

# 中性子共鳴分光法が切り拓く 原子力科学技術の世界

-J-PARC を用いた革新的な核反応測定技術とその展開-

平成28年11月8日

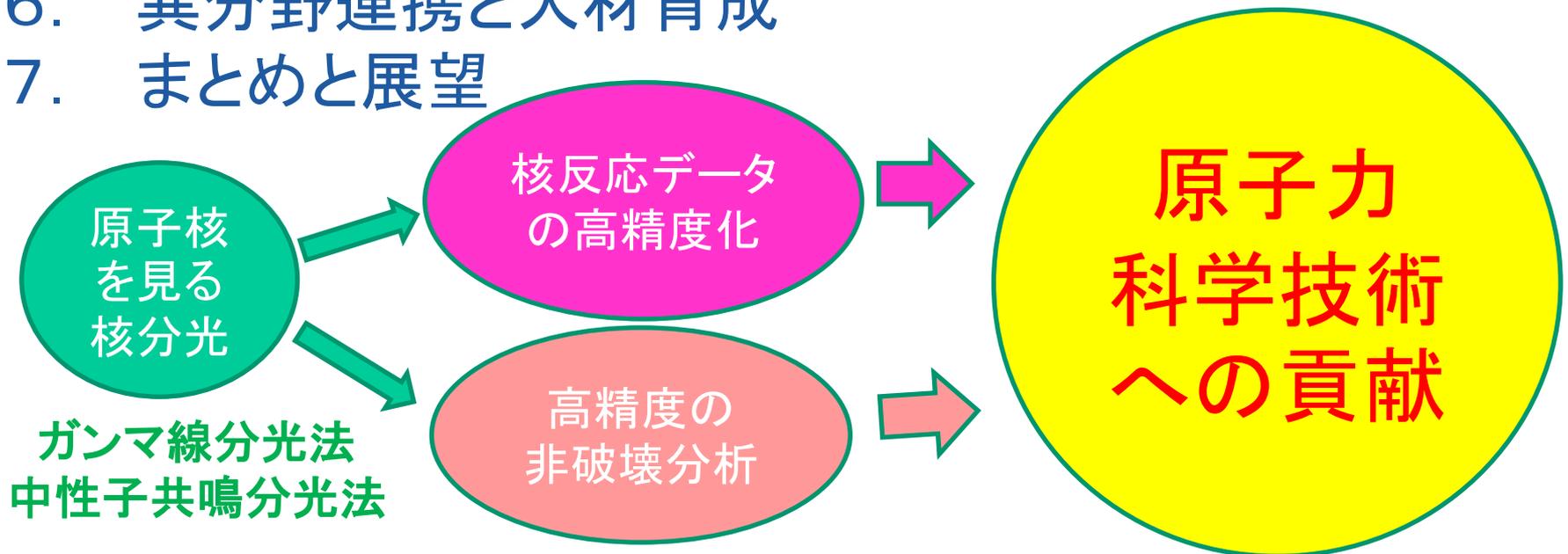
原子力科学研究部門 原子力基礎工学研究センター

核工学・炉工学ディビジョン長

原田 秀郎

# 内容

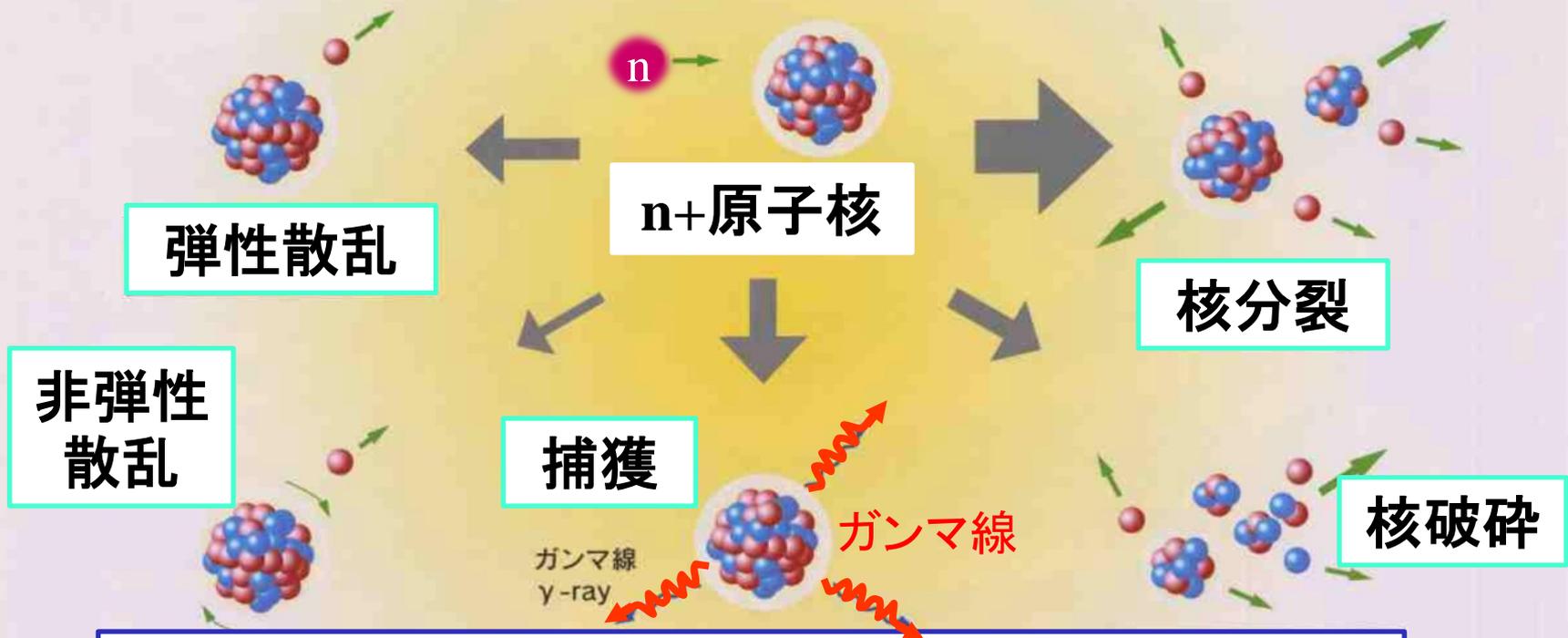
1. 核反応データ高精度化の意義
2. 放射性核種の核反応データ測定の難しさ
3. 革新的中性子共鳴分光法開発による課題解決
4. 新たな非破壊分析技術への展開
5. 原子力科学技術の発展に向けて
6. 異分野連携と人材育成
7. まとめと展望



# 中性子と原子核の反応

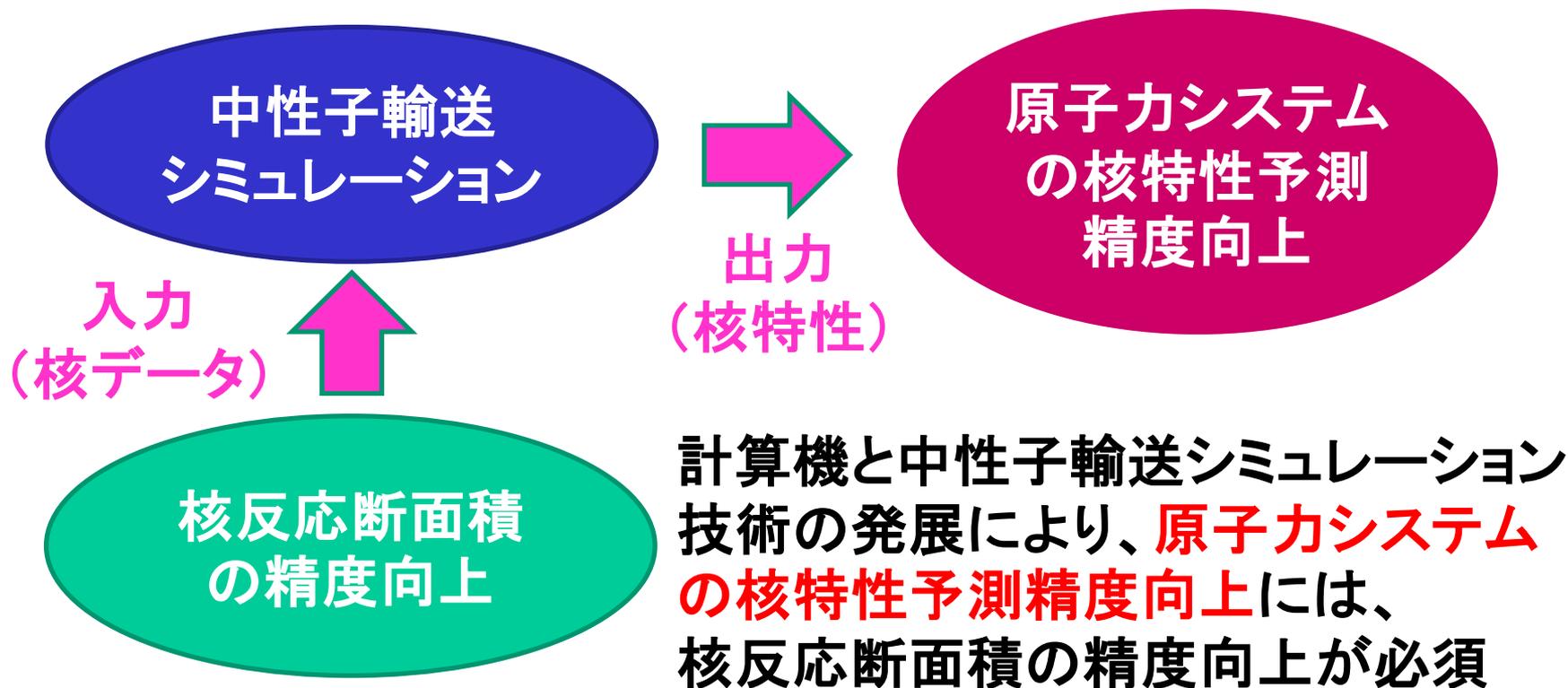
原子核の半径: 数fm(フェムトメートル) = 数 $10^{-13}$  cm  
原子核の面積:  $\sim 10^{-24}$  cm<sup>2</sup> =  $\sim 1$  Barn (バーン)  
核反応の確率: 核反応断面積(バーン)

様々な  
核反応  
の種類



計算機とモンテカルロ法の発展により、  
様々な原子カシシステムの予測が可能となってきた。

# 核反応断面積精度向上の意義

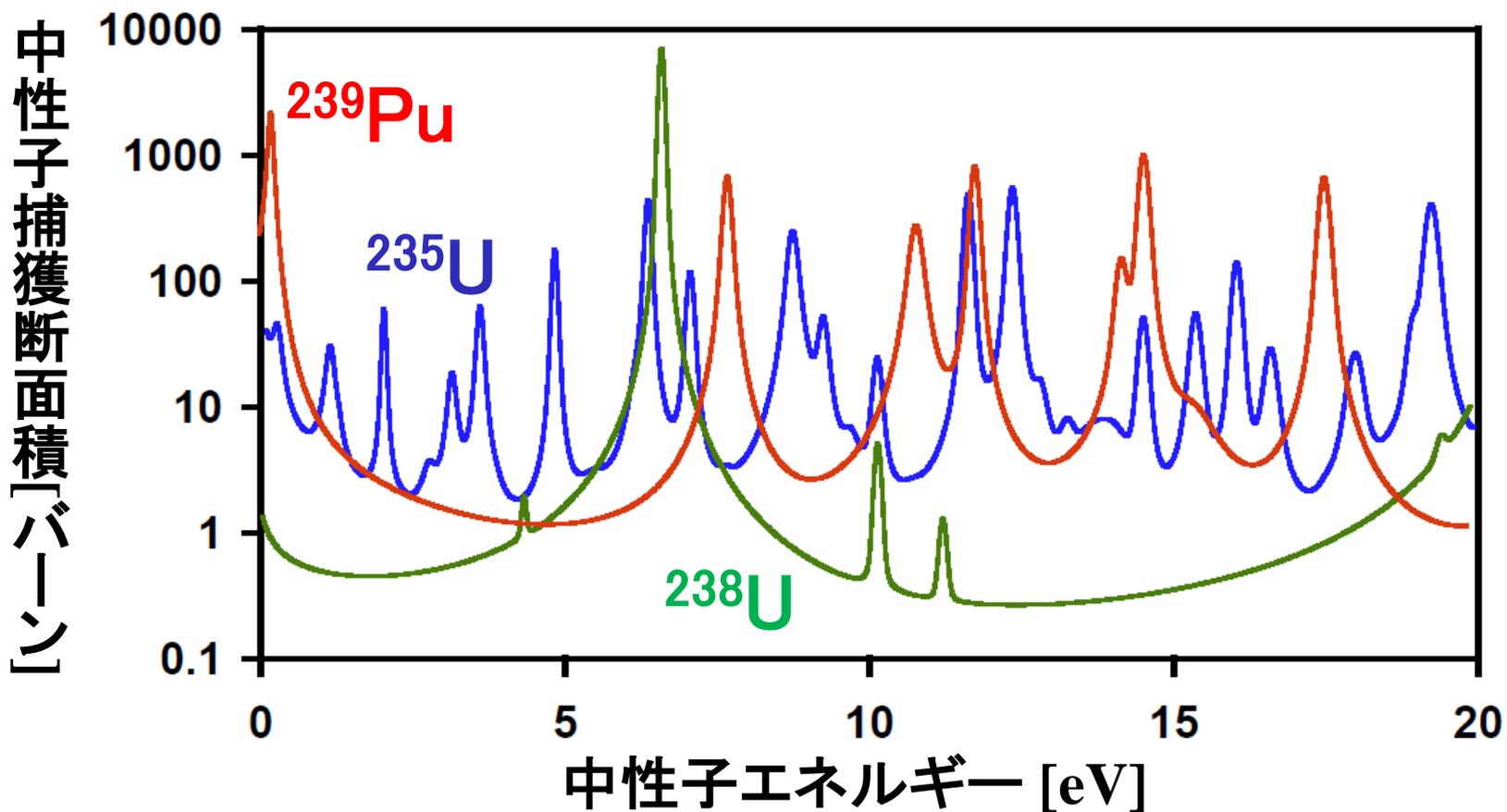


ニーズ例:

放射性廃棄物の核変換システム研究では、マイナーアクチニド (Np, Am, Cm) の核反応断面積の高精度化が求められ、精度向上に向けた研究が世界的に進捗中。

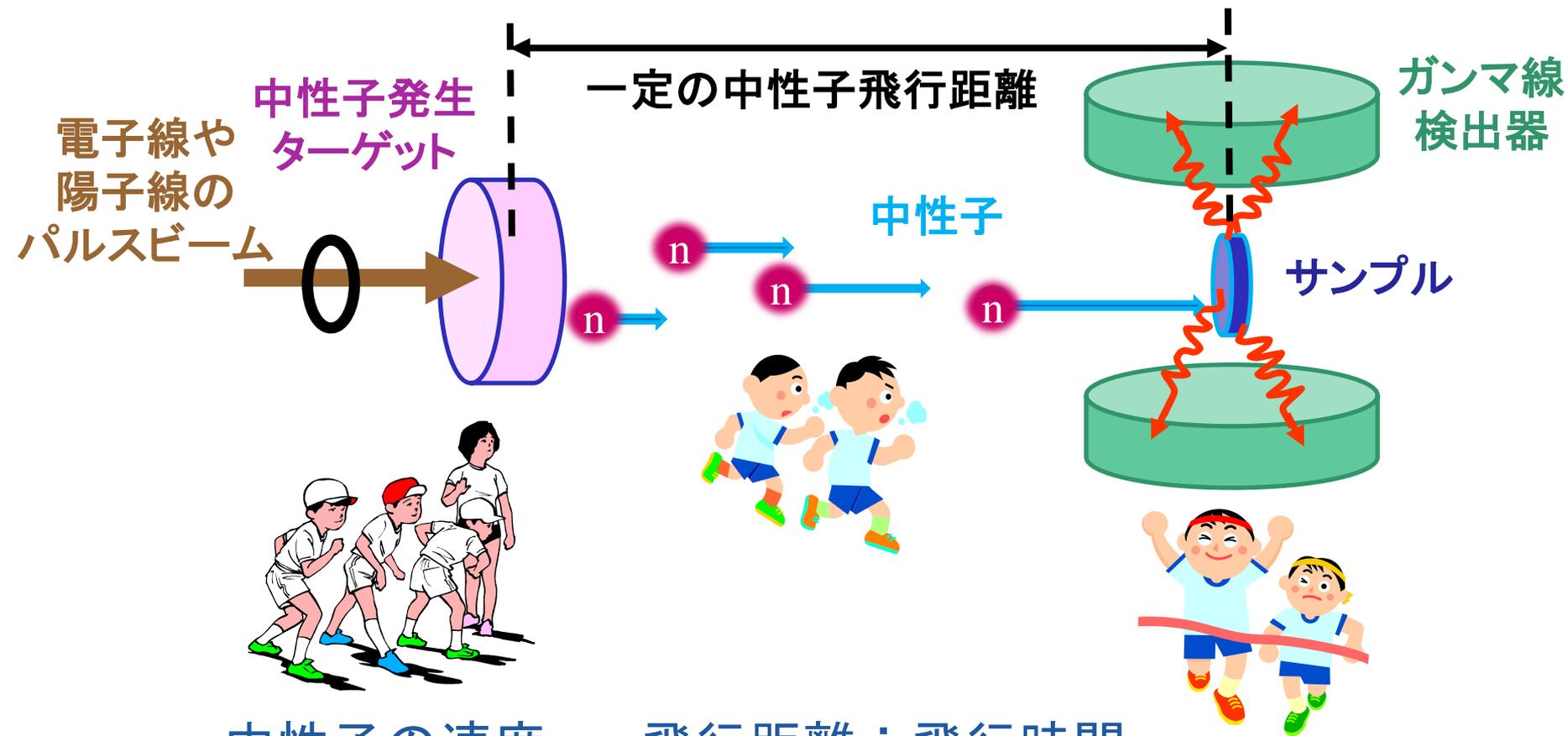
# 核反応断面積と中性子共鳴

核反応断面積は、中性子エネルギーに大きく依存  
 中性子共鳴：核種固有で理論予測不可  
 中性子共鳴を含むエネルギー依存性の測定必須



# 複雑なエネルギー依存性を測るには

飛行時間を測定し、中性子の速度(エネルギー)を決める



$$\text{中性子の速度} = \text{飛行距離} \div \text{飛行時間}$$

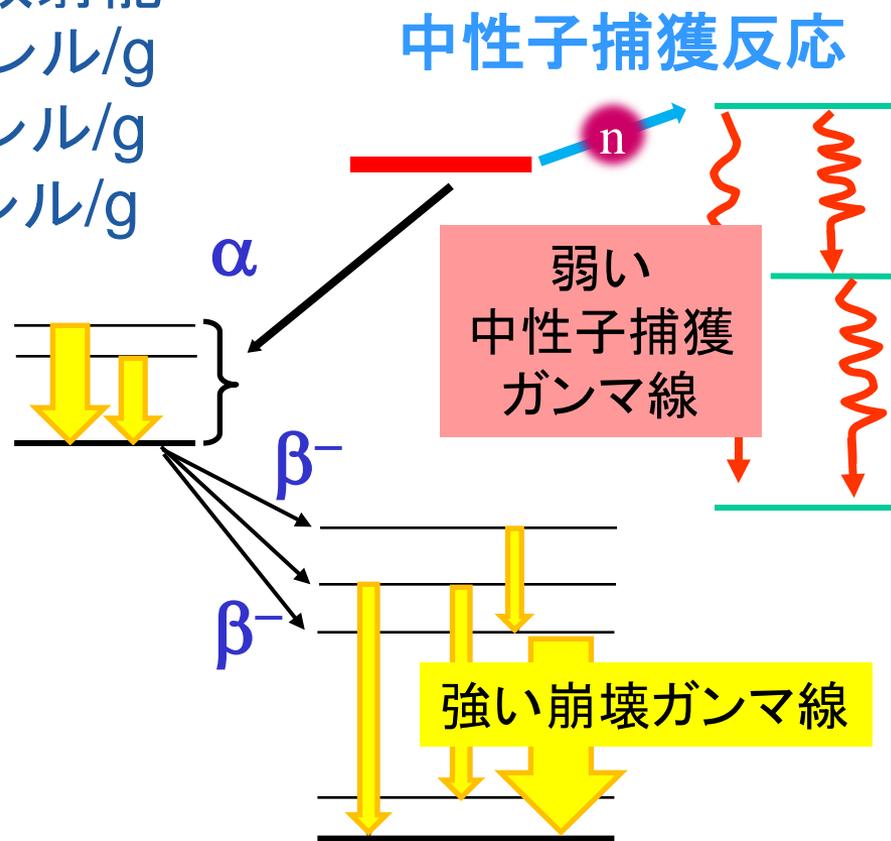
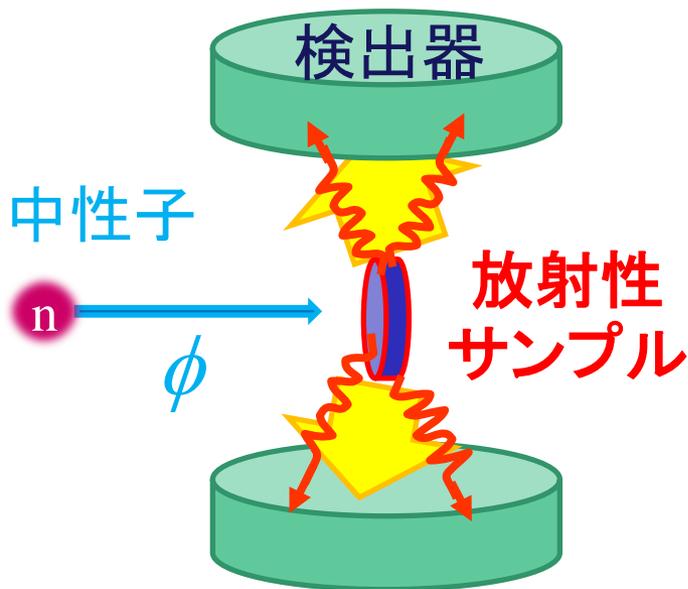


中性子のエネルギー

# 弱い中性子ビーム強度では

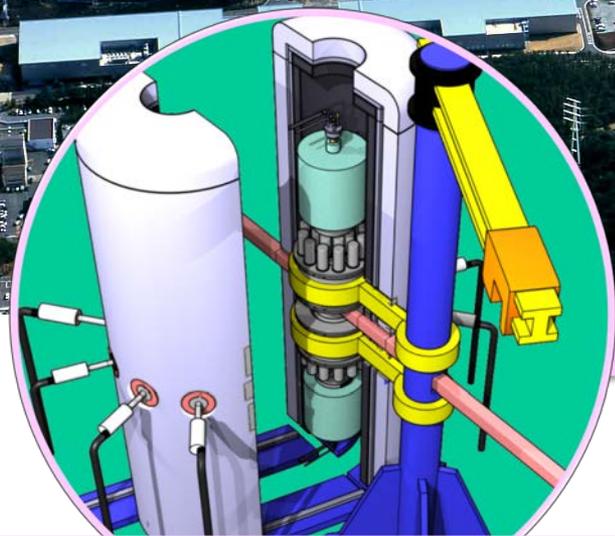
放射性核種からの強い崩壊ガンマ線の妨害により、高精度の中性子核データの測定が困難であった。

核種 (半減期)	1g当たりの放射能
U-235 (7 億年)	→ 8万ベクレル/g
Am-241(432 年)	→ 1270億ベクレル/g
Cm-244 ( 18 年)	→ 3 兆ベクレル/g

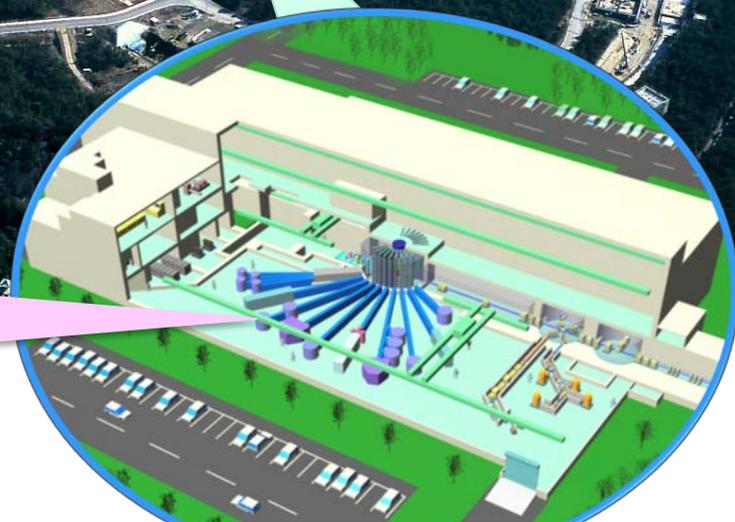


# 大強度パルス中性子ビームの適用

J-PARC @ 東海村



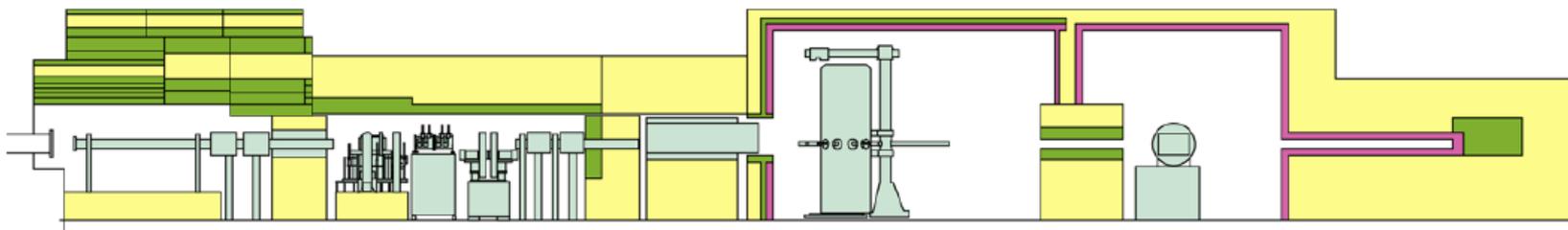
中性子核反応測定装置  
(ANNRI)



物質・生命科学実験施設  
(MLF)

# 中性子核反応測定装置 ANNRI

## Accurate Neutron-Nucleus Reaction Measurement Instrument



### 異なる分野の連携

- ・核分光
- ・核データ測定
- ・宇宙核物理
- ・元素分析
- ・中性子ビーム工学

### 機構外研究協力

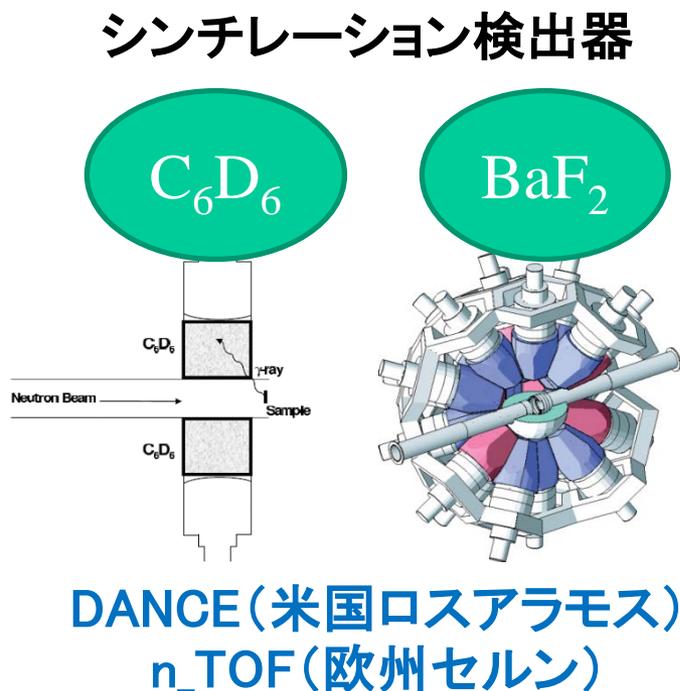
- ・東京工業大学
- ・北海道大学
- ・京都大学

ANNRI完成記念研究会（2011. 2. 24）での集合写真

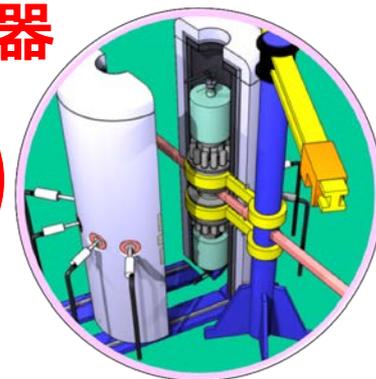
# 高分解能ガンマ線分光法の導入

中性子共鳴の同定に威力を発揮する  
半導体検出器

中性子束強度  
「相対値」



Ge



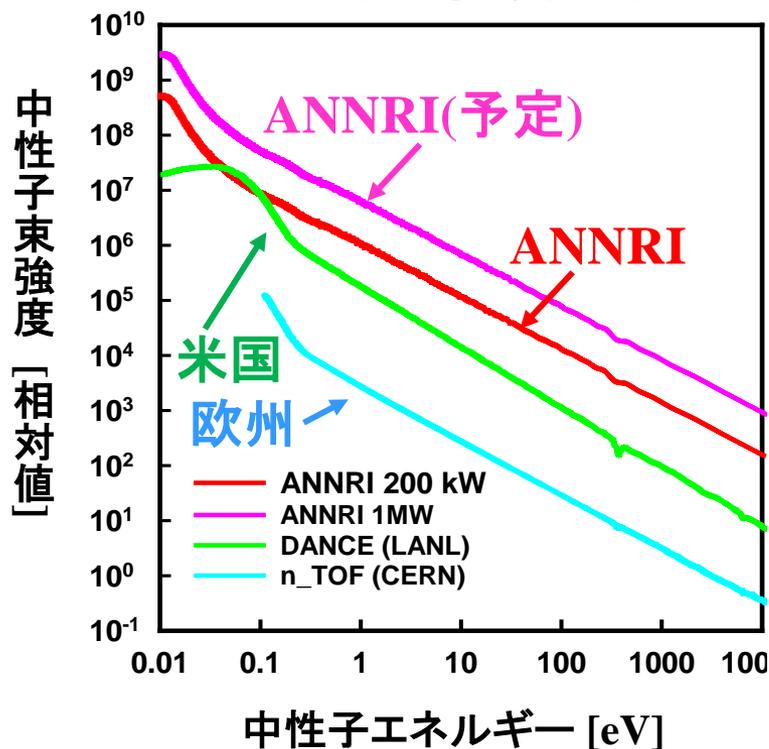
ANNRI  
(JAEA/J-PARC/MLF)

高速データ収集系  
高性能遮蔽  
高品質ビーム

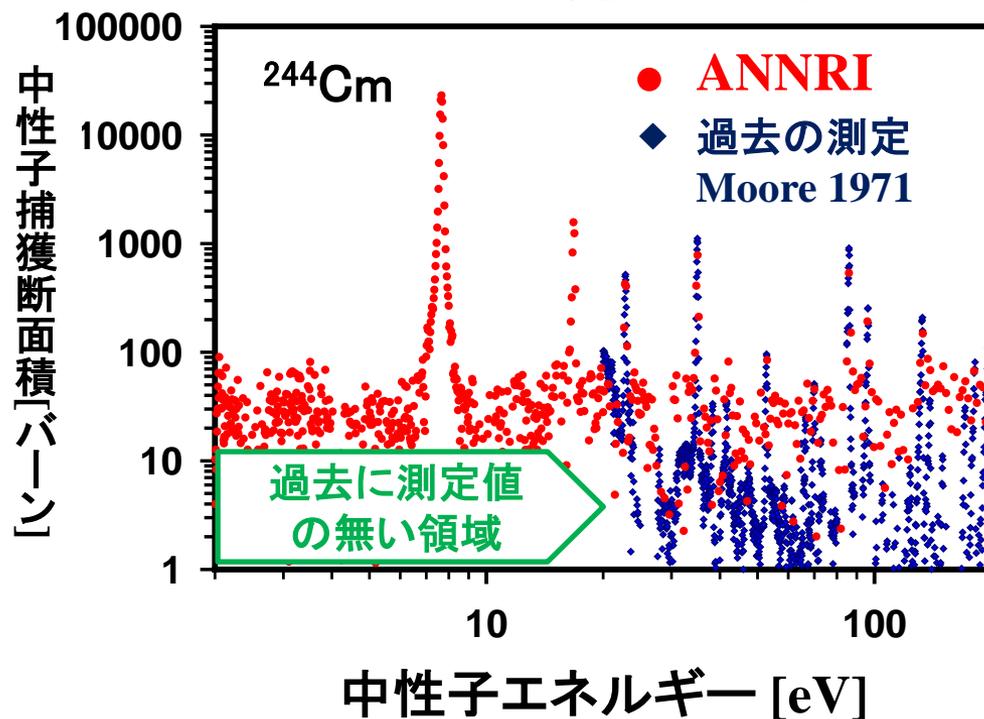
ガンマ線検出器のエネルギー分解能

# 大強度パルス中性子ビームの適用

世界3大  
中性子核データ測定施設  
の中性子束強度比較



J-PARC/ANNRIで測定した  
 $^{244}\text{Cm}$ の中性子捕獲面積  
と過去の測定値の比較



加速器施設では世界初  
 $^{244}\text{Cm}$ の中性子捕獲断面積  
測定に成功！

# 革新的な非破壊分析技術への展開

サンプルに含まれる不純物の影響で、高精度の非破壊分析が困難

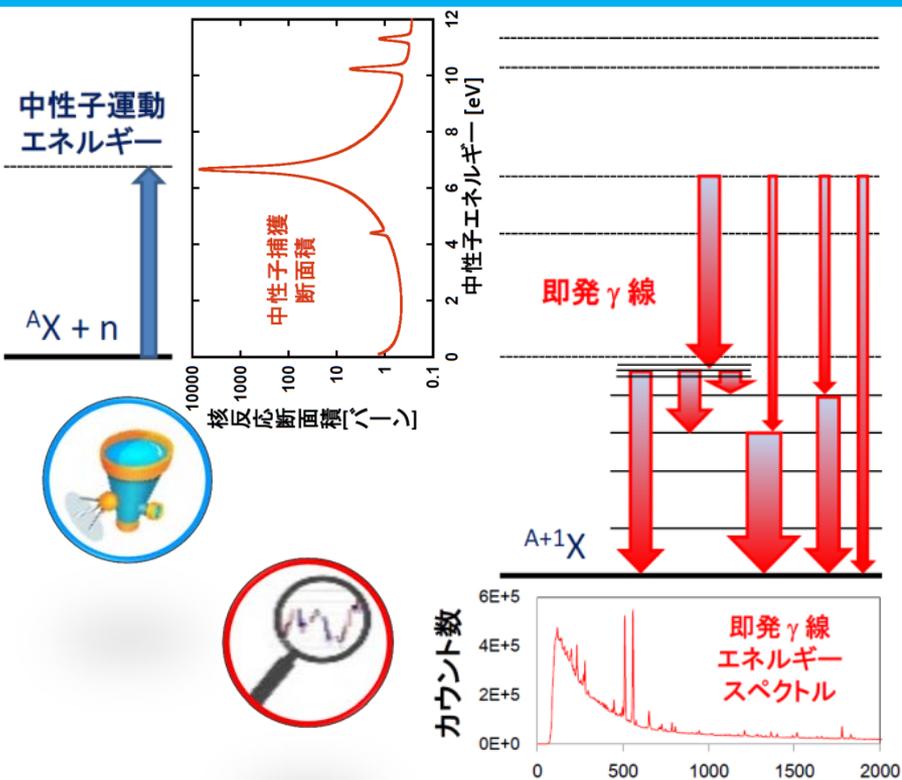


融合

従来の中性子共鳴分光法

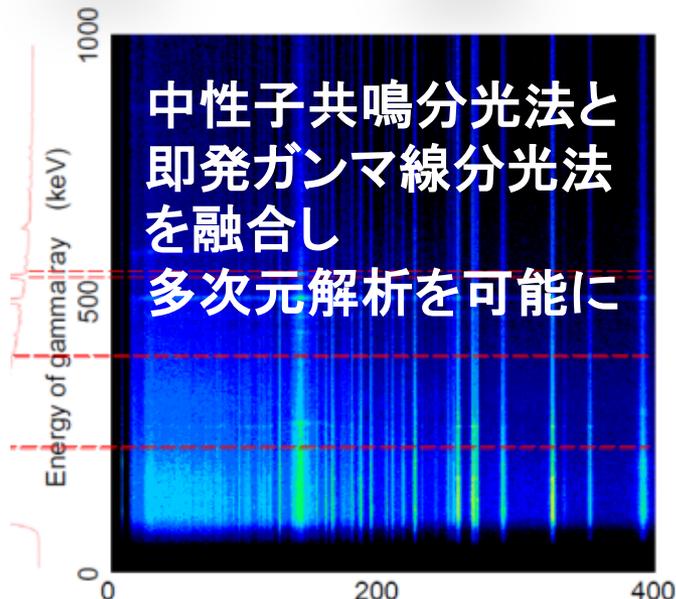
中性子共鳴だけで分析

ガンマ線エネルギーの分析を融合



ガンマ線エネルギー分解能 1000

1000



中性子共鳴分光法と  
即発ガンマ線分光法  
を融合し  
多次元解析を可能に

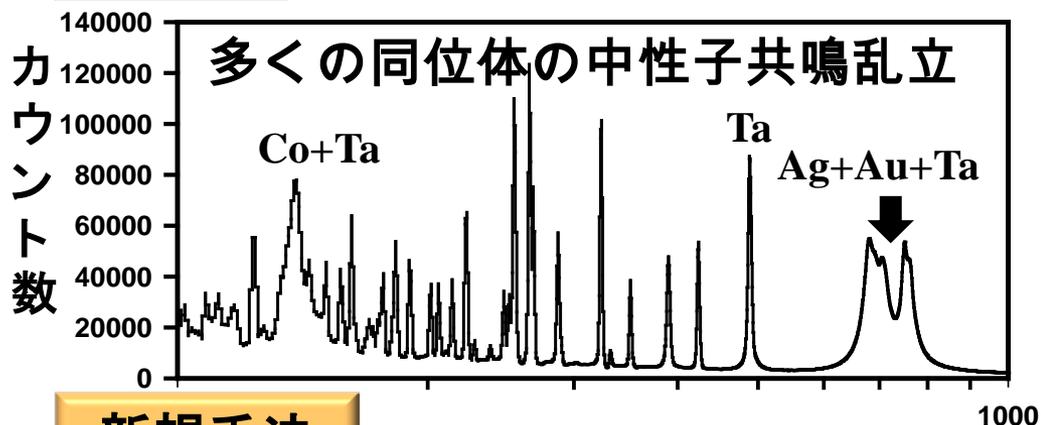
中性子エネルギー分解能 1000

分解能 1000 × 1000 を実現

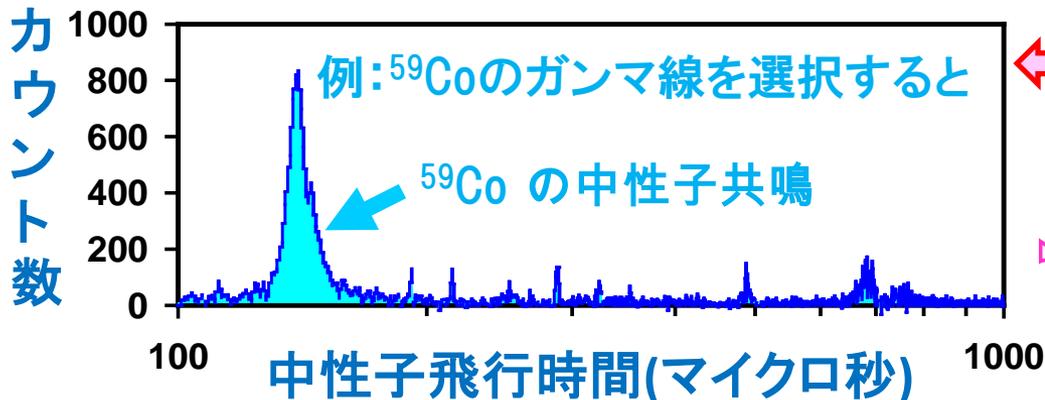
# 高分解能ガンマ線分光法の融合効果

多次元マトリックスからガンマ線エネルギーを選択し、  
中性子飛行時間(エネルギー)スペクトルを導出

## 従来法



## 新規手法



ガンマ線エネルギー

J-PARC/  
ANNRI

ガンマ線と中性子  
エネルギーの相関  
が利用可能

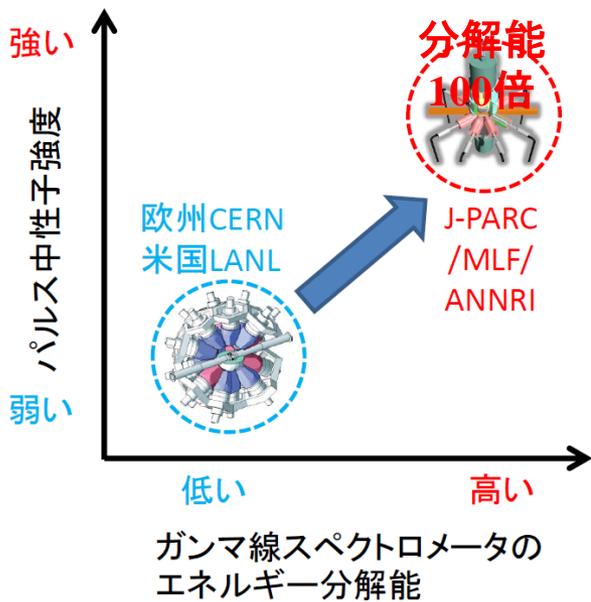
: 230 keV

中性子飛行時間(エネルギー)

不純物の影響を大幅  
低減できる高信頼性の  
元素(同位体)分析

# 原子力科学技術の発展に向けて

中性子と原子核の反応を精密に測るため  
中性子共鳴分光法を大幅に革新



核計算の精度向上

核計算コード

核データライブラリー

核反応データ精度向上

分析・計量精度向上

本研究開発により  
発展が期待される  
原子力科学技術

原子力分野への貢献

核計算の高精度化により、  
新しい原子力システム設計  
(核変換技術)や  
核廃棄物量の正確な予測等

学際分野への貢献

宇宙物理学(元素合成)  
物理学(対称性の破れ等)

宇宙物理学(隕石分析等)  
考古学(銅鐸、人骨等)  
新素材開発(超硬合金等)

平成28年度 文部科学大臣表彰 科学技術賞

「中性子共鳴分光法の大規模な革新とその応用研究」

# 異分野連携と人材育成

## ・異分野専門家による知の融合

核データ(井頭/東工大教授), 元素分析(海老原/首都大教授)  
中性子ビーム工学(鬼柳/北大名誉教授)等の卓越した研究者と  
JAEAの核分光(ガンマ線分光・中性子共鳴分光)専門家の連携

## ・多くのポスドクが装置開発・技術開発に貢献

原子力分野の他, 核物理, 宇宙線等の分野から人材が集結  
現在, JAEAの他, 大学, 産総研, 規制庁, 量研機構等で活躍中

## ・修士・博士課程学生による利用

現在, 核データ, 宇宙核物理, 元素分析の他, 基礎物理,  
ニュートリノ検出器開発等, ANNRIは多くの分野で利用中

## ・活躍した若手研究者は、原子核科学技術分野の中核的研究者として、各分野の技術継承及び人材育成に貢献が期待

# まとめと展望

大強度中性子ビームと高分解能ガンマ線分光技術を融合して、**中性子共鳴分光法を大幅に革新**

高度な基礎・基盤技術と異分野連携の効果  
次世代を担う研究者が本研究開発により育成

**今後の原子力科学技術への展開**

核データ・シミュレーションの高精度化を通じた  
原子力技術への貢献

革新的な分析技術による原子力・学際分野への貢献

**ANNRIの新規利用、大歓迎**