

早稲田大学・東京都市大学 共同原子力専攻  
第18回未来エネルギーフォーラム・シンポジウム

# 加速器による核データ研究の進展

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構  
岩本 信之

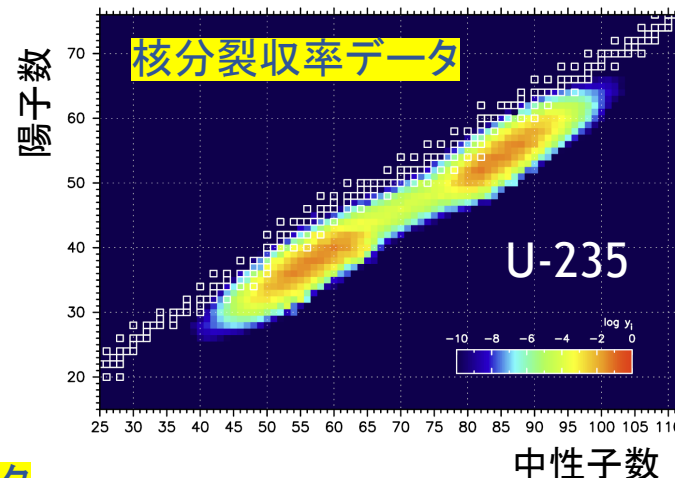
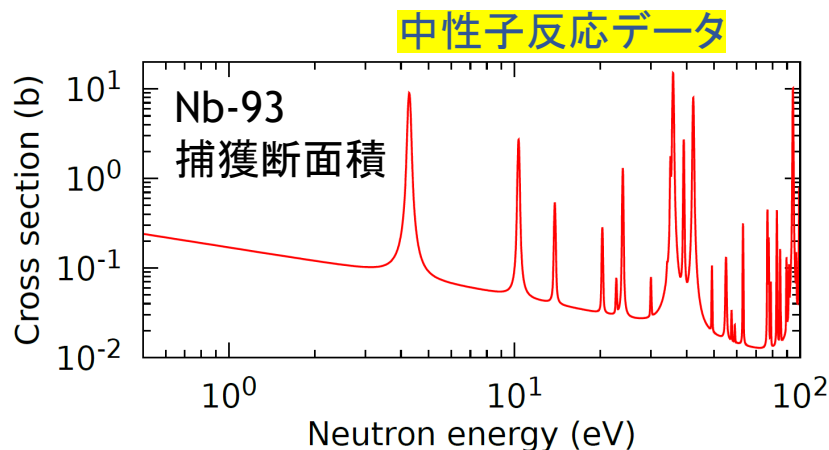
1

- ① 核データとは
- ② 大強度陽子加速器施設(J-PARC),  
物質・生命科学実験施設(MLF)  
核破碎中性子を利用した中性子断面積測定
- ③ ニューズバル放射光施設  
レーザーコンプトン散乱ガンマ線を利用した  
中性子生成断面積測定
- ④ まとめ

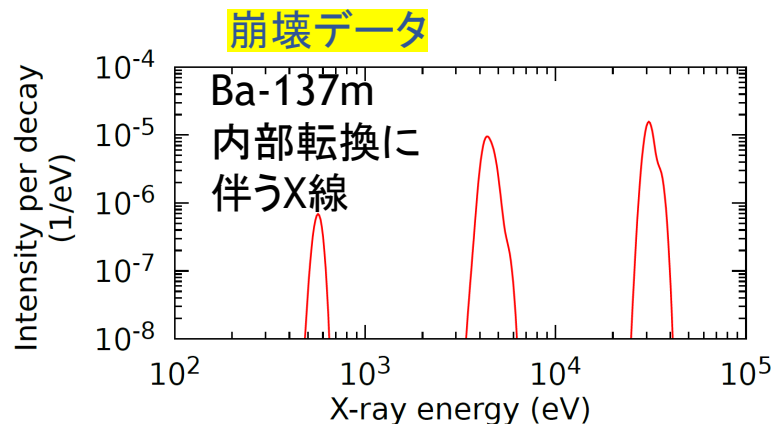
# ① 核データとは

# 核データとは

- 電子の質量や真空中の光速と同じ**物理定数の一つ**
- 原子核と中性子や陽子、ガンマ線(光子)などとの**反応の起こり易さ(断面積)**・**核分裂生成物の生成割合(核分裂収率)**・**崩壊様式**などの情報のこと



1 b(バーン)=10<sup>-24</sup> cm<sup>2</sup>



原子力の技術開発や放射線の影響評価を行うための**基盤データ**

# JENDLの開発

- JAEAではこれらの核データを編集した評価済核データライブラリ (Japanese Evaluated Nuclear Data Library; JENDL)を開発
  - 1977 JENDL-1 (72核種) 高速増殖炉研究
  - 2010 JENDL-4.0 (406核種) 軽水炉の高燃焼度化・長寿命化研究
  - 2021 **JENDL-5** (795核種) 原子力安全、廃止措置研究

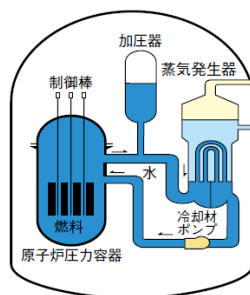


大学やIAEAと連携・開発

11サブライブラリ	
中性子反応	
熱中性子散乱則	w/京大
核分裂収率	w/東工大
崩壊データ	
陽子反応	
重陽子反応	
アルファ粒子反応	w/IAEA
光核反応	
光子-原子	
電子-原子	
原子緩和	

中性子反応の核種数

原子炉の核計算など



資源エネルギー庁「原子力2008」

原子力



核医学

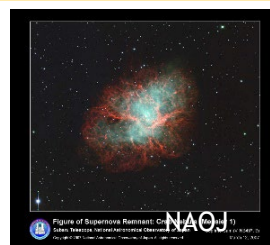
RI生成量計算など

Tc-99 2.111E5y *6.0067h	Tc-100 β崩壊
Mo-98 24.39	Mo-99 2.7490d

中性子捕獲反応

元素合成計算など

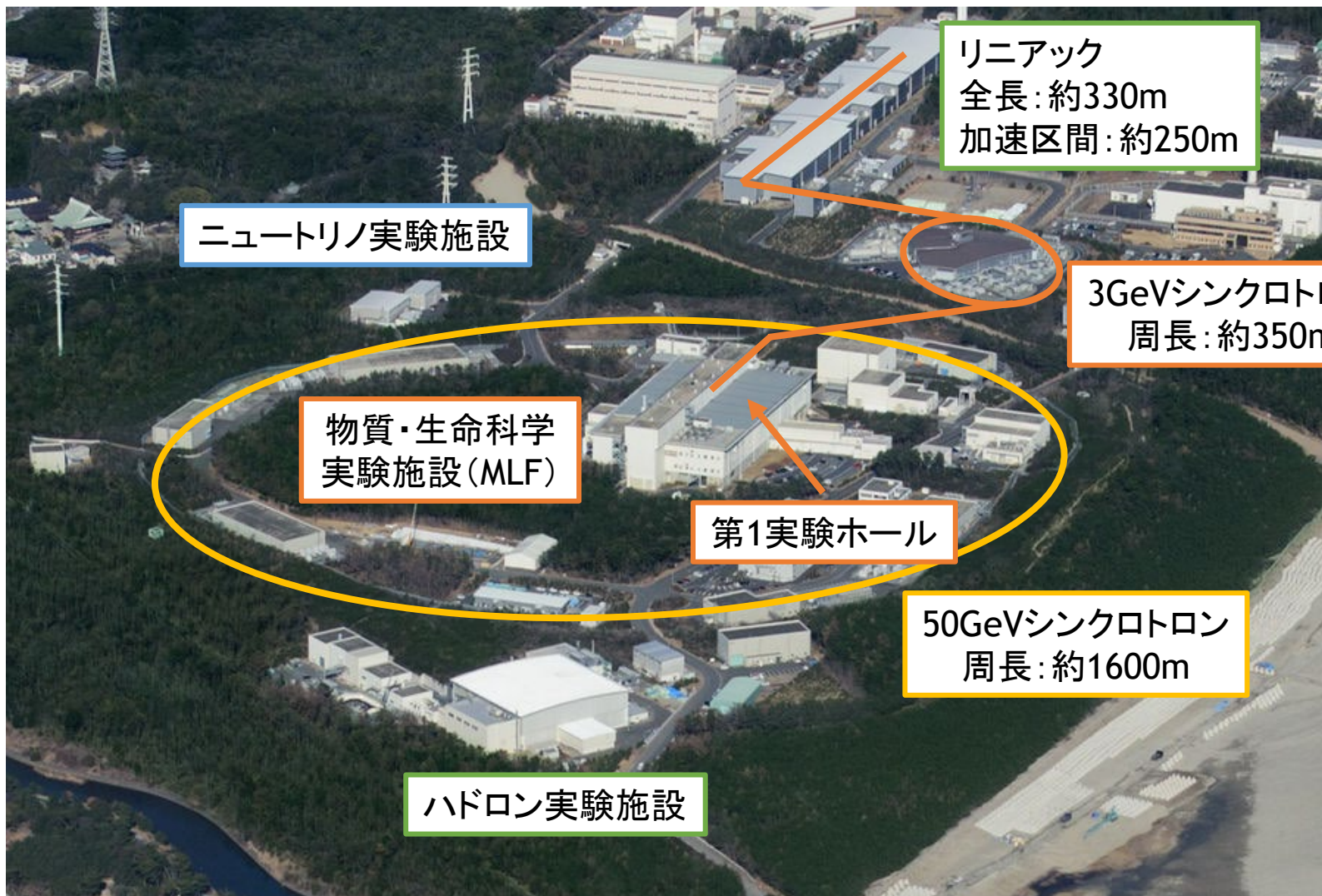
宇宙



原子炉の  
インベントリ評価など

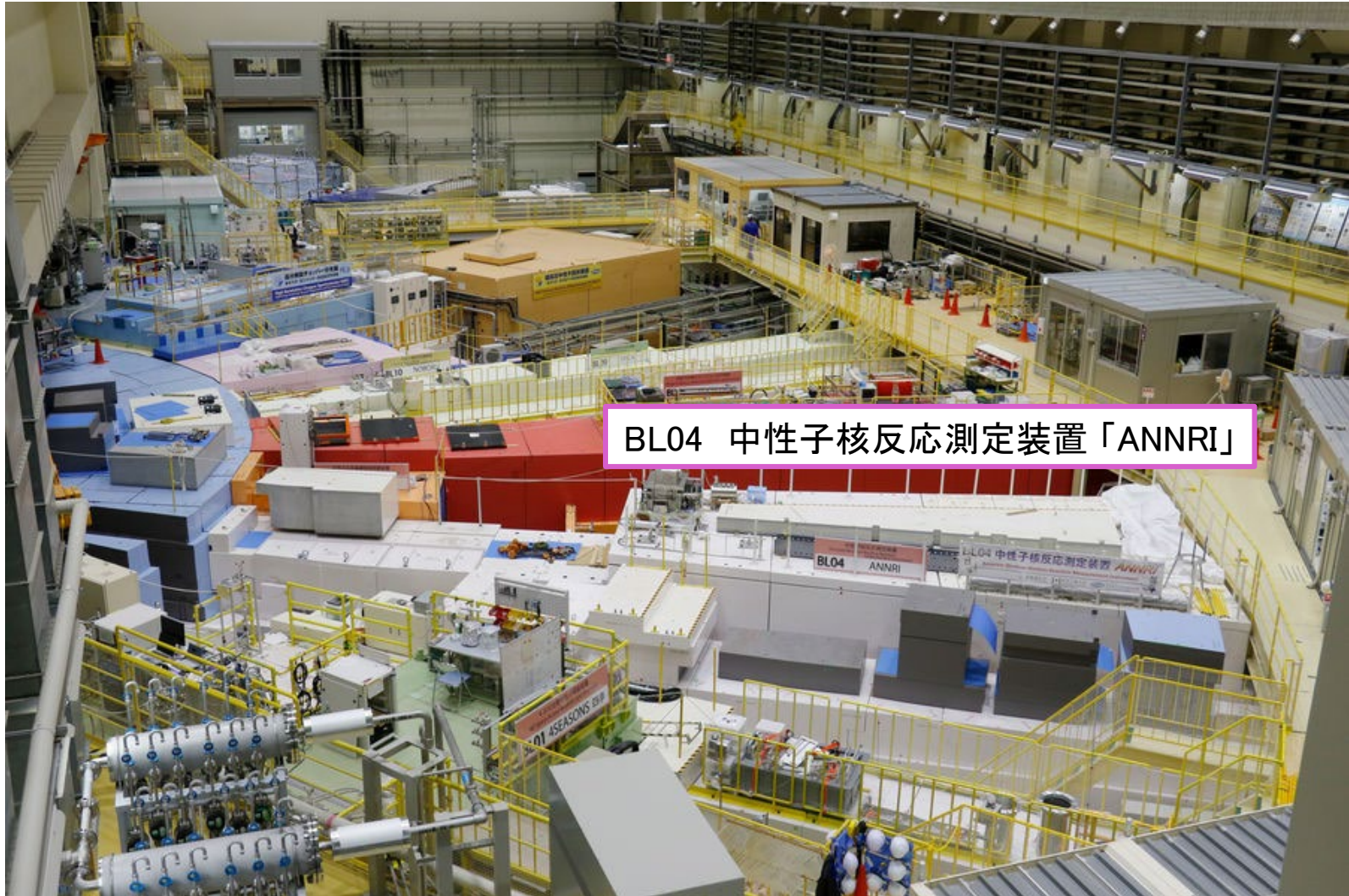
② **大強度陽子加速器施設(J-PARC),  
物質・生命科学実験施設(MLF)**  
核破碎中性子を利用した中性子断面積測定

# J-PARC 航空写真



画像提供: J-PARCセンター

# MLF 第1実験ホール

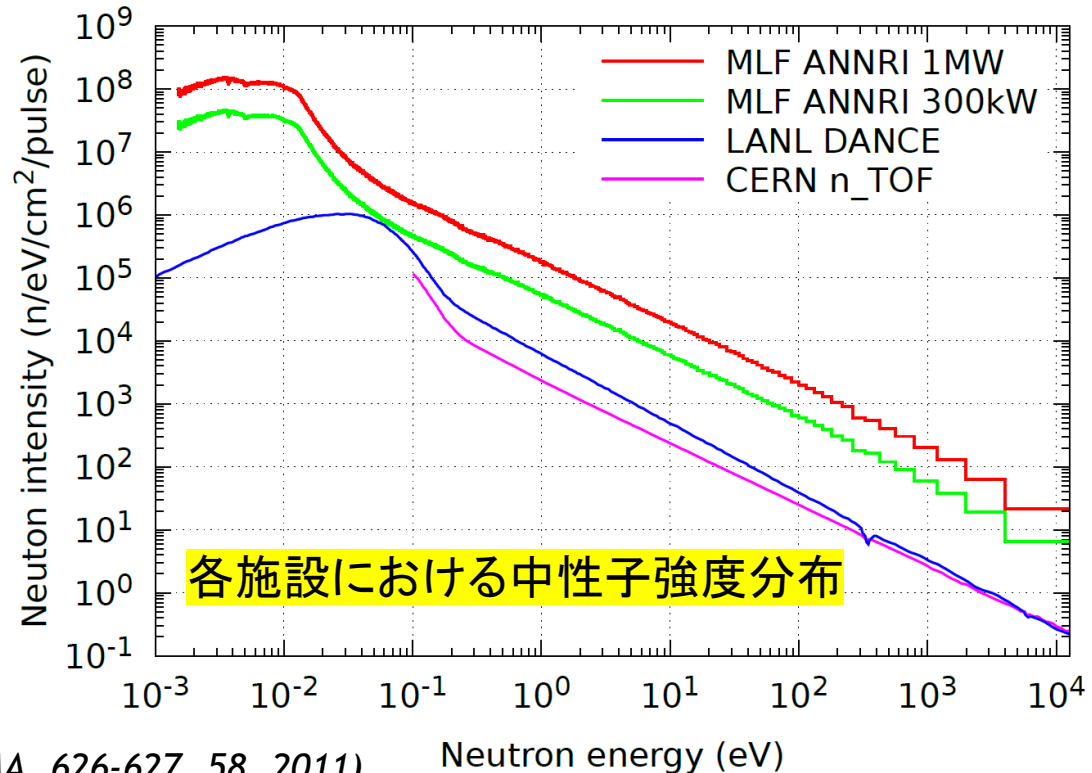
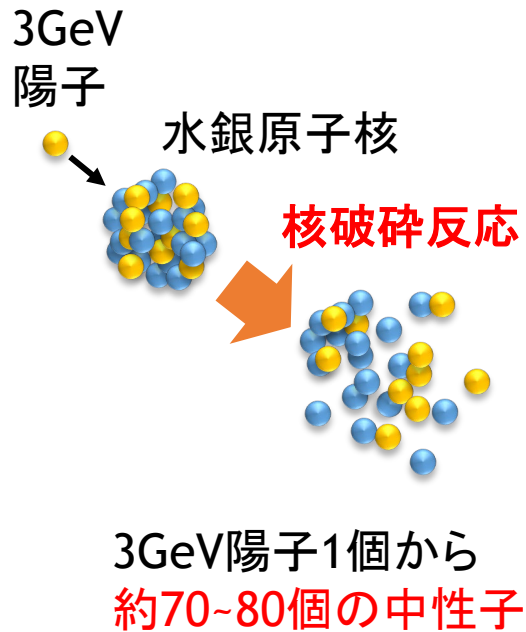


画像提供: J-PARCセンター



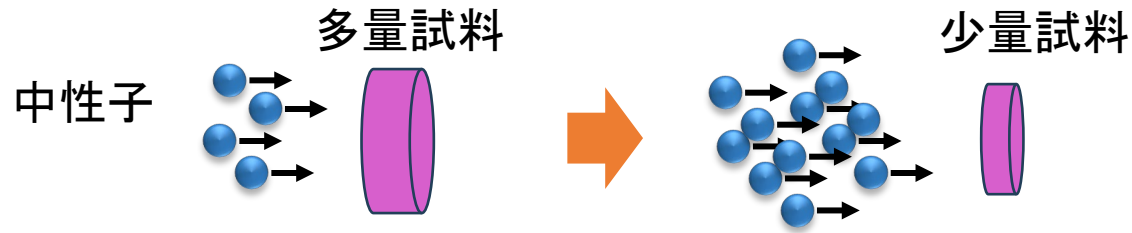
# 陽子加速と大強度中性子

- リニアックで負水素イオン(陽子1個, 電子2個)を400MeV(光速の71%)まで加速
- 3GeVシンクロトロンで陽子を3GeV(光速の97%)まで加速
- MLFの液体水銀標的に3GeV陽子を入射
- 陽子と水銀による原子核破砕反応で中性子が大量に発生
- 中性子は減速材(超臨界水素)を通り、エネルギーが幅広く分布

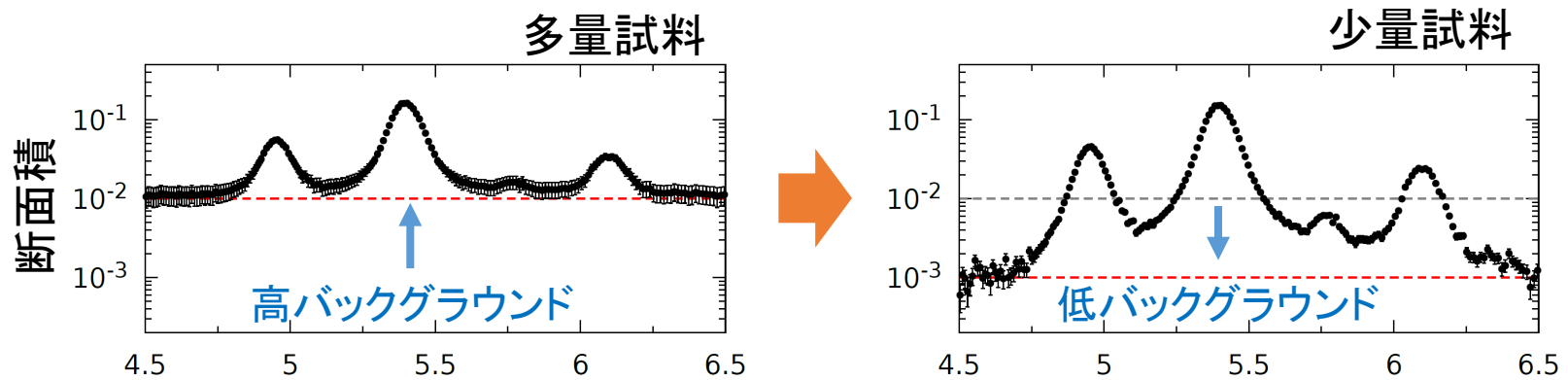


# 大強度中性子のメリット

- 試料に照射する中性子数の増加により、試料量を減らしても、**従来と同じイベント数(統計精度)で測定が可能**



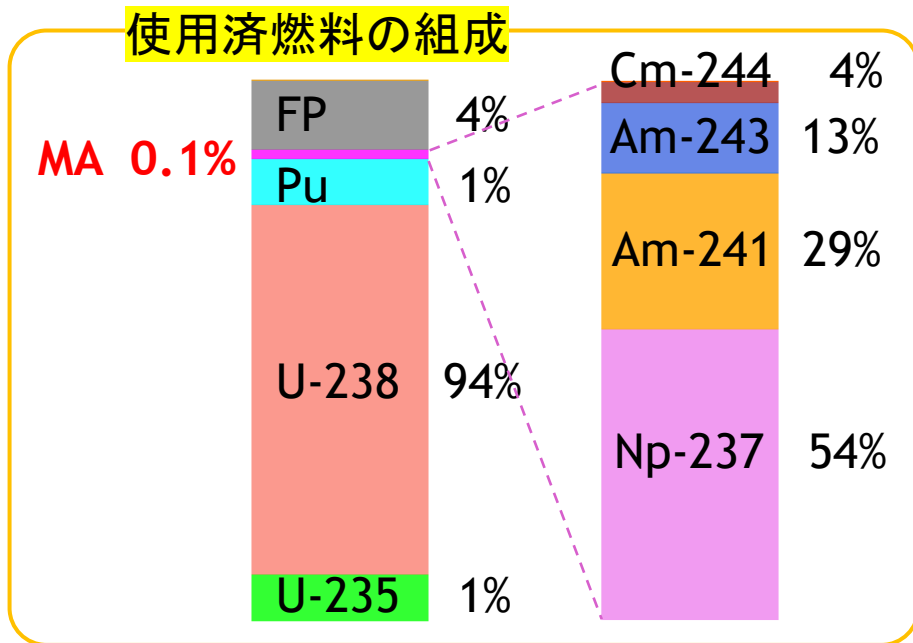
- 試料が放射性である場合、試料量を減らして、放射性崩壊で生じるガンマ線などによる**バックグラウンドの低減が可能**



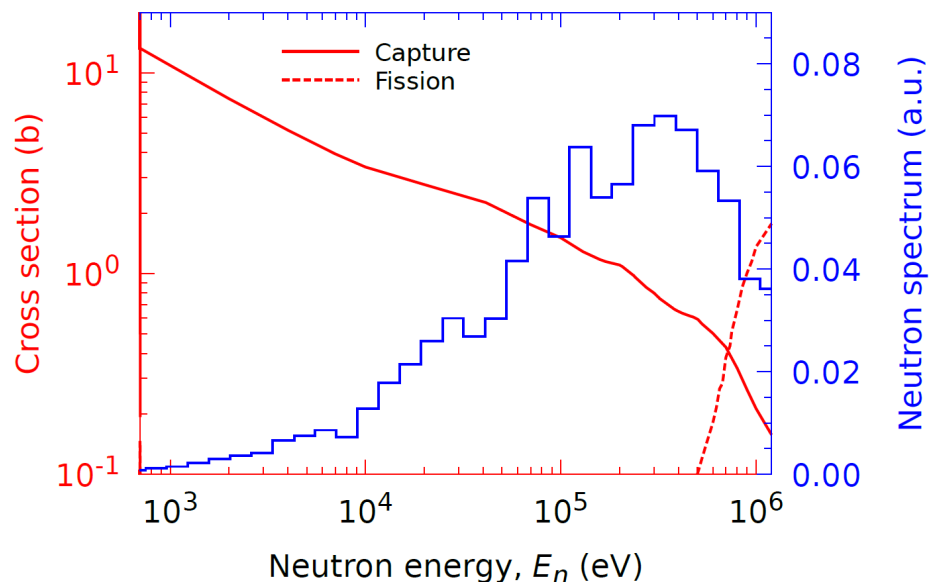
**放射性核種**の断面積測定に有利

- 加速器駆動未臨界システムなどを用いた核変換による長寿命核種の減容
  - 放射性毒性の強いマイナーアクチノイド(MA)

## ネプツニウム Np-237、アメリシウム Am-241,243



Am-241の中性子断面積と  
中性子スペクトル

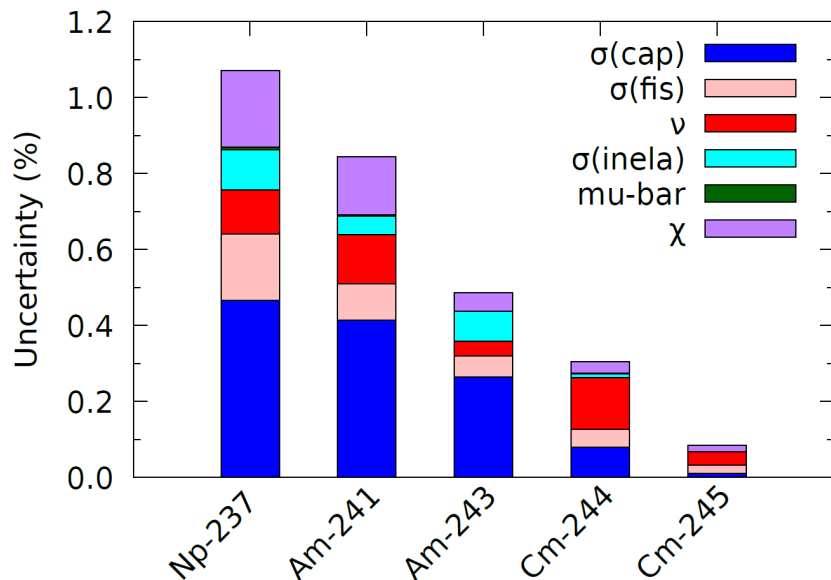


核変換システムの核特性(未臨界度など)や対象核種の核変換効率の  
評価に、これらの中性子捕獲断面積の精度向上が必須

- 加速器駆動未臨界システムなどを用いた核変換による長寿命核種の減容
  - 放射性毒性の強いマイナーアクチノイド(MA)

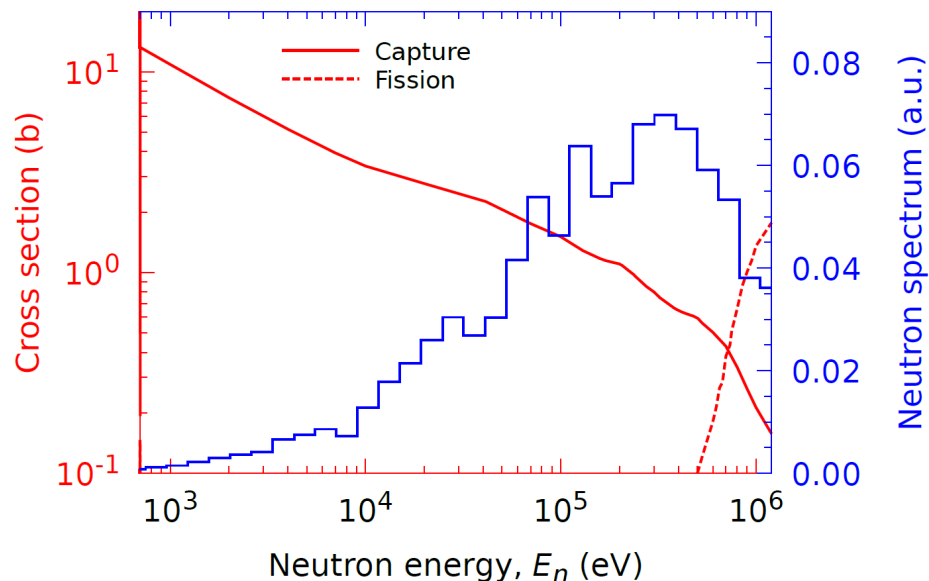
## ネプツニウム Np-237、アメリシウム Am-241,243

臨界性に対するMAの核反応ごとの不確かさ



(H.Iwamoto+ JAEA-Research 2014-033)

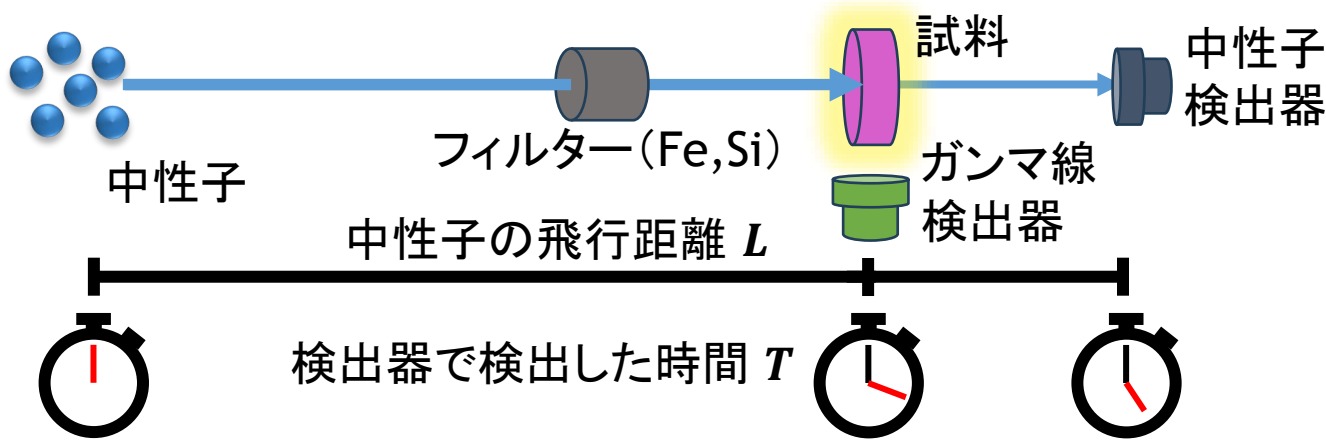
Am-241の中性子断面積と  
中性子スペクトル



核変換システムの核特性(未臨界度など)や対象核種の核変換効率の  
評価に、これらの中性子捕獲断面積の精度向上が必須

# Am-241試料の測定①

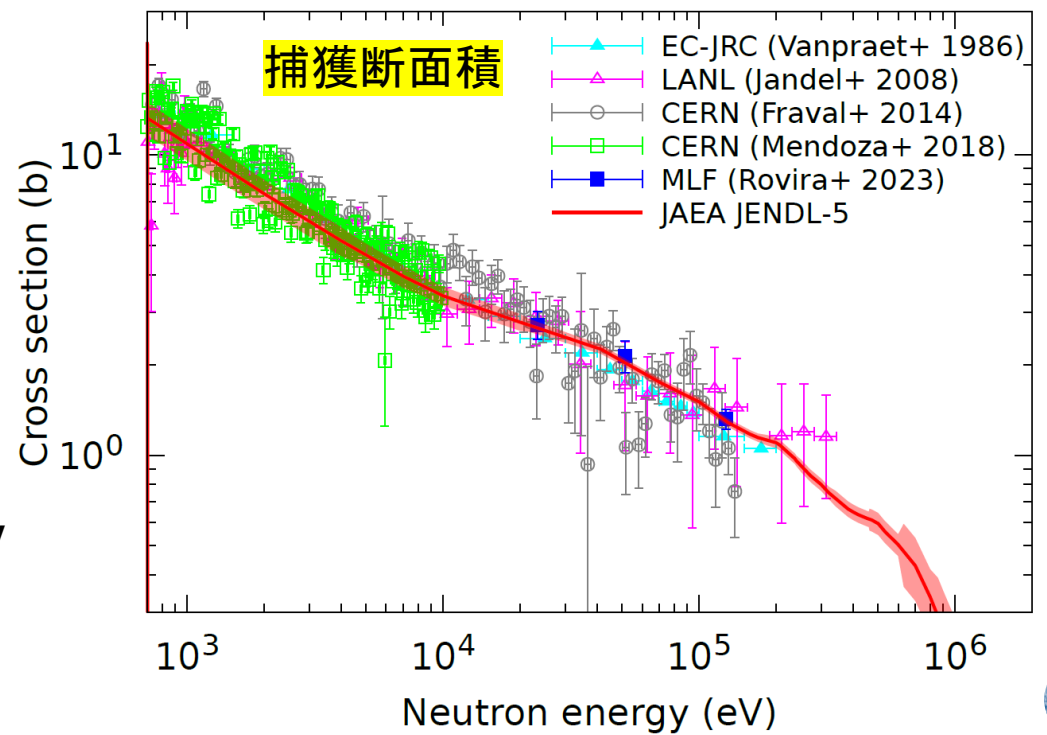
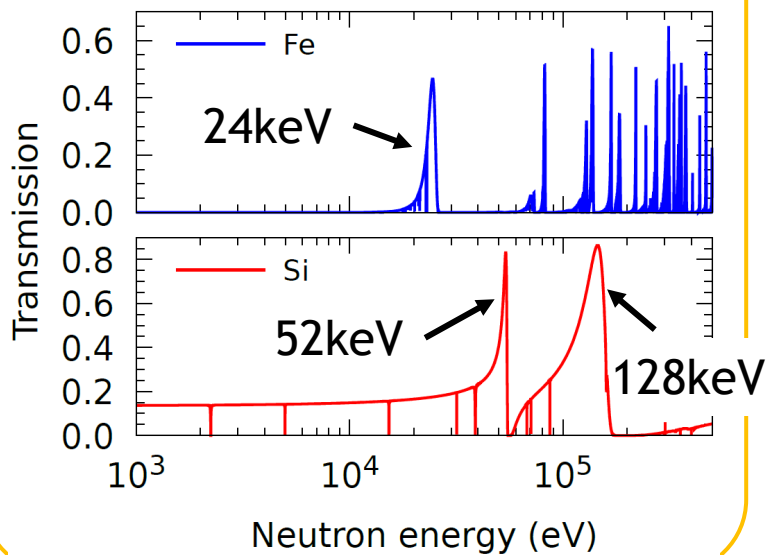
## 飛行時間法による中性子透過率・捕獲断面積測定



測定した  $L$  と  $T$  から  
中性子のエネルギーへ変換

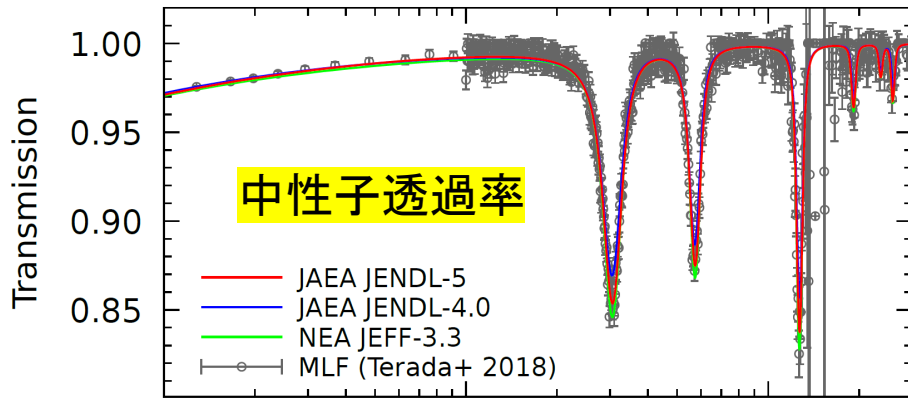
$$E_n = \frac{1}{2} m_n \left( \frac{L}{T} \right)^2$$

## フィルター法を応用した測定 → バックグラウンドの低減が可能



# Am-241試料の測定②

- 低エネルギー領域の捕獲断面積は、軽水炉における生成量の推定に重要
  - EC-JRC施設の測定では熱捕獲断面積が $749 \pm 35$  bと報告 ( $684 \pm 39$  b@JENDL-4.0)



Am-241試料

質量  $7.5 \pm 0.1$  mg

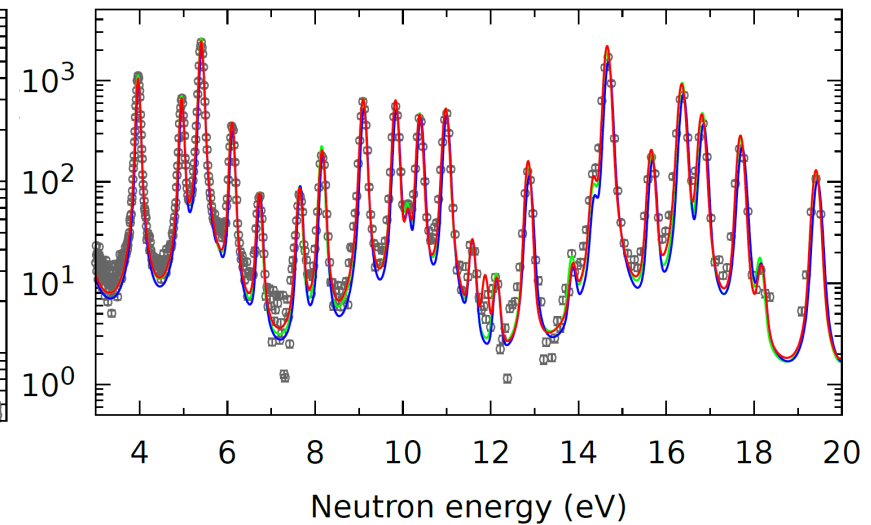
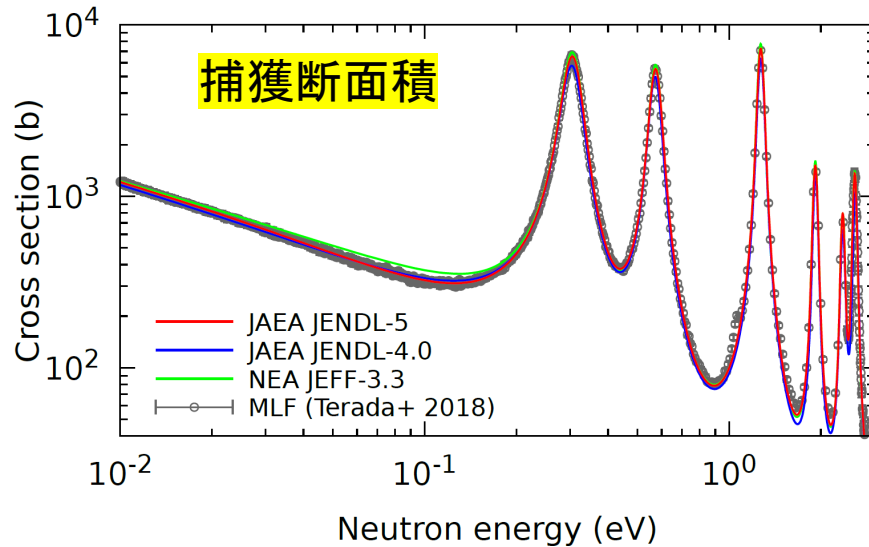
( $957.4 \pm 0.5$  MBq)



$\frac{1}{43}$

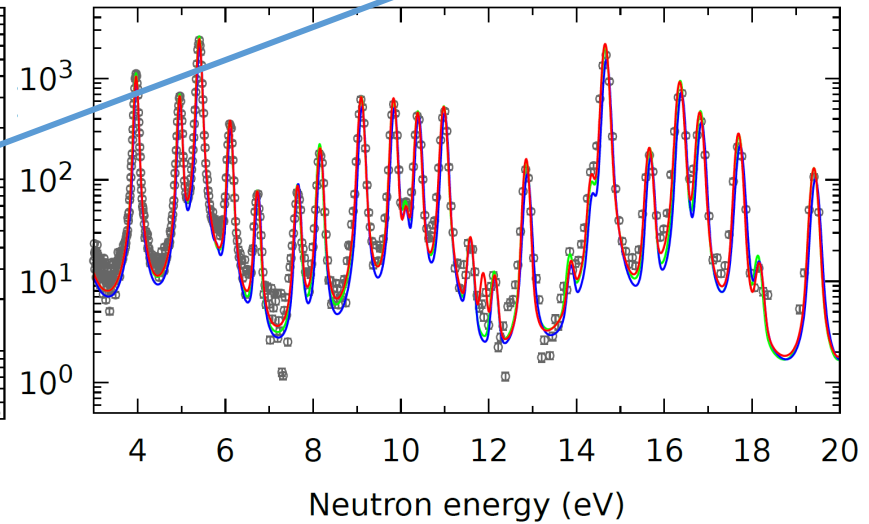
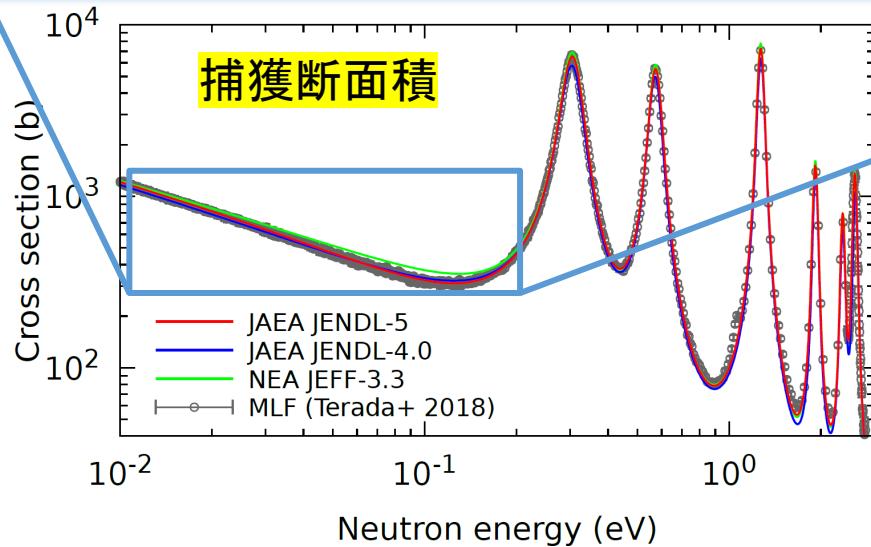
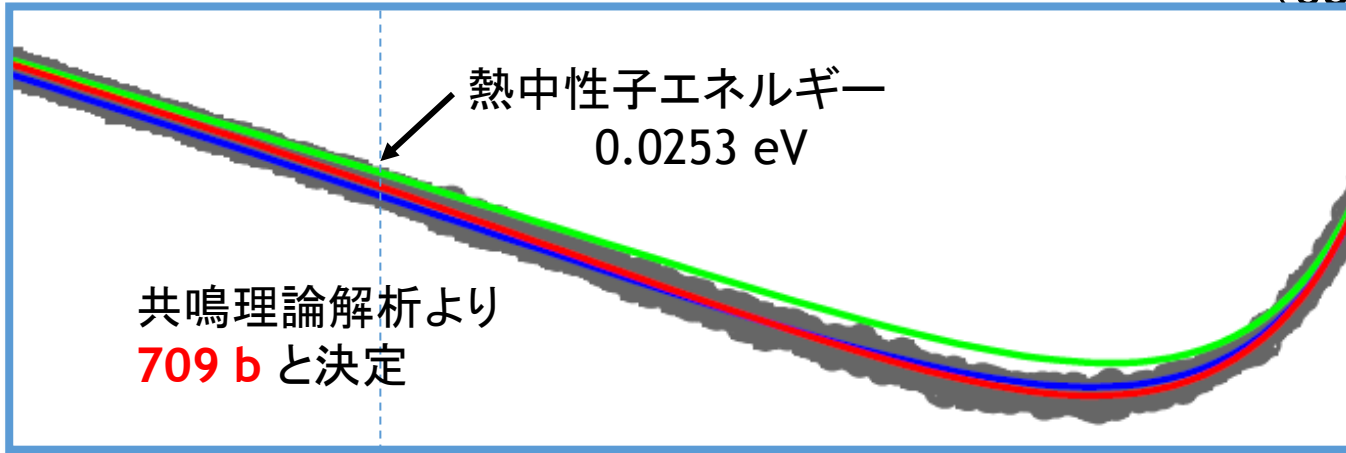
Am-241試料@EC-JRC

質量  $324.6 \pm 1.2$  mg



# Am-241試料の測定②

- 低エネルギー領域の捕獲断面積は、軽水炉における生成量の推定に重要
  - EC-JRC施設の測定では熱捕獲断面積が $749 \pm 35$  bと報告  
( $684 \pm 39$  b@JENDL-4.0)



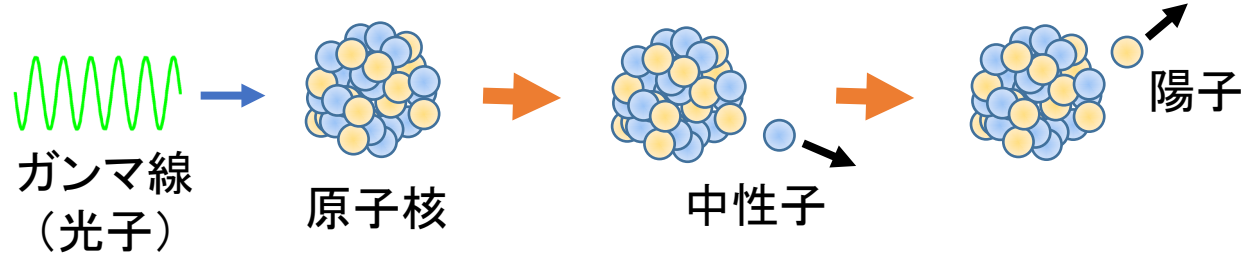
Am-241, 243やNp-237などのMA核データの信頼性を向上

### ③ ニューズバル放射光施設

レーザーコンプトン散乱ガンマ線を利用した  
中性子生成断面積測定

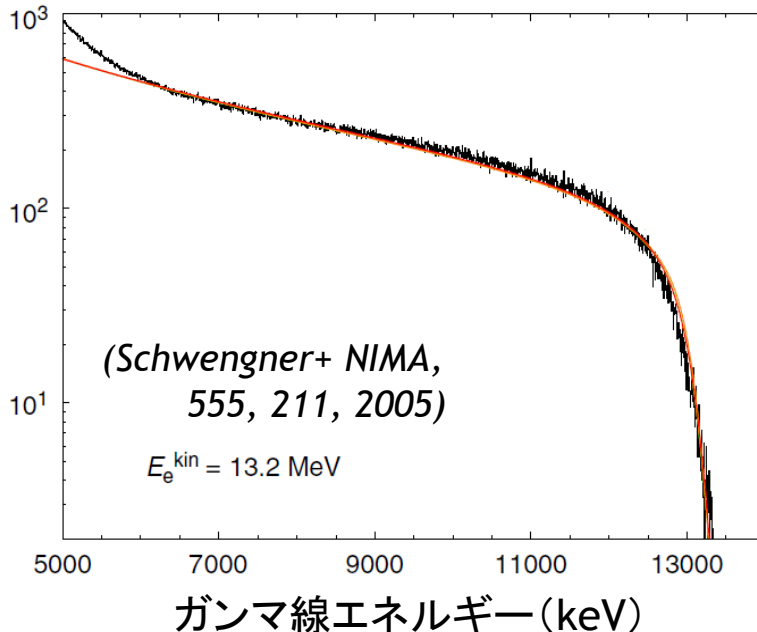


- 原子核がガンマ線を吸収して、持ち込まれたエネルギーを粒子やガンマ線で放出



- 電子(陽電子)が物質と相互作用するとガンマ線(制動放射線)を発生
  - 制動放射線は電子のエネルギーを上限として連続的に分布
- 電子線加速器からの電子により発生したガンマ線による施設の放射化
  - 光核反応で生成される中性子量を推定することが重要

ガンマ線エネルギー分布



多くの実験では、制動放射線や陽電子対消滅ガンマ線を利用  
→エネルギー広がりを反映した断面積

各エネルギー点での断面積測定には、  
**(準)単色ガンマ線が必要**

# ニュースバル放射光施設

兵庫県赤穂郡上郡町



Spring-8

リニアックからの電子ビーム

ニュースバル  
放射光施設

リニアックからの1.0-GeV 電子ビーム

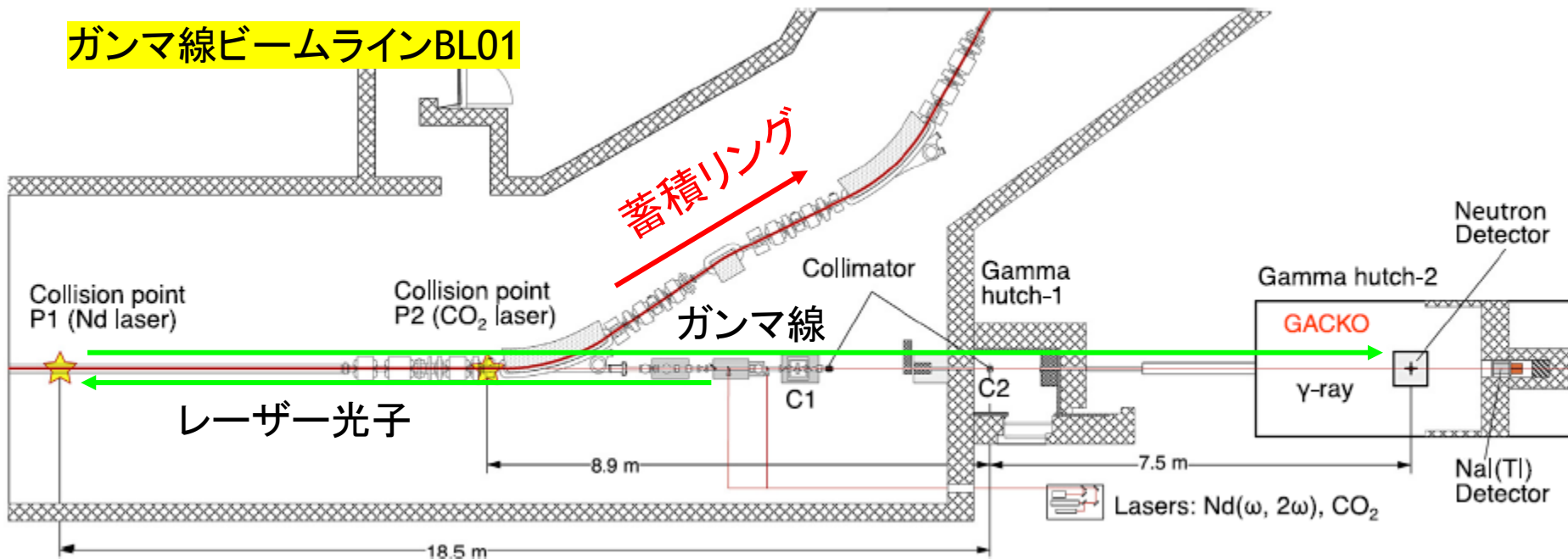


電子蓄積リング  
周長 119m

<https://www.lasti.u-hyogo.ac.jp/NS/facility.html>

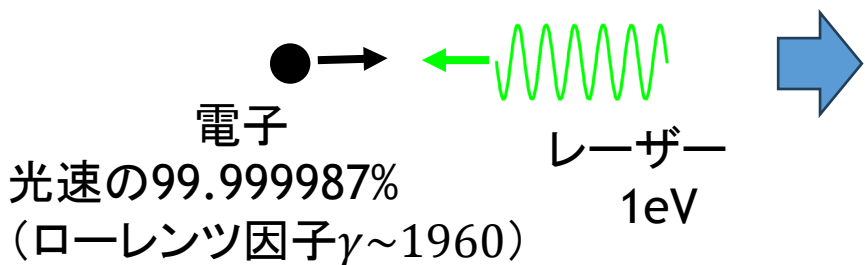
# レーザーコンプトン散乱ガンマ線

## ガンマ線ビームラインBL01

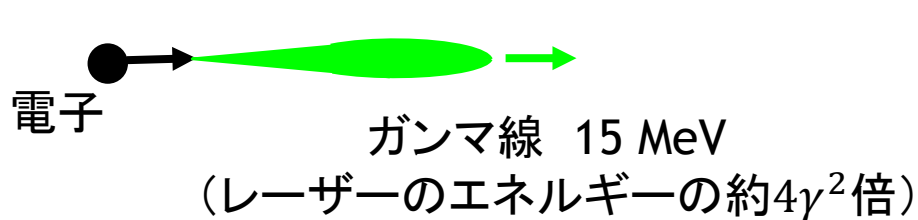


(Utsunomiya et al. NIM A896, 103, 2018)

レーザーを相対論的電子に  
正面から照射



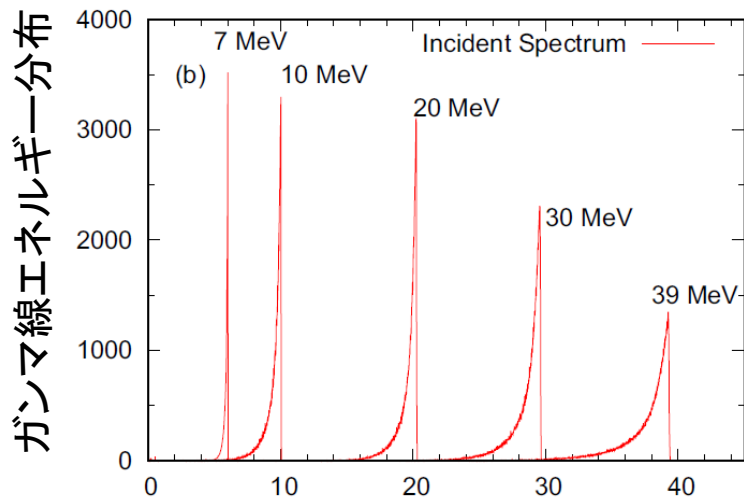
集束したガンマ線をレーザーの  
照射方向と反対に放出



レーザーコンプトン散乱(LCS) → ガンマ線加速器

# 中性子生成断面積の評価

エネルギー広がり (FWHMで1-3%) が  
小さく、低バックグラウンド



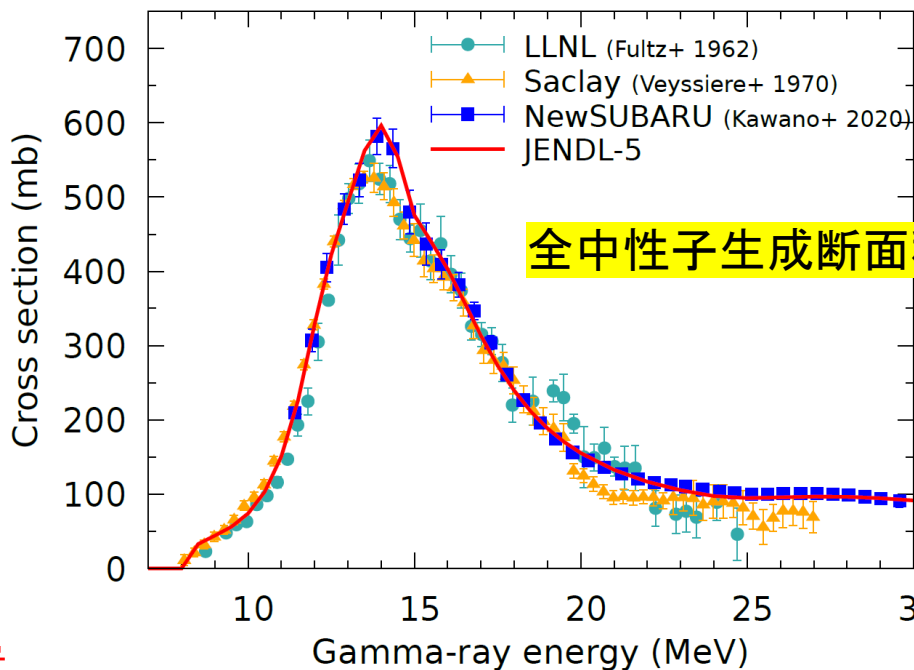
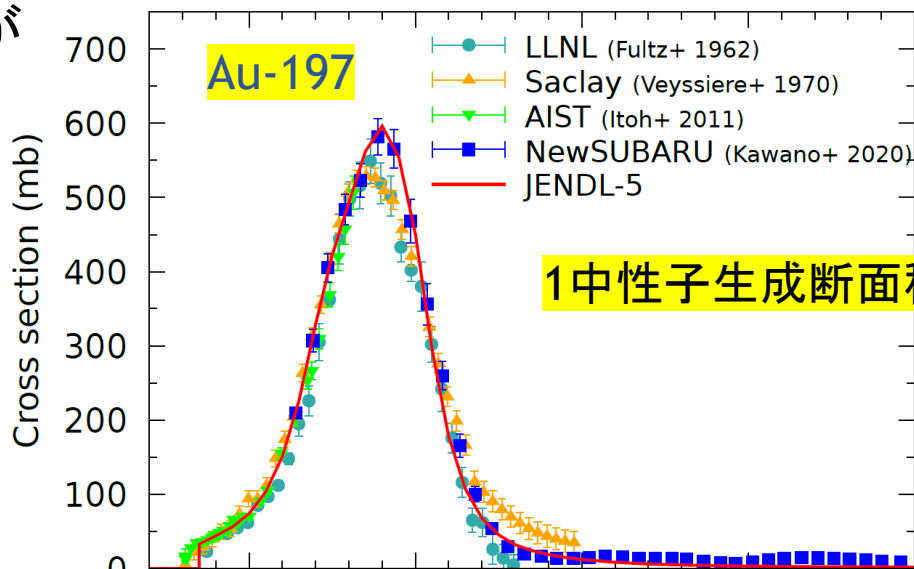
ガンマ線エネルギー (MeV)

(Kawano, ..., *NI+ Nucl. Data Sheets*, 163, 109, 2020)

陽電子対消滅ガンマ線を利用したLLNL  
(米国)とSaclay(仏国)との結果に矛盾

IAEA・国際研究プロジェクト(2016-2019)の  
一環として、LCSガンマ線で測定を実施

**光核反応データの信頼性を向上**



## ② 大強度陽子加速器施設 (J-PARC), 物質・生命科学実験施設 (MLF)

大強度核破砕中性子を利用した中性子断面積測定

- ◆ MA核データの信頼性を高め、核変換システム諸量の評価精度向上に貢献

## ③ ニューズバル放射光施設

準単色レーザーコンプトン散乱ガンマ線を利用した  
中性子生成断面積測定

- ◆ 中性子生成断面積の信頼性を高め、電子線加速器施設における放射化量の推定精度向上に貢献
- ◆ 評価済核データは、IAEA・国際研究プロジェクトで開発したIAEA/PD-2019やJENDL-5に収録