



北海道大学
HOKKAIDO UNIVERSITY

2013/01/09

中性子イメージング専門研究会

中性子共鳴吸収イメージングの 定量化に関する研究

○長谷美 宏幸 佐藤博隆 木野幸一 加美山隆 鬼柳善明

北海道大学大学院 工学院

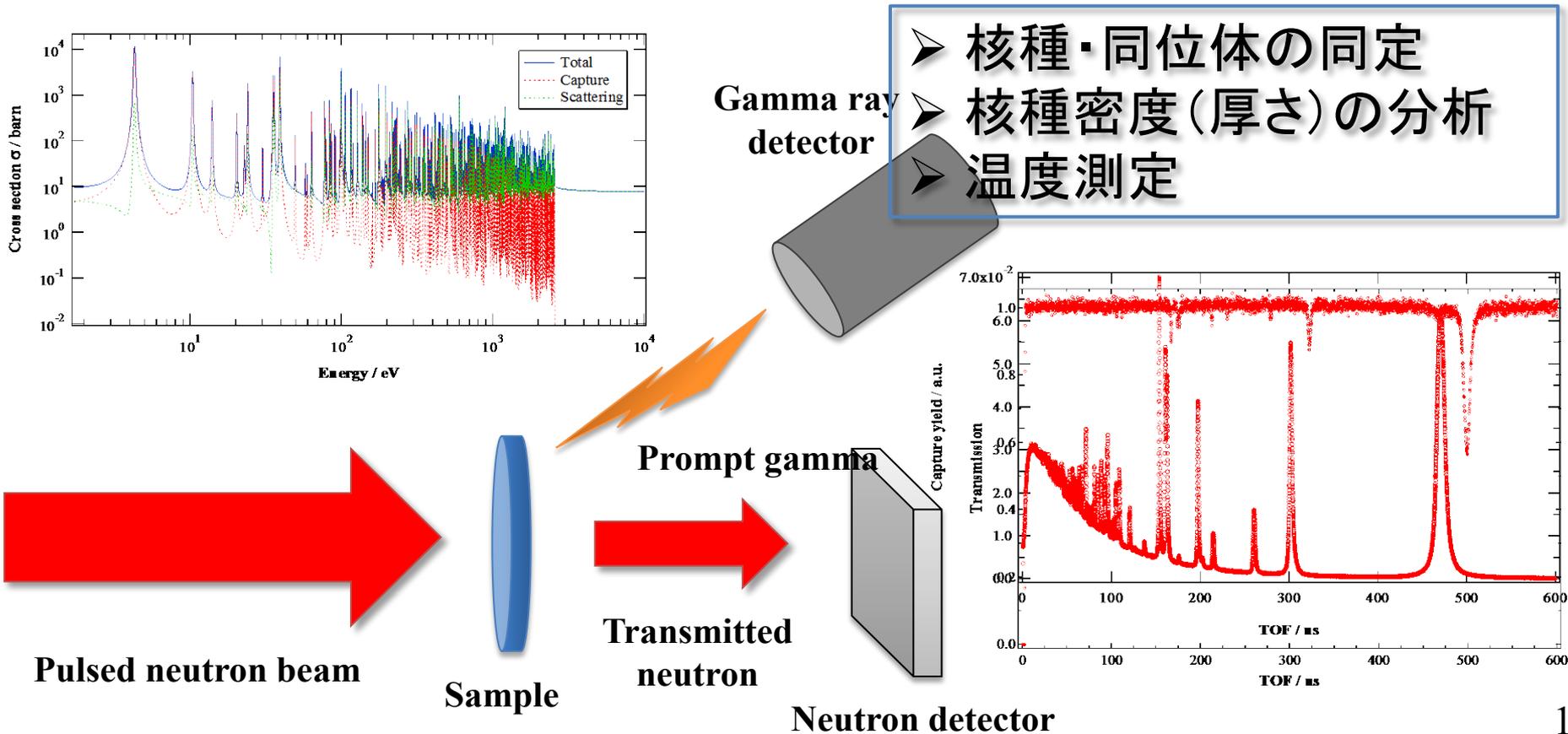
原田正英 甲斐哲也 大井元貴 瀬川麻里子 篠原武尚

日本原子力研究開発機構 J-PARCセンター

中性子共鳴吸収分光法

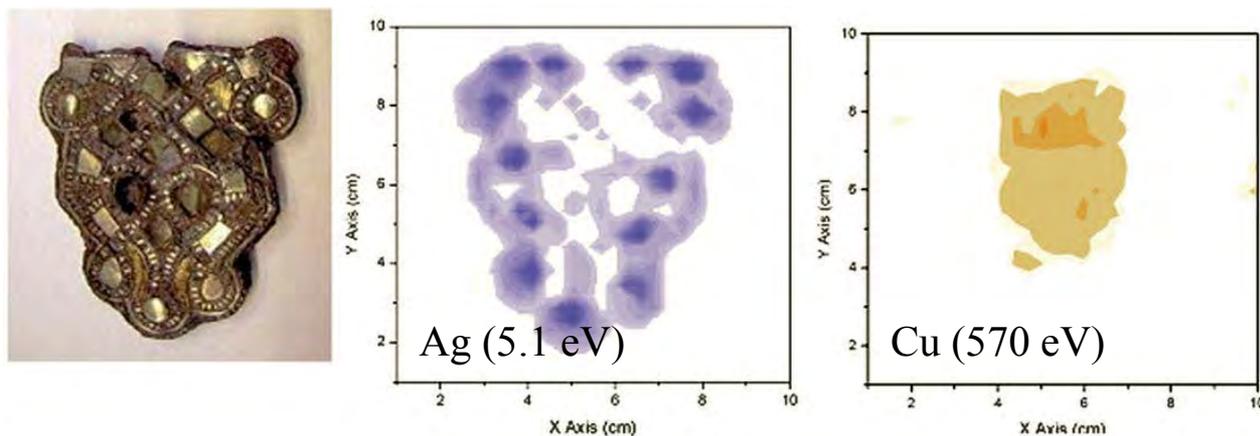
中性子共鳴吸収分光法 (N-RAS) . . .

原子核による中性子の共鳴吸収時に発生する**即発 γ 線**の計数もしくは**中性子透過率**の測定と飛行時間 (TOF) 法を組み合わせることで共鳴吸収スペクトルを測定する技術



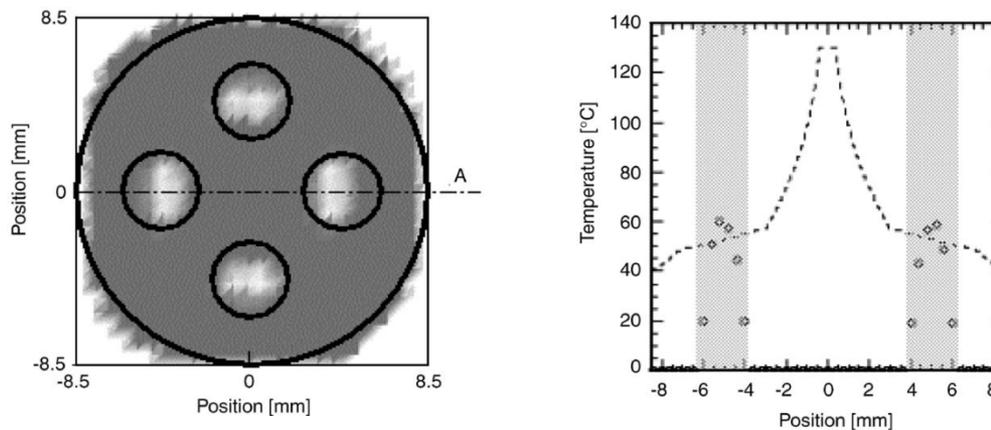
N-RASの応用 — 共鳴吸収イメージング —

考古学試料に含まれる元素のイメージング



E. P. Cippo, et al., *J. Anal. At. Spectrom.*, **26**, 992 (2011)

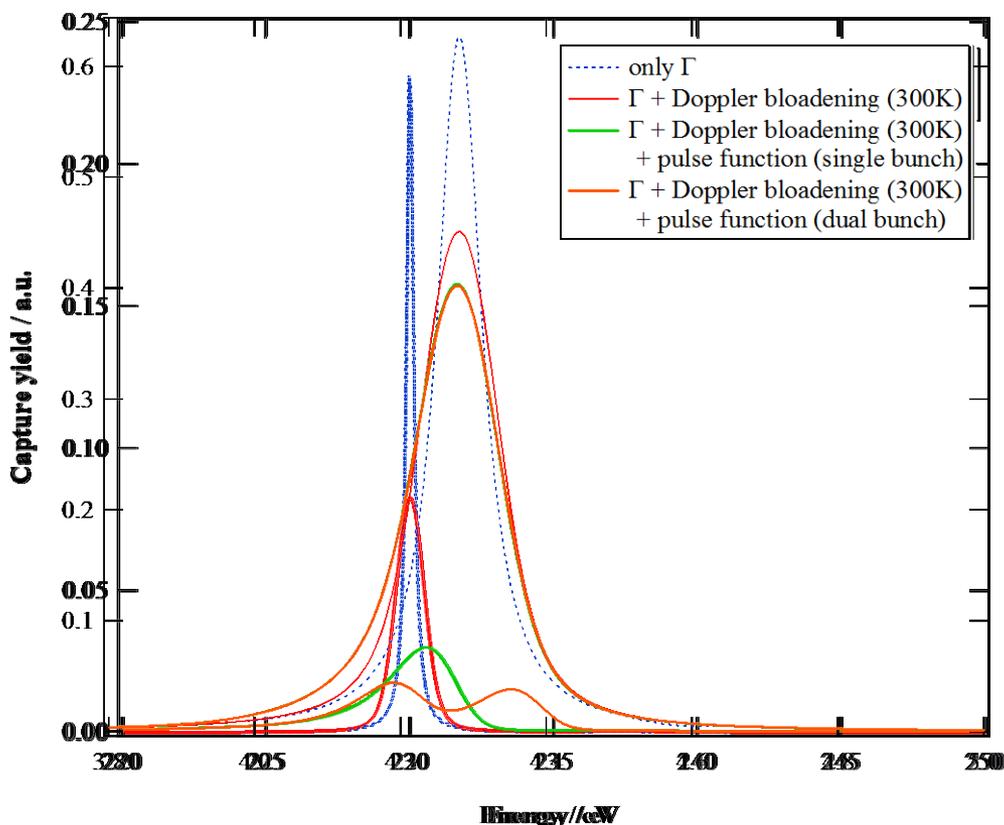
MOX燃料模擬体の核種密度・温度イメージング



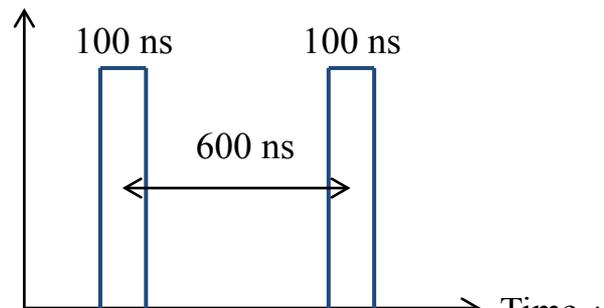
T. Kamiyama, et al., *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A*, **542**, 258 (2005)

共鳴吸収スペクトルを変化させる要因

「Doppler 拡がり」「中性子のパルス関数」などの影響により、測定される共鳴吸収スペクトルの形状が変化(幅が広がる)する。



タ銅の共鳴吸収スペクトル



定量的な共鳴イメージングの為に...

- 使用する装置のパルス関数を再現し、解析に取り入れる
- 陽子ビームのダブルバンチ構造を考慮する(J-PARC)
- Doppler拡がりの評価に関してより詳細なモデルを使用する

研究背景と目的

N-RASによる核種・温度分析(イメージング)を定量的に行うためには、使用する装置の熱外中性子のパルス関数を任意のエネルギーで計算できることが不可欠である。



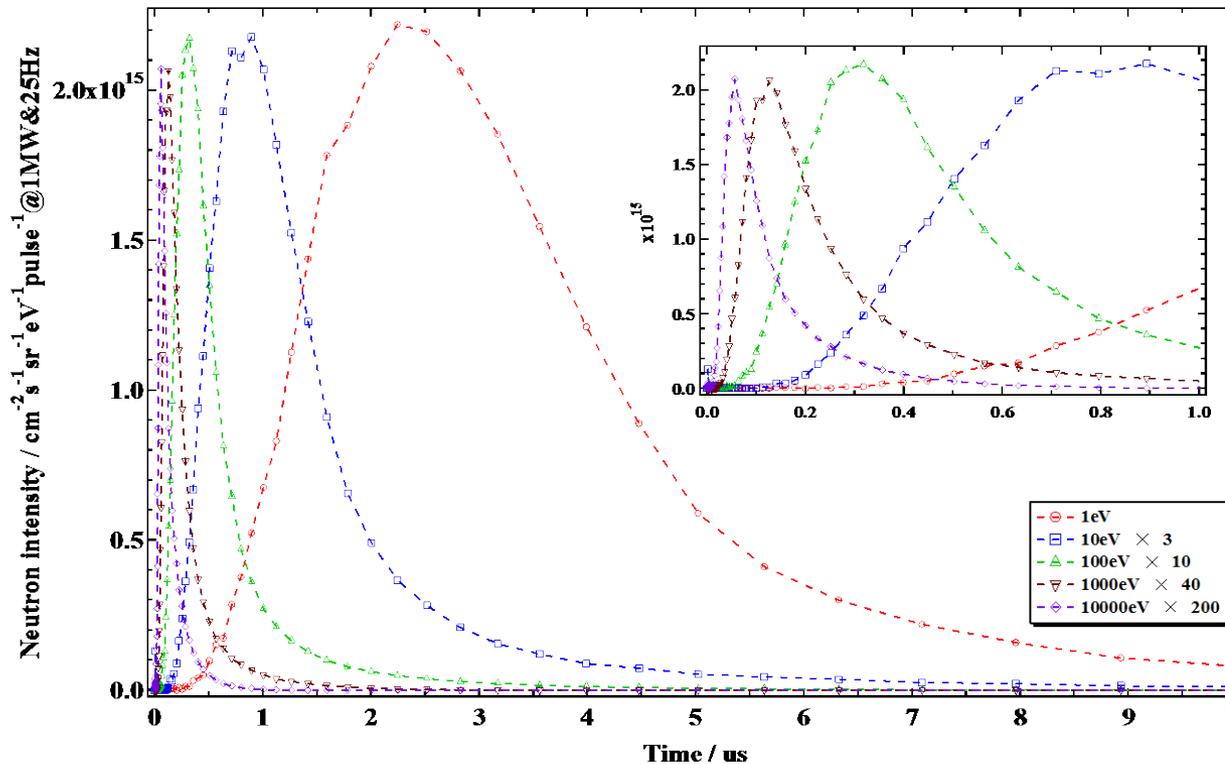
J-PARCにおける定量的な共鳴イメージング手法の確立を目指し、物質・生命科学実験施設MLFのBL10(中性子源特性試験装置NOBORU)のパルス関数を導出し、解析に用いる。

- BL10のパルス関数の導出
- 共鳴解析コードにパルス関数(及びダブルパルス)を組み込む
- 実験データ(共鳴吸収スペクトル)の解析

BL10のパルス関数導出

BL10の中性子放出時間分布

BL10における熱外中性子(1 eV ~ 10 keV)の中性子放出時間をシミュレーション計算により求めた。



BL10の中性子放出時間分布
(シミュレーション計算)

既存の関数を用いて
フィッティングを行い、
任意のエネルギーで
BL10のパルス関数を
再現できる関数を決定
する。

Cole-Windsor関数

Cole-Windsor関数

$$F(t) = (1-R)F_1(t) + RF_2(t)$$

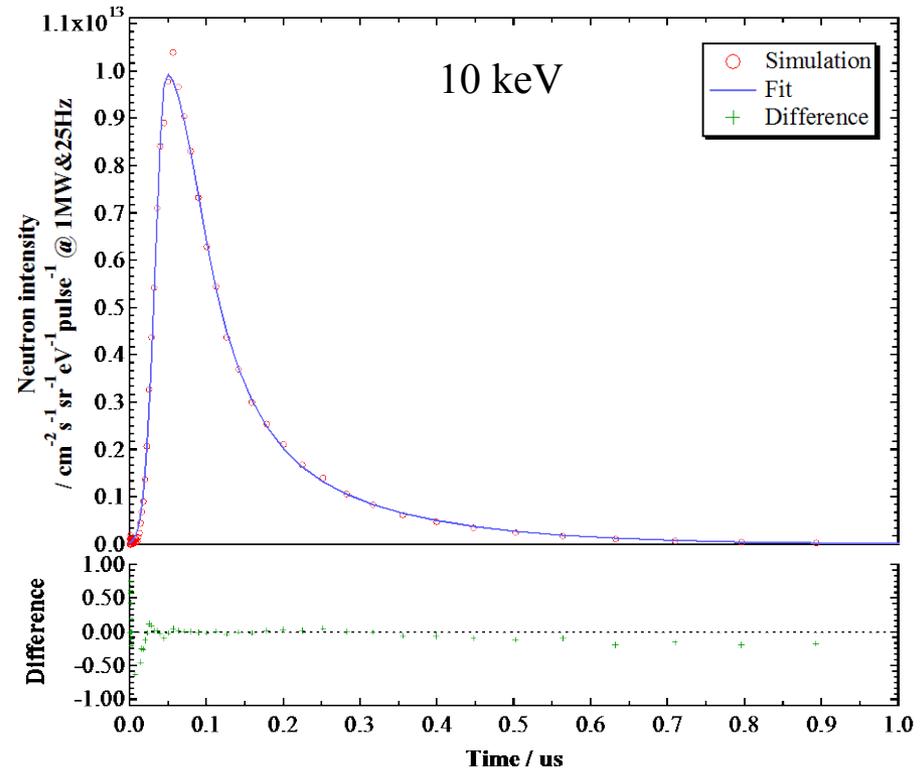
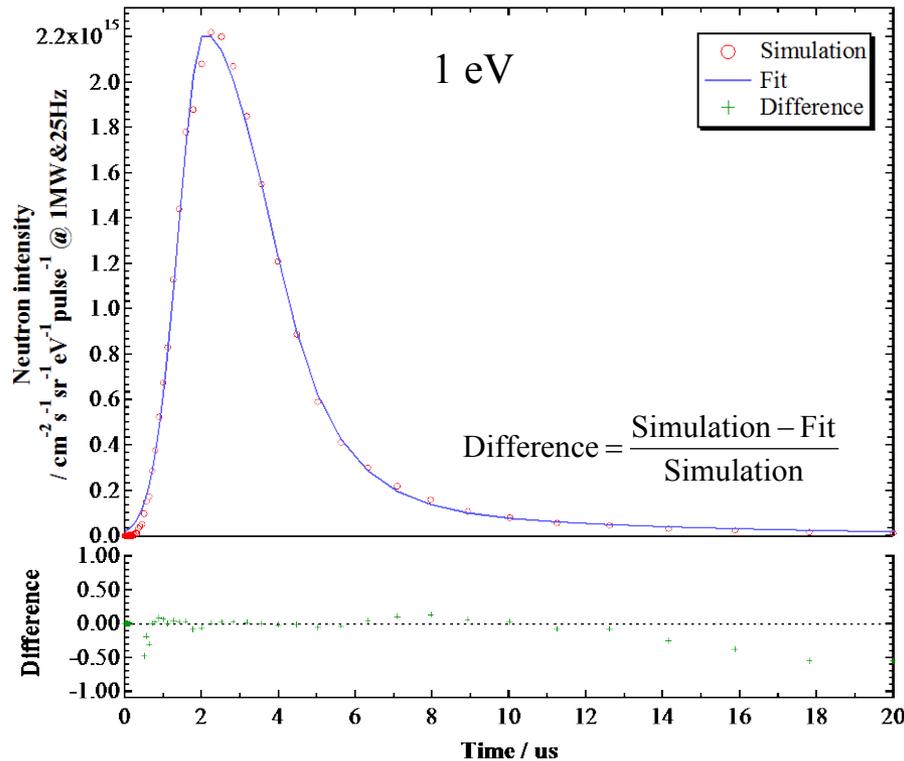
$$t < t_0 \quad F_1(t) = F_2(t) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta t}{\sigma_1}\right)^2\right) \quad (\Delta t = t - t_0)$$

$$t_0 < t < t_0 + \gamma_1 \sigma_2^2 \quad F_1(t) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta t}{\sigma_2}\right)^2\right) \quad t > t_0 + \gamma_1 \sigma_2^2 \quad F_1(t) = \exp\left(\frac{(\gamma_1 \sigma_2)^2}{2} - \gamma_1 \Delta t\right)$$

$$t_0 < t < t_0 + \gamma_2 \sigma_2^2 \quad F_2(t) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta t}{\sigma_2}\right)^2\right) \quad t > t_0 + \gamma_2 \sigma_2^2 \quad F_2(t) = \exp\left(\frac{(\gamma_2 \sigma_2)^2}{2} - \gamma_2 \Delta t\right)$$

C 、 R 、 t_0 、 γ_1 、 γ_2 、 σ_1 、 σ_2 : フィットティングパラメータ

Cole-Windsor関数によるフィッティング



中性子放出時間分布とCole-Windsor関数によるフィッティング

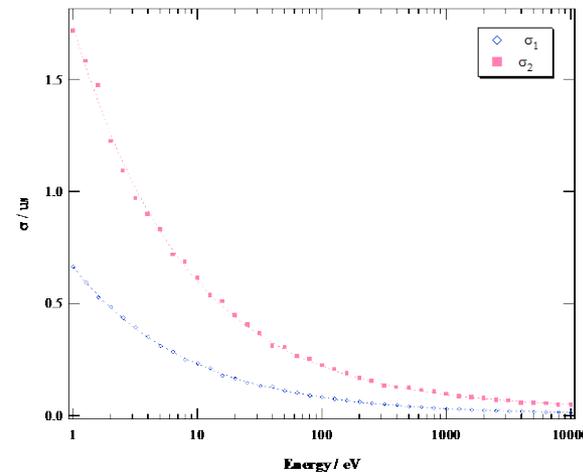
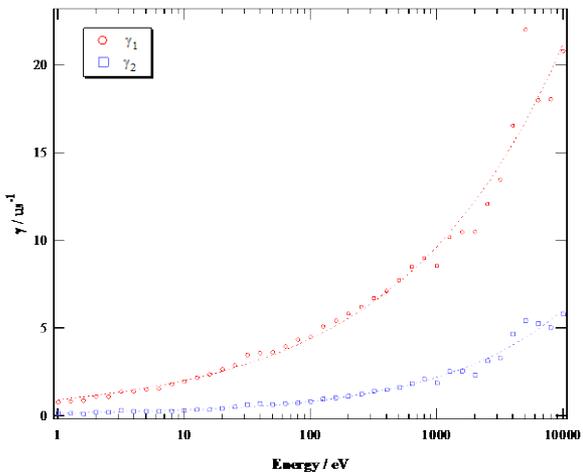
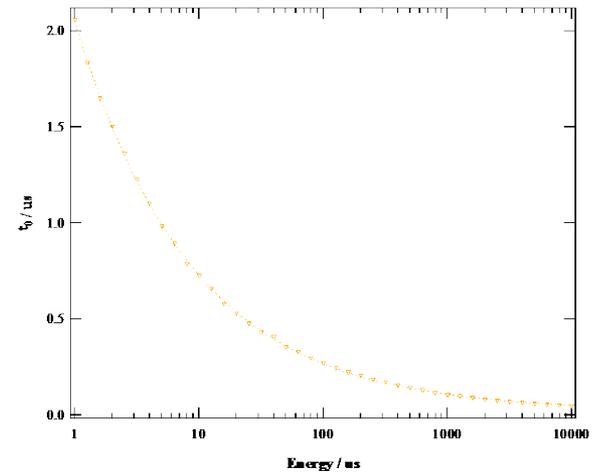
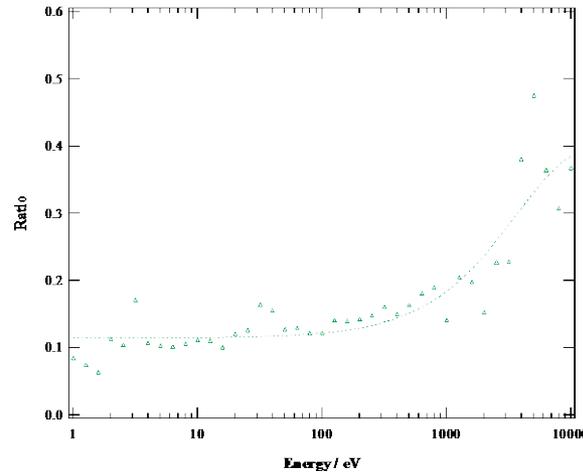
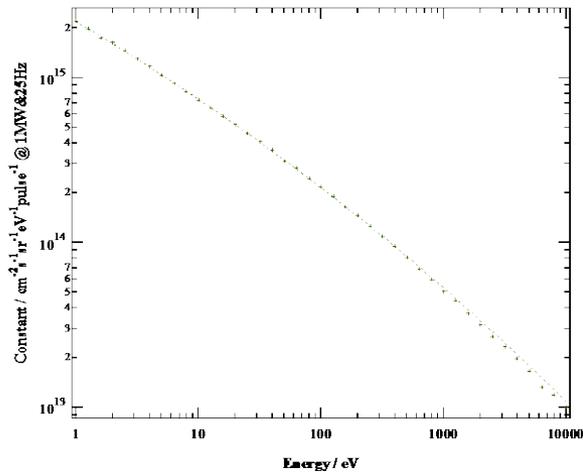
BL10のパルス関数はCole-Windsor関数により再現可能

任意のエネルギーで関数を計算できるように、パラメータのエネルギー依存性を調べた。



Cole-Windsor関数のパラメータのエネルギー依存性

全てのパラメータがエネルギーに対し、滑らかに変化
 任意のエネルギーでBL10のパルス関数が再現可能に



$$C = 8.03 \times 10^{18} \exp(-8.21 E^{0.0542})$$

$$R = 0.404 - 0.290 \exp(-2.78 \times 10^{-4} E)$$

$$t_0 = 2.27 \times 10^{-2} + 2.03 E^{-0.460}$$

$$\gamma_1 = 2.95 \times 10^{-2} + 0.905 E^{0.343}$$

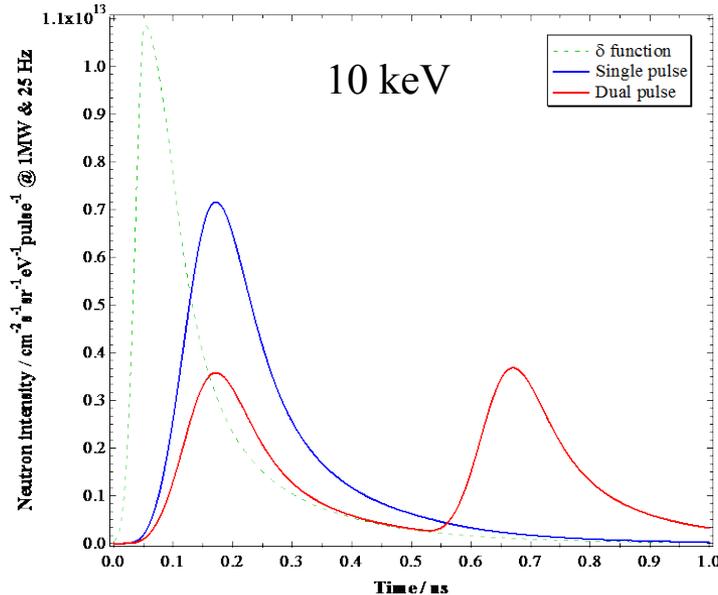
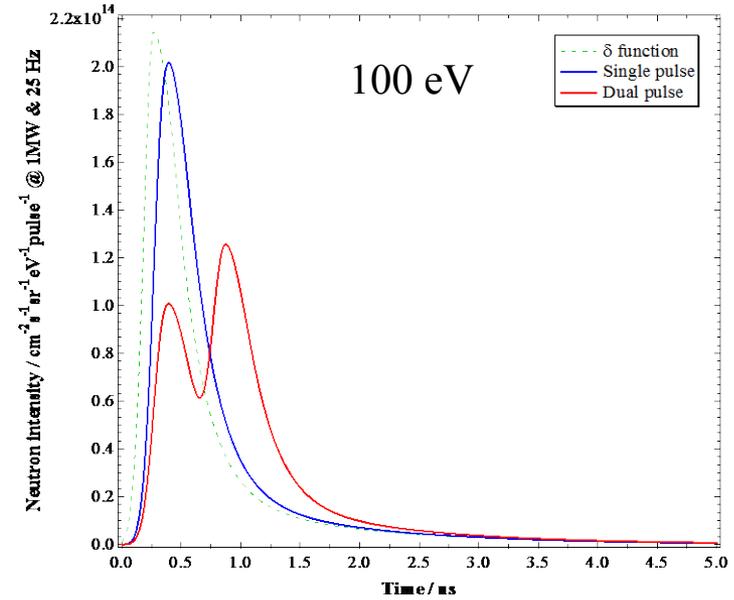
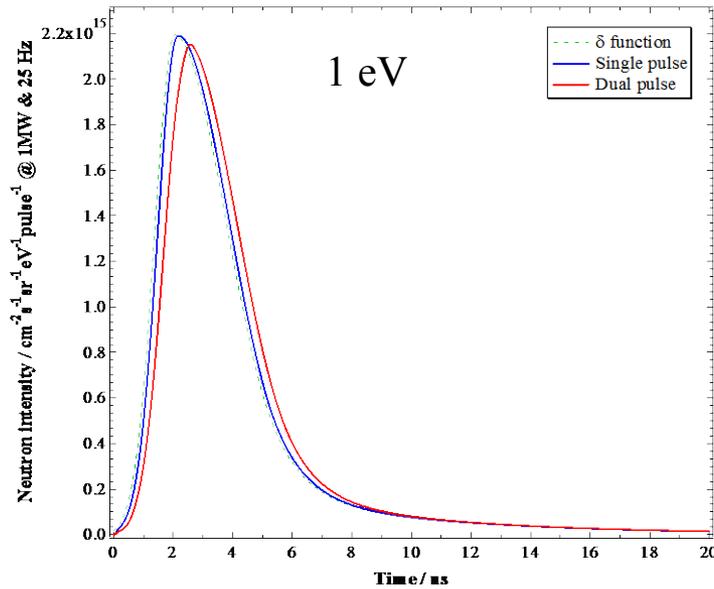
$$\gamma_2 = 6.78 \times 10^{-2} + 9.77 \times 10^{-2} E^{0.447}$$

$$\sigma_1 = 6.80 \times 10^{-3} + 0.658 E^{-0.468}$$

$$\sigma_2 = 3.15 \times 10^{-2} + 1.71 E^{-0.476}$$

Cole-Windsor関数のパラメータのエネルギー依存性

BL10のパルス関数



BL10のパルス関数とJ-PARC陽子ビーム
パルスの時間構造の畳み込み

BL10のパルス関数を共鳴解析
コードに組み込み、実際に共鳴
吸収スペクトルの解析を行う。

BL10のパルス関数を組み込んだ 共鳴解析コードによる核種密度分析

共鳴解析コードREFITによる核種密度分析

REFITコード...

共鳴吸収スペクトルに対しフィッティングを行い、共鳴パラメータなどを求める解析コード(主に核データの分野で利用)

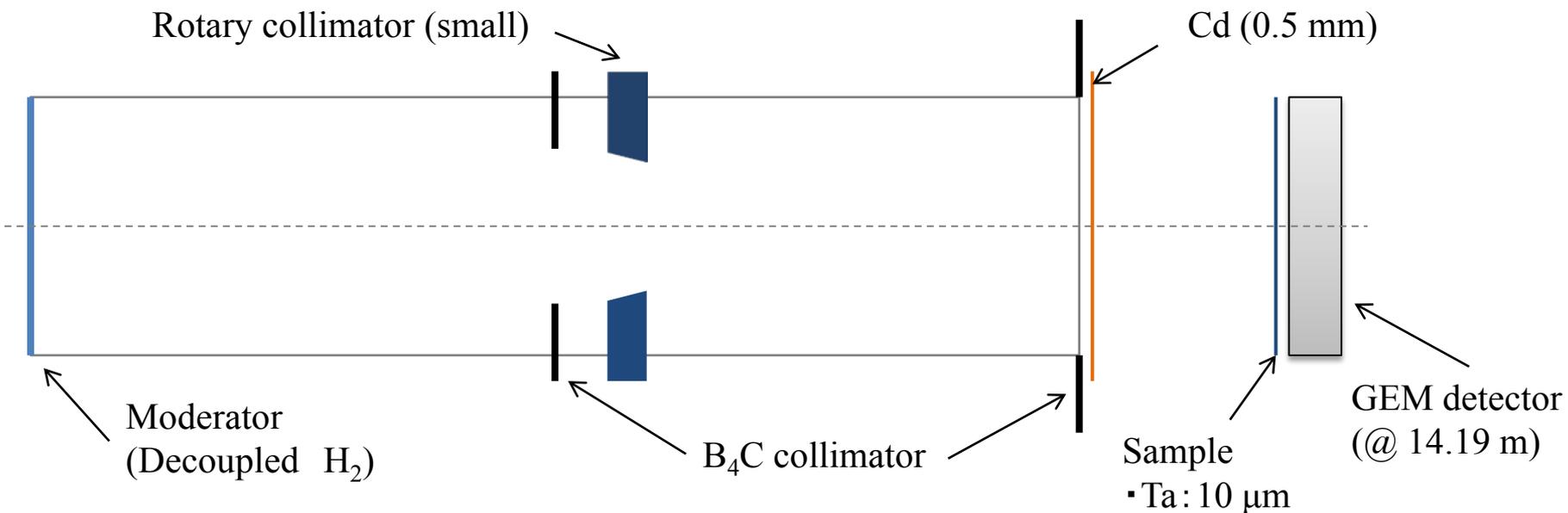
REFITコードのオリジナルのパルス関数

- ① Ikeda-Carpenter関数と χ^2 分布
- ② IRMM用のGunsingの式

このREFITコードでBL10のパルス関数を再現できるようにするため、Cole-Windsor関数を組み込んだ。

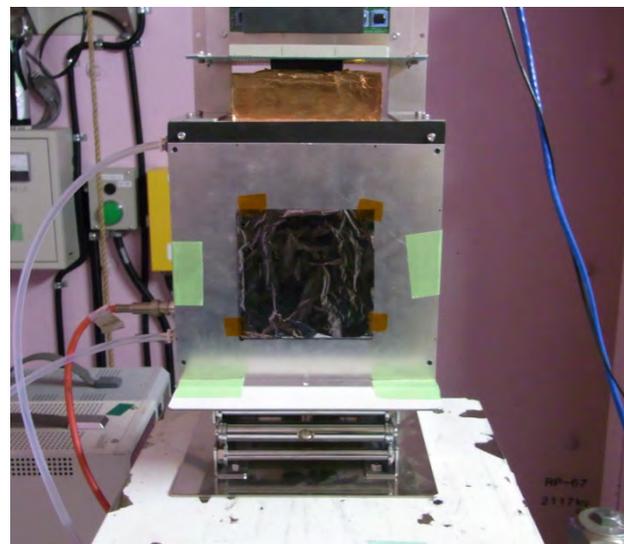
このREFITコードを用いて**タンタル**の中性子透過率スペクトルの解析を行い、**試料厚さ（核種密度）**の分析を行った。

実験体系・ビーム条件

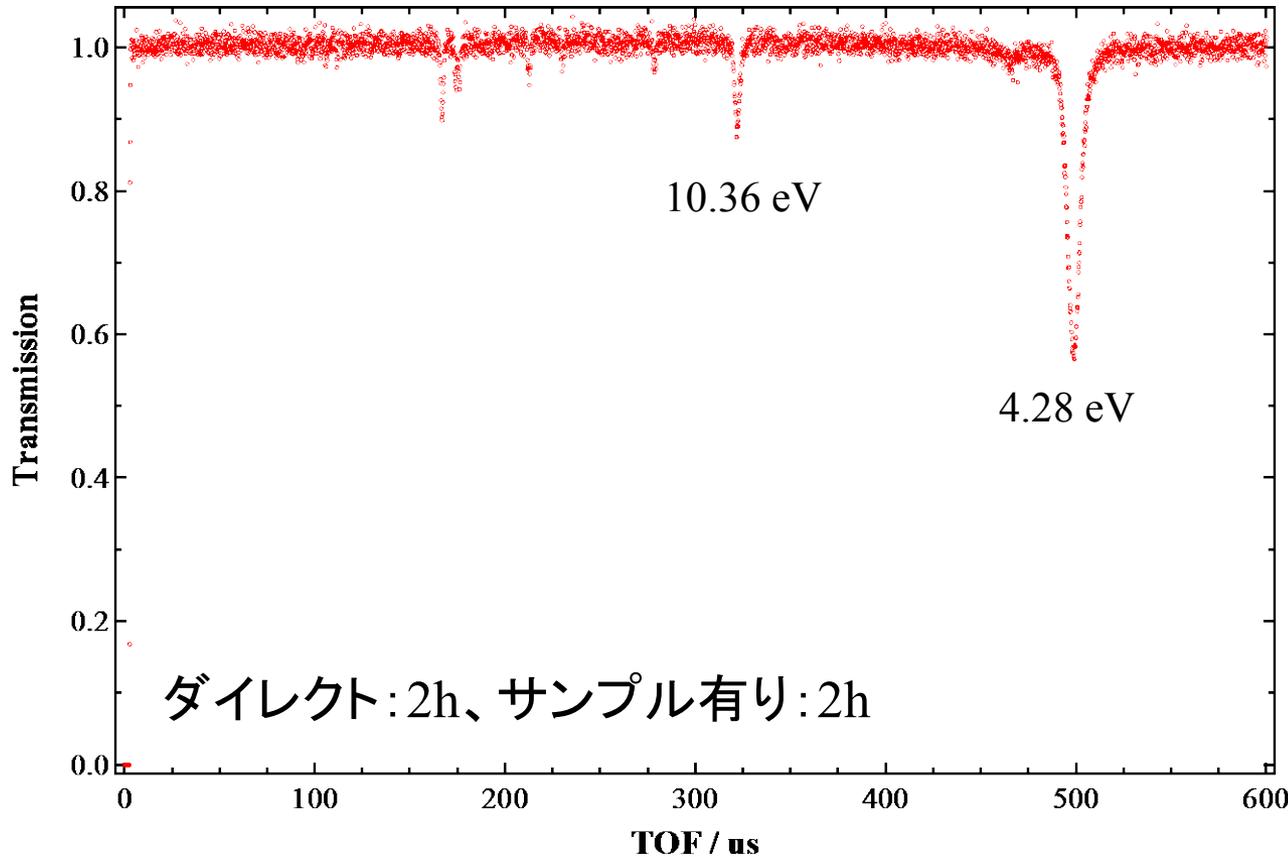


ビームライン: J-PARC/MLF/BL10

- 実験日時 : 2012/06/01-02
- 加速器出力 : 210kW
- 中性子飛行距離 : 14.19 m
- ロータリーコリメータ : 小 (L/D = 600)
- ビームサイズ : 10 × 10 cm²
- フィルター : 未使用
- チョッパー : 未使用



10 μm 厚タンタルの中性子透過率スペクトル

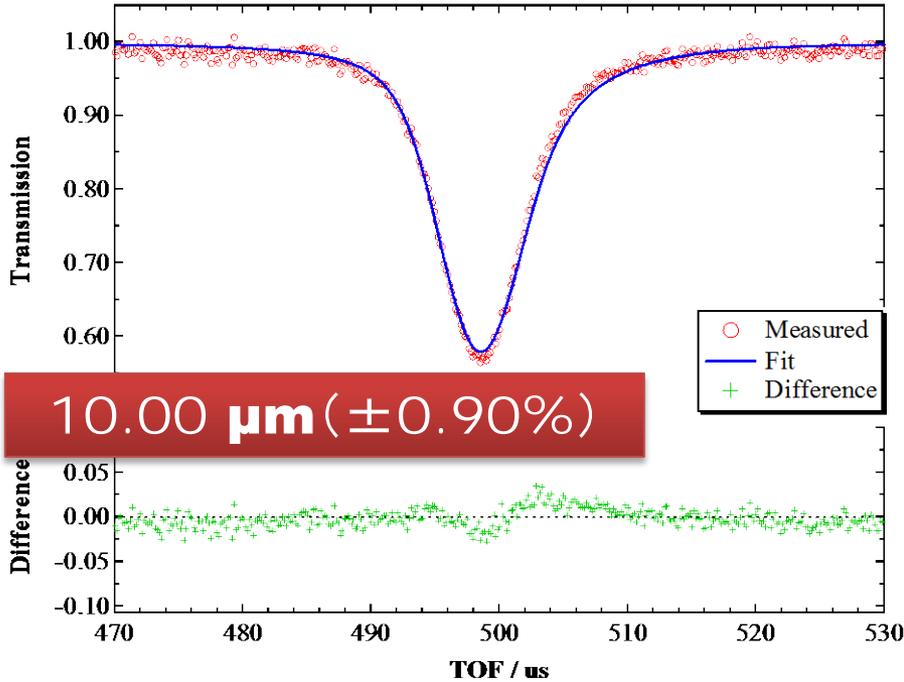


10 μm 厚タンタルの中性子透過率スペクトル

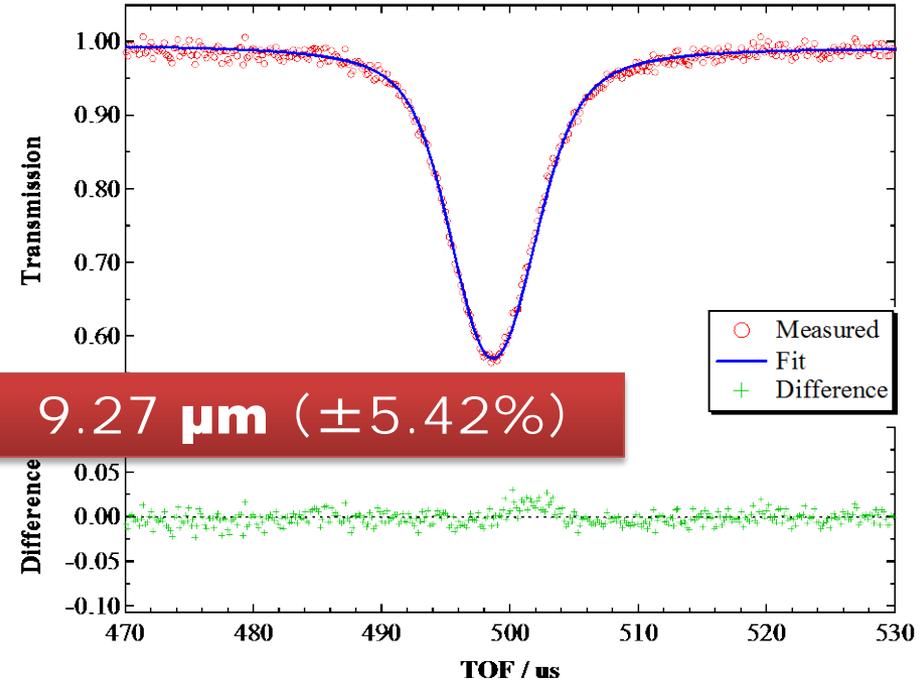
4.28eV共鳴、10.36eV共鳴それぞれに対し、REFITコードによるフィッティングを行い、サンプル厚さ(核種密度)を求めた。

REFITによるフィッティング (4.28 eV)

REFIT (Cole-Windsor関数)



オリジナルREFIT



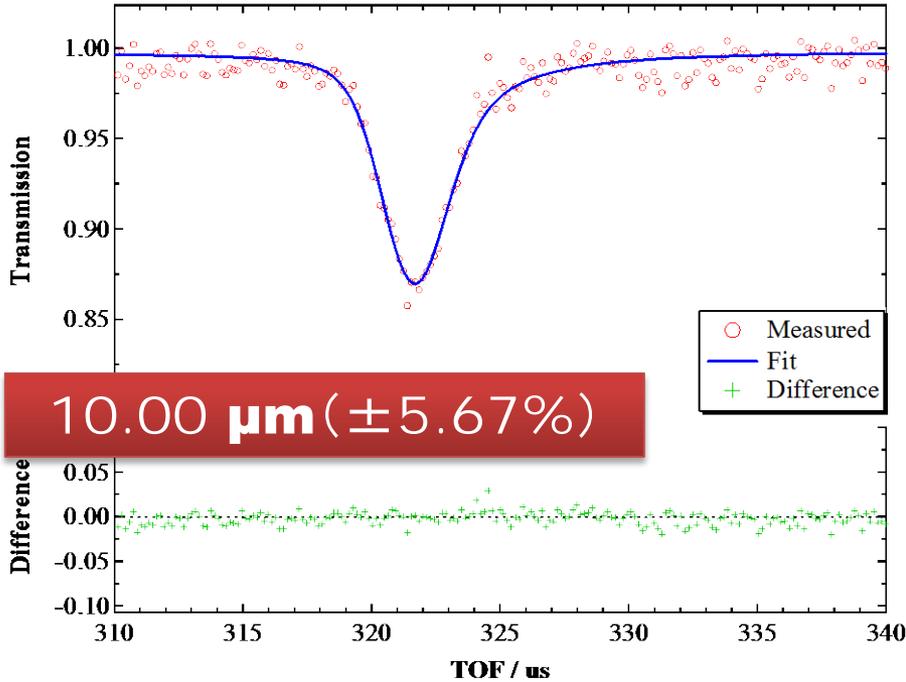
10 μm 厚タンタルの中性子透過率スペクトルと
REFITによるフィッティング (4.28 eV共鳴)

5%以内の誤差が生じている

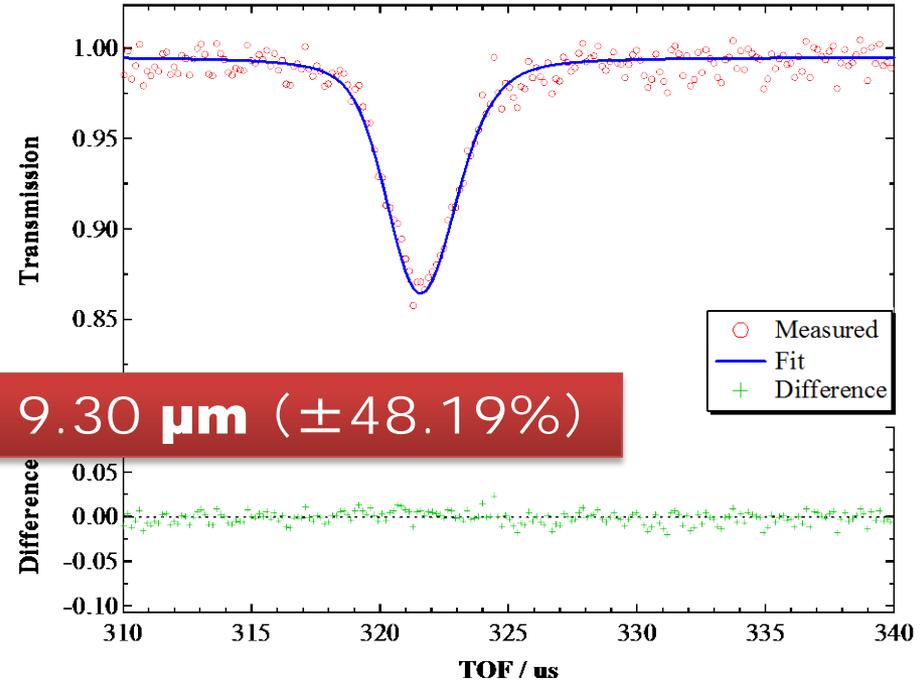
- Doppler拡がりのモデルが簡易な理想ガスモデル
- パルス関数の精度の問題

REFITによるフィッティング (10.38 eV)

REFIT (Cole-Windsor関数)



オリジナルREFIT



10 μm 厚タンタルの中性子透過率スペクトルと
REFITによるフィッティング (10.36 eV共鳴)

4.28eV共鳴へのフィッティングに比べて誤差が大きい

➤ 実験データの点数及び誤差の影響

まとめ

- J-PARC/MLF/BL10のパルス関数はCole-Windsor関数で記述できることが明らかになった。
→BL10のパルス関数を任意のエネルギーで再現可能
- BL10パルス関数を組み込んだREFITコードにより、サンプル厚さ(核種密度)を求めた。
 - 4.28 eV共鳴 : 10.00 μm (誤差 \pm 0.90%)
 - 10.36 eV共鳴 : 10.00 μm (誤差 \pm 5.67%)

共鳴解析において、パルス関数を考慮することで、
高精度での核種密度分析が可能となった。

付録

改造REFITによる透過率スペクトルの計算

透過率を計算した場合、オリジナルのREFIT (Ikeda-Carpenter関数) と改造REFIT (Cole-Windsor関数) を比較すると、試料厚さが同じでもオリジナルREFITの方が透過率が低くなる。

→オリジナルREFITでは核種密度を低く見積もってしまう。

