

2023年1月5日

H. Sato, M. Miyoshi, R. S. Ramadhan, W. Kockelmann & T. Kamiyama,
A new thermography using inelastic scattering analysis of wavelength-resolved neutron transmission imaging,
Scientific Reports, 2nd round review in progress.

令和4年度中性子イメージング専門研究会 @ 京都大学複合原子力科学研究所

非弾性散乱に起因する 冷中性子全断面積の温度依存変化を利用した サーモグラフィの開発

○佐藤 博隆¹, **三好 茉奈**¹, R. S. Ramadhan²,
W. Kockelmann³, 加美山 隆¹

¹北海道大学, ²University of Bristol, ³ISIS, RAL, STFC



北海道大学
HOKKAIDO UNIVERSITY



University of
BRISTOL



Science and
Technology
Facilities Council

ISIS Neutron and
Muon Source

研究背景(1/5):

熱対策における内部温度の測定の重要性と課題

工業製品の温度測定の実状

- ・実装状態で内部温度を測定することが重要
- ・非破壊・非接触で温度測定することが重要

従来の温度測定技術では困難



中性子サーモグラフィによる温度イメージング

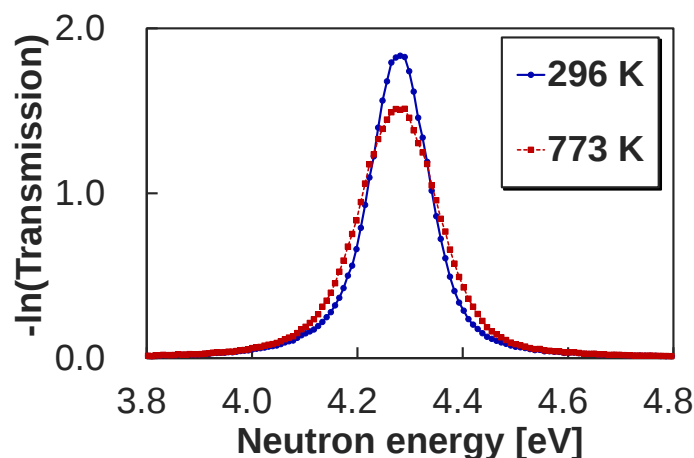
⇒ 物体内部の温度を非破壊非接触的に可視化できる

研究背景(2/5): 既存の中性子サーモグラフィにおける課題

中性子サーモグラフィとは

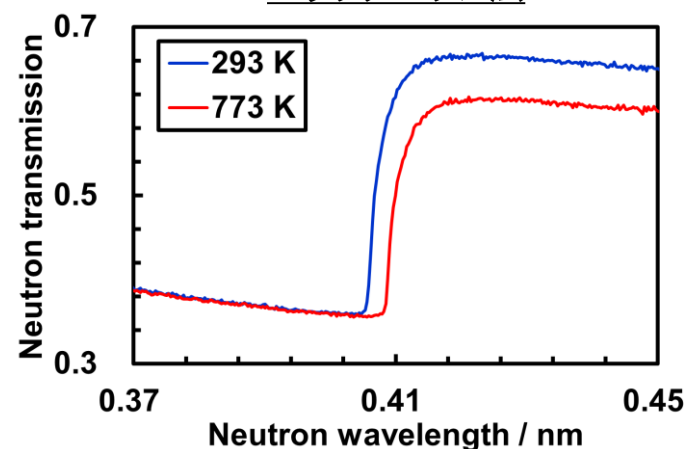
パルス中性子波長分解型透過イメージングを応用した温度測定法

共鳴吸収法[2]



- △重元素物質に限定
- △高エネルギーのeV中性子を利用

ブラッグエッジ法

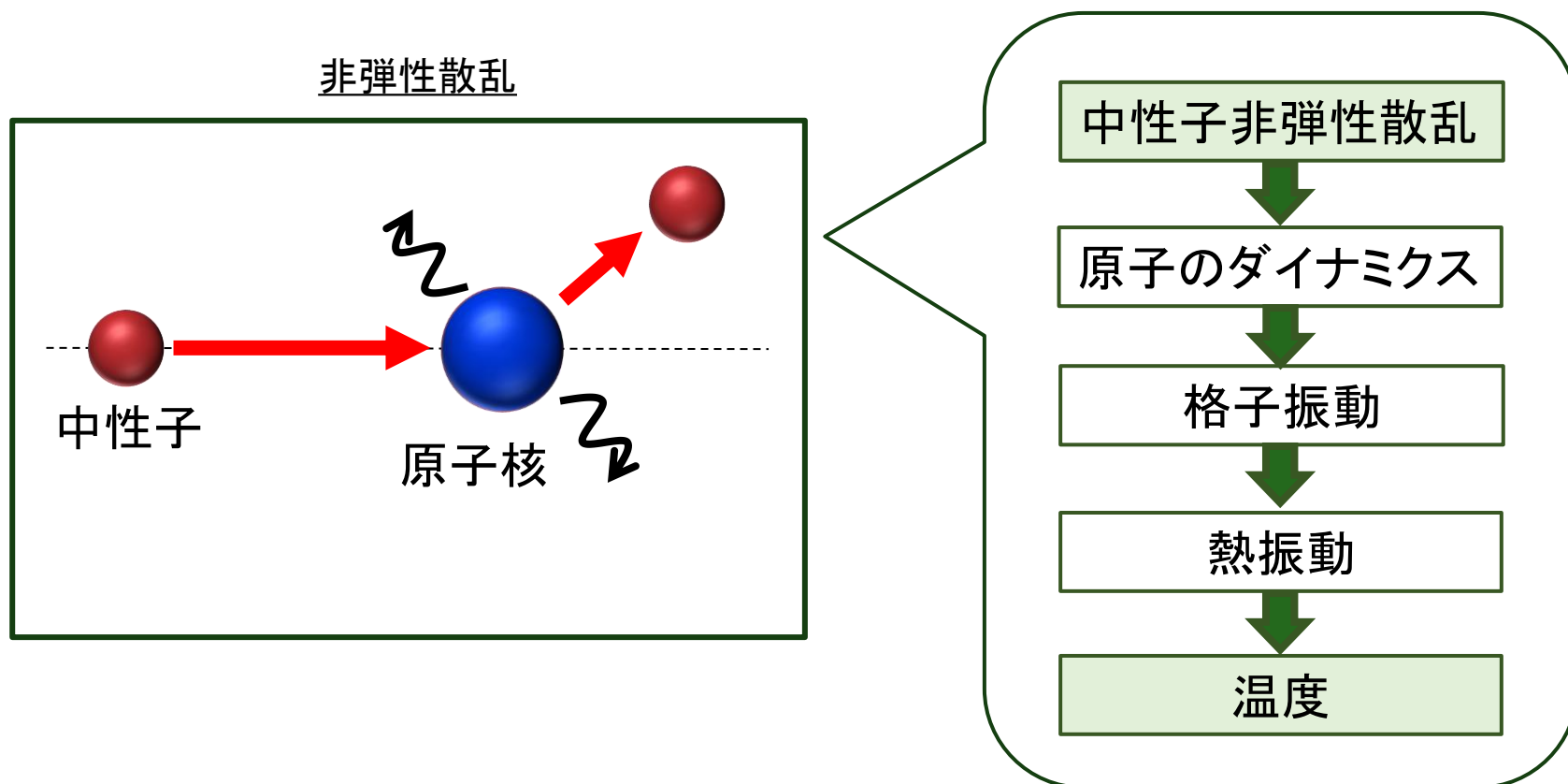


- △結晶性物質に限定
- △高い波長分解能が必要

汎用性が高く、高測定効率なサーモメトリの開発が必要

研究背景(3/5): 中性子サーモグラフィの新しいアプローチの提案

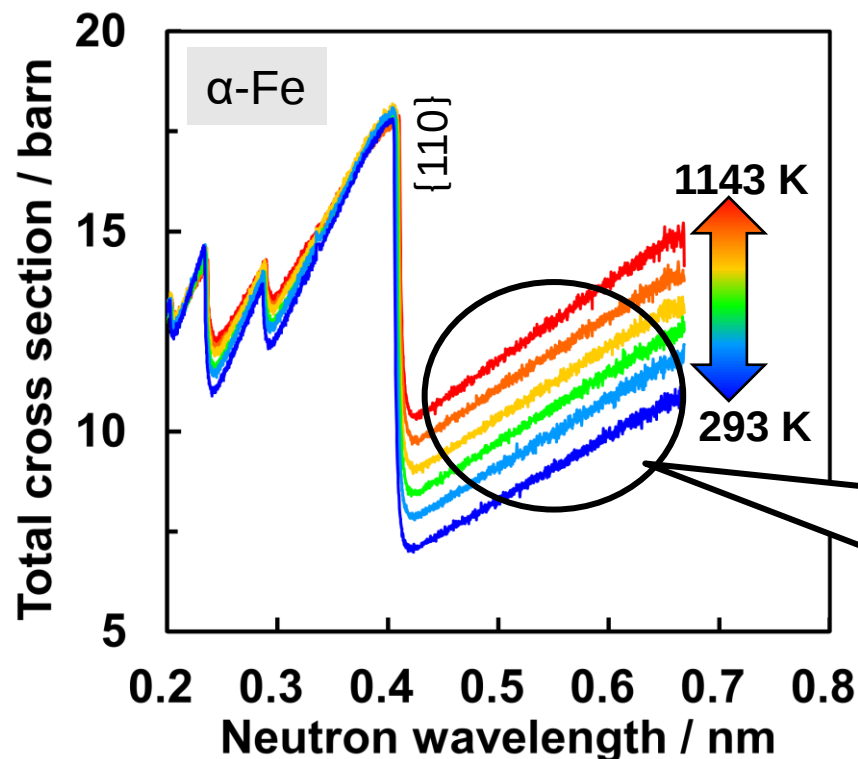
非弾性散乱による冷中性子全断面積の温度依存変化
を利用したサーモメトリー



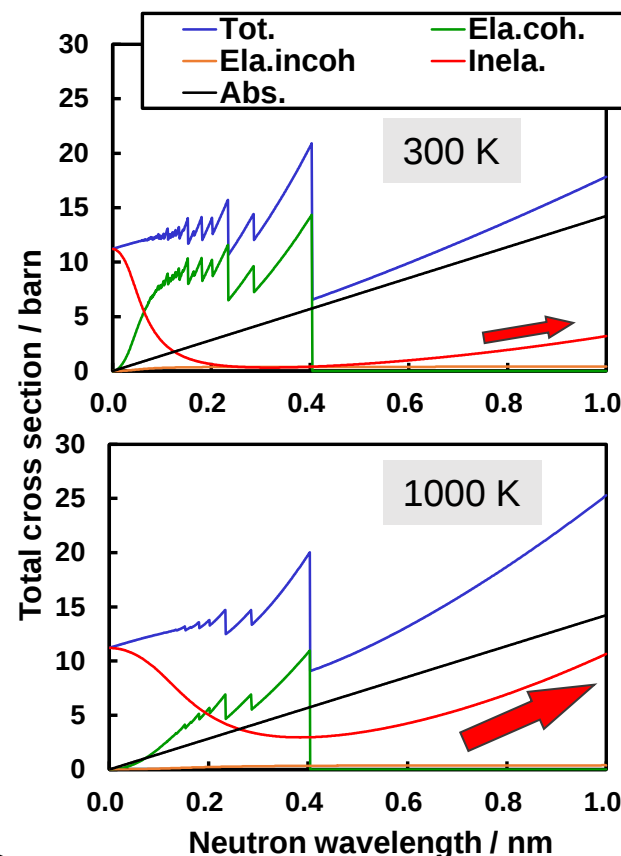
研究背景(4/5):

非弾性散乱に起因する冷中性子全断面積の温度依存変化

全断面積の温度依存変化^[3]



α -Feの各断面積の計算値



非弾性散乱断面積により
冷中性子全断面積が温度依存変化することを利用

研究背景(5/5): 既存の中性子サーモメトリーに対する本手法の利点

非弾性散乱を用いる利点

(共鳴吸収解析と比較して)

- ・重元素物質に限定しない

長波長域を用いる利点

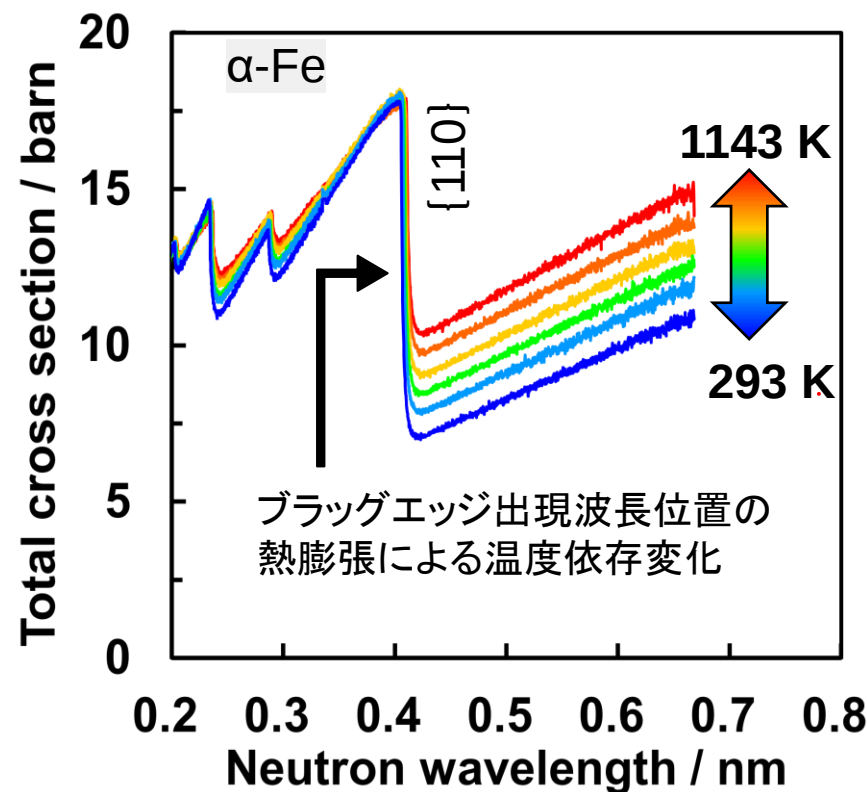
(ブラッグエッジ出現波長位置と比較して)

- ・温度依存変化が大きい
- ・結晶性物質に限定しない
- ・測定時間の短縮が期待される

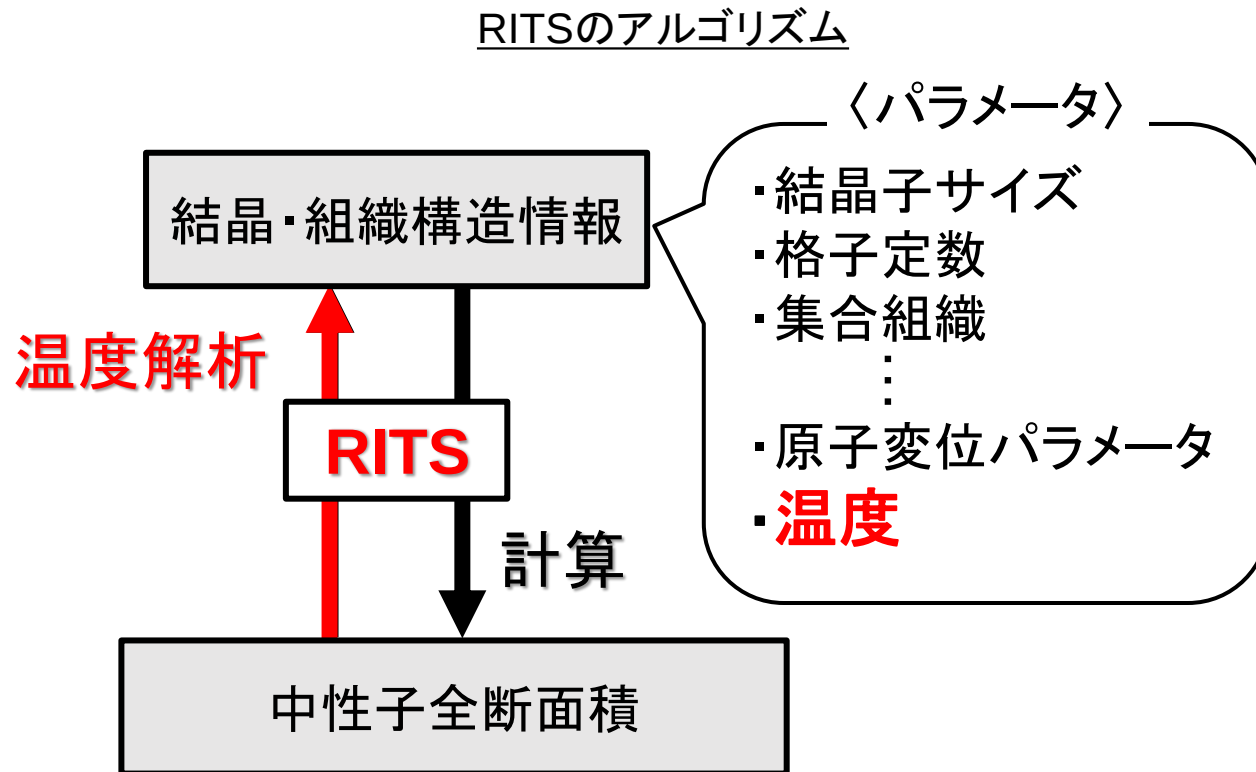


汎用性が高く
高測定効率なサーモメトリー

全断面積の温度依存変化



先行研究(1/2): 中性子全断面積解析コード「RITS_[4]」による温度解析



RITSを用いることで、
検量線を用意せずとも様々な条件での温度解析が期待できる

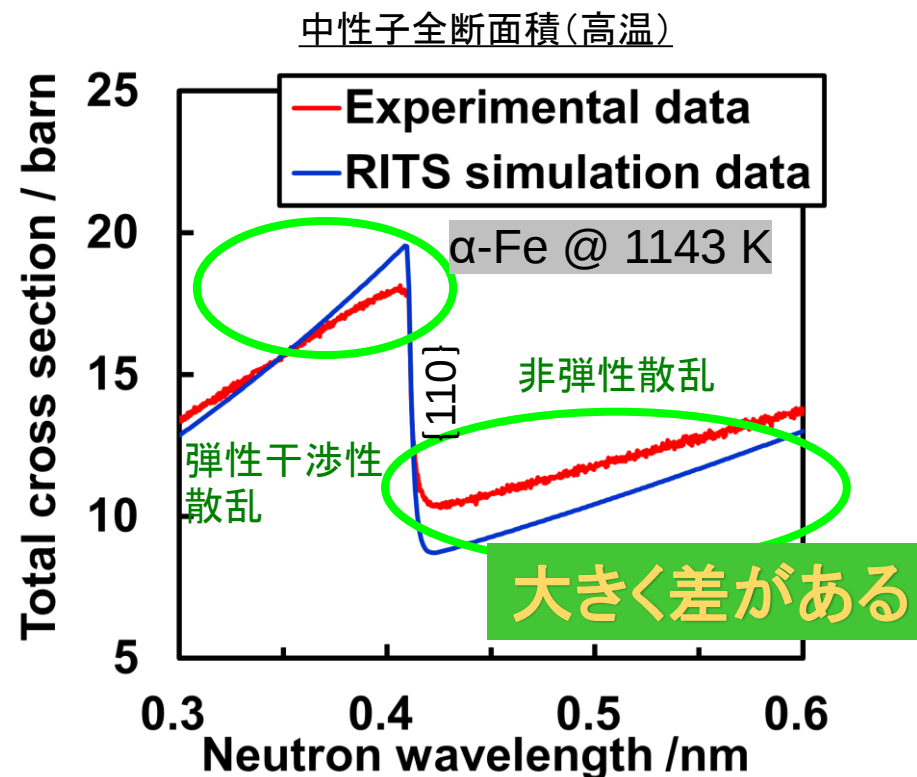
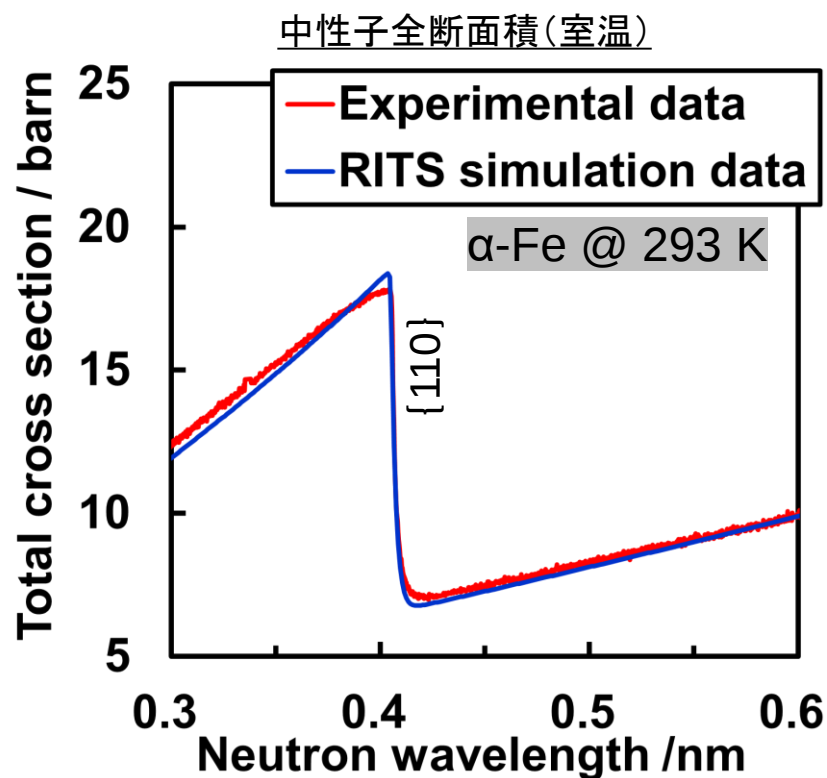
先行研究(2/2):

冷中性子全断面積における実験値とRITSによる計算値の差異

先行研究^[5]で明らかにした課題

高温実験で得られた全断面積を計算で再現できない

- ▶ 従来のモデル関数に含まれる**原子変位パラメータ**(B_{iso} 、 $\phi_1 \phi_3$)が原因
弾性干渉性散乱: B_{iso} のみ 非弾性散乱: B_{iso} と $\phi_1 \phi_3$ の両方 を含む



研究目的と研究内容

研究目的

非弾性散乱に起因する
冷中性子全断面積の温度依存変化を利用した
中性子サーモグラフィの開発

研究内容

- ① **新しい全断面積モデル関数**を用いた温度解析手法の開発
- ② 本手法を用いた**温度イメージング**の性能評価

研究内容

① 新しい全断面積モデル関数を用いた温度解析手法の開発

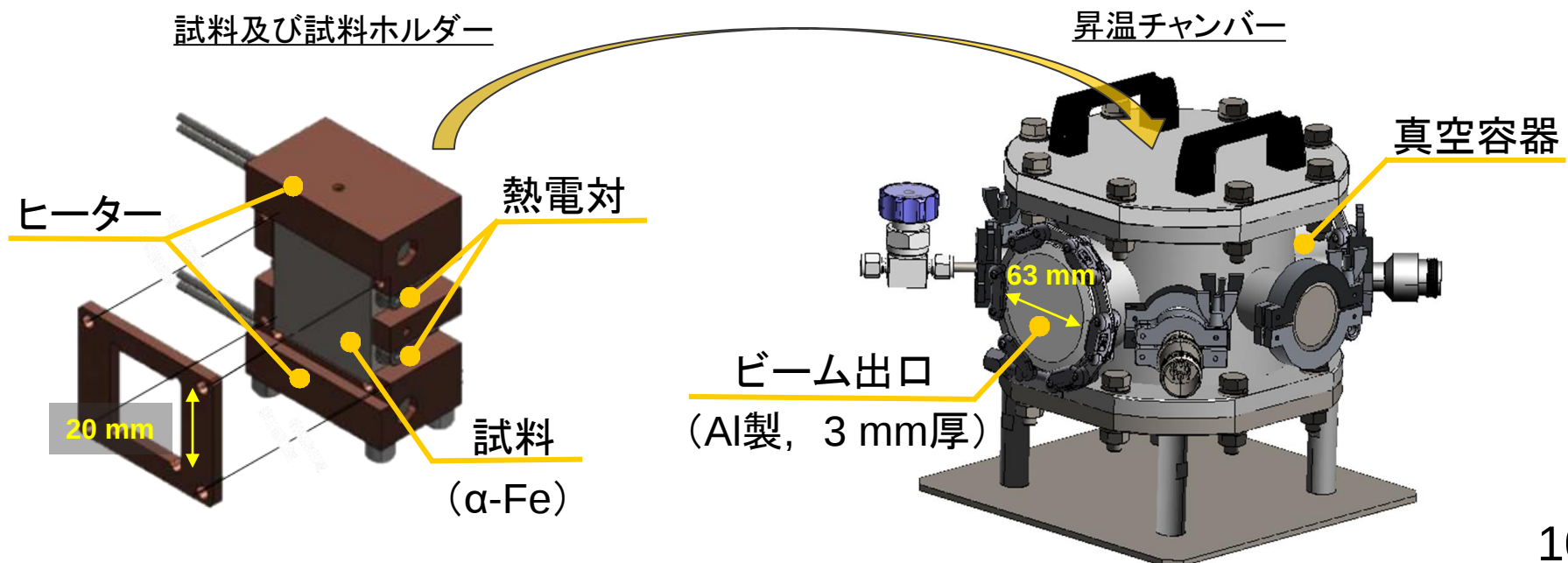
② 本手法を用いた温度イメージングの性能評価

実験(1/2)： 原子変位パラメータと温度イメージングの検証のための実験

実験目的

- ◆ 冷中性子全断面積モデル関数改善のために原子変位パラメータの実験値を得る
- ◆ 温度イメージングを行う

試料を均一かつ一定に保持・制御できる昇温装置



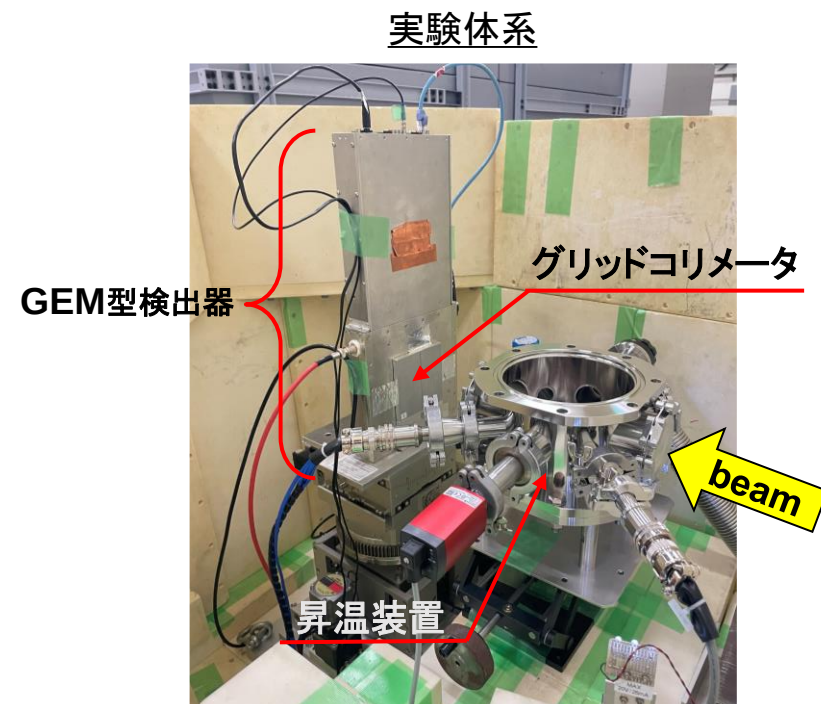
実験(2/2)： 原子変位パラメータと温度イメージングの検証のための実験

実験概要

- **実験施設**：北海道大学電子加速器パルス中性子源「HUNS」
- **検出器**：GEM型中性子TOFイメージング検出器(BBT THIN-GEM)
検出面積 $10 \times 10 \text{ cm}^2$
画素サイズ $0.8 \times 0.8 \text{ mm}^2$
- **試料**： α -Fe
30 mm角, 10 mm厚さ
294 K, 371 K, 465 K, 569 K
※試料上部と下部の温度差は最大で3 K

実験条件

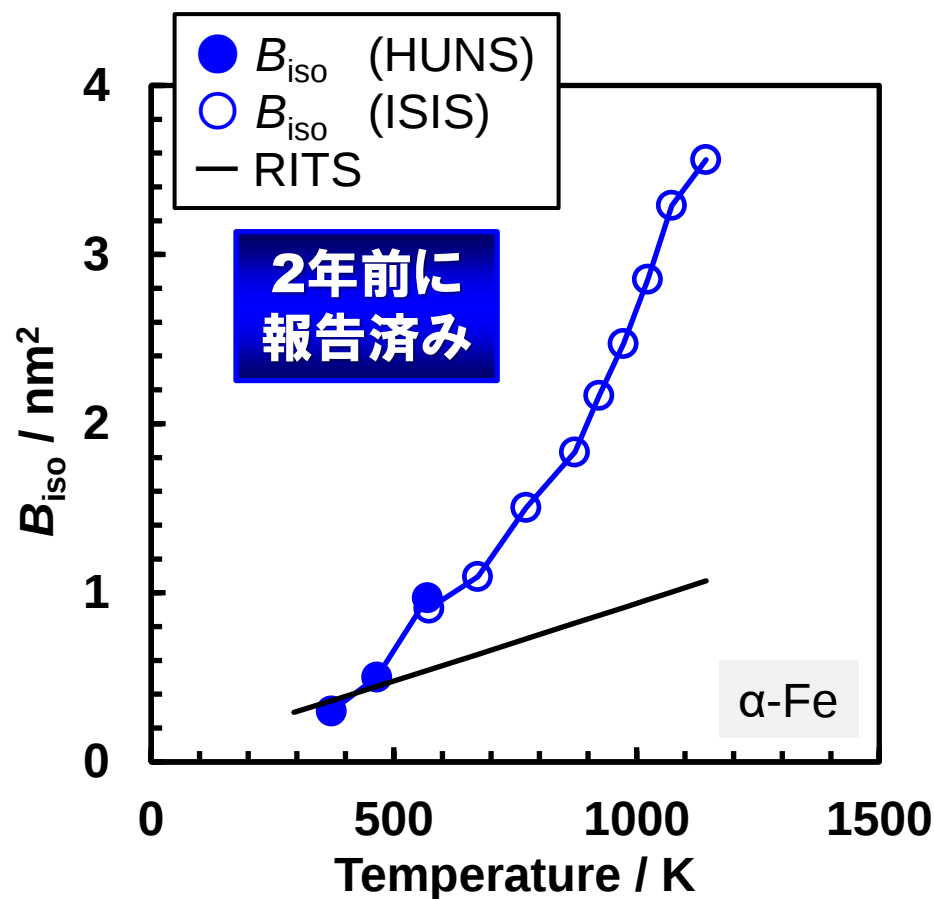
- 中性子飛行距離：6.277 m
- 電子線加速エネルギー：33 MeV
- 出力：2.275 kW
- パルス繰り返し：70 pps
- 電子パルス幅：4 μs



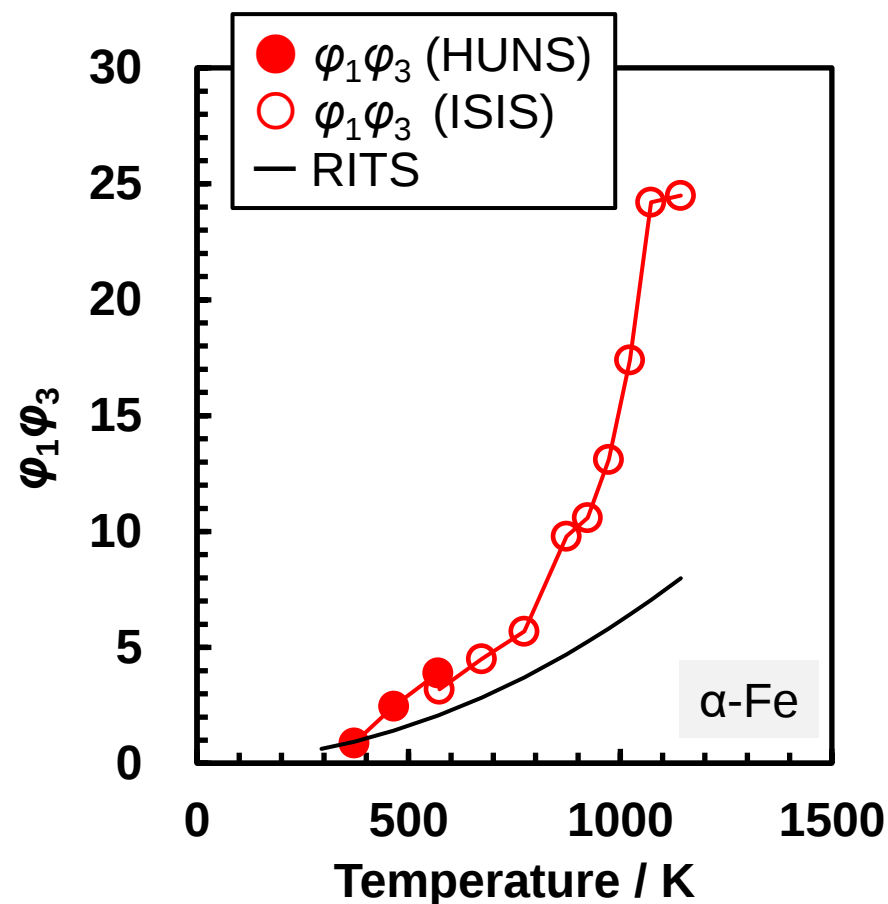
原子変位パラメータの導出結果

※RAL ISIS施設における実験データも検証に用いた

B_{iso} の温度依存変化の比較



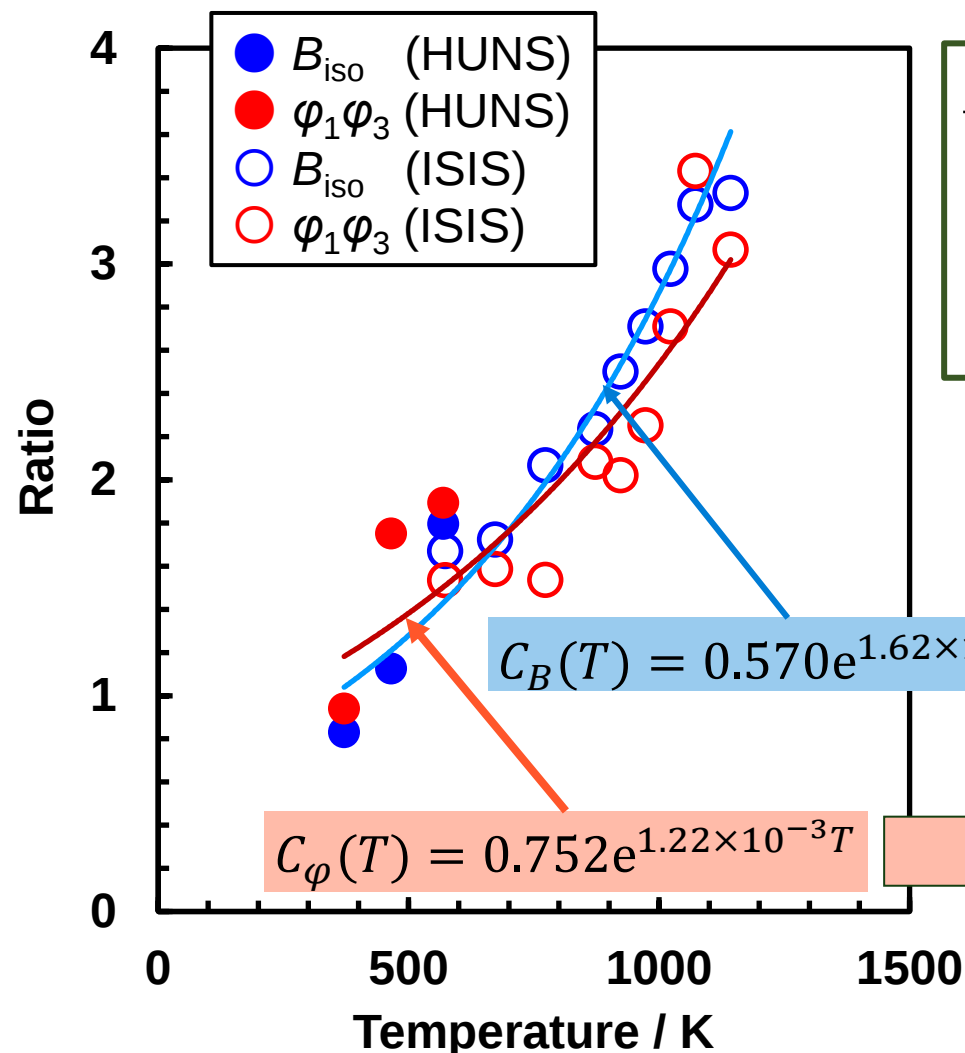
$\varphi_1\varphi_3$ の温度依存変化の比較



原子変位パラメータは理論予測より非常に大きな値をとる

α-Feの原子変位パラメータの補正関数導出方法

原子変位パラメータの
計算値に対する実験値の比率の温度依存性



原子変位パラメータの比率

- ・ 温度に対し**大幅に増加**
⇒ 理論予測よりも**温度応答性が高い**
- ・ B_{iso} と $\varphi_1 \varphi_3$ が**同様の傾向**を示す

補正関数

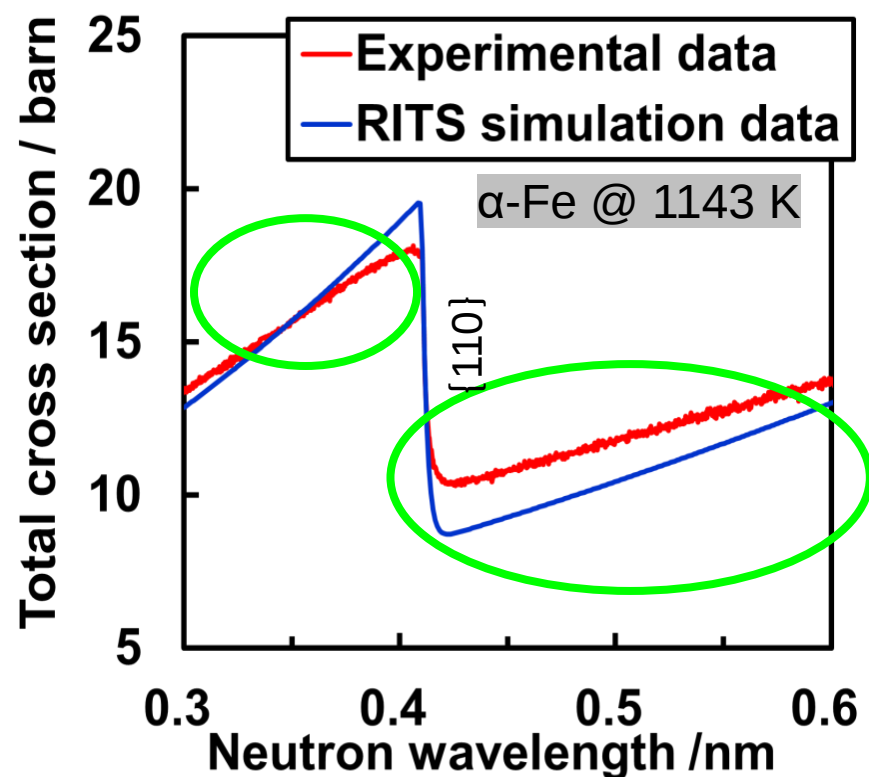
RITSの

- ① 弾性干渉性散乱断面積
- ② 非弾性散乱断面積

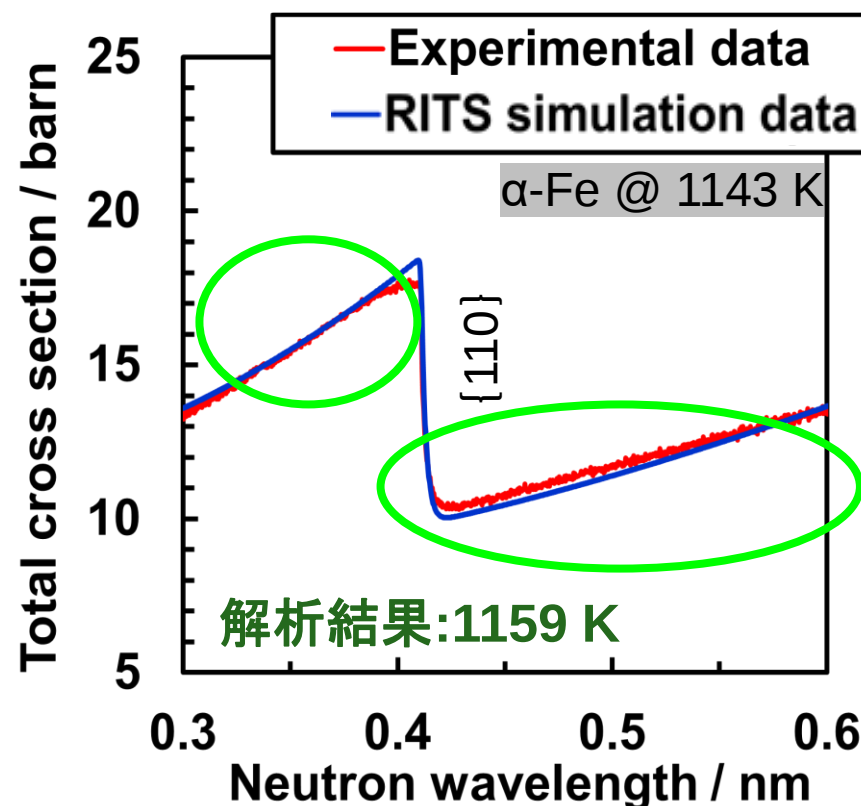
に導入

補正型全断面積モデルによる実験全断面積の再現結果

従来の全断面積モデル



補正型全断面積モデル



実験全断面積が再現され、温度解析も可能に

研究内容

- ① 新しい全断面積モデル関数を用いた温度解析手法の開発
- ② 本手法を用いた**温度イメージング**の性能評価

温度イメージング実験による検証方法

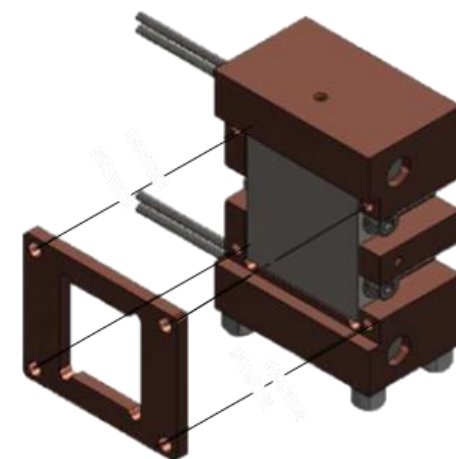
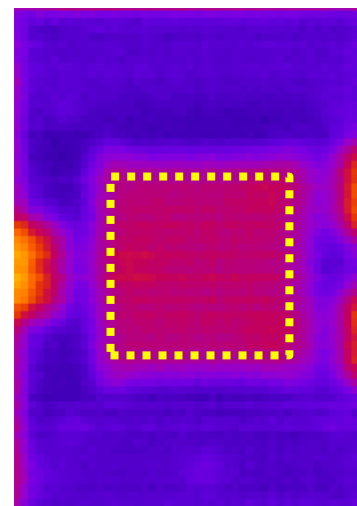
実験概要・条件

- ・実験施設：北海道大学電子加速器パルス中性子源「HUNS」
- ・検出器：GEM型中性子TOFイメージング検出器(BBT THIN-GEM)
検出面積 $10 \times 10 \text{ cm}^2$
画素サイズ $0.8 \times 0.8 \text{ mm}^2$
- ・試料： α -Fe
30 mm角, 10 mm厚さ
※昇温チャンバー内に設置
- ・試料温度：294 K, 371 K, 465 K
※試料上部と下部の温度差は3 K以下
(一様)
- ・測定時間：各2時間

温度イメージング方法

- ・試料ホルダーから露出している $20 \times 20 \text{ mm}^2$ の範囲で温度イメージングを行った
- ・補正型全断面積モデルを用いて空間分解能 2.4 mm で温度解析を行った

温度イメージングを行った範囲



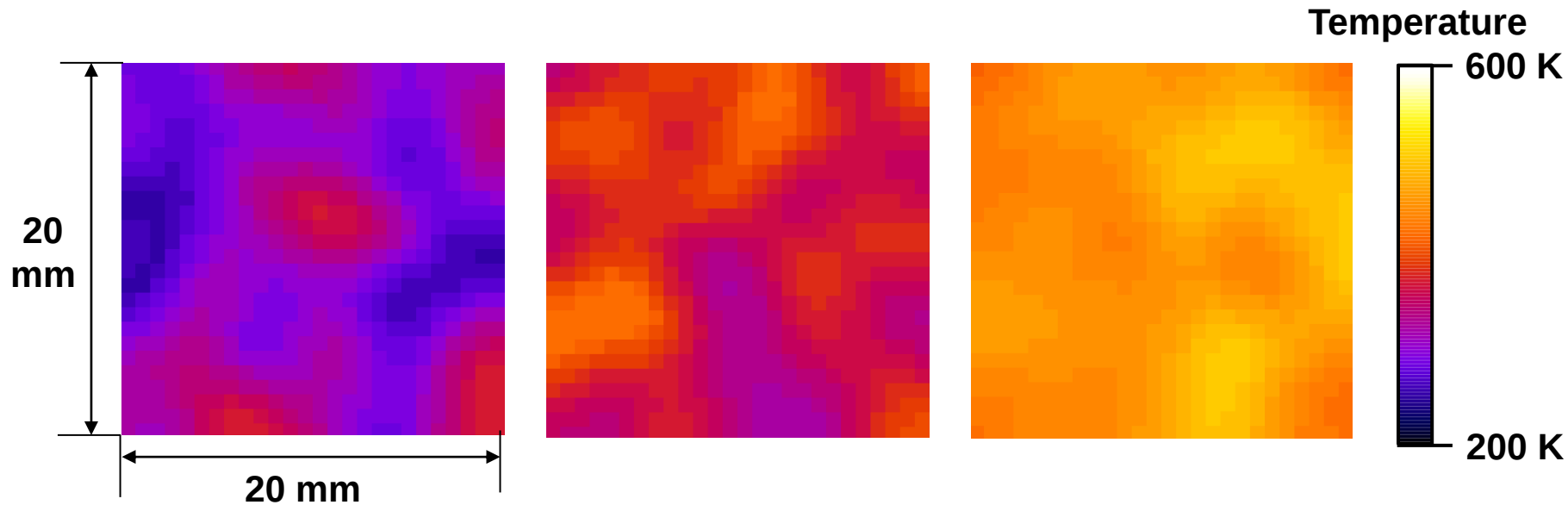
α -Fe板試料のバルク温度2次元イメージング結果

試料温度

294 K

371 K

465 K



解析結果

304 ± 27.3 K

370 ± 23.9 K

458 ± 20.1 K

- ✓ **10 K以下の正確度**で温度イメージングが達成された
- ✓ 位置によって温度のばらつきが観測された
- ✓ 高温側で温度のばらつきが抑えられる傾向が見られた

まとめ

非弾性散乱に起因する 冷中性子全断面積の温度依存変化を利用した サーモグラフィの開発

① 新しい全断面積モデルを用いた温度解析手法の開発

- ・ 従来の原子変位パラメータ計算モデルでは実験結果を再現しない
⇒ **[補正関数]**を開発・導入した

② 本手法を用いた温度イメージングの性能評価

- ・ **10 K以下の正確度で中性子サーモグラフィを短時間で達成**

③ 今後の課題

- ・ 他の物質にも補正関数が適用できるのか？（デバイ温度に近い α -FeとAlは同じような補正関数になることが既に明らかになっている）
- ・ RITSのIncoherent approximationではなく、Quasi-harmonic approximationを試してみては？（改善の方向だが、それでも実験結果を完全再現とはいかなさそう...。）