

J-PARC MLFにおける窒素ガス充填の 中性子ビームモニターの コミッショニングと運用

大下英敏 (KEK IMSS)

概要

本発表では、窒素ガス充填の中性子ビームモニター（ N_2 gas filled neutron beam monitor: N_2 -NBM）のコミッショニングと運用について紹介する。



本研究において、 N_2 -NBMを用いた中性子強度の定常的な絶対量測定を実現することができた。

2024年6月からは、実際の中性子実験における運用を開始を開始している。

目次

- 物質・生命科学実験施設 (MLF)
- 高強度中性子全散乱装置 (NOVA)
- 中性子検出の原理
- 開発のモチベーション
- 窒素ガス充填の中性子ビームモニター
- Geant4シミュレーション
- 実験セットアップ
- 動作電圧
- 出力電荷量分布
- 実測による中性子強度 $I(E)$
- 公開データによる中性子強度 $I_{\text{cal}}(E)$
- $I(E)$ と $I_{\text{cal}}(E)$ の比較
- 実際の中性子実験への適用
- まとめ

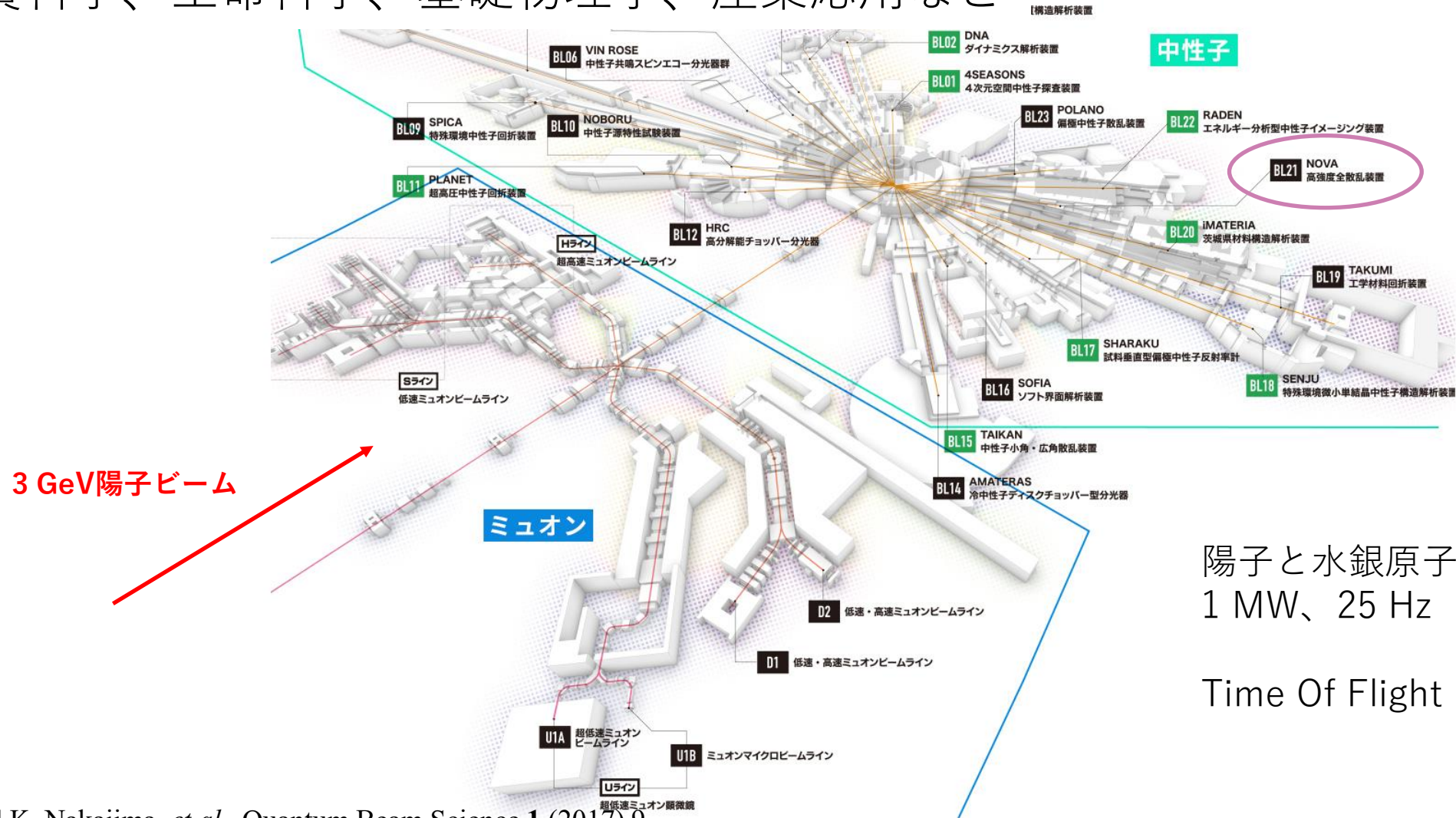
共同研究者：

T. Yokoo、N. Kaneko、S. Itoh、D. Ueta、T. Honda、
S. Torii、H. Endo、T. Seya、T. Otomo

物質・生命科学実験施設 (MLF)

世界最高強度を誇るパルス中性子源の1つ

物質科学、生命科学、基礎物理学、産業応用など

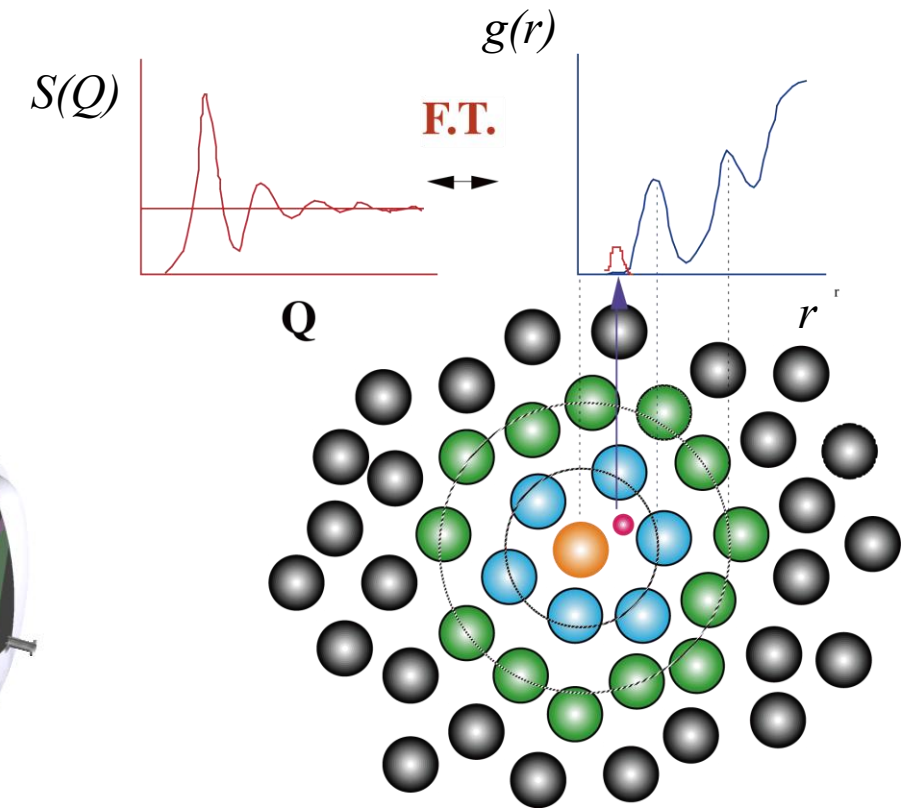
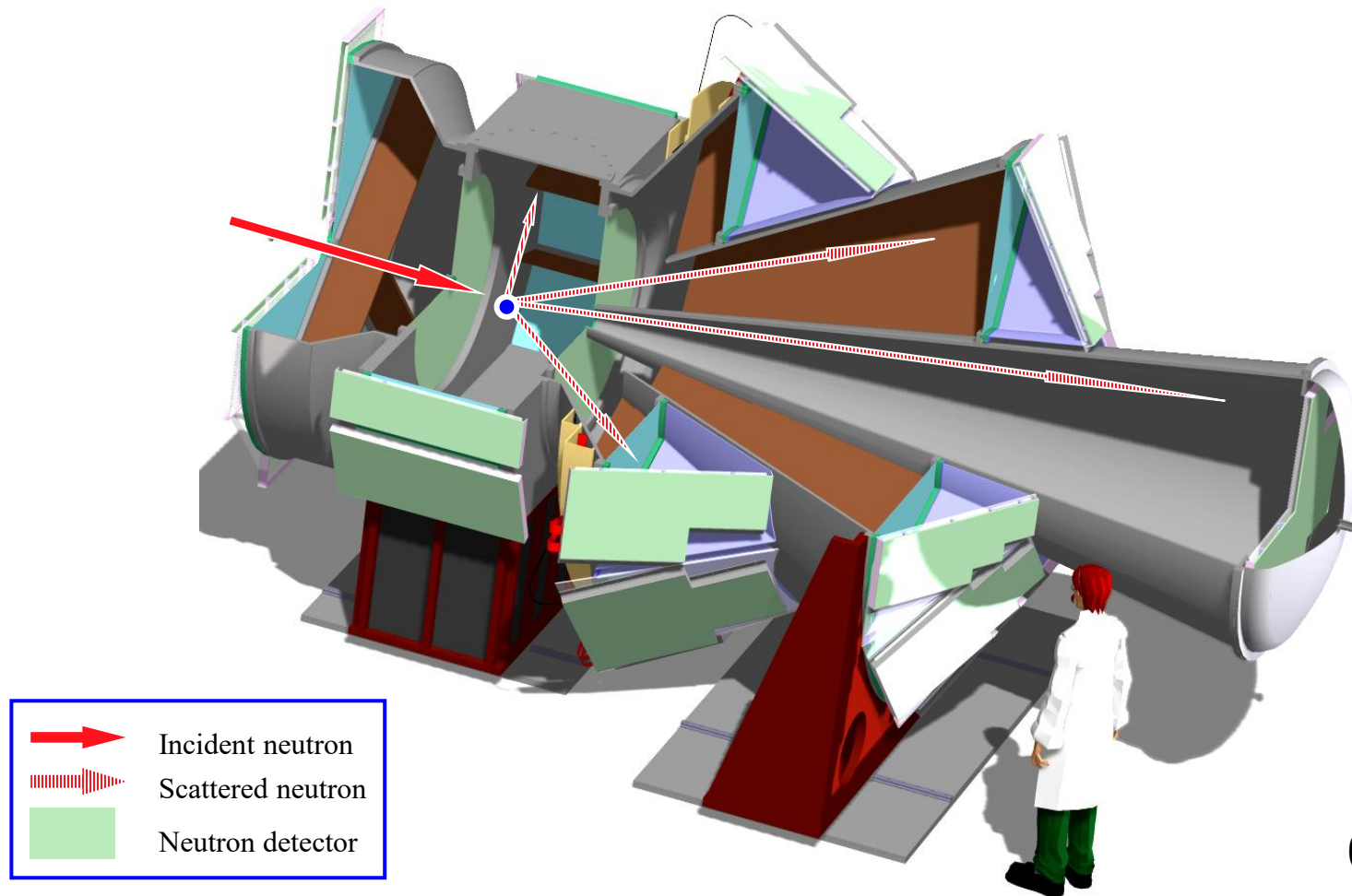


陽子と水銀原子核の核破砕反応
1 MW、25 Hz

Time Of Flight (TOF) 法の実施

高強度中性子全散乱装置 (NOVA)

全散乱法による液体、ガラス、非晶質の構造解析



中性子の利用範囲：
 $0.12 \sim 8.3 \text{ \AA}$ ($0.0012 \sim 5.68 \text{ eV}$)

中性子検出の原理

荷電粒子を放出する中性子吸収反応を利用
これらの元素を含む材料は中性子コンバータと呼ばれる

Reaction	Q-value	Particle	Energy	Particle	Energy
${}^3\text{He}(\text{n},\text{p}){}^3\text{H}$	0.77 MeV	p	0.57 MeV	${}^3\text{H}$	0.19 MeV
${}^6\text{Li}(\text{n},\alpha){}^3\text{H}$	4.79 MeV	α	2.05 MeV	${}^3\text{H}$	2.74 MeV
${}^{10}\text{B}(\text{n},\alpha){}^7\text{Li}+\gamma$ (0.48 MeV) 93%	2.3 MeV	α	1.47 MeV	${}^7\text{Li}$	0.83 MeV
${}^{10}\text{B}(\text{n},\alpha){}^7\text{Li}$ 7%	2.79 MeV	α	1.77 MeV	${}^7\text{Li}$	1.01 MeV
${}^{14}\text{N}(\text{n},\text{p}){}^{14}\text{C}$	0.62 MeV	p	0.58 MeV	${}^{14}\text{C}$	0.04 MeV
${}^{157}\text{Gd}(\text{n},\gamma){}^{158}\text{Gd}+\text{e}^-$	≤ 0.182 MeV	Conversion electron 0.07~0.182 MeV			
${}^{235}\text{U}(\text{n},\text{Lfr})\text{Hfr}$	~ 100 MeV	Light fragment (Lfr)	≤ 80 MeV	Heavy fragment (Hfr)	≤ 60 MeV

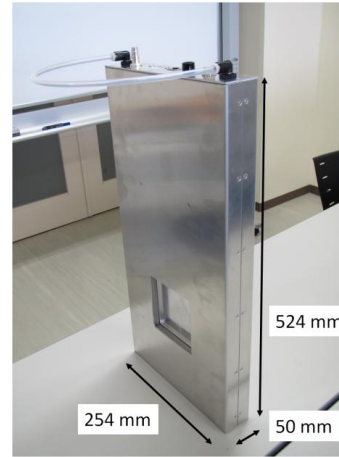
開発のモチベーション

- 入射中性子の絶対量を監視、診断するビームモニターが無い
従来のNBM：3-ヘリウムガス充填の中性子ビームモニター (^3He -NBM)、
GEMを用いた中性子ビームモニター(nGEM)



【 ^3He -NBM】

検出器タイプ：比例計数管
中性子検出反応： $^3\text{He}(n,p)^3\text{H}$ 反応
熱中性子感度： $10^{-5} \sim 10^{-3}$
大強度中性子環境下での動作不可
新規の入手不可



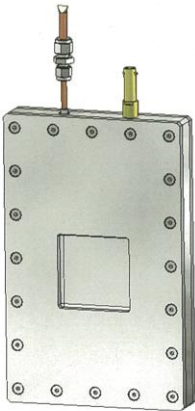
【nGEM】

検出器タイプ：被覆検出器
中性子検出反応： $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ 反応
熱中性子感度： $10^{-4} \sim 10^{-2}$
高計数過ぎる、放射線損傷の可能性
新規の入手不可

- 中性子絶対量の測定は、金箔 + ^3He -NBMの測定から導出
即時性の欠如、継続的な監視には向かない
- 中性子実験への適用として、規格化パラメータの提供
現在は、多くのビームラインで入射陽子数を採用

窒素ガス充填の中性子ビームモニター

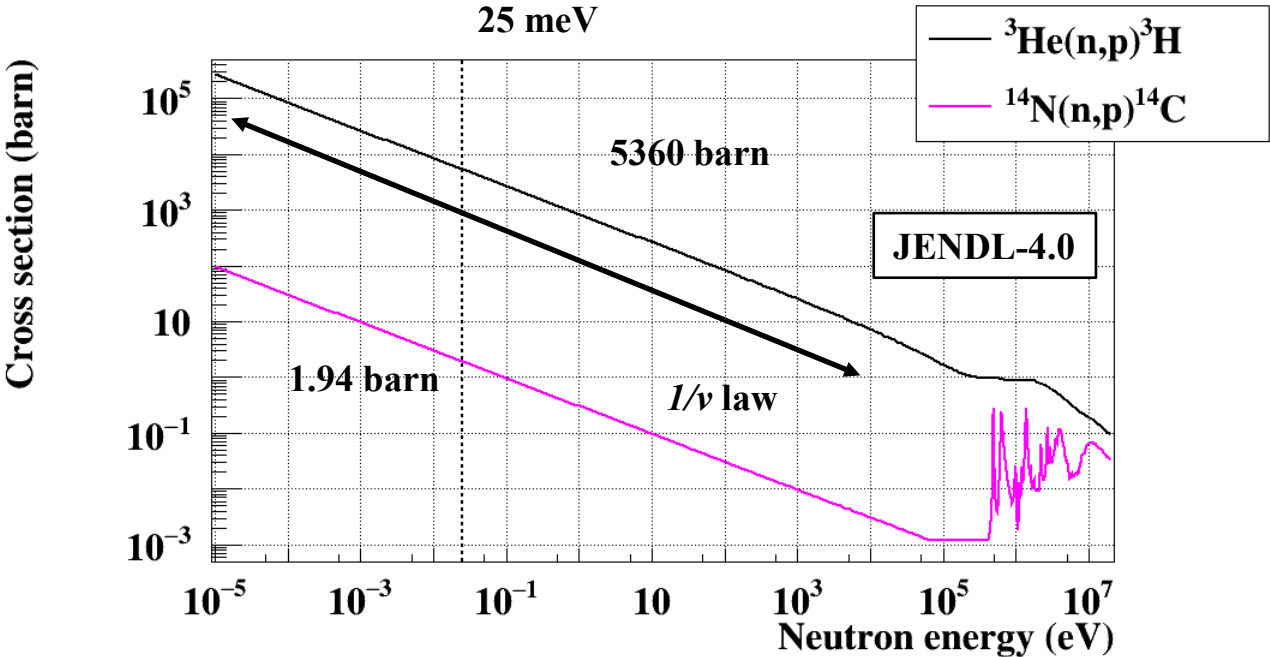
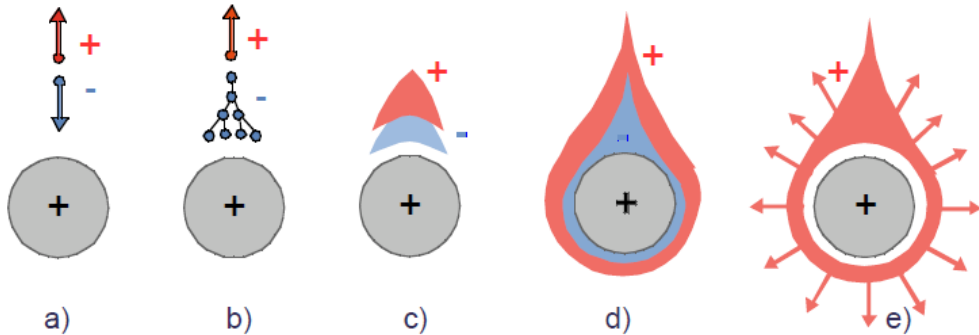
キヤノン電子管デバイスから購入可能
中性子検出＋シグナル生成



[Gaseous radiation detector] F. Sauli, CERN 77-09 (1997).

CANON E68953	
中性子検出反応	$^{14}\text{N}(\text{n},\text{p})^{14}\text{C}$
Q値	0.62 MeV
チェンバーガス	Ar/N ₂ (786 Torr/50 Torr)
ガス有感領域、ガス層の厚さ	65 mm×65 mm, 12 mm t
構造	Multi Wire Proportional Chamber
外寸	250 mm×160 mm×32 mm
位置検出	×
熱中性子感度	6.73×10^{-6}
メーカー仕様電圧	1400 V

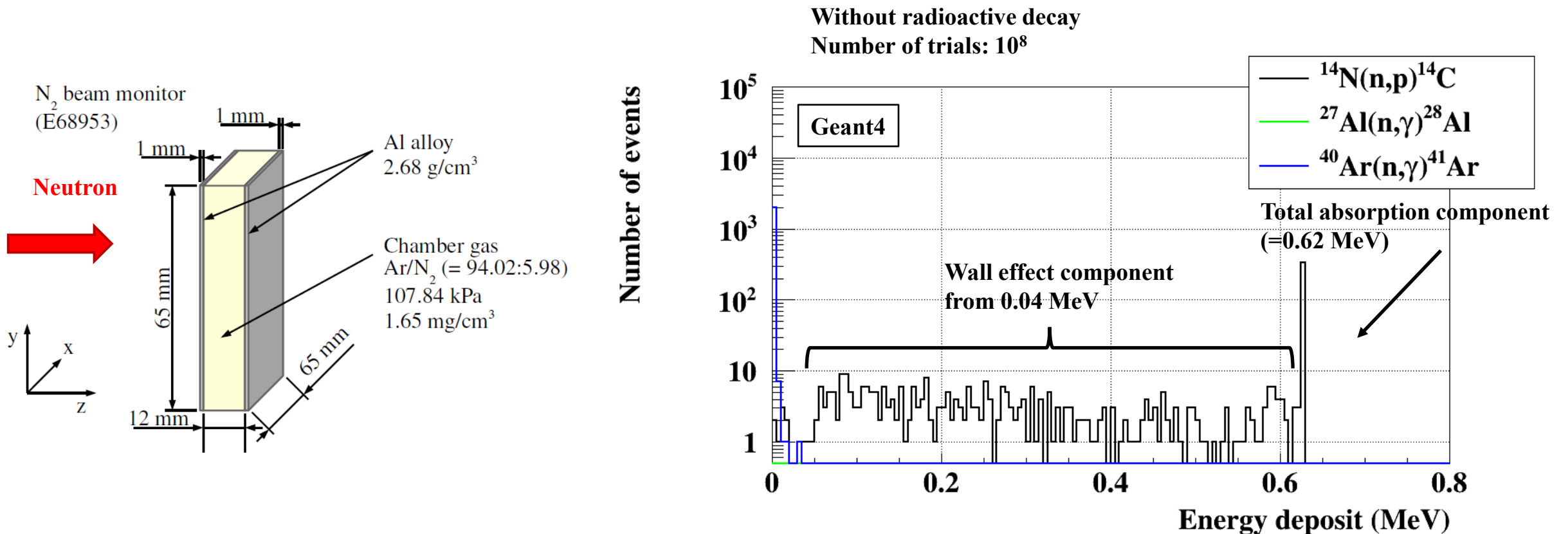
Gaseous radiation detector



[JENDL-4.0] K. Shibata, *et al.*, J. Nucl. Sci. Technol. **48**(1) (2011) 1, [CANON ELECTRON TUBES & DEVICES] <https://etd.canon/en/index.html>.

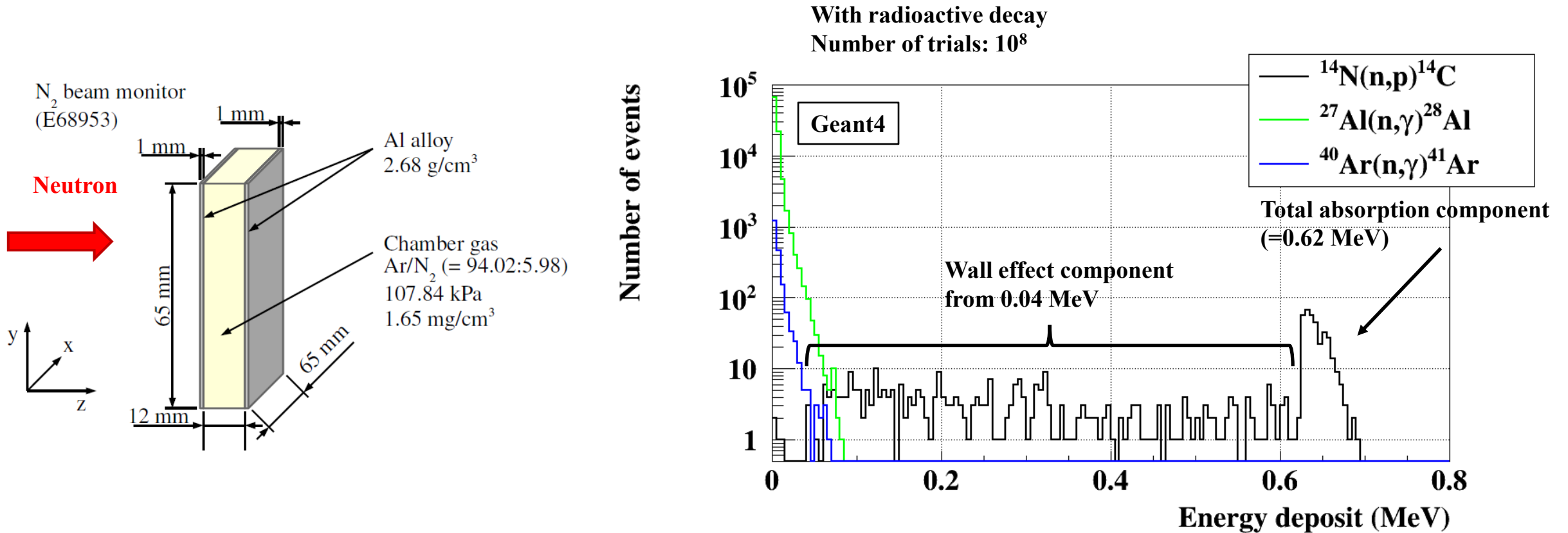
Geant4シミュレーション

物質中を通過する粒子の物理相互作用をシミュレーションするためのツールキット
N₂-NBMのガス有感領域におけるエネルギー損失量を導出
イベント数を計数することによって中性子感度を導出



Geant4シミュレーション

放射性崩壊プロセス有のシミュレーションも可能



バックグラウンドは ^{28}Al の β 崩壊に由来する β 線

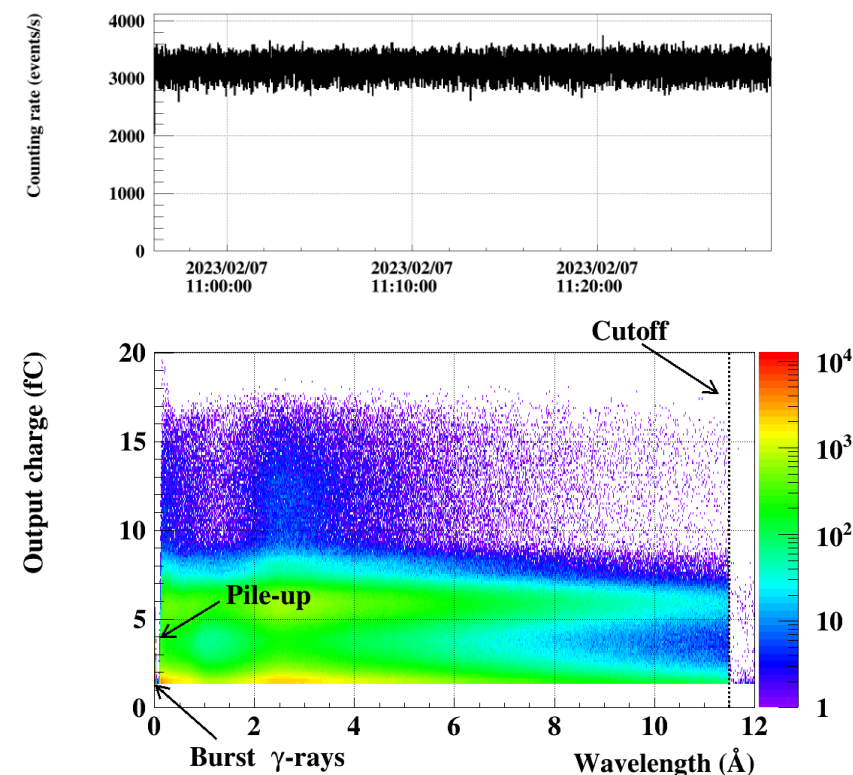
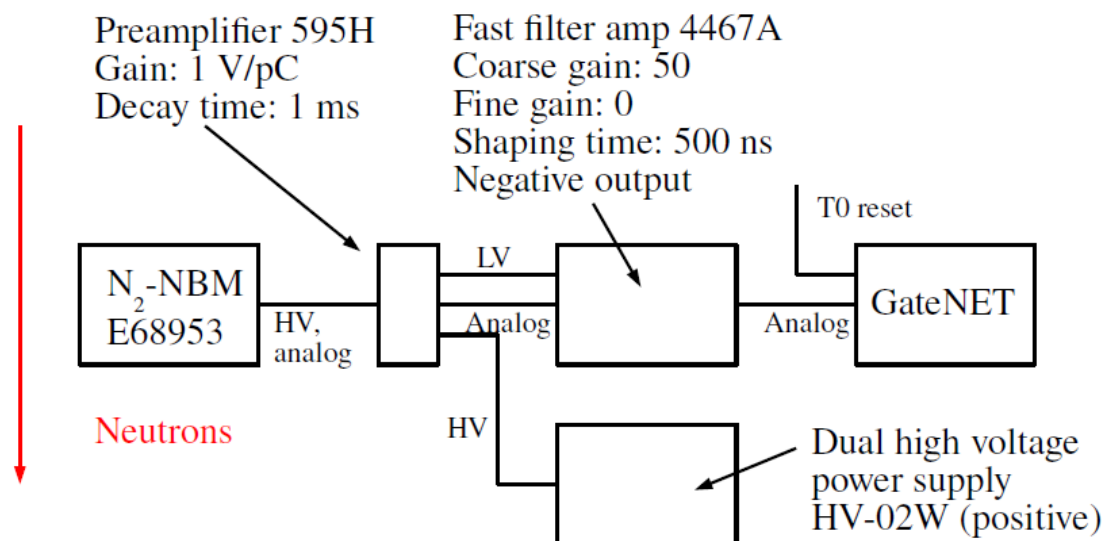
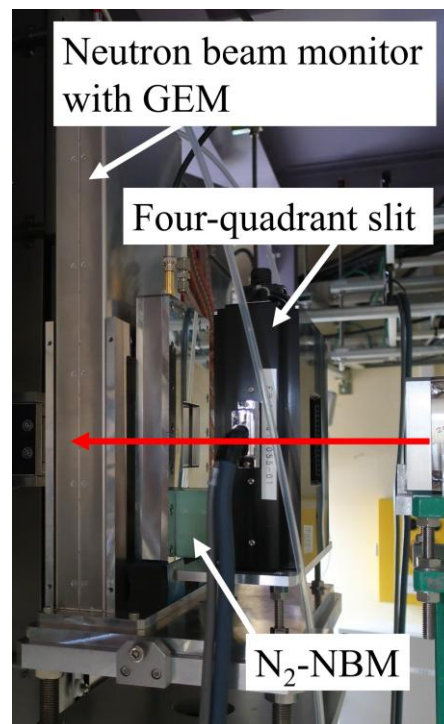
壁効果が低いエネルギー領域まで広がっているので、中性子絶対量の測定は困難

実験セッアップ

N₂-NBMはNOVA真空槽の上流側に設置

読み出し回路、データ収集ソフトウェアは既存のシステムと同一

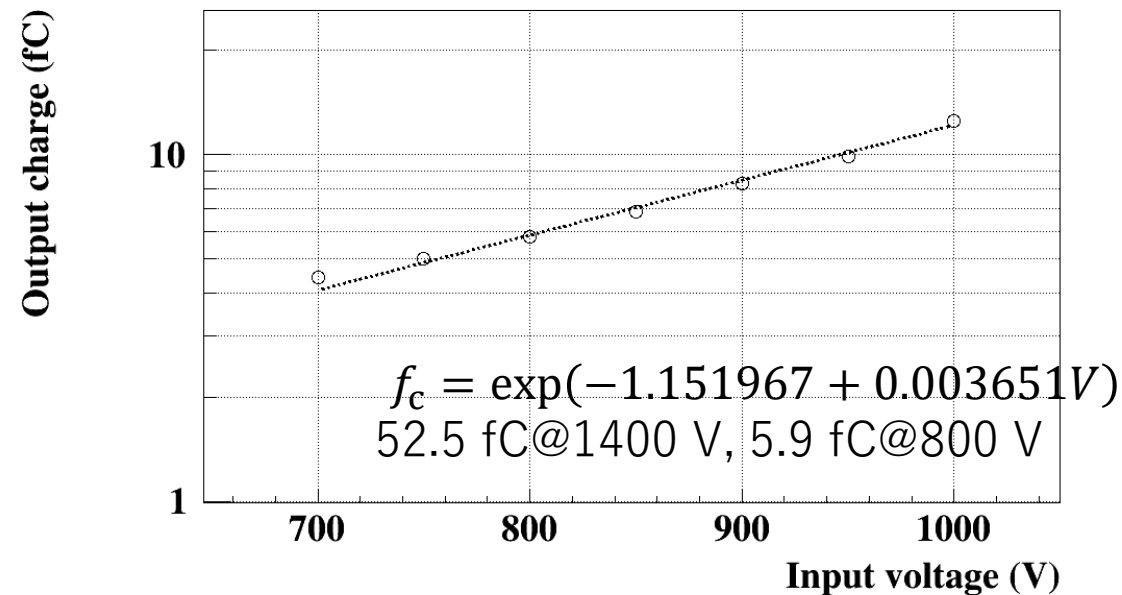
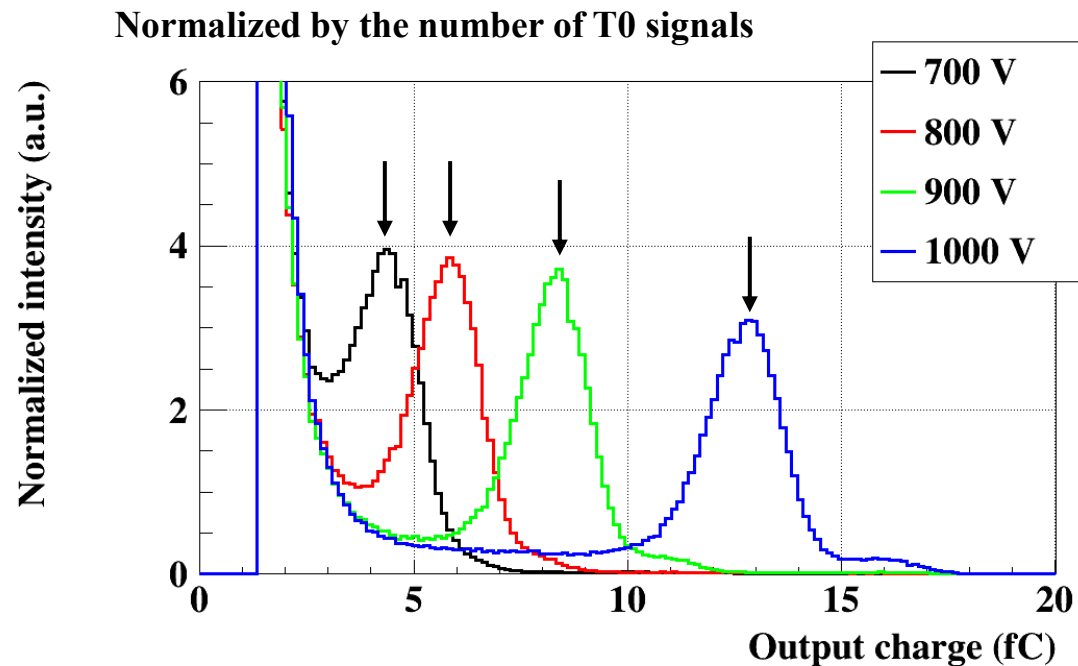
⇒ TOF値、出力電荷量（パルス波高値から換算）の測定



Beam power: 793 kW、 T0 chopper: 25 Hz mode、 L_1 : 13.76 m、 Beam size@nGEM: 3.44×3.44 cm

動作電圧

ガス放射線検出器における比例モードでの動作を確認
放射線損傷を軽減するため、動作電圧は800 Vとした

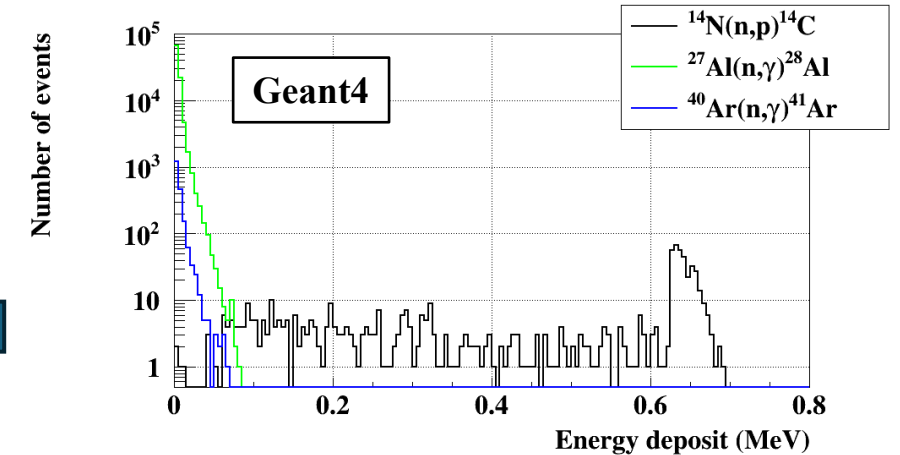
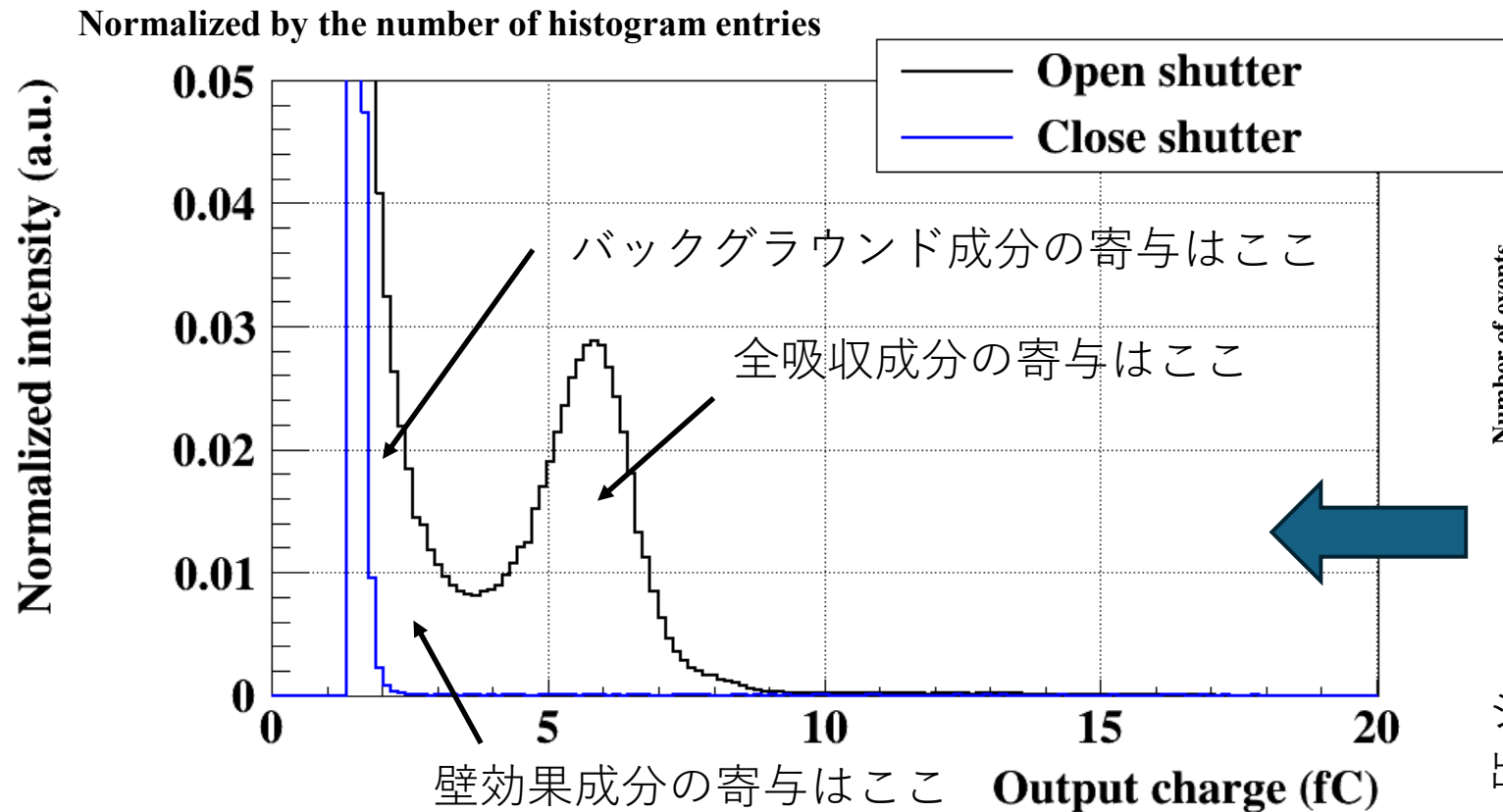


$$G = \frac{(\text{Output charge})}{\frac{(\text{Deposited energy})}{W} \times 1.602 \times 10^{-19}} = \frac{5.9 \times 10^{-15}}{\frac{620000}{30} \times 1.602 \times 10^{-19}} \sim 1.8$$

十分に低いガスゲインでの動作であるため、検出器の長寿命化が期待できる

出力電荷量分布（１）

ビームシャッター開閉の測定により中性子ヒットを確認

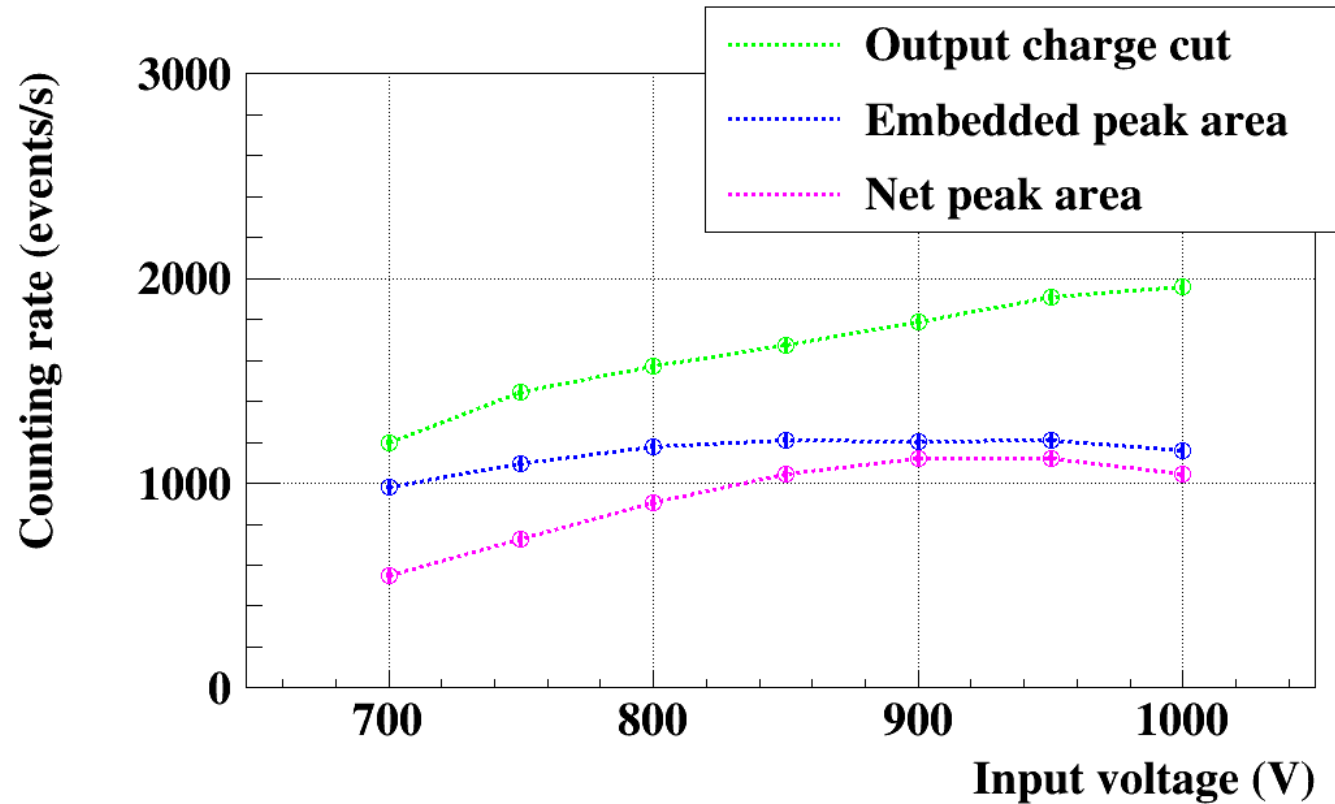


シグナル生成過程を経て畳み込まれると出力電荷量分布となる

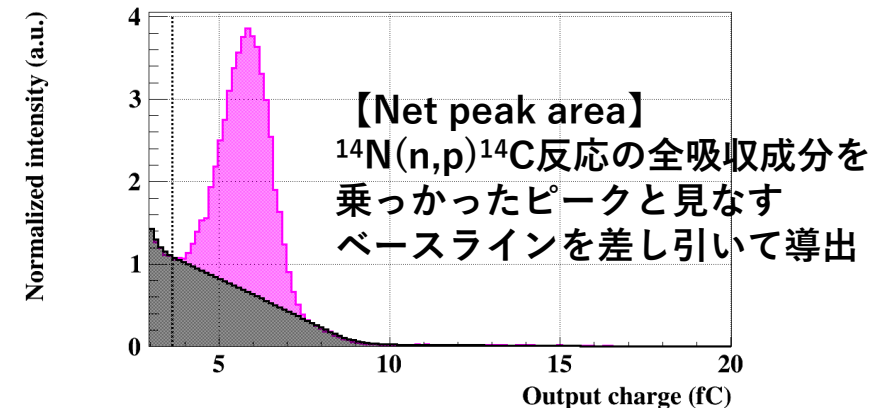
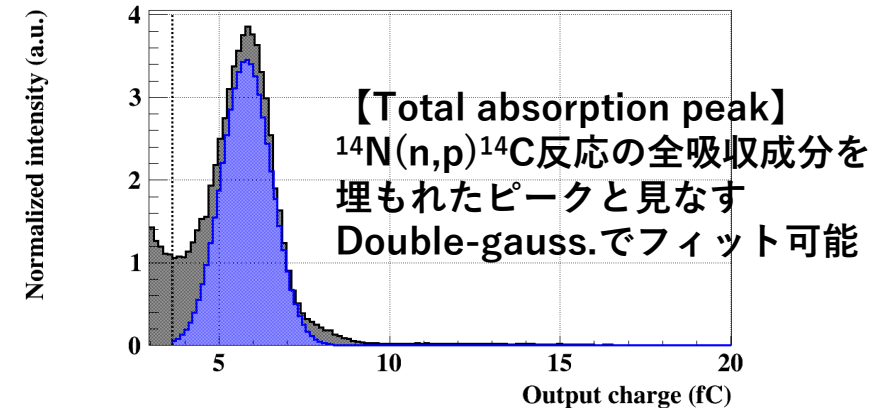
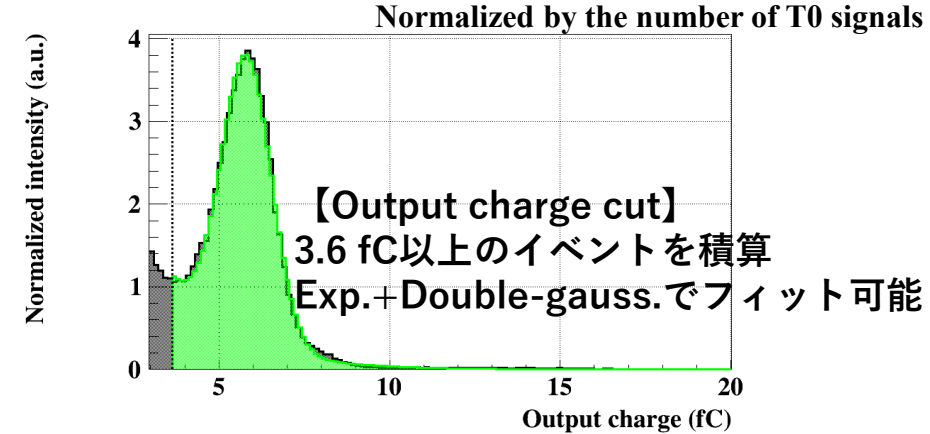
中性子絶対量を導出するため、定量性をもつ成分の抽出が必要
本研究では、 $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ 反応の全吸収成分を抽出する

出力電荷量分布 (2)

$^{14}\text{N}(\text{n},\text{p})^{14}\text{C}$ 反応の全吸収成分を抽出する方法を検討



$^{14}\text{N}(\text{n},\text{p})^{14}\text{C}$ 反応の全吸収成分を埋もれたピークと見なすと検出器動作条件の変化に対しても耐性がある
⇒中性子強度によって妥当性を評価する
⇒抽出のための補正項は、計数率の比を採用



実測による中性子強度 $I(E)$

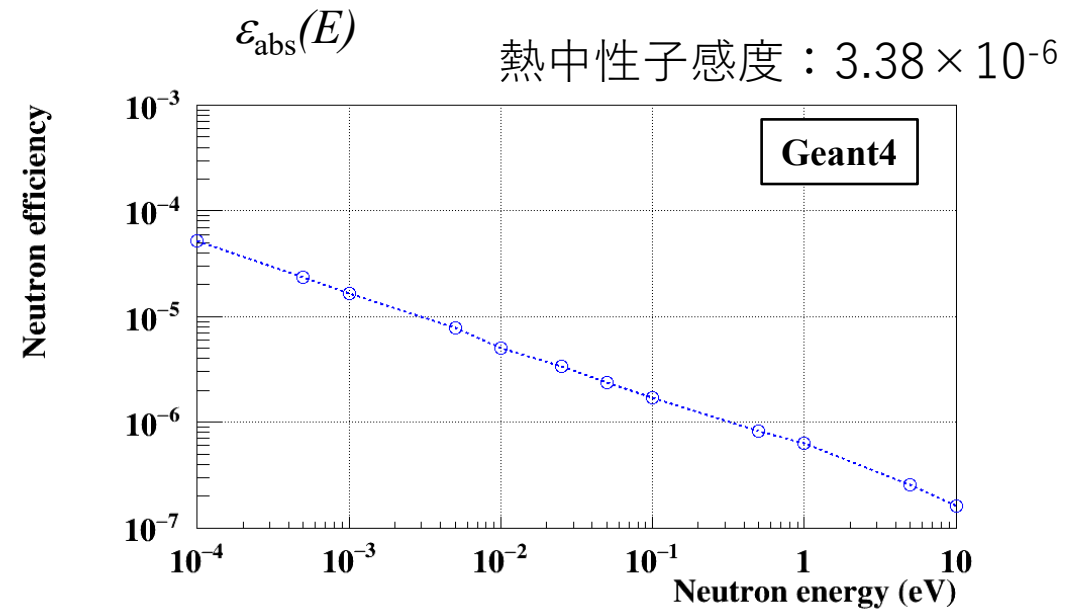
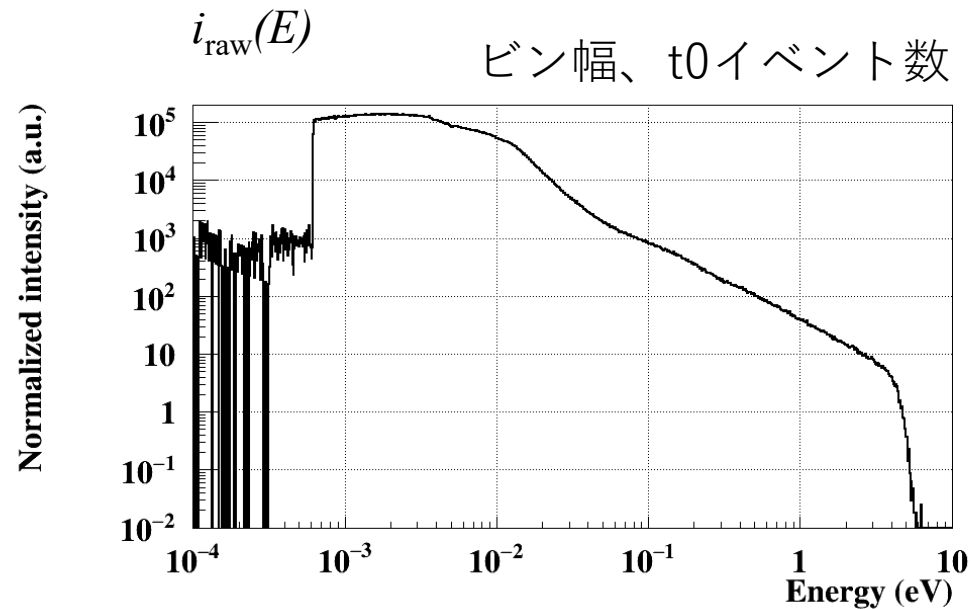
$$I(E) = \frac{i_{\text{raw}}(E)k_1k_2}{\varepsilon_{\text{abs}}(E)}$$

$i_{\text{raw}}(E)$: N₂-NBMの測定データから得られた入射中性子エネルギー分布

$\varepsilon_{\text{abs}}(E)$: Geant4によって得られたN₂-NBMの中性子感度 (全吸収成分)

k_1 : J-PARC加速器ビームパワーの補正項 (1 MW/793 kW=1.26)

k_2 : $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ 反応の全吸収成分を抽出するための補正項 (=0.75)



公開データによる中性子強度 $I_{\text{cal}}(E)$

$$I_{\text{cal}}(E) = i_{\text{cal}}(E)Tr_{\text{total}}(E)p_1p_2$$

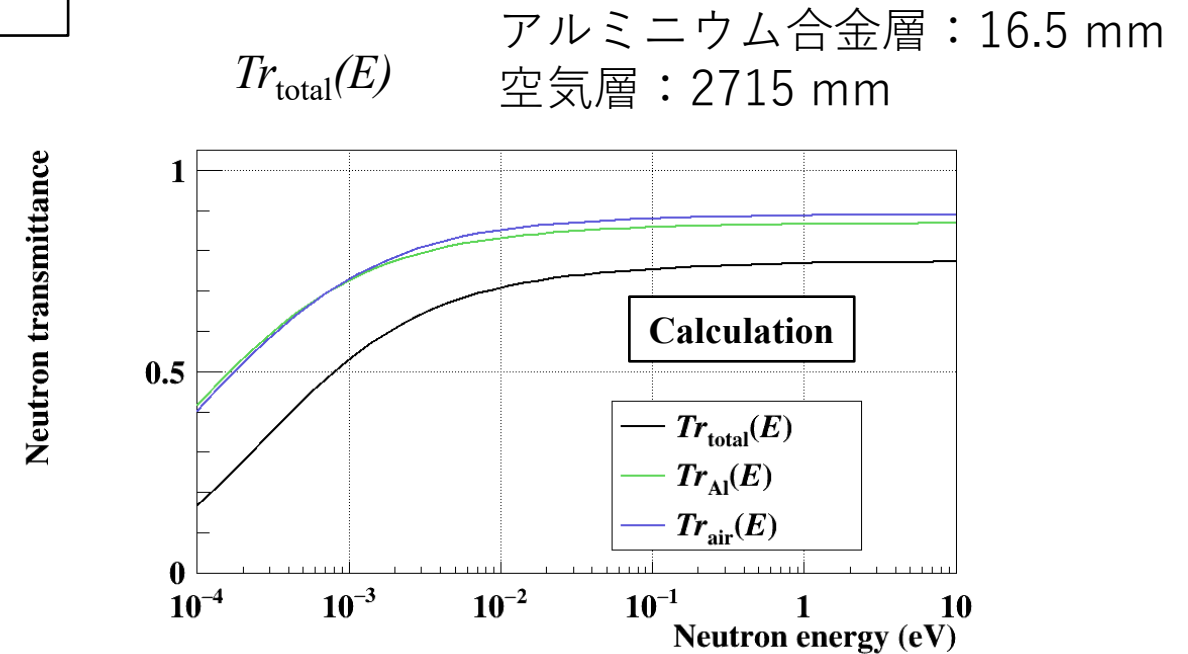
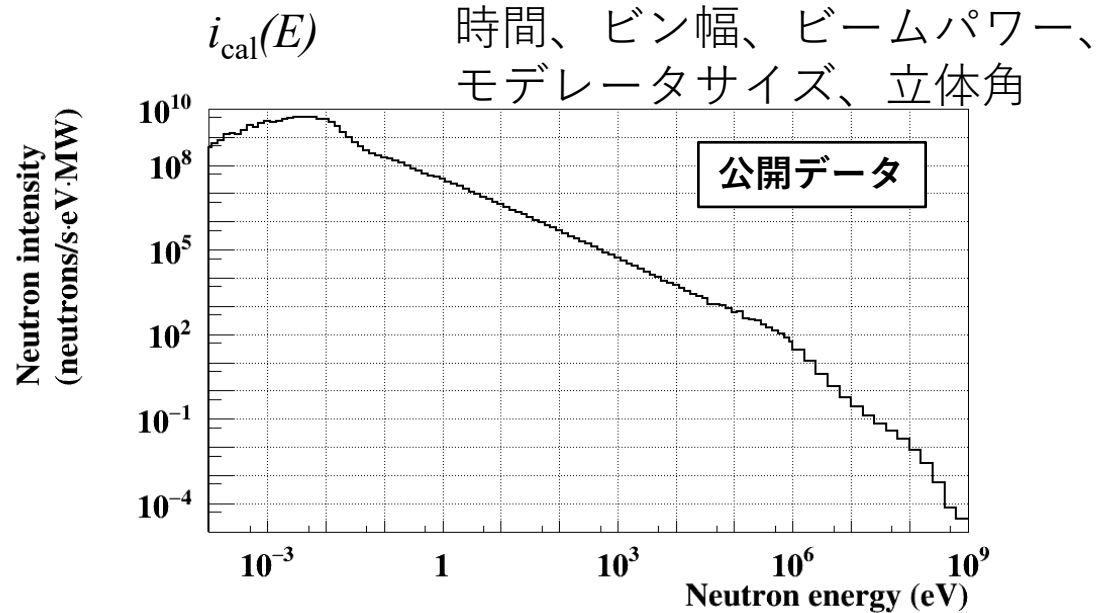
$i_{\text{cal}}(E)$: MLF（施設側）が公開するデータに基づく中性子強度

$Tr_{\text{total}}(E)$: NOVAのビームライン構造物による中性子透過率

p_1 : 軽水を用いた中性子モデレータの効果による補正項 (=0.82)

p_2 : ミュオン標的における陽子ビーム損失の補正項 (=0.94)

公開データでは中性子ターゲットに陽子ビームを入射させた核破砕反応のPHITSシミュレーションをおこなっている



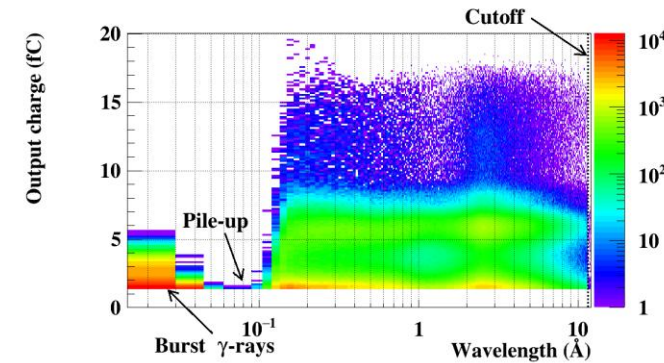
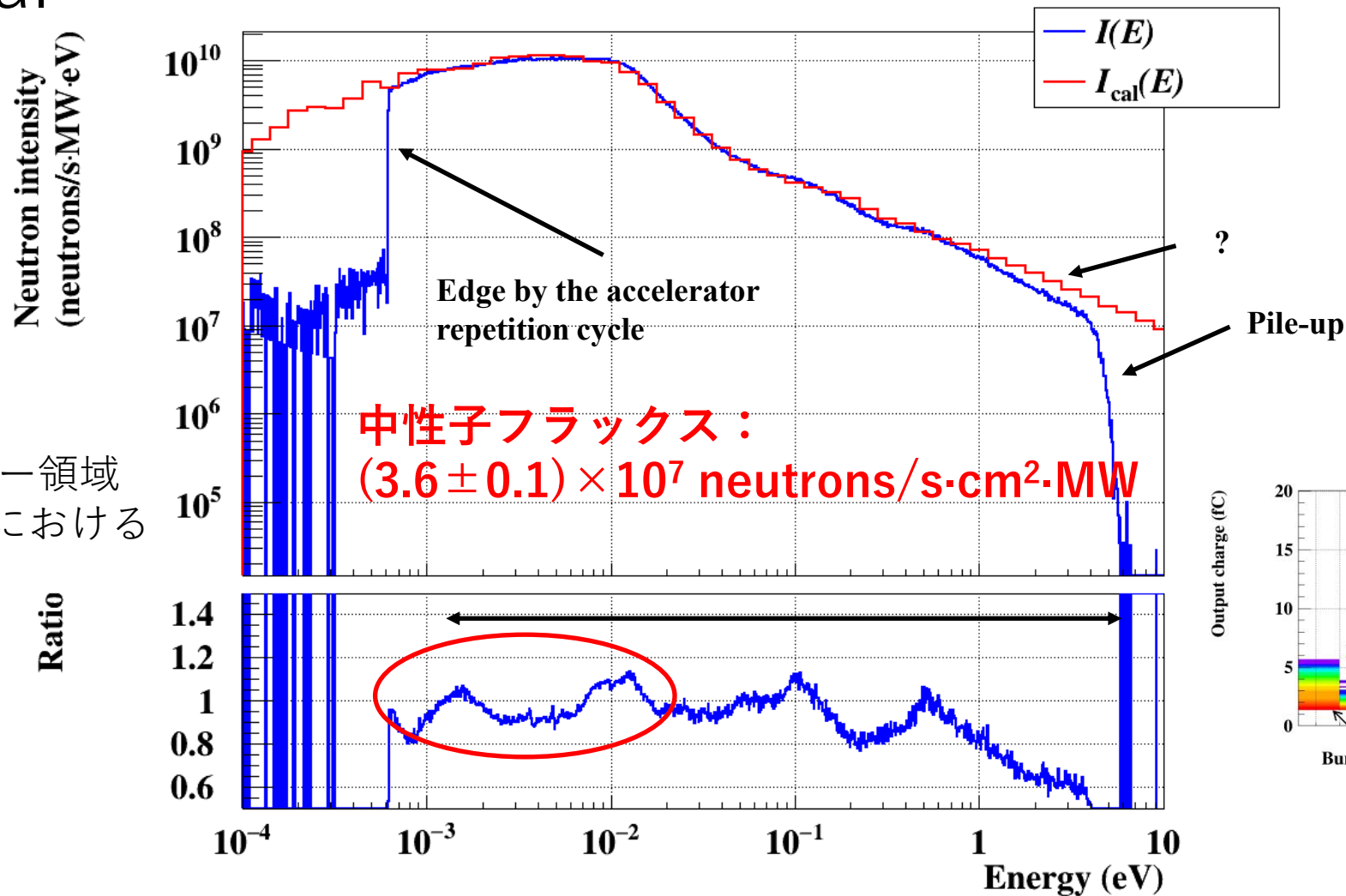
[公開データ] Web page of the MLF beamline specifications, <https://j-parc.jp/researcher/MatLife/en/instrumentation/ns3.html>.

[PHITS] T. Sato, *et al.*, J. Nucl. Sci. Technol. **61** (2024) 127.

$I(E)$ と $I_{\text{cal}}(E)$ の比較

NOVA解析
(0.0012~5.68 eV)

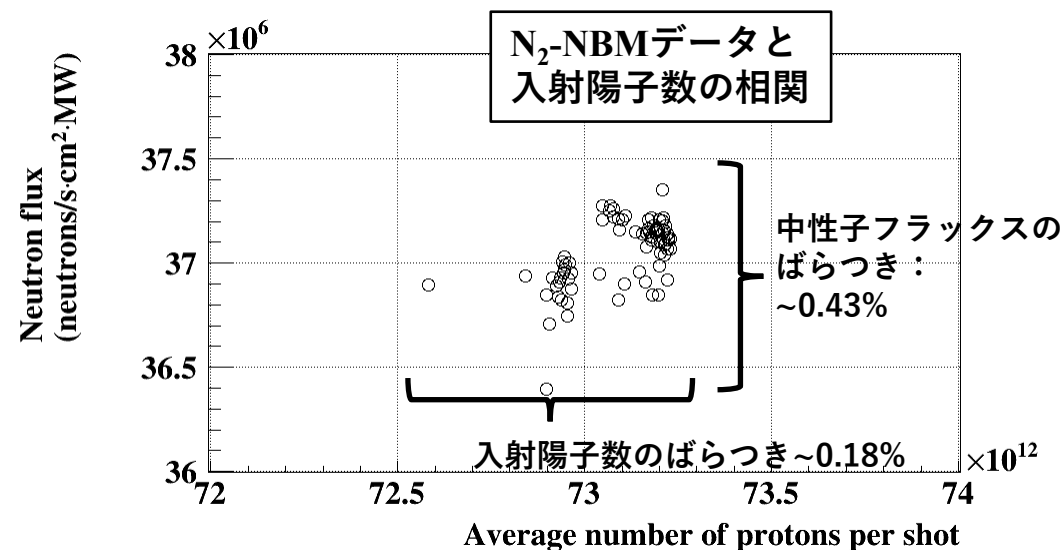
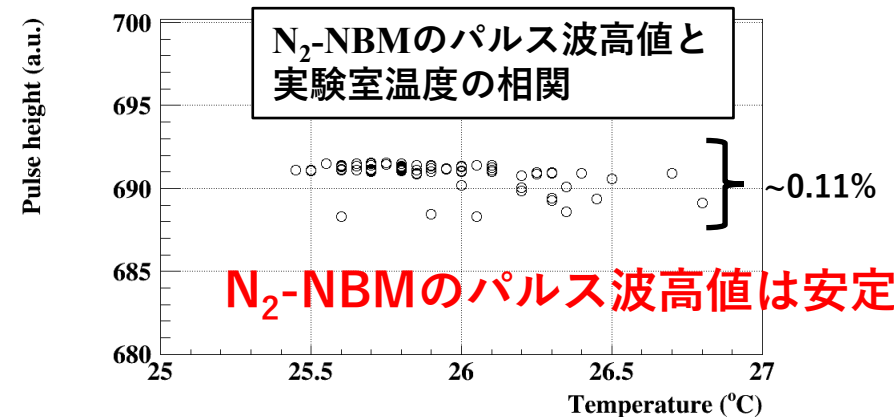
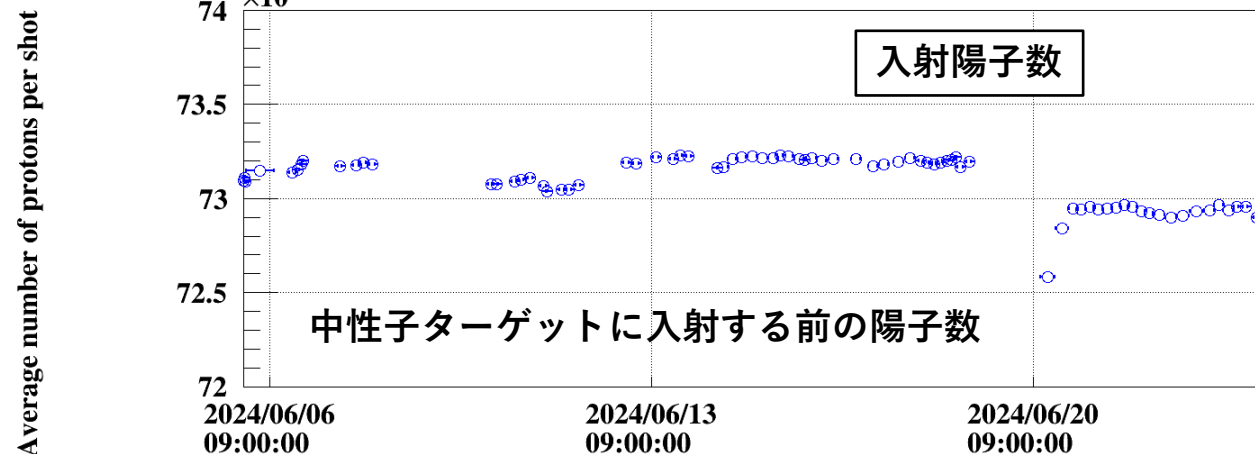
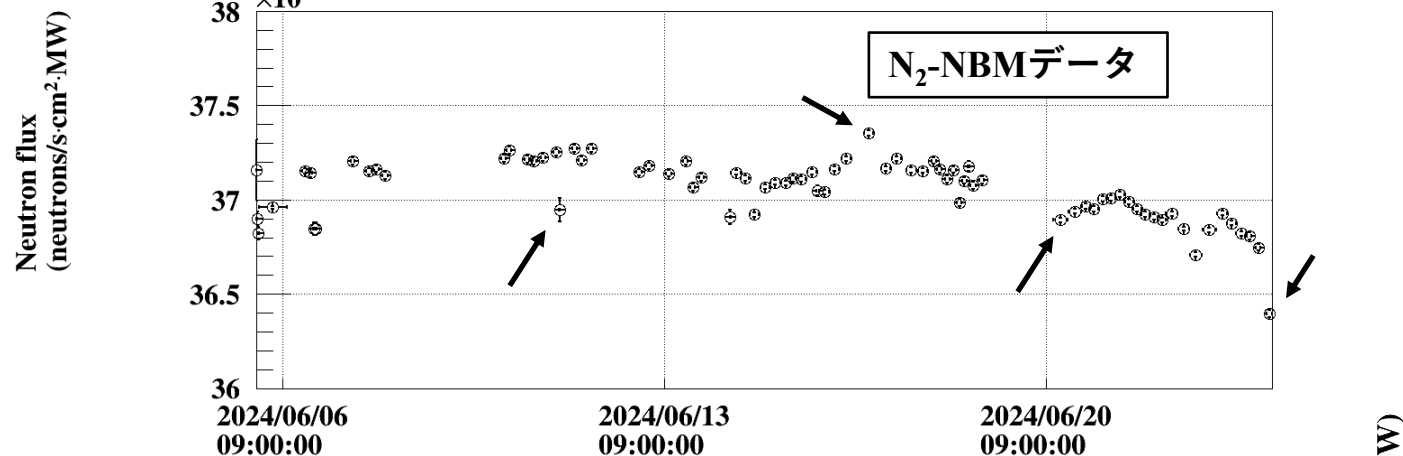
強度の強いエネルギー領域
(0.6 meV~2 eV) における
 $I(E)$ と $I_{\text{cal}}(E)$ の違い：
-20~14%



$I(E)$ と $I_{\text{cal}}(E)$ は良く一致しており、出力電荷量分布から $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ 反応の全吸収成分を抽出する考え方が正しいことを示している
中性子フラックスの値も先行研究（金箔やnGEMでの測定）と一致

実際の中性子実験への適用

NOVAに輸送されてきた中性子フラックス



規格化パラメータとして、N₂-NBMデータと入射陽子数は安定している
今後、さらに長期運用において評価を継続する

まとめ

MLFのNOVAにおいて N_2 -NBMのコミッショニングをおこない、
2024年6月から運用を開始した。

- MLFにおける中性子絶対量の測定を実現するために、
- (0) Geant4シミュレーションの結果と合わせて中性子絶対量を導出した
 - (1) $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ 反応の全反応ではなく、全吸収成分を計数した
- また、この方法は検出器のゲイン変動にロバストである
- (2) 読み出し回路特性の選択によって検出器の長寿命化が期待できる

本研究はJSPS科研費JP20H04461の助成を受けて実施されました。
また、各ビームラインにおける中性子照射試験はKEK IMSSの中性子共同利用S1型実験課題
(2019S05、2019S06、2019S09) としておこなわれました。

ご清聴ありがとうございました