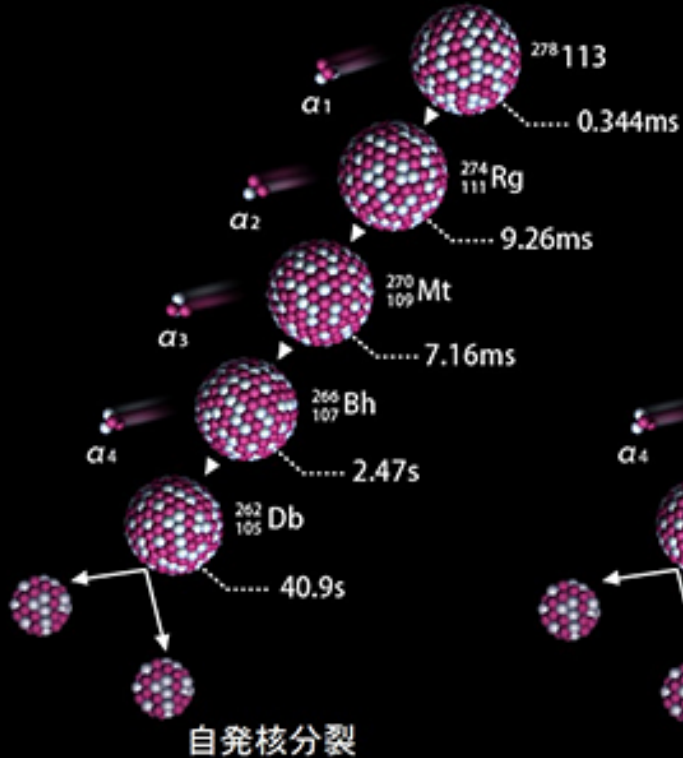


GARIS実験の進展

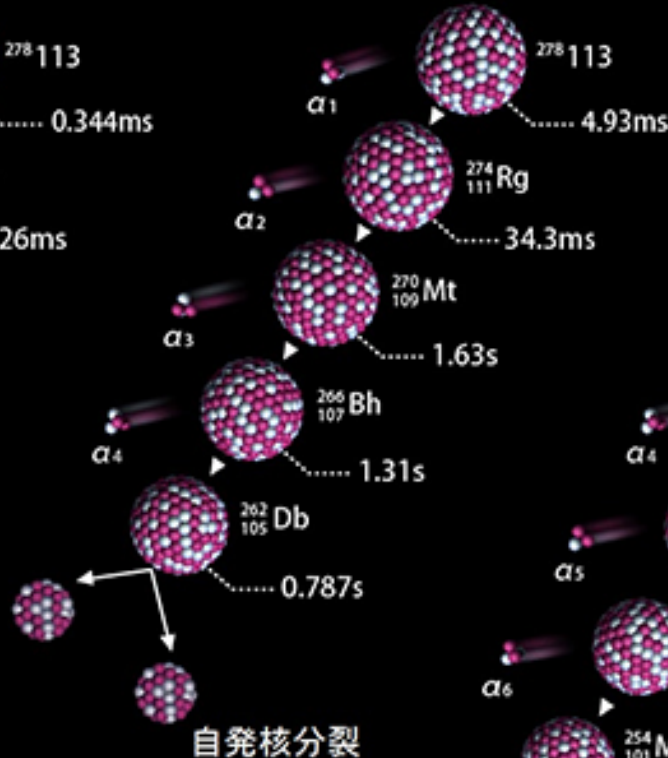
Year	RIKEN	FLNR	GSI
2001	加速試験成功	(~2001 [114], [116])	[110], [111], [112])
2002	$^{58}\text{Fe}+^{208}\text{Pb}\rightarrow_{108}\text{Hs}$ (10例) $^{64}\text{Ni}+^{208}\text{Pb}\rightarrow^{272}$ [110] (14例)	$^{48}\text{Ca}+^{249}\text{Cf}\rightarrow$ [118]	
2003	$^{64}\text{Ni}+^{209}\text{Bi}\rightarrow^{273}$ [111] (14例) [113]開始($^{70}\text{Zn}+^{209}\text{Bi}$)	$^{48}\text{Ca}+^{243}\text{Am}\rightarrow$ [115]	^{110}Ds 命名 [113]確認できず
2004	$^{70}\text{Zn}+^{208}\text{Pb}\rightarrow^{277}$ [112] (2例) $^{70}\text{Zn}+^{209}\text{Bi}\rightarrow^{278}$[113] 1st!! (7/23)	$^{48}\text{Ca}+^{245}\text{Cm}\rightarrow$ [116]	^{111}Rg 命名
2005	$^{70}\text{Zn}+^{209}\text{Bi}\rightarrow^{278}$[113] 2nd!! (4/2)		
2007		$^{48}\text{Ca}+^{237}\text{Np}\rightarrow$ [113]	$^{48}\text{Ca}+^{238}\text{U}\rightarrow$ [112]
2009	$^{23}\text{Na}+^{248}\text{Cm}\rightarrow^{266}\text{Bh}$ (32例) 278 [113]の崩壊鎖の確認	$^{48}\text{Ca}+^{249}\text{Bk}\rightarrow$ [117]	$^{48}\text{Ca}+^{244}\text{Pu}\rightarrow$ [114]
2010	^{274}Rg No event		^{112}Cn 命名
2011	$^{70}\text{Zn}+^{208}\text{Pb}\rightarrow^{277}$ [112] (1例)	^{114}Fl , ^{116}Lv 命名	
2012	$^{70}\text{Zn}+^{209}\text{Bi}\rightarrow^{278}$[113] 3rd!! (8/12)		$^{48}\text{Ca}+^{248}\text{Pu}\rightarrow$ [114]

3つの[113]イベント

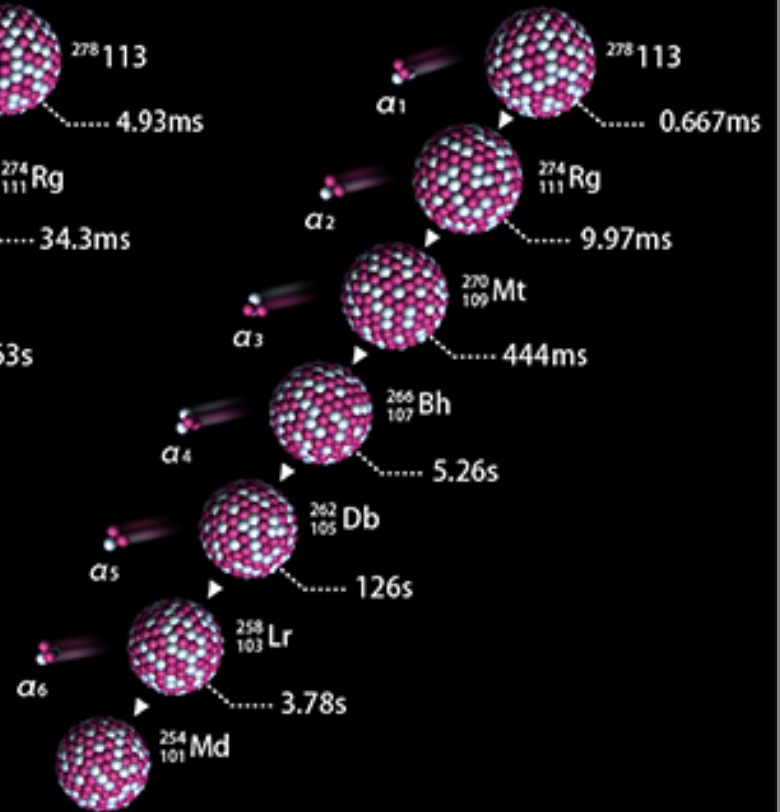
2004.07.23



2005.04.02

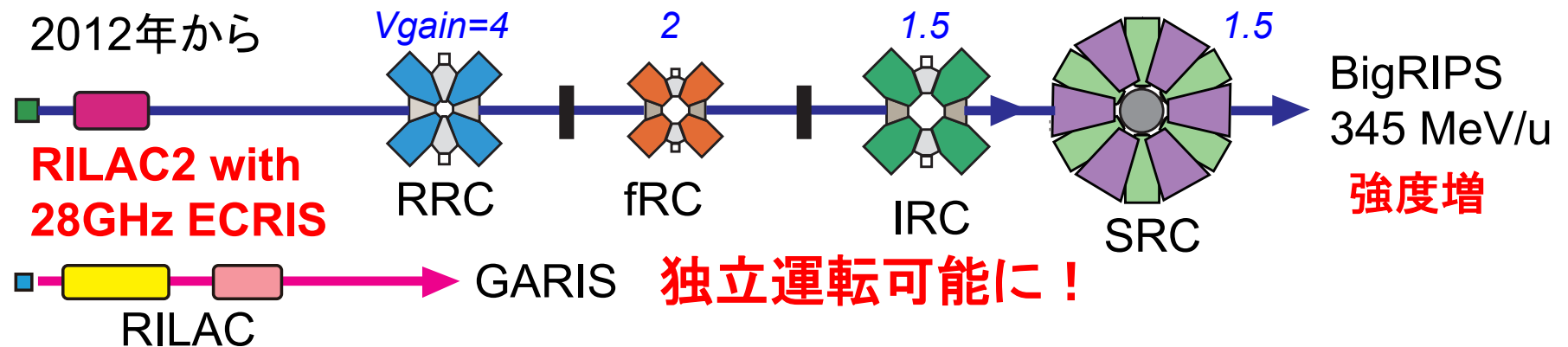
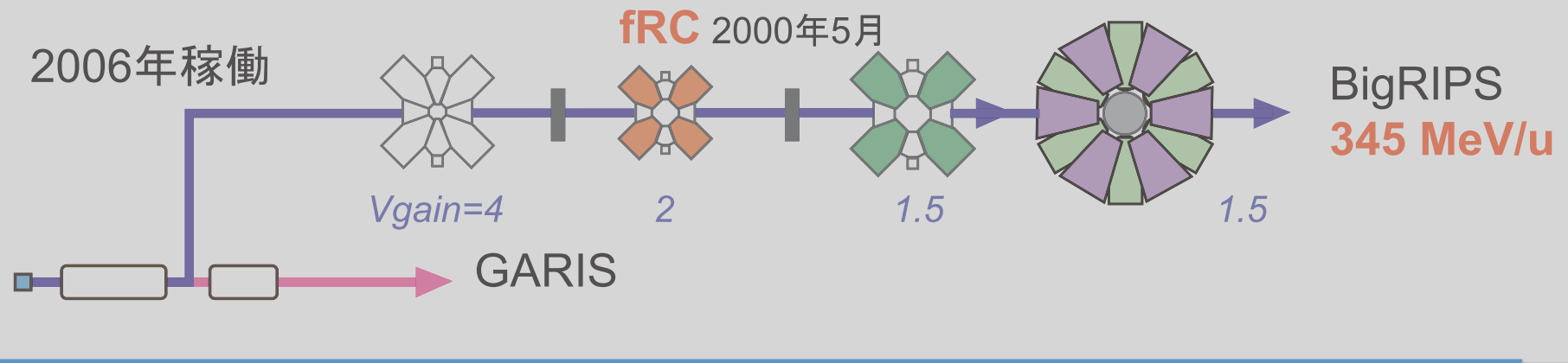
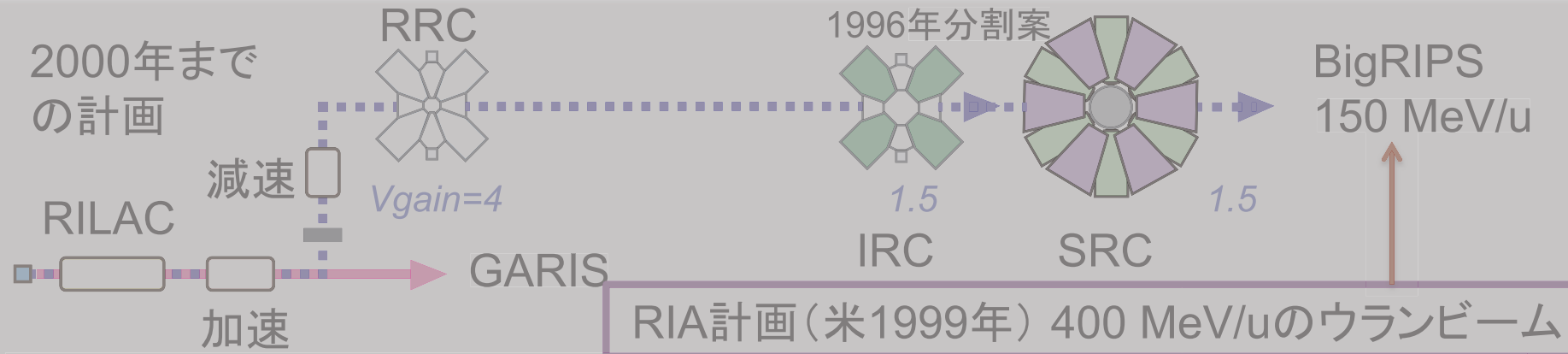


2012.08.12

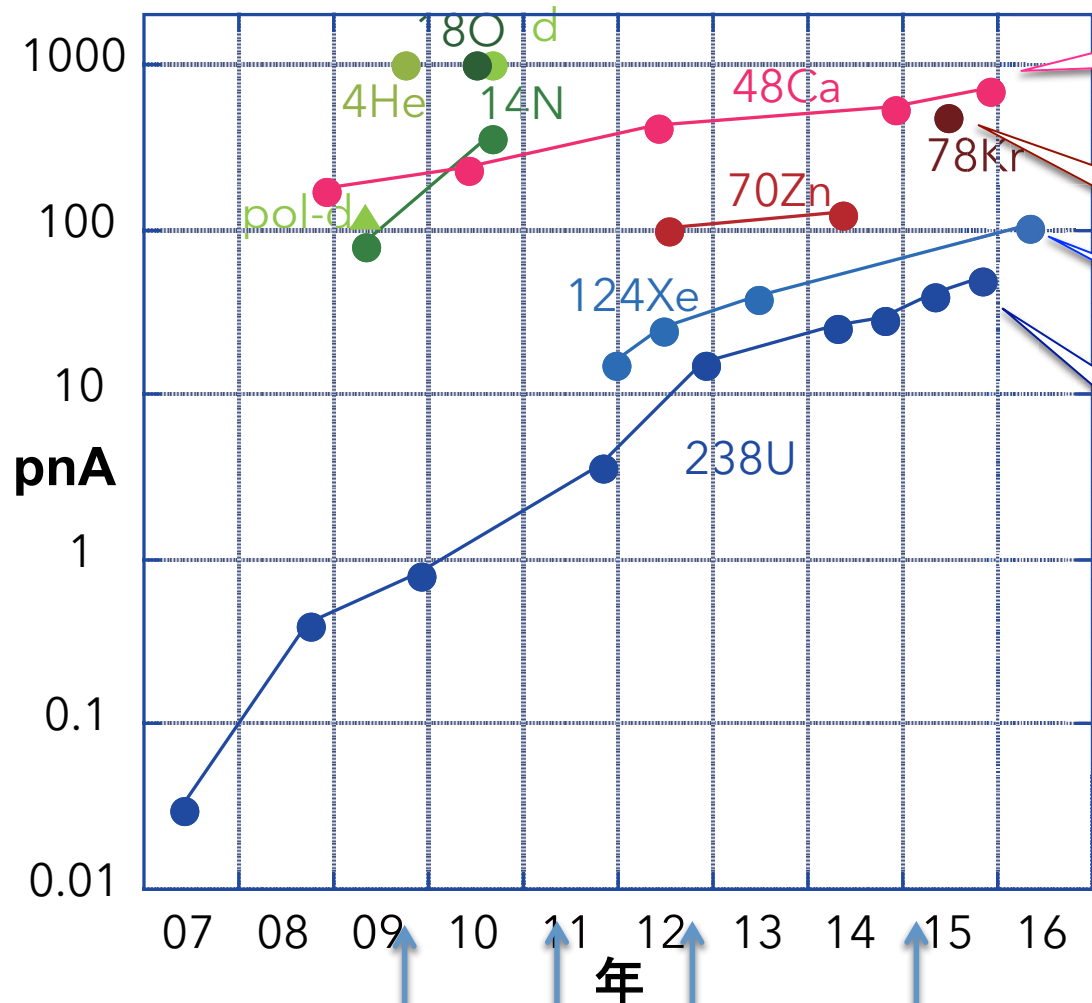


576日 total dose: 13.9×10^{19} => 平均0.47 puA

RIBF加速器の変遷



RIBF加速器(SRC)のビーム強度



^{48}Ca : 689 pA
=> **11.4 kW**

^{78}Kr : 486 pA
=> **13.1 kW**

^{124}Xe : 102 pA
=> **4.4 kW**

^{238}U : 49 pA
=> **4.0 kW**

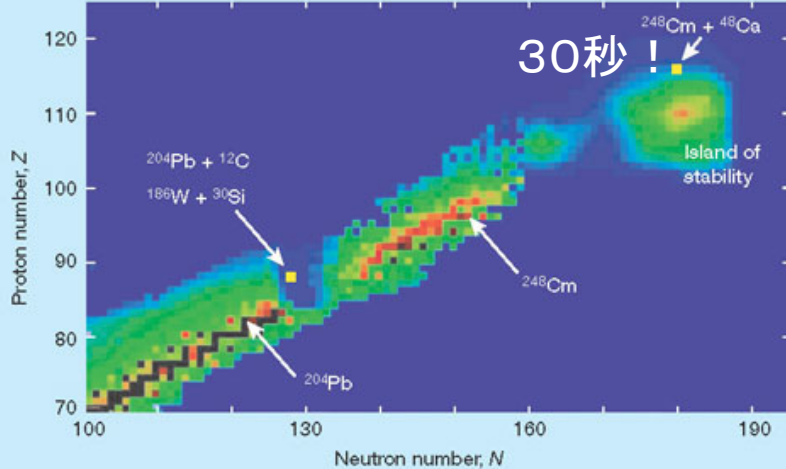
- 不安定核物理を牽引
- ・145種の新RI生成
 - ・新魔法数の発見
 - ・元素合成の理解
 - ・核反応データ蓄積

28GHz-ECRIS稼働
RILAC2稼働
ヘリウムガスストリッパ稼働 & fRC増強

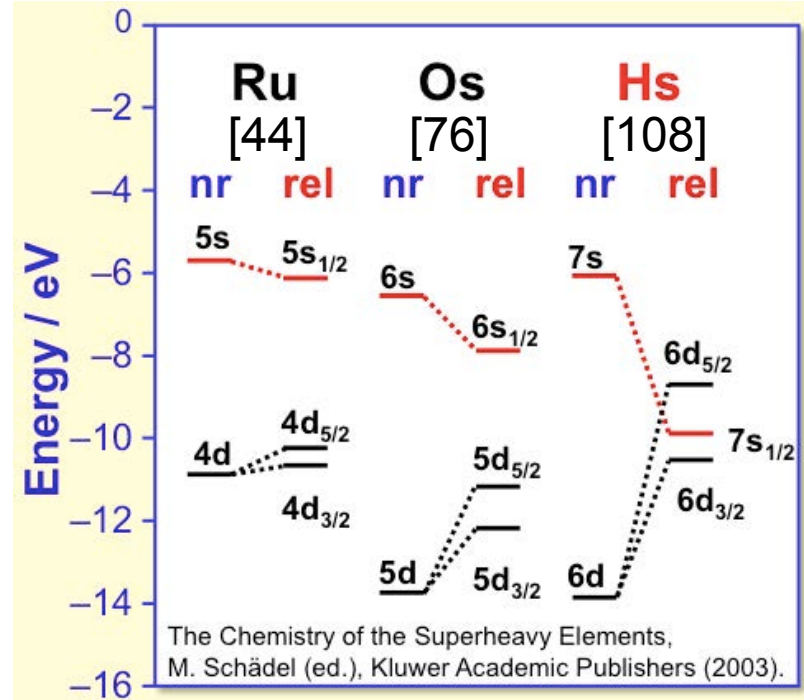
グラファイトシート
ストリッパ導入
& 多くの改良...

超重元素用の加速器の今後

- ・[119](第8周期)以降の元素合成: 元素はどこまで存在するのか
- ・超重元素の化学的性質(第何族?) / 物理的性質(質量など)
- ・新しい合成法の開発... 安定の島?



Yu. Ts. Oganessian, Nature **413**, 122 (2001).



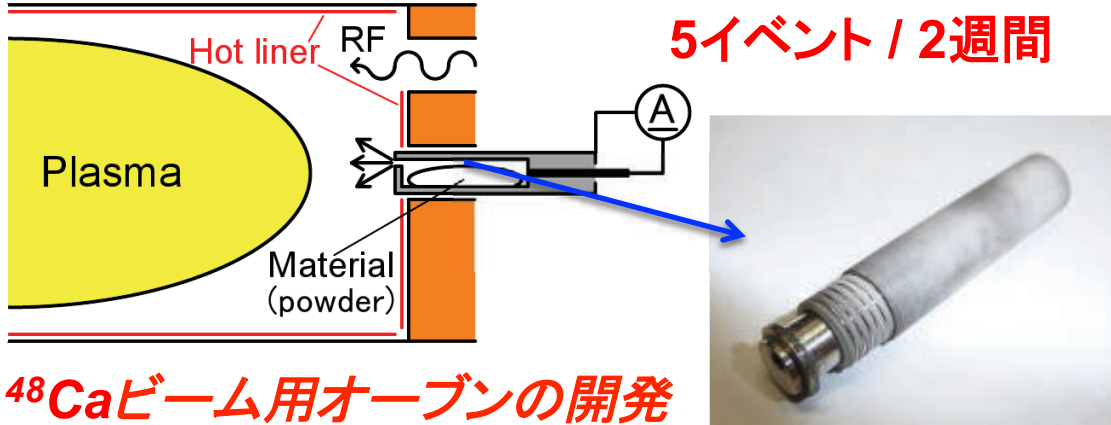
The Chemistry of the Superheavy Elements, M. Schädel (ed.), Kluwer Academic Publishers (2003).

- ・大強度金属イオンビーム生成: $\sim 10 \mu\text{A}$
- ・標的: アクチノイド物質・耐熱性の向上
- ・分離装置と検出器の高度化

理研での[119]以降の元素合成への取り組み

1) Hot fusionの追試 $^{48}\text{Ca} + ^{248}\text{Cm} \rightarrow ^{116}\text{Lv}$:

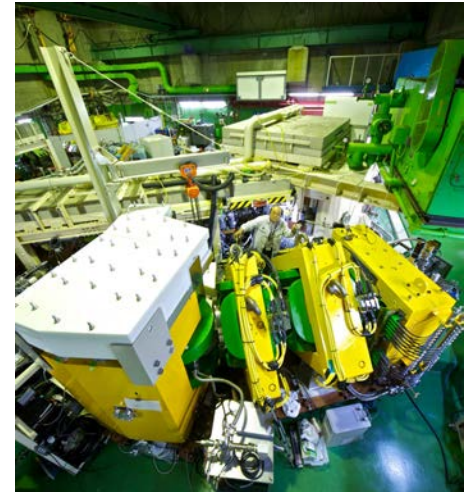
5イベント / 2週間



^{48}Ca ビーム用オーブンの開発

2) GARIS IIの始動

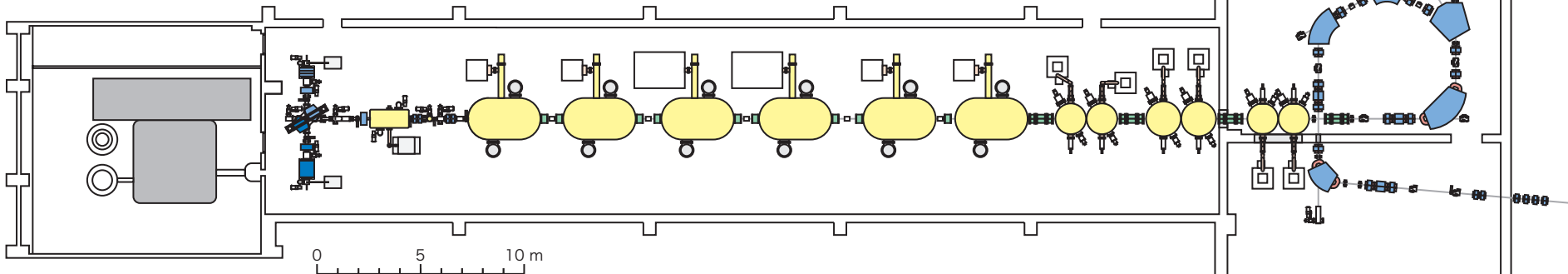
$^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U} \rightarrow ^{112}\text{Cn}$



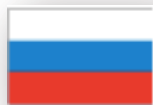
3) 金属イオンビームの開発: Ti, V, Cr..

MIVOC法 $\text{Cp}^*\text{Ti Me}_3 / \text{Cp}_2\text{V} / \text{Cp}_2\text{VMe}_2$

(IPHC-Grenobleとの共同開発)



国際動向：超重元素研究は盛んになっている

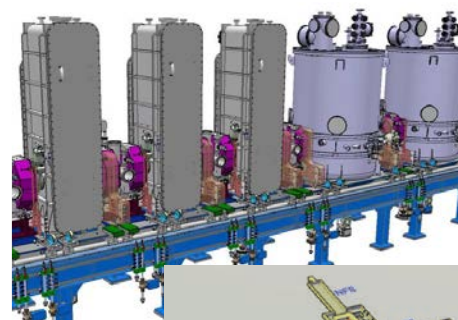


FLNR

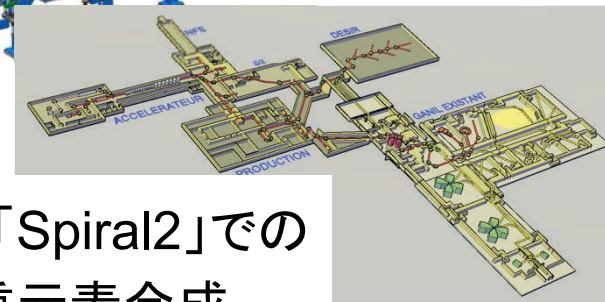


「DC280」

新サイクロトン主体の
「超重元素ファクトリー」建設



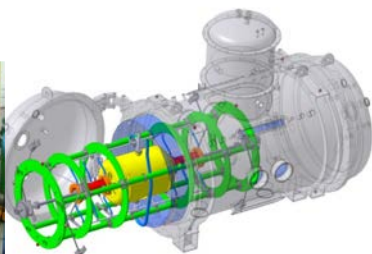
GANIL



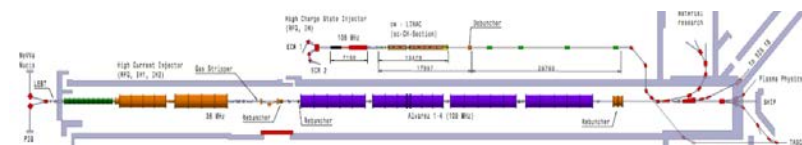
新施設「Spiral2」での
超重元素合成



GSI



UNILAC + ON-LINAC



専用の超伝導線形加速器の開発



LBNL

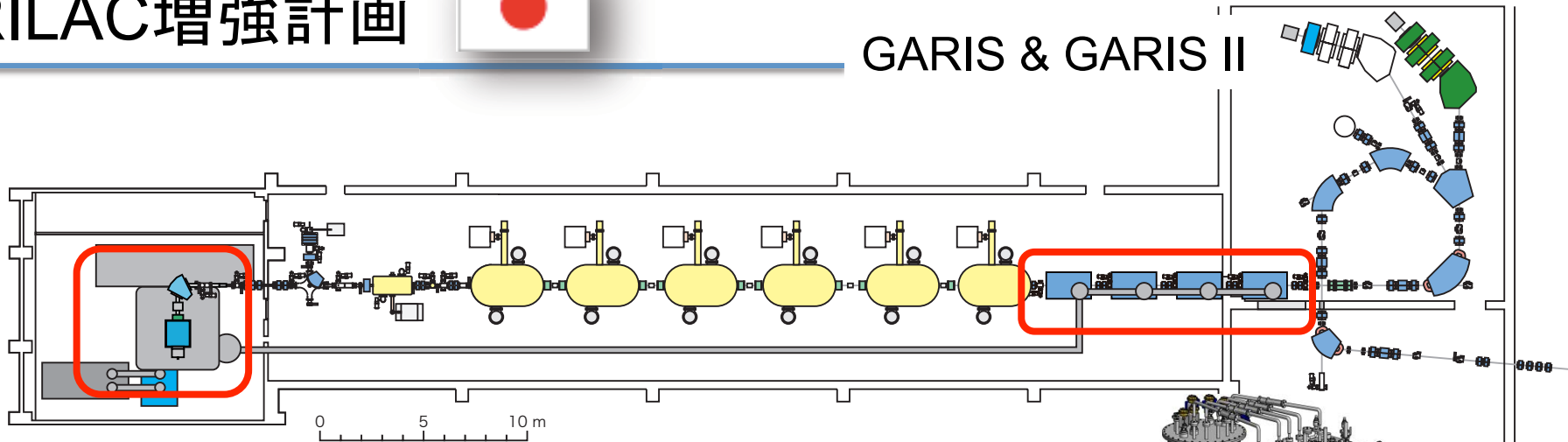
「VENUS」

88”サイクロトンへの
超伝導ECRイオン源の投入

RILAC増強計画



GARIS & GARIS II

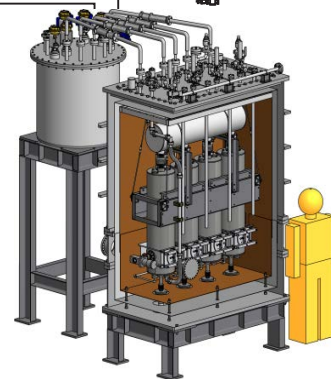


28GHz 超伝導
ECRイオン源



大強度化

高加速勾配



超伝導線形加速器

$E \sim 6 \text{ MeV/u}$, $M/q \sim 6$
 $\Rightarrow 10 \text{ pA}$

新領域開拓の
原動力にする



謝辞:

森田浩介氏(理研/九大)

羽場宏光氏, 森本幸司氏(理研)

SASオペレータの皆さん

関連文献:

- ・矢野, 加瀬, 森田, 理研ニュース2004年11月号
- ・森田浩介, 日本物理学会誌 60, No. 9 (2005) 698
- ・加瀬昌之, 日本加速器学会誌 13, No. 1 (2016) 1
- ・矢野安重, 日本物理学会誌 71, No. 5 (2016) 330
- ・矢野安重, 仁科記念財団 NKZ No. 55 (2015) p. 43
- ・山根一眞, 日経ビジネスオンライン 2012.10.23

加瀬昌之, 「加速器」 13 (2016) 1. より

参考文献・画像引用:

- ・馬場宏, RADIOISOTOPES 49, 305-317 (2000).
- ・IUPACホームページ <https://iupac.org>
- ・理研ホームページ <http://www.nishina.riken.jp/113/>
- ・FLNRホームページ http://flerovlab.jinr.ru/flnr/dribs_1.html、<http://flerovlab.jinr.ru/flnr/u400.html>
- ・FAIRホームページ <http://www.fair-center.eu/news-events/news-view/article/gsi-accelerator-facility.html>
- ・TASCAホームページ <https://www-win.gsi.de/tasca/facility/facility.html>
- ・SHIPホームページ https://www.gsi.de/en/work/research/nustarennanustarennadivisions/she_phisik/experimentel_setup/ship.htm
- ・LBNLホームページ <http://cyclotron.lbl.gov/ionsources>
- ・<http://www.nndc.bnl.gov/chart/>
- ・P. Anger, HIAT2015, TUA2C01
- ・P. Gerhard et al., HIAT2015, WEA1C03