

# 第三ピークと終焉領域に対する実験的アプローチ

## 直接

- $(n, \gamma)$ - $(\gamma, n)$  平衡状態:

## r-過程の経路

- 滞留核の寿命

第三ピーク形成に要する時間

- 定常流仮定:

温度  $T$  と中性子数密度  $N_n$  の相関



r-過程はユニークな環境で記述できるか?

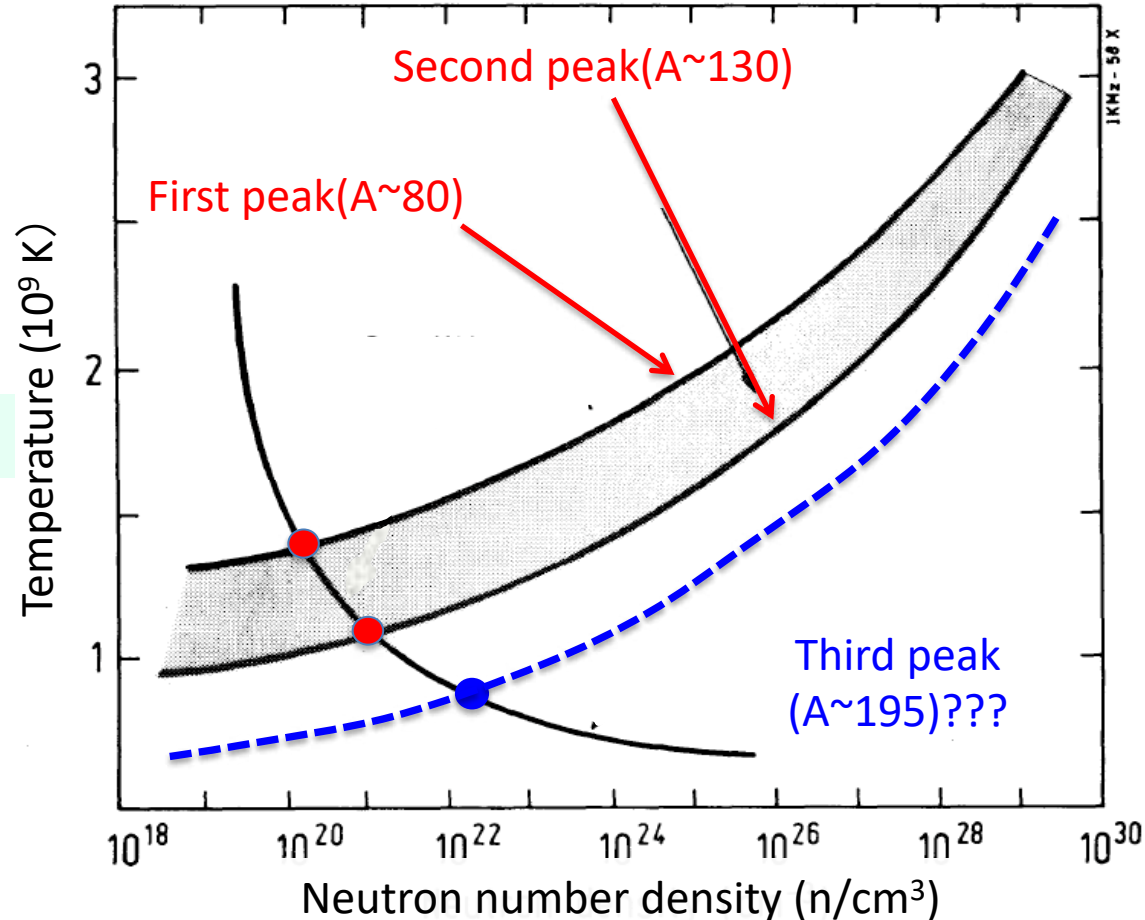
## 間接

- 初期中性子量 ( $1-Y_e$ )
- 核分裂同位元素の生成率
- 滞留核領域の核構造
- 



起源天体の特定 (CC-SNe, NSM, ..)

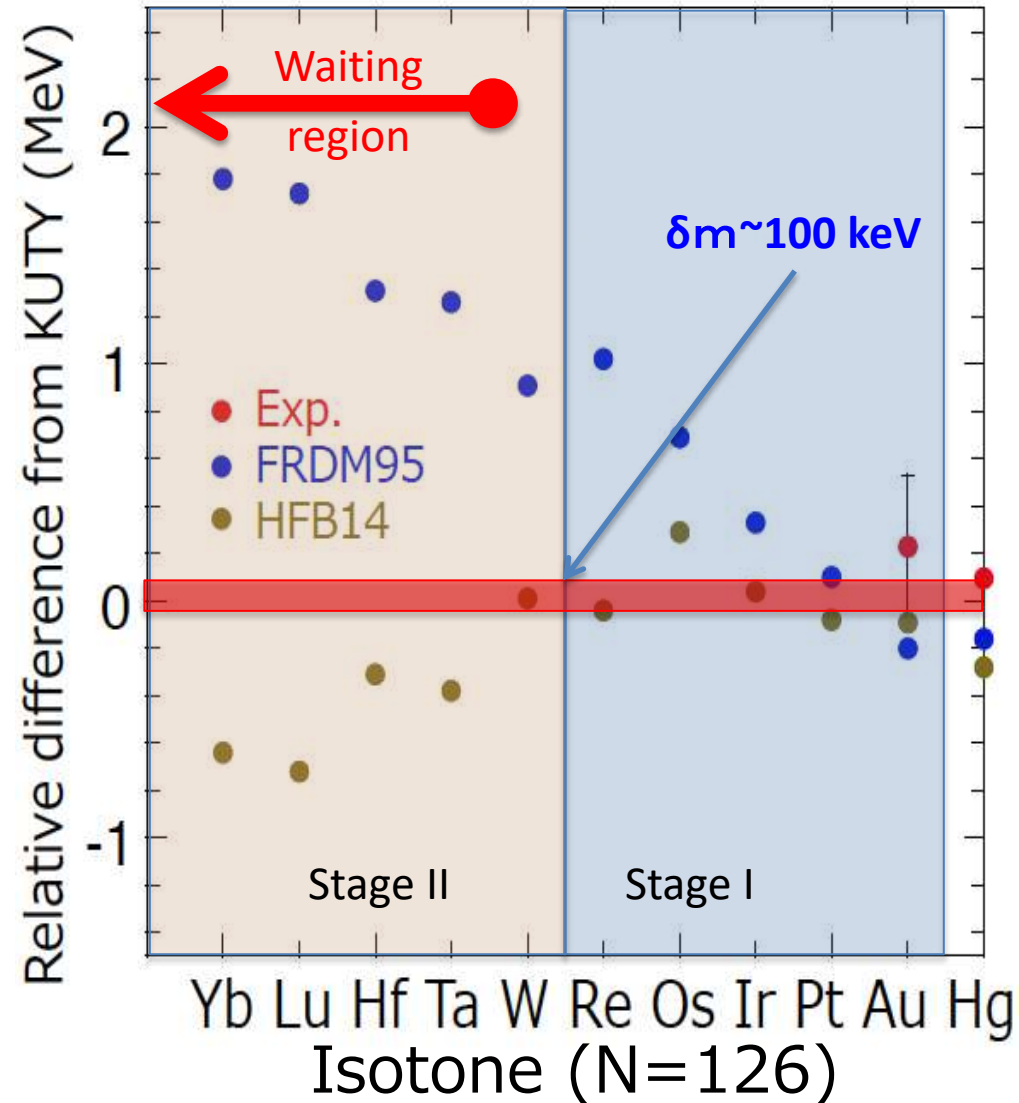
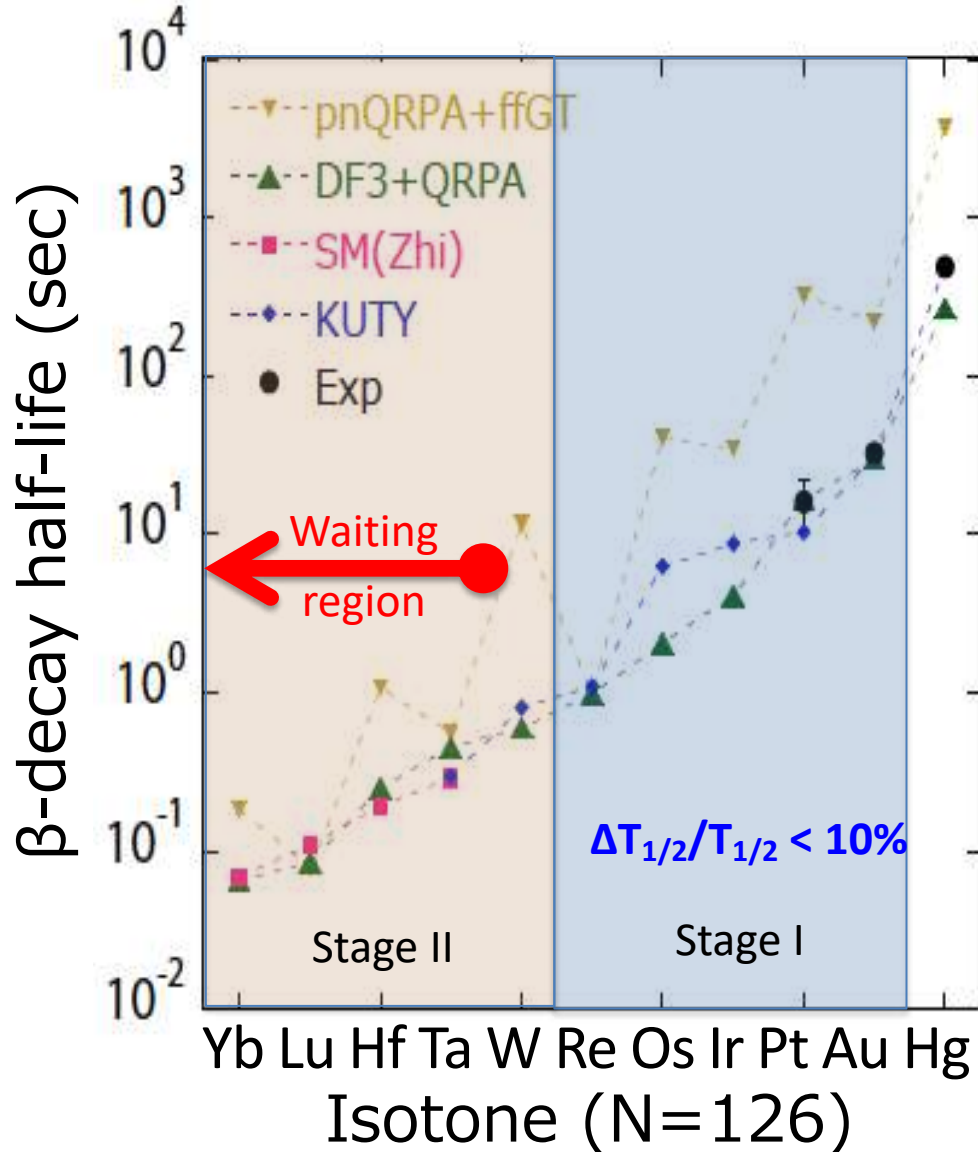
from K. -L. Kratz, et al., Ap. J. 403('93)216.



# Uncertainty of lifetime & mass predictions in N=126 isotones



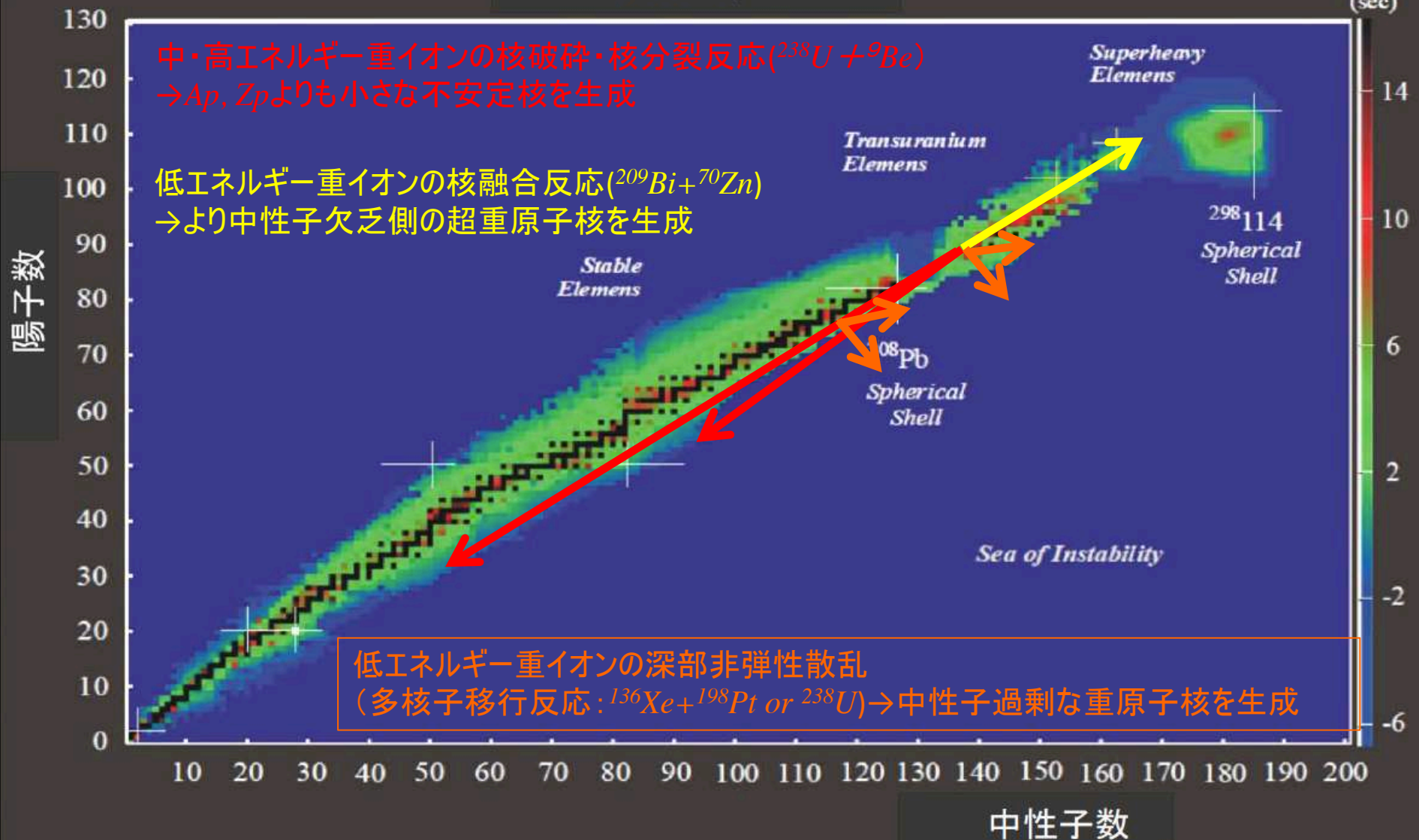
Stage I (~2020,  $^{136}\text{Xe}$ , 250 pA) to Stage II (2021~,  $^{238}\text{U}$ , up to 10  $\mu\text{A}$ )



# 中性子過剰未知重原子核の生成法

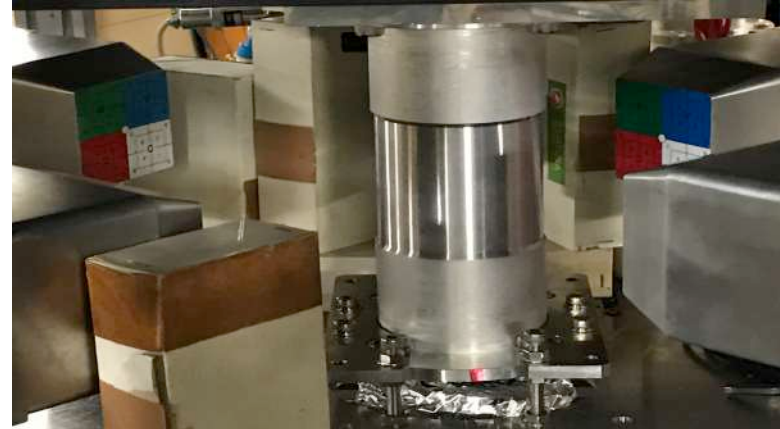
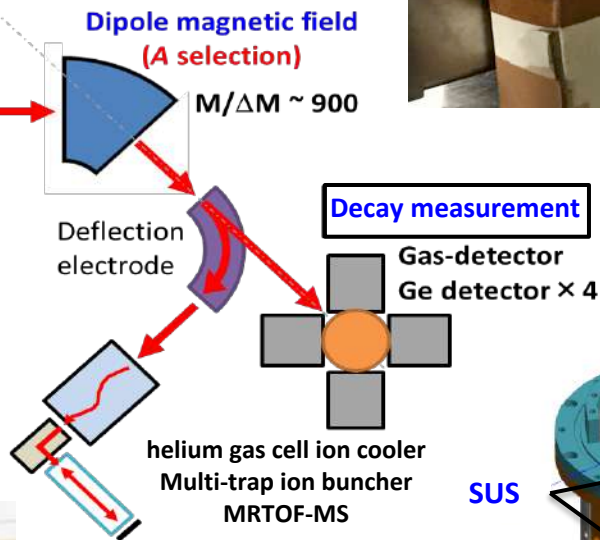
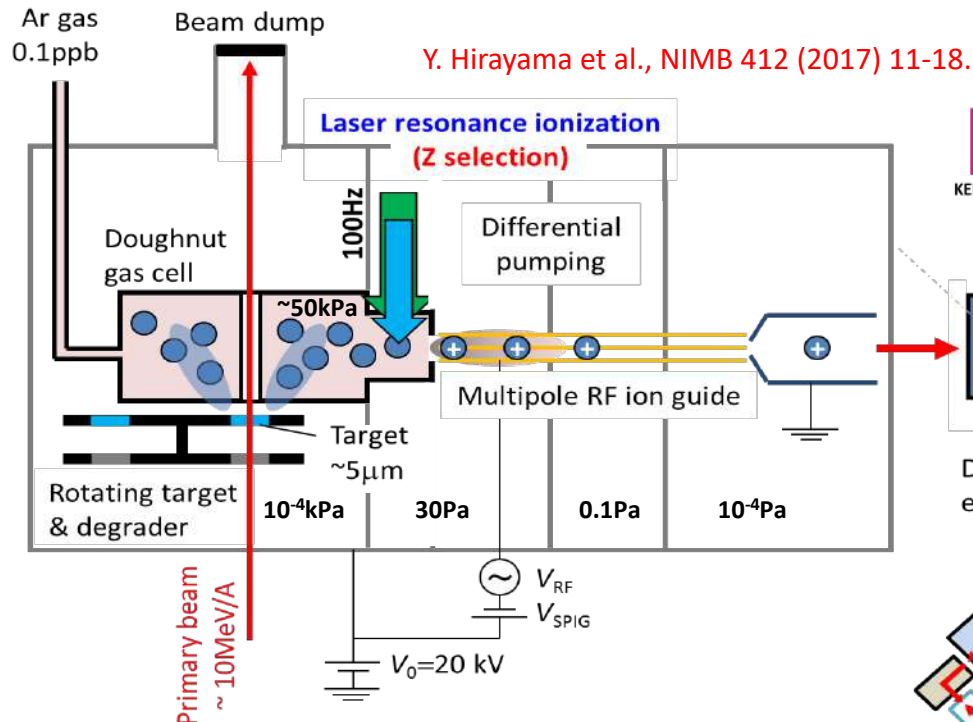
-多核子移行反応のユニークさ-

## 核図表



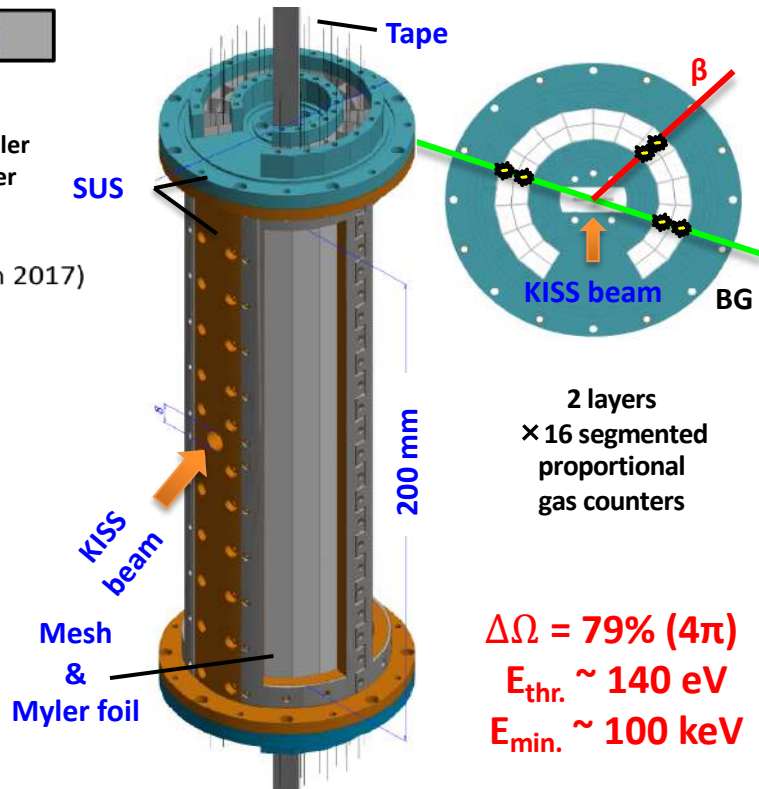
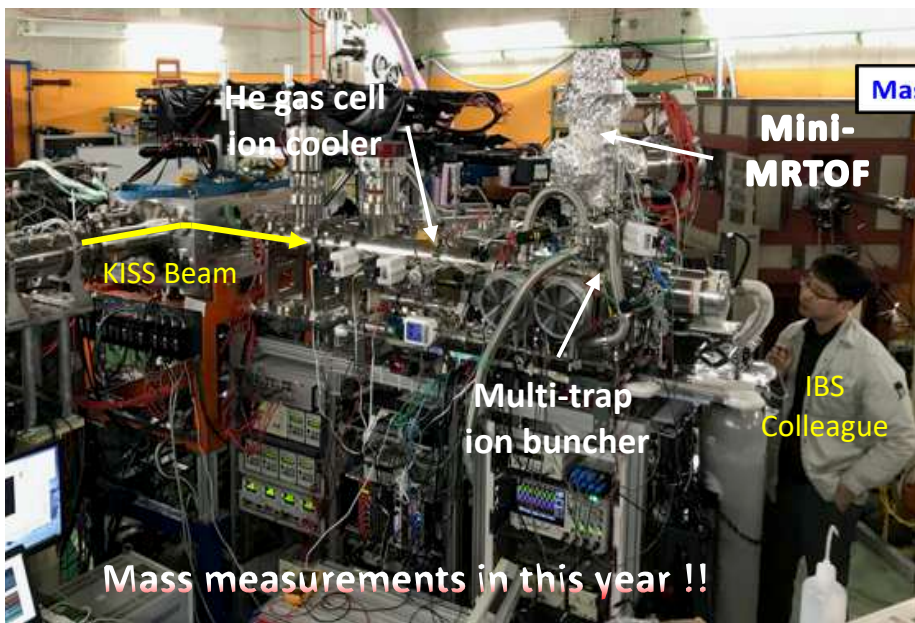


# KISS (KEK Isotope Separation System)



M. Mukai et al., NIMA 884 (2018) 1-10.

Mass measurement (Installed in 2017)



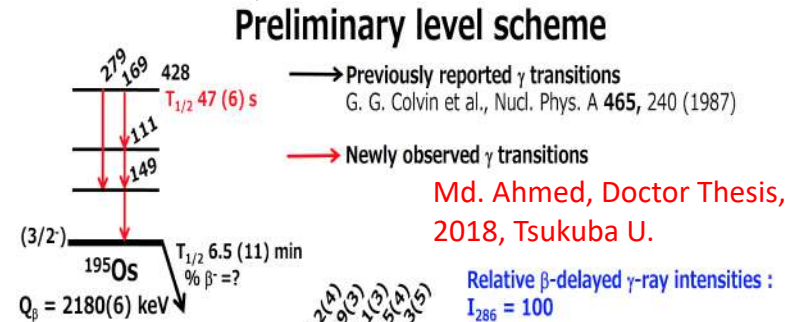
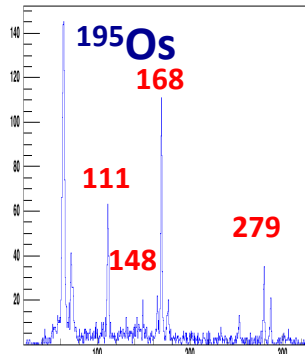
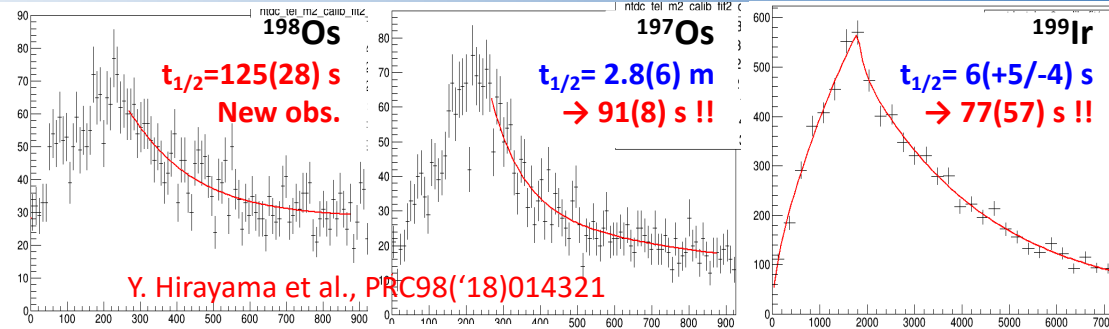
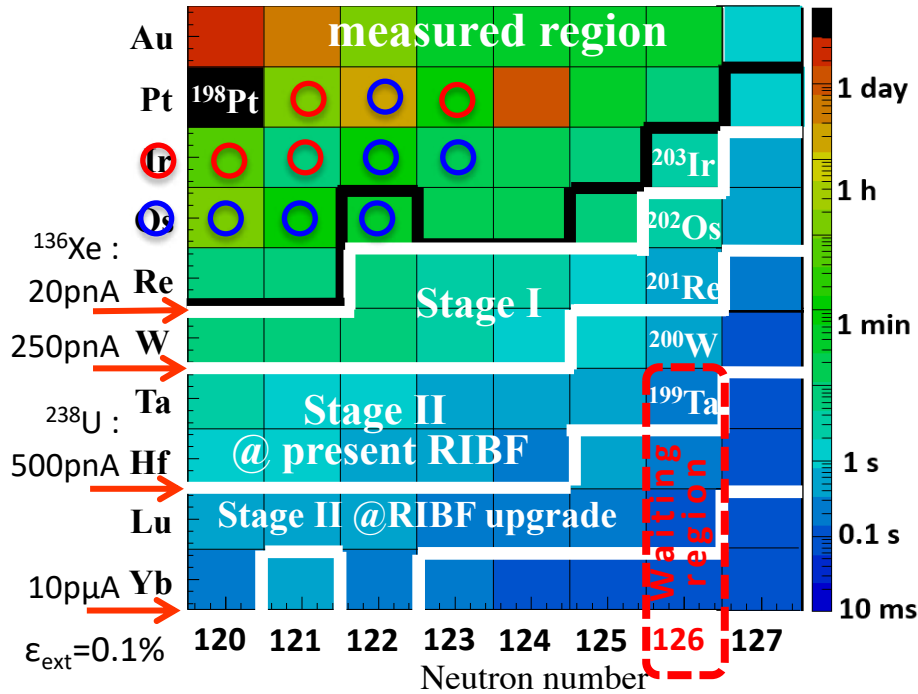
# Lifetime confirmation and decay spectroscopy

- Y. Hirayama: NP1512-RRC41-

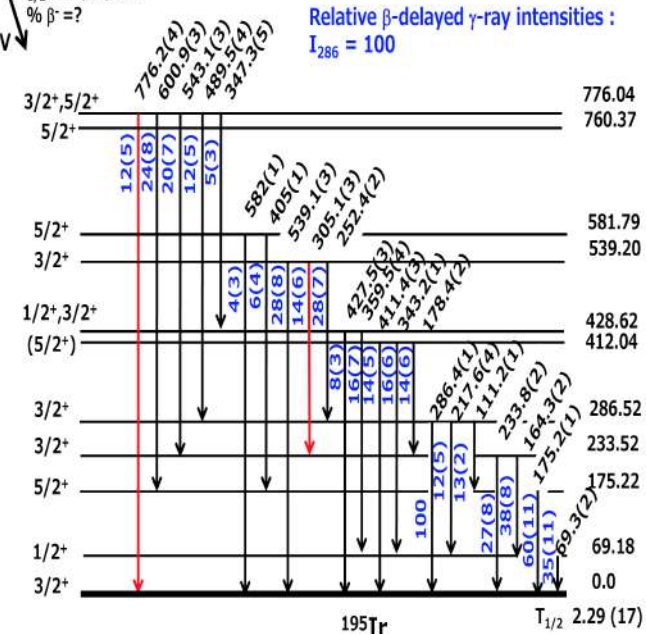


- Y. Hirayama, NP1512-RRC41: "Lifetime measurement of nuclei around N=126 using KISS" (2016~)

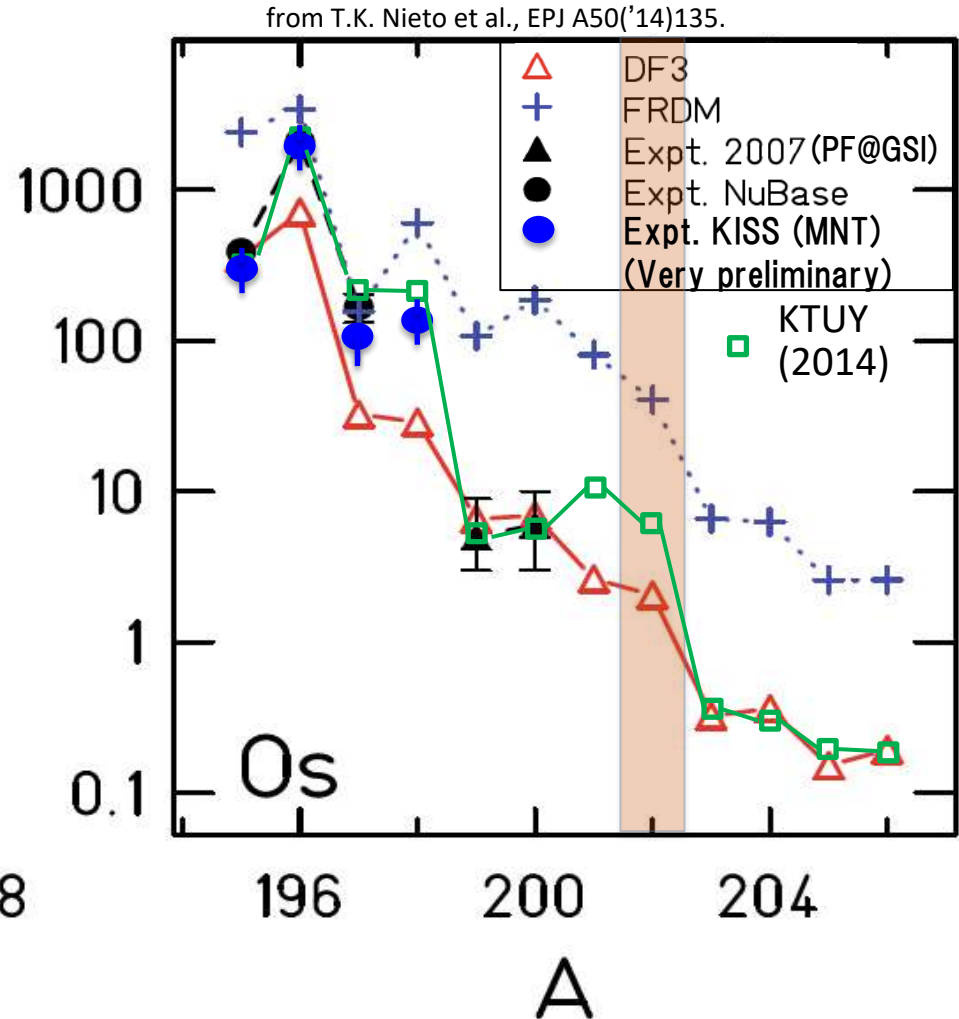
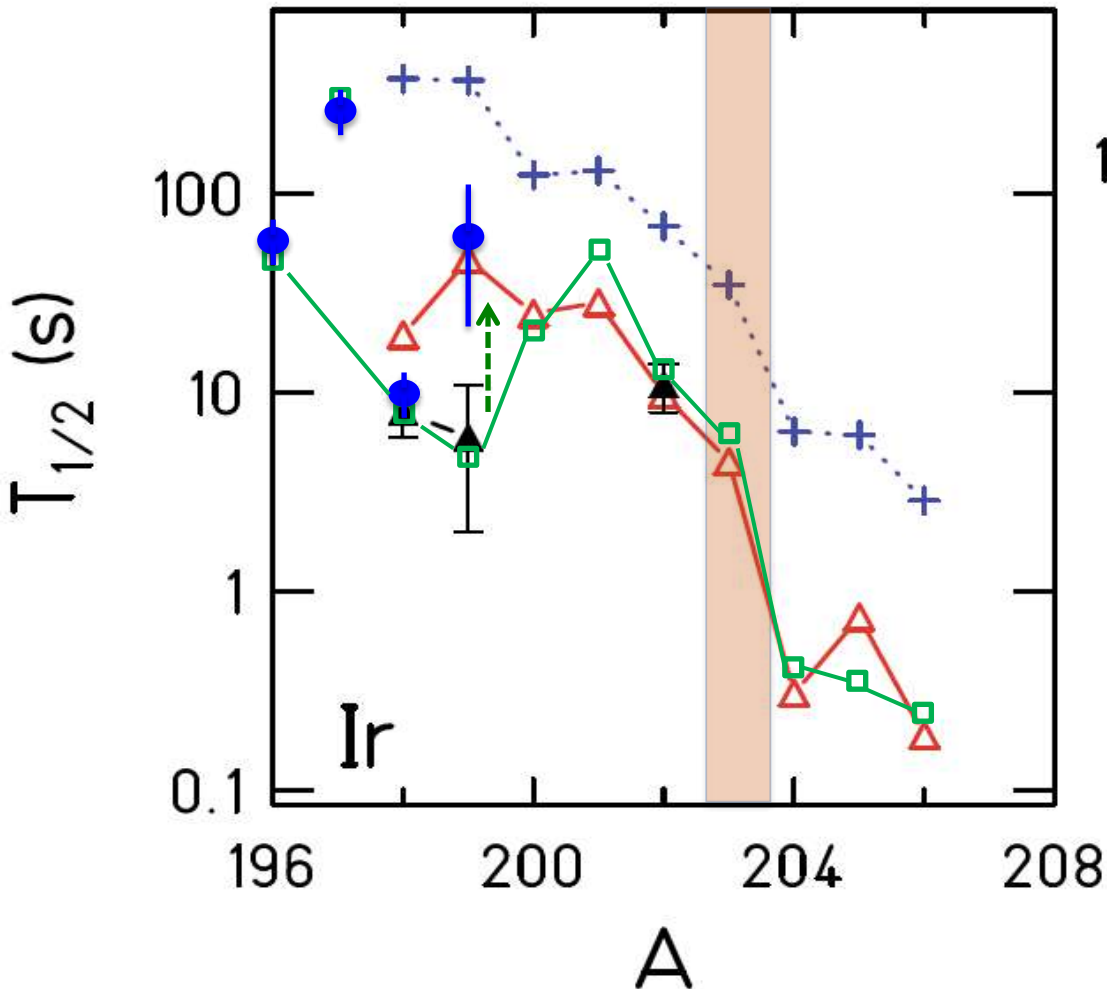
KUTY : H. Koura, et al.,  
<http://www.ndc.jaea.go.jp/CN14/index.html> Expected :  $T_{1/2}$



- 11 n-rich isotopes (Pt, Ir, and Os) have been measured.
- $^{198}\text{Os}$  has been newly identified with half-life of 2 min..
- Some discrepancies between the reported and present data
- Some isomeric states would be newly assigned



# Preliminary lifetime systematics of Ir and Os isotopes



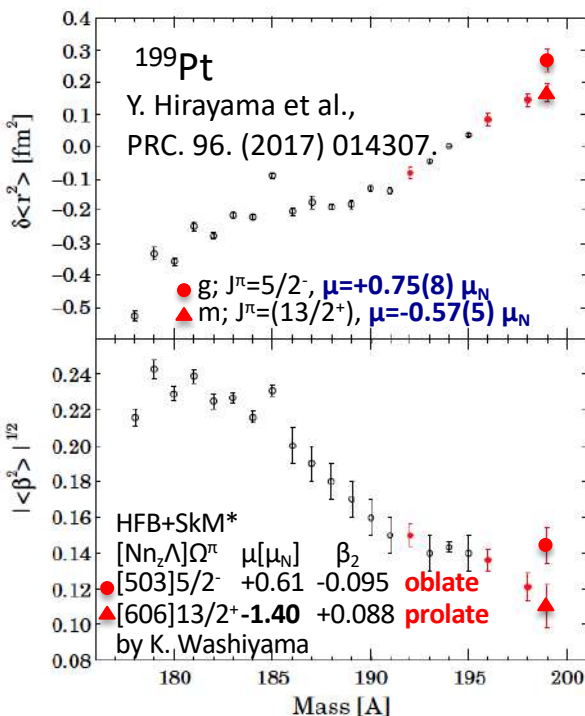
**$N < 126$ : FF transitions are dominated.**  
 $\nu(3p_{1/2})$  or  $\nu(3p_{3/2}) \rightarrow \pi(3s_{1/2})$  and  $\nu(2f_{5/2})$  or  $\nu(3p_{3/2}) \rightarrow \pi(2d_{3/2})$

- Measured half-lives of  $^{199}\text{Ir}$  would become close to the DF3 and KTUY predictions.
- Newly obtained half-life of  $^{197-8}\text{Os}$  would be longer than the DF3 by a factor around 2-3.

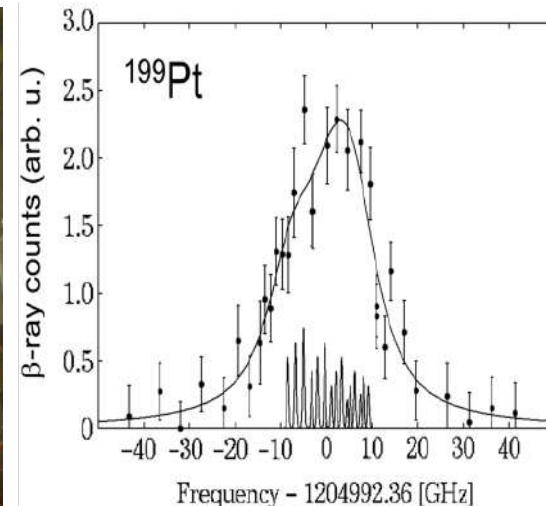
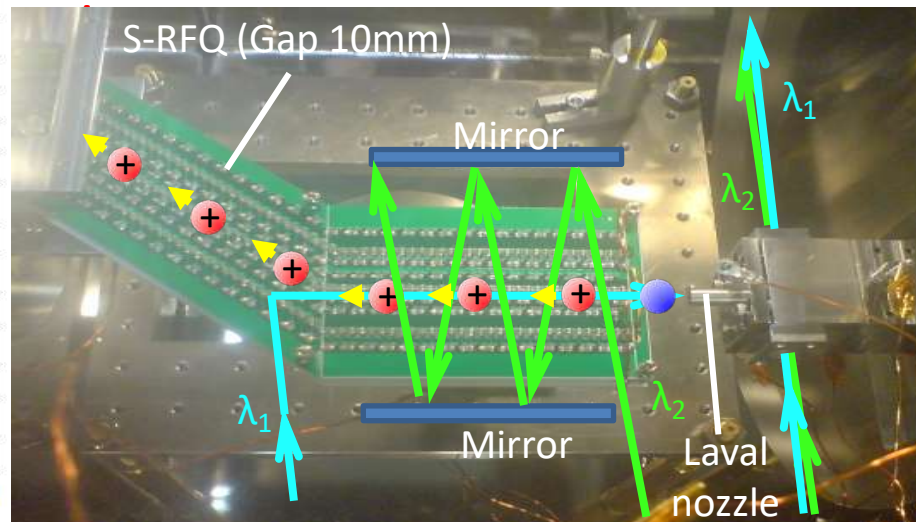


# Laser spectroscopy

## of n-rich isotopes in non-volatile elements



- In-gas-cell (~2017) to In-gas-jet laser spectroscopy (2018~):
- effective laser ionization with high frequency narrow band laser
- reducing Doppler and Pressure broadening to 1/10~1/40: total width  $\delta\nu \sim 0.3$  GHz
- Precise HFS measurement: + **quadrupole moment and spin/parity**



78(Pt)	M	M	MQ	MQ	MQ	MQ	MQ	MQ	MQ	M	M	M	M*										
77(Ir)	MQ	MQ	MQ	MQ	MQ	MQ	MQ	MQ	MQ	MQ	MQ	MQ	MQ	M*	M*	M*							
76(Os)			MQ			M	MQ	MQ		MQ													
75(Re)	M	M	M	MQ	MQ	MQ	MQ	MQ	MQ														
74(W)					M		M																
73(Ta)				MQ	MQ	M																	
72(Hf)	MQ	MQ																					
	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126

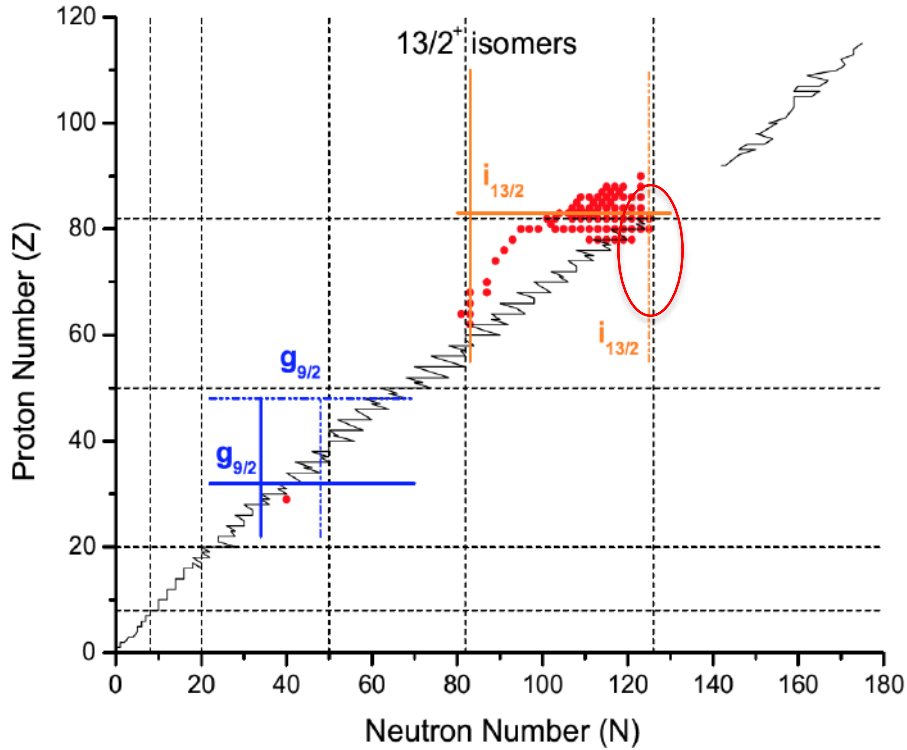
Proton Number

M : Magnetic dipole moment is known.  
 Q : Electric quadrupole moment is known.  
 M\* : Magnetic dipole moment was measured in KISS.

Black:  $\geq 5 \times 10^8$  y  
 Green:  $\geq 30$  days  
 Red:  $\geq 10$  min  
 Yellow:  $< 10$  min

# 核異性体( $\nu^{-1}[i_{13/2}]$ )と変形共存の系統的な振る舞い

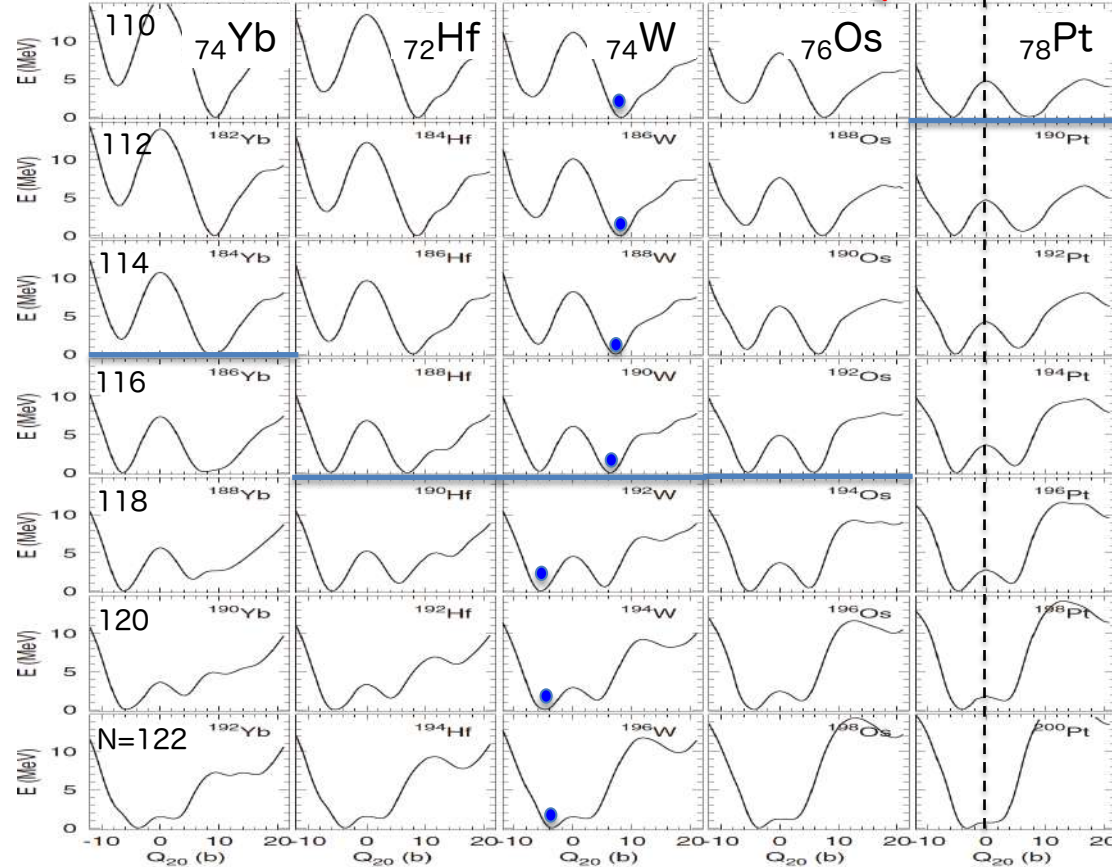
A. K. Jain, et al, NDS128(2015)1.



L. M. Robledo et al., J. Phys. Nucl. Part. Phys. 36(2009)115104

HFB+ Gogny D1S

← oblate → prolate



四重極モーメント

- Shape coexistence of oblate and prolate shapes
- 核異性体 ( $13/2^+$ ) の励起エネルギー ( $E_x$ )
- 有効半減期
- $(n, \gamma) \Leftrightarrow (\gamma, n)$  を通じた abundance への影響
- high spin だが...

$$\frac{N_{is}}{N_{gnd}} = \frac{g_{is}}{g_{gnd}} \exp \left[ \frac{-E_{is}}{86.2 [keV / 10^9 K]} \right]$$



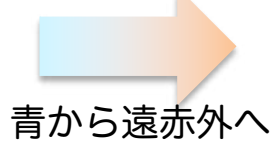
# Kilonovaにおける核分裂リサイクルの可能性



2017.08.18-19

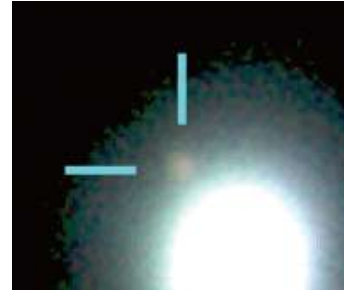


r-過程でラ  
ンタノイド  
までの重元  
素を生成

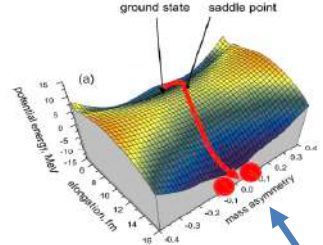


青から遠赤外へ

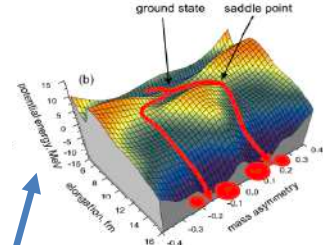
2017.08.24-25



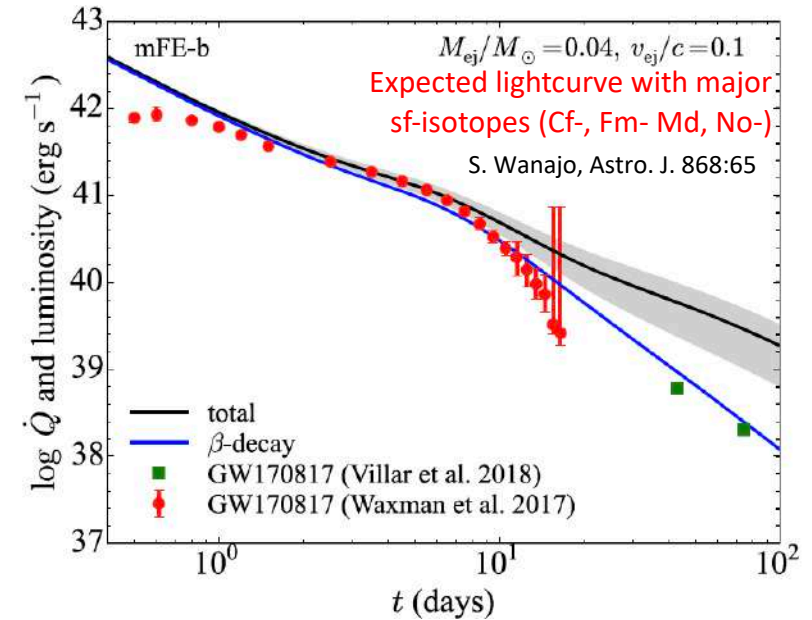
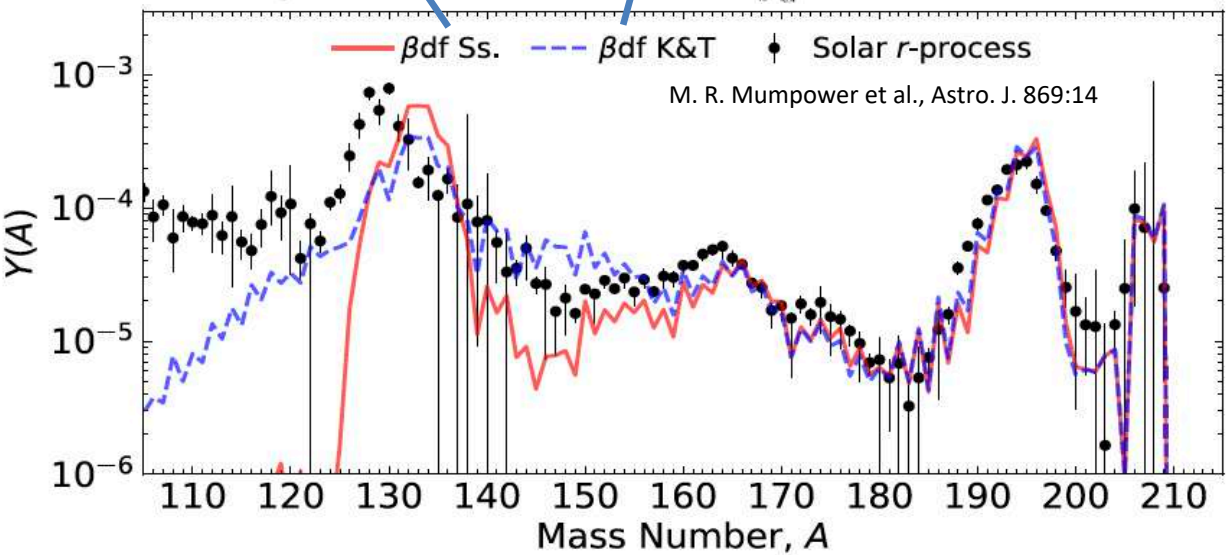
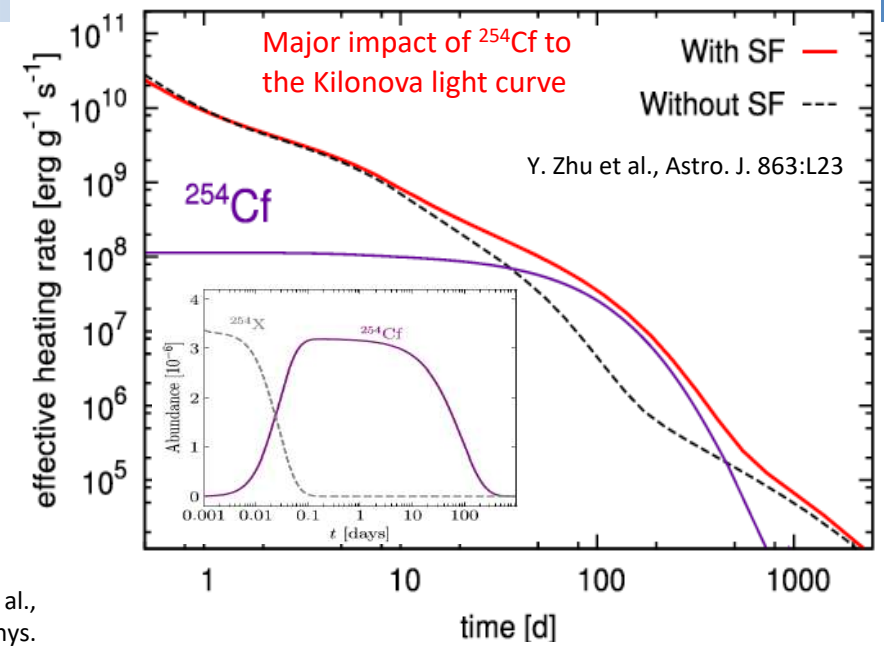
Macroscopic Energy only  
(like a Liquid Drop)



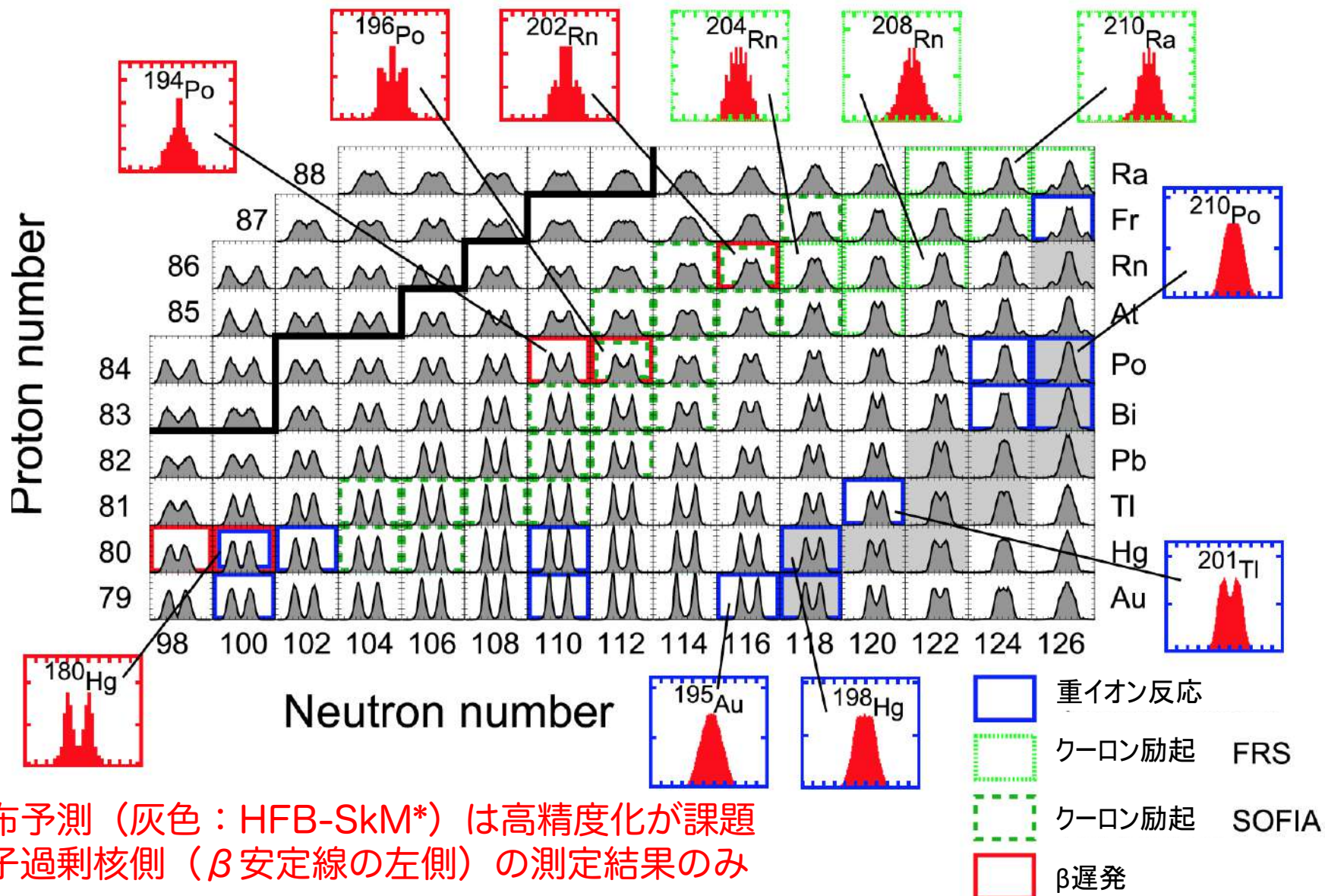
Microscopic effects added  
(nuclear shells and pairing)



A.N. Andreyev et al.,  
Rept. Prog. Phys.  
81(2018)016301



# 核分裂片質量分布:測定と予測(~2016)



- 分布予測 (灰色: HFB-SkM\*) は高精度化が課題
- 陽子過剰核側 ( $\beta$ 安定線の左側) の測定結果のみ



# 核分裂障壁の測定法（現状と将来計画）

Beams	Direct kinematics	Inverse kinematics
Stable Beams, up to $^{238}\text{U}$ (n, p, light/heavy ions, $\gamma$ , $e^-$ )	<p>1. MNT-induced fission with ISOL/In-beam@ JAEA(*<math>^{254}\text{Es-tgt}</math>)</p> <p>Prompt fusion/transfer-induced fission</p> <p>SF, <math>\beta\text{DF}</math></p>	<p>Prompt fusion/transfer-induced fission,</p> <p>VAMOS at GANIL [39]</p>
	Future/Proposed	
	<p>Photofission with brilliant <math>\gamma</math>-ray beams at e.g. ELI [42],</p> <p>SF, <math>\beta\text{DF}</math> with S3 at GANIL</p>	
Radioactive ion beams (RIBs) (fragmentation/spallation of $^{238}\text{U}$ )	<p><math>\beta\text{DF}</math> of low-energy 30–60 keV beams at ISOLDE [10]</p> <p>2. <math>\beta\text{DF}</math> of MNT-TLF's with @KISS</p>	<p>Coulex of relativistic secondary beams</p> <p>SOFIA at GSI [11, 40, 41]</p>
	Future/Proposed, see section 5	
	<p>Prompt fusion/transfer-induced fission with post-accelerated RIBs</p> <p>4. Fission study of further n-rich isotopes with MNT of n-rich RNB's @OEDO</p>	<p>3. p,2p/Coulex with SAMURAI at RIKEN</p> <p><math>e^-</math>-RIBs with SCRIT at RIKEN, ELISe at GSI</p>

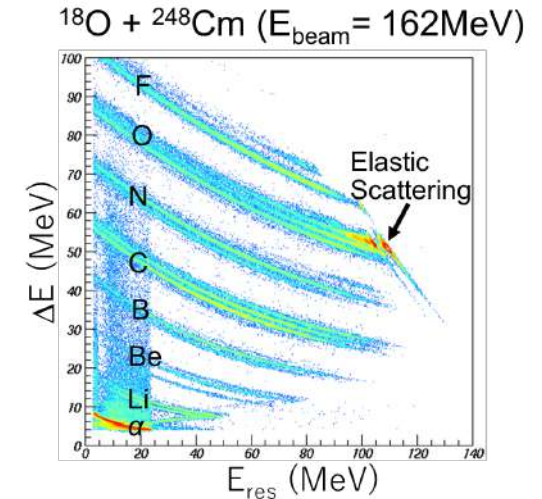
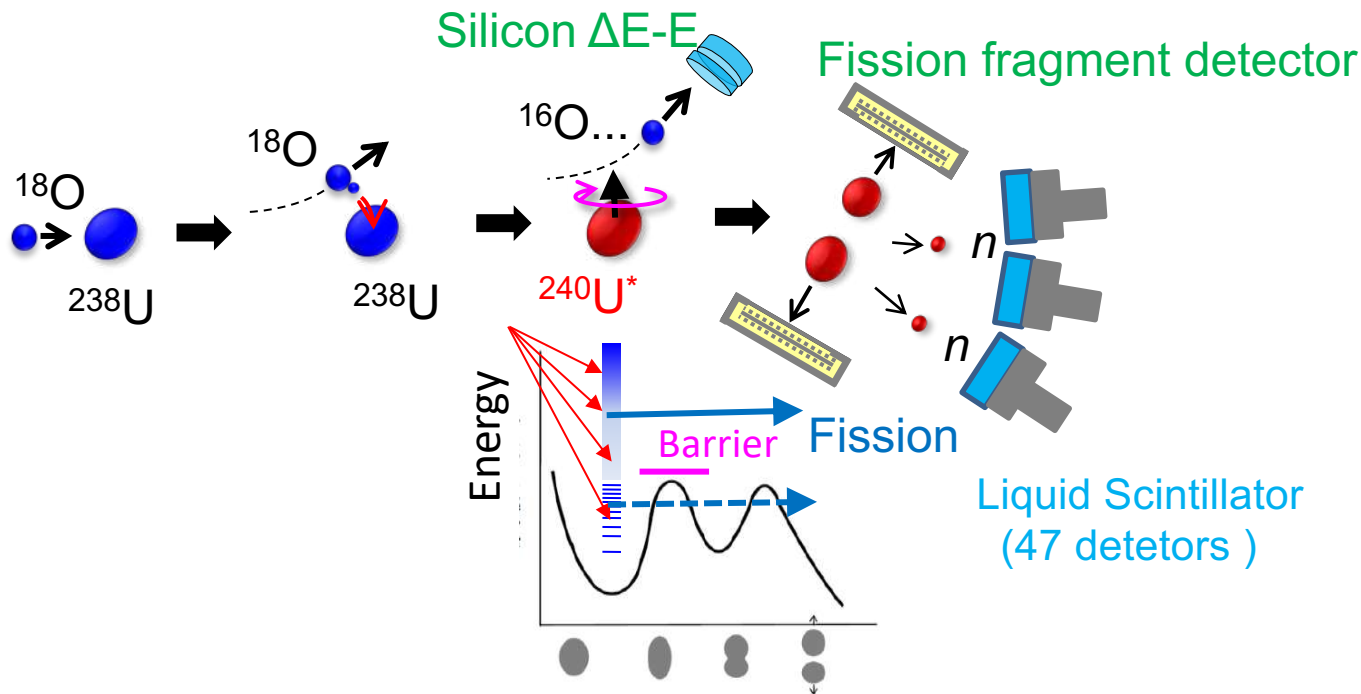


# 1. Multi-nucleon transfer reactions and fission @ JAEA

Courtesy of K. Nishio@JAEA

In the multi-nucleon transfer (MNT) reactions:

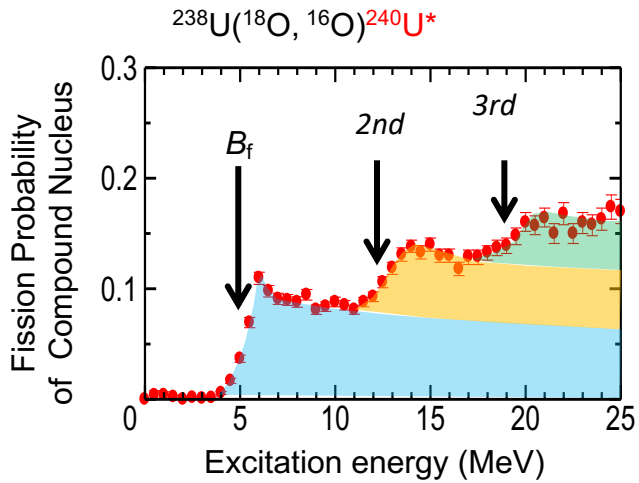
- We can generate many nuclei depending on transfer channels.
- Excitation energy of compound nucleus distributes widely.



Measured and Planned experiments using  $^{18}\text{O}$  beam and targets of  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{248}\text{Cm}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{249}\text{Cf}$ ,  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{249}\text{Bk}$ ,  $^{254}\text{Es}$

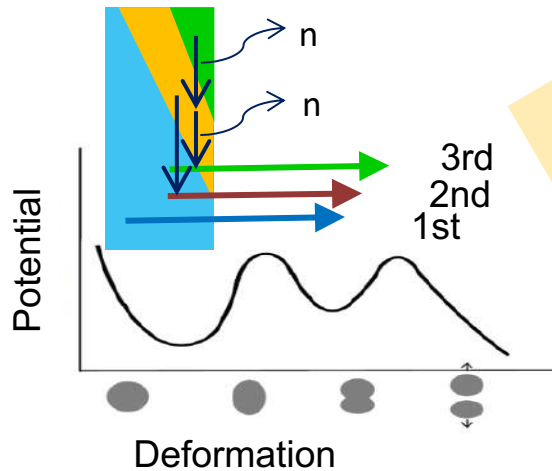
# Fission Probability and Fission Barrier Height

Courtesy of K. Nishio@JAEA



$$B_f^{\text{exp}} = 5.5 \text{ MeV}$$

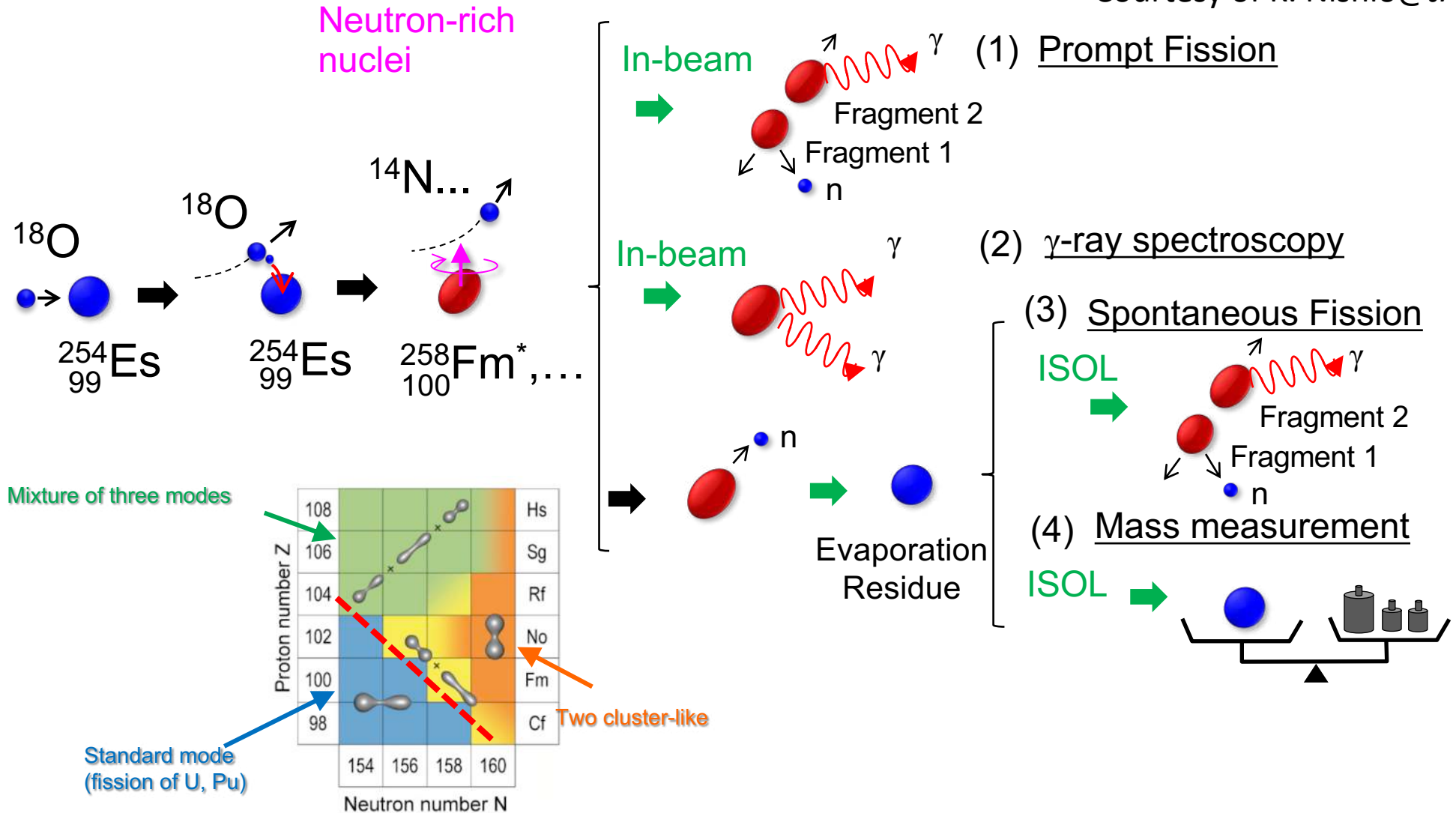
$$B_f^{\text{cal}} = 6.38 \text{ MeV (P. Möller)}$$



Closed material for Web-distribution

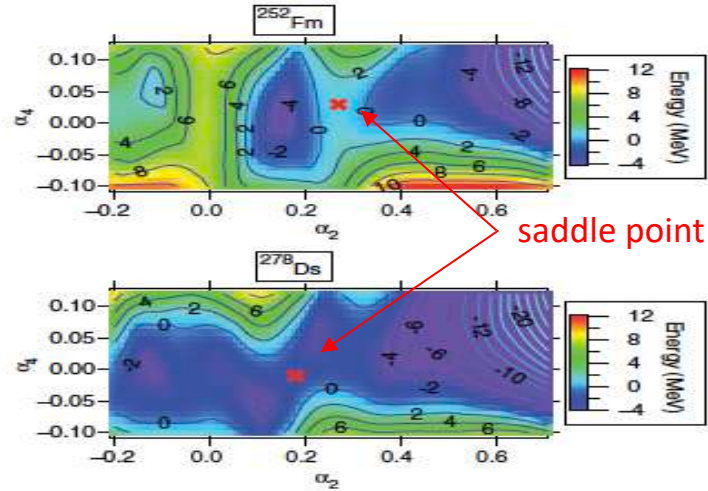
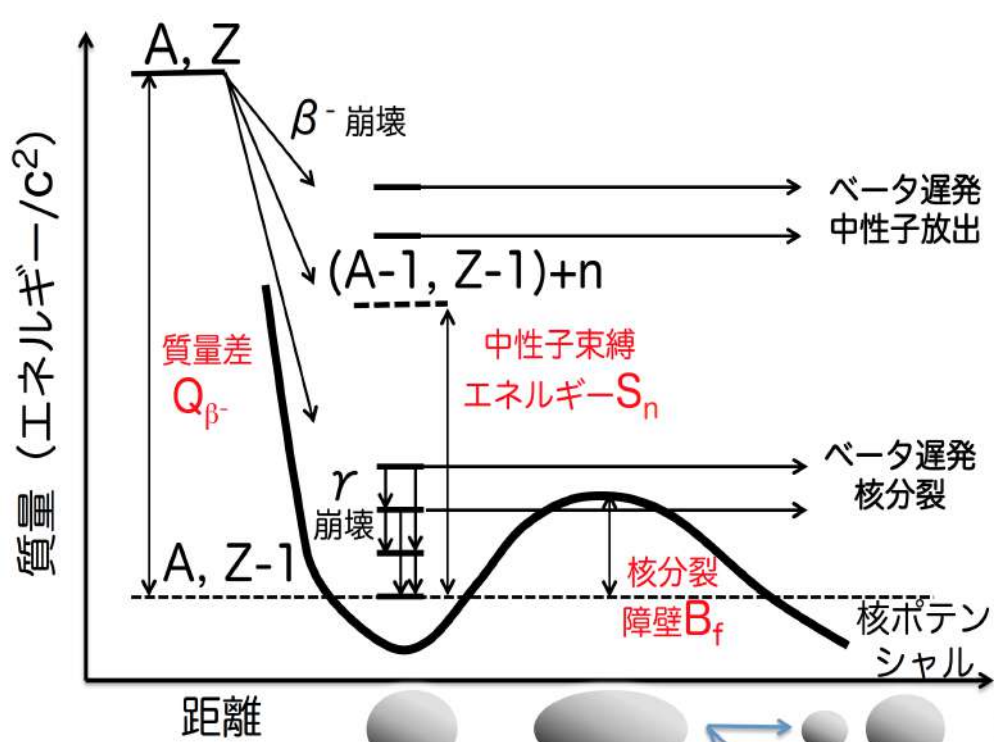
# Experiments using $^{254}_{99}\text{Es}$ target and Multi-nucleon Transfer reactions

Courtesy of K. Nishio@JAEA

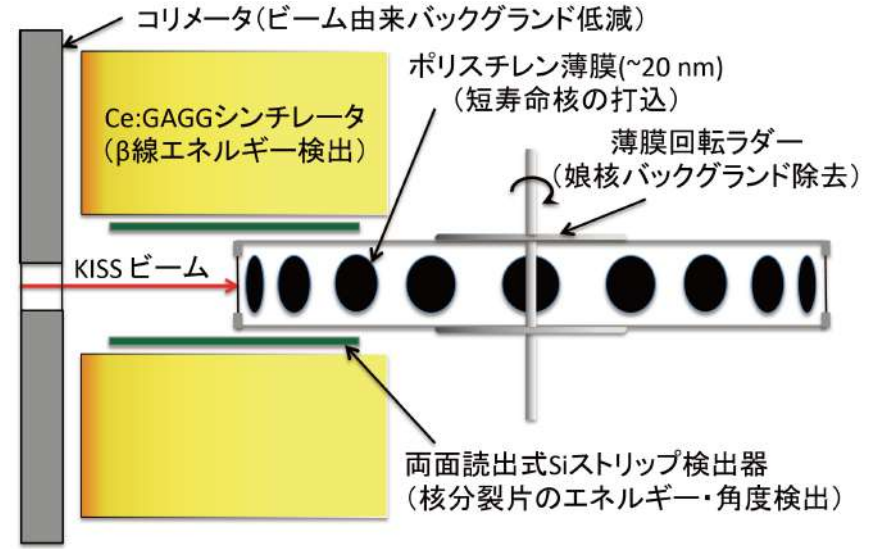




# 2. $\beta$ -delayed fissions of MNT target-like fragments



H. Koura,  
PTEP113D02



GAGG無機シンチレータによる大立体角、同時測定

- 核分裂片( $E, \theta, \phi$ )  $\rightarrow$  分裂片の質量分布
- $\beta$ 線  $\rightarrow B_f = Q_{\beta} - E_{\beta}(\text{max: 核分裂})$
- $\gamma$ 線

・ 中性子過剰な短寿命重原子核の生成と分離

$\rightarrow$  元素選択型質量分離器(KISS)

・  $Q_{\beta^-}, S_n$ の精密測定

$\rightarrow$  多重反射型飛行時間測定式 質量分光器(MRTOF-MS)

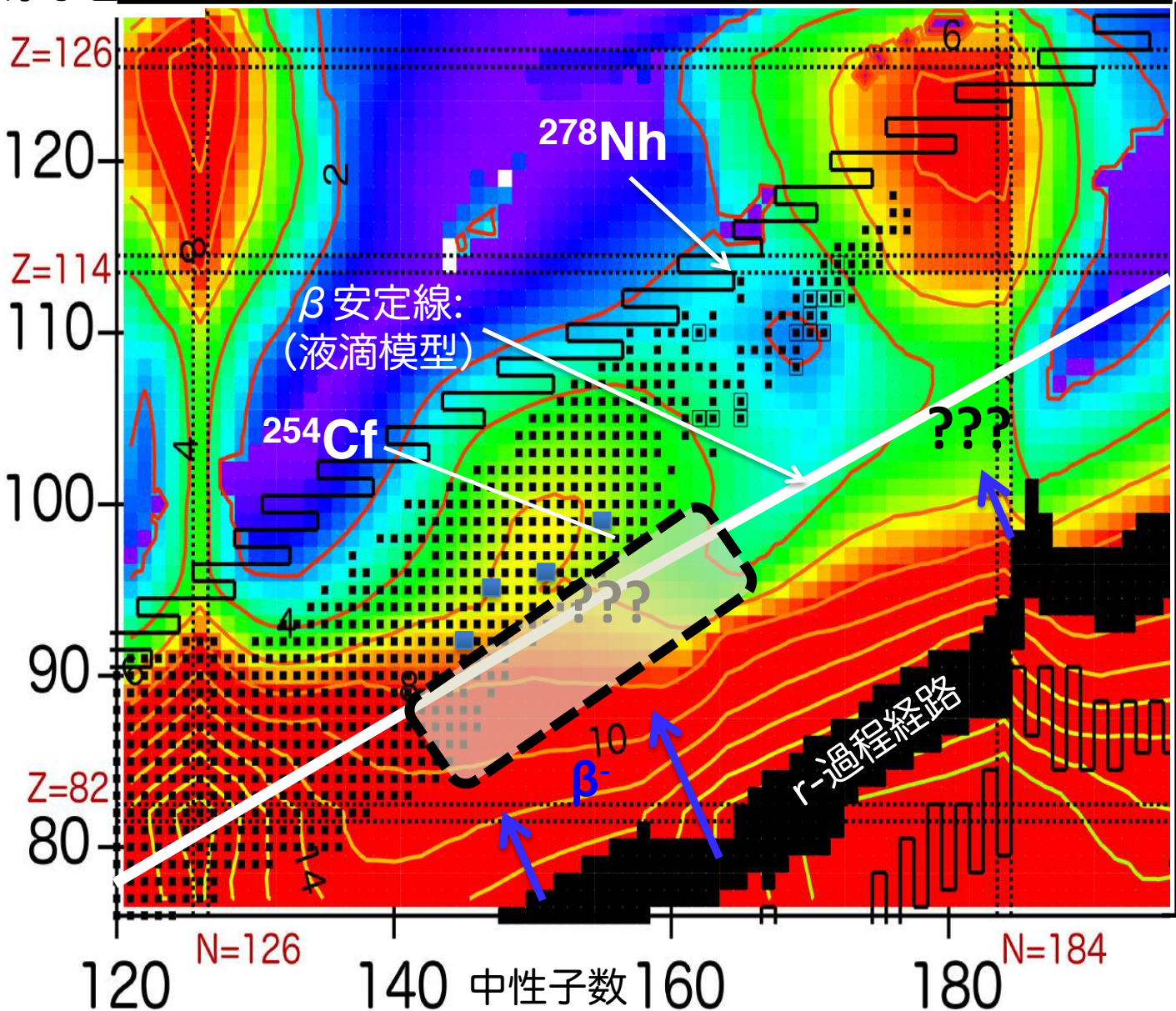
・ 核分裂障壁( $B_f$ )の測定と崩壊分光

$\rightarrow$  遅発核分裂測定器

# Accessible area with KISS

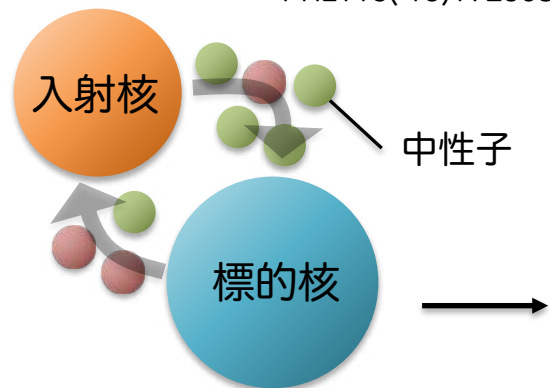
原子番号

from H. Koura, PTEP 2014, 113D02

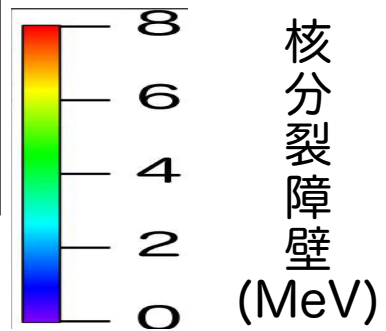


ウラン・超ウラン元素標的  
 (■  $^{238}\text{U}$ ,  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{248}\text{Cm}$ ,  $^{254}\text{Es}$ )  
 と高強度 $^{238}\text{U}$ の多核子移行反応  
 ・ユニークな未踏領域核生成法  
 ・世界に先駆け有効性を実証

X.Y. Watanabe et al.,  
 PRL115('15)172503

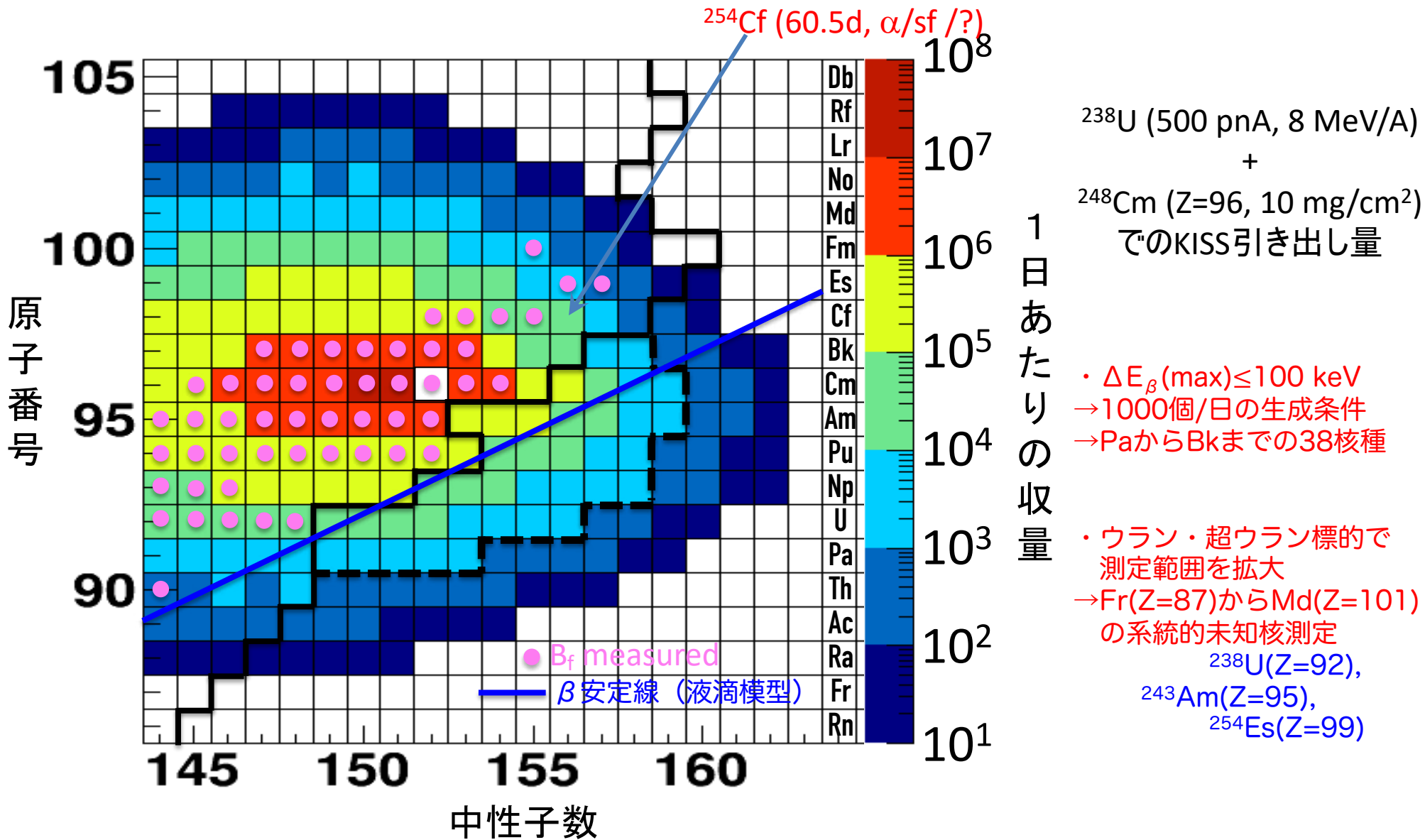


測定対象：  
 Fr(Z=87)からMd(Z=101)  
 ~80の未知核種 (β安定線の先)



# ウラン・超ウラン元素標的による多核子移行反応

-β安定線（ハイゼンベルグの谷）の対岸へ-

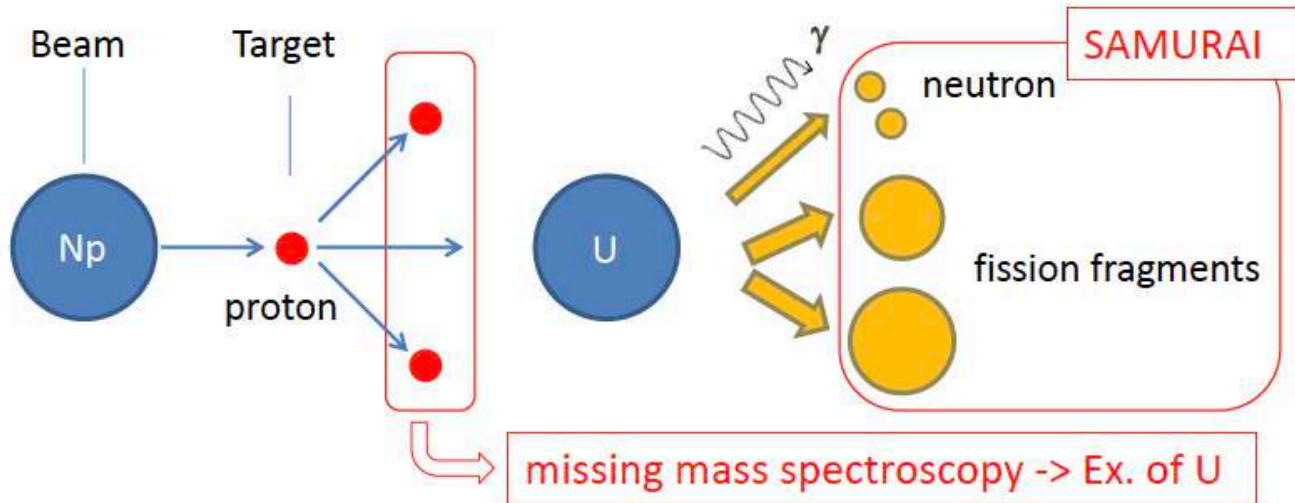




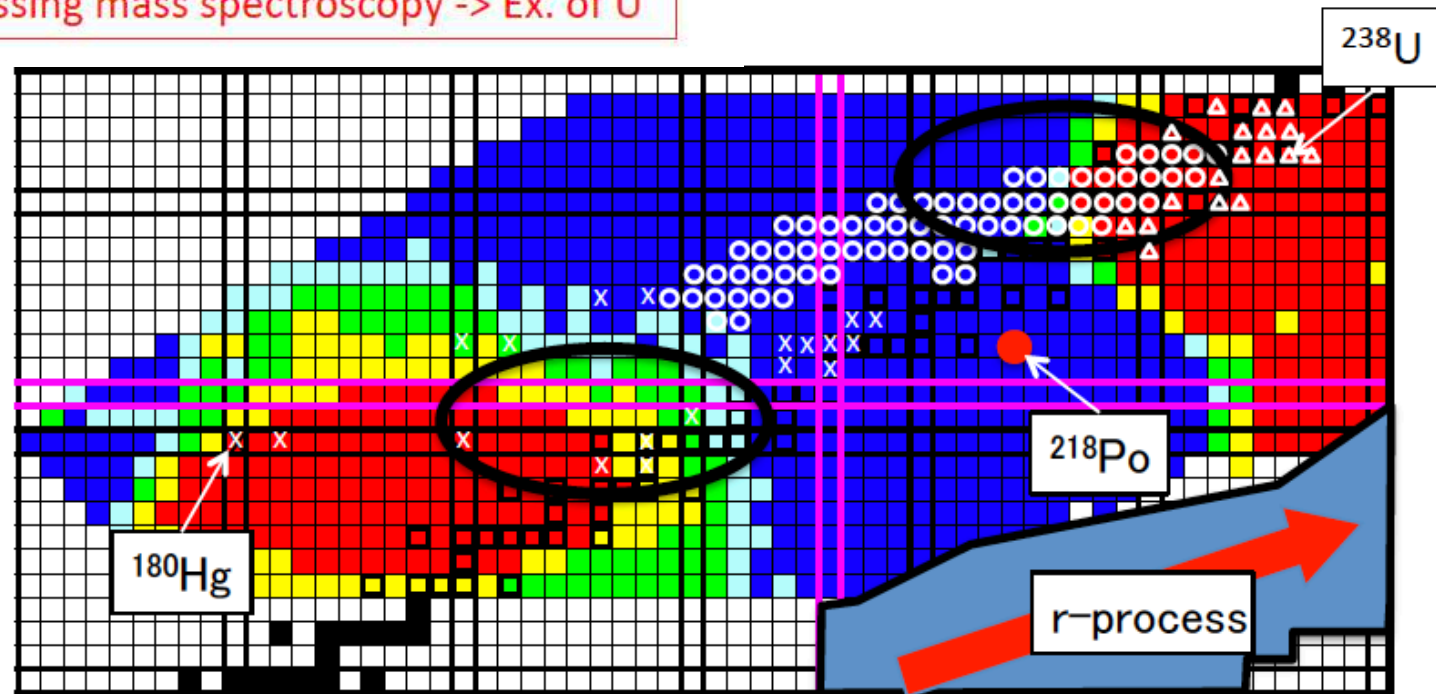
# 3. Fission study with (p, 2p) probe at SAMURAI



Courtesy of M. Sasano@Riken



核分裂障壁  
と  
核分裂片 (A, Z) 分布  
の同時測定



# 4. fission study of further n-rich heavy isotopes produced through MNT of n-rich RNB's



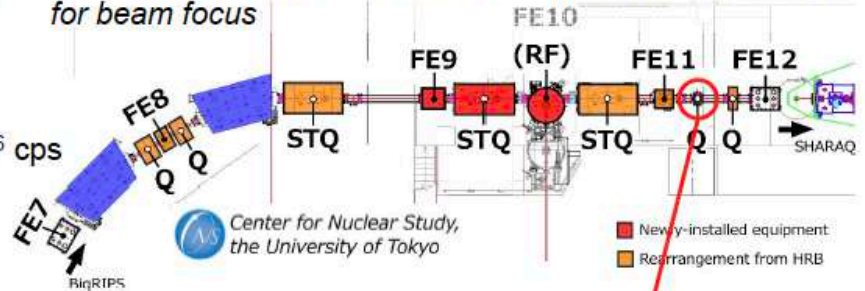
Courtesy of X.Y. Watanabe@KEK

**BigRIPS at RIKEN**  
 $^{238}\text{U}$  (345 MeV/A, 50 pA) fission

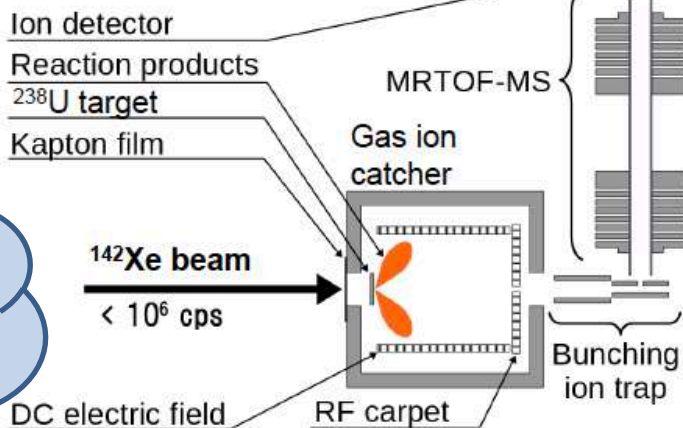
Secondary beam	Beam intensity
$^{137}\text{Xe}$	$2 \times 10^6$ cps
$^{138}\text{Xe}$	$4 \times 10^6$ cps
$^{139}\text{Xe}$	$4 \times 10^6$ cps
$^{140}\text{Xe}$	$5 \times 10^6$ cps
$^{141}\text{Xe}$	$3 \times 10^6$ cps
$^{142}\text{Xe}$	$2 \times 10^6$ cps
$^{143}\text{Xe}$	$5 \times 10^5$ cps
$^{144}\text{Xe}$	$1 \times 10^5$ cps
$^{145}\text{Xe}$	$2 \times 10^4$ cps
$^{146}\text{Xe}$	$2 \times 10^3$ cps

$> 10^6$  cps

**OEDO (Optimized Energy Degrading Optics for RI beam)**  
 Energy-degrading system for RI beam with an RF deflector for beam focus

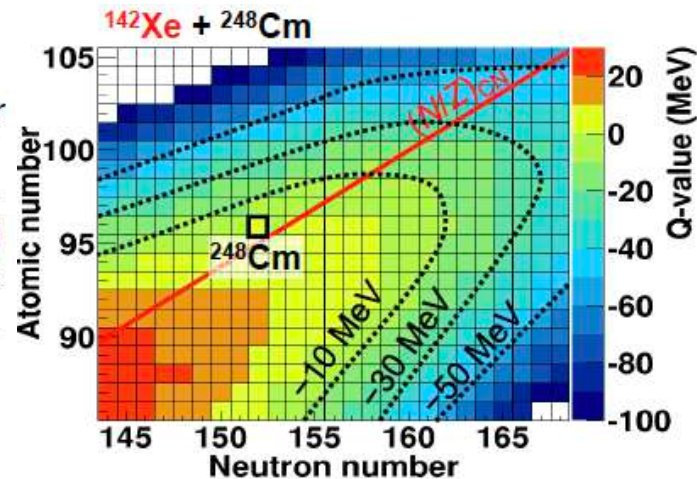


Energy-degradation down to  $< 10$  MeV/A

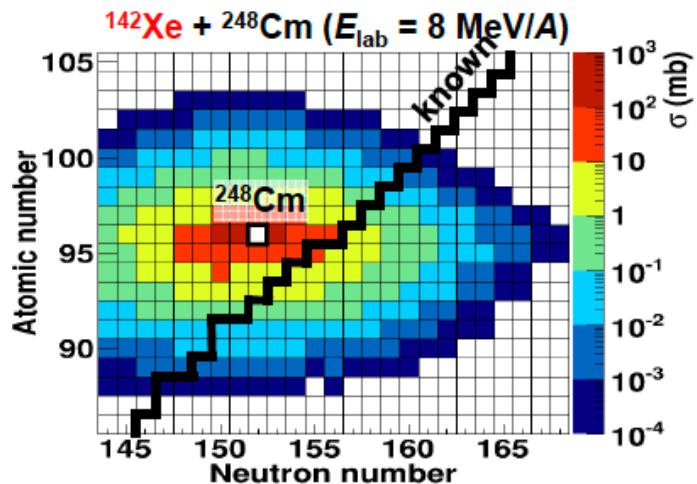


HIE-ISOLDE  
 High-quality low-energy RI beam

$3.7 \times 10^7$  cps @ 1  $\mu\text{A}$  proton beam

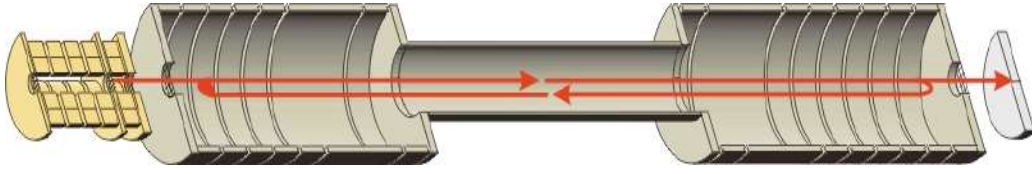


N/Z<sub>crit</sub>-lineが標的よりも  
 n-richサイドになる！！



# おまけ：All about MRTOF-MS

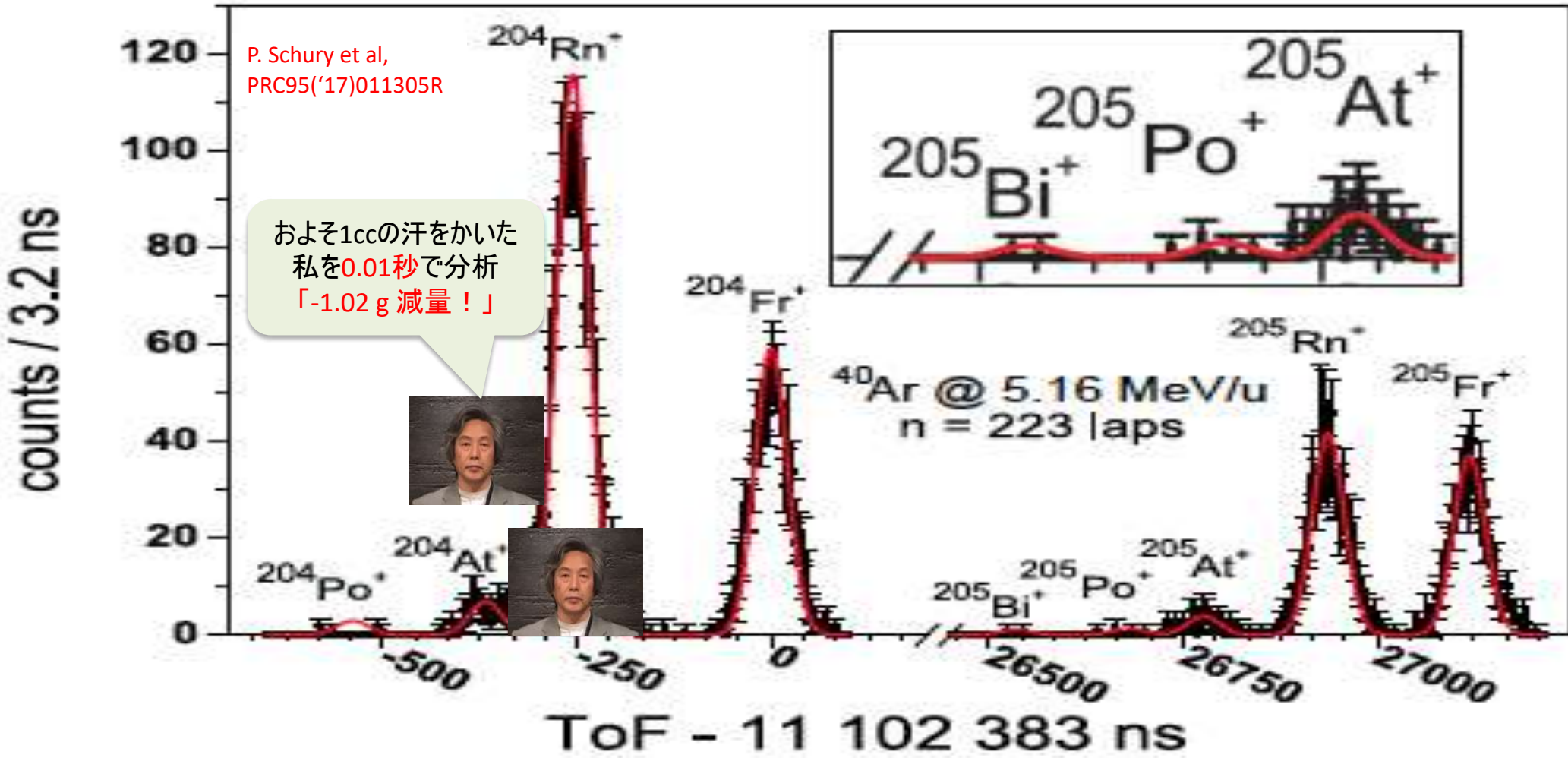
## 多重反射型飛行時間測定式質量分析器



イオンミラー

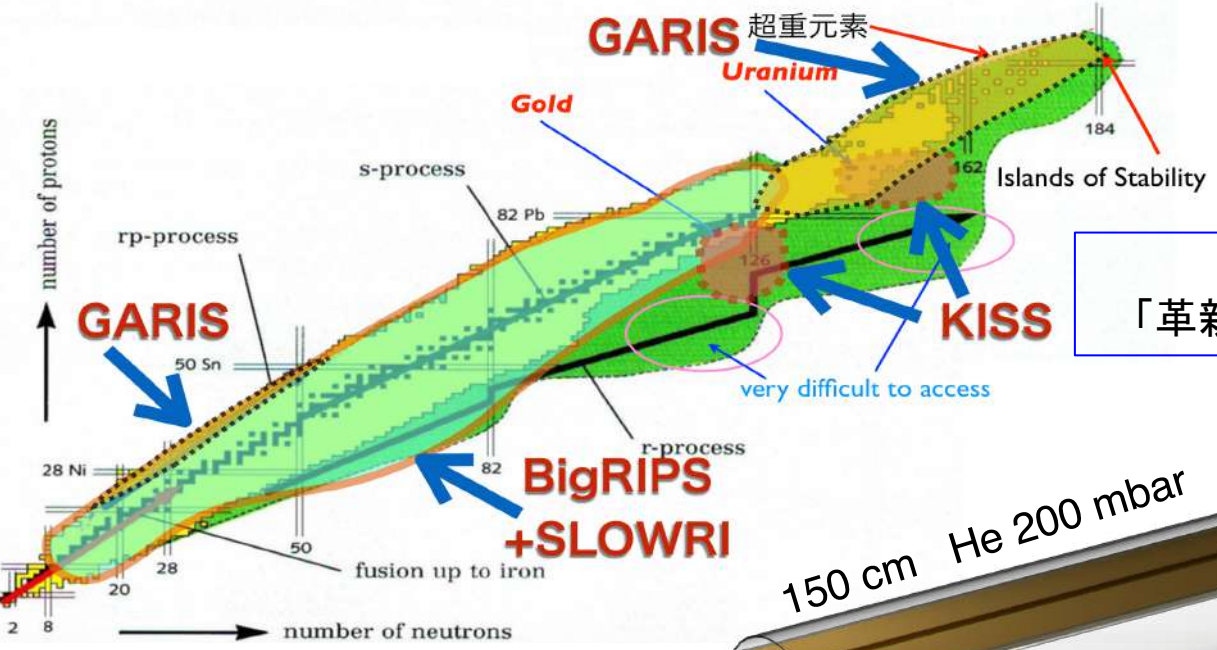
イオンミラー

- ・ 15年をかけて、KEKと理研が開発。
- ・ 高精度・高確度 ( $\delta m/m \sim 10^{-8}$ )
- ・ コンパクト ( $\sim 1 \text{ m}$ ) で高速分析 ( $\sim 10 \text{ ms}$ ) する革新的装置

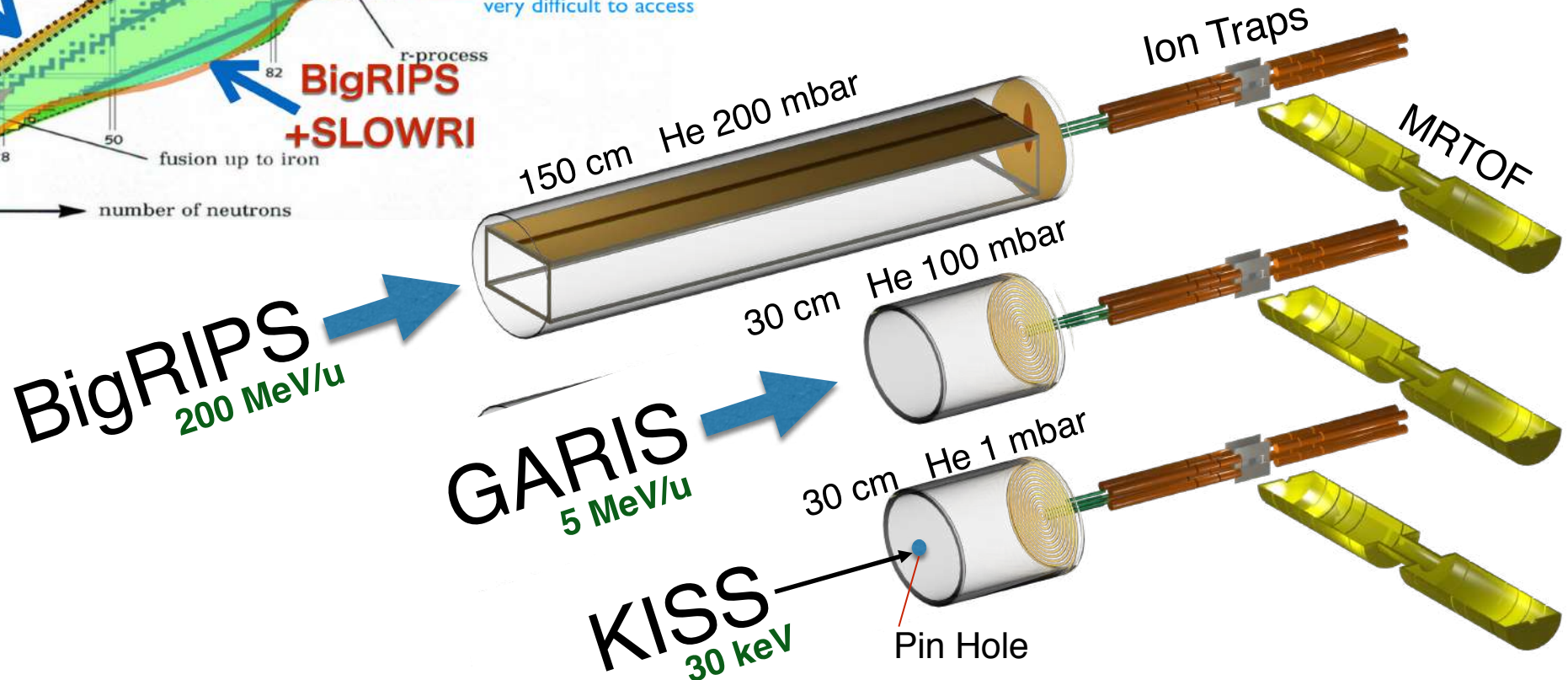




# おまけ：網羅的原子核質量測定プロジェクト、RIBF (2017~)



特別推進(和田:2017-2021)  
「革新的質量分光器を用いた重元素の起源の研究」



# 119番元素 合成に策あり

113番ニホニウムの次へ 理研が実験開始

2018/6/28朝日

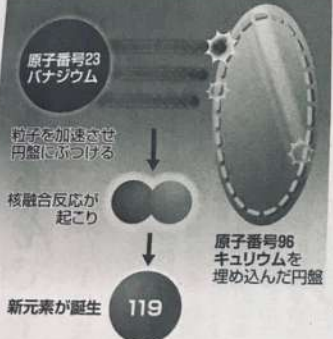
元素の周期表

1	H	2	He	3	Li	4	Be	5	B	6	C	7	N	8	O	9	F	10	Ne	11	Na	12	Mg	13	Al	14	Si	15	P	16	S	17	Cl	18	Ar	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	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	55	Cs	56	Ba	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	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	87	Fr	88	Ra	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	Mn	102	Lv	103	Ts	104	Og
---	---	---	----	---	----	---	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	----	---	----	----	----	----	----	---	----	----	----	----	----	----	----	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	----	-----	----	-----	----	-----	----	-----	----



新元素を分離する装置「GARIS II」増玉  
東京市の理化学研究所

## 119番元素の作り方



## 装置を強化 「熱い核融合」で挑戦

「水素1」 「鉄126」な  
元素の種類を示す原子番号  
119番元素を合成する実験を始めた。装置の性能を高め、再び新元素の命名権獲得を目指す。実験を通じて、元素の特性などの理解が深まることが期待される。

113番元素「ニホニウム」を発見した理化学研究所などの研究チームが、今度は119番元素を合成する実験を始めた。装置の性能を高め、再び新元素の命名権獲得を目指す。実験を通じて、元素の特性などの理解が深まることが期待される。

号は、原子核のなかにある陽子の数を表す。新元素はすでにある元素同士の足し算で作る。例えばニホニウム原子番号113番は、加速器を使って亜鉛(30番を金属のヒュスマス(83番の円盤型の標的)に高速で打ち込んで作った。119番元素は、比較的高いエネルギーで、国内に研究が利用できないものが多く、米オクリッジ国立研究所が原子炉で製造し、提供してもらう。羽場宏光・超重点元素合成研究チームリーダーは「実験開始に必要な量に足りる量を何とか用意できるものがある」と意気込みを述べた。

か提供してもらったと言った。理化学連合(IUPAP)によるニホニウムの合成とは異なる方法も取り入れる。人工的に作った新元素は非常に不安定で、アルファ線を放出して一瞬で崩壊し、別の元素に変わってしまう。

新元素を作ったことを証明するため、ニホニウムでは、合成した新たな原子核のエネルギー状態が低い「冷たい核融合」という方法を使い、崩壊過程をよく知られた元素にたどりつけるようにして、国際純正・応用化学連合(IUPAC)と国際純粋・応用物

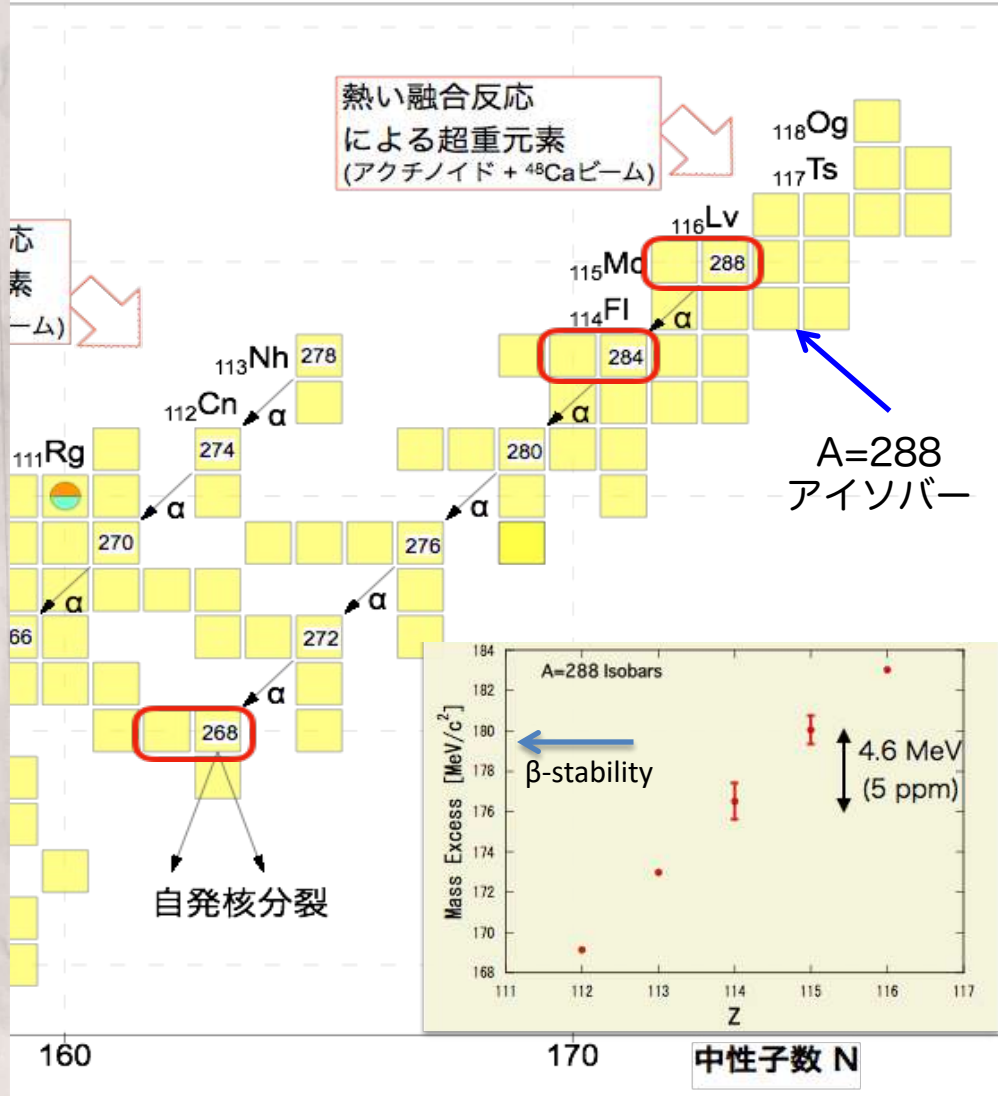
質測定器 命名権後押し? 119番元素を作りだす実験と同時に、解析技術の研究も進んでいる。高エネルギー加速器研究機構(次城東つくば市)などの国際研究チームは、元素ごとのわずかな質量の違いを検出できる測定器を開発した。

この測定器は、合成した元素をとらえて、装置の中を飛ぶ時間から質量を測ることができるとしている。これまで、崩壊過程を明らかにすることで新元素の発見を立証してきたが、質量を厳密に測れるようになれば、崩壊までに長時間かかる場合や、崩壊する過程がよく

質量は、新元素の証明だけでなく、原子の寿命や、どのような状態になるかを知る手がかりになるため、今後の分析にかかせないという。高エネルギーは、この測定器を使って約300番のうちの13種類の同位体で、精密な質量を明らかにして、和道浩治教授は「質量測定は、ニホニウムに続く、次の命名権を後押しする強力な武器になるかもしれない」と話している。

# 重核質量測定 @GARIS II

超重核の質量 ↔ 原子番号の物理的同定



中性子数 N



# まとめ（と核理論研究への希望）



- KISS projectは金・白金ピーク起源核の性質を調べて、その天体環境条件を解明しようとしている
- ユニークに測定寿命を説明できる模型がないことの背景として、**核変形の定量的な理解（特に閉殻近傍の変形共存）**が必要だと思われる
- 核分裂サイクルの詳細な核データは、r-過程の理解に大きなインパクトを持っているにも拘らず理論・実験ともに極めて不十分な状況にある
- r-過程終焉部にも関連する核分裂研究では、魁となるJAEAでの実験に続いて、KEK, Rikenなどで実験的研究が画策されている
- 原子核質量の高精度・高効率・高速度測定を可能としたMRTOFの威力は、（主に基底状態の）nuclear mass map作成の現実性に結びついている
- n-rich heavy isotope生成のfeasibilityを知る上で、MNT反応機構の定量的理解が欠かせない。特に**n-rich RNB'sによるMNT反応の特徴**をいち早く抑えたい
- 核分裂サイクルを元素合成の定量的シミュレーションに載せるには、**精度良いPES-map（多体分裂の可能性も含む質量非対称度（変形度？）、重心間距離をパラメーターにした）**確立が急務だと思われる
- 詳細なPES-mapをもとに、**核分裂障壁や核の励起エネルギー**を関数とした核分裂片の分布予測までを一貫した動的模型で記述出来ないだろうか？

End



# r-過程の第三ピークと終焉領域

## - KEK-WNSCのアプローチ -

20180620-21重力波時代のrプロセスと不安定核  
H. Miyatake, WNSC, IPNS, KEK

いつ・どこでできたのか？  
天文観測

異なる天体・世代星での元素存在比  
動的・静的情報

*直接的な情報*  
合成経路、合成条件  
(存在比パタンの説明)

銀河における物質進化の解明  
爆発的天体モデルの  
定量化・精密化

どのようにできたのか？  
原子核物理

極端条件（高温、高密度、中性子  
過剰など）下の反応・構造

どうしてできたのか？  
宇宙物理

起源天体の動的・静的性質  
極端状態下の物質形成

*間接的な情報*  
核物理パラメータ曖昧さの解消  
未知核の性質予測

# もう少し先に行ってみよう

- r-過程終焉部・核分裂障壁 -

Relative strength:  $\beta$ -decays & n-captures along the path at  $N=184$  vs  $N=126$

**$A \sim 110 - 170$  (including rare-earth peak):**

Fission Fragment Distribution  
Fission rates  $A \sim 278$  ( $N=184$ )  
+ (n, $\gamma$ ) &  $\beta$  competition

**$A \sim 195$  peak:**

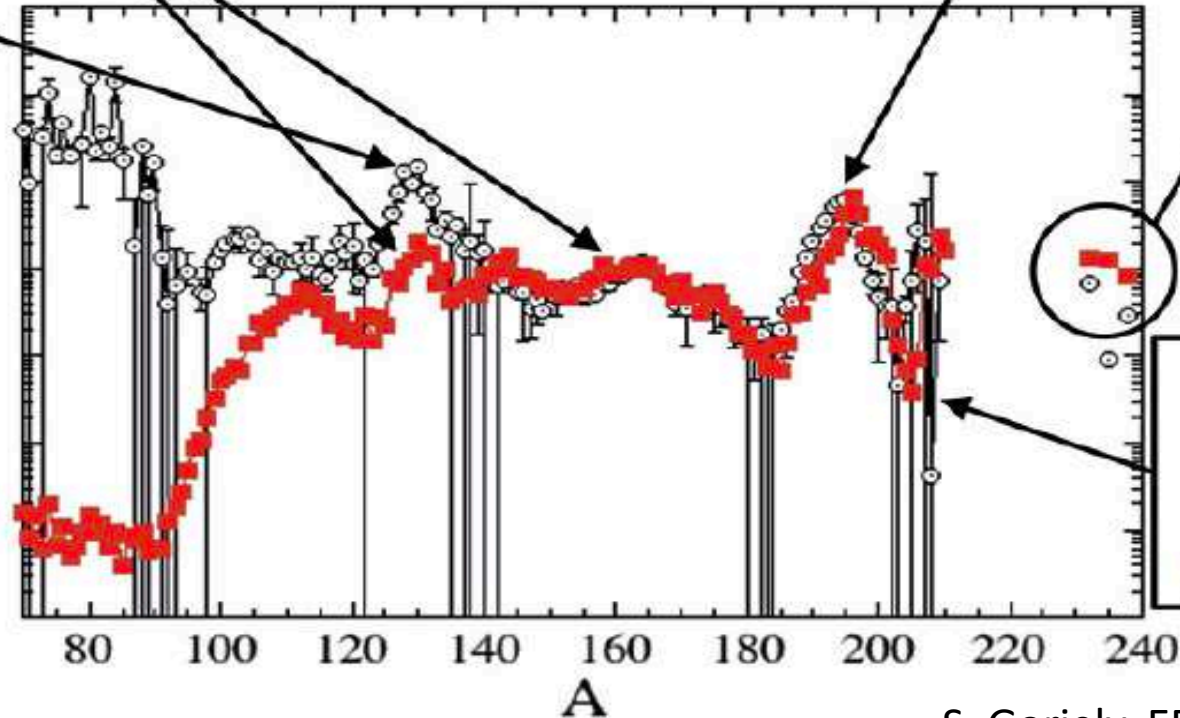
(n, $\gamma$ ) &  $\beta$  competition ( $N=126$  shell)  
+ late-n capture (prompt fission neutrons &  $\beta$ -delayed neutrons)

**$A \sim 130$  peak (?):**

If symmetric FFD at  $A \sim 278$  with  $\nu \sim 20$  prompt neutrons emitted

Th & U:  
(n, $\gamma$ ) &  $\beta$

**$A \sim 202$ :**  
(n, $\gamma$ ) &  $\beta$   
(plus fast expanding trajectories)



超重核領域 ~ r-過程終焉部  
天体核物理に対する  
インパクト

測定対象  
生成・分離・測定における  
イノベーション

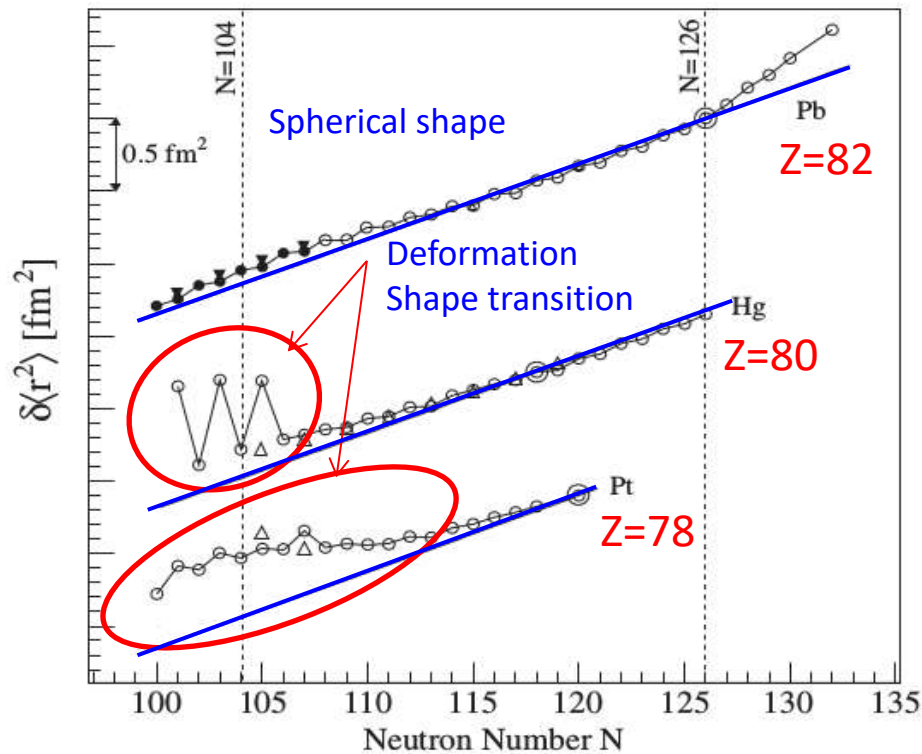


# Hyperfine structure in the In-gas laser spectroscopy

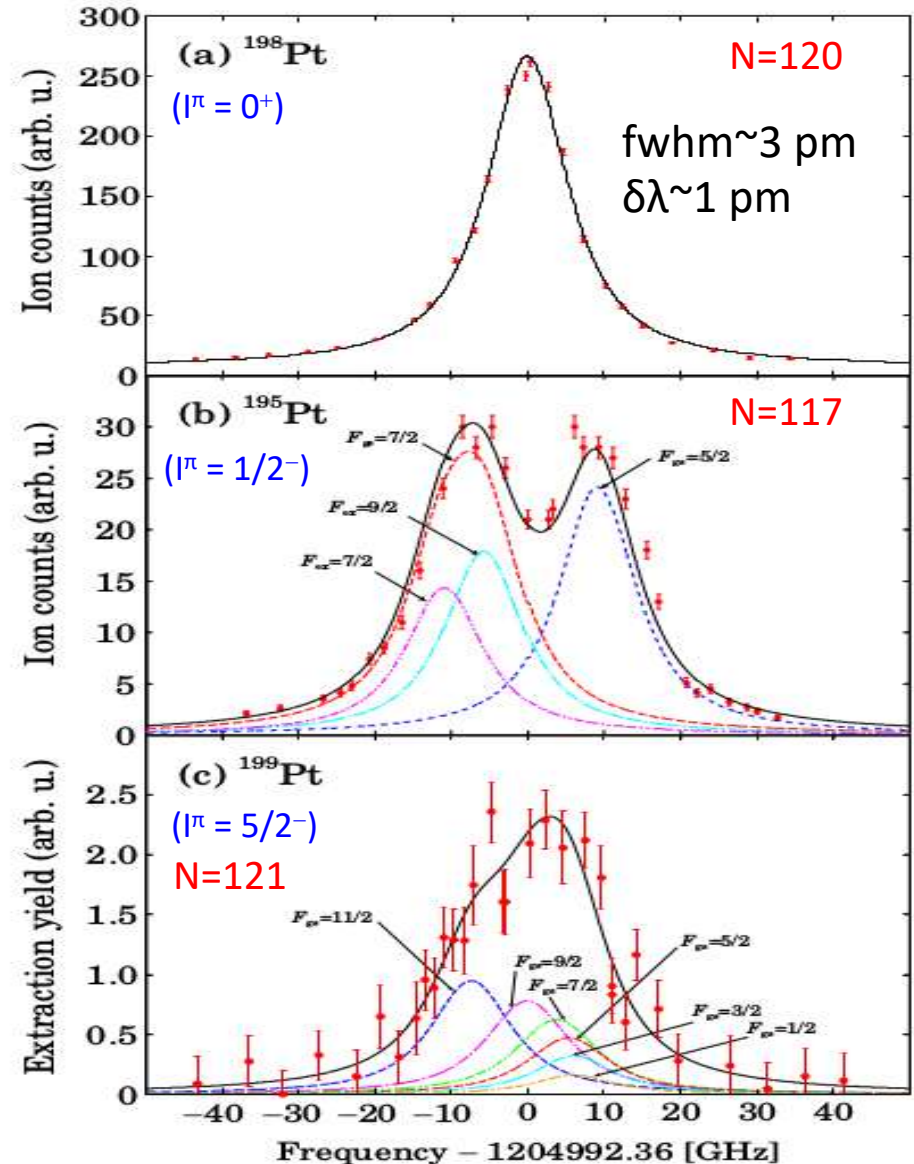
## Study of nuclear structure in the N=126 region

### Laser spectroscopy

- Isotope shift
  - charge radius
  - deformation
- Hyperfine structure
  - $\mu, Q$
  - wave-function



PRL98(2007)112502





# Masses to be measured

Experimentally Synthesized :  $\approx 3300$

Mass Known ( $\delta m/m < 10^{-6}$ ): 2300

Synthesized but Mass unknown :  $\approx 1000$

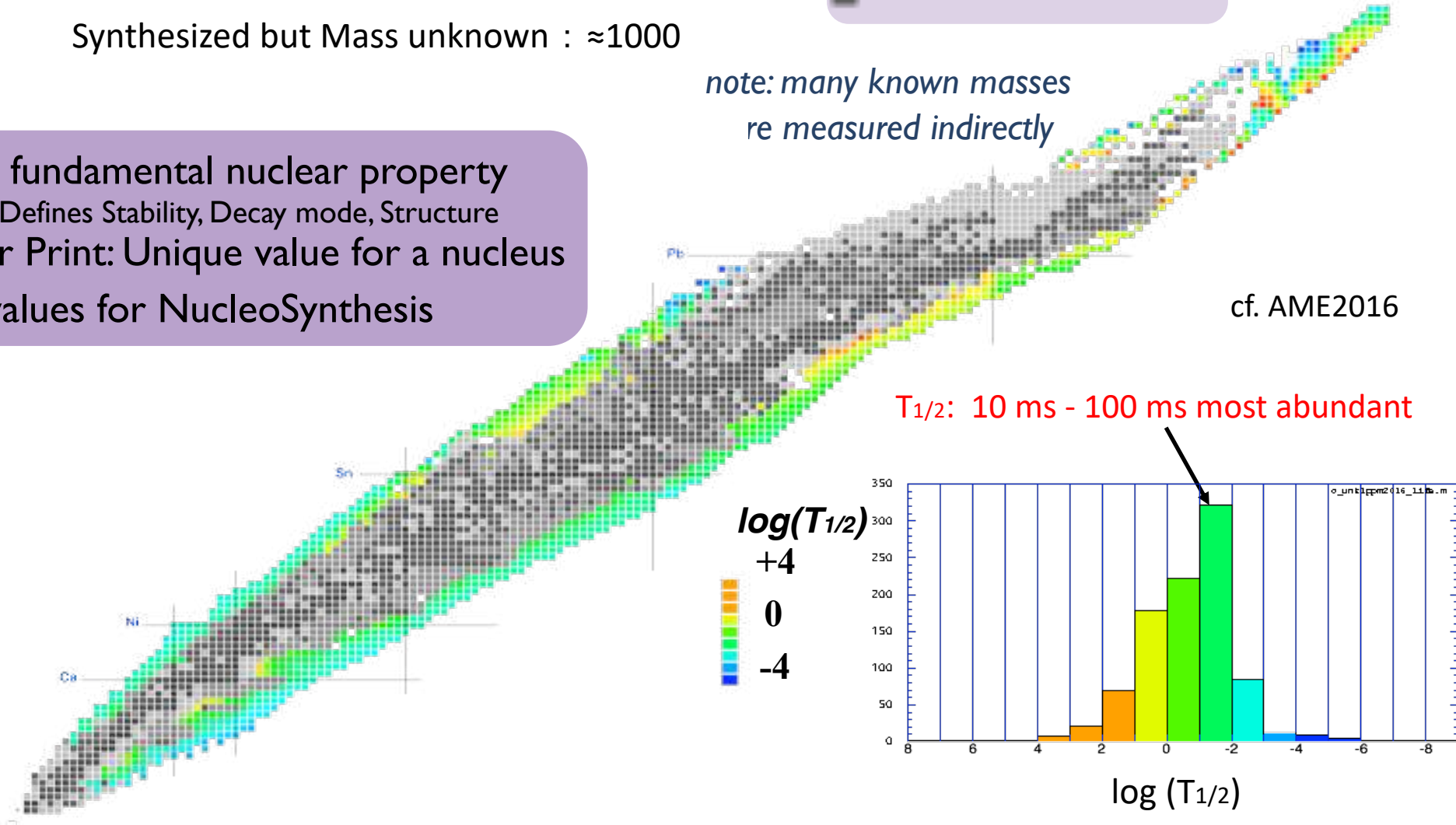
decay, reaction (660)  
mass spectrometry

note: many known masses  
re measured indirectly

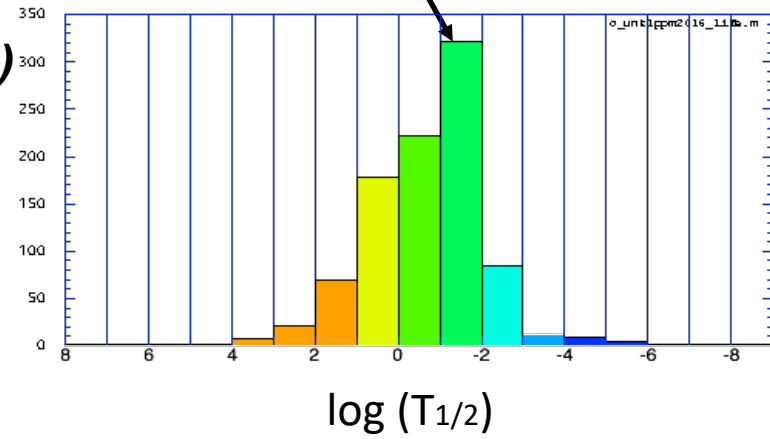
- Most fundamental nuclear property  
Defines Stability, Decay mode, Structure
- Finger Print: Unique value for a nucleus
- Key values for NucleoSynthesis

cf. AME2016

$T_{1/2}$ : 10 ms - 100 ms most abundant



$\log(T_{1/2})$   
+4  
0  
-4



# KISS-MRTOF-MS: 2017年度後半から測定可能

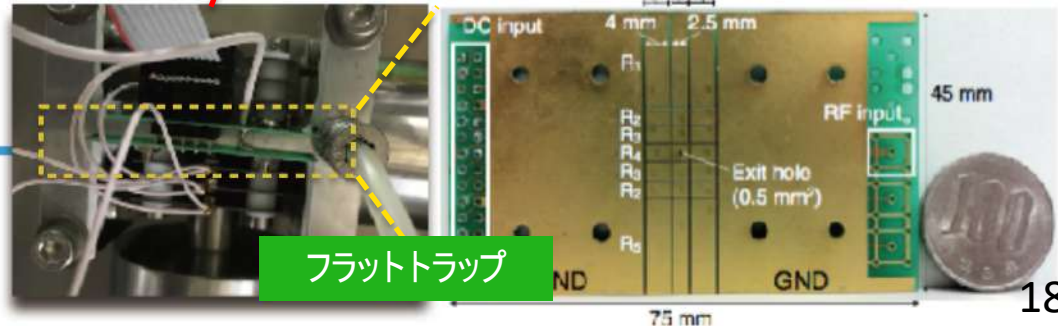
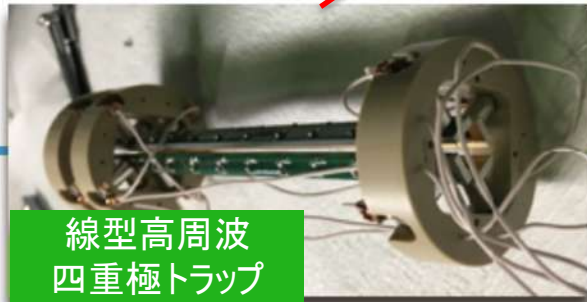
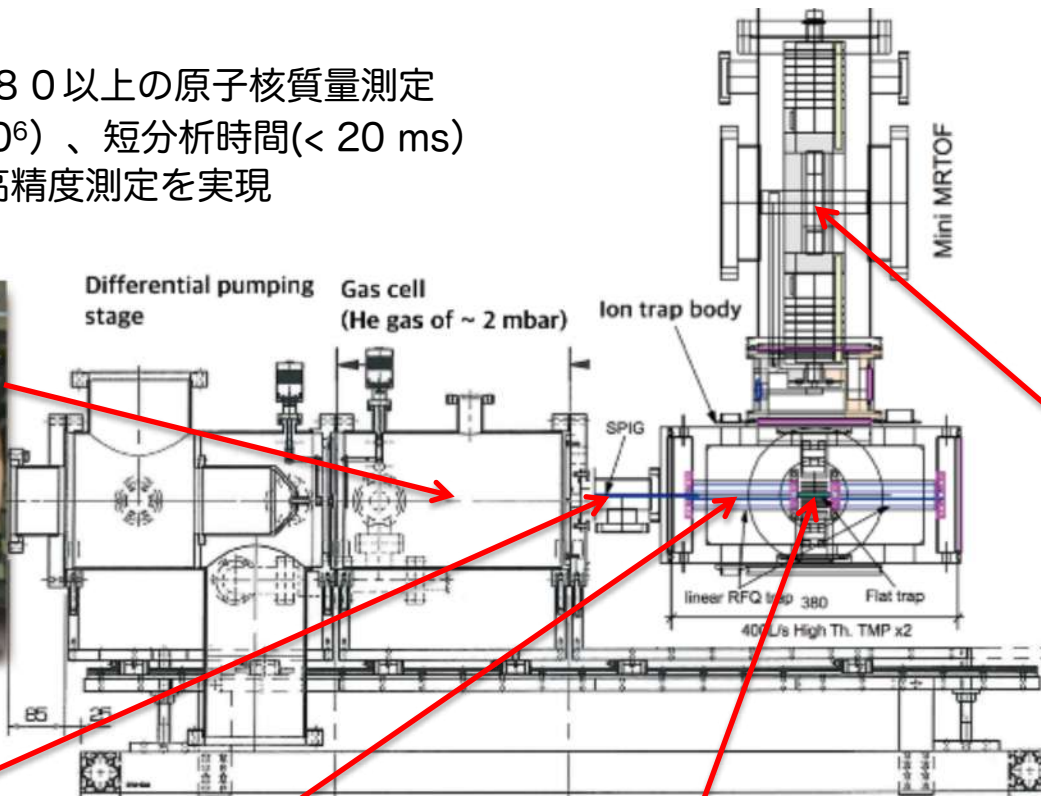


## 実績ある装置:

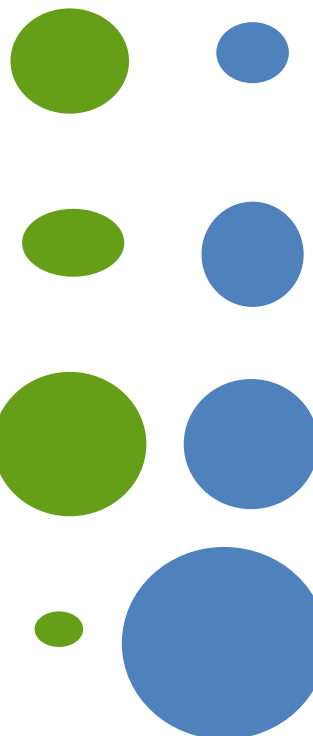
- ・超ウラン元素(6種)を含む80以上の原子核質量測定
- ・十分な分解能( $M/\Delta M > 10^6$ )、短分析時間(< 20 ms)
- ・世界に先駆けて高確度・高精度測定を実現

基盤S(2012), 特推(2017)

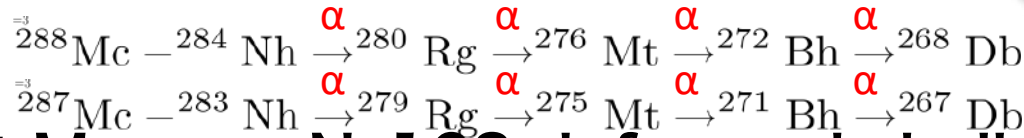
ヘリウムガスセル



# Summary of physics cases @ GARIS-II E6



- Pin down masses of hot-fusion SHE **10 events for 0.4 MeV precision**

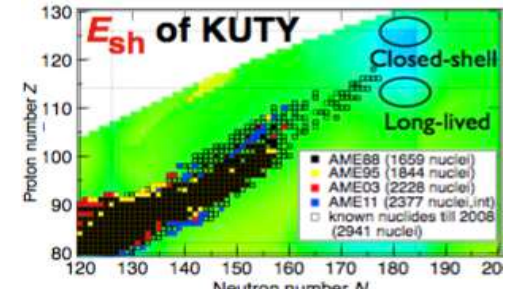
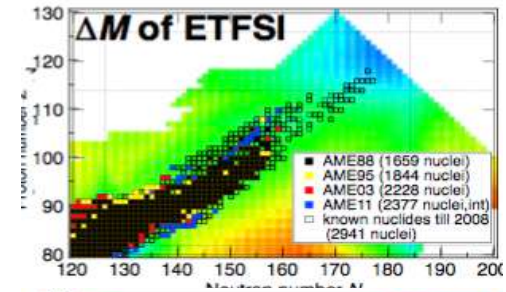
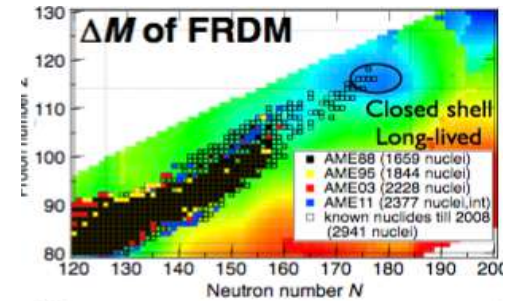
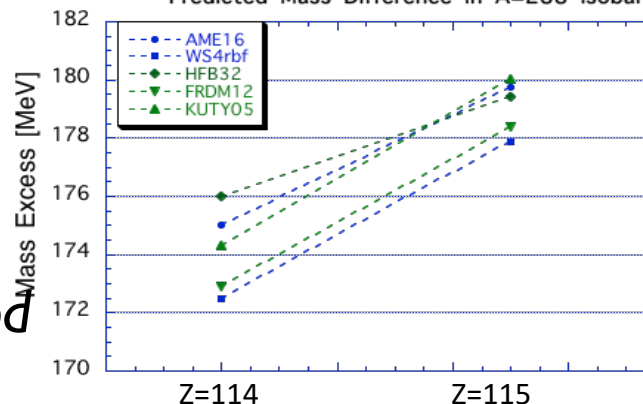


- First Masses  $N > 162$  deformed shell  
*Island of Stability prediction depends strongly on  $N=162$  sub shell (cf. H. Koura)*

- A-identification **2 events is sufficient**



- Z-identification **10 events is sufficient if theories are accurate**



Feasibility Impact

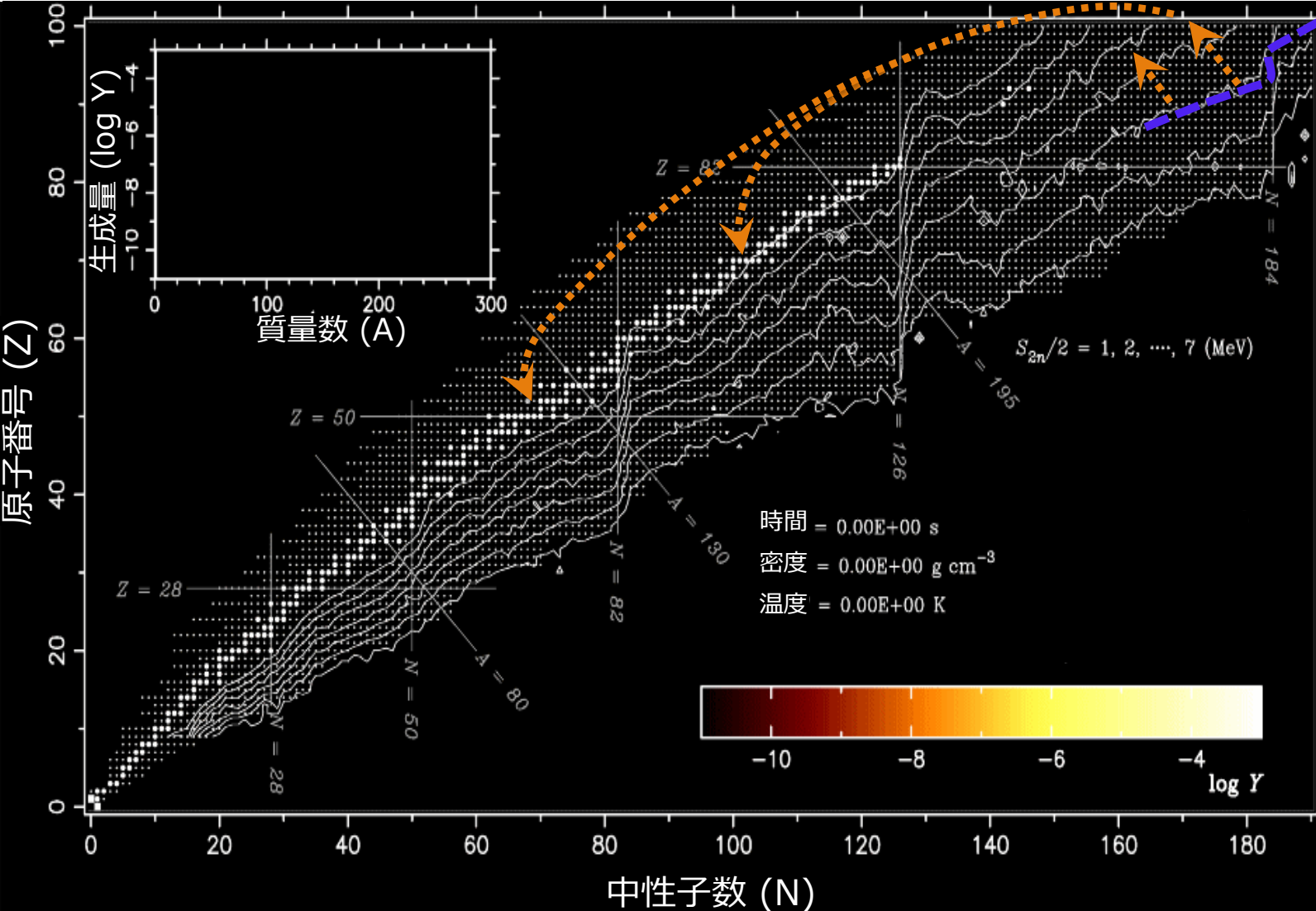
X-ray ?  
chemistry ?

not accepted by JWP of IUPAC+IUPAP  
but, they ask "Direct Physical Method to identify Z as well as A"



# NSM赤道面(low $Y_e$ ): 核分裂リサイクル??

ガンマ線、電磁波、元素存在比パターンと比較

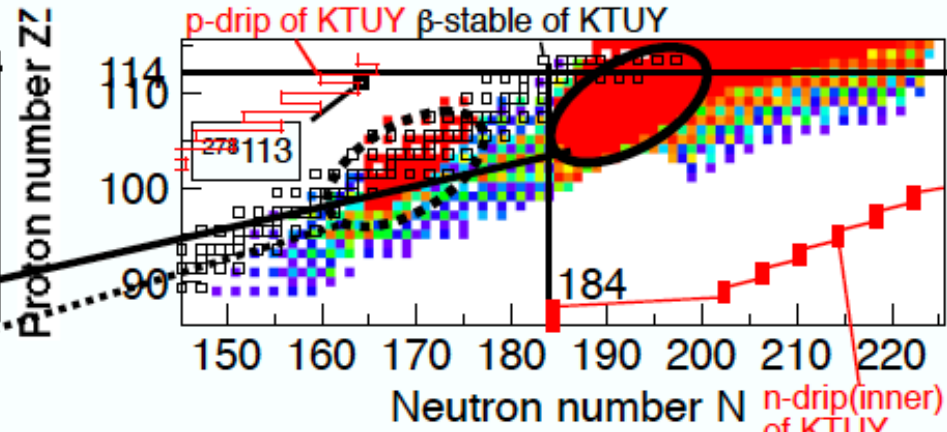
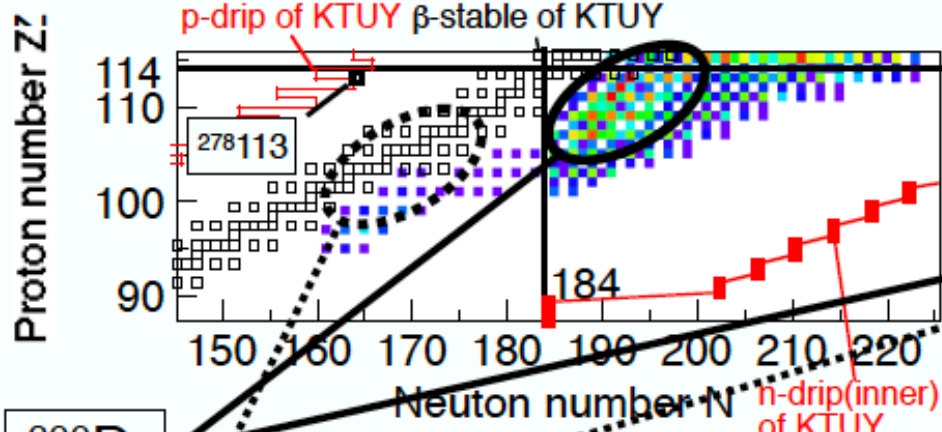


- 新しい核反応手法による終焉領域探索
- ・ r-過程終焉領域とはどこなのか？
  - ・ どのように終焉するのか？
  - ・ 元素生成比への核分裂の影響は？
  - ・ 超重元素は生成されるのか？

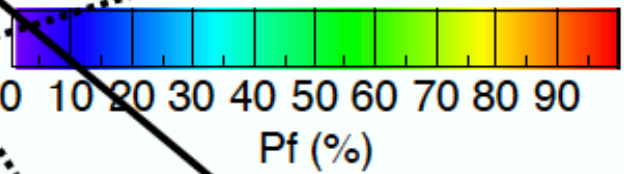
# Results - $\beta$ -delayed fission probability $P_f$

$P_f$  (no correction)

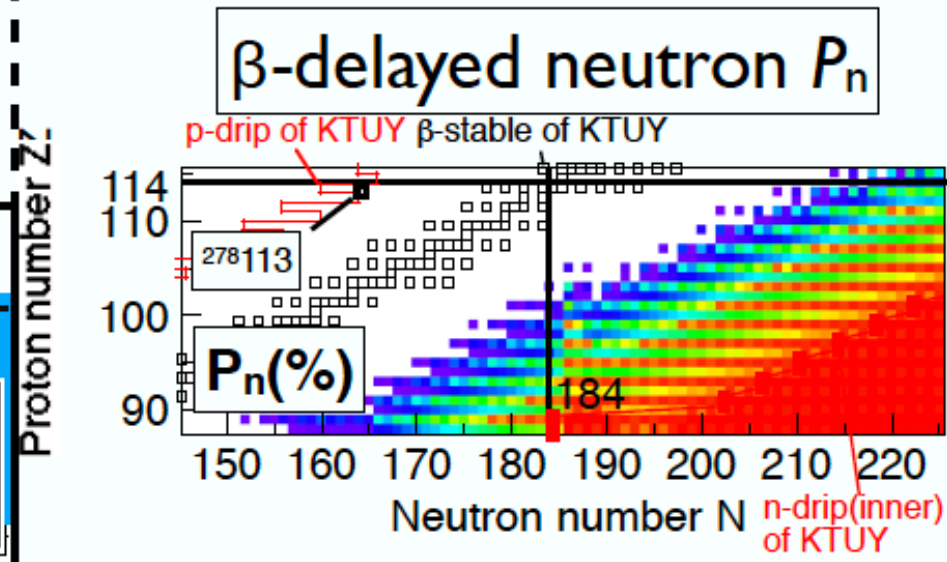
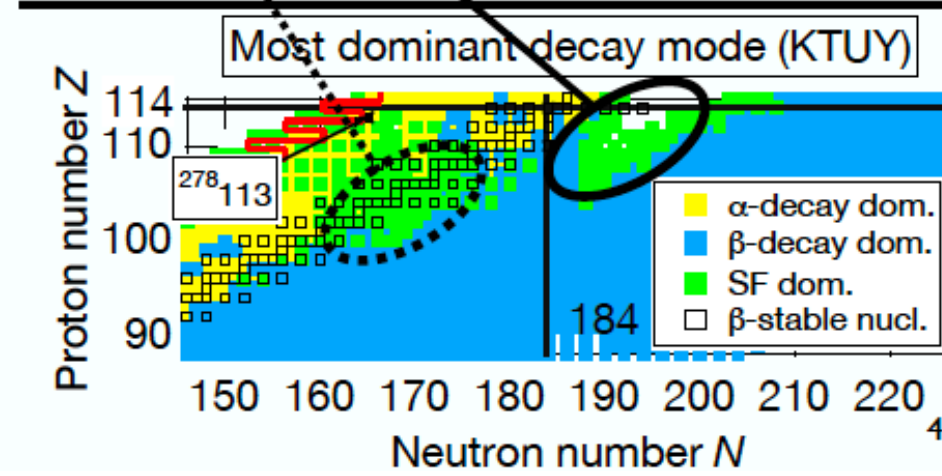
$P_f$  ( $B_f$  is 3MeV reduced)



$\sim 300$  Ds  
 $\sim 270$  No



$\beta$ -delayed neutron  $P_n$



Tachibana, Koura

Courtesy of H. Koura@JAEA