



令和2年度 中性子イメージング専門研究会 於 オンライン(京大 複合研)

北大における2020年度の 波長分解型中性子イメージング研究

佐藤 博隆， 加美山 隆

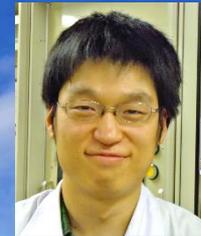
北海道大学 大学院工学研究院 応用量子科学部門
中性子ビーム応用理工学研究室

コロナ禍と修理工事(後述)のため、
半年間の停止期間がありました。

Part ①

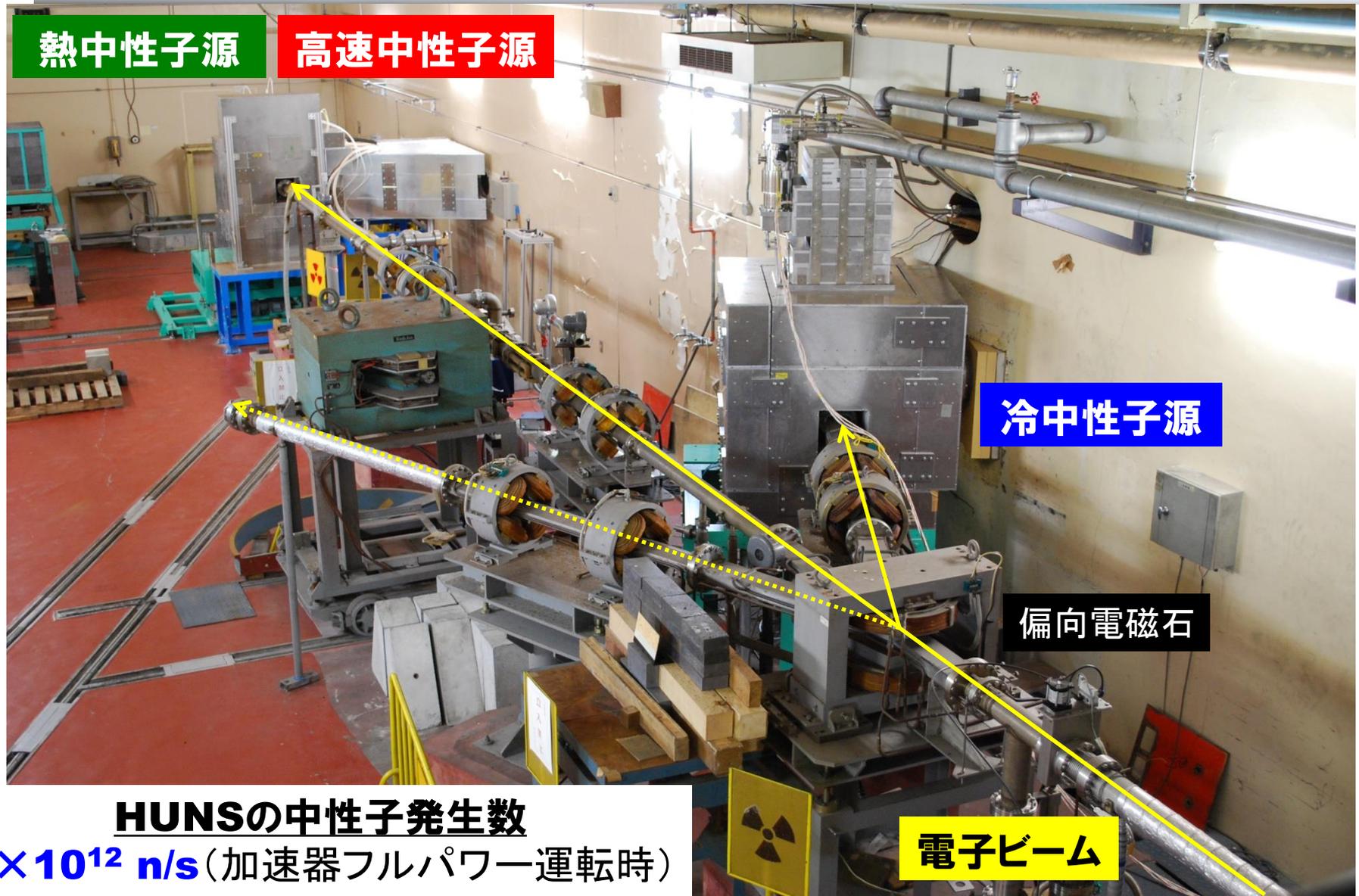
北大電子加速器駆動パルス中性子源 Hokkaido University Neutron Source “HUNS”のアップグレード

施設長：加美山 隆
技術職員：長倉 宏樹、佐藤 孝一



加速器駆動パルス中性子源「HUNS」

→ TOF法による白色中性子の波長分解が可能



熱中性子源

高速中性子源

冷中性子源

偏向電磁石

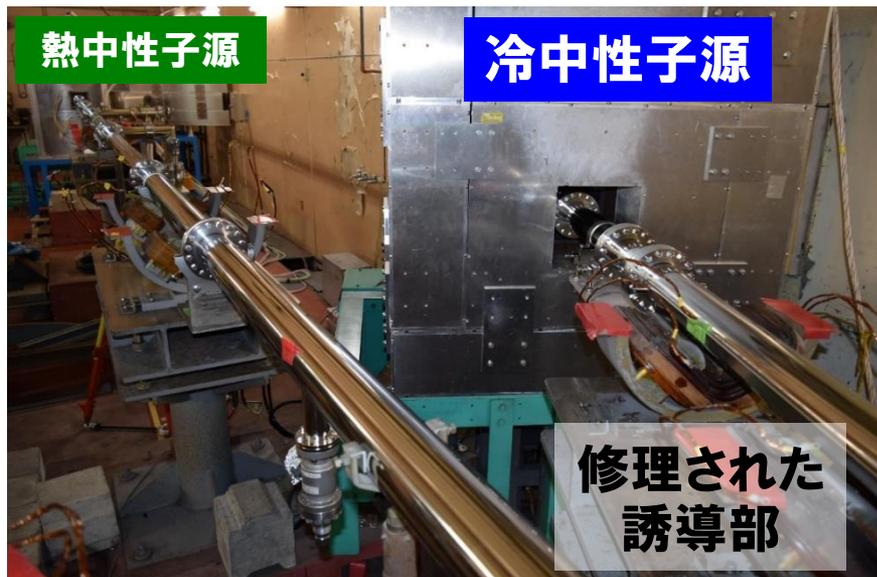
電子ビーム

HUNSの中性子発生数

5×10^{12} n/s (加速器フルパワー運転時)

電子ビーム誘導部の 北海道胆振東部地震からの復旧工事

修理された誘導部



誘導部のBaking (管内ガス出し)



復旧工事により、
加速器と中性子源をつなぐ電子ビーム誘導部の
真空度が復旧 (約 10^{-8} Pa)

→ 電子ビームの中性子源到達率の向上 (約4%向上)

HUNSの研究利用実験

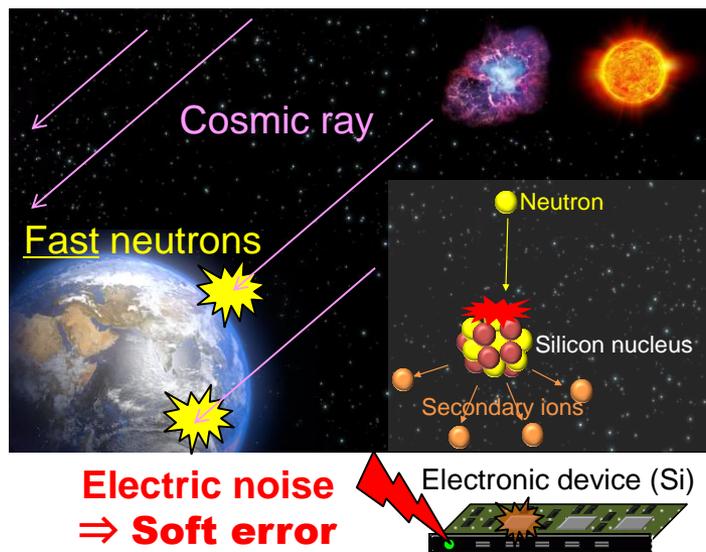
教育利用に関しては、KEK連携講座や国際原子力人材育成イニシアティブ事業などが進行中。

① パルス中性子小角散乱実験 @ 冷中性子源

- ✓ 結合型**固体メタン減速材**(最高性能の冷減速材)使用

② 中性子ソフトエラー実験 @ 高速中性子源

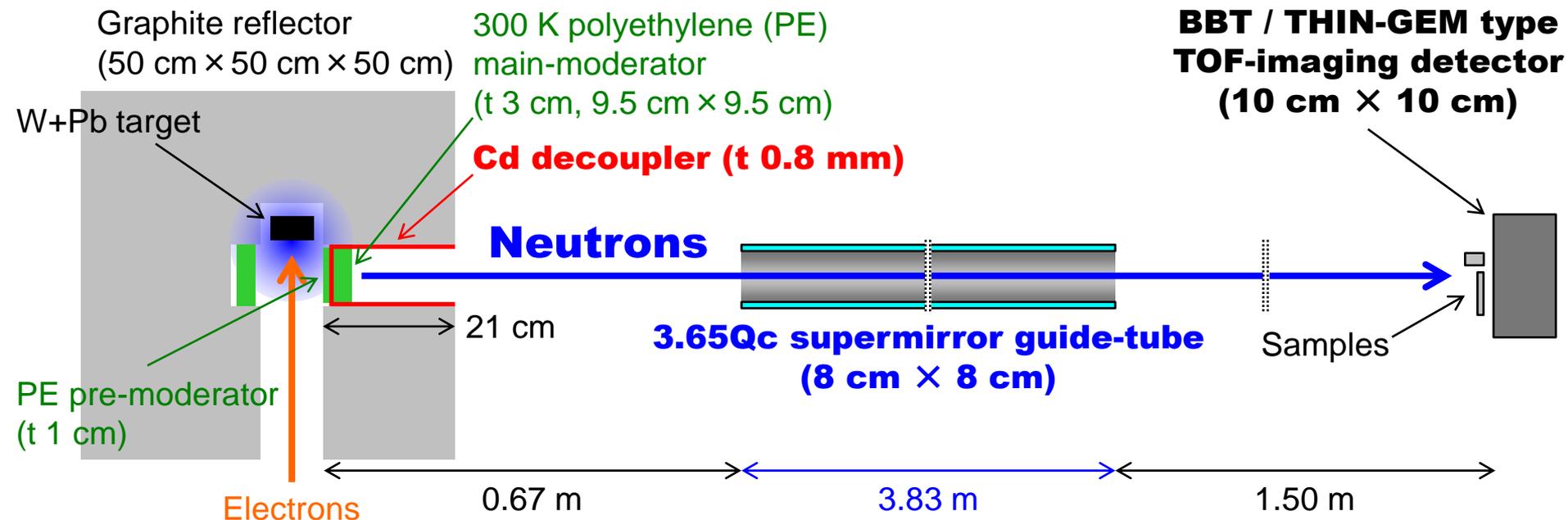
- ✓ 多くの民間企業からユーザー



③ パルス中性子イメージング実験 @ 熱中性子源

パルス熱中性子ビームライン (中性子飛行距離:約 6 m)

非結合型減速材(短パルス)モードの体系図



最近の改良点や明らかになったこと

- ① 中性子発生ターゲットの耐熱性の向上 → フルパワーでの加速器運転が可能
- ② 中性子発生ターゲットと減速材のカップリング改善
- ③ 中性子束 $1.3 \times 10^4 \text{ n/cm}^2/\text{s}$ を確認 (1 eV以下、加速器出力50%、上記体系)
- ④ 高検出効率タイプ(低効率タイプの約2.3倍の効率)のGEM型検出器の修理

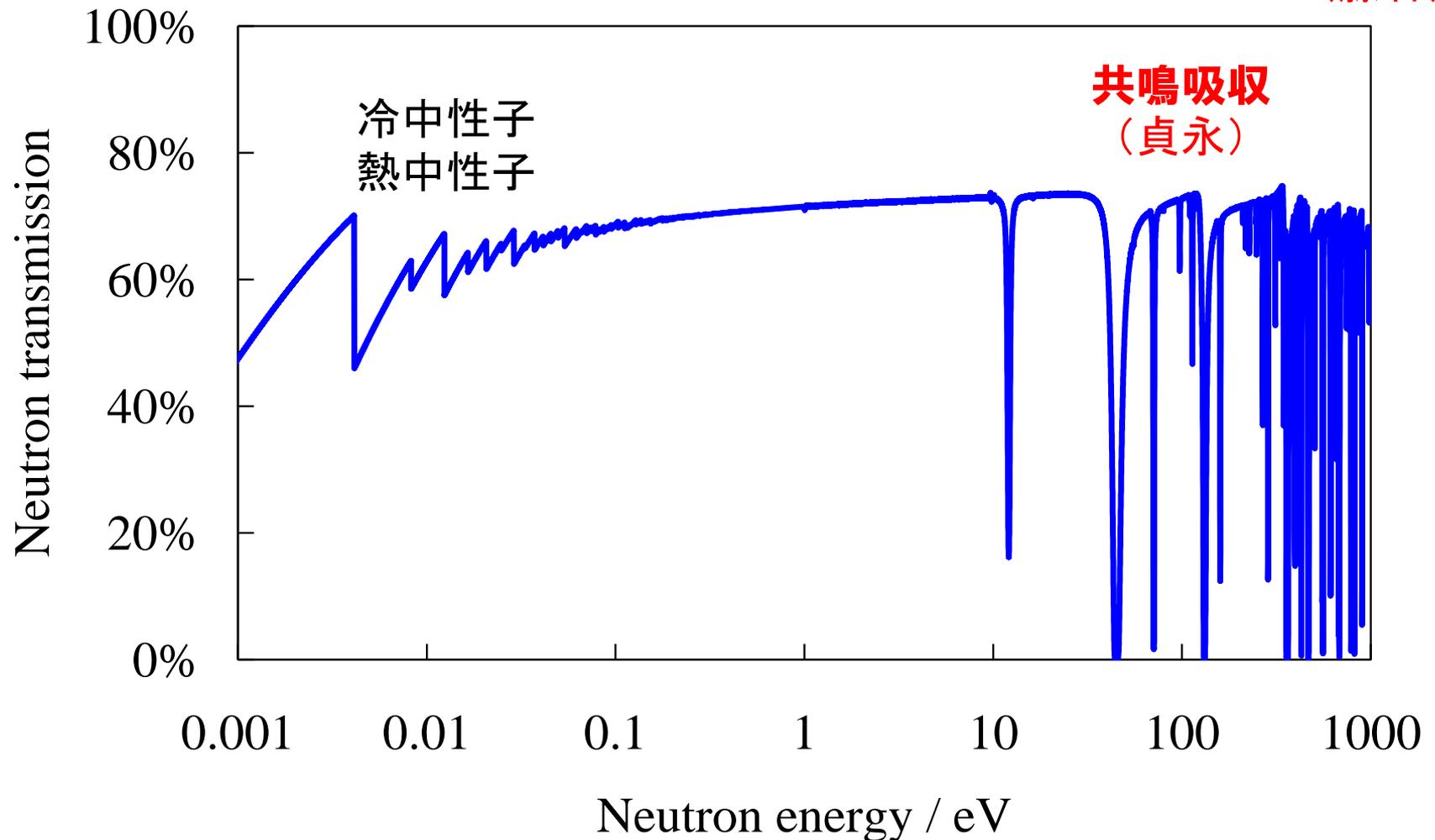
Part ②

波長分解型中性子イメージングに関する 最近の研究（開発研究と応用研究）

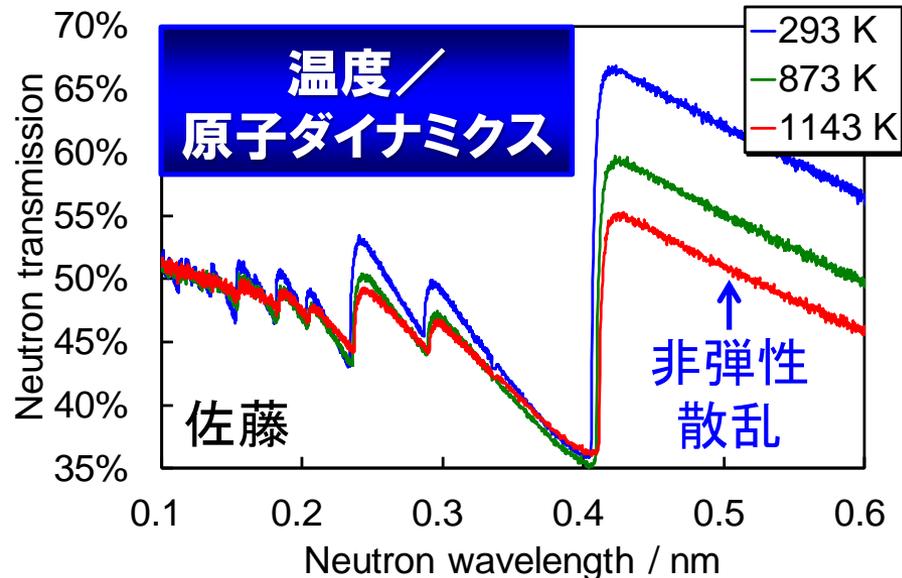
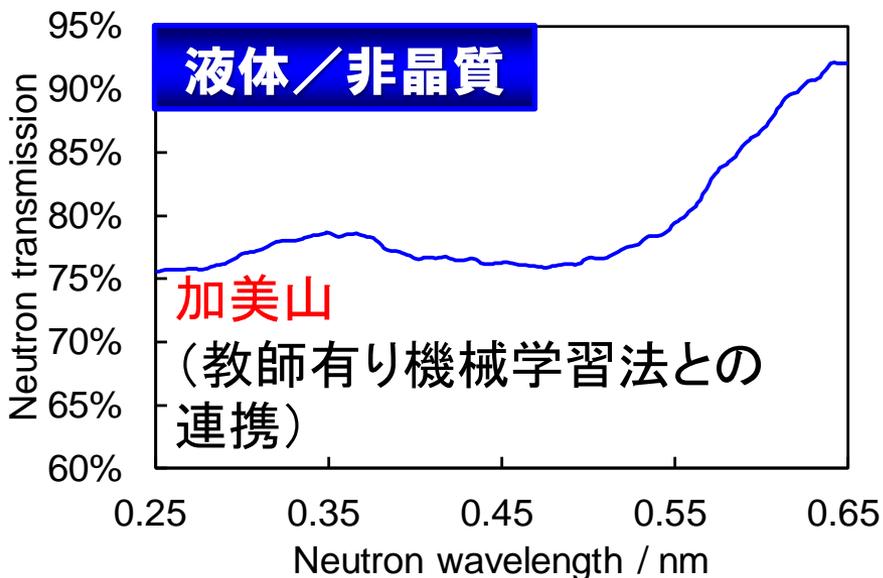
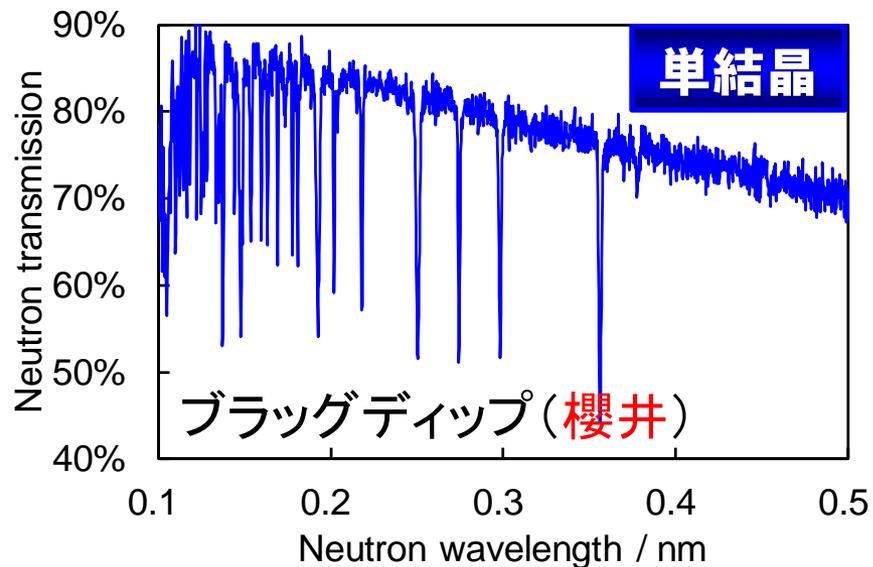
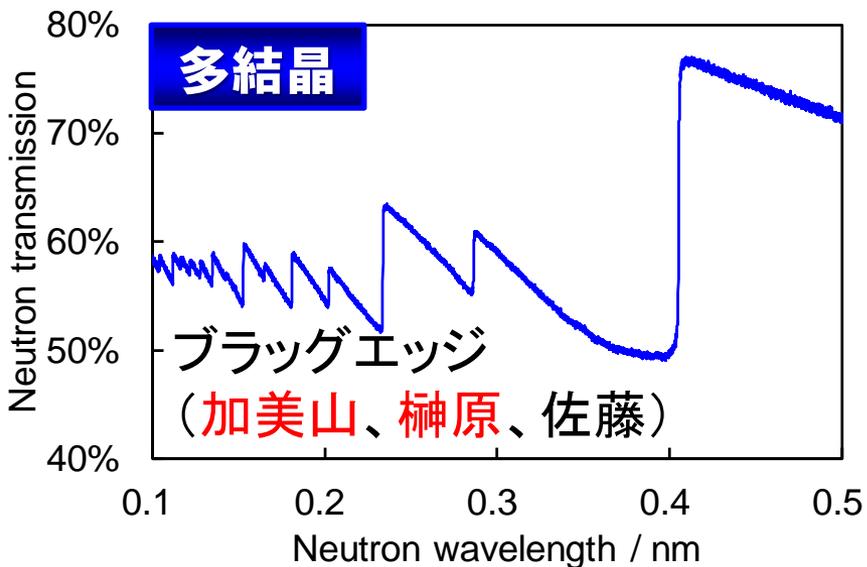
中性子透過率のエネルギー依存性 (中性子透過率スペクトル)

例：厚さ 1 cm のモリブデン

高速中性子
(藤谷)



冷・熱中性子の透過率スペクトル (画素毎に解析 → 物質情報の可視化)



2-1: 中性子非弾性散乱に起因する 長波長側の中性子透過率スペクトル変化の 温度イメージングに向けた解析

北大: 三好 茉奈、佐藤 博隆、加美山 隆

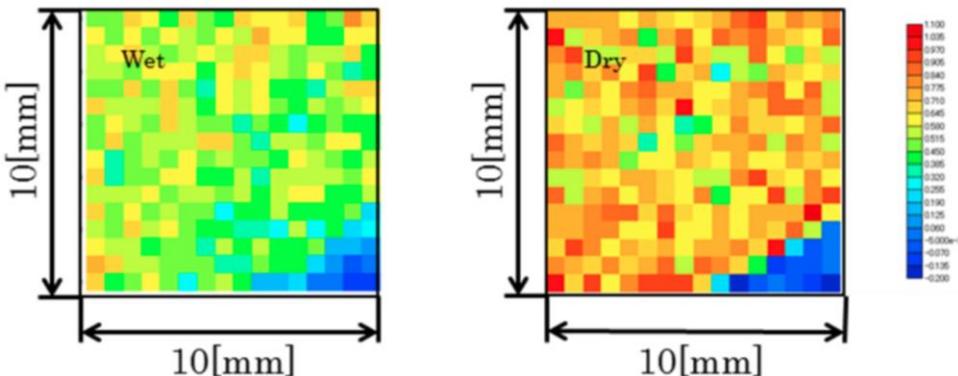
STFC RAL **ISIS**: W. Kockelmann

Coventry Univ.: R.S. Ramadhan、M.E. Fitzpatrick

科研費
KAKENHI

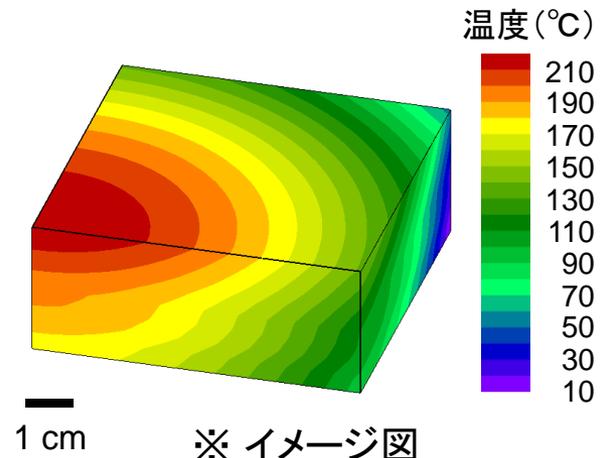
先行研究

セメントペースト中の
水のダイナミクスの可視化



本研究で目指しているもの

中性子共鳴吸収トモグラフィの
経験を活かした温度イメージング

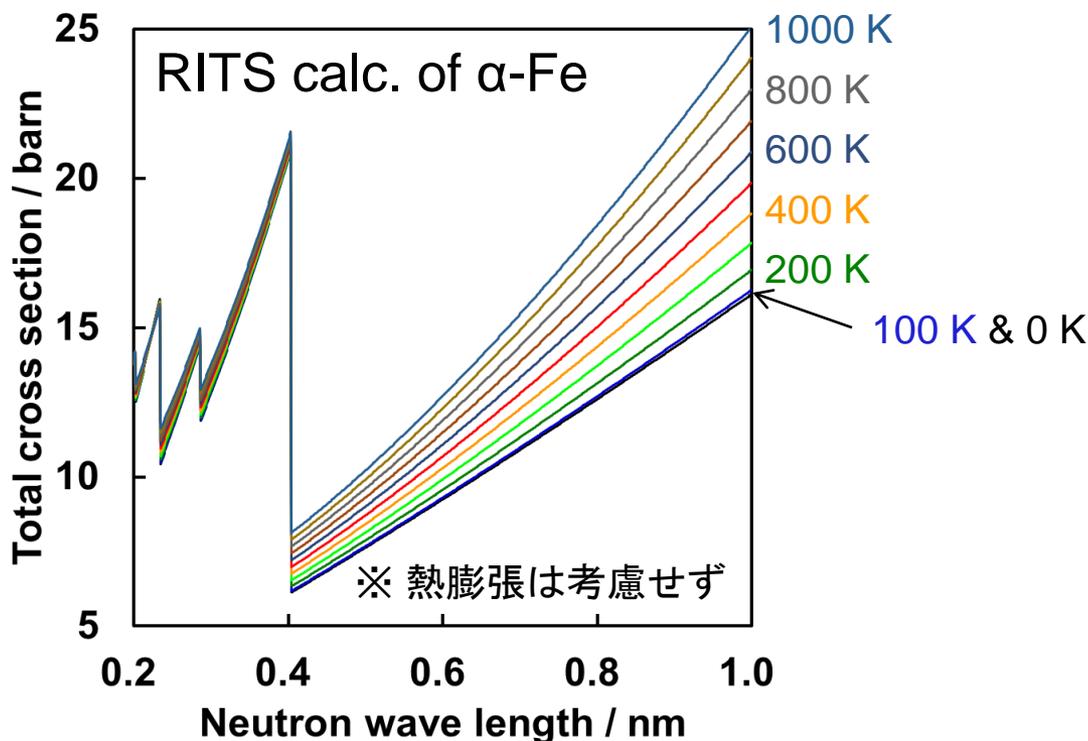


ブラッグエッジ解析プログラム「RITS」の 温度解析への応用

温度解析 / イメージングに向けた本手法のモチベーション

- 熱膨張によるブラッグエッジシフトよりも、長波長側のスペクトル変化が大きい。
- 波長分解能が低くても観測可能 & 長波長中性子の利用 → 高い測定効率

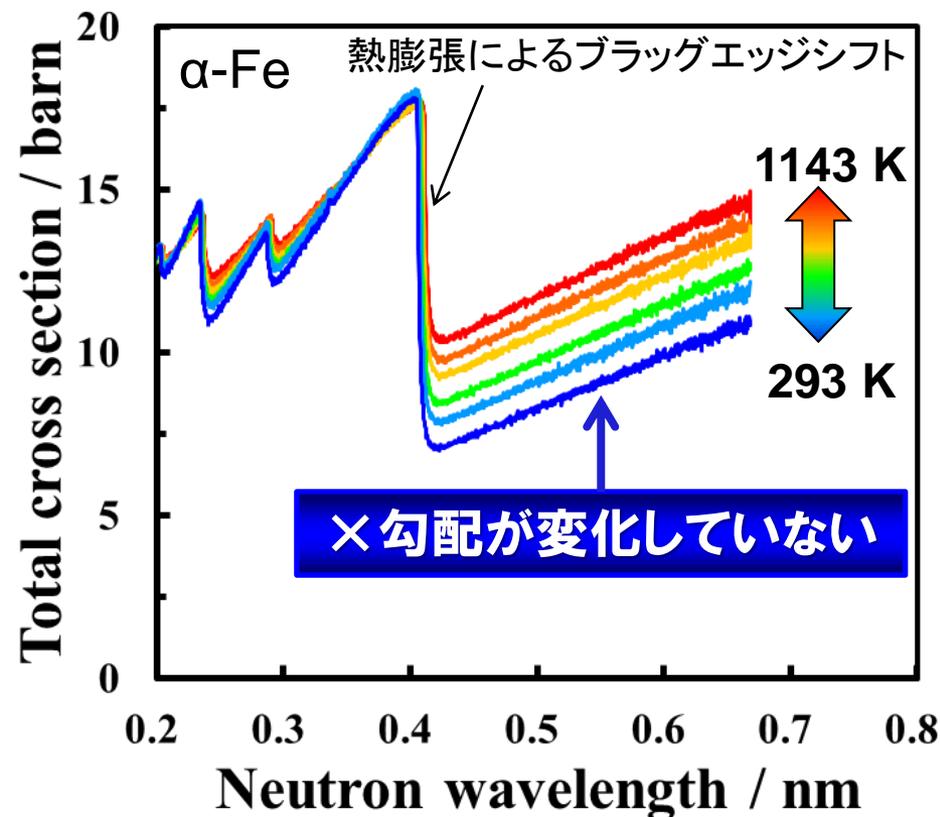
RITSで温度解析
ができるのでは？
by RITS開発者



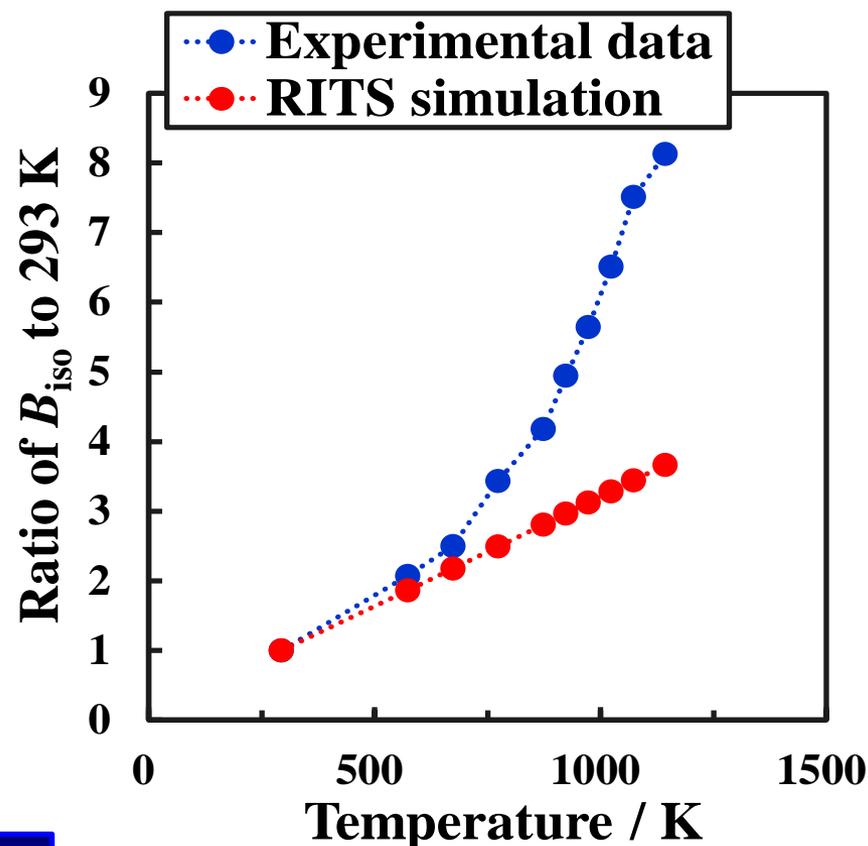
温度依存全断面積の計算で明らかになったこと: 比較的高温向けの手法になり得る

- 100 K以下で変化が小さい。
- 150 K以下では、熱～冷中性子領域の非弾性散乱が負の値として計算される。

ISIS-IMATで測定された冷中性子全断面積から明らかになった課題(今後HUNSで検証)



短波長側の弾性干渉性散乱断面積の解析による原子変位パラメーターの導出



○室温のデータはRITSと一致

○Debye-Waller因子は波長によって不変

現在のRITSそのままでは
温度解析に利用できない

×原子変位パラメーターが
温度に比例していない

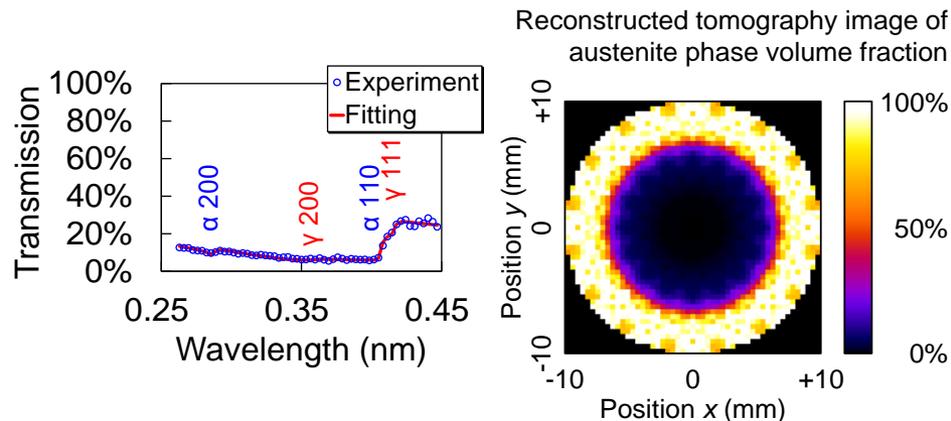
2-2: ダブルブラッグエッジ解析による 複相鋼の結晶相分率解析型イメージング - α 相中 γ 相の場合 -

北大: 鈴木 颯太、佐藤 博隆、加美山 隆



先行研究

RITSによる α 鋼中 γ 相分率のトモグラフィ



RITS解析に苦労

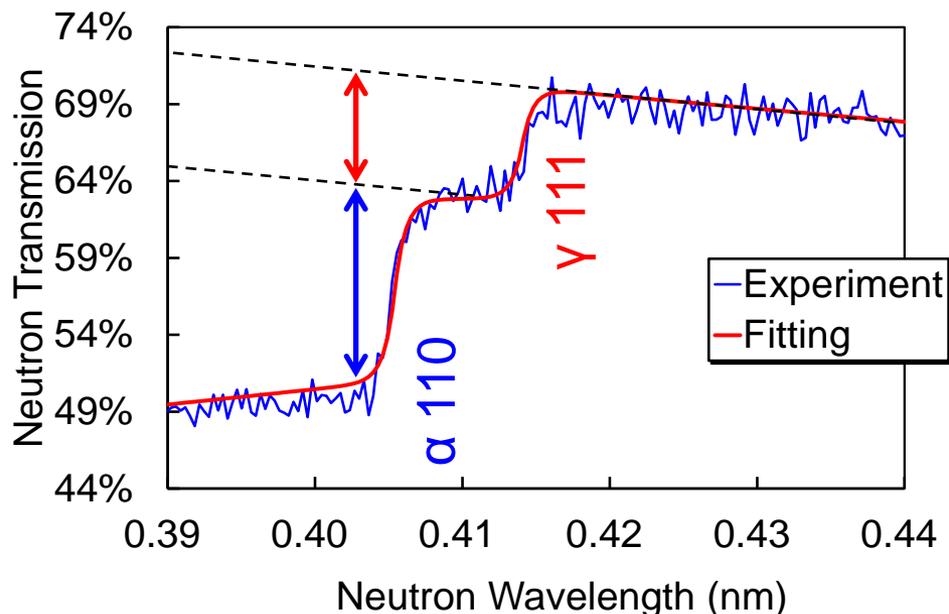
H. Sato, M. Sato, Y.H. Su, T. Shinohara & T. Kamiyama, ISIJ Int. Vol. 61 No. 5 (2021) ???-???. (昨日アクセプト)

ダブルブラッグエッジ解析による 結晶相分率の測定原理と工夫点

J-PARC RADENの実験結果

α (フェライト) / γ (オーステナイト)

下図: 2相共存(50%)のブラッグエッジ



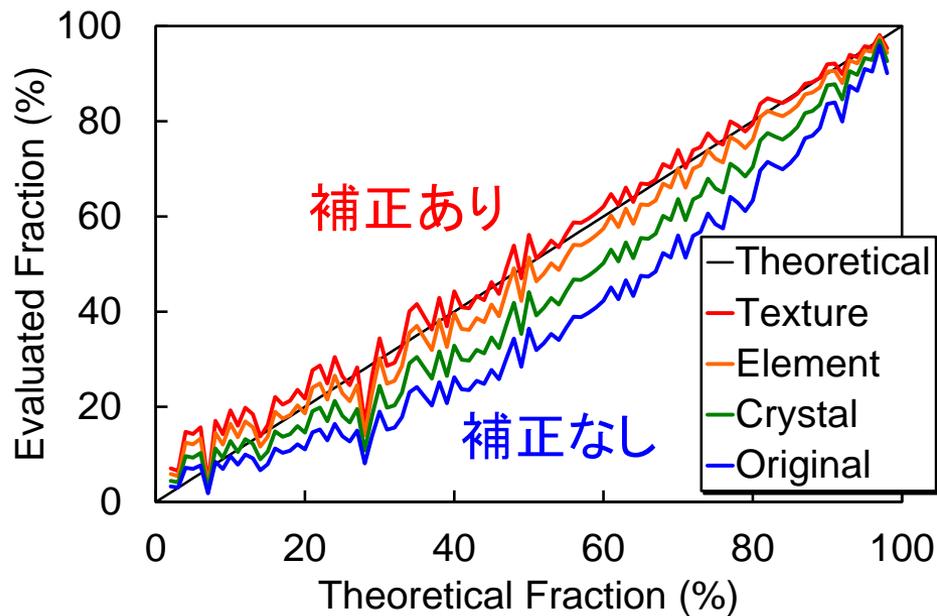
ダブルブラッグエッジプロファイルの
フィッティング解析により
各相のブラッグエッジの比率を導出

↓
各相の比率(分率)を導出

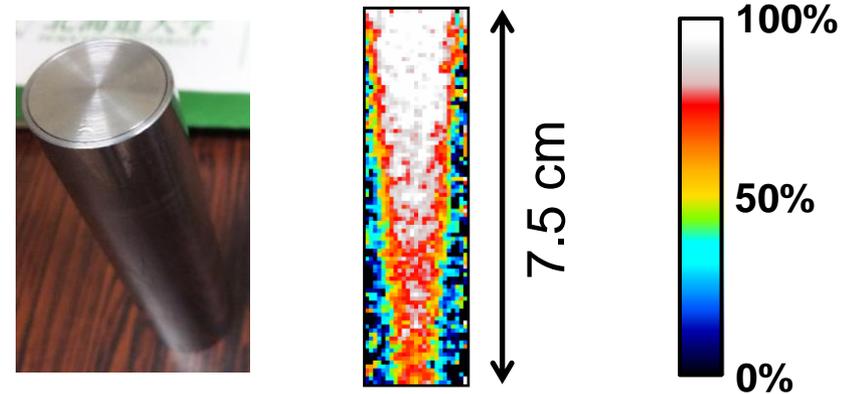
相によるエッジ高さ
(結晶構造・元素・集合組織効果に依存)
の違いを考慮

ダブルブラッグエッジ解析による α 相中 γ 相分率のイメージング

各種補正の効果



α 相と γ 相が組み合わさった鋼棒の γ 相分率イメージング γ 相が内側、 α 相が外側



各種補正を施せば
正確度は高い

RITSより簡単＆
解が一意に定まる

2-3: その他の最近のアクティビティ

教師無し機械学習法「主成分分析(PCA)」の 波長分解型中性子イメージングへの応用

HUNSで測定した 試料の中性子透過率スペクトルをPCA
→ 値を画素毎にプロット

第1主成分

第2主成分

集合組織変化

第1主成分： 試料の厚さと正の相関

第2主成分： **スペクトルが変化している**ことを検知

長所： 人が考えずにスペクトル変化を検知可能

短所： ブラッグエッジ解析の方が高感度で、状態を定量評価可能

簡単にやれるので
・既に「普段使い」状態
・**早期に論文化!**
(海外グループに先を越されないよう注意)

その他、HUNS実験の進捗状況

● 国際共同研究による文理融合研究の進展

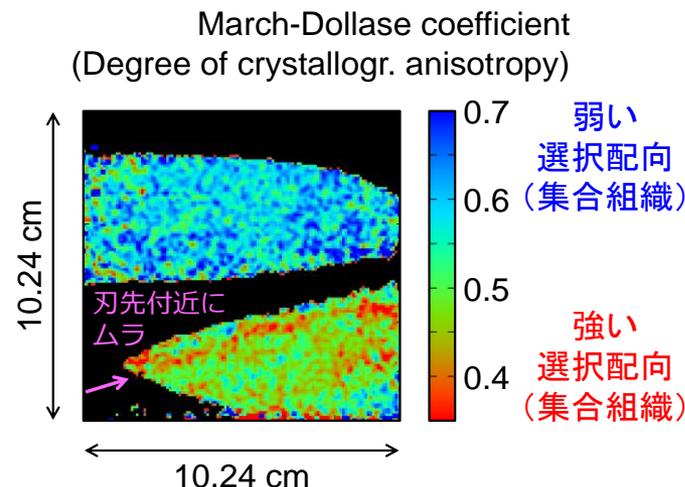
- S.M. Cho *et al.*, Nucl. Eng. Tech., in press. (ダマスカス鋼ナイフ ↓)
- イタリアのDr. Francesco Grazziが
日本学術振興会の外国人研究者招へい事業に採択

● 原子力用材料の 中性子エネルギー依存の遮へい率の測定

- J.Y. Kim *et al.*, Trends in Metals and Mater. Eng. **33** (2020) 36.

● 産学連携

- 鉄鋼材料
- 建築材料



まとめ

① 2020年度のHUNS

- コロナ禍と修理工事(後述)のため半年間の停止
- 電子ビーム誘導部の修理工事 → ビーム電流の向上
- パルス熱中性子源の改造、TOF画像検出器の修理

② 北大における2020年度の波長分解型中性子イメージング研究 (本日この後、5つの報告)

- ダブルブラッグエッジ、ブラッグディップ、液体
- 非弾性散乱を利用した温度イメージング法の開発
- 機械学習などを利用した簡単なデータ解析法の開発
- 熱外中性子を利用した共鳴吸収分光法
- 高速中性子の閾値反応とX線用IP転写イメージングを利用した新しい中性子スペクトル測定法の開発
- 産学連携、国際連携による文理融合などの応用研究