

103番元素が解く周期表のパズル ローレンシウム(Lr)のイオン化エネルギー 測定に成功

平成27年12月1日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

永目 諭一郎

究極の化学
極限の化学

希少なローレンシウム
原子が**周期表の相対論**
領域を照らし出す



立体周期表: バーの高さが各元素のイオン化エネルギー値を示す

内容

- 103番元素ローレンシウム(Lr)とは
- なぜローレンシウムか
- 究極の化学分析
- 成果の意義
- 化学界における反響
- まとめ

103番元素ローレンシウム(Lr)とは

国際純正・応用化学連合
(IUPAC) 認定の周期表

1																	18
1																	2
H																	He
3	4											5	6	7	8	9	10
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
11	12											13	14	15	16	17	18
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
19	20	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	31	32	33	34	35	36
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
55	56	57-71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
87	88	89-103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118
Fr	Ra		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	113	Fl	115	Lv	117	118

超アクチノイド元素

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

ローレンシウム
最後のアクチノイド

超ウラン元素

1940年代にグレン・シーボルクが「**アクチノイドの概念**」を提唱

原子番号100を超える**超重元素**はイオンビームを用いて人工的に合成 ⇒ 電子構造や化学的性質はほとんど調べられていない

ローレンシウム(Lr)の発見

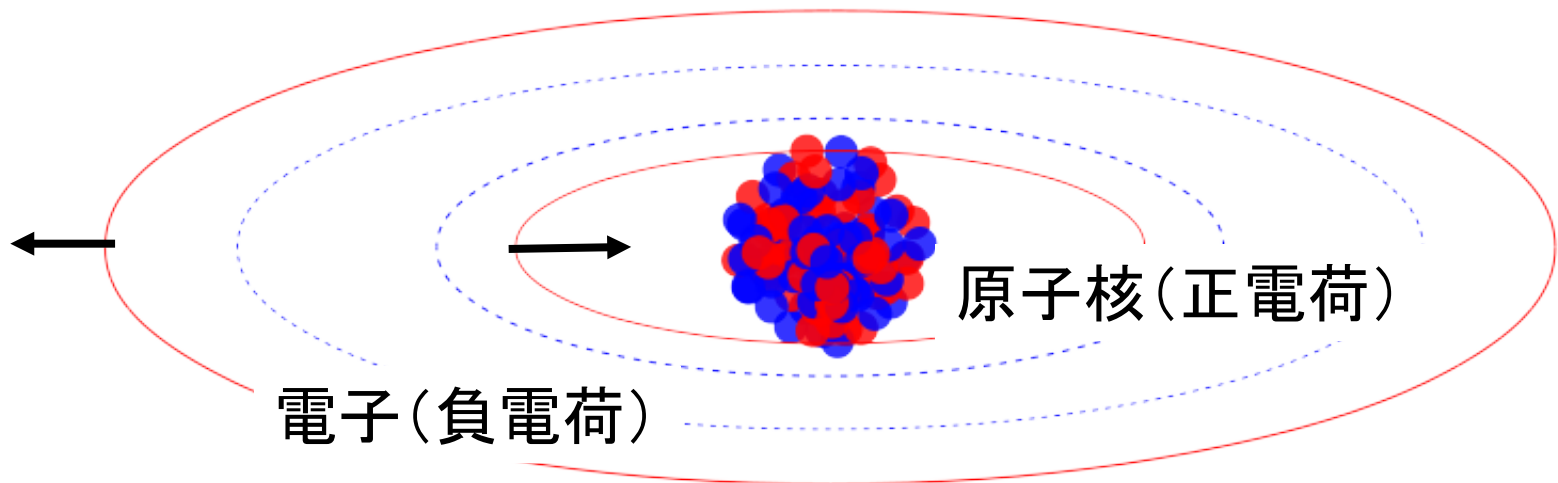
1961年 米国・ローレンスバークレー研究所で人工的に合成
アーネスト・ローレンス(Ernest O. Lawrence)

1939年 ノーベル物理学賞:

「サイクロトロンの開発と人工放射性元素の研究」



超重元素に特徴的な電子配置



元素の化学的性質: 最も外側の電子配置に支配される ⇒ 周期律

超重元素: 中心の正電荷が大きくなり、近くの電子との相互作用が強くなる

内側の電子: 光速に近い速度で運動 ⇒ **相対論領域**
⇒ 軌道半径が収縮

外側の電子: 原子核の正電荷が遮蔽される ⇒ 軌道半径が変化

⇒ 最も外側(最外殻)の電子配置に変化 ⇒ 周期律のほころび?

なぜローレンシウム(Lr)か

➤ ローレンシウムの最外殻の電子配置

- ・相対論効果により最外殻の電子配置が変化し、Lrは周期表の予想から逸脱する可能性が理論的に予言
- ・ローレンシウムの「異常性」の探索

➤ ローレンシウムの化学的研究

- ・人工的に合成：数秒間に1原子の生成率
- ・寿命が短い(ローレンシウム-256)：半減期27秒
- ・シングルアトムスケール(atom-at-a-time)
- ・実験的な検証はない

⇒ シングルアトム分析 ⇒ 究極の化学

究極の化学分析－着眼点

➤ 着目：Lrの(第一)イオン化エネルギー

- ・原子から電子1個を取り去るために必要なエネルギー
⇒ 最外殻の電子配置の情報
- ・これまでの手法では約1兆個以上の原子数が必要
⇒ 超重元素での測定は皆無 ⇒ **ブレイクスルーが必要**

➤ 着想：表面電離(イオン化)過程 + 質量分離 + 放射線(アルファ壊変)計測の複合装置

- ・オンライン同位体分離器(原子力科学研究所):
⇒ 核反応生成物をオンラインでイオン化と質量分離
新同位体の発見などで実績を有する
- ・アルファ壊変の精密測定: 1個の原子でも同定が可能

表面電離過程

熱せられた金属表面に原子を接触させると、表面を通して電子が移動し、原子がイオン化される現象

原子がイオン化される効率 (I_{eff}) は、主として次の量に依存する

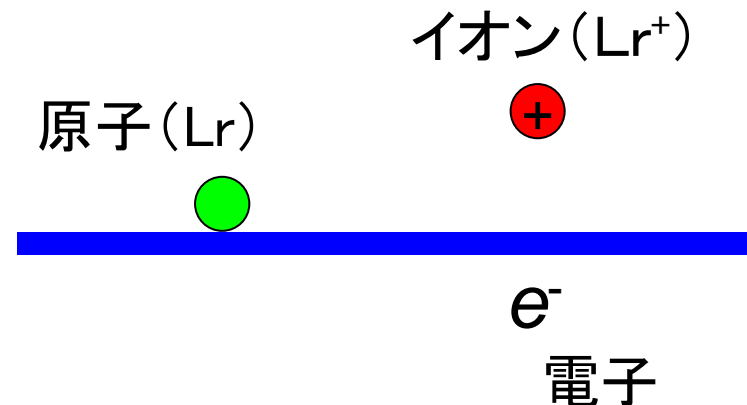
金属表面の温度 (T)

金属の種類 (仕事関数: φ)

原子のイオン化エネルギー (IP^*)

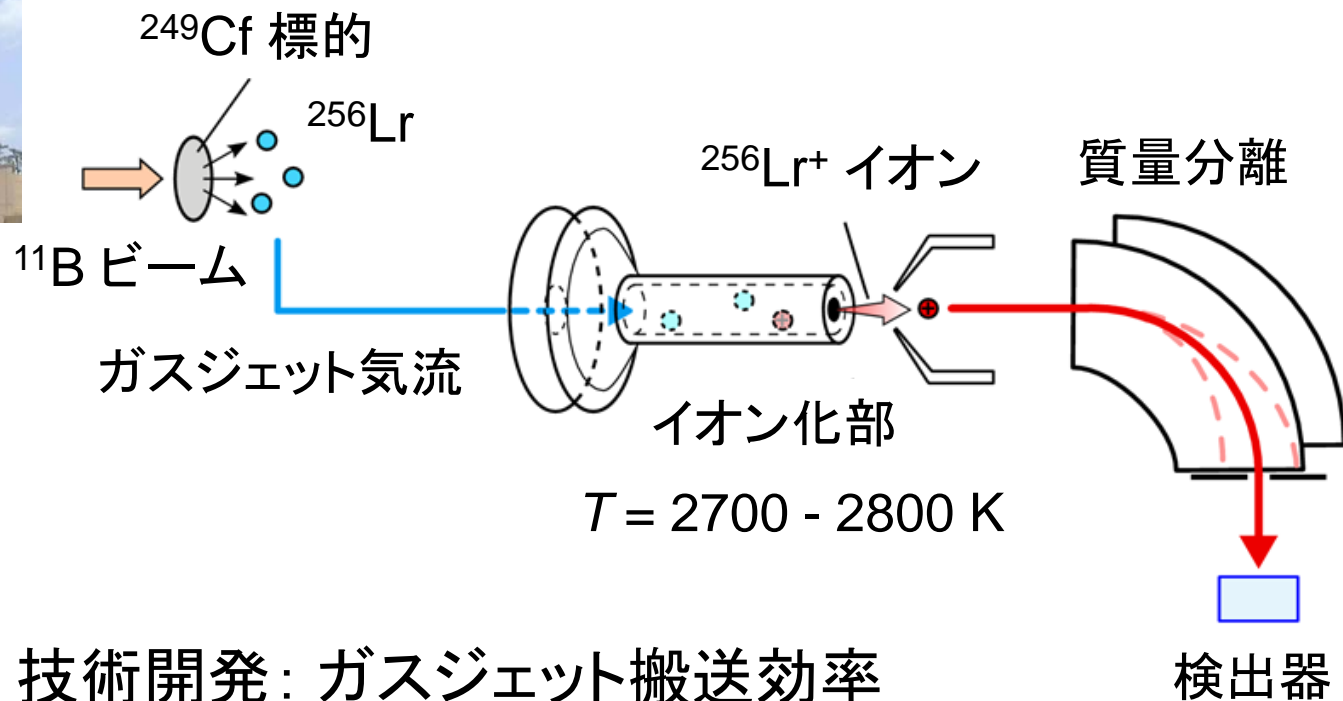
$$I_{\text{eff}} \propto \exp\left(\frac{\varphi - IP^*}{kT}\right)$$

k : ボルツマン定数



究極の化学実験

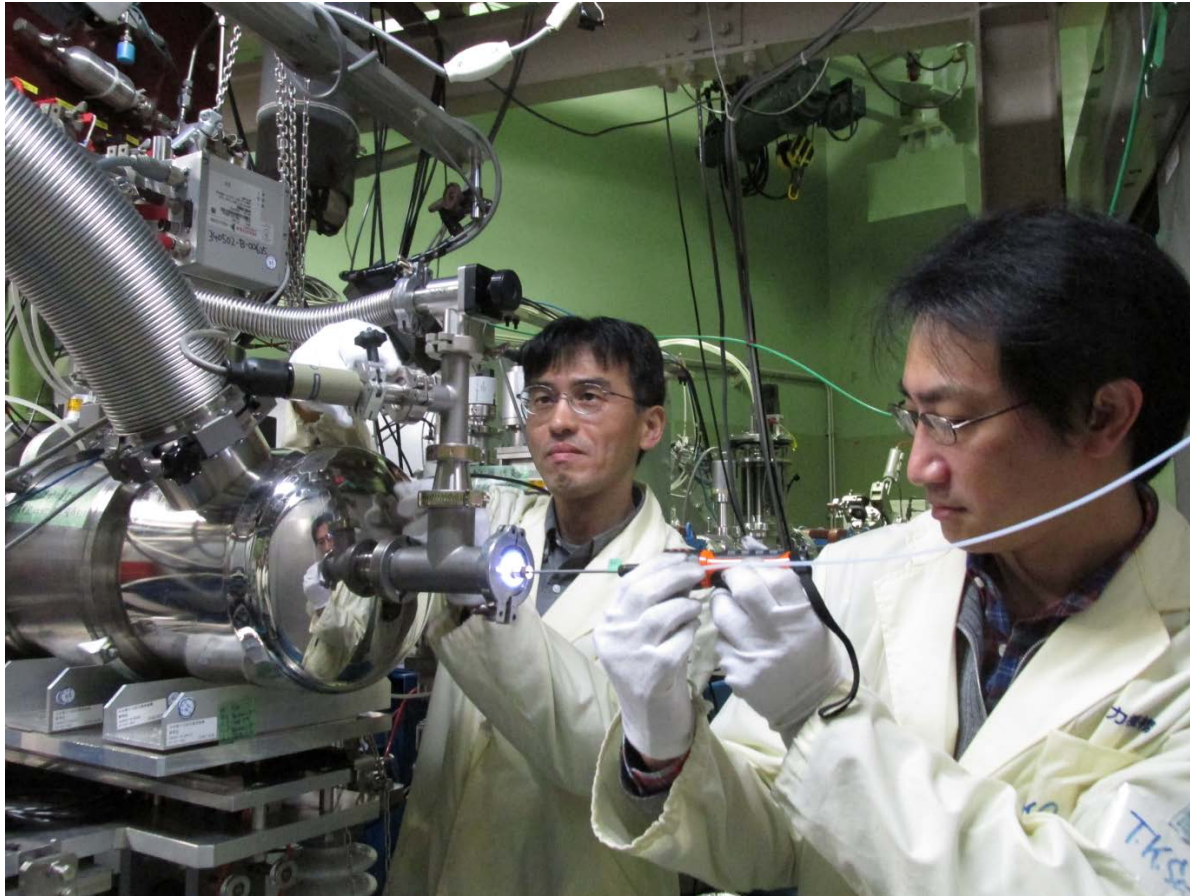
イオン化効率 (I_{eff}) の測定



原子力科学研究所
タンデム加速器

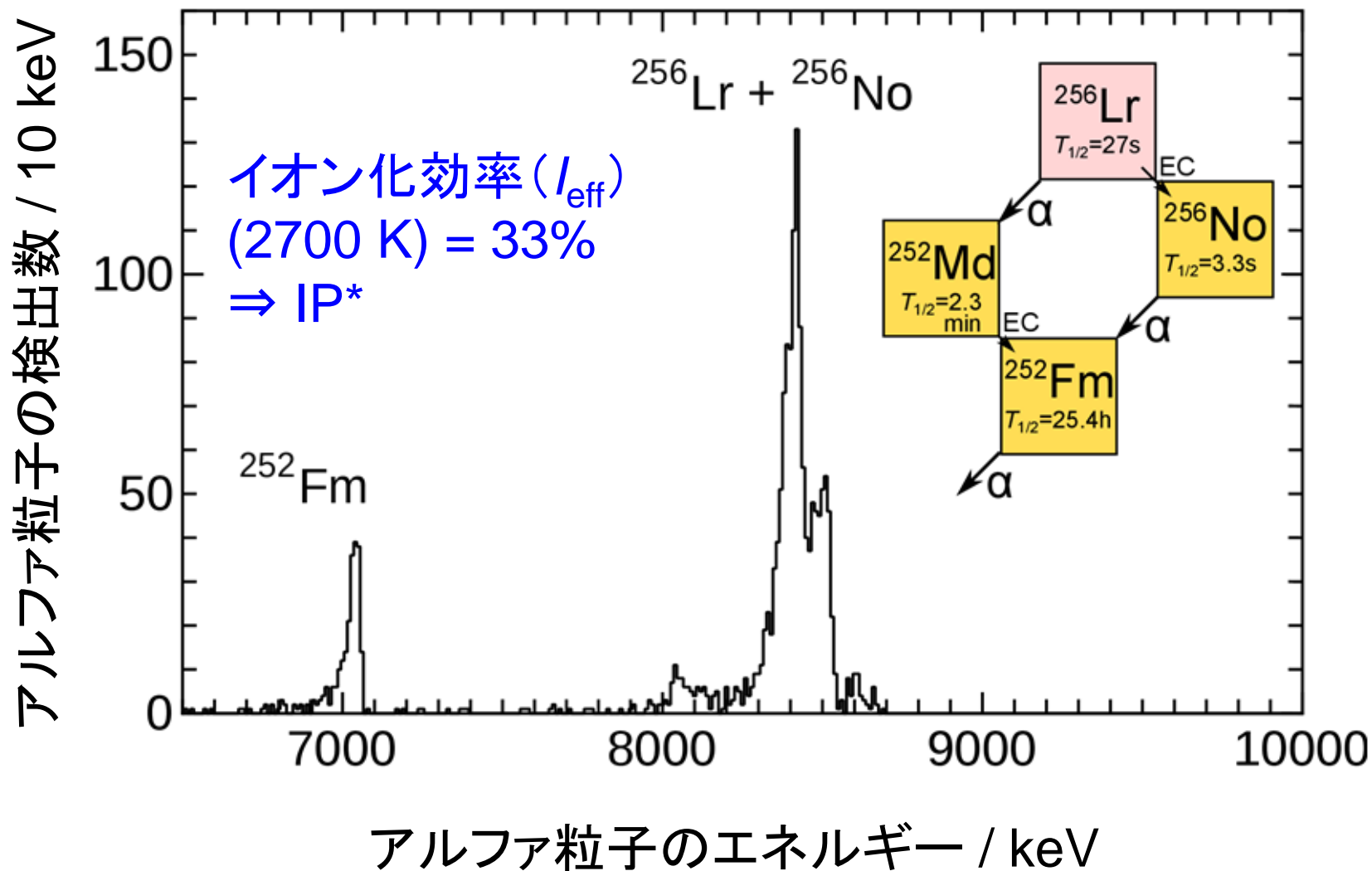
技術開発: ガスジェット搬送効率
ガス排気、イオン化部
の加熱、温度測定 など

実験のセットアップ



ガスジェット部とイオン化部を結合

^{256}Lr のイオン化と質量分離に成功



イオン化効率 \Rightarrow イオン化エネルギー

$$I_{\text{eff}} \propto \exp\left(\frac{\varphi - \text{IP}^*}{kT}\right)$$

$$\text{IP}^* \Rightarrow \text{IP}$$

(励起準位に対する補正)

$$I_{\text{eff}} = 33\%$$

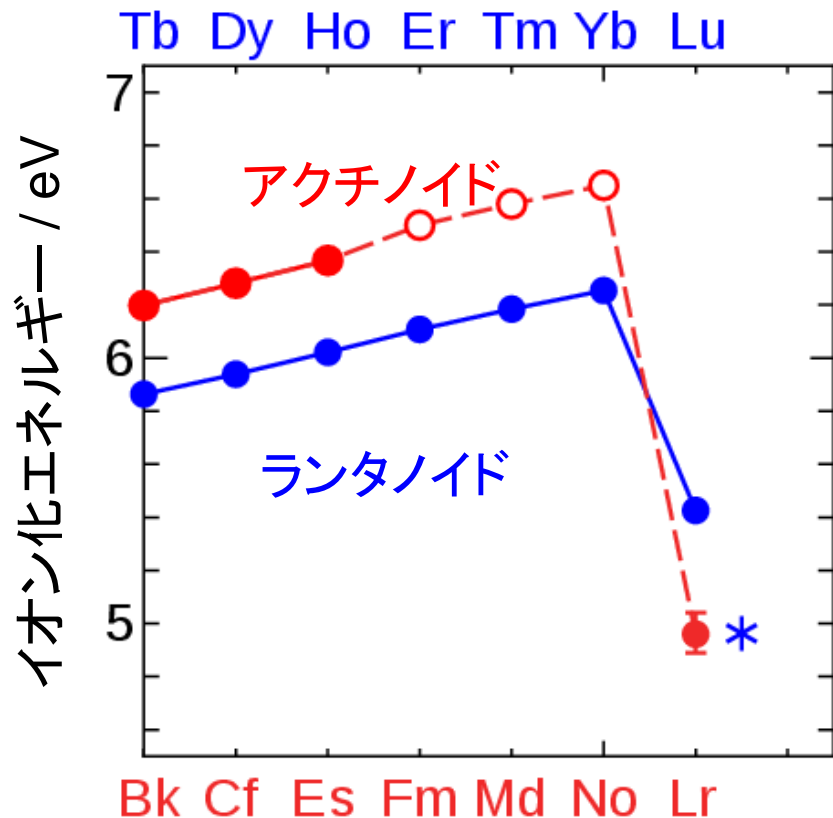


$$\text{IP}^* = 5.29 \text{ eV}$$



$$\text{IP} = 4.96 \text{ eV}$$

イオン化エネルギー (IP) の決定



アクチノイドならびにランタノイド
元素のイオン化エネルギー

	IP / eV
実験値	4.96 ± 0.08
理論値	4.963*

アクチノイド元素の中でもっとも
小さい値

相対論効果の影響を考慮した
電子配置: 最外殻の電子1個が
ゆるく結合している

Lu: 最後のランタノイド元素



Lr: 最後のアクチノイド元素

成果の意義

- ▶ シングルの原子スケールでのイオン化エネルギー測定法の開発：
 - ・究極の化学分析法の開発(革新的技術の創出)に成功

- ▶ 「アクチノイドの概念」の実験的検証
 - ・周期表のパズルのひとつのピースをはめ込む

- ▶ 超重元素領域－相対論領域
 - ・原子の電子配置に関する初の実験的情報
 - ・相対論効果を考慮した電子配置を示唆
 - ・理論計算に対して信頼できるベンチマークを提供

化学界における反響

周期表の改訂に繋がるか

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

現在

3
21
Sc
39
Y
57-71
89-103



提案

3
21
Sc
39
Y
71
Lu
103
Lr

国際純正・応用化学連合 (IUPAC) 認定の周期表

周期表の改訂に繋がるか

1																	18
1																	2
H																	He
3	4											5	6	7	8	9	10
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
11	12											13	14	15	16	17	18
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
55	56	57-71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
87	88	89-103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118
Fr	Ra		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	113	Fl	115	Lv	117	118

現在

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

1																	18
1																	2
H																	He
3	4											5	6	7	8	9	10
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
11	12											13	14	15	16	17	18
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
55	56	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
87	88	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118
Fr	Ra		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	113	Fl	115	Lv	117	118

提案

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

ローレンシウムの居場所は？

- アクチノイド元素？
- 遷移金属元素？
- 国際純正・応用化学連合(IUPAC)
2015年夏のIUPAC無機化学部門の議題として取り
上げられた
⇒ 周期表の改訂？

まとめ

- ローレンシウムのイオン化エネルギー測定に成功
 - ⇒ 究極の化学分析の開発－革新的技術の創出
 - ⇒ 70年を経てアクチノイド系列を確立
 - ⇒ 相対論領域への挑戦を可能 ⇒ 周期律のほころび？

- ローレンシウムの周期表での居場所は？
 - ⇒ 周期表の改訂に係わる議論を巻き起こす

- 究極の化学－Extreme Chemistry
 - ⇒ 新しい研究領域(相対論領域の化学)の開拓
 - ⇒ 超重元素の研究: 元素全体の理解へ繋がる鍵が秘められているフロンティア領域