The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	放射能の基礎とニホニウムの発見
Author(s)	篠原, 厚
Citation	高大連携物理・化学教育セミナー報告書. 2019, 31
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/77169
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

高大連携物理・化学教育セミナー
2019.12.7 於基礎工学部国際棟（シグマホール）

放射能の基礎と ニホニウムの発見

篠原　厚
大阪大学　大学院理学研究科/放射線科学基盤機構

本日の予定（コンテンツ）

1. はじめに（放射能の発見と物質観の拡大）
2. 放射化学の研究とは（研究室のちょっと宣伝）
3. 放射線・放射能の基礎
4. ニホニウムの発見（超重核の合成、ニホニウム誕生とその意義）
5. 新重元素の化学（単一原子の化学とは、最重元素の化学へ（当グループの研究を中心に））
6. おわりに

１．はじめに

■放射能の発見と物質観の拡張

■　サブアトムの世界の開闢

古代文明の根元論：古代ギリシャ、中国、インド
BC.4c　アリストテレス（5元質）、、、自然哲学
中世　錬金術
17c　近代化学の芽生え：　ボイル　元素的概念
　→ラヴォアジェ（燃焼理論、質量保存則）
　→（相次ぐ元素の発見）→　元素の性質－重さの周期性
18c　ドルトン（原子説）　　↓
1869年　メンデレーエフ　元素の周期表の提案
　（→元素の性質の予言、未知元素の予言(Ga,Sc,Ge)　）

■ サブアトムの世界の開闢

1911年　ラザフォードの原子核の発見
1913年　ボーアの原子モデル
（放射性壊変の概念が確立してくる）
1932年　チャドウィックの中性子の発見
1938年　ハーン＆ストラスマンの核分裂の発見
1942年　フェルミによる人類初の原子炉（CP-1）

19c末　放射能の発見　→　原子核、電子の発見　→原子の構造

サブアトムの世界の開闢
（核エネルギーの解放）

素粒子←原子核←

20c下旬　素粒子の標準モデル（クォーク・レプトンモデル）

20c　放射化学と言う分野の出現、発展、縮小？

2．放射化学の研究とは
（研究室のちょっと宣伝）

■ 放射化学とは
■ 放射化学の研究（研究室のテーマを例に）

■ 元素の周期表

■ 天然の放射性元素　■ 人工放射性元素

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H	1 H															2 He	2 He
2	3 Li	4 Be	4 Be										5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg	12 Mg										13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rn	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
-	-																	

*Lanthanoids	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
**Actinoids	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

■ 放射化学とは（私見的位置付け）

放射性同位体や原子核を扱う化学、日本では無機化学の一分野？

領域：　素粒子・原子核　原子（電子）　分子　クラスター　マクロ（生命、環境、、、）

核化学・放射化学

主題：　1）核現象の化学的研究
→ 本来の核化学：　核反応、核分裂、核壊変、（核分光）
新規核現象の探求

2）核現象による化学研究
→ ホットアトム化学、トレーサー技術、放射化分析、Ps、μSR、
メスバウァー分光、環境、年代測定、宇宙・地球科学

3）物質の拡張　→ 放射化学の歴史
→ 新元素の合成と化学(TRU、TRA、SHE)、放射性元素の化学
人工原子（エキゾチックアトム）、

福島問題

0）応用　→　医学・生命科学、エネルギー、工業利用、、、核鑑識
原子力（炉化学、バックエンド、、、廃炉）

■ 主な研究テーマ 一覧

1. 重・超アクチノイド元素の核的・化学的性質
（単一原子の化学、超重元素の化学、核と電子系の相互作用）

2. エキゾチックアトム（ミュオン原子・分子）の化学
（第2世代物質系の化学を目指して、新奇元素分析）

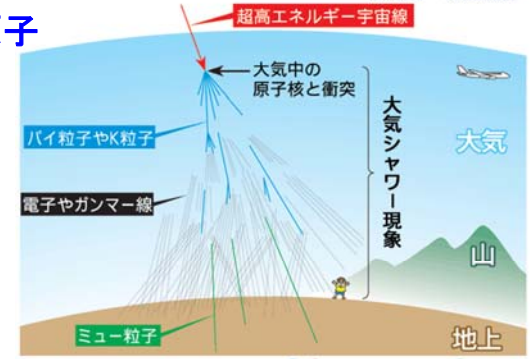
3. 放射性核種の環境動態－福島原発事故から－
（放射性核種の環境動態、化学状態の解明）

4. 核医学利用のための新規放射性核種の開発
（α線内用療法、^{124}I、^{62}Znなど（イメージング）、^{99m}Tc製造法）

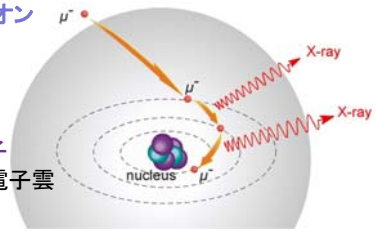
2. エキゾチックアトムの化学

■ ミュオンとミュオン原子

地表に到達する宇宙線の
主な成分はミュオン
掌に毎秒1個程度の強度
量子ビーム利用には大量生成
可能な大強度加速器が必要



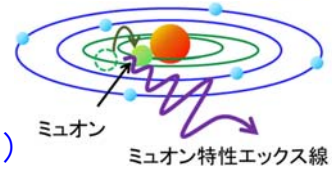
加速器による
ミュオンなど様
々な粒子生成



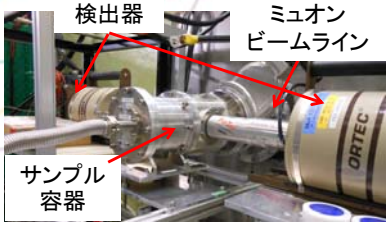
原子
1s電子雲

ミュオン原子の形成
・エネルギーは200倍
・軌道半径は1/200

負ミュオンによる非破壊で
元素深度分布の分析に成功

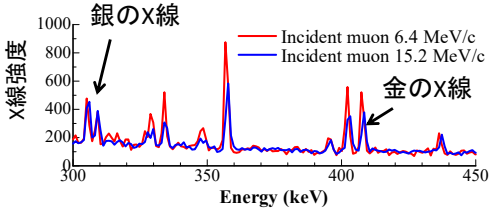


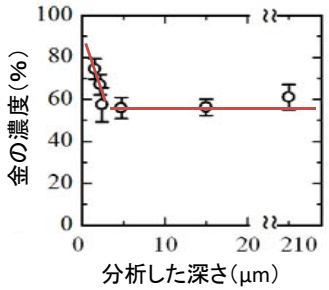
■ 研究例（小判の元素分析）



MUSEでの実験の様子

分析した
天保小判
（19世紀）





小判の金の濃度は表面
数μmだけが高い！

3. 放射性核種の環境動態
－福島原発事故への対応－

2011.3.11. 東日本大震災、津波
福島第一原子力発電所電源喪失
2011.3.12. ～ 放射性物質の大量放出

原子炉の
安全神話

崩壊

炉心溶融（メルトダウン）

^{137}Cs放出量:
～15 PBq

環境汚染
環境調査、被爆調査

環境放射能
/環境動態/廃炉関連研究

汚染の未来予測
/環境回復へ

放射能・放射線教育の見直し

基礎研究・学術としての展開・継続
（大学の研究分野として定着）

廃炉へ

人材育成

学生にとって
魅力有る分野へ

建設中含め世界で500基超の原子炉

40年間続く課題・日本の研究力の真価 ⇨ 世界における日本の責任

■ 研究の目的

放射性物質は、事故時にどうやって、どれぐらい出たのか？
今後の環境挙動は？

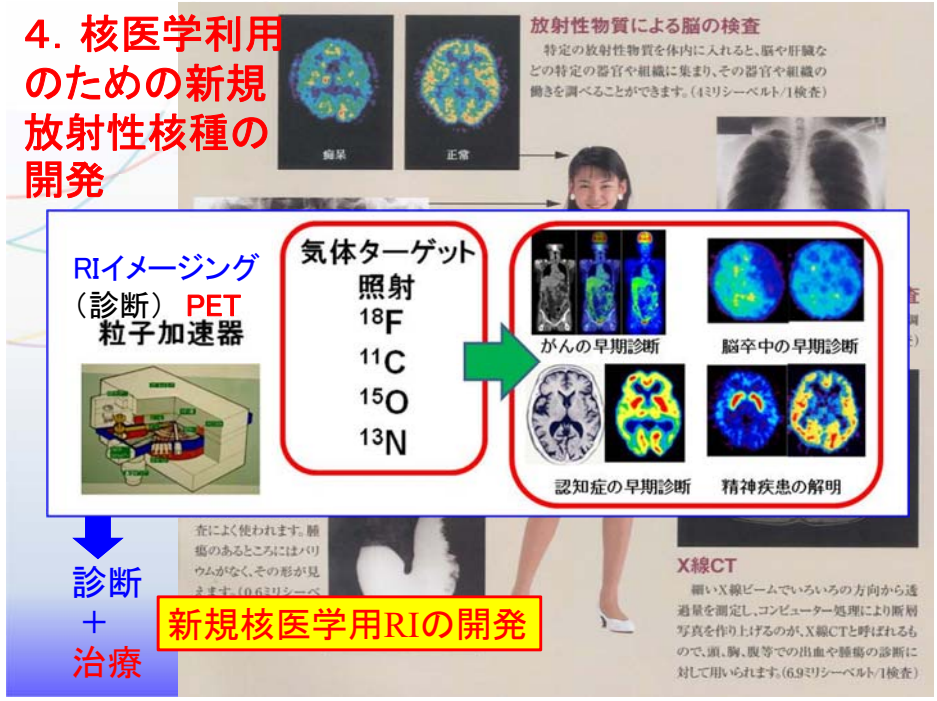
環境試料から
炉内事象へ迫る

一次放出の
化学形態決定
と炉内事象

放射化学から
のアプローチ

炉内事象、
未来予測、環境回復

4. 核医学利用のための新規放射性核種の開発



■ アルファ線核医学治療法

大阪大学 OPEN 2021

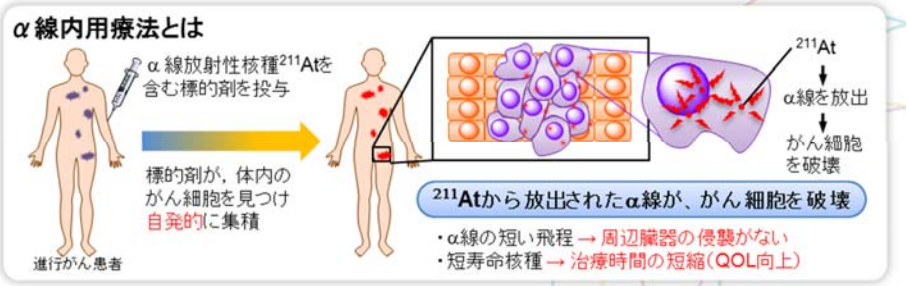
背景・必要性

・がん患者の1/3は、初診時に有効な治療法のない初診時進行がん.
・低コストで高齢者にとっても優しい治療法の開発が急務.
・難治性がんを主な対象とし、副作用の低い治療法として、アルファ線核医学治療法に大きな期待が寄せられている.

現状

・ベータ線内用療法
（患者負担大、施設不足）
・^{223}Raによる治療開始
（^{225}Ac、^{211}Atに期待、世界で競争）

加速器製造可能
RI製造-分子合成-核医学-病院



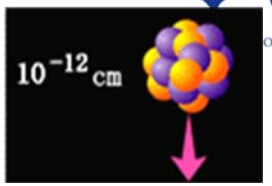
大阪大学 OPEN 2021

3. 放射線・放射能の基礎

- ■ 原子核の質量と安定性
- ■ 放射性壊変の様式と速度
- ■ 核反応の基礎

■ 放射線・放射能の基礎

●原子核の概要

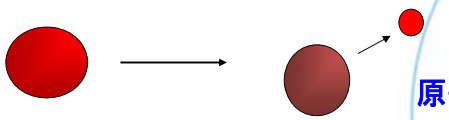


原子核の大きさ:　（原子：10^{-10}m）
核半径＝$r_0A^{1/3}$、r_0＝1.2×10^{-15}m

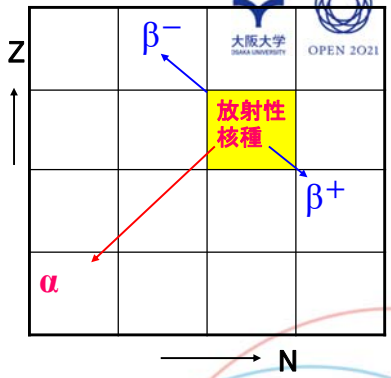
原子核の形:　おおよそ球形　（球形から変形した核もある）

原子核の構造: 陽子（Z）＋中性子（N）から成る
電気を帯びた液滴　ー原子核の質量
原子のような殻構造　ー魔法数（2,8,20,28,50,82,,,）

放射性壊変：不安定な原子核が放射線放出を伴いより安定な原子核に変わる。（←原子核の安定性、固有の半減期）



●主な放射性壊変



・α壊変:　$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}He$　（α）

（重い原子核で起こる）
ヘリウムの原子核（^{4}He）を放出してより安定な原子核になる。

・β壊変:　$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + e^- + \bar{\nu}$　（β^-）

$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + e^+ + \nu$　（β^+）

β線（電子）を放出することによりより安定な原子核になる
（核の電荷がアンバランスな原子核ー陽子過剰核、中性子過剰核）

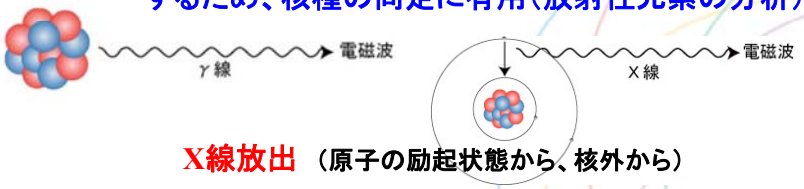
・自発核分裂:　$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A_1}_{Z_1}Y_1 + {}^{A_2}_{Z_2}Y_2 + xn$

（$A=A_1+A_2+x$、　$Z=Z_1+Z_2$）

非常に重い原子核領域で、自発的に核分裂を起こす。
対称核分裂（$A_1=A_2$）、非対称核分裂（$A_1>A_2$）
（例えば、^{252}Cf、^{238}U、、、）

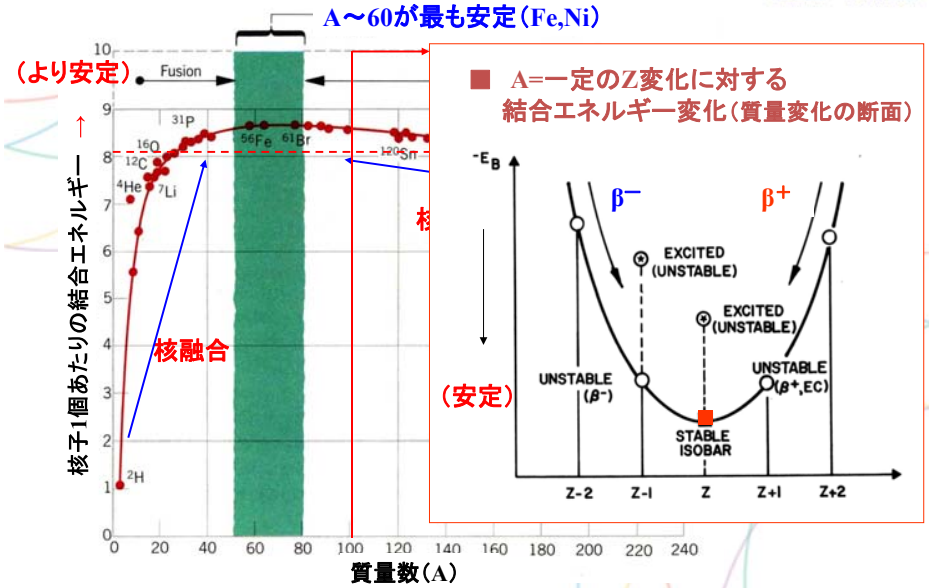
・γ（ガンマ）線放出:　$^{A}_{Z}X^* \rightarrow {}^{A}_{Z}X + \gamma$

励起状態の原子核が光子（γ線）を出して安定な状態になる。
→　原子核に固有（核構造を反映）のガンマ線を放出するため、核種の同定に有用（放射性元素の分析）。



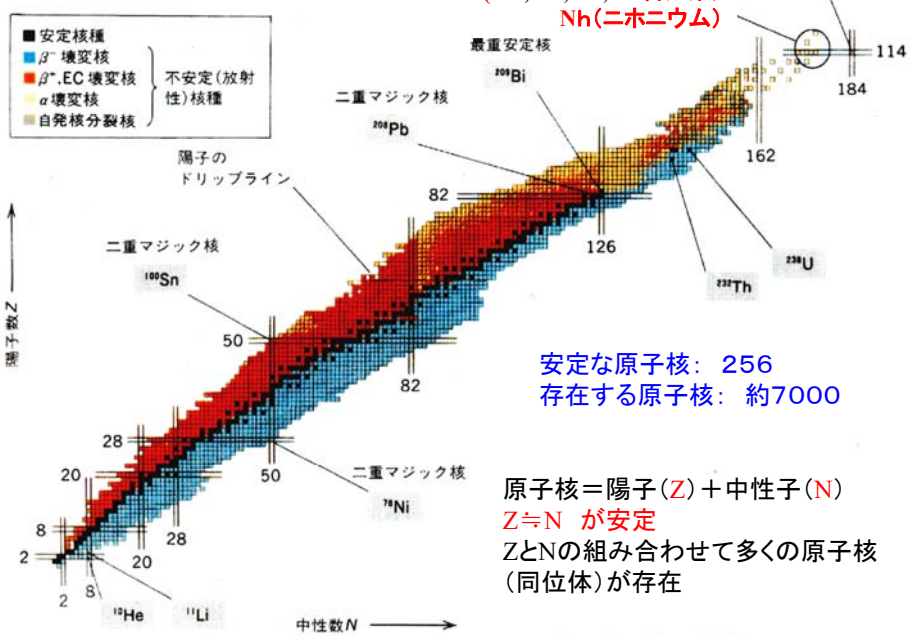
X線放出　（原子の励起状態から、核外から）

核子1個当たりの結合エネルギーの変化（原子核の安定性）



● 核種表 ＜確認された原子核＞

新発見の超重元素
(118,117,115,113番元素)
Nh(ニホニウム)



安定な原子核： 256
存在する原子核： 約7000

原子核＝陽子(Z)＋中性子(N)
Z≒N が安定
ZとNの組み合わせて多くの原子核(同位体)が存在

放射線・放射能の基礎のまとめ

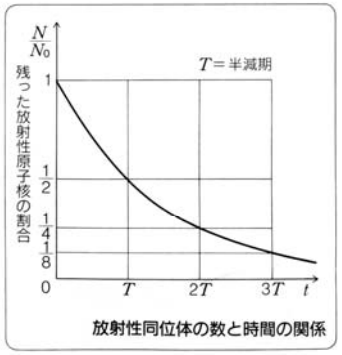
放射能 ：放射壊変する強さ：D　1壊変/秒=1Bq(ベクレル)

$D = \lambda \times N$　(λ:壊変定数)

半減期(T) ：放射性壊変により原子数が初期量の半分になる時間

$T = \ln 2/\lambda \fallingdotseq 0.693/\lambda$

壊変則 ：$N = N^0 e^{-\lambda t}$　　$N = N_0\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}}$

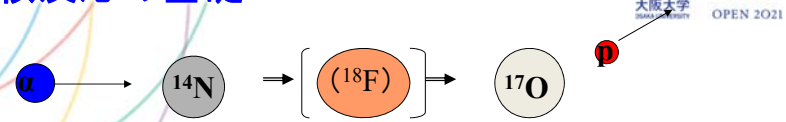


放射性同位体の数と時間の関係

●表4　放射性同位体の半減期
(＊は人工放射性同位体)

原子核	崩壊の型	半減期
＊ $^{3}_{1}H$	β	12.3 年
$^{14}_{6}C$	β	5.73×10^{3}年
＊ $^{32}_{15}P$	β	14.28 日
$^{40}_{19}K$	β	1.27×10^{9}年
＊ $^{60}_{27}Co$	β	5.271 年
＊ $^{90}_{38}Sr$	β	28.8 年
＊ $^{131}_{53}I$	β	8.040 日
$^{226}_{88}Ra$	α	1.60×10^{3}年
$^{238}_{92}U$	α	4.468×10^{9}年

■ 核反応の基礎



・反応の標記： ex. $^{14}N(^{4}He, p)^{17}O$

$^{14}N + ^{4}He \rightarrow ^{17}O + p$

ターゲット ＋ 入射粒子 → 生成核 ＋ 放出粒子

・核子数(A)保存：14 ＋ 4 ＝ 17 ＋ 1
・電荷保存： 7 ＋ 2 ＝ 8 ＋ 1

・入射粒子のエネルギー： 原子核と核子(もしくは原子核同士)が核力の範囲まで近づく(触れあう)必要があるため、(中性子反応以外は)クーロン反発に打ち勝つ高エネルギーが必要。(一般に数MeV以上、粒子加速器利用)
・反応の確率： 原子核の大きさが原子の1万分の1以下であるため、衝突の確率は非常に小さい。(反応の断面積：σ)
・反応のQ値： 化学反応と同様、反応に伴いエネルギーの授受がある。

■ 用語

A　電荷
El
Z　N

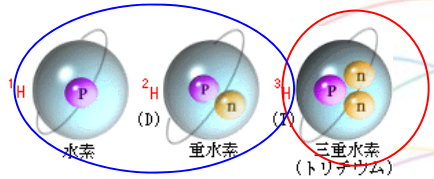
$^{12}_{6}C$

原子番号(Z)：原子核に陽子の数
(＝電子の数→化学的性質)

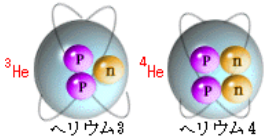
質量数(A)：原子核の陽子と中性子の数の和(A=Z+N)

核種：ZとNで決められて原子核、　核子：陽子や中性子

同位体(アイソトープ)：
同じZ(同じ元素)で質量数の異なるもの



●陽子と中性子の組み合わせ
↓
安定同位体→安定元素
放射性同位体

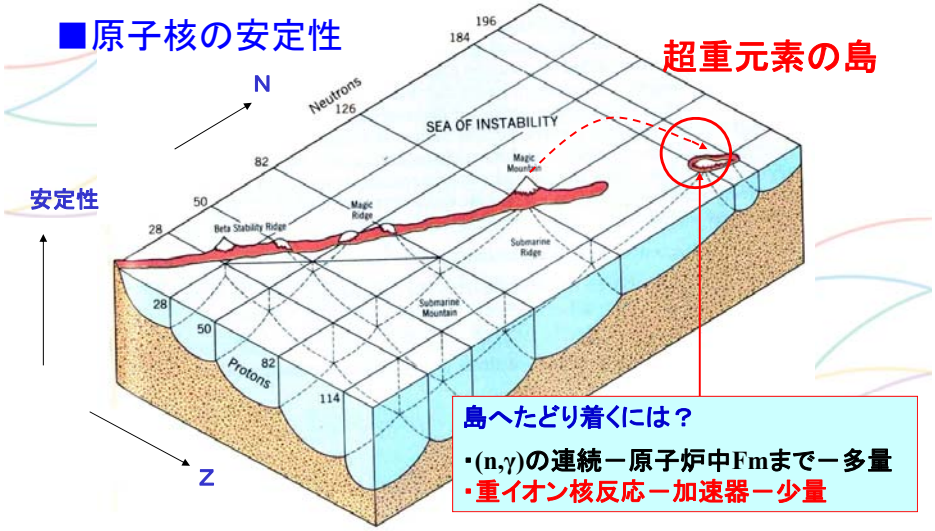


4. ニホニウムの発見

1. 超重核の核合成
   - 超重の安定性と核反応
   - 実験装置
2. ニホニウム誕生とその意義
   - ニホニウムの合成
   - 命名権の獲得とニホニウムの意義

1. 超重核の合成

■原子核の安定性

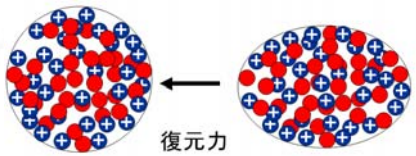


島へたどり着くには？

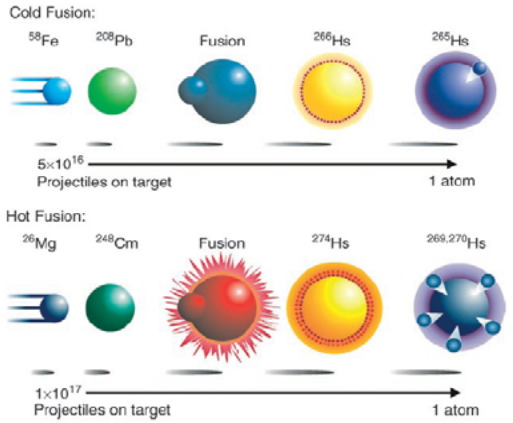
・(n,γ)の連続ー原子炉中Fmまでー多量

・重イオン核反応ー加速器ー少量

核合成の問題



陽子と中性子は強い力で結びついており、原子核は球に



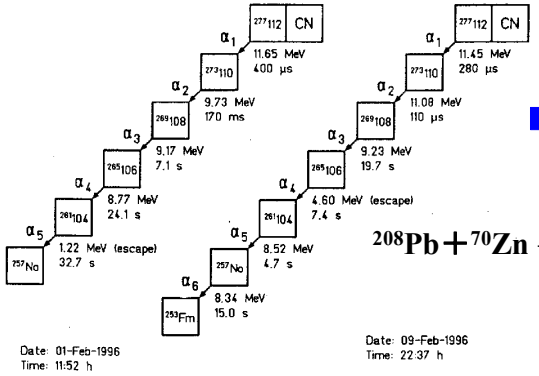
核分裂と競争

→冷たい核融合反応
(Cold Fusion)

→熱い核融合反応
(Hot Fusion)

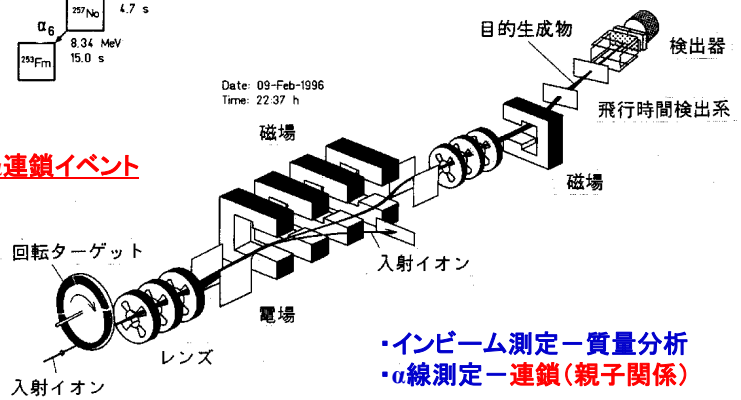
大阪大学「理学への招待」(森田浩介)

■ 重元素生成実験法と測定原理



観測されたα連鎖イベント

$^{208}Pb + ^{70}Zn \rightarrow ^{277}112 + 1n$



・インビーム測定ー質量分析

・α線測定ー連鎖(親子関係)

● First Discovery of Each Transuranium Element

Z	sym.	Reaction	Investigators	
93	Np	$^{238}U(n,\gamma)^{239}U \rightarrow {}^{239}Np$	MacMillan	1939-1940
94	Pu	$^{238}U(d,2n)^{238}Np \rightarrow {}^{238}Pu$	Seaborg, MacMillan	1940
95	Am	$^{239}Pu(2n,\gamma)^{241}Pu \rightarrow {}^{241}Am$	Seaborg et al.	1944
96	Cm	$^{239}Pu(\alpha,n)^{242}Cm$	Seaborg et al.	1944
97	Bk	$^{241}Am(\alpha,2n)^{243}Bk$	Seaborg et al.	1949
98	Cf	$^{242}Cm(\alpha,n)^{245}Cf$	Seaborg et al.	1950
99	Es	$^{238}U + 15n \rightarrow {}^{253}Es$	Seaborg et al.	1953
100	Fm	$^{238}U + 17n \rightarrow {}^{255}Fm$	Seaborg et al.	1953
101	Md	$^{253}Es(\alpha,n)^{256}Md$	Seaborg et al.	1955
102	No	$^{246}Cm(^{12}C,4n)^{254}No$	Seaborg et al.	1958
103	Lr	$^{252}Cf(^{11}B,6n)^{257}Lr$	Ghiorso et al.	1961
104	Rf	$^{242}Pu(^{22}Ne,4n)^{260}Rf$	Flerov et al.	1964
		$^{249}Cf(^{12}C,4n)^{257}Rf$	Ghiorso et al.	1969
105	Db	$^{243}Am(^{22}Ne,4n)^{261}Db$	Flerov et al.	1967, 1971
		$^{249}Cf(^{15}N,4n)^{260}Db$	Ghiorso et al.	1970
106	Sg	$^{249}Cf(^{18}O,4n)^{263}Sg$	Ghiorso et al.	1974

● First Discovery of Each Transuranium Element

Z	sym.	Reaction	Investigators	
107	Bh	$^{209}Bi(^{54}Cr,n)^{262}Bh$	Armbruster et al.	1981
108	Hs	$^{208}Pb(^{58}Fe,n)^{265}Hs$	Armbruster et al.	1984
109	Mt	$^{209}Bi(^{58}Fe,n)^{266}Mt$	Armbruster et al.	1984
110	Ds	$^{208}Pb(^{62}Ni,n)^{269}Ds$	Hofmann et al.	1994
111	Rg	$^{209}Bi(^{64}Ni,n)^{272}111$	Hofmann et al.	1994
112	Cn	$^{208}Pb(^{70}Zn,n)^{277}112$	Hofmann et al.	1996
113		$^{243}Am(^{48}Ca,xn)^{291-x}115(\alpha)^{287-x}113(x=3,4)$	Oganessian et al.	2003
	Nh	**$^{209}Bi(^{70}Zn,n)^{278}113$**	Morita et al.	2004
114	Fl	$^{244}Pu(^{48}Ca,xn)^{292-x}114$ (x=3,4)	Oganessian et al.	1999-2000
115	Mc	$^{243}Am(^{48}Ca,xn)^{291-x}115$ (x=3,4)	Oganessian et al.	2003
116	Lv	$^{248}Cm(^{48}Ca,4n)^{292}116$	Oganessian et al.	2000
117	Ts	$^{249}Bk(^{48}Ca,3n)^{294}117$	Oganessian et al.	2010
118	Og	$^{249}Cf(^{48}Ca,3n)^{294}118$	Oganessian et al.	2002

2. ニホニウムの誕生

祝　2015.12.31命名権獲得！

祝　2016.11.30命名：Nh

2004年に理化学研究所の森田グループが「発見」、80日間加速器で核反応実験を続けて113番原子1個の合成に成功。その後120日後にもう1個合成し、さらに実験を続けたが、8年間見つからなかった。
しかし、2012年8月12日についに3個目の合成に成功した。実に延べ553日の実験の結果である。国際委員会で認定されれば命名権が与えられる。

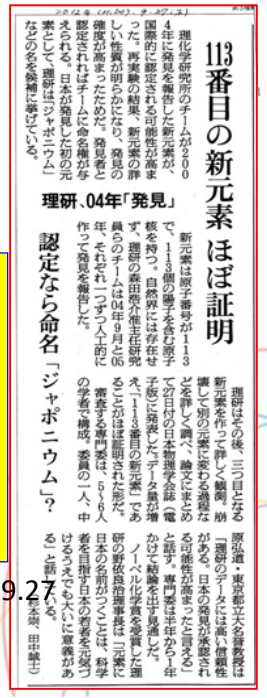
毎日新聞　2012.9.27

「国、科学界の悲願」

理研チーム　成果に感無量

「日本発」元素 周期表に

朝日新聞　2012.9.27



113番目の新元素 ほぼ証明

理研、04年「発見」

認定なら命名「ジャポニウム」？

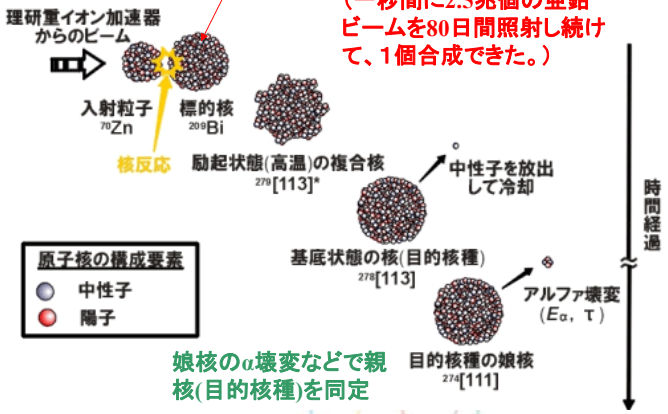
資料の一部は、加治・森田（理研）両氏の資料を許可を得て抜粋

■ 理化学研究所における113番元素の合成実験

超重核合成の過程

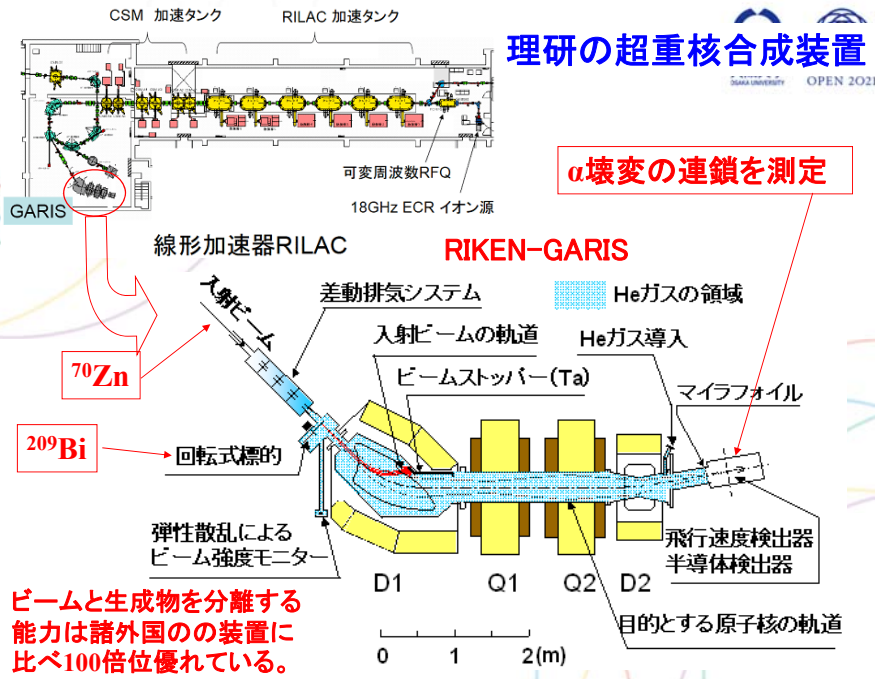
核融合反応
（Cold Fusion）

出来るだけ励起しないように融合させる。→　反応確率が極端に小さい
（一秒間に2.5兆個の亜鉛ビームを80日間照射し続けて、1個合成できた。）



娘核のα壊変などで親核(目的核種)を同定

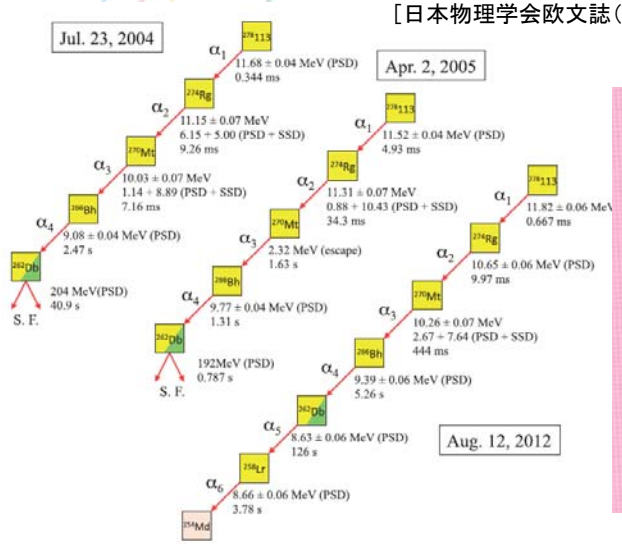
理研の超重核合成装置



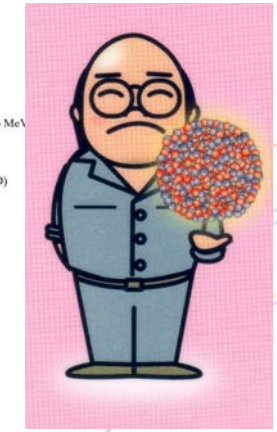
ビームと生成物を分離する
能力は諸外国のの装置に
比べ100倍位優れている。

● 観測されたα鎖(113番元素の証明)

J. Phys. Soc. Jpn., 81, 103201 (2012)
[日本物理学会欧文誌(81巻)]



理研の森田さん



■ 命名権はどのようにして決めるか
ー日本初、アジア初の快挙ー

元素の命名に関する国際委員会
(IUPAC＋IUPAP＝Joint Working Party)
5～6名の世界的専門家による評価 → 命名権を決定

何度か結論が延期され厳しい状況がしばらく続いた、、、
→ついに、来るべき時が、、、

2015年12月31日 命名権の発表(元素認定)
113=日本、115=ロシア、117=アメリカ、118=ロシア

2016年11月30日 元素名の決定
113=ニホニウム(Nh)、
115=モスコビウム(Mc)、117=テネシン(Ts)、118=オガネソン(Og)

● アジア初，日本発の新元素

INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY
Advancing Chemistry Worldwide

President Prof. Natalia P. Tarasova (Russia)
Vice President Prof. Qi-Feng Zhou (China)
Secretary General Prof. Richard Hartshorn (New Zealand)
Past President Dr. Mark C. Cesa (USA)
Treasurer Mr. Colin J. Humphris (UK)
Executive Director Dr. Lynn M. Soby (USA)

For Immediate Release 30 November 2016 2016年11月30日

IUPAC Announces the Names of the Elements 113, 115, 117, and 118

Elements 113, 115, 117, and 118 are now formally named nihonium (Nh), moscovium (Mc), tennessine (Ts), and oganesson (Og)

Research Triangle Park, NC (USA): On 28 November 2016, the International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) approved the names and symbols for four elements: nihonium (Nh), moscovium (Mc), tennessine (Ts), and oganesson (Og), respectively for element 113, 115, 117, and 118.

命名記念式典（2017年3月14日）

原子番号	発見国	元素名 英語	元素名 日本語	元素記号
113	🇯🇵	nihonium	ニホニウム	Nh
115	🇷🇺🇺🇸	moscovium	モスコビウム	Mc
117	🇷🇺🇺🇸	tennessine	テネシン	Ts
118	🇷🇺🇺🇸	oganesson	オガネソン	Og

5. 新元素の化学

1. 超重元素化学（阪大グループの研究を中心に）
   - 単一原子の化学、特徴と実験法
   - 我が国の超重元素化学研究（Rfイオン交換挙動、Noの電気化学、Rfの共沈挙動）
2. 次世代へ

1. 超重元素の化学（阪大Grを中心に）

（単一原子の化学、超重元素の第2世代化学を目指して）

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
–																		
*Lanthanoids			57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
**Actinoids			89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	

赤：放射性元素
Np～：人工元素

化学的研究最前線（気相化学：Fl、溶液化学：Sg）
（RIKEN, GSI, PSI, LBNL, Dubna, JAERI）

第7周期における新しい化学の開拓

第8周期へ・・・＞g-電子の化学

重元素化学の特徴
↓
短寿命・放射性
単一原子の化学
“Atom at-a-time chemistry”

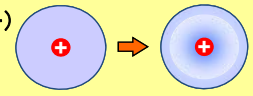
● 超重元素化学の興味→化学のフロンティア

超重元素の化学的性質：錯形成定数，酸化還元電位，イオン半径など

- 新元素の化学的性質，周期性，電子構造
- 第7周期の化学，6d電子の化学結合，相対論効果が化学結合に与える影響
- 加速器オンラインの単一原子の化学
  （クロマトグラフ法、溶媒抽出、*単一原子電気化学、共沈法*、、、）

直接的な効果

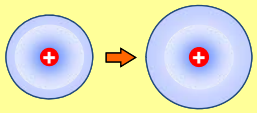
sやp軌道（内殻電子）が収縮



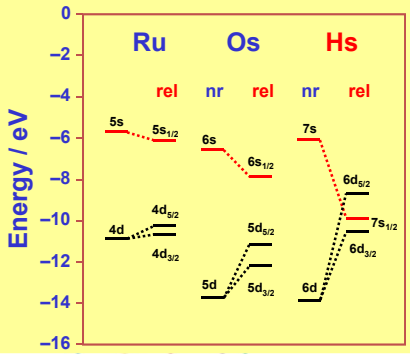
$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-(v/c)^2}} \qquad a_B = \frac{\hbar^2}{mc^2} = a_B^0\sqrt{1-(v/c)^2}$$

間接的な効果

dやf軌道（外殻電子）が膨張



原子価電子のエネルギーレベル

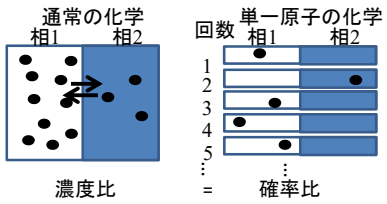


●超重元素化学の方法論：加速器オンライン実験

重元素実験における制限

重元素は加速器でのみ生成できる人工元素
低生成率、短寿命
➡単一原子レベルしか扱えない(同定：α線測定)

単一原子化学の概念図

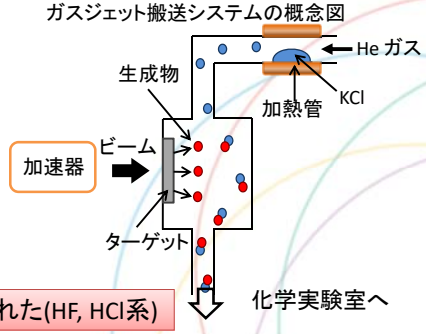


加速器オンライン実験概要

加速器により元素を合成
↓
KCl/Heガスジェットにより
化学実験室へ搬送
↓
化学実験室
溶液化(溶液化学の場合)
↓
化学操作、α線測定

実験操作を迅速に、多数回繰り返し行う。
(自動実験装置が必要)

ガスジェット搬送システムの概念図



重元素化学では主に**クロマト法**で研究された(HF, HCl系)

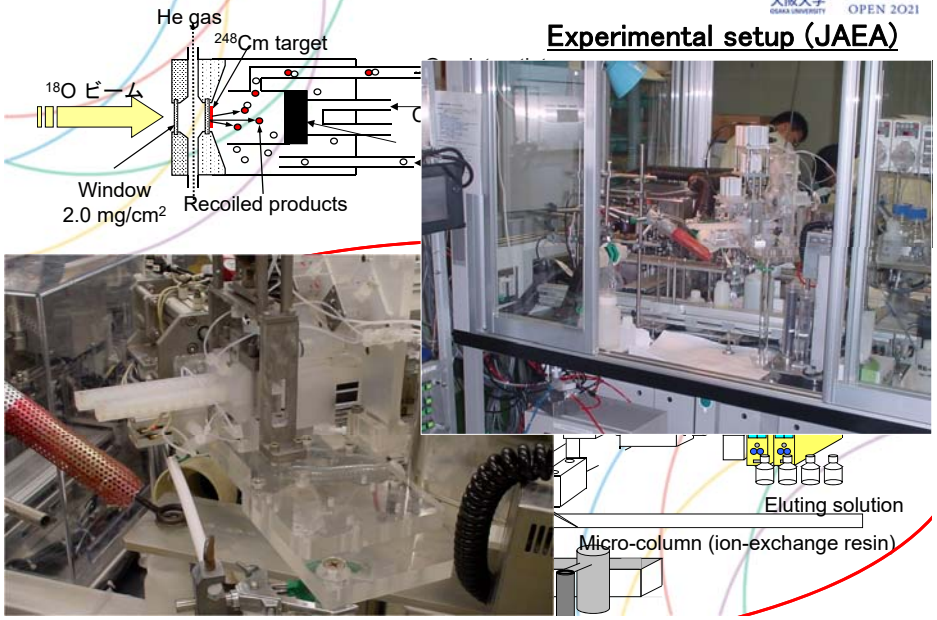
■ 化学的研究に適した超重元素の生成

化学的研究で使用される超重核種の生成量(トップレベルの加速器)

原子番号	核種	半減期(秒)	合成のための核反応	生成断面積(nb)	生成率*	文献
104	^{257}Rf	4.0	^{208}Pb(^{50}Ti,n)	10	2 min^{-1}	10
104	^{261}Rf	78	^{248}Cm(^{18}O,5n)	13	4 min^{-1}	11
			^{244}Pu(^{22}Ne,5n)	4	1 min^{-1}	12
105	^{262}Db	34	^{249}Bk(^{18}O,5n)	6	2 min^{-1}	13
			^{248}Cm(^{19}F,5n)	1.5	0.5 min^{-1}	11
	^{263}Db	27	^{249}Bk(^{18}O,4n)	10	3 min^{-1}	13
106	^{263}Sg	0.9	^{249}Cf(^{18}O,4n)	0.3	6 h^{-1}	14
	^{265}Sg	7.4	^{248}Cm(^{22}Ne,5n)	~0.24	5 h^{-1}	15
	^{266}Sg	21	^{248}Cm(^{22}Ne,4n)	~0.025	0.5 h^{-1}	15
107	^{266}Bh	~1	^{249}Bk(^{22}Ne,5n)	0.025-0.25		16
	^{267}Bh	17	^{249}Bk(^{22}Ne,4n)	~0.07	1.5 h^{-1}	16
108	^{269}Hs	14	^{248}Cm(^{26}Mg,5n)	~0.006	3 d^{-1}	17
108	^{270}Hs	2-7	^{248}Cm(^{26}Mg,4n)	~0.004	2 d^{-1}	17
112	^{283}112	3-5 min	^{238}U(^{48}Ca,3n)	0.004	1.5 d^{-1}	18

*10^{18}原子/cm^2(約0.8 mg/cm^2 相当)のターゲットに毎秒3×10^{12}個のイオンを照射した場合

■ 日本における加速器オンライン化学実験(溶液系)



● Rfのイオン交換挙動 ―(HF system)

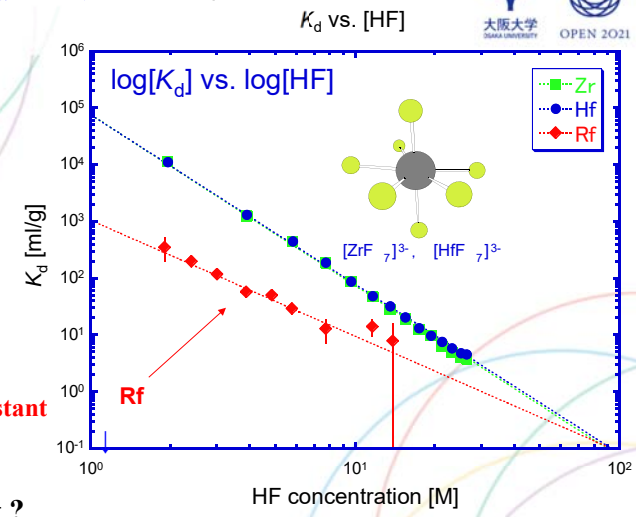
Affinity to cation-exchange resin
Zr = Hf > Rf

↓

Complex formation constant
(Chemical bond nature)

↓

Relativistic effect ?



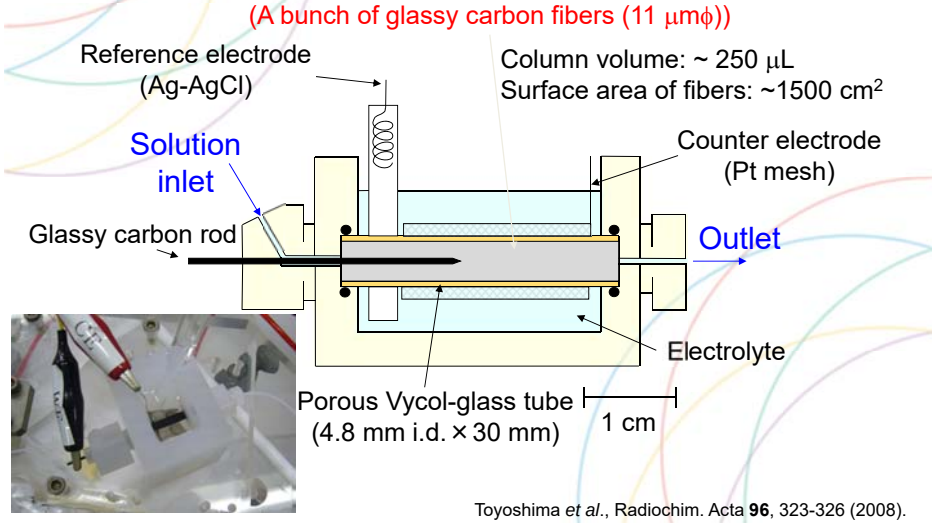
→ <2nd generation chemistry>

<J. Am. Chem. Soc. **126**, 5219 (2004)>

■単一原子電気化学の開発

(Noの酸化還元電位の測定)

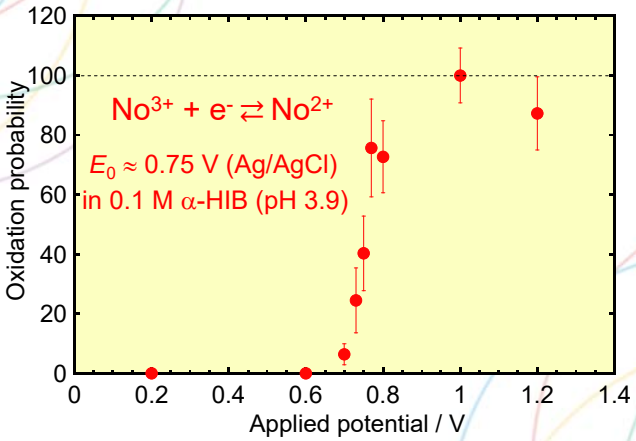
Flow electrolytic column



Toyoshima *et al.*, Radiochim. Acta **96**, 323-326 (2008).

● Noの酸化還元電位の測定

—World's first electrochemistry for the heavy element—

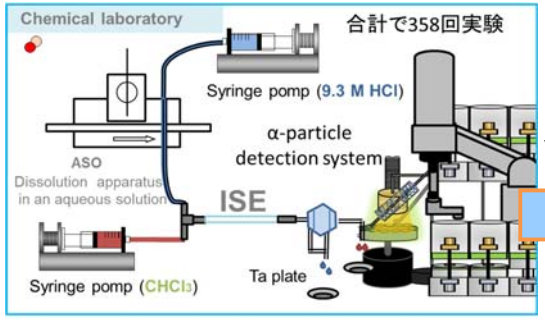


$$\text{Oxidation probability} = \frac{100 \times [No^{3+}]}{[No^{3+}] + [No^{2+}]}$$

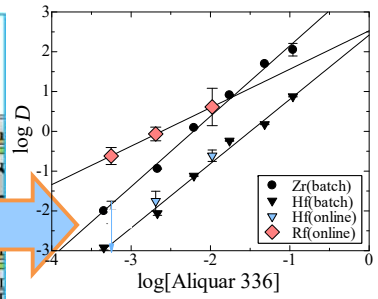
J. Am. Chem. Soc., **131**, 9180 (2009)

■ 研究例: Rfの溶媒抽出実験

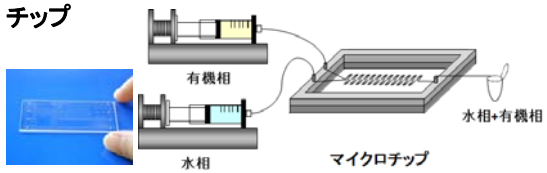
フロー抽出装置ISE



Aliquat336-HCl系の溶媒抽出
分配比D:抽出される度合い



マイクロ化学チップ



- 超重元素(Rf)の液液抽出に成功！
- 抽出された塩化物錯体の価数を決定！
- 同族元素とは明らかに異なる挙動！
- フロー化学→より短寿命(重い)元素の化学へ

2. 将来へ

■ 超重元素化学 → 第7周期元素の化学の展開 第8周期を目指して

● **長寿命の超重元素を求めて** 114？ 126？

不安定核ビームによる核合成(中性子過剰側を造る)

● **最重元素の化学に向けて** Bh、Hs、、、Nh、、126、

新方法論開発(極短寿命、単一原子化学、、、)

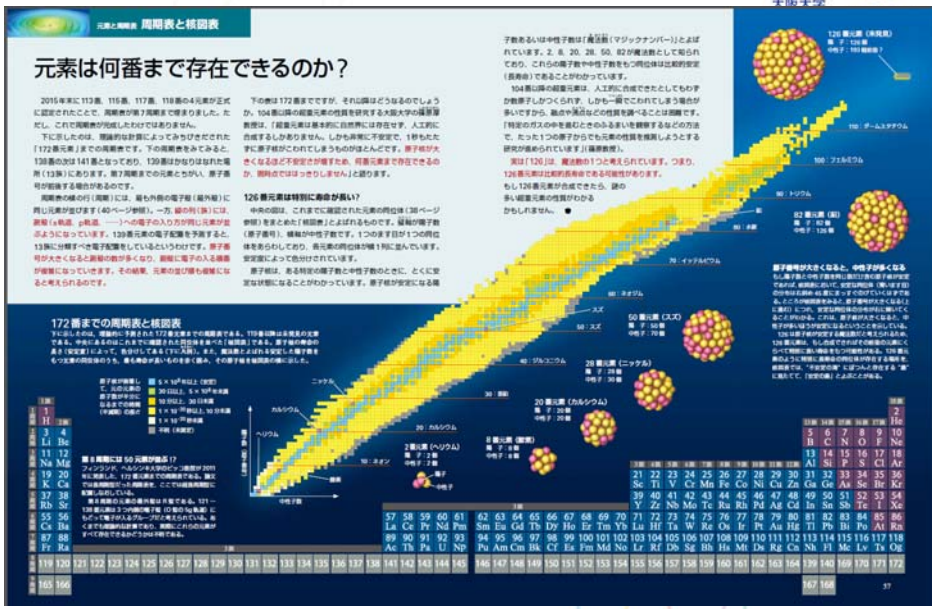
GARIS-化学(理研→世界的拠点)

● **第2世代化学の展開** 重An、Rf、Db、Sg、、、同族体

熱力学量？基盤的実験 オールジャパン体制(→メンバー減少)

↓ ↓

施設の問題 ←→ 人材育成

(放射能・放射線規制等) (基礎科学、原子力社会)

周期表の拡張、これから広がる短寿命核(元素)の化学は？