



北海道大学  
HOKKAIDO UNIVERSITY



H28年度中性子イメージング専門研究会  
H29/1/6、KURRI

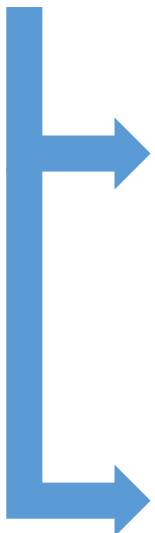
# 北海道大学における パルス中性子イメージング研究の展開

(北海道大学) 加美山 隆、佐藤 博隆、上地 将斗、  
長谷美 宏幸、佐々木 司、古坂 道弘

# 北海道大学の小型加速器中性子源－HUNS

- ▶ 45MeV電子線ライナック(1次ビーム)
  - 1973年完成～40年以上稼働
  - 34MeV, 33 $\mu$ Aの電子ビーム～1kW
  - 本体のリプレースに向けて活動中。

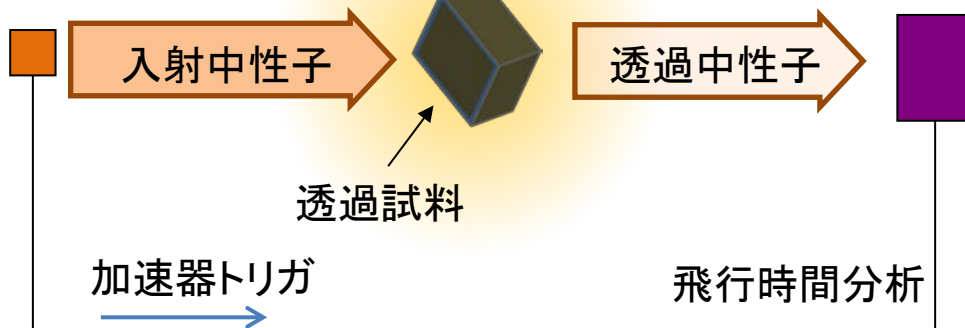


- 
- ▶ 冷中性子源
    - 結合型冷中性子源
    - メシチレンモデレータで稼働中(温度～20K)。
    - SANS、ブラッグエッジイメージング等に利用。
  - ▶ 熱中性子源
    - 結合型熱中性子源
    - X線ターゲットと遠隔操作切り替え式
    - 複合ラジオグラフィ、共鳴吸収分光等に利用。

# HUNSのイメージング研究

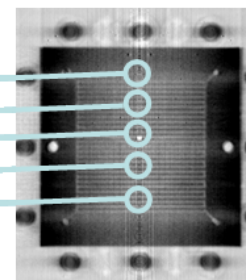
## パルス中性子イメージング

パルス線源



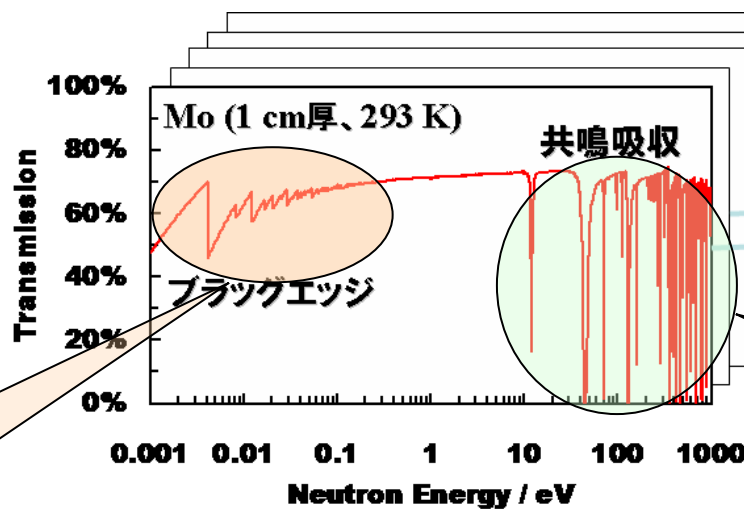
2次元検出器

中性子/光変換型  
または  
ガス検出器等



位置毎の  
スペクトル

イメージング  
対象物



**ブレイクエッジ  
イメージング**  
結晶組織分布、歪

**共鳴吸収イメージング**  
核種毎の存在量、ダイナミクス

# 本日のトピックス

- 1. 小型加速器中性子源の高分解能化(佐々木、佐藤、古坂)**  
非結合型モデレータによるエネルギー分解能の改善
- 2. ブラッグエッジ解析コードRITSの改良(佐藤)**  
結晶子サイズの評価値の改善
- 3. 中性子共鳴吸収分光法による稼働中機械部品の温度測定**

# 1. 小型加速器中性子源の高分解能化

# 非結合型+前置減速材の特性

結合型

前置減速材(ポリエチレン) 1.5 cm厚

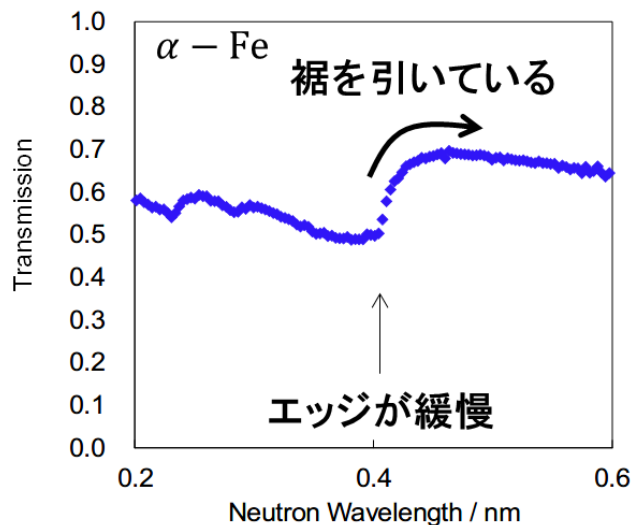
減速材(固体メタン)

厚さ: 5 cm  
高さ: 10 cm  
幅: 10 cm

ビームライン

ターゲット(鉛) 7 cm角

メタン 結合型



新型

## 非結合型+前置減速材

前置減速材(ポリエチレン) 1cm × 0.5cm × 0.5cm

減速材(ポリエチレン)

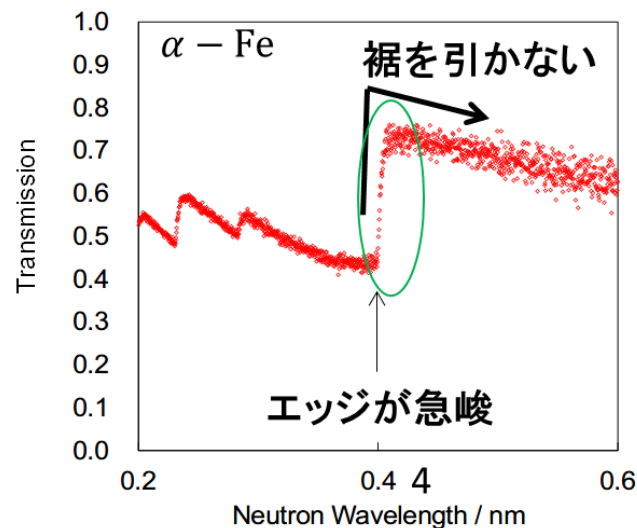
厚さ: 3 cm  
高さ: 10 cm  
幅: 10 cm

中性子吸収体(カドミウム)

ビームライン

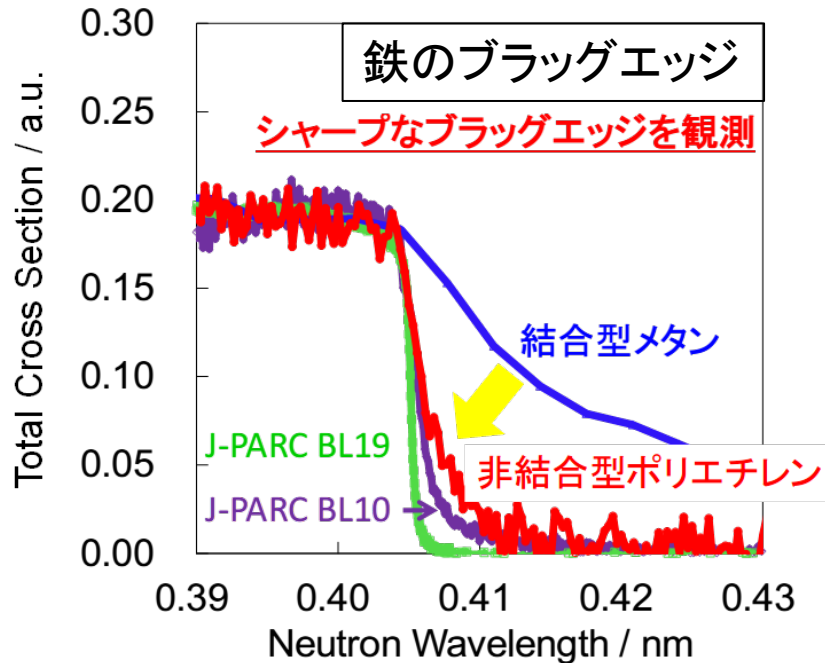
ターゲット(鉛) 7 cm角

ポリエチレン 非結合型+前置減速材



# パルスのFWHM及び波長分解能の比較

＜結合型メタンモデレータ v.s. 非結合型ポリエチレンモデレータ＞



	J-PARC MLF BL19 (匠)	J-PARC MLF BL10 (NOBORU)	HUNS 非結合型 ポリエチレン	HUNS 結合型 メタン
放出時間パルス 半値幅 $\Delta t$ [ $\mu$ s]	30	50	35	168
減速材種類	ポイズン型	非結合型	非結合型	結合型
飛行距離 [m]	40.1	14.5	6.72	6.04
波長分解能	0.16%	0.35%	0.51%	2.65%

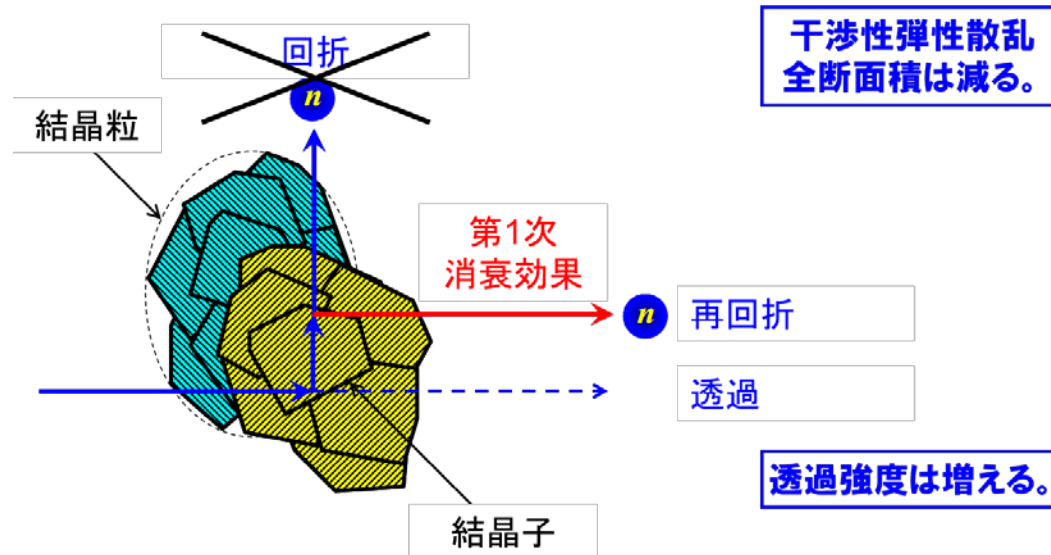
小型加速器線源でも0.51%の波長分解能を達成  
→ スーパーミラーとの組み合わせで強度低下を補う必要あり

## 2. ブラッグエッジ解析コードRITSの改良



# RITSの課題：結晶子サイズの過大評価

## RITSコードによるブラッグエッジスペクトルの解析 第1次消衰効果 $\leftrightarrow$ 結晶子サイズ



中性子透過法 (RITS) の結晶子サイズ  
= **1.55** × 中性子回折法 (Rietveld解析法) の結晶子サイズ

(H. Sato, *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A **651** (2011) 216-220.)

なぜか？

# 「結晶構造因子」の定義の変更 (原子物理の定義から結晶学の定義へ)

干渉性弾性散乱全断面積(1 原子当たり)

$$\sigma_{\text{ela}}^{\text{coh}}(\lambda) = \frac{\lambda^2}{2V_0} \sum_{hkl} |F_{hkl}|^2 d_{hkl} R_{hkl}(\lambda) P_{hkl}(\lambda) E_{hkl}(\lambda)$$



- 従来のRITS: 1 原子当たり
  - Rietveld解析法: 1 単位胞当たり
  - 現在のRITS: 1 単位胞当たり
- (全断面積は最後に1 原子当りに規格化される。)



変更

Sabineの第1次消衰効果関数 (< 1.0)

$$E_{hkl}(\lambda) = E_L(X) \cos^2 \theta_{hkl} + E_B(X) \sin^2 \theta_{hkl}$$

$$X = \left( \frac{\lambda F_{hkl} S}{V_0} \right)^2$$

$F_{hkl}$  の定義の変更は、  
結晶子サイズの値に  
影響する！

- $\lambda$ : 中性子の波長
- $V_0$ : 単位胞の体積
- $hkl$ : 回折のミラー指数
- $F_{hkl}$ : 結晶構造因子
- $d_{hkl}$ : 結晶格子面間隔
- $R_{hkl}$ : エッジプロファイル関数
- $P_{hkl}$ : 選択配向関数
- $\theta_{hkl}$ : ブラッグ角
- $S$ : 結晶子サイズ

同じ  $F_{hkl} \times S$  (消衰効果) では、  
 $F_{hkl}$  が大きくなるので、  
 $S$  (結晶子サイズ) は小さくなる。

# 再解析の結果

詳細な実験・解析の情報は以下の論文を参照

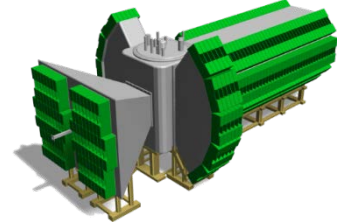
H. Sato, *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A **651** (2011) 216-220.

## 透過データ

- HUNS (Hokkaido Univ. Neutron Source) で測定
- RITSで解析
- 4種類の $\alpha$ -Fe (**BCC**) 試料

## 回折データ

- J-PARC MLF BL20 “iMATERIA” で測定
- Z-Rietveldで解析
- 同じ試料を測定・解析



## 新旧RITSならびにZ-Rietveldの解析結果の比較

	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Average
Previous RITS	4.25 $\mu\text{m}$ (151%)	5.31 $\mu\text{m}$ (158%)	3.25 $\mu\text{m}$ (157%)	3.83 $\mu\text{m}$ (156%)	4.16 $\mu\text{m}$ (155%)
Present RITS	3.01 $\mu\text{m}$ (107%)	3.77 $\mu\text{m}$ (112%)	2.30 $\mu\text{m}$ (111%)	2.70 $\mu\text{m}$ (110%)	2.94 $\mu\text{m}$ (110%)
Z-Rietveld	2.81 $\mu\text{m}$	3.37 $\mu\text{m}$	2.07 $\mu\text{m}$	2.46 $\mu\text{m}$	2.68 $\mu\text{m}$

(BCCの場合)RITSで得られた結晶子サイズは、  
回折法で得られる結晶子サイズの **155%** から **110%** に改善

### **3. 中性子共鳴吸収分光法による 稼働中機械部品の温度測定**

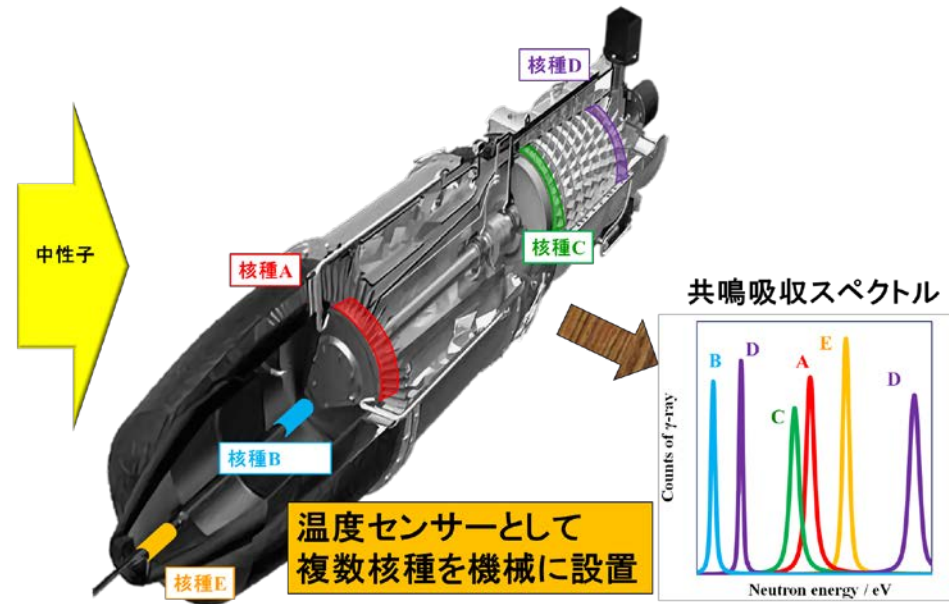
# 動作している機械部品の温度測定

- ・軸受の寿命は、温度が $15^{\circ}\text{C}$ 上昇するごとに半減する。
- ・絶縁材料の寿命は、温度が $10^{\circ}\text{C}$ 上昇するごとに半減する。

既存の方法では稼働中機械内部の温度分布や部品毎の温度を測定できない。



- ✓ 高速で回転
- ✓ 部品点数が多い
- ✓ 構造が複雑



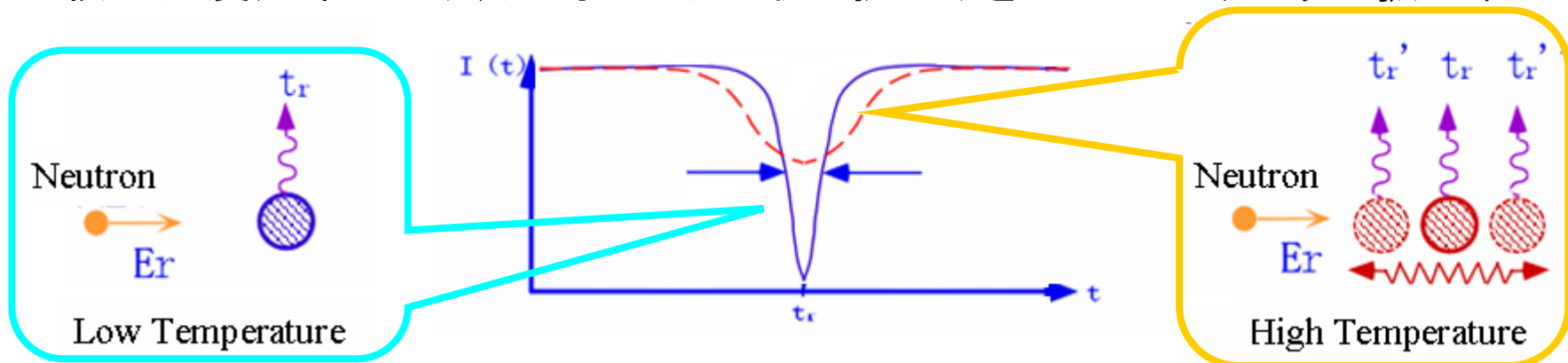
## 即発 $\gamma$ 線型中性子共鳴吸収分光法による温度測定

・・・中性子の高い透過力を利用して

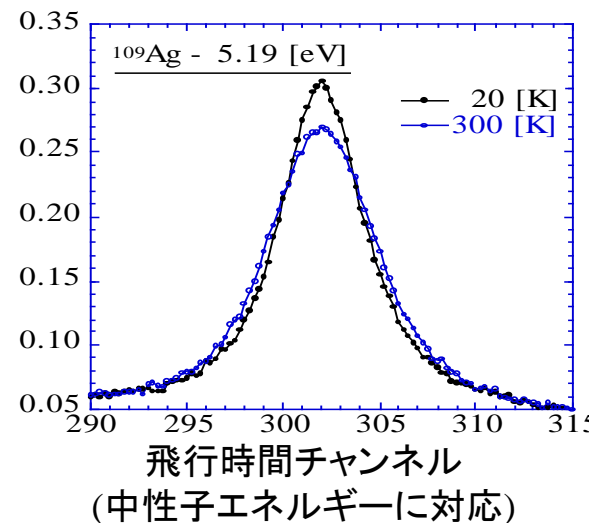
**物体内部**の温度を**非破壊・非接触**で測定可能。

# 中性子共鳴吸収分光法 N-RAS

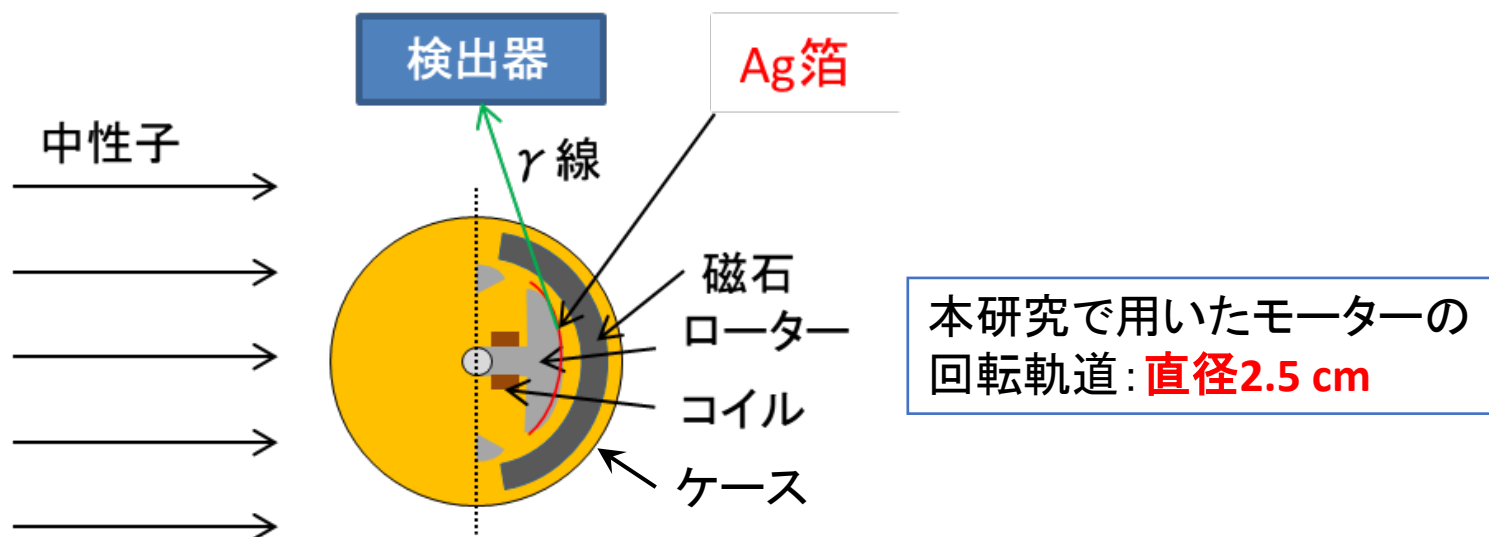
中性子共鳴吸収時に核に付与されるエネルギー → 両者の相対速度により決まる。  
原子核の速度分布により、共鳴ピーク形状も広がりをもち = ドップラー広がり



- 共鳴エネルギーは、核種により固有の値を持つ  
= 混合物中においても**特定核種を選択的に観測可能**
- ピーク線幅の解析で、核種毎の運動状態が解析できる  
= **温度計**として利用可能
- 複合核崩壊の際に即発  $\gamma$  線を放出。  
= 即発  $\gamma$  線のカウンタで共鳴吸収を測定できる →



# 回転部品の温度測定における課題



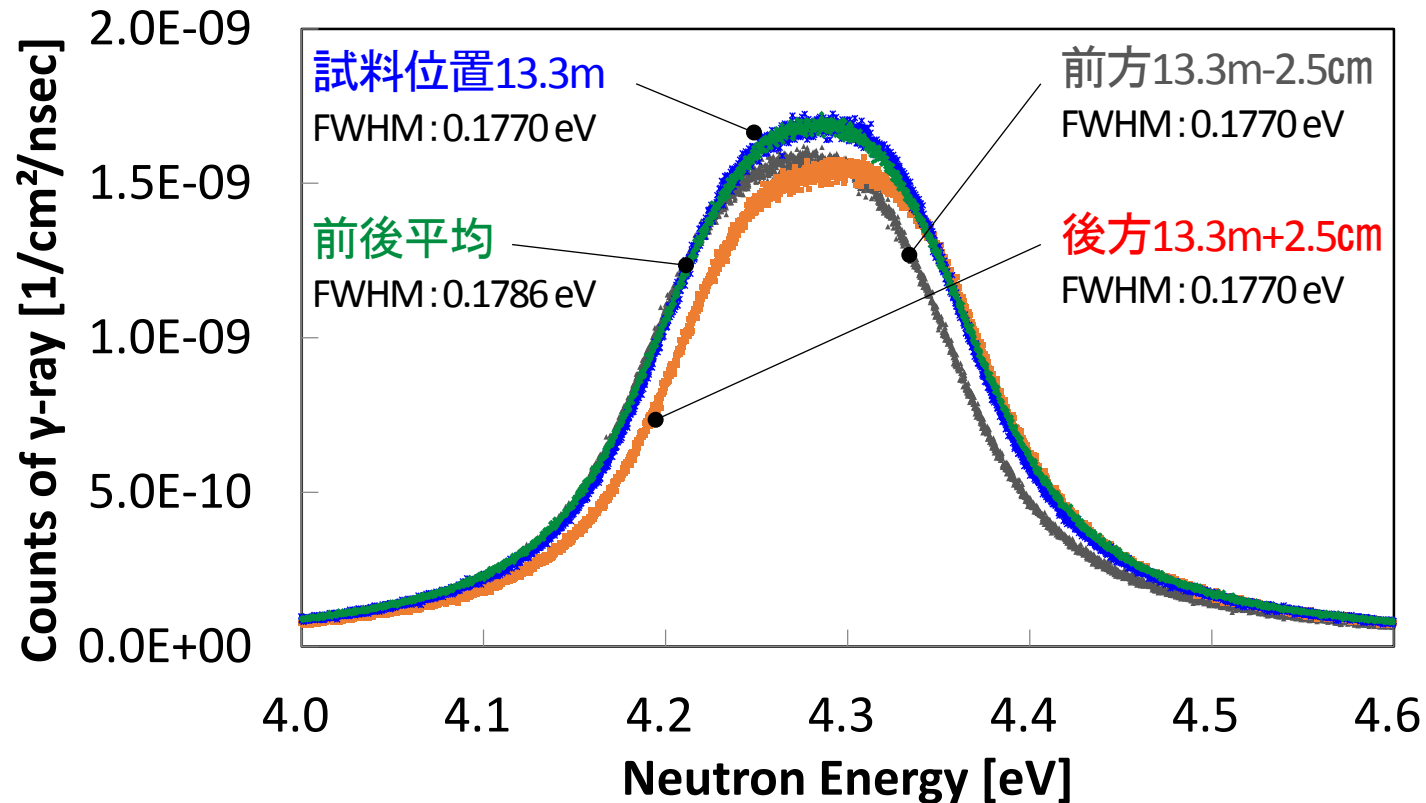
温度以外に共鳴吸収ピーク形状を変化させる要因

モーターの回転に伴う核種の位置変動

- (1) 核種位置の飛行距離の変化(即発 $\gamma$ 型に特有)
- (2) 核種の実効厚さの変化

# (1) 飛行距離の変化が温度測定に及ぼす影響

PHITSによるTa-181箔の共鳴吸収シミュレーション

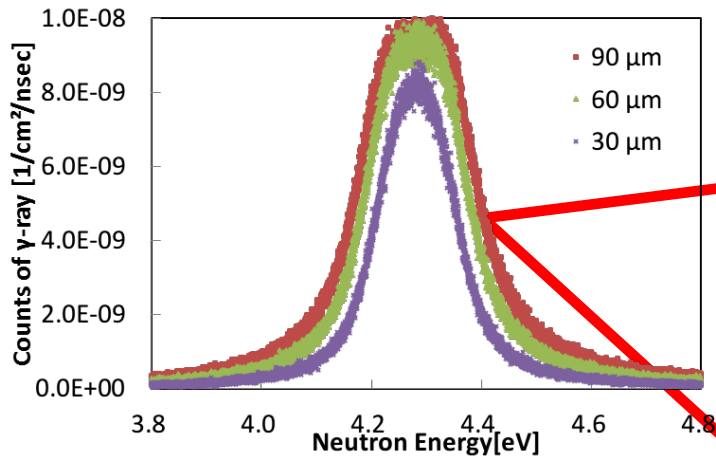


回転中心に対称なスペクトルの平均で近似可能

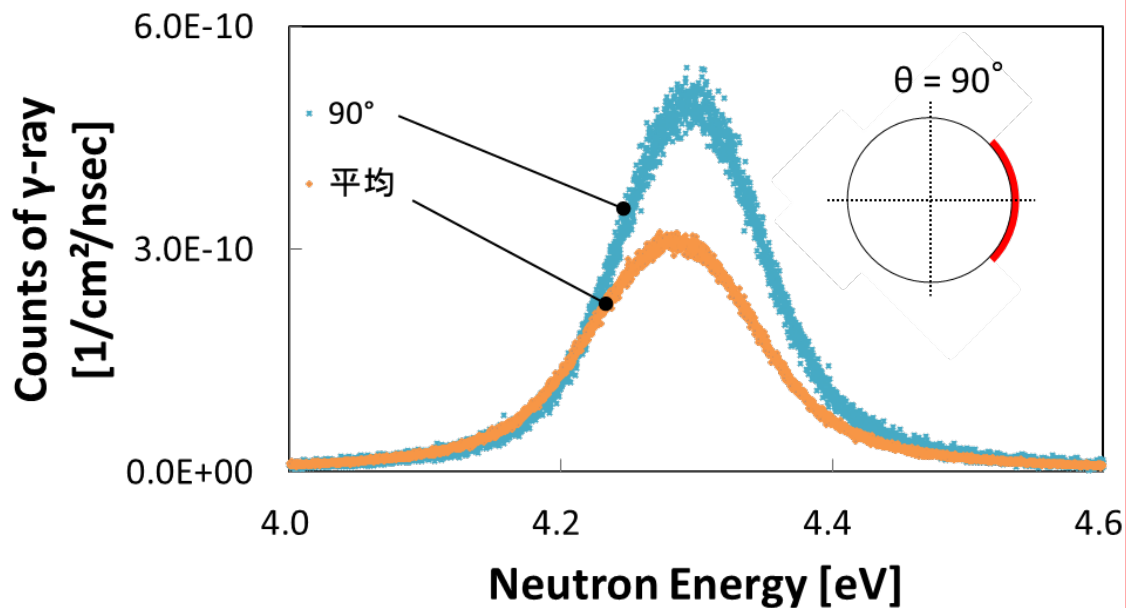


## (2) 実効厚さの変化が温度測定に及ぼす影響

共鳴吸収ピークの箔厚による変化



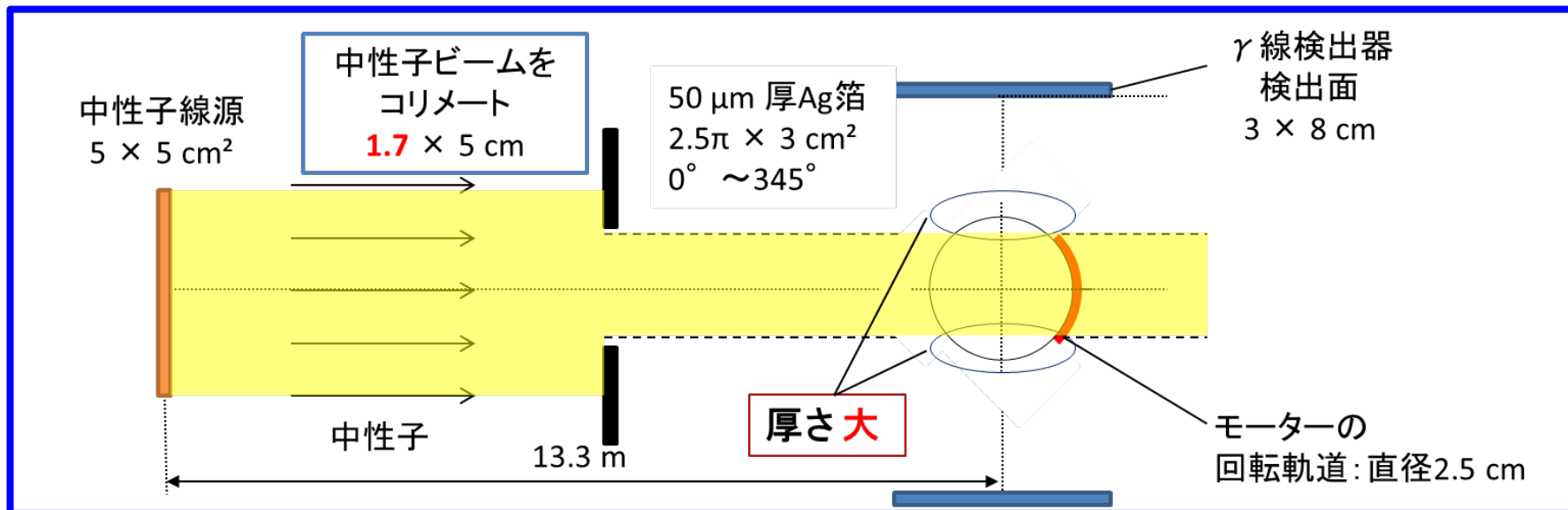
箔が回転している場合と  
回転していない場合の比較



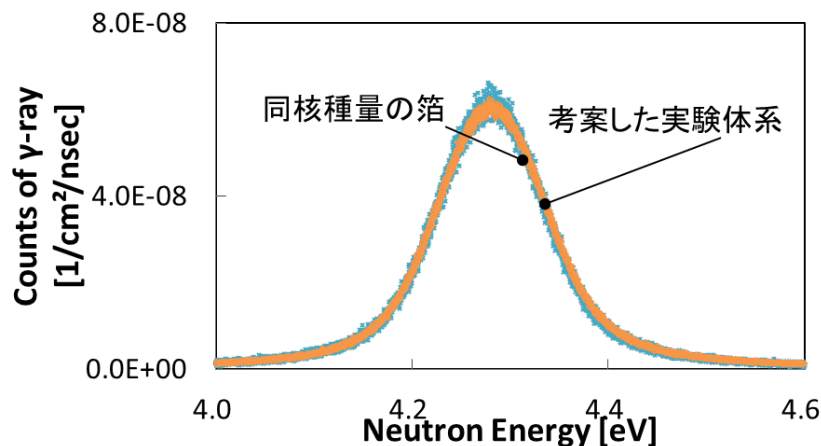
スペクトルの平均(回転している場合)は、REFITによる解析結果で**63 K**の誤差を生じる。

- 平均: 1回転分の箔の共鳴吸収スペクトルを平均
- 90°: 実効厚さが最も薄い位置

# 回転体の温度測定体系



考案した実験体系と同核種量の箔での共鳴吸収ピークの比較(シミュレーション)



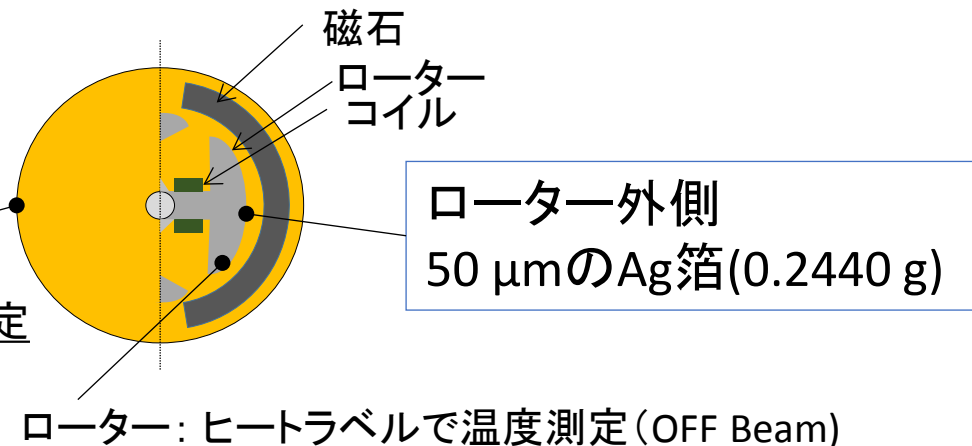
REFITによる解析結果  
(試料温度 = 298 K、Ta箔)

同核種量の箔: 298.44 K  
考案した実験体系: 300.40 K

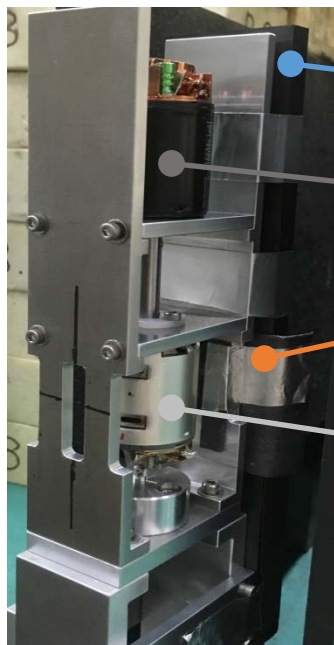
# 回転部品温度測定実験 (@HUNS)

- 試料: 模型用モーター  
ローター外径=50mm

モーターケース外側: 熱電対で測温度定



- モーター固定台



・ $\text{B}_4\text{C}$ 焼結材(厚さ10 mm)  
中性子ビームをコリメート(幅9mm、高さ21mm)

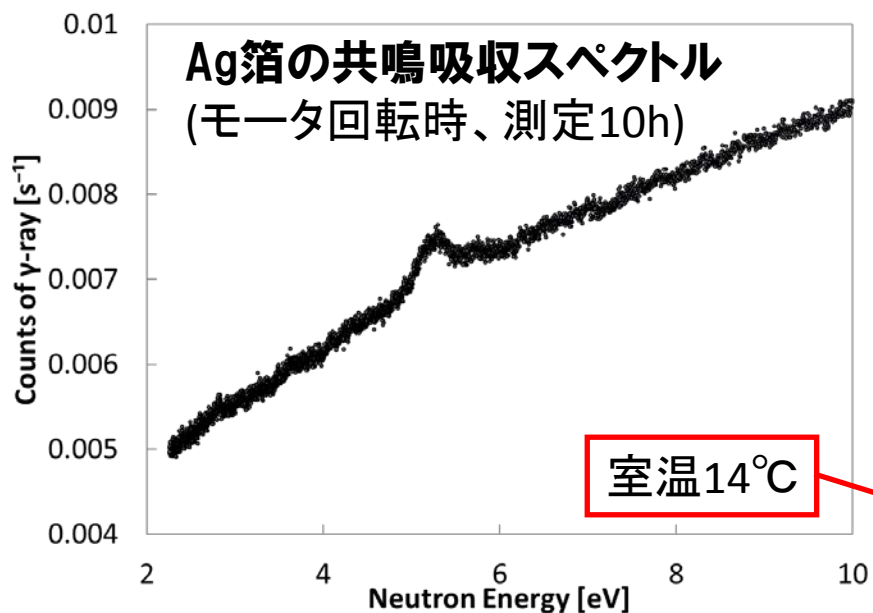
・室温測定用補助モーター

・鉛(厚さ0.2 cm)  
 $\text{B}_4\text{C}$ から検出器に入る即発 $\gamma$ 線の遮蔽

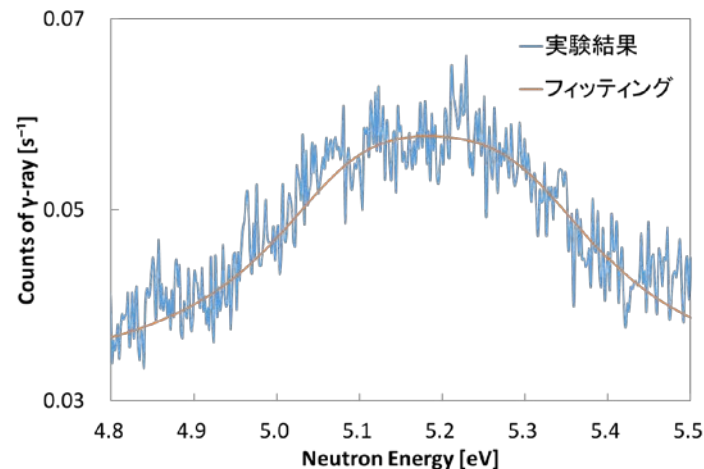
・試料用モーター

- 測定時室温 $\sim 14^\circ\text{C}$
- モーター回転時ケース温度 $\sim 45^\circ\text{C}$

# 温度測定結果



## REFITによるフィッティング



室温を再現する  
ように厚さを補正

モーター電源	REFITフィッティング値 [°C]		ヒートラベル [°C] (測定誤差±2K)
	核種密度補正前	核種密度補正後	
OFF(停止)	40.1	14.0	—
ON(回転)	98.6	60.8	56.9~61.9

Ag箔の実効厚さ  
51.24 $\mu$ m

補正後の厚さ  
56.37 $\mu$ m

# まとめ

北海道大学の中性子源HUNSでは、冷・熱中性子源が継続的にパルス中性子イメージング研究に利用されている。

最近の成果として、

- ・モデレータの非結合化により、エネルギー分解能が格段に向上することを確認した。
- ・ブラッグエッジスペクトル解析コードRITSの改良により、結晶子サイズの評価値が回折法と一致するようになった。
- ・回転運動部品の中性子共鳴吸収分光法による温度測定に成功した。