

京大電子加速器中性子イメージング ビームラインのシミュレーション

次世代原子炉燃料の健全評価のための非破壊分析技術の開発

Development of **Non**destructive **M**ethods **A**dopted for **I**ntegrity Test of **N**ext Generation Nuclear Fuels

名大工

(産学連携) 鬼柳善明、原田あすか

(総合エネルギー工学) 渡辺賢一、瓜谷章

京大炉

高橋佳之、佐野忠史、堀順一、中島健

内容

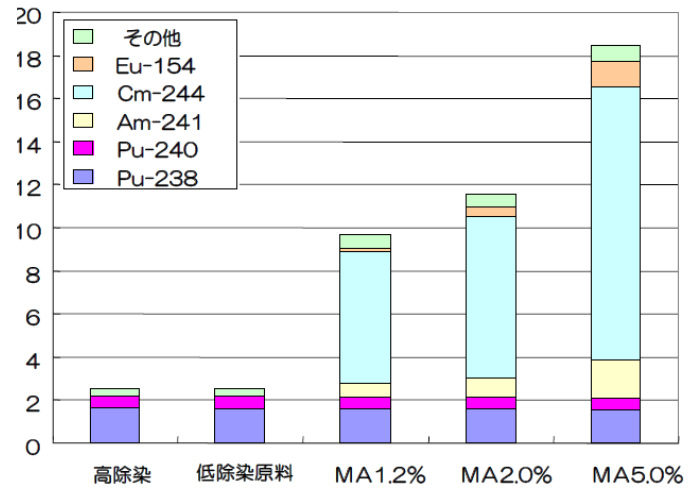
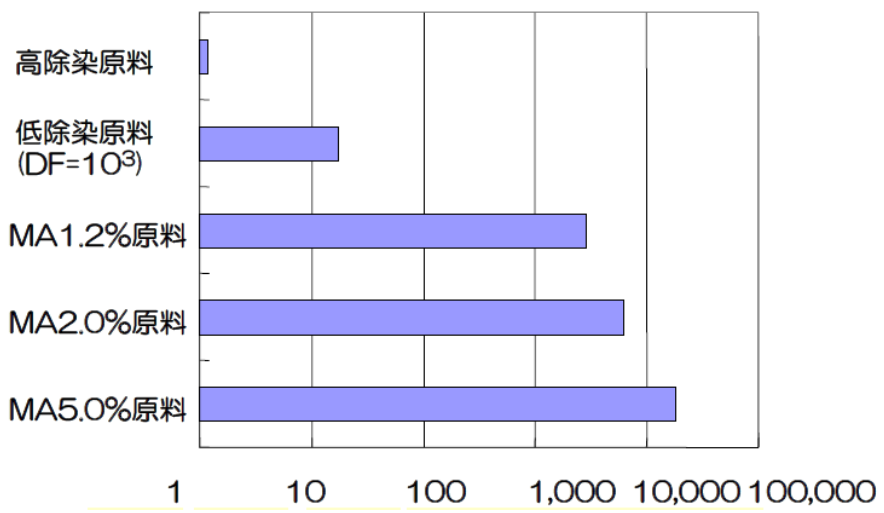
KURRI-LINAC イメージングビームライン

- N-DeMain背景
- 減速材の設計
- 鉛コリメータ
- 中性子放出時間分布
- まとめ

研究開発の背景

N-DeMAIN

長期的なエネルギー安定供給能力に加えて、原子力発電から発生する高レベル放射性廃棄物による環境負荷を低減するシステムとして、**MA含有TRU燃料を用いた高速炉システム**が有望視されている



線量率 現行燃料の10⁴倍

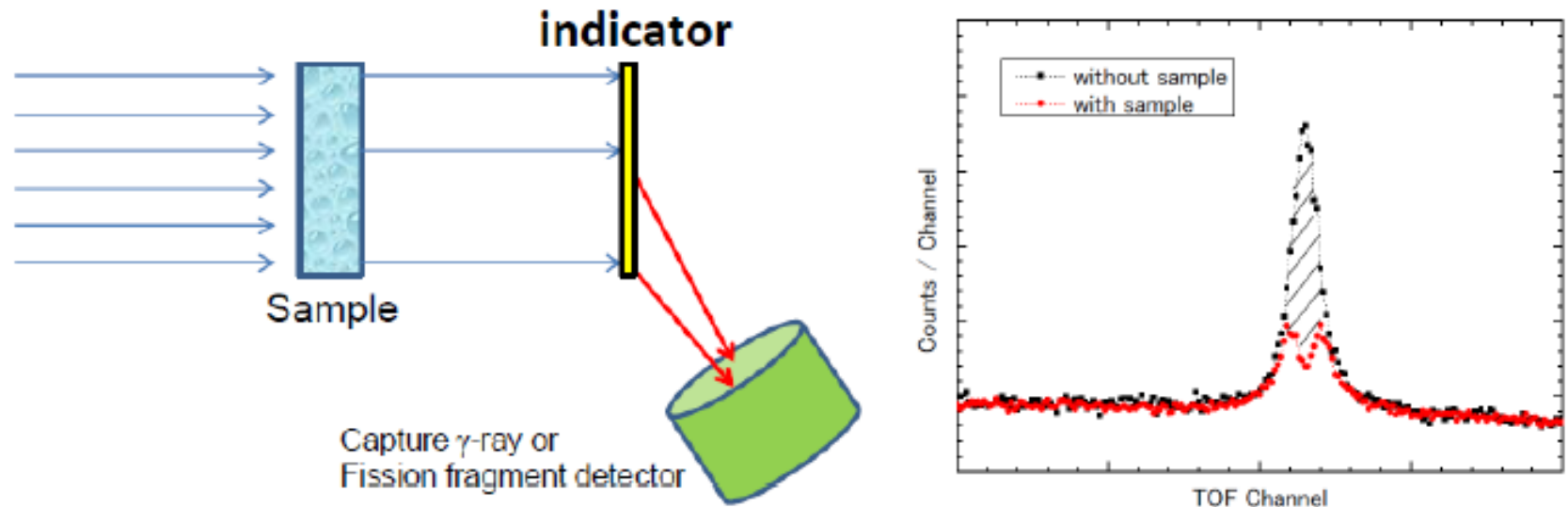
崩壊熱 現行燃料の約7倍

出典: 敦賀原子力夏の学校「核燃料サイクル～FBRサイクル～」平成19年9月10日～14日、講演資料、滑川卓志



安全性の高いシステムの実用化を目指すためには**高放射能を有する燃料に対する熱的特性を含めた健全性評価**が不可欠である

Self-indication法による核種定量技術の高精度化



測定対象核種から成るindicatorを試料下流側に配置

Indicatorからの反応生成物を測定することによって間接的に透過中性子を測定

(特徴)

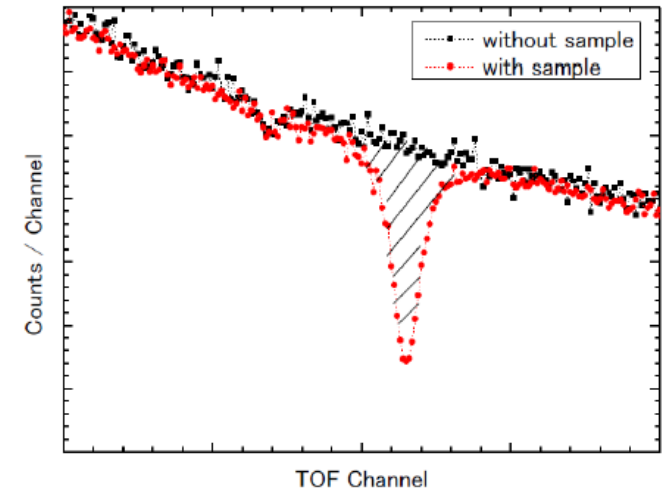
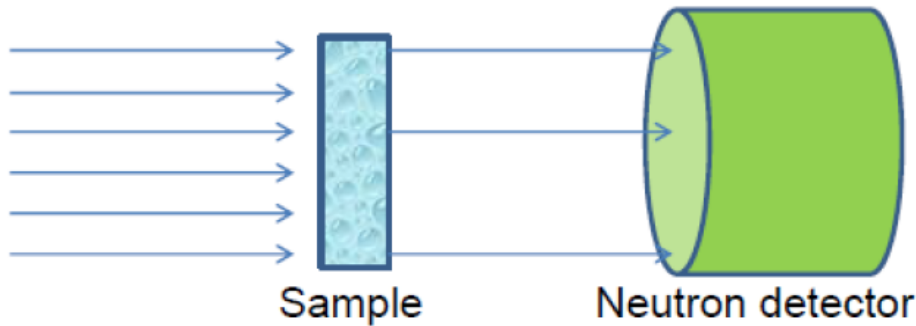
- ・試料自身の放射能の影響 無
- ・測定対象核種にのみ高感度測定が可能
 - 混在試料中の特定核種の共鳴吸収の同定が容易

パルス中性子をプローブとした非破壊分析手法

N-DeMAIN

Neutron Resonance Transmission Analysis (NRTA)

共鳴吸収による透過中性子の変化量から定量する方法



- ・ 共鳴エネルギーは核種固有の値 → 核種の同定
- ・ 共鳴吸収量は原子数厚さに依存 → 核種の定量
- ・ ドップラ効果による共鳴幅の拡がり → 温度測定が可能
- ・ 中性子透過法によって
2次元画像検出器使用可 → イメージングが容易

必要な装置: パルス中性子源、TOF測定、2次元画像検出器、データ処理装置

中性子源の高性能化

熱外中性子領域の強度を高くする。
分解能は共鳴実験が可能なものとする。

京大炉のビームライン配置

既設 パックマン減速材

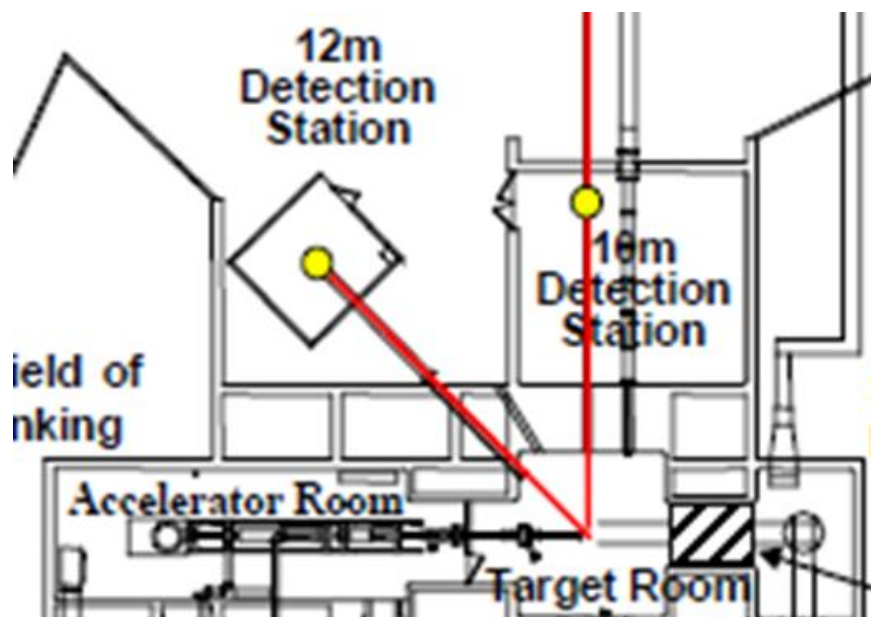
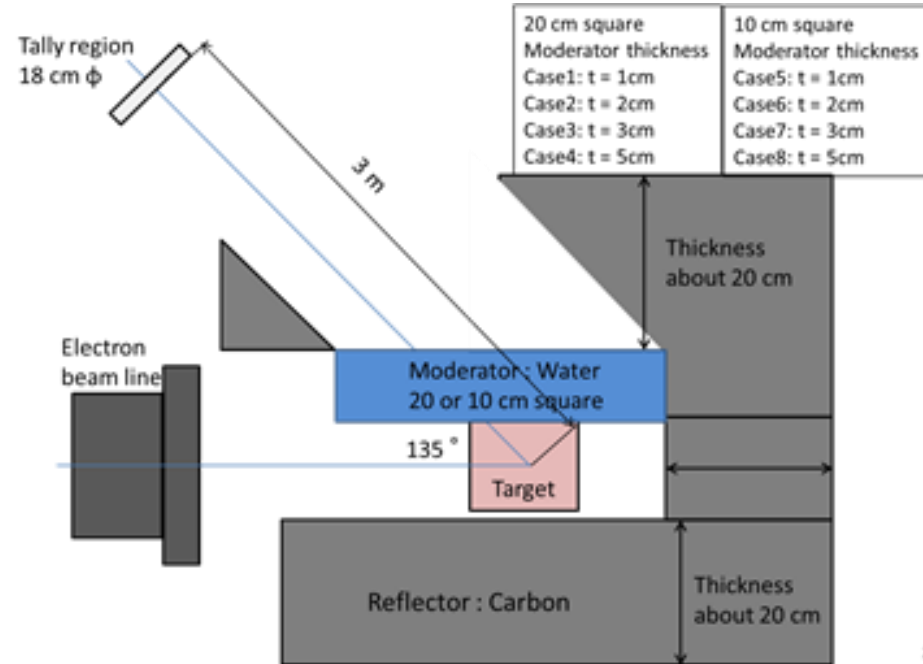
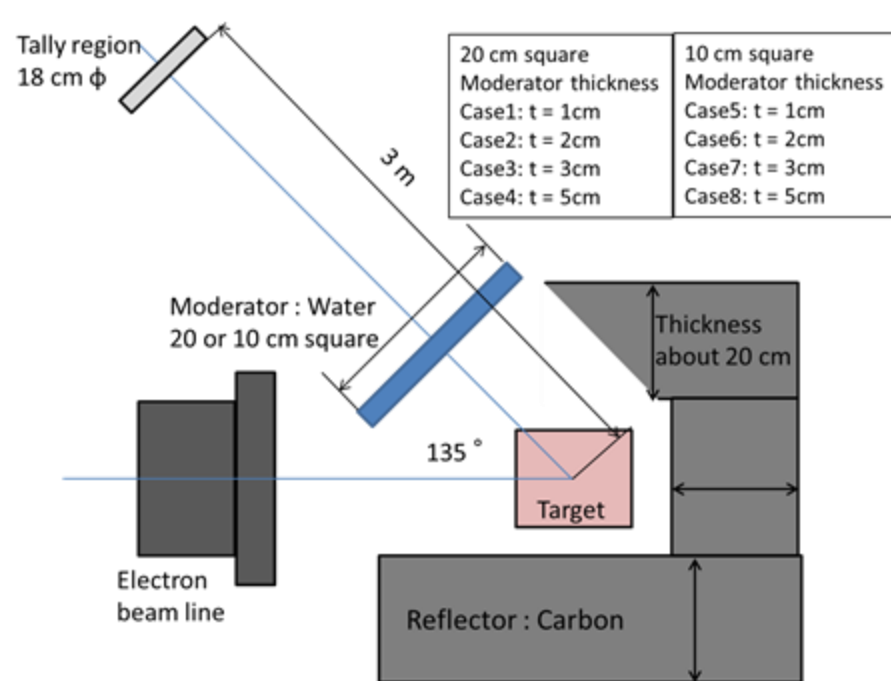


Figure 1. The pac-man type moderator and the Ta target in KURRI-LINAC.

減速材配置の仕方

Setting 1 ビームライン直交型
強度が落ちる
放出時間分布は良い

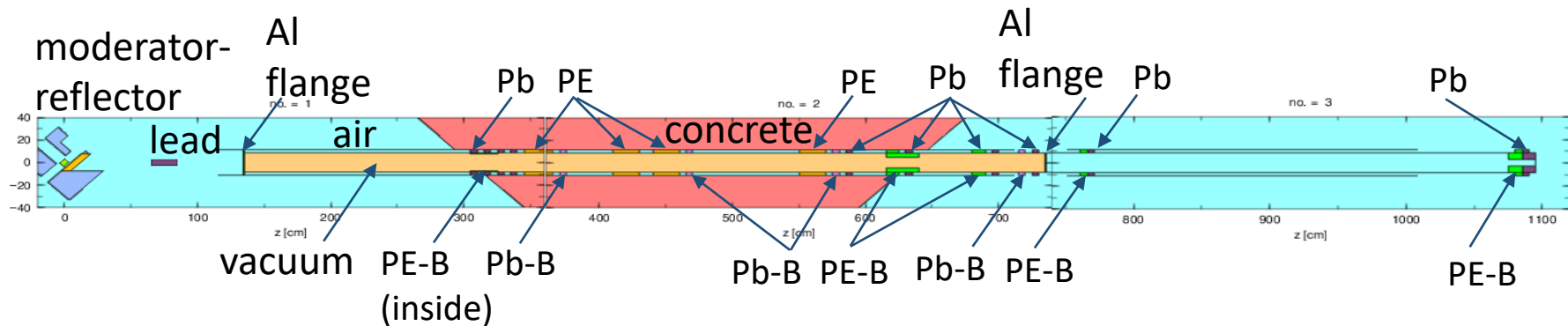
Setting 2 ターゲット近接配置型
強度が高い
放出時間分布は悪い



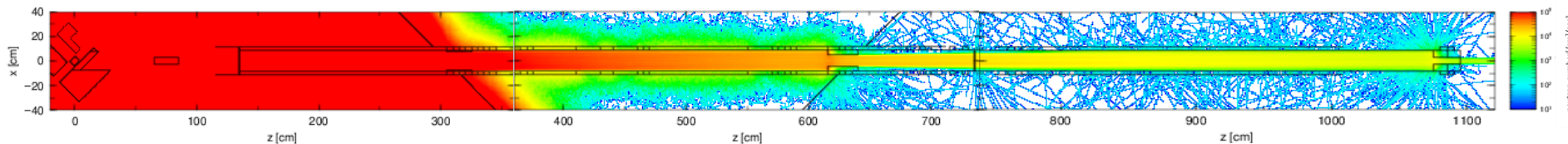
Energy range	Condition	20 cm square				10 cm square			
		t = 1cm	t = 2cm	t = 3cm	t = 5cm	t = 1cm	t = 2cm	t = 3cm	t = 5cm
Total	setting 1	1.56E-06	1.34E-06	1.16E-06	7.68E-07	1.05E-06	8.61E-07	7.19E-07	4.50E-07
	setting 2	1.89E-06	1.72E-06	1.54E-06	1.18E-06	1.15E-06	9.88E-07	8.66E-07	7.04E-07
1 eV- 500 eV	setting 1	3.91E-07	4.23E-07	4.23E-07	3.23E-07	1.94E-07	2.01E-07	1.98E-07	1.68E-07
	setting 2	7.20E-07	8.03E-07	8.03E-07	6.93E-07	5.16E-07	5.54E-07	5.56E-07	4.99E-07

Setting 2の方が強度が高い。

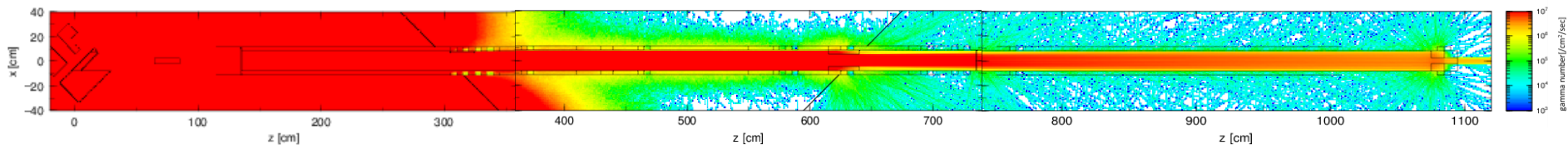
中性子およびガンマ線のコリメーション



Neutron XZ distribution



Gamma XZ distribution



ガンマ遮蔽や中性子遮蔽の配置を考え、最終的にこの配置とした。

[中性子ビーム中のガンマ線の遮蔽]

Pb遮蔽体をコリメータモデルに設置し、ガンマ強度を減らす。

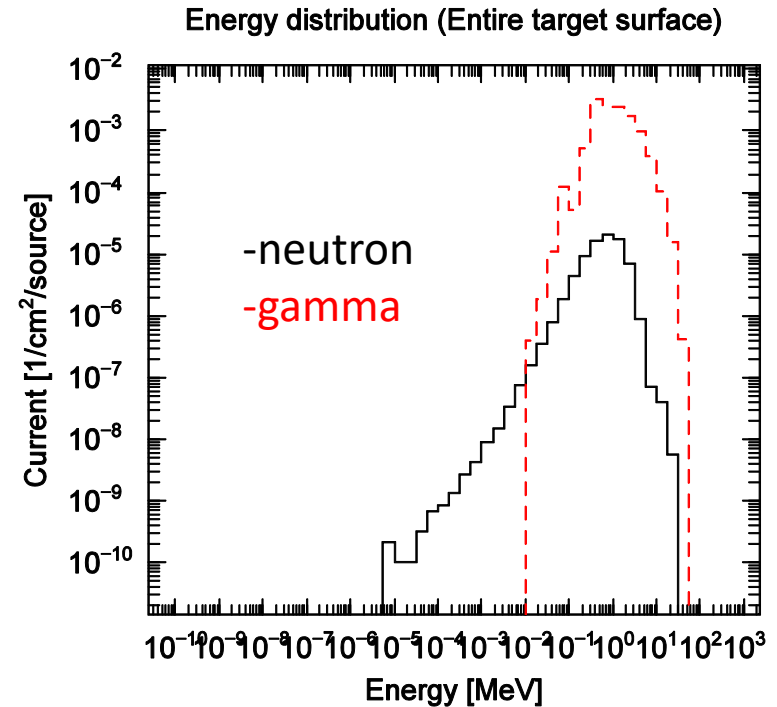
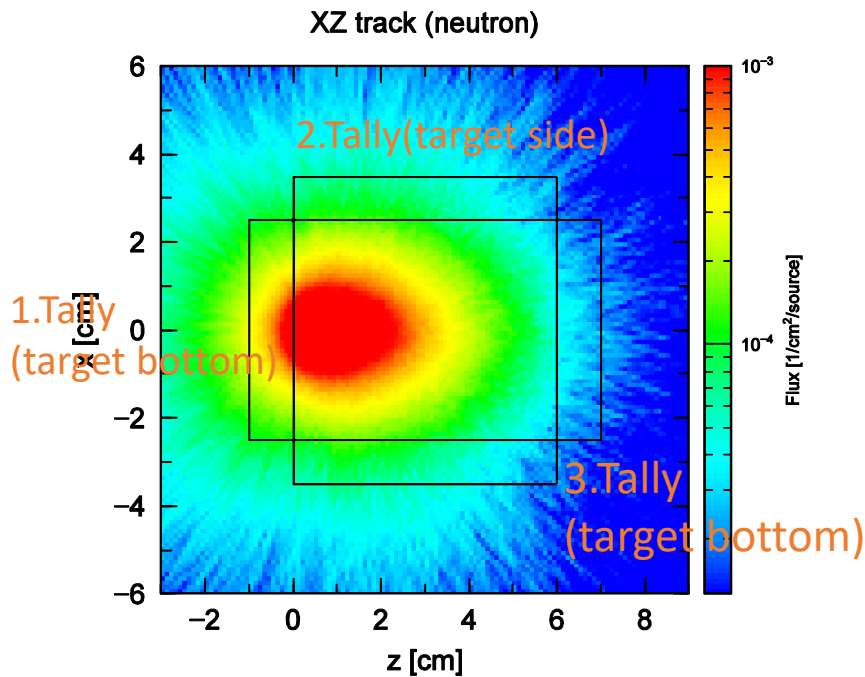
- ① 減速材と飛行管入り口の間(標準配置)
- ② コリメータ出口
- ③ ターゲット・減速材の間

同じ中性子強度減で最もガンマ線減少が少ないものを探す。(①を標準にする)

を使用しシミュレーション計算を行い比較する。

[source PHITS]

PHITS2.82



[STEP1]

Electron source : 40MeV

Ta target : $\phi 5 \times 6$

Put tally entire target surface

Get

*Energy Distribution(Entire target surface)

[STEP2]

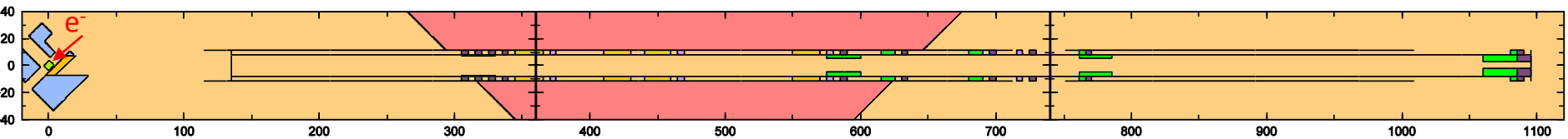
use neutron & gamma energy

distribution as **point radiation source**

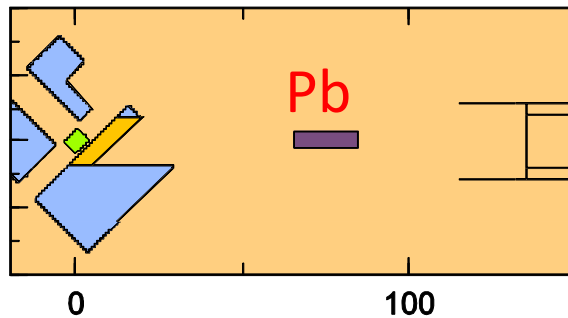
Electron sourceよりタリーをしたneutronを
Neutron sourceを点線源として使用。
gamma numberをタリーの際にはgamma source
を点線源として使用。

[collimator]

[Collimator]

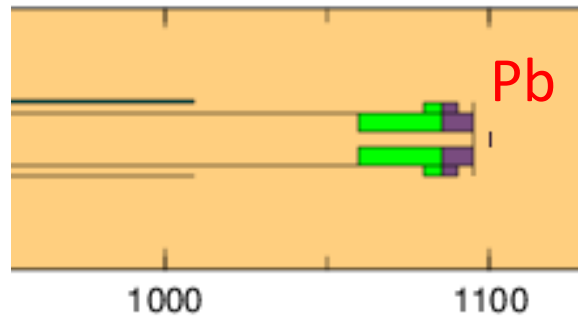


[①Pb Z=65]



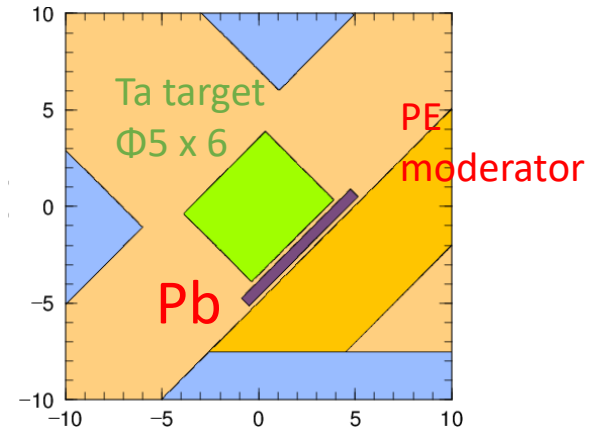
Pb Z=65

[②Pb Z=1100]



Pb Z=1100

[③Pb behind target]



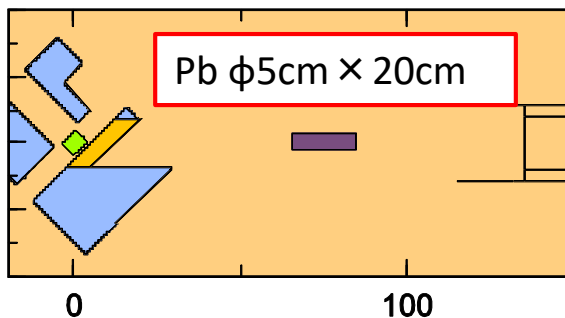
この3つの位置にPbを置いて、コリメータ出口後方 (Tally 位置 Z=1195) でのガンマ強度を比較する。

[シミュレーション結果]

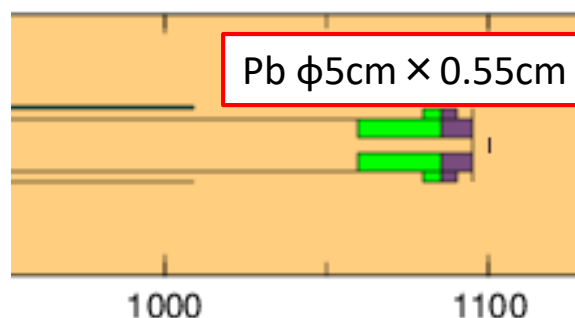
①の中性子強度と、同程度になるように②③でのPbの厚さを変える。
その場合における、ガンマ強度を比較。

Tally at Z=1195	neutron number [n/sec/cm2]	neutron ratio [/without Pb]	gamma number [n/sec/cm2]	gamma ratio [/without Pb]
① Z=65	3.8819E+04	0.835	3.8059E+06	0.295
② Z=1100	3.8900E+04	0.837	5.7691E+06	0.447
③ behind target	3.8299E+04	0.824	6.8173E+06	0.529
without Pb	4.6476E+04		1.2899E+07	

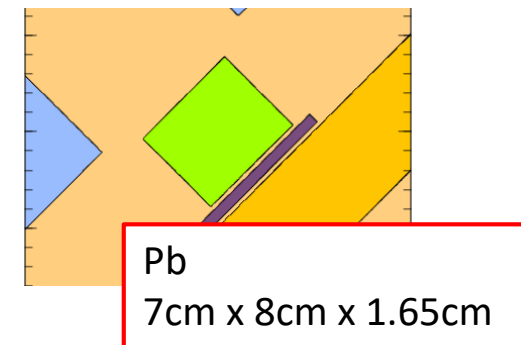
[①Pb Z=65]



[②Pb Z=1100]



[③Pb behind target]

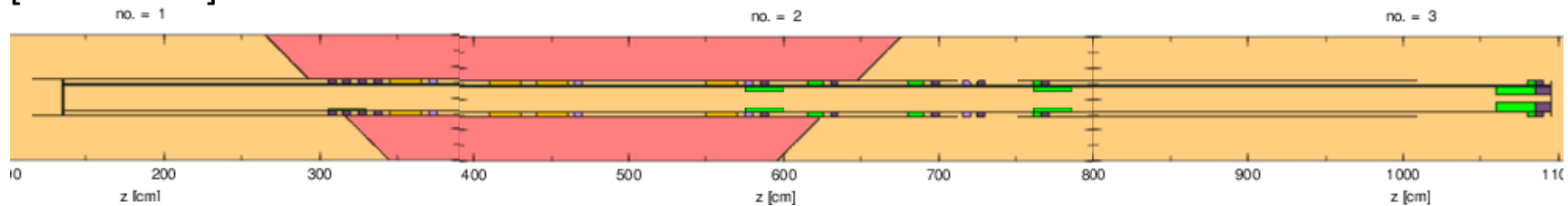


①の場合にガンマ強度が最も効果的に減少している。

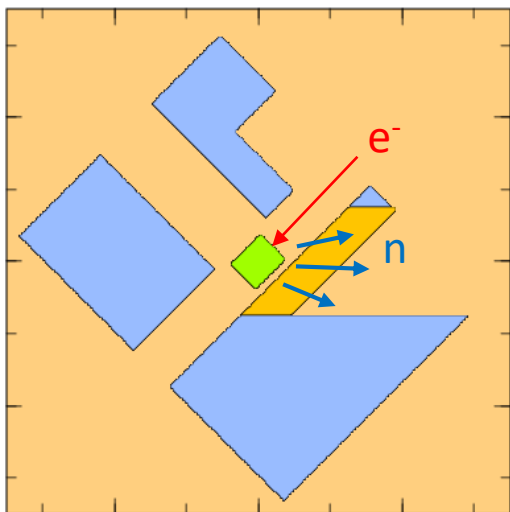
[中性子放出時間分布]

[傾斜減速材、反射体の影響]

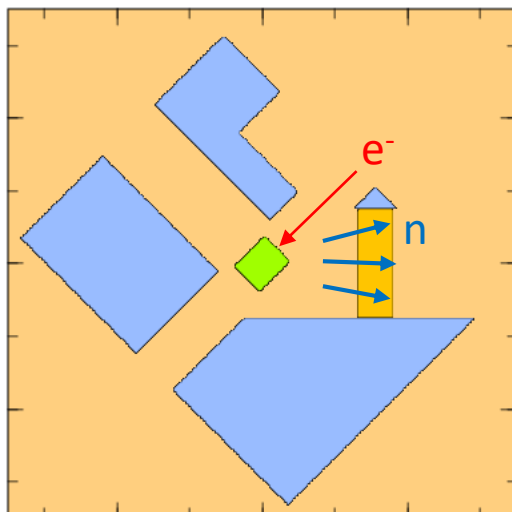
[Collimator]



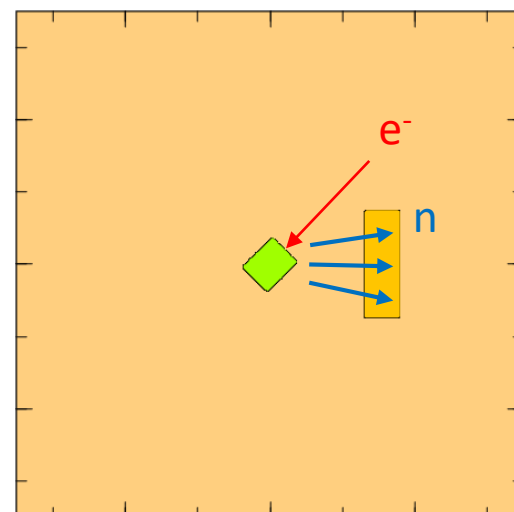
[inclined angle moderator]



[orthogonal angle moderator]

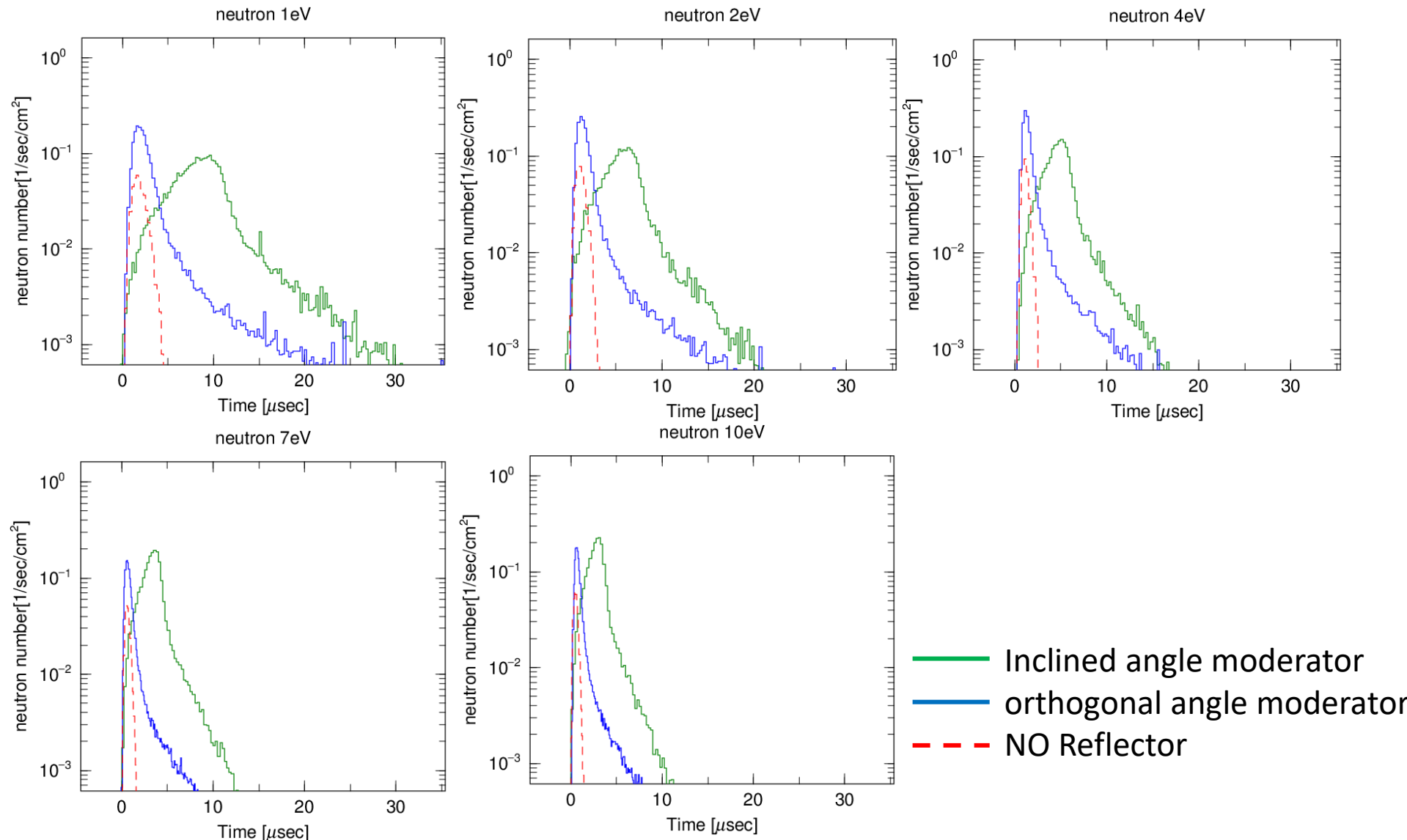


[NO Reflector]



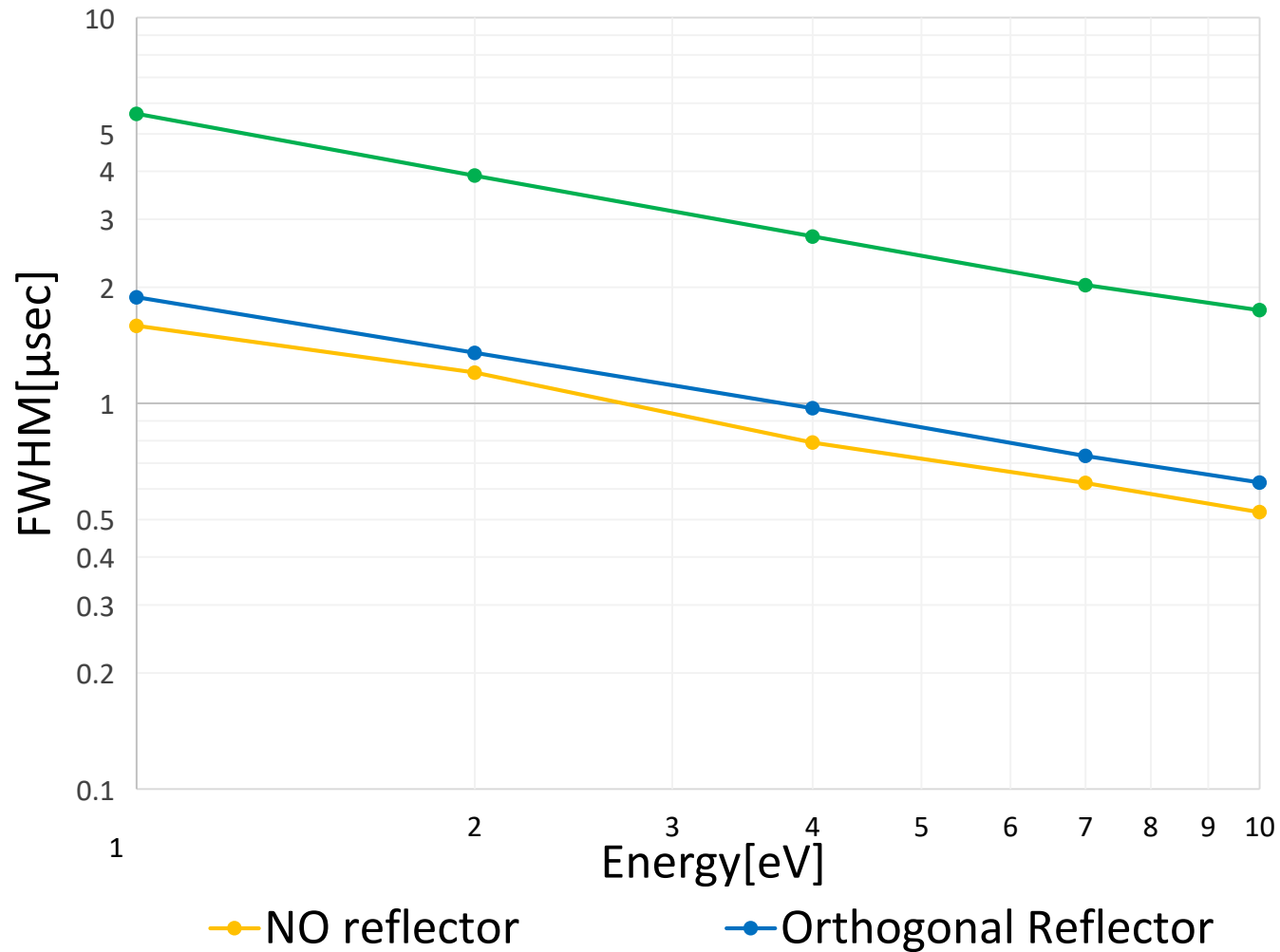
Neutron time distribution

(Energy range $\pm 0.1\%$, $Z=1195$, point tally)



Energy range : $E \pm 0.1\%$,
point tally at $Z=1195$

FWHM [Log-Log]



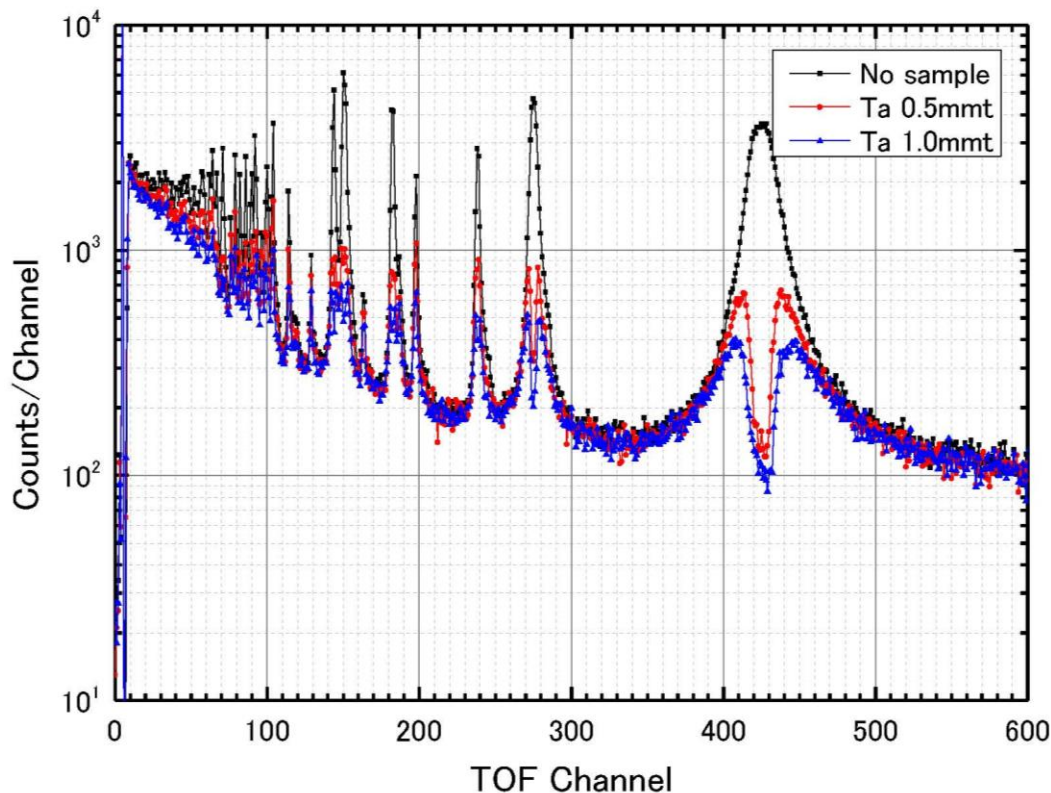
Taの4.28eVのピークでのパルス幅による不確かさ

中性子パルスの半値幅: 2.6 μ sec

No sampleの半値幅: \sim 20 μ sec

真の半値幅: $\text{SQRT}(20^2 - 2.6^2) = 19.82$

残差の割合: $|19.82 - 20.00| / 19.82 = 0.00856 = 0.86\%$



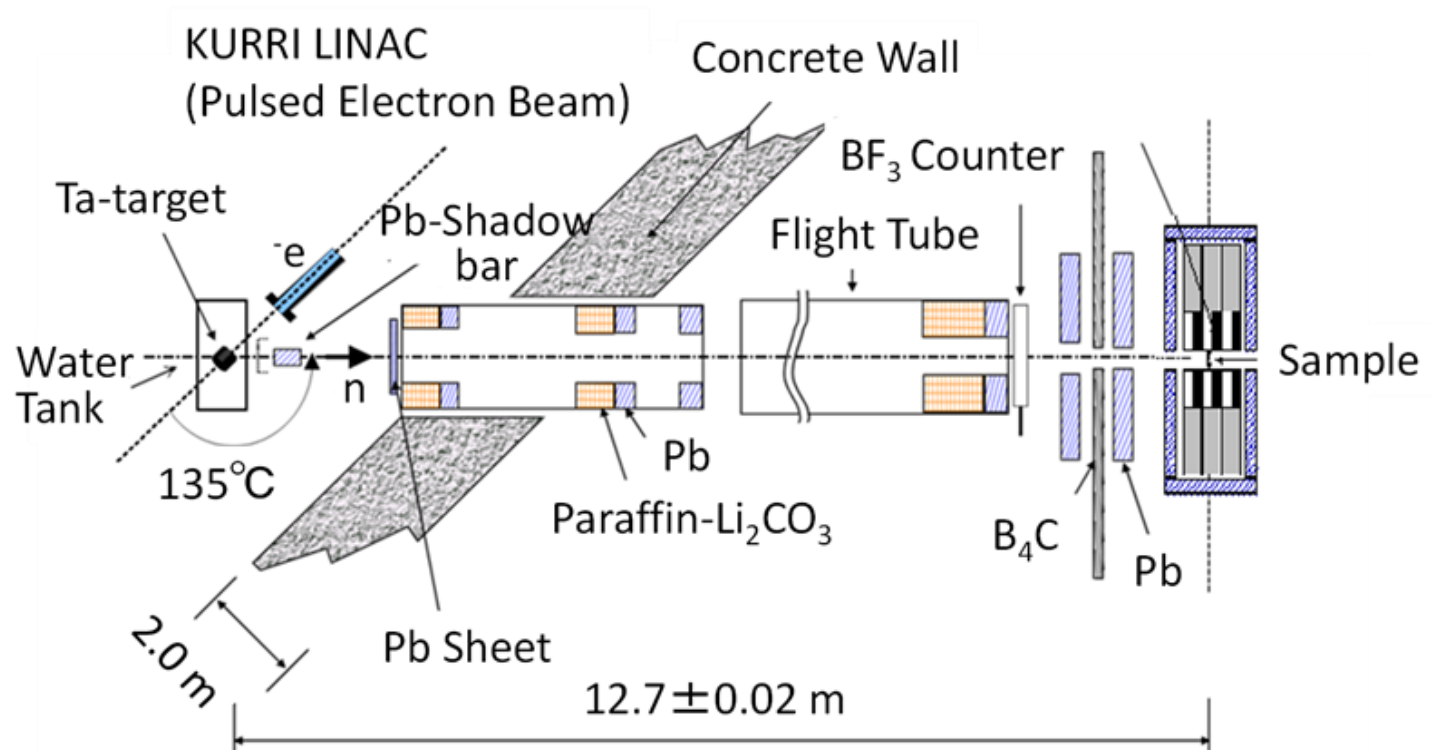
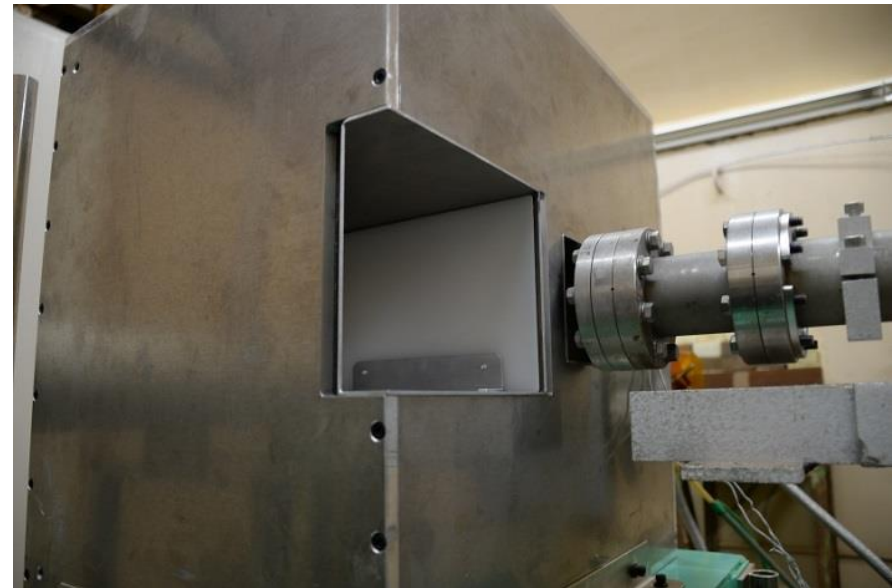
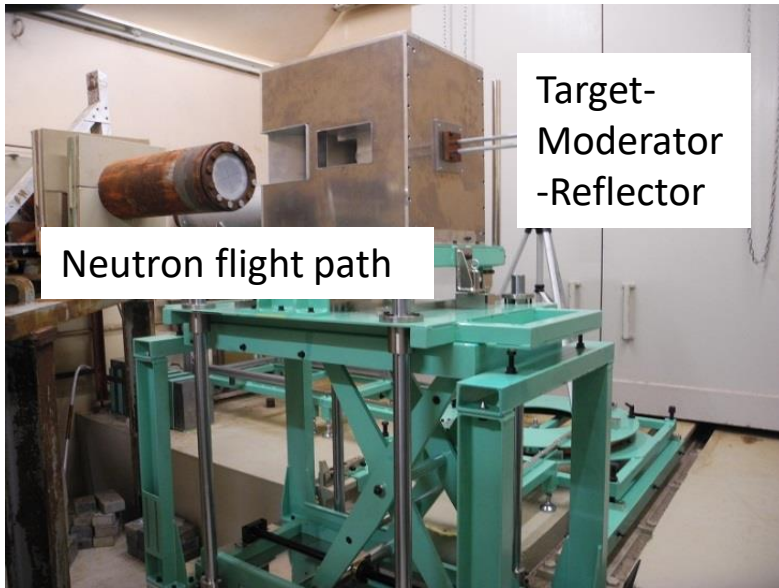
○Taの低エネルギーピークについては、半値幅の影響は大きくない。

他のピークについての検討が必要。

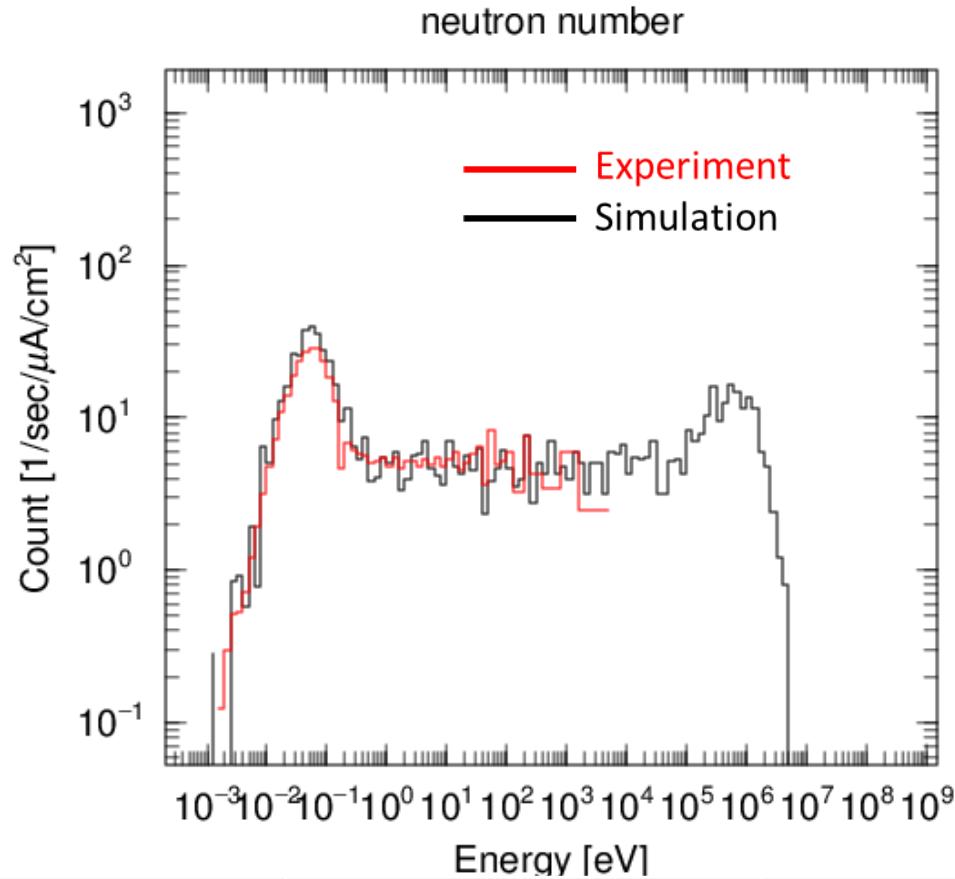
○セルフインディケーション法では問題はない。

○ピーク位置、形がずれることが予想されるので、透過法での定量解析にはシミュレーション計算が必要。

○温度測定ときは減速材を直角に配置するのもあり。



[中性子スペクトルの実験・計算の比較]



	Experimental value [$\text{cm}^2/\text{sec}/\mu\text{A}$]	calculated value [$\text{cm}^2/\text{sec}/\mu\text{A}$]	E/C
thermal neutron ($0.002\text{eV} < E < 0.2\text{eV}$)	235.95	299.10	1.27
epi thermal neutron ($0.2\text{eV} < E < 1.8\text{keV}$)	213.18	203.68	0.96

- 1) 減速材配置を検討し、ターゲット密着型が強度が高いことが分かった。
- 2) コリメータ系について検討し、効果的な中性子、ガンマ線コリメータの配置を決めた。
- 3) 中性子ビーム中の γ 線遮蔽について、三種の鉛遮蔽体の配置について数値シミュレーションを用いて優劣を検討した。その結果、減速材と飛行管の間に鉛を置く方法が優れていることが明らかとなった。
- 4) 中性子放出時間分布についてシミュレーション計算した。その結果、共鳴中性子ピーク測定のエネルギ分解能に対する影響が小さいことが示された。
- 5) 中性子スペクトル強度について、数値シミュレーション結果と実験結果の比較を行った。その結果、30%以内で一致していることが分かり、実際の測定体系が予想された通りできていることが示された。

Acknowledgement

Present study includes the result of "Development of Non-Destructive Methods Adapted for Integrity test of Next generation nuclear fuels" entrusted to the Kyoto University by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology of Japan (MEXT).