



WNSC
KEK Wako Nuclear Science Center



安心安全な新たな核エネルギー創出のための 元素変換研究の推進(案)

理化学研究所
仁科加速器科学研究センター

櫻井 博儀

RIビームファクトリー：世界に冠絶する重イオン加速器施設

“超重元素研究”

重イオン加速器施設の国際研究拠点

陽子数 Z 最大の原子核

核融合 ~ 5 MeV/u

ニホニウム(113番元素)
→119番元素

KEK: KISS

多様な超ウラン原子核

多核子移行反応 ~ 10 MeV/u

旧施設 (1986-)

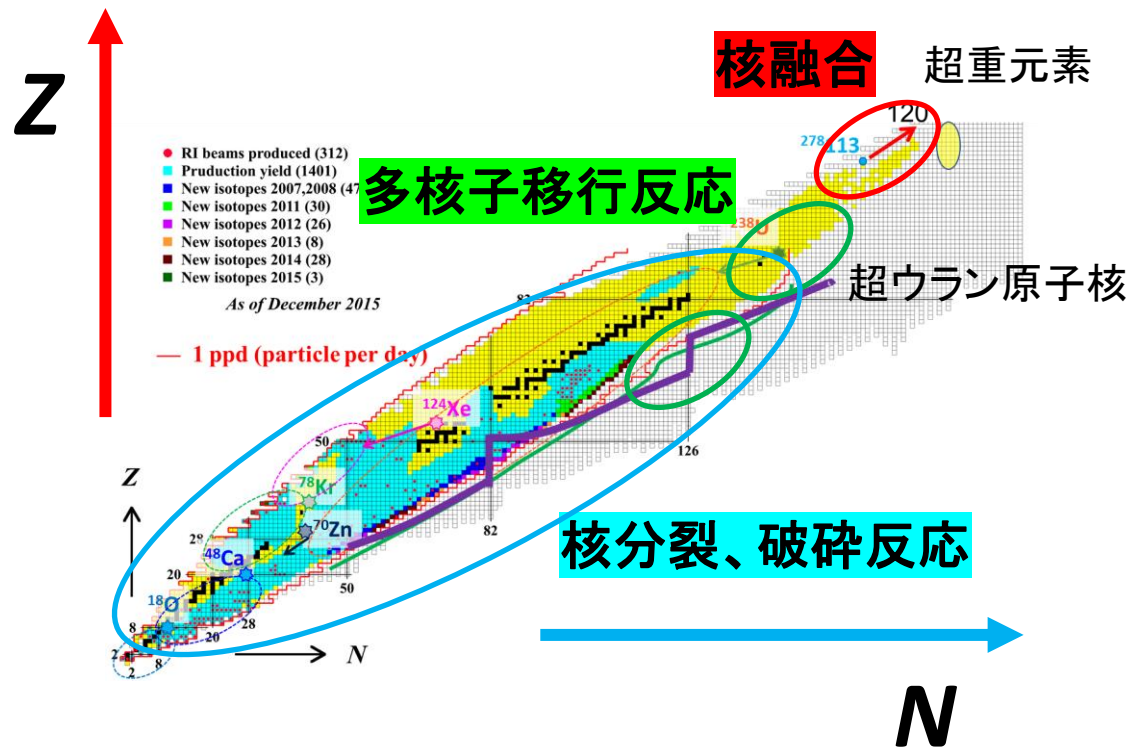
新施設 (2006-)

“エキゾチック原子核”

中性子数 N 最大の原子核
中性子過剰な原子核

核分裂、破砕反応

345 MeV/u



RI ビームファクトリー

“エキゾチック原子核”



超伝導リングサイクロトロン (SRC)
 世界最強
 エネルギー 345 MeV/u
 ウランの全運動エネルギー
 80 GeV(ギネス登録)

1次ビーム

標的

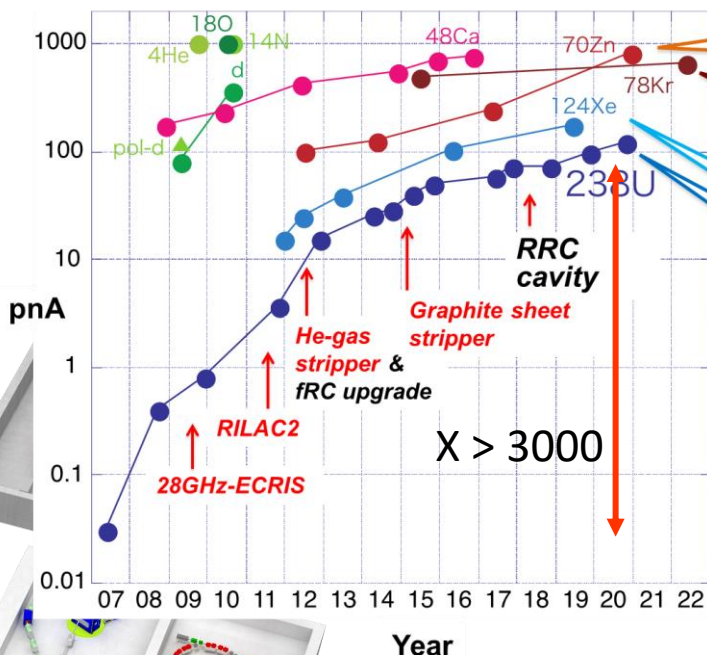
新施設 (2006-)

RIビーム

200-250 MeV/u

超伝導RIビーム生成分離装置
 世界最高のRI収集効率

核分裂、破碎反応



70Zn: 788 pA
=> 19.0 kW

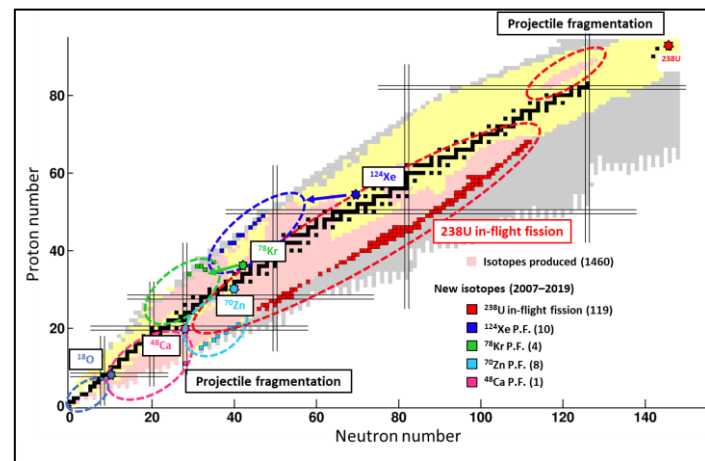
78Kr: 690 pA
=> 18.6 kW

124Xe: 173 pA
=> 7.4 kW

238U: 117 pA
=> 9.6 kW

2007年稼働以来、
 ウランビーム強度
 3000倍以上
 2013年以降
 可用性 95%以上

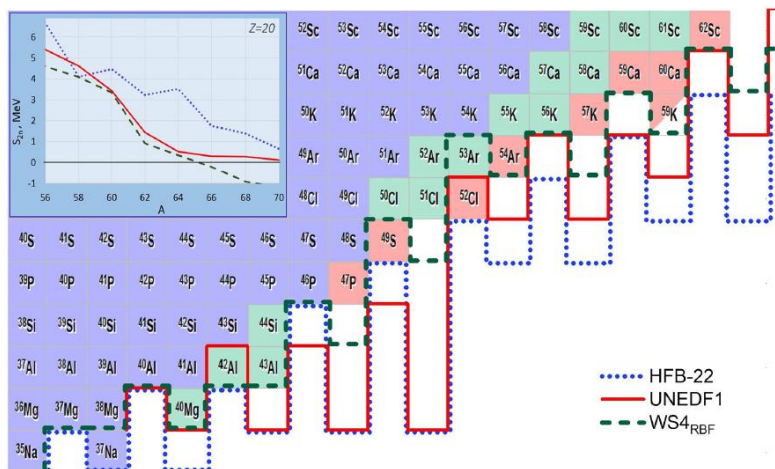
2007年稼働以来
 新同位元素150核種以上



新同位元素の発見 (2018年以降)

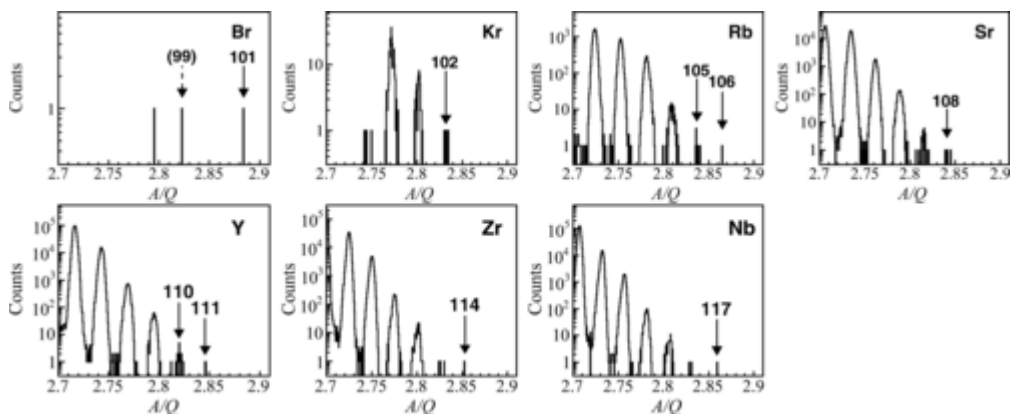
リン(P)-スカンジウム(Sc)領域の中性子過剰核 8核種

Tarasov et al., PRL 121, 022501 (2018)



臭素(Br)-ニオブ(Nb)領域の中性子過剰核 9核種

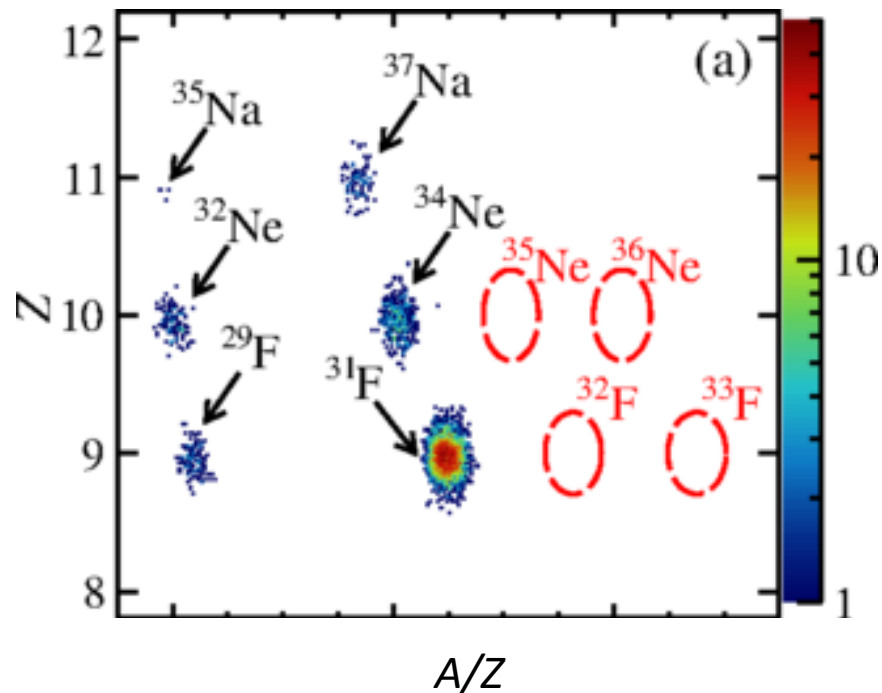
Sumikama et al., PRC 103, 014614 (2021)



フッ素(F)、ネオン(Ne)の中性子ドリップ線の決定

—原子核の地図の境界線を20年ぶりに更新—

Ahn et PRL 123, 212501 (2019)



近々にプレスリリースあり。(PRL, in press)

基幹実験装置群

SAMURAI



SCRIT



ZeroDegree



磁気スペクトロメーター

ZeroDegree

SAMURAI

SHARAQ+OEDO (東大・CNS)

質量測定用イオン蓄積リング

Rare-RI Ring

超低速RIビーム生成

RF Ion Guide, SLOWRI

ガンマ線検出器



Tracking-Ge
(阪大・RCNP)

Electron-Scattering

SCRIT+ISOL

RI-RI Scattering

RUNBA+ISOL

(京大・化研)

Rare-RI Ring



SHARAQ+OEDO (CNS)



BigRIPS



新施設 (2006-)

target

RI beams

~250-300 MeV/nucleon

新同位元素発見数ランキング

2021年末時点でのランキング

研究所別	国別
1位 Berkeley 640	1位 アメリカ 1335
2位 GSI 445	2位 ドイツ 566
3位 Dubna 221	3位 イギリス 299
4位 Cambridge 218	4位 ロシア 249
5位 RIKEN 191	5位 日本 233

Thoennesson <https://people.nsl.msui.edu/~thoennesson/isotopes/>

国際的に開かれた運営

国際実験課題採択委員会(年1回)

東大・CNS, KEKと共同開催

採択率 30%

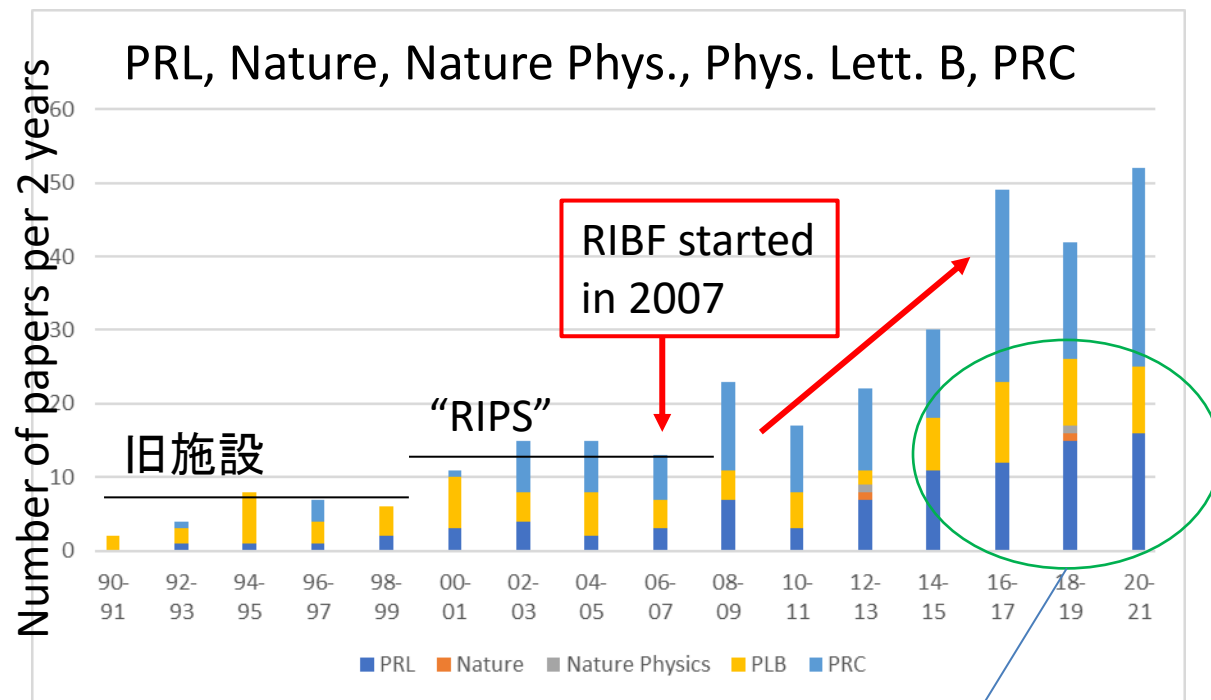
世界数十か国(FY2021実績25か国)から研究課題
年間のユーザー数(ただし、3か月運転)

コロナ禍前 300~400人(約30%が外国人)

海外研究者:大型検出器など、in-kindで貢献

欧州原子核物理委員会(NuPECC)の準メンバー

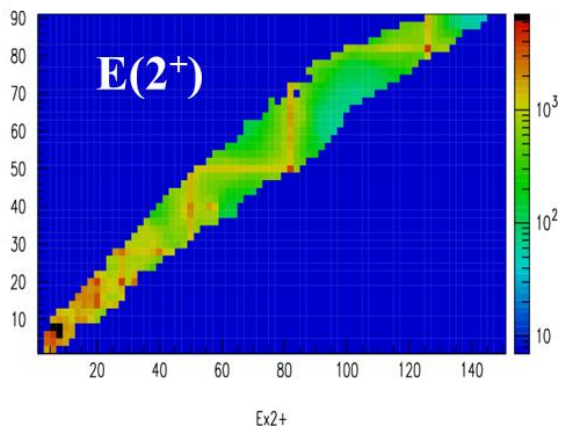
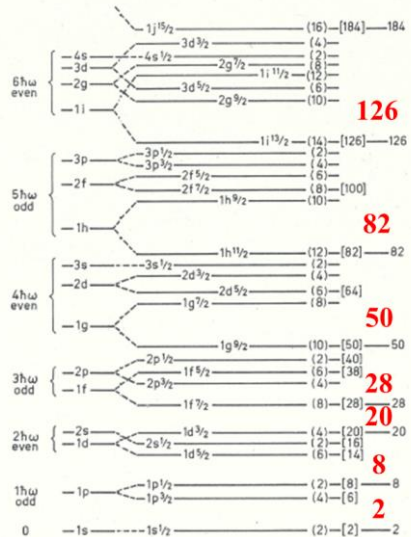
RIBFで生産された原子核物理学の論文数 (データ発表論文のみ)



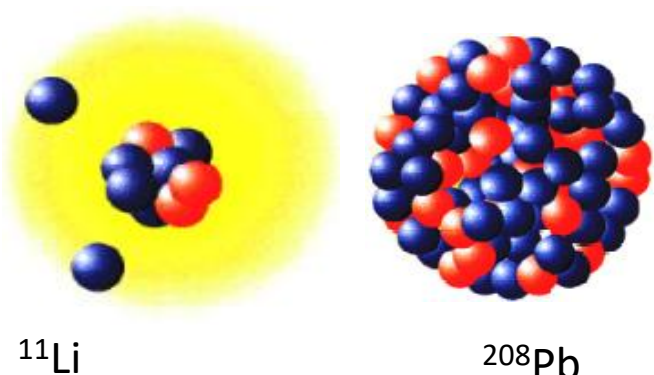
世界の他の重イオン施設と比べ、2-3倍の出版数

エキゾチック原子核のテーマ

殻進化：魔法数の喪失と新魔法数

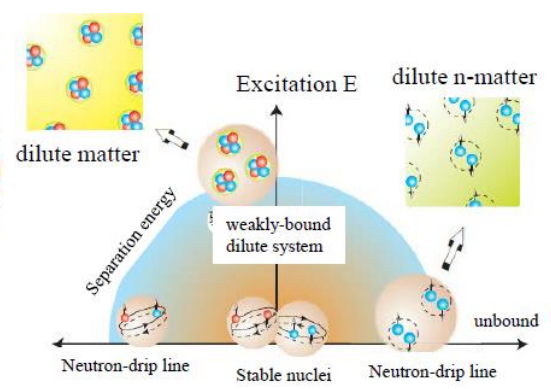


核子相関と凝縮 (核物質のBEC-BCSクロスオーバー)

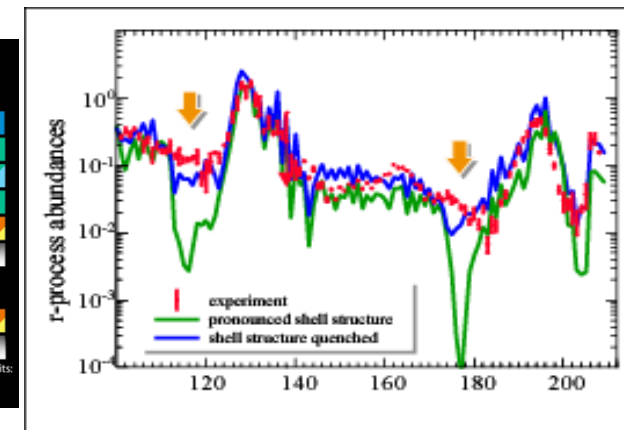
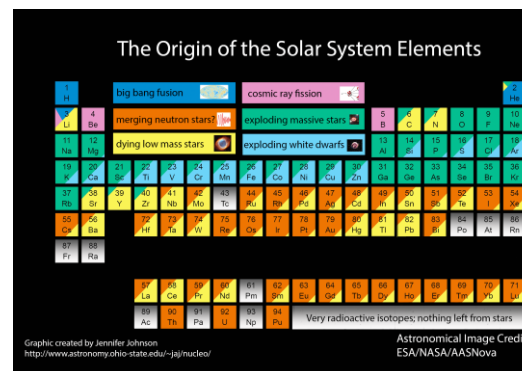


^{11}Li
(two neutron halo)

^{208}Pb



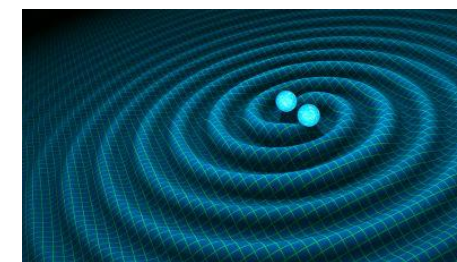
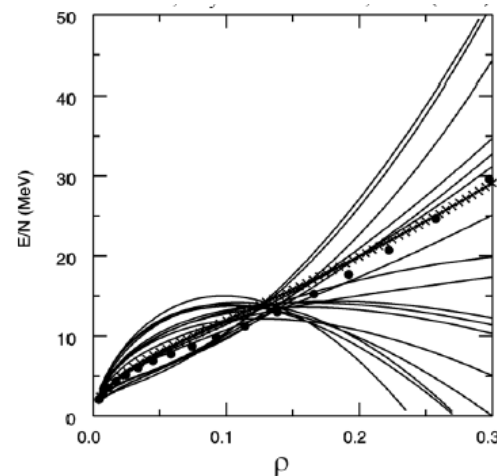
鉄からウランに至る宇宙での元素合成過程



Jennifer Johnson

<http://www.astronomy.ohio-state.edu/~jaj/nucleo/>

中性子過剰物質の状態方程式 超新星爆発、中性子星、重力波解析



gravitation wave
from neutron-star mergers

Space.com

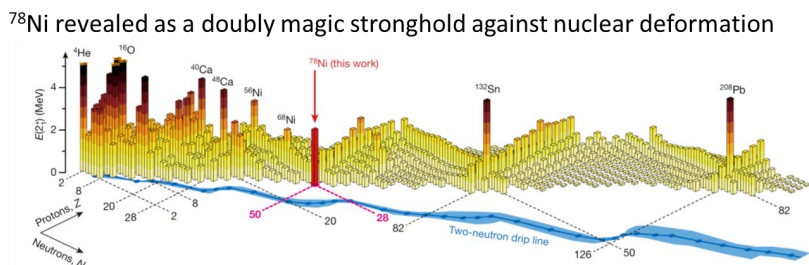
エキゾチック研究の成果(超厳選)(2007-2022)

殻進化:魔法数の喪失と新魔法数

新魔法数34の発見(Nature 2013)



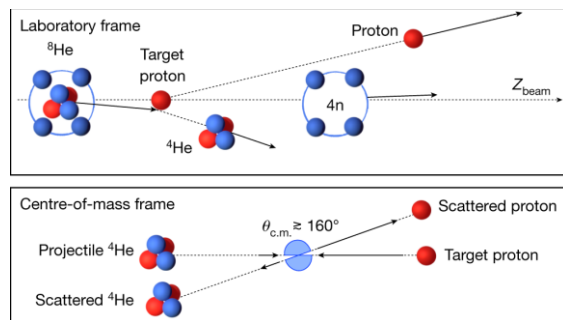
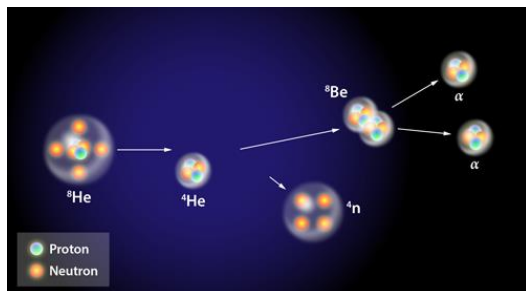
ニッケル-78の二重魔法数(Nature 2019)



Cu同位体の殻進化(Nat. Phys. 2019)

核子相関と凝縮

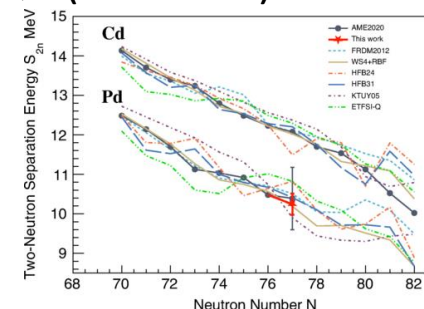
原子番号0の4中性子原子核の観測
(PRL 2016, Nature 2022)



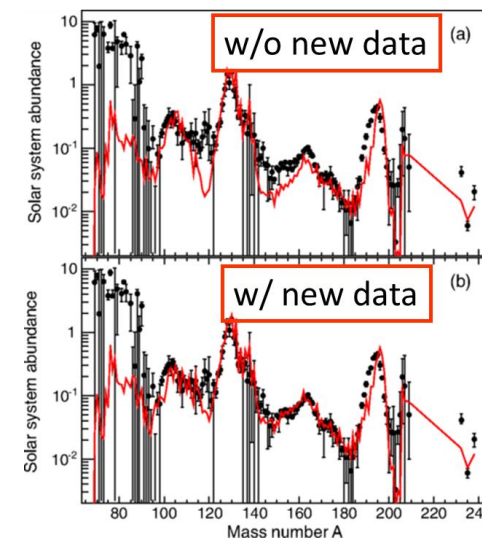
鉄からウランに至る宇宙での元素合成過程

未知核種の半減期
(PRL 2011, 15, 17)

質量測定(PRL 2022)



遅発中性子測定(PRL 2022)



中性子過剰物質の状態方程式

三体力研究 (PRC2017, 21)

Sn-132のガモフテラー
共鳴 (PRL 2018)

重イオン衝突による
硬さ測定

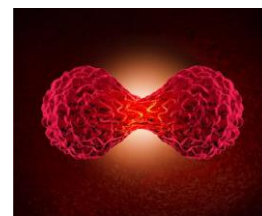
(PLB 2020, PRL 2021)



今後20年：軽元素から重元素、陽子過剰へ

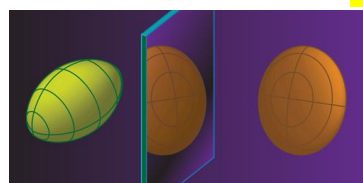
Courtesy of D. Suzuki

アルファ崩壊、核分裂は、量子的な微視的モデルで現象を再現することに成功していない
 実験・理論の協働で新エネルギー創出に挑戦



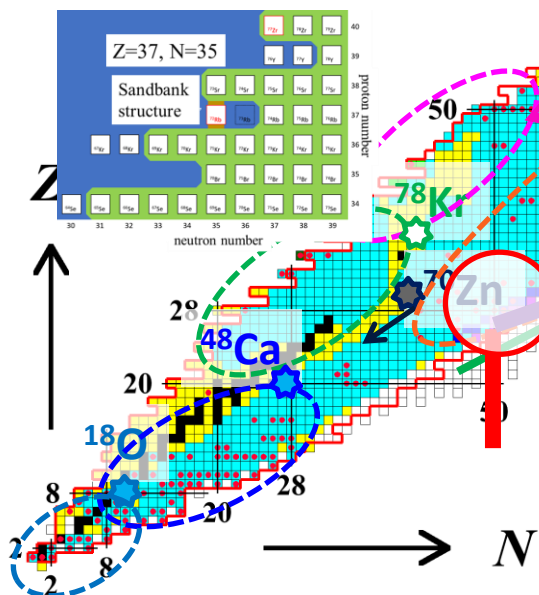
アルファ凝縮
核分裂

クーロン力と核力の競合



アイソスピン対称性？

陽子-中性子相関？



陽子ドリップ線

^{164}Pb

^{124}Xe

^{80}Ni

^{76}Fe

^{78}Ni を超えた魔法数？
元素合成過程のスタート地点

変形

新魔法数 $N=90$ ？

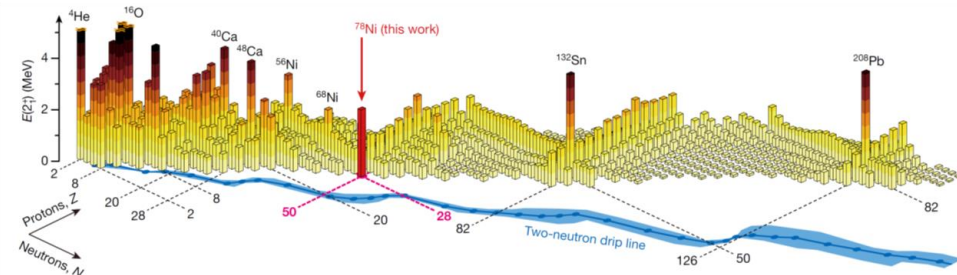
$N=126$ の魔法性？
元素合成過程の第三ピーク

マイナーアクチノイド

^{200}W

^{140}Sn

^{78}Ni revealed as a doubly magic stronghold against nuclear deformation



安定の島

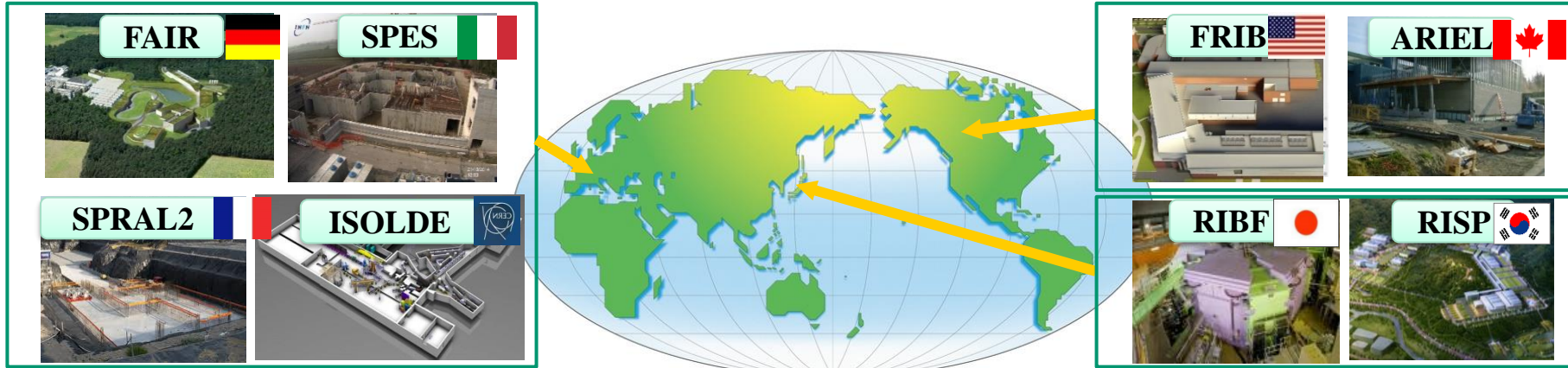
120

$^{278}\text{113}$

^{238}U

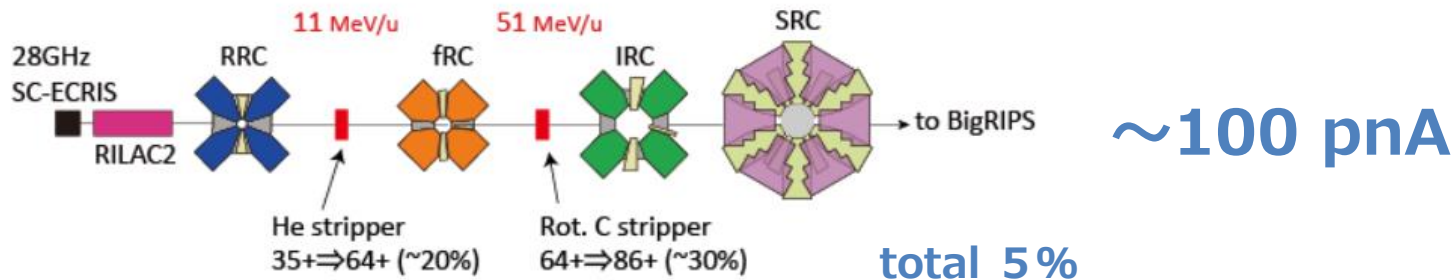
184

$N=184$ ？



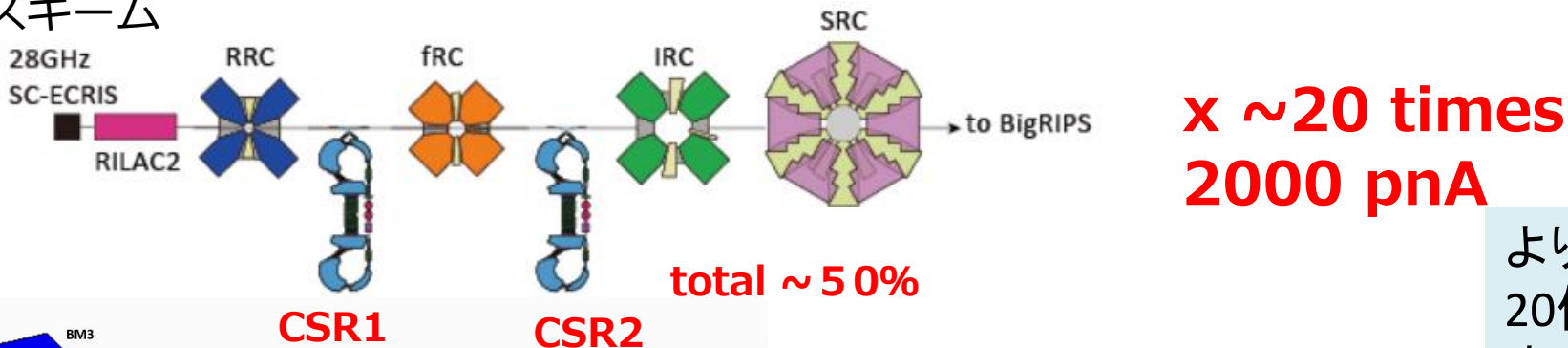
荷電変換リング (CSR) を用いた²³⁸Uビーム大強度化計画

現行加速スキーム

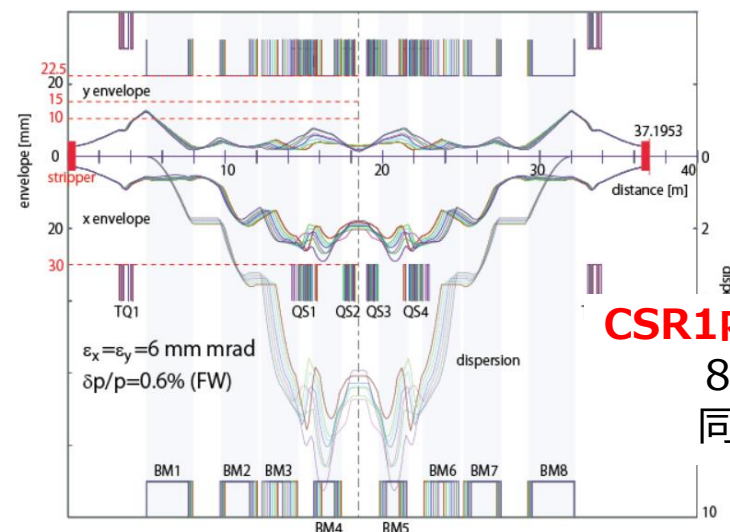
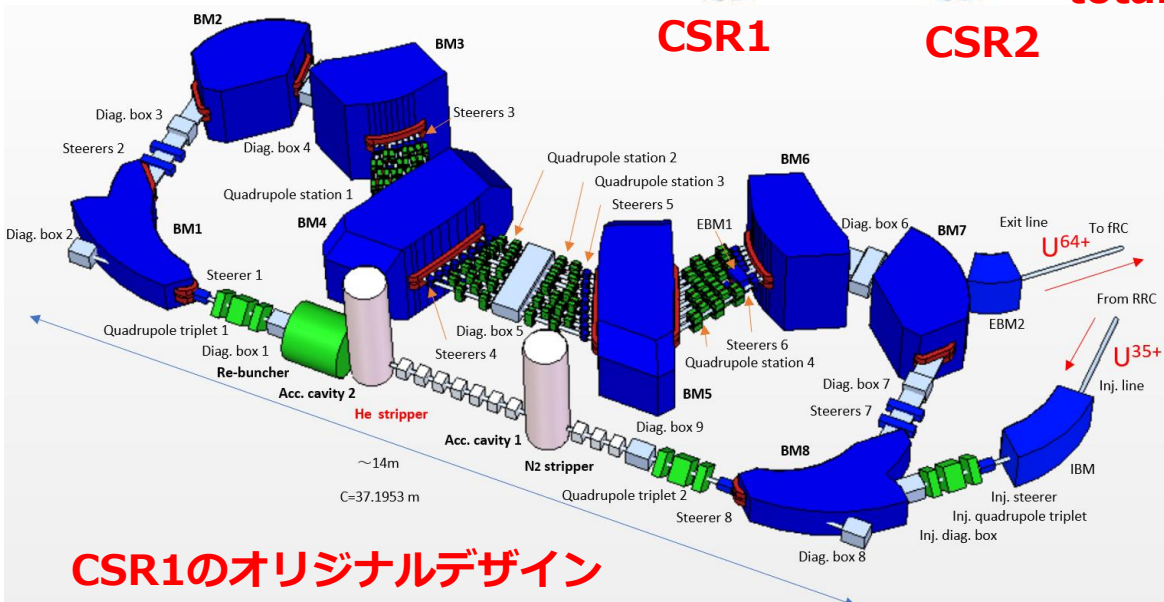


Courtesy of Imao

CSRを用いた加速スキーム



よりExoticな原子核
20倍の実験効率
省エネルギー

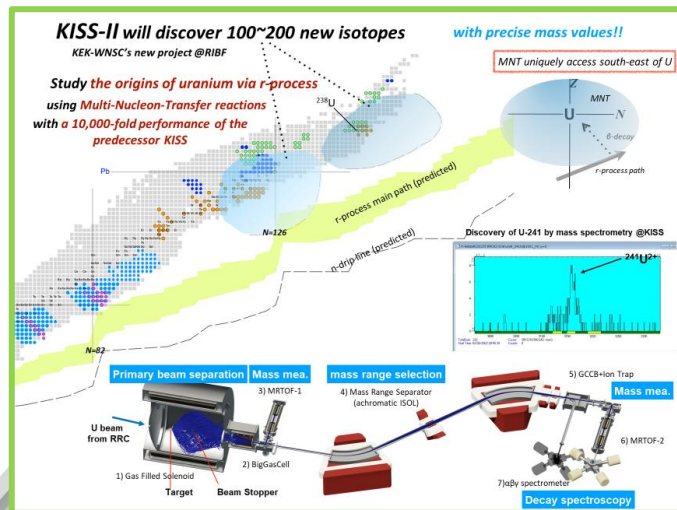


CSR1内ビームダイナミクス
8つ価数を独立に収束
同じ形状で荷電変換される

CNS, KEK, RCNP との協働体制

KEK: 超ウラン原子核の大量生成

超ウラン原子核の崩壊様式、核分裂生成物



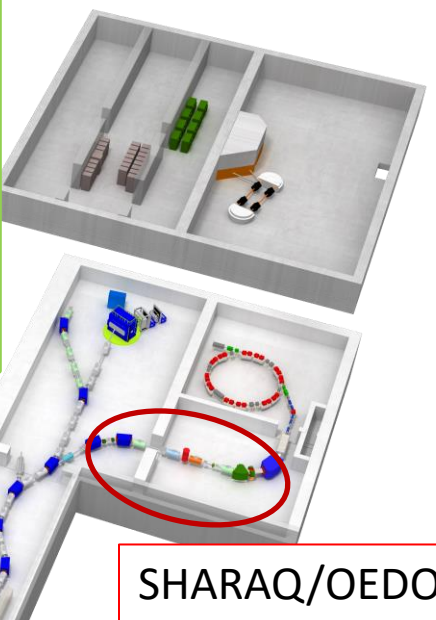
KISS->KISS-II

RRC 2pμA U beam at 10 MeV/u

多核子移行反応

旧施設 (1986-)

新施設 (2006-)



SHARAQ/OEDO

RCNP: トラッキングGe検出器の拡充

高励起束縛状態の対称性の変化 状態密度



トラッキングGe検出器概要

γ線の検出器中での散乱位置を三次元的に決定し、コンプトン散乱+光電吸収の過程をトラック。

- 非全吸収イベントの抑制(高S/N比化)
- 高検出効率
- γ線放出角度の高精度決定

高スピンなど、γ線多重度が多い反応の微弱な分岐に高感度ドブラーシフト補正

検出限界

- GAMMASPHEREの数百倍、CAGRAの数百倍 (4πアレイ)
- GAMMASPHEREと同等、CAGRAの数百倍 (1πアレイ)
- これまで不可能だった弱い分岐が見えてくる。
- かつて安定核でやっていた実験が不安定核でもできる。

*1π検出器は米国(GRETINA)と欧州(AGATA demonstrator)が稼働

CNS: 低エネルギーRiビームの供給

中性子捕獲断面積

OEDO/SHARAQの高度化

基幹設備として運用~多彩な核物理を開拓

高度化

OEDOによる汎用的低エネルギーRiビームの供給

- Ge array (GRAPE + alpha)
- SHARAQ D1 gap 拡大 (Y acceptance ±3%→±6%)
- S1 焦点面検出器の高度化
- SHARAQ gas-filled 化

Very Heavy Nucleiの高スピン八重極相関 (La, Fr, etc...)

中性子欠損核の四重極相関

回転バンドからのα崩壊

安定の島への基礎研究

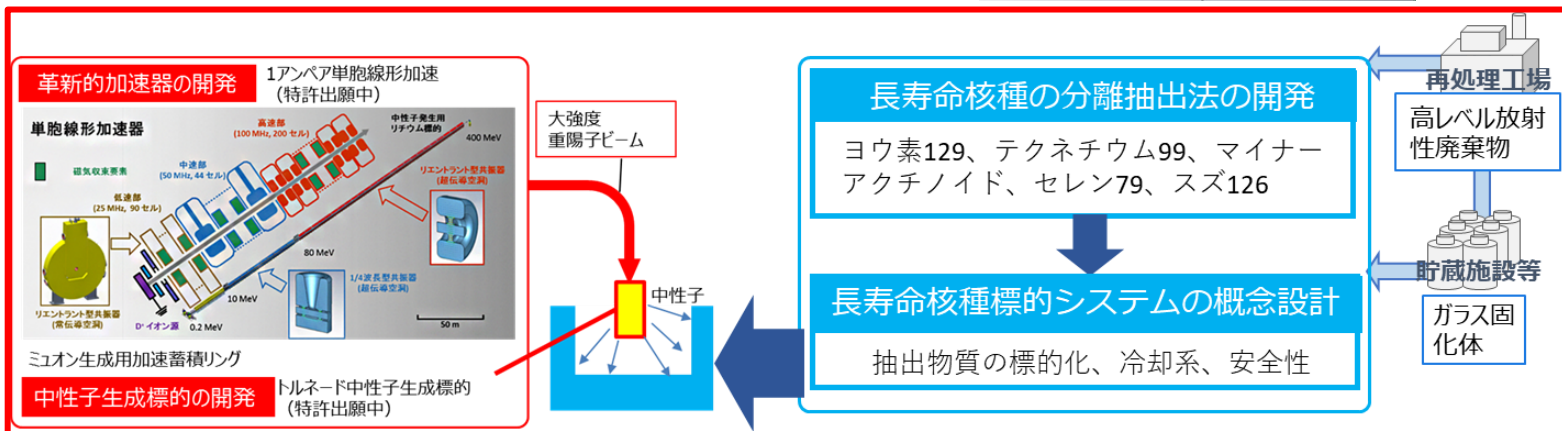
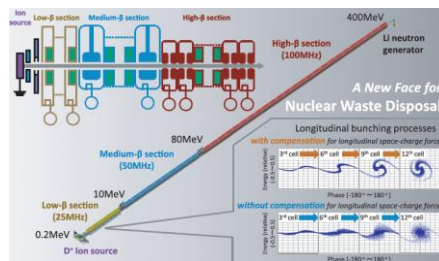
高レベル放射性廃棄物の処理処分問題への挑戦

ImPACT「核変換による高レベル放射性廃棄物の大幅な低減・資源化」2014-2018年度

原研-理研主導

地層処分地のサイトが決まらない状況。後世に負の遺産を残さない。
 長寿命の核分裂生成物に特化
 加速器を利用した核変換。
 基礎からの研究開発
 理工連携、オールジャパン体制

(1) 理研RIBFを利用した基礎データ取得 (2) 革新的加速器の提案 (特許出願)



元素変換による 持続発展可能な社会の 実現へ ～加速器が人類を救う～

仁科加速器科学センター
 櫻井 博儀、大津 秀徳、
 炭蘆 聡之、松崎 禎市郎、
 吉田 光一
 ©仁科センター 核変換データ研究開発室
 上垣外 修一、奥野 広樹、
 坂本 成彦
 ©仁科センター 大強度加速技術開発室

- 背景** 原子力発電所から排出される高レベル放射性廃棄物は、持続発展する社会を実現するために解決すべき社会問題であり、廃棄物の減容化と放射能の低減化が求められています。廃棄物を低減するためには、元素分離と変換の二つの技術が必要です。廃棄物中に含まれる、長寿命のマイナーアクチノイドについては高濃縮などの研究開発が進んでいますが、長寿命核分裂生成物についてはほとんど研究開発が進んでいないのが現状でした。
- 概要** 仁科加速器科学センターは、ImPACTプロジェクトで長寿命核分裂生成物の元素変換に焦点をあてたコンセプト[1]を取得し、研究開発を実施しました。長寿命核種を安定核種や短寿命核種に元素変換する際に、原子炉では低いエネルギーの中性子しか利用できませんが、加速器の場合は、エネルギーが制御された中性子やミュオンなどを利用することができます。仁科センターでは、RIBF(ビームファクトリー)を利用した反応データの取得[4]、ミュオンによる核医薬品製造法の提案[2]、超大強度(1アンペア)重陽子線形加速器の提案[3]、超伝導加速空洞の開発[5]や2次元電子発生用標的の概念設計などで大きな貢献をしました。
- 利点**
 - RIBFファクトリーで得られる長寿命核分裂生成物ビームを利用し、逆運動学による効率のよいデータ取得
 - 加速器のハイパワ化、省エネ化に必要な超伝導加速空洞の開発
 - 革新的重陽子線形加速器により1日当たり約1モルの人工元素変換「錬金術」が可能。
- 応用**
 - マイナーアクチノイド元素のデータ取得、新エネルギー源創出へ。
 - 廃棄物中の有用元素を利用した物質循環・リサイクルの実現へ。
 - 世界の加速器分野および基礎科学分野を席巻。医療・物質材料・核融合分野への大きな波及効果

参考文献

1. 特許第6106892号
2. 国際会議論文 PCT/P2011/03236
3. 国際会議論文 PCT/P2018/03453
4. H. Wang et al., Phys. Lett. B 754 104-108 (2016); PTEP 2017, 021001 (2017)
5. N. Sakamoto et al., Conference proceedings of LINAC2018, 2018

©仁科加速器科学センター E-mail: sakurai@ribf.riken.jp

安心安全な新たな核エネルギー創出のための元素変換研究の推進(案)

20世紀

相対論 $E = mc^2$

核分裂エネルギー

量子論 $\lambda = \frac{h}{p}$

熱中性子捕獲

原子力エネルギー

熱的な反応

中性子はMaxwell分布

高レベル放射性廃棄物の
処理処分問題

21世紀の基礎科学の役割

相対論 $E = mc^2$

新エネルギー源？

量子論

共鳴状態

入射粒子のエネルギー制御
コヒーレント中性子

加速器による資源化・減容化

非熱的な反応

中性子はMaxwell分布ではない

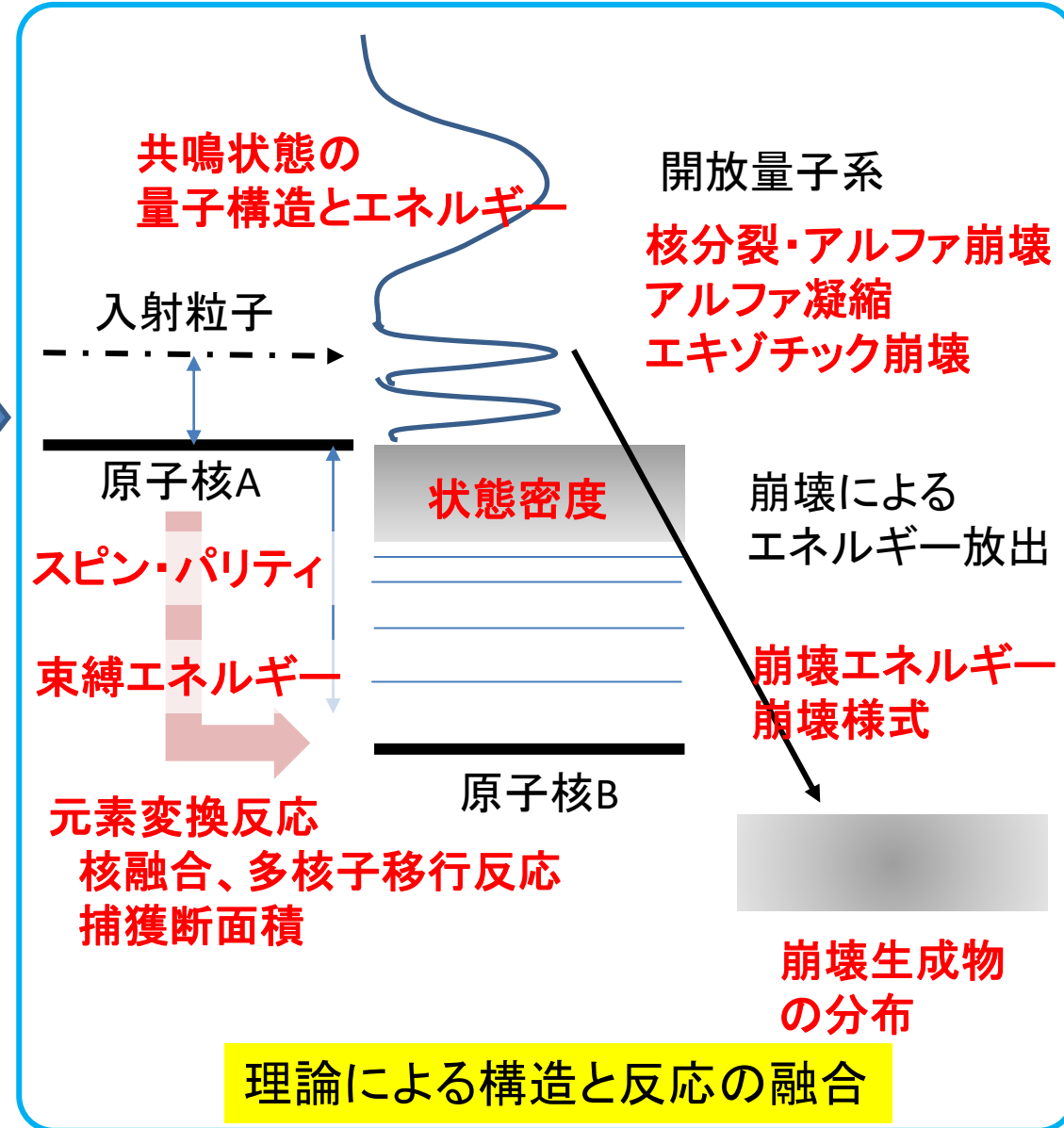
中性子反応 (>10 MeV) による
破砕反応

大量の中性子生成

1A加速器による重陽子破砕

ミュオン触媒核融合

(原子・分子共鳴)

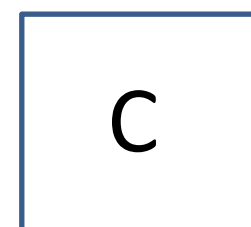
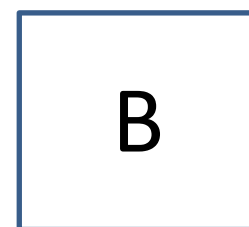
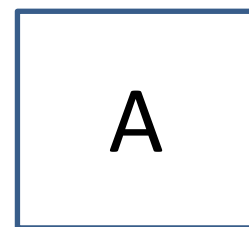


まとめ

- 超重元素119番探索 SRILAC+GARIS-III
- 2007年の稼働以来、RIBF新施設で多くの研究成果。世界の研究拠点
r-過程原子核に世界で初めて到達

- RIBFの高度化(強度20倍)と2次反応で、FRIB越え。省エネルギー。即スタートしたい。
- 軽、中重元素から重元素へ、陽子過剰領域へ
- KEK, CNSと共同運営。将来はRCNPも加え、世界の先導性を維持発展。
- 加速器物理・工学、原子力工学(エネルギー)、天文宇宙物理学(元素合成過程、状態方程式)、
素粒子物理学(SKやHKのBGプロセス)、原子・分子物理学(量エレ、原子衝突、冷却原子系)、
プラズマ物理工学(核融合、ブランケット)、医学(医療用RIの生成)、RIを利用した新材料。
- ~200億円(内、理研は150億円/9年)、運営費40億/年

- 理論による構造と反応の融合により「共鳴」を理解し、
理工連携により、安心安全な持続発展可能なエネルギーの創出を目指す



...