

# FFAG陽子加速器を用いた ADS用核データの実験的研究

---

研究代表者                      岩元 大樹（国立研究開発法人日本原子力研究開発機構）  
再委託先研究責任者          石 禎浩（国立大学法人京都大学）

明午 伸一郎、西尾 勝久、廣瀬 健太郎、岩元 洋介、栗山 靖敏、前川 藤夫、牧井 宏之、  
森 義治、岡部 晃大、Orlandi Riccardo、大泉 昭人、佐藤 大樹、Smallcombe James、  
杉原 健太、洲寄 ふみ、塚田 和明、上杉 智教、八島 浩

# 内容

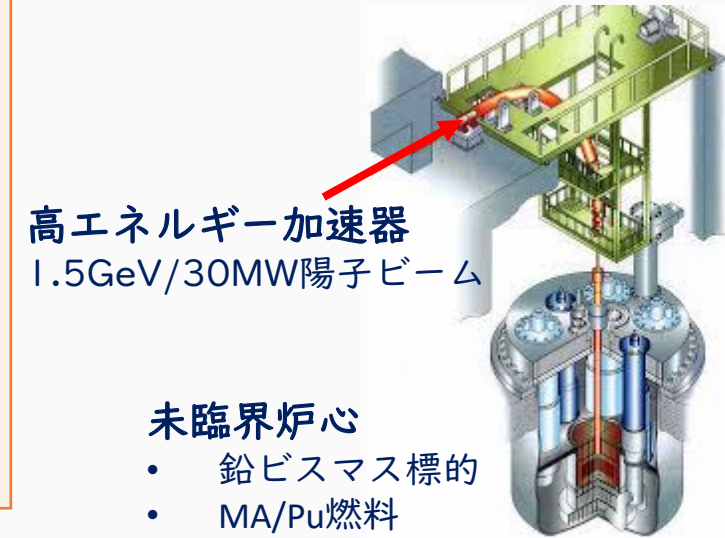
- 研究の背景と目的
- 全体研究計画
- 項目ごとの研究の内容と成果
- 成果の新規性と研究の効果
- 成果の外部発表
- 関連研究の国内外の状況
- 今後の課題と方向性

# 研究の背景と目的

## 背景

### 加速器駆動核変換システム (ADS) の研究開発

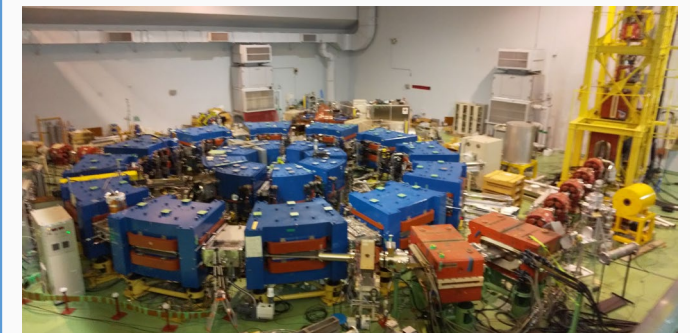
- GeVからkeV領域の核反応が関与
- 数十MeVから200MeVの核反応に関する実験データの不足により、核反応モデルの検証が困難



JAEA提案ADS

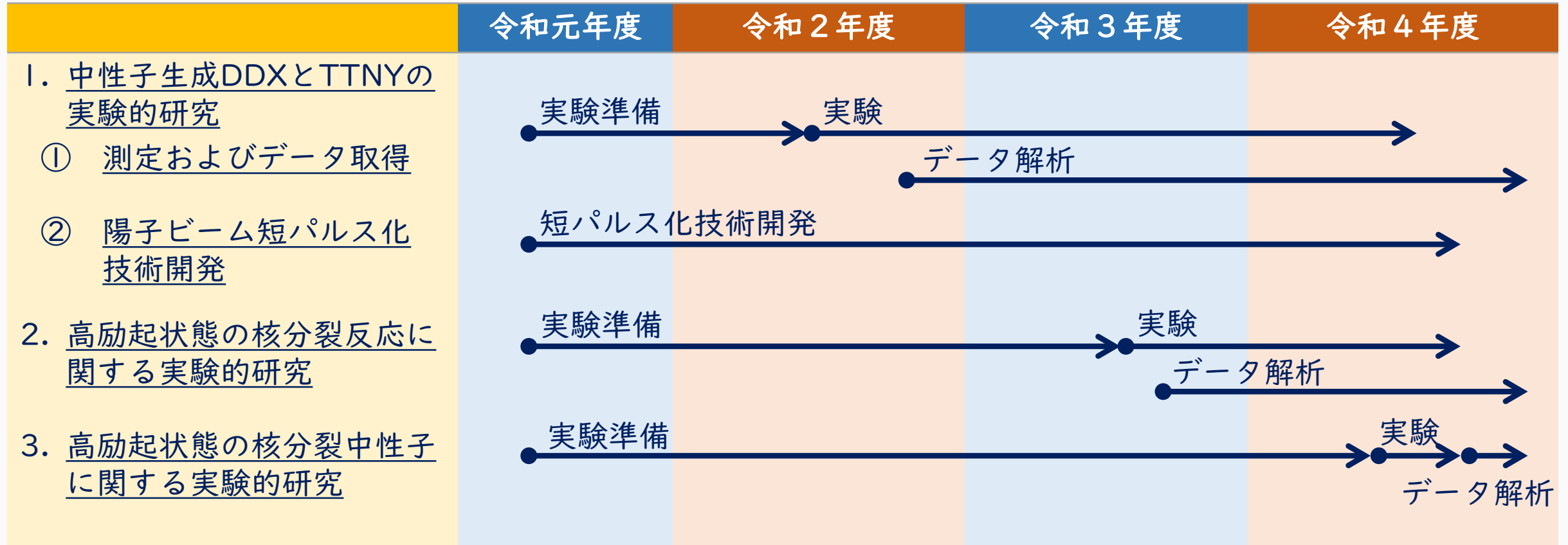
## 目的

1. ADS標的材に関する核データを実験によって取得
2. 核反応モデルの精度検証
  - ADS標的材：鉛 (Pb)、ビスマス (Bi)、鉄 (Fe)
  - 陽子ビーム発生装置：固定磁場強収束 (FFAG) 加速器 (ビームエネルギー107MeV、繰返し30Hz)



FFAG加速器@京都大学  
複合原子力科学研究所

# 全体研究計画



TTNY：厚い標的から放出される中性子収量  
Thick Target Neutron Yield

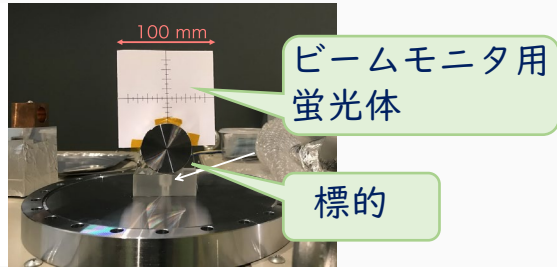
DDX：二重微分断面積  
Double-Differential X(cross) section

# 1. 中性子生成DDXとTTNYの実験的研究

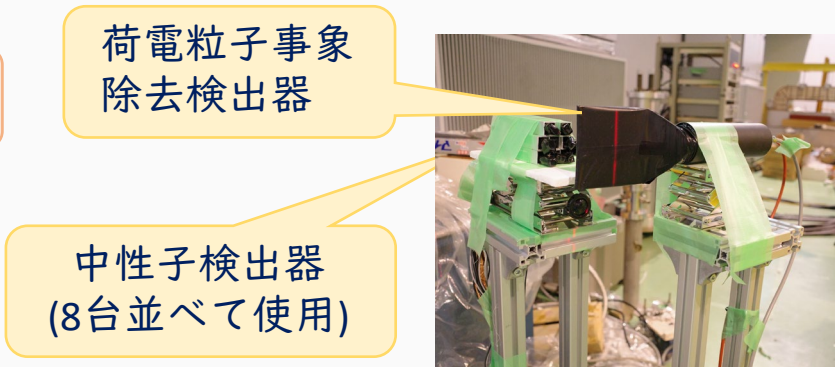
# ① 測定およびデータ取得 — TTNy測定 —

**内容** 厚さ30mmの標的に陽子ビームを照射し、標的から放出される中性子収量のエネルギー分布と角度分布を測定

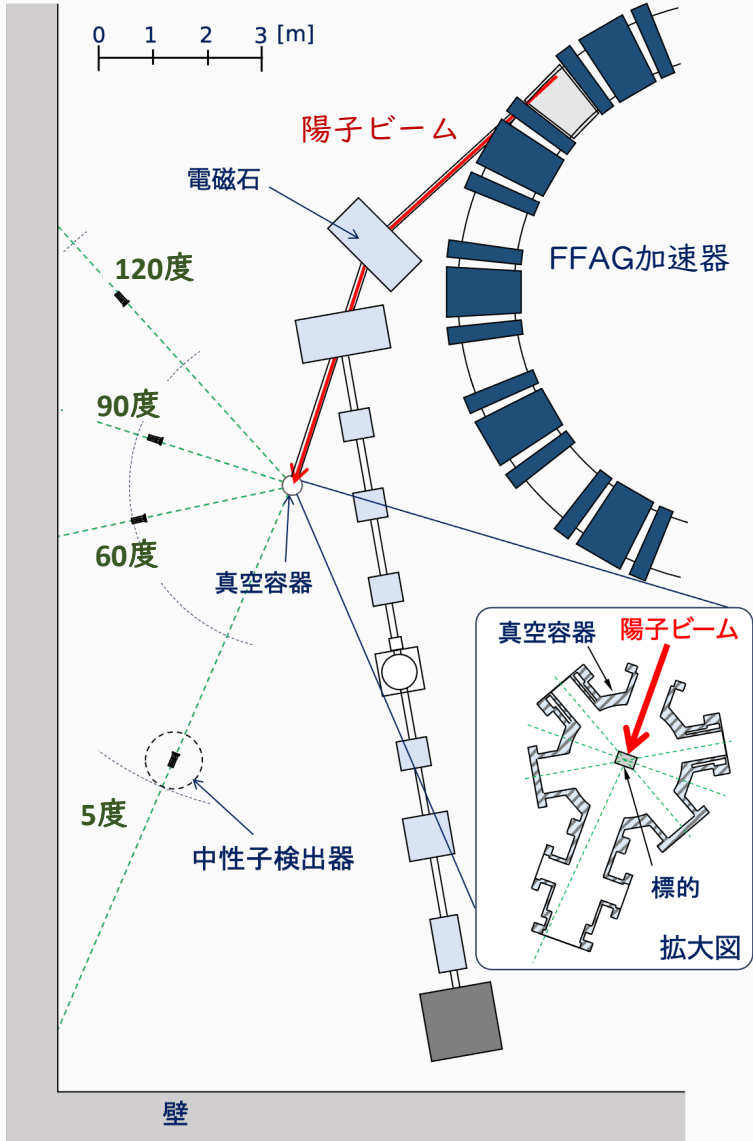
**手法**  
飛行時間 (TOF) 法 (TOF: Time-Of Flight)  
+ 波形弁別 (PSD) 法  
(PSD: Pulse-Shape Discrimination)



**装置**  
中性子検出器： EJ-301液体有機シンチレーションカウンタ  
データ収集システム： FPGA内蔵16チャンネルデジタイザ (SIS3316)



SIS3316



TTNy測定実験体系

# ① 測定およびデータ取得 — DDX測定 —

**内容** 数mm厚の標的に陽子ビームを照射し、標的原子核から放出される中性子のDDXを測定

## 手法・装置

TTNY測定と同じ

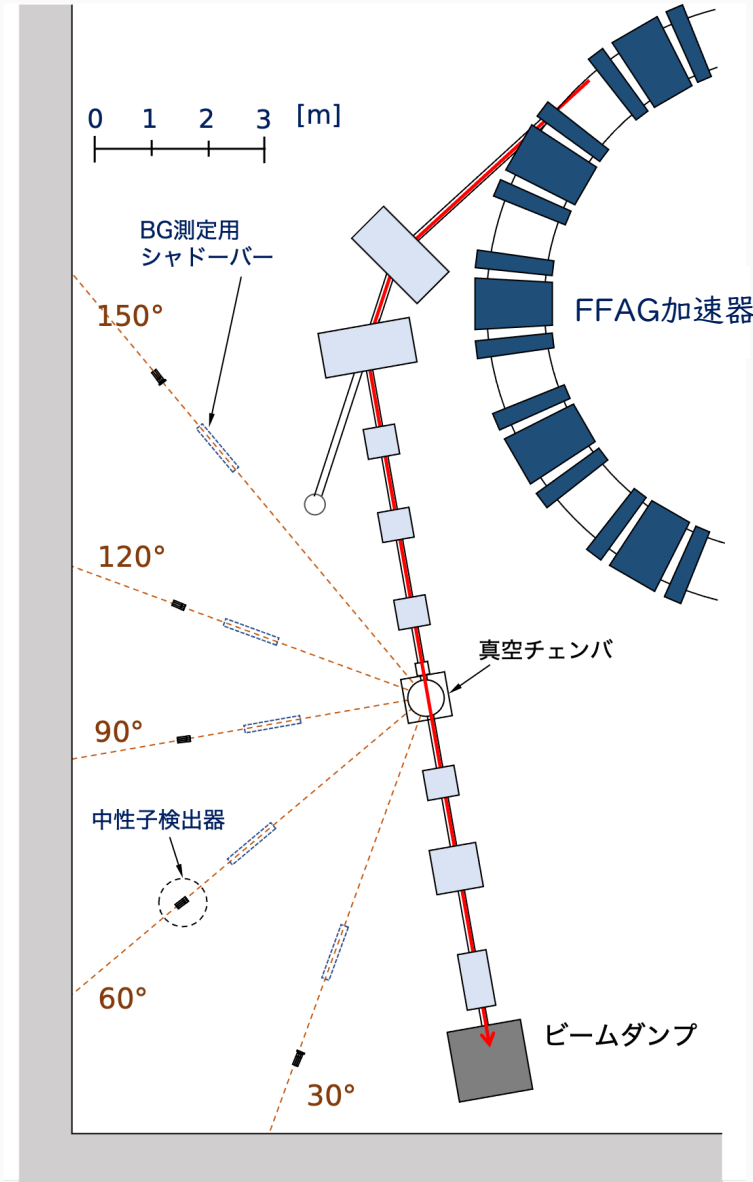
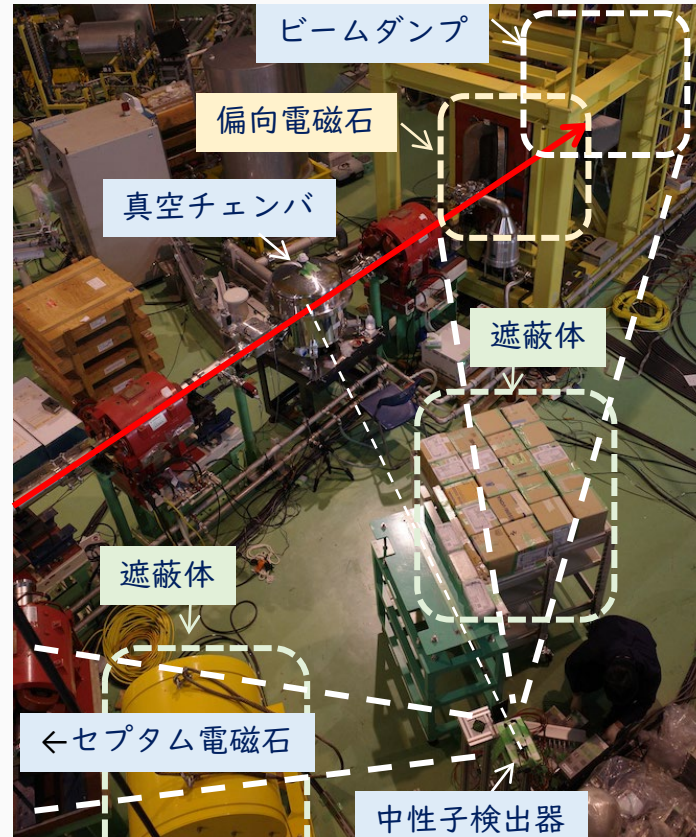
## 加速器本体室（制約環境下）での実験

### 狭隘な空間

- ➡ 中性子検出器を可能な限り遠くに設置
- 陽子ビームを短パルス化

### 高バックグラウンド中性子

- ➡ バックグラウンド中性子源と中性子検出器との間に遮蔽体を設置



DDX測定実験体系

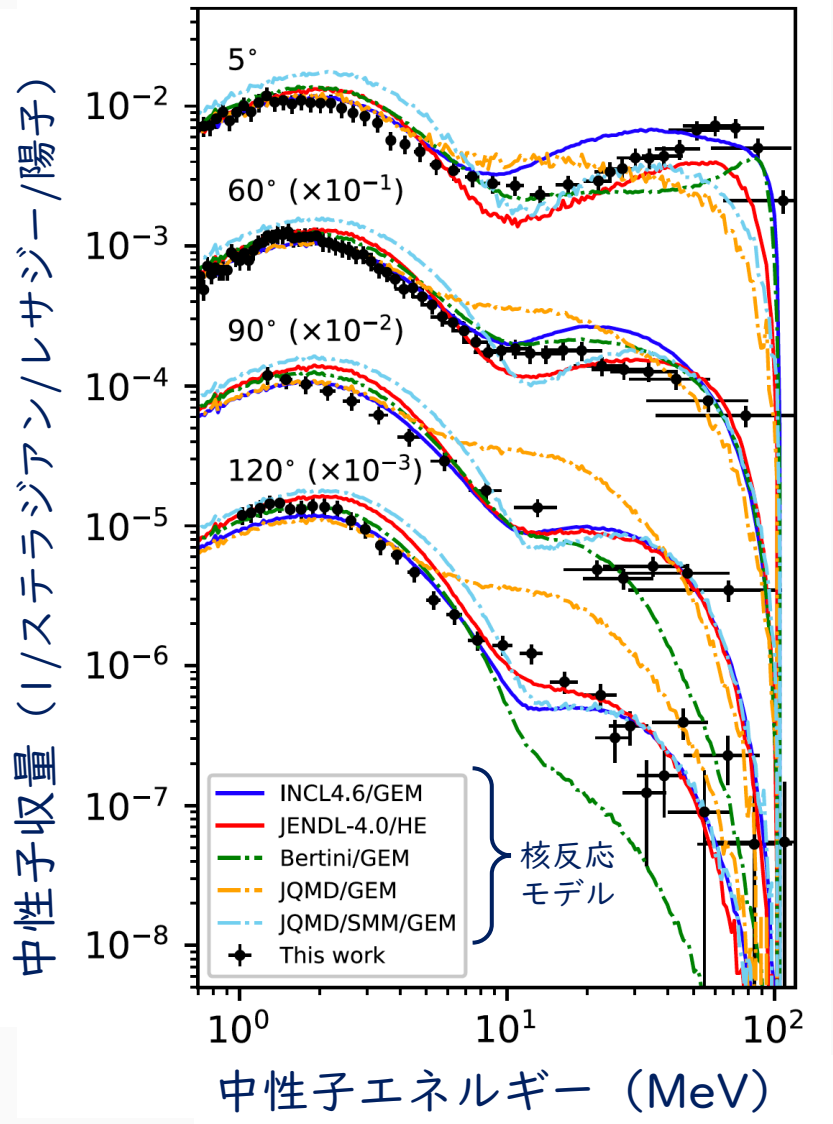
**成果** 広範な放出エネルギー・角度範囲にわたり、Pb, Bi, Feに対するTTNY、ならびにPbおよびBiに対するDDXを取得

# ① 測定およびデータ取得 — 核反応モデルの精度検証 I —

**内容**  
 実験で得られたTTNYを、放射線輸送解析コードPHITSに搭載の核反応モデルによる解析値と比較し、モデルの精度検証を実施

**成果**

- それぞれの核反応モデルの課題と予測精度向上に資する知見を抽出
- TTTY測定および核反応モデルの精度検証に関する研究成果をまとめた論文が学術誌に掲載\*  
\*H. Iwamoto, et al., Measurement of 107-MeV proton-induced double-differential thick target neutron yields for Fe, Pb, and Bi using a fixed-field alternating gradient accelerator at Kyoto University, J. Nucl. Sci. Technol. 60(4), 435-449 (2023).
- 論文に対して第55回日本原子力学会賞論文賞を受賞
- 研究成果に対して、令和5年日本原子力研究開発機構理事長表彰研究開発功績賞を受賞



Pbに対するTTNY測定値と核反応モデル解析値との比較

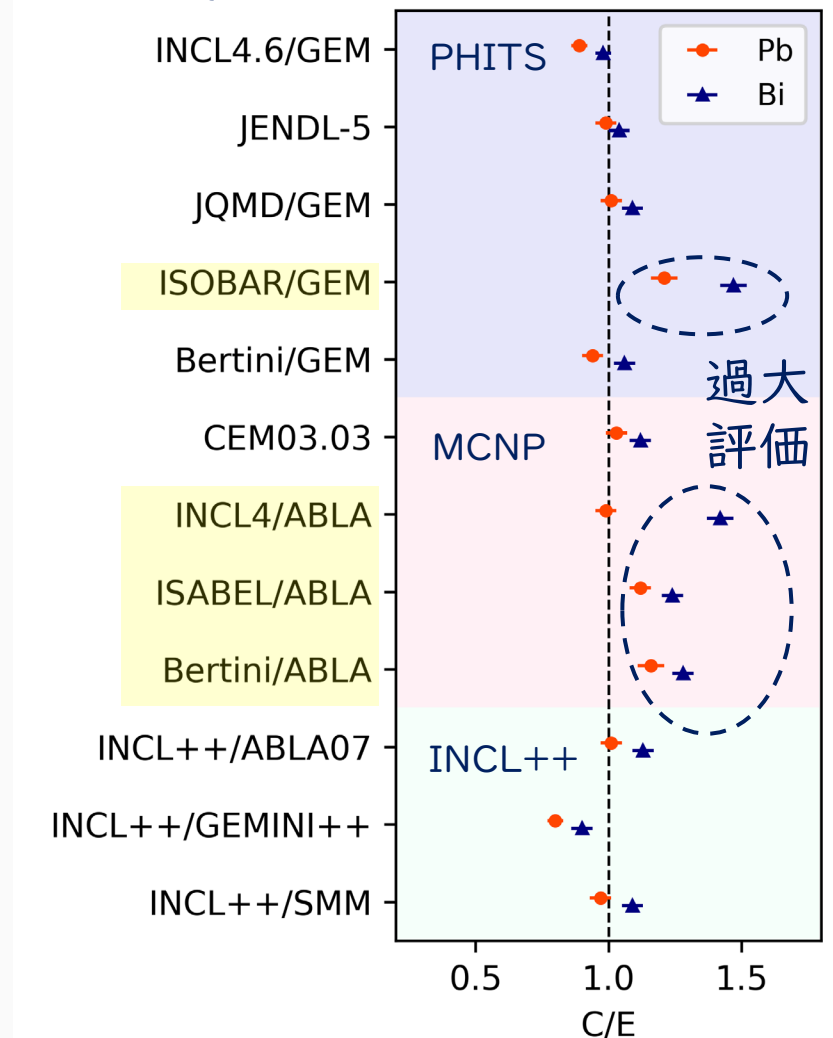


# ① 測定およびデータ取得 — 核反応モデルの精度検証 2 —

**内容**  
 実験で得られたDDXを、代表的な粒子輸送解析コード (PHITS, MCNP, INCL++) に搭載の核反応モデルによる解析値と比較し、モデルの精度検証を実施

**成果**

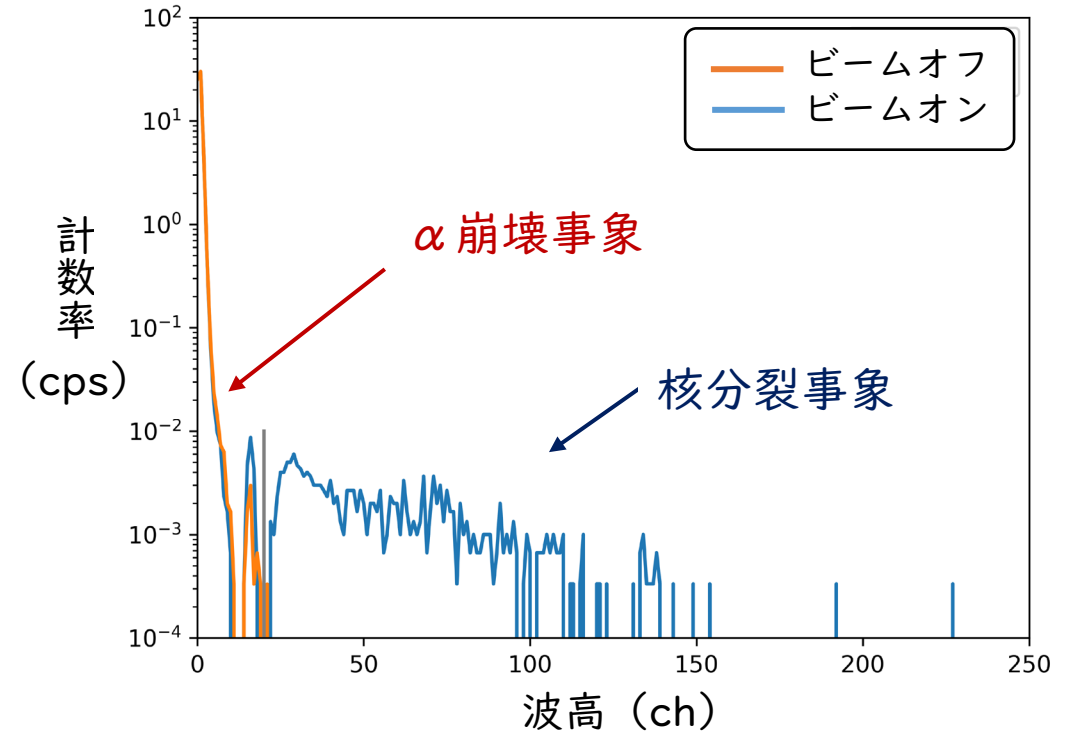
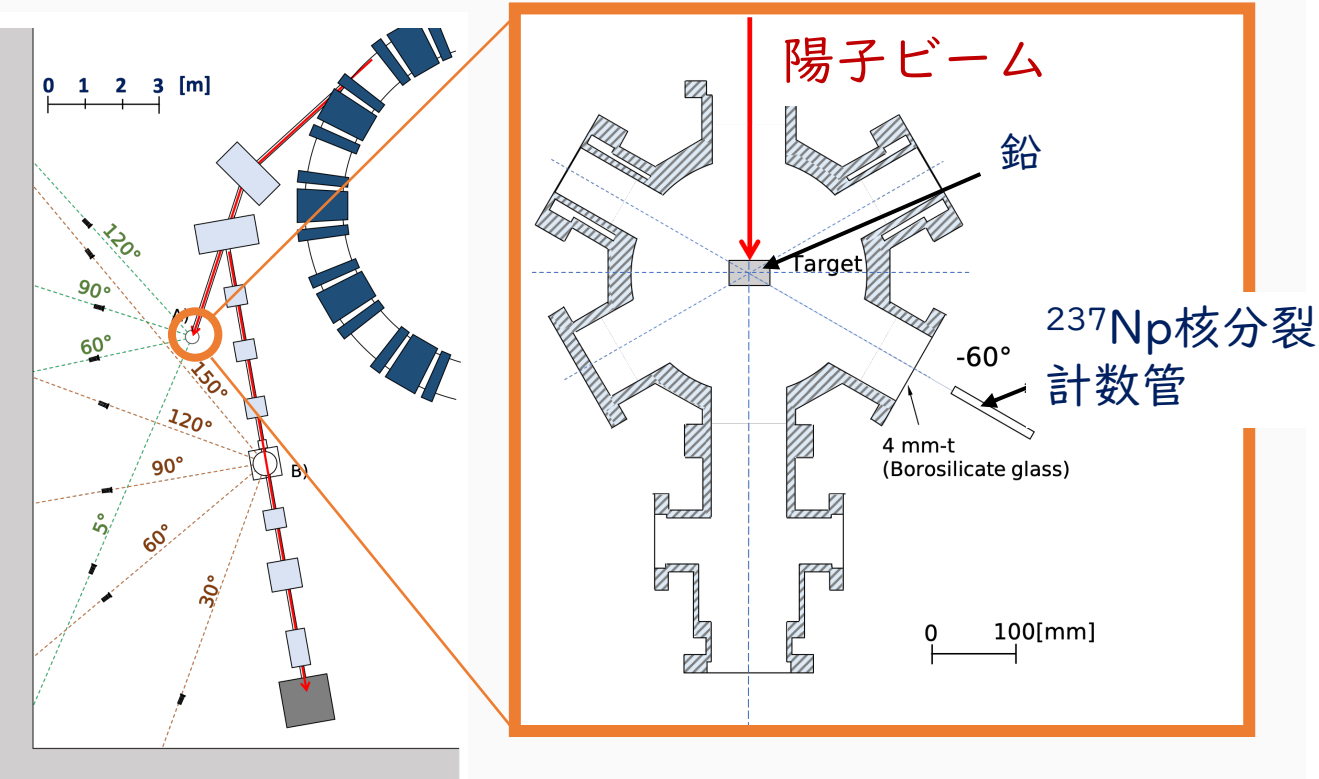
- それぞれの核反応モデルの課題と予測精度向上に資する知見を抽出
- ベルギー原子力研究センター-SCK CENとの国際共同研究に発展し、SCK CEN-JAEA間でDDXを用いたベンチマーク解析を実施
- 本研究とSCK CENとの共同研究の成果をまとめた論文が学術誌に掲載\*  
\*H. Iwamoto, et al., Neutron-production double differential cross sections of Pb and Bi in proton-induced reactions near 100 MeV, Nucl. Instr. Methods, Phys. Res. B, 544, 165107 (2023).
- 本研究で得られた課題が発端となり、J-PARCにおいて二重微分断面積測定実験を実施中



PbとBiに対する平均核破碎中性子多重度<sup>†</sup>の比較  
<sup>†</sup> DDXを放出角度とエネルギーに対して積分した量

# ① 測定およびデータ取得 — $^{237}\text{Np}$ 核分裂反応率測定 —

**内容** 核破砕中性子場における $^{237}\text{Np}$ の核分裂反応率を測定



$^{237}\text{Np}$ 核分裂計数管の波高分布

## 成果

- 核破砕中性子場における $^{237}\text{Np}$ 核分裂反応率データを取得
- TTTY比較結果と整合する結果を確認

$^{237}\text{Np}$ 核分裂反応率の測定値と核反応モデルによる解析値との比較

実験値 (cps)	計算値 <sup>†</sup> (cps)	C/E
$0.160 \pm 0.009$	0.194	1.29

<sup>†</sup>INCL4.6/GEMによる

# ① 測定およびデータ取得 — 実験の効果検討 —

**内容** 本実験による中性子収量予測に対する効果とADS核設計に与える影響を調査

## 評価手法

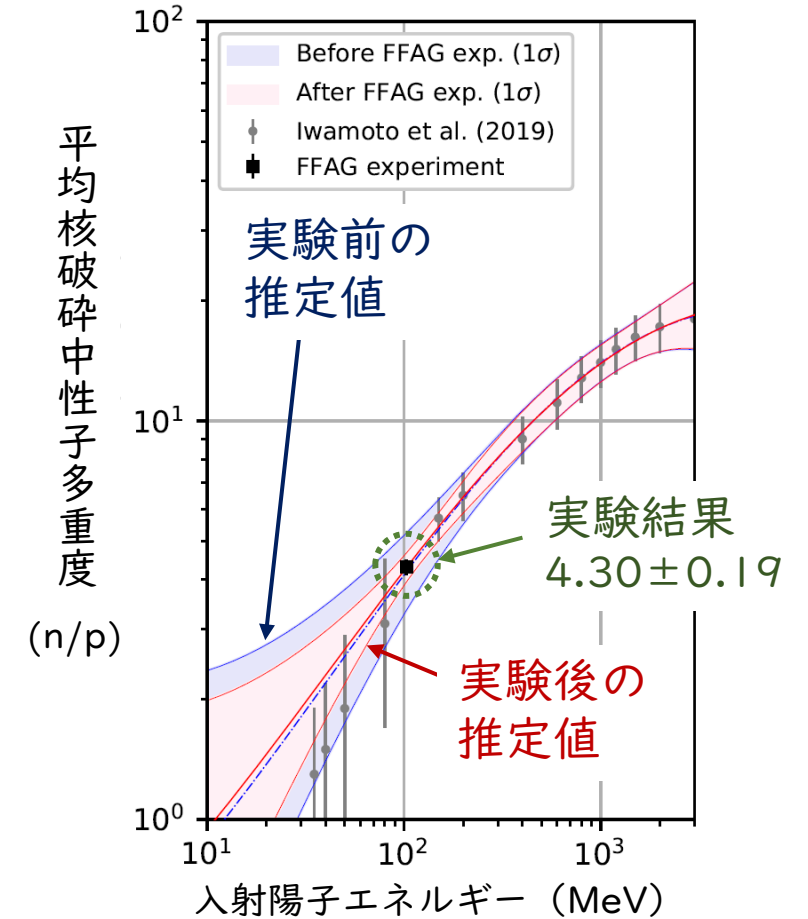
- 鉛標的に関する中性子収量評価データ\*
- ガウス過程を用いたベイズ推定法\*\*

\*H. Iwamoto, et al., Estimation of uncertainty in lead spallation particle multiplicity and its propagation to a neutron energy spectrum, J. Nucl. Sci. Technol. **56**(2), 276-290 (2020).

\*\*H. Iwamoto, Generation of nuclear data using Gaussian process regression, J. Nucl. Sci. Technol. **57**(8), 932-938 (2020).

## 成果

- 実験によって100MeV領域（およびそれ以下）の中性子収量評価値の精度が最大5%程度までに向上
- KUCA\*\*\*のADS未臨界炉物理実験における中性子源強度の不確かさを評価
- 評価した中性子収量データを用いて、ADSで用いる陽子ビーム電流の感度・不確かさ解析の必要性を明らかにした



ベイズ推定法による実験前後のPbに対する平均核破碎中性子多重度の推定値†

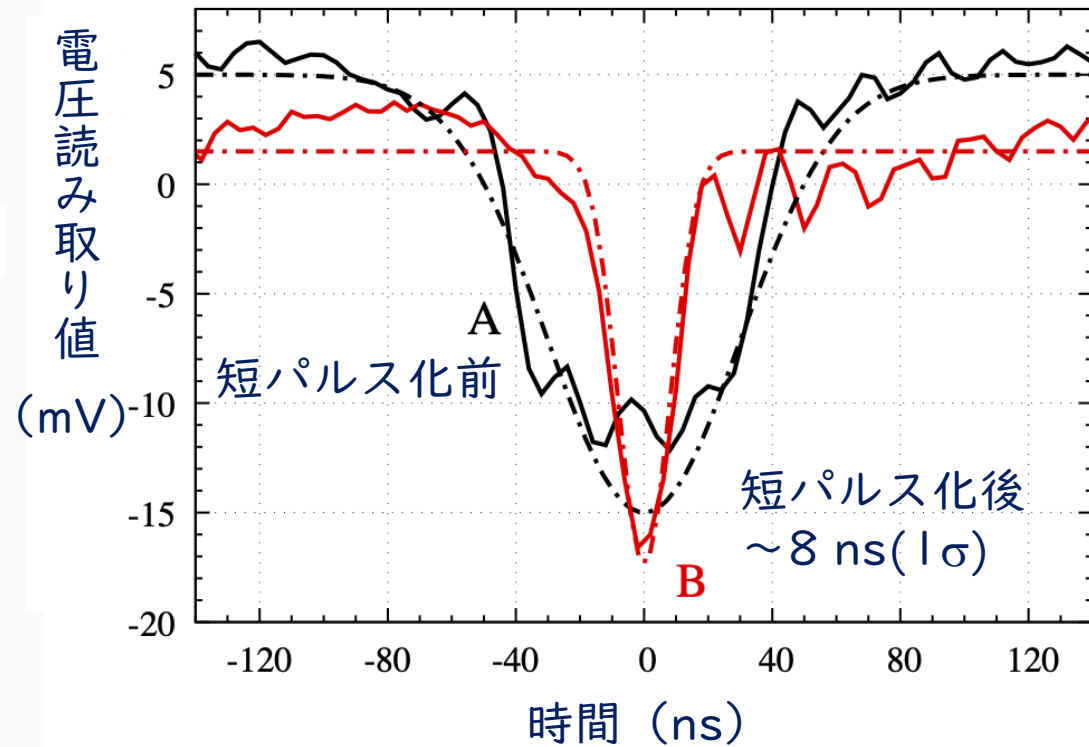
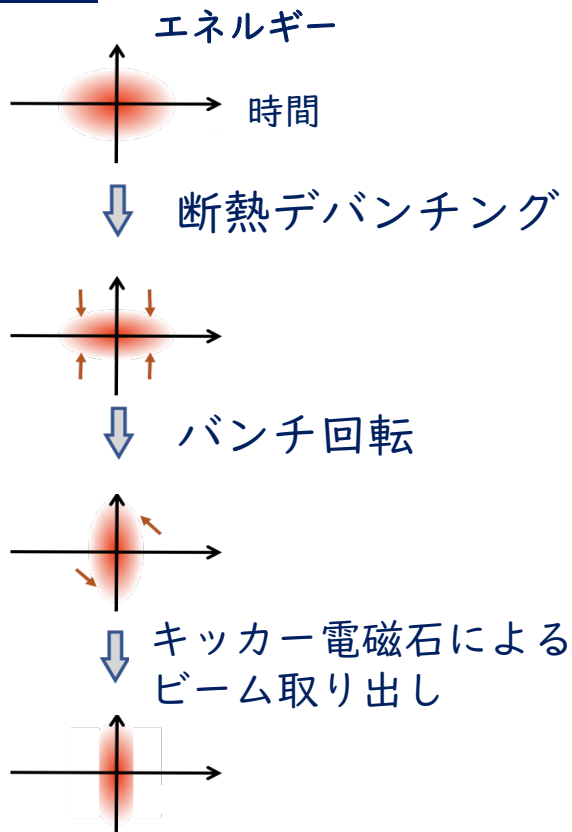
†帯の幅は1σの不確かさを表す

\*\*\*KUCA: 京都大学臨界集合体実験装置 (Kyoto University Critical Assembly) の略称

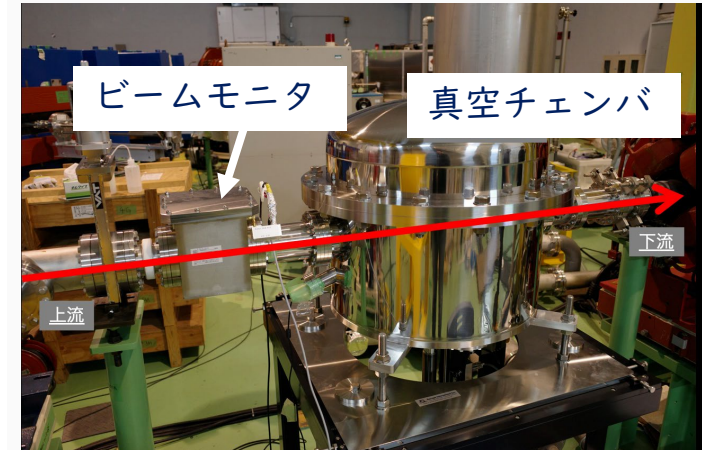
## ② 陽子ビーム短パルス化技術開発

**内容** DDX, TTTY測定において可能な限り高いエネルギー分解能を得るため、ビームのパルス幅が10 ns未満となるよう、短パルス技術開発を実施

### 手法



ビームモニタで観測されたビームの時間構造



真空チェンバの上流側に設置されたビームモニタ

**成果** 短パルス化を達成するとともに、リアルタイムでパルス幅を調整可能な機能を追加

2. 高励起状態の核分裂反応に関する実験的研究
3. 高励起状態の核分裂中性子に関する実験的研究

## 2. 高励起状態の核分裂反応に関する実験的研究

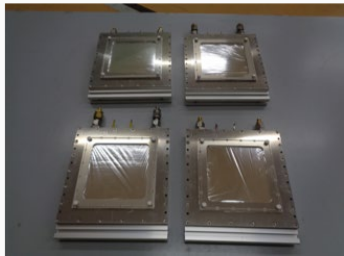
### 3. 高励起状態の核分裂中性子に関する実験的研究

**内容** 濃縮した $^{208}\text{Pb}$ と $^{209}\text{Bi}$ 箔に陽子ビームを照射し、標的から放出される核分裂片の質量数分布と核分裂中性子の収量を測定

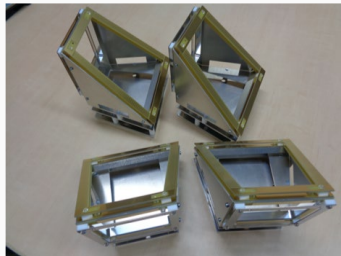
**手法** 飛行時間 (TOF) 法

#### 検出器

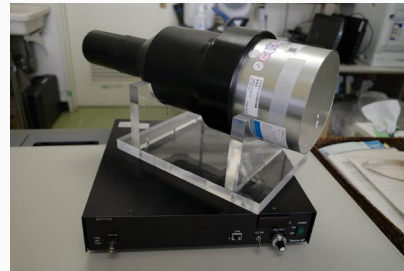
- 核分裂片質量数分布測定：  
多芯線比例計数管 (MWPC)  
+ マイクロチャンネルプレート (MCP)
- 核分裂中性子測定：  
液体有機シンチレーション検出器



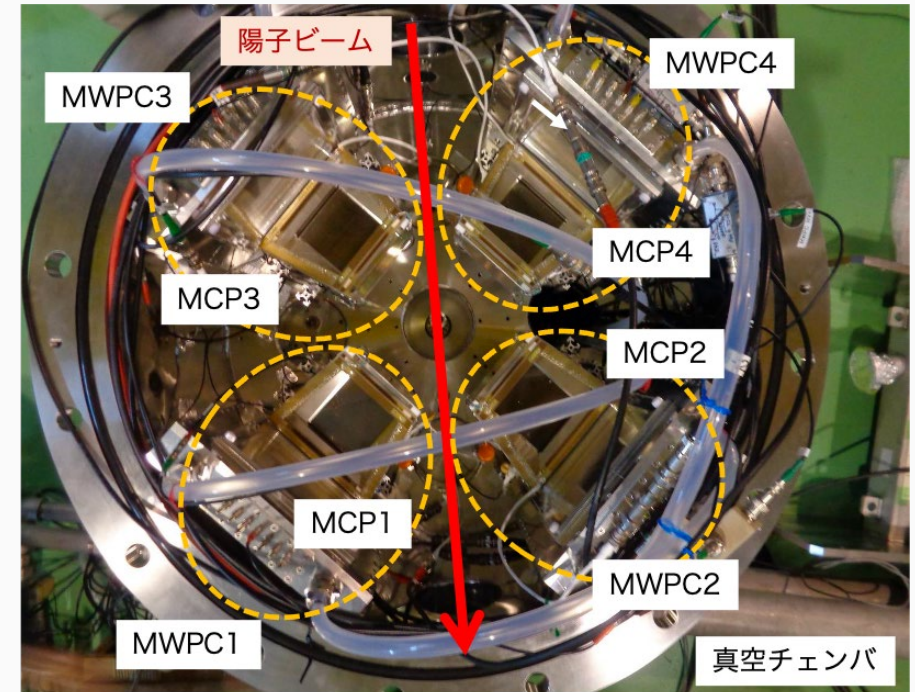
MWPC



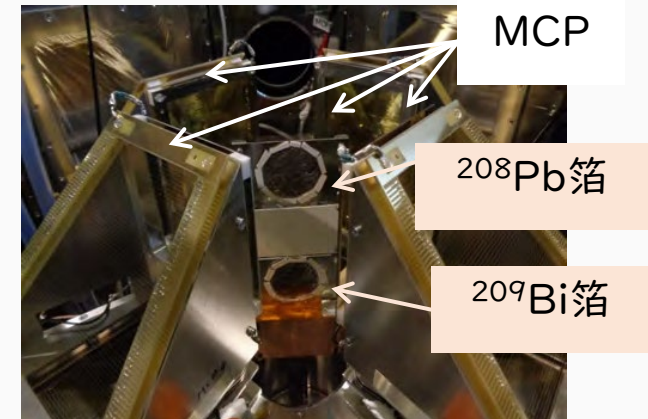
MCP



中性子検出器



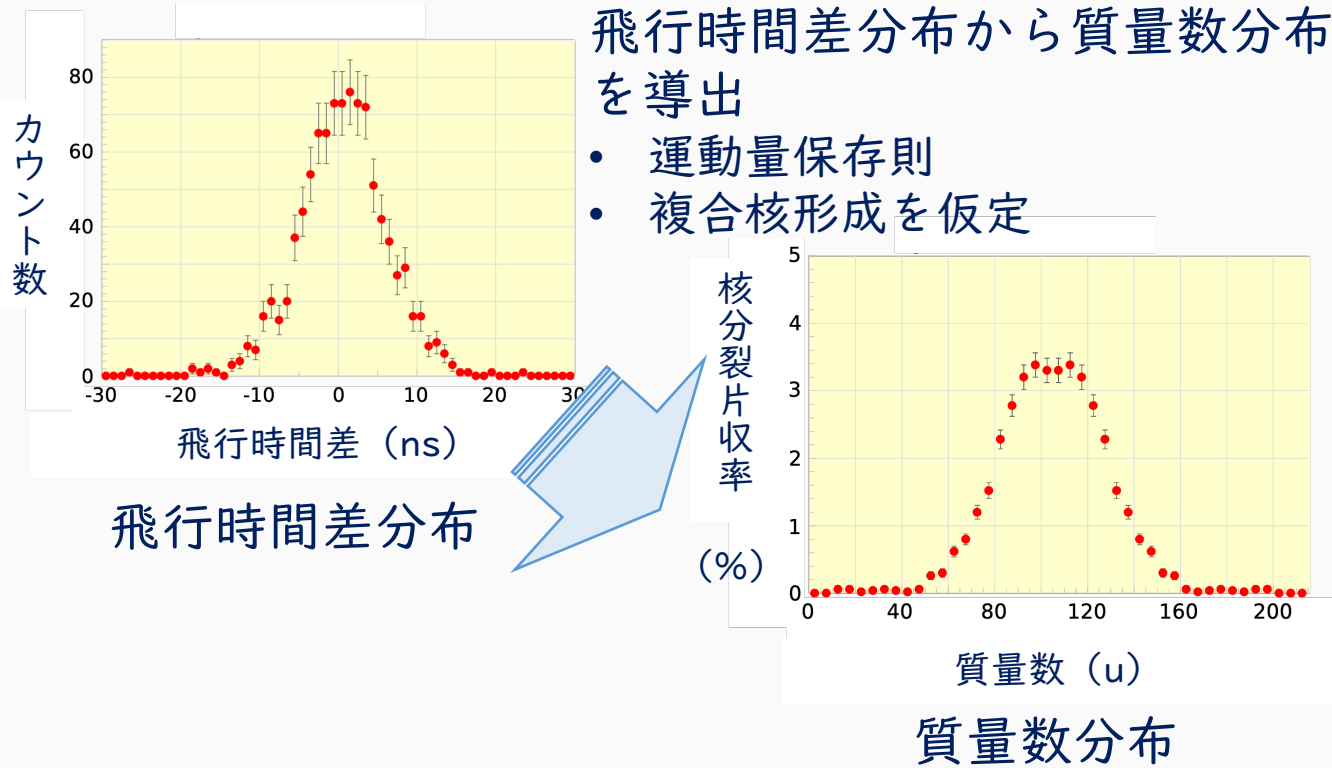
核分裂片検出器の配置



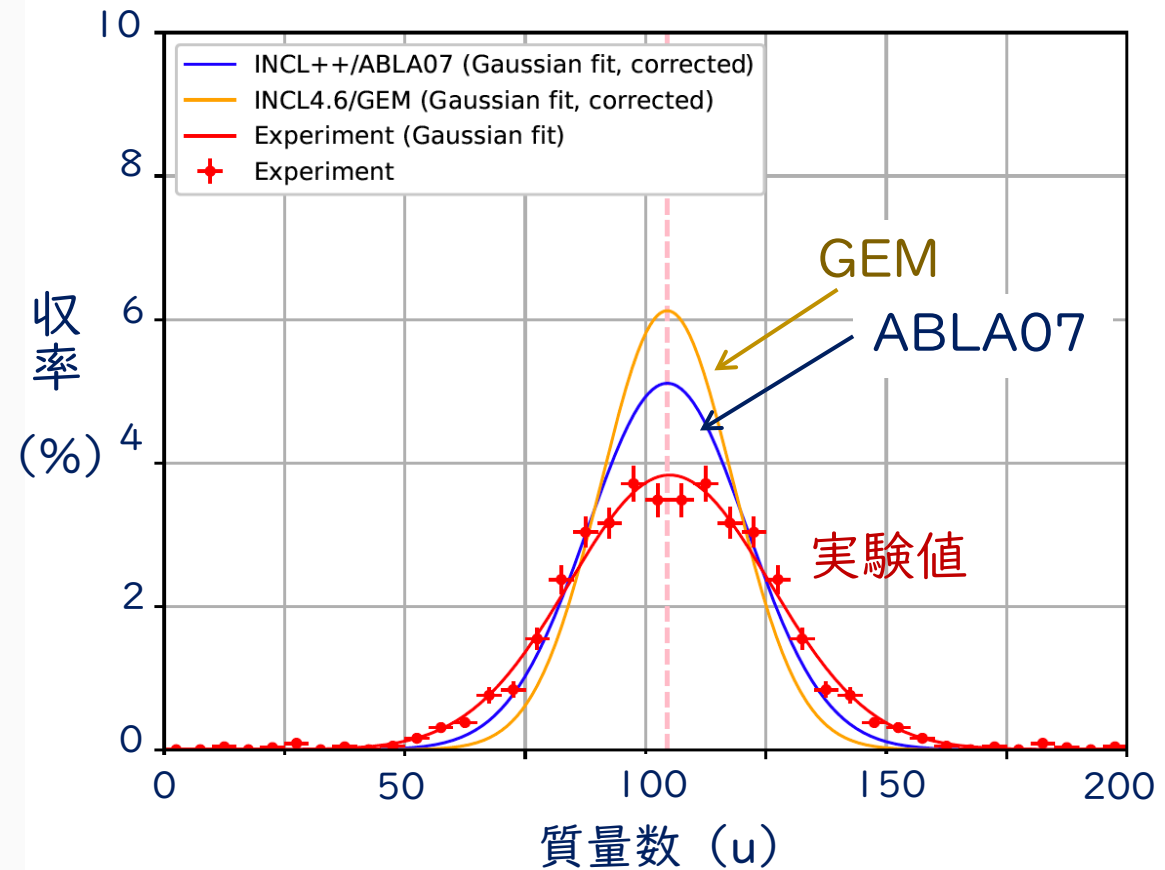
ターゲットホルダに取り付けられた標的

# 2. 高励起状態の核分裂反応に関する実験的研究

## 実験解析



## 核反応モデルの精度検証



$^{208}\text{Pb}(p,f)$  反応の質量数分布の実験値と核反応モデル解析値との比較<sup>†</sup>

<sup>†</sup>核反応モデル解析値の中心が実験値に一致するように質量数を補正して比較

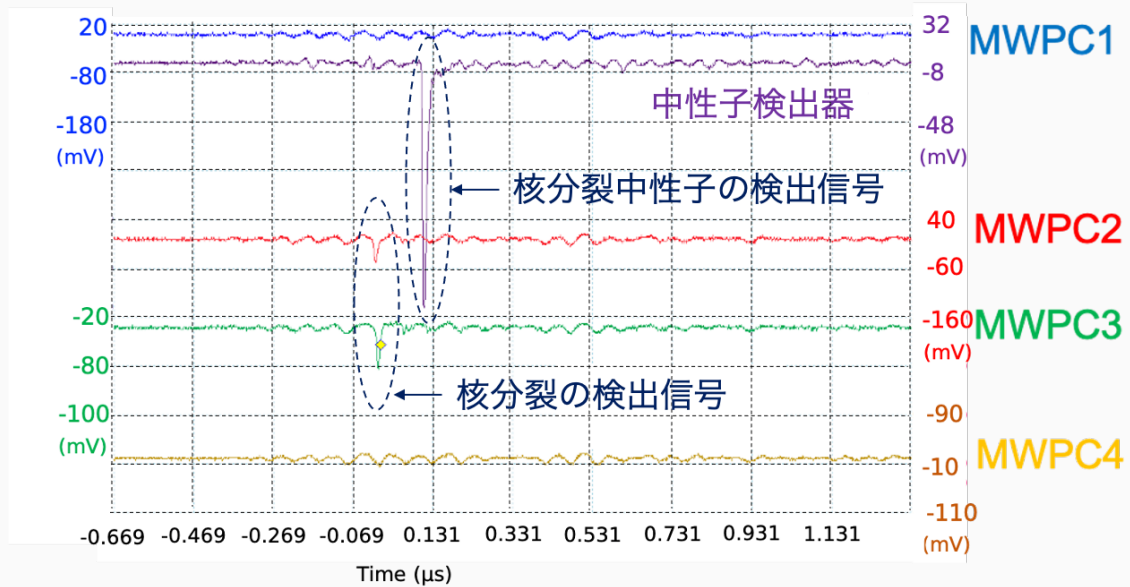
## 成果

- $^{208}\text{Pb}$ および $^{209}\text{Bi}$ に対する陽子入射核分裂片質量数分布の実験データを取得
- 実験解析手法の課題とともに、核反応モデルの予測精度向上に資する知見を抽出

# 3. 高励起状態の核分裂中性子に関する実験的研究

## 実験

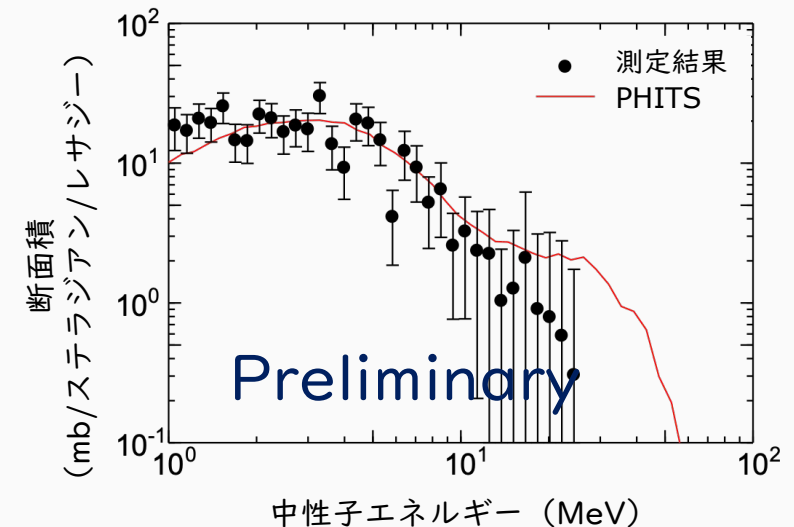
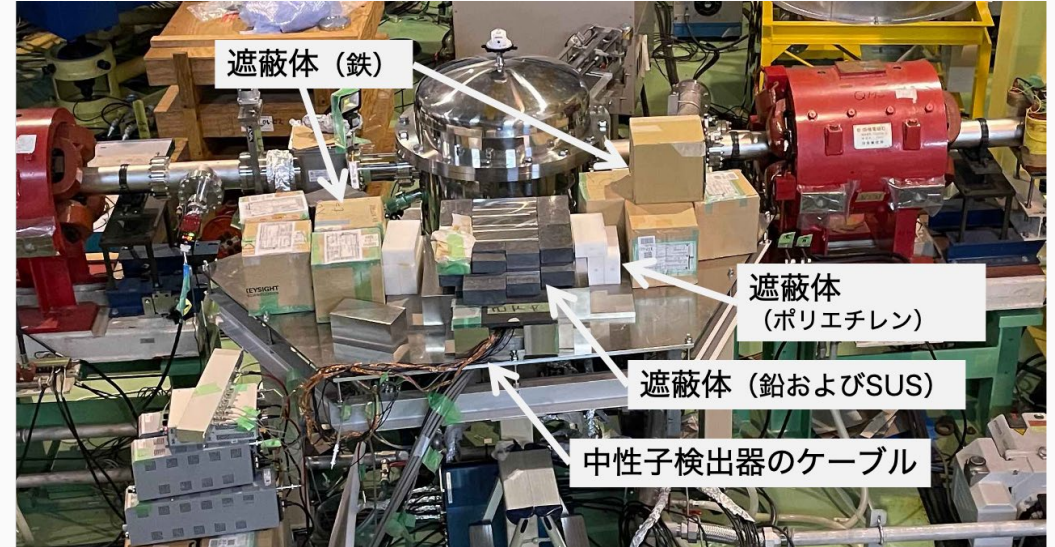
1対のMWPC (2x) の同時信号をスタート信号にして、核分裂中性子を検出



同時計数における核分裂中性子の検出信号

## 成果

- $^{209}\text{Bi}$ に対する核分裂中性子収量のエネルギー・スペクトルを取得
- 統計精度に課題があるが、核反応モデルは実験値をおおむね再現することを確認



$^{209}\text{Bi}(p,f)$ 反応に対する核分裂中性子収量のエネルギー・スペクトル

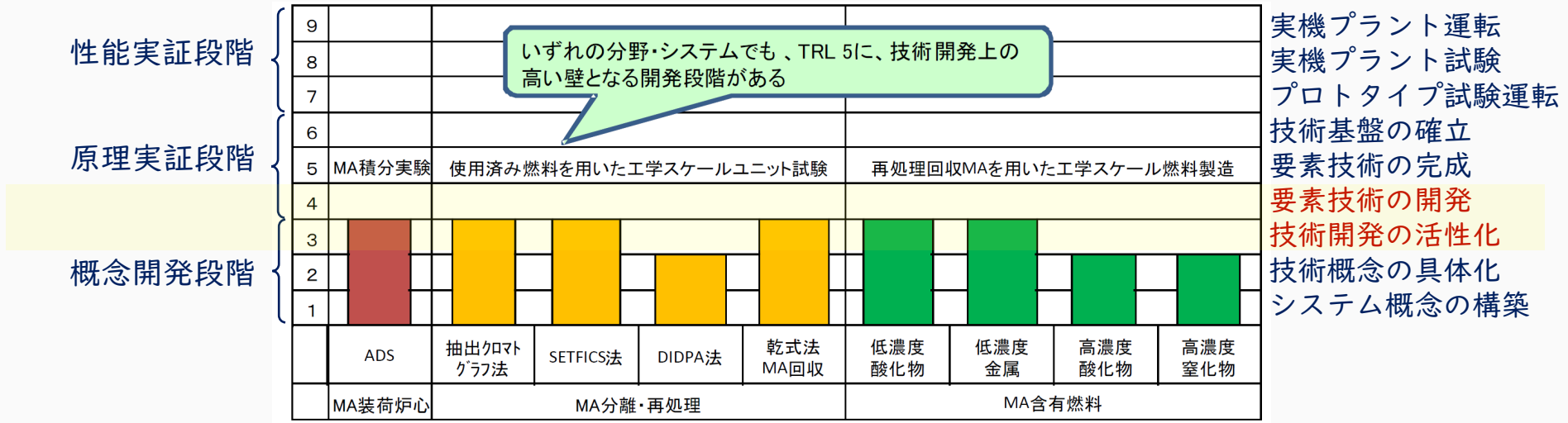


# 成果の新規性

- 中性子検出器を開発し、幅広いエネルギー帯域の中性子エネルギースペクトルを高効率で測定することに成功
- 検出信号を同時処理するシステムを開発し、統計精度の課題を克服
- 短パルス化技術開発により、実験施設の空間的制限のもとで核反応モデルの検証に十分なエネルギー分解能を達成
- 100MeV領域核反応の核データを取得し、これによって初めて、この領域における核反応モデルの精度検証が可能となった

# 研究の効果

- 核反応モデルの予測精度に関する知見は、ADSにおける核設計の信頼性向上に貢献



## 分離変換技術の技術的成熟度 (TRL: Technology Readiness Level)

分離変換・MAリサイクル研究専門委員会、「分離変換技術はどこまで成熟したか？技術成熟度評価に基づく現状整理と提案」、日本原子力学会誌、Vol.52、No.12、(2010).

※すべての分野で、相当量のMAを用いた試験が可能なインフラの欠如が、次段階に進む障害になっている

現状のADS開発はTRL3に留まっており、相当量のMAを使用できない状況において、本成果はTRL向上のための課題「核破砕ターゲット＋高速未臨界体系の核特性評価・基盤データの拡充」に貢献

- 本研究で得られた知見は、ADSだけでなく核破砕中性子源施設の設計や陽子線治療施設の遮蔽設計・治療計画の信頼性向上、および宇宙物理関連分野にも寄与すると期待される

# 成果の外部発表

## 口頭発表

1. Nakano K, Iwamoto H, Meigo S, et al., Experimental Program of Nuclear Data for Accelerator-driven Nuclear Transmutation System Using FFAG Accelerator - First Subprogram: Spallation Neutron Measurement, Symposium on Nuclear Data 2020 (SND2021), 26-27 November 2020, RIKEN Wako Campus.
2. 岩元大樹, 明午伸一郎, 西尾勝久他, FFAG 陽子加速器を用いたADS用核データの実験的研究, 日本原子力学会2021年春の年会, 2021年3月17日~3月19日, オンライン開催.
3. 中野敬太, 岩元大樹, 明午伸一郎他, FFAG 陽子加速器を用いた鉄標的からの中性子エネルギースペクトルの測定, 日本原子力学会2021年秋の大会, 2021年9月8日~9月10日, オンライン開催
4. Iwamoto H, Nakano K, Meigo S, et al., Measurement of 107-MeV proton-induced double differential neutron yields for iron for research and development of accelerator-driven system, Symposium on Nuclear Data 2021 (SND2021), 12-16 November 2020, オンライン開催
5. 上杉智教, 熊取FFAG における短パルスビーム取り出し, 第18回日本加速器学会年会, 2021年8月9日~8月12日, オンライン開催
6. 中野敬太, 岩元大樹, 明午伸一郎他, FFAG 陽子加速器を用いた鉛およびビスマス標的からの中性子エネルギースペクトルの測定, 日本原子力学会2022年春の年会, 2022年3月16日~3月18日, オンライン開催
7. Iwamoto H, Nakano K, Meigo S, et al., Measurement of double-differential neutron yields for iron, lead, and bismuth induced by 107-MeV protons research and development of accelerator-driven systems, 15th International Conference on Nuclear Data for Science and Technology (ND2022), 21-29 July 2022, オンライン開催
8. 岩元大樹, 明午伸一郎, 佐藤大樹他, 鉄、鉛およびビスマスに対する107MeV陽子入射中性子収量の測定と解析, 日本原子力学会2022年秋の年会, 2022年9月7日~9月9日, 茨城大学
9. 上杉智教, 石禎浩, FFAG 加速器における任意パルス長ビーム取り出し第19回日本加速器学会年会, 2022年10月18日~10月21日, オンライン開催
10. 明午伸一郎, 岩元大樹, 中野敬太他, 京都大学FFAG 加速器を用いた加速器駆動型核変換システム(ADS)用核データの実験的研究, 第19回日本加速器学会年会, 2022年10月18日~10月21日, オンライン開催
11. Iwamoto H, Nakano K, Meigo S, et al., Measurement of 100-MeV range reaction data using the fixed field alternating gradient accelerator at Kyoto University, Symposium on Nuclear Data 2022 (SND2022), 17-18 November 2022, 近畿大学
12. 岩元大樹, 明午伸一郎, 佐藤大樹他, 京都大学FFAG加速器を用いた核データ測定実験における中性子生成二重微分断面積の解析および<sup>237</sup>Np核分裂計数管を用いた核破碎中性子場の測定, 日本原子力学会2023年春の年会, 2023年3月14日~3月18日, 東京大学
13. 明午伸一郎他, FFAG陽子加速器を用いた陽子入射反応に関する核データ測定, 第20回日本加速器学会年会, 2023年8月29~9月1日, 日本大学
14. 岩元大樹他, 加速器駆動核変換システム開発のための核データ実験プログラム, 日本原子力学会2023年秋の大会, 2023年9月6日~9月8日, 名古屋大学
15. Iwamoto H, et al. Experimental program on nuclear data for accelerator driven systems using FFAG accelerator, I6IEMPT, October 23-27, 2023, OECD/NEA, Paris, France.

# 成果の外部発表

## 論文・プロシーディングス発表

1. Nakano K, Iwamoto H, Meigo S, et al., Experimental program of nuclear data for accelerator driven nuclear transmutation system using FFAG accelerator -First subprogram: spallation neutron measurement, Proceedings of the 2020 Symposium on Nuclear Data; November 26-27, 2020, RIKEN Nishina Center, RIKEN Wako Campus, Saitama, Japan; [JAEA-Conf-2021-001](#), pp.150-155.
2. 上杉智教、石禎浩、栗山靖敏他、熊取FFAGにおける短パルスビーム取り出し、[第18回日本加速器学会プロシーディングス、TUP026、2021年10月](#)
3. Iwamoto H, Nakano K, Meigo S, et al., Measurement of 107-MeV proton-induced double-differential neutron yields for research and development of accelerator-driven systems, Proceedings of the 2021 Symposium on Nuclear Data; November 18-19, 2021, [JAEA Conf-2022-001](#), pp.129-133.
4. 岩元大樹、明午伸一郎、中野敬太他、京都大学FFAG加速器を用いた加速器駆動型核変換システム(ADS)用核データの実験的研究、[第19回日本加速器学会プロシーディングス、TUP040、2023年1月](#)
5. Iwamoto H, Nakano K, Meigo S, et al., Measurement of 107-MeV proton-induced double-differential thick target neutron yields for Fe, Pb, and Bi using a fixed-field alternating gradient accelerator at Kyoto University, [Journal of Nuclear Science and Technology, vol.60\(4\), pp.435-449 \(2023\)](#).
6. Iwamoto H, Nakano K, Meigo S, et al., Measurement of 107-MeV double-differential neutron yields for iron, lead, and bismuth induced by 107-MeV protons research and development of accelerator-driven systems, Proceedings of 15th International Conference on Nuclear Data for Science and Technology (ND2022), [EPJ Web of Conferences vol.284 p.01023](#).
7. 岩元大樹、明午伸一郎、西尾勝久他、FFAG加速器を用いた陽子入射反応に関する核データの測定、[第20回日本加速器学会プロシーディングス、THOB2、2023年11月](#)
8. Iwamoto H, Meigo S, Satoh D, et al. Neutron-production double-differential cross sections of  $^{nat}\text{Pb}$  and  $^{209}\text{Bi}$  in proton-induced reactions near 100 MeV, [Nucl Instrum. Methods Phys. Res. B, vol.544, p.165107, \(2023\)](#).

## 受賞・表彰

1. 岩元大樹、明午伸一郎、佐藤大樹、岩元洋介、Measurements of 107-MeV proton-induced double-differential thick target neutron yields for Fe, Pb, and Bi, 第55回日本原子力学会賞 論文賞、2023年3月
2. 岩元大樹、明午伸一郎、佐藤大樹、岩元洋介、ADS標的材の中性子収量測定、日本原子力研究開発機構理事長表彰 研究開発功績賞、2023年10月

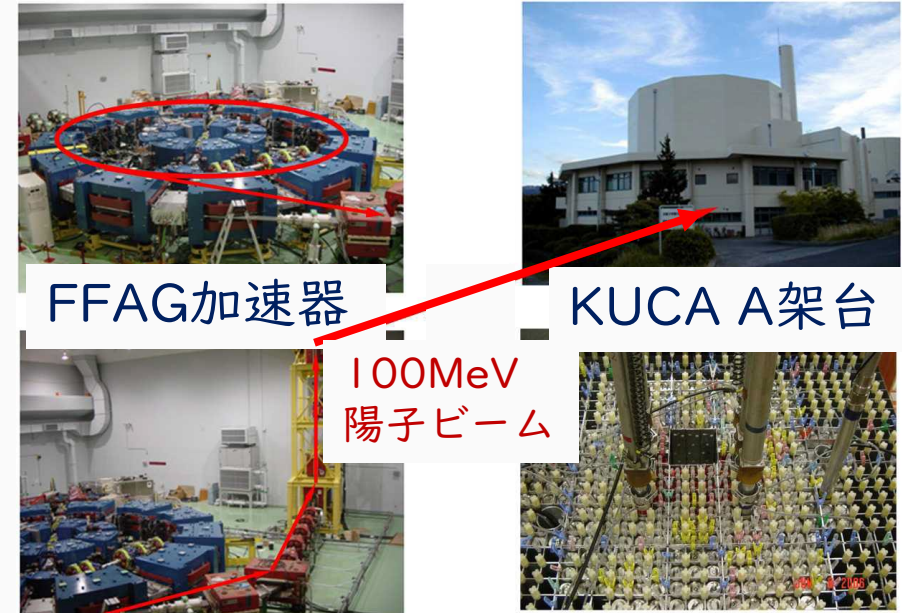
# 関連研究の国内外の状況

## 国内

本研究成果は、KUCAの未臨界炉物理実験における外部中性子源に関する詳細な情報を与えるもので、今後の詳細解析に資すると期待される

## 国外

SCK CENでは、欧州のADS実験炉MYRRHAプロジェクトにおいて100MeV陽子加速器の建設が進行中<sup>[1,2]</sup>であり、これに関連して、同センターでも同等の入射エネルギーの陽子ビームを用いた実験が注目されている



(KUCA: Kyoto University Critical Assembly)

[1] MYRRHA homepage, <https://myrrha.be>

[2] H. A. Abderrahim et al. "Accelerator Driven Subcritical Systems", Encyclopedia of Nuclear Energy, pp.191-202, 2021.

# 今後の課題と方向性

- 核反応モデルの再現性に課題があることが判明したため、J-PARCで二重微分断面積測定実験を実施している

明午他、「400-MeV - 3 GeV陽子におけるAl(p,xp)反応の二重微分断面積の測定2」日本原子力学会2023年春の年会

明午他、「400-MeV - 3 GeV陽子におけるAl(p,xp)反応の二重微分断面積の測定3」日本原子力学会2023年秋の大会

- SCK CENと共同で、DDXデータを用いた核反応モデルのベンチマーク解析を実施した

H. Iwamoto, et al. “Neutron-production double differential cross sections of Pb and Bi in proton-induced reactions near 100 MeV”, Nucl. Instr. Methods, Phys. Res. B, 544, 65107 (2023).

- 本実験結果とJ-PARCでの実験結果を活用して、核反応モデルのベンチマーク解析とモデルの高度化を実施する必要がある
- 中性子収量の不確実性がADS核設計に与える影響を、感度・不確かさ解析により明らかにする必要がある
- ADSの実現と核反応モデルのさらなる検証に向けて、実験の可能性を模索する必要がある