

磁気製品/実用材料中の磁場の可視化に向けた 中性子磁気イメージング手法の開発

J-PARCセンター 物質・生命科学ディビジョン 中性子利用セクション

廣井 孝介

中性子イメージング

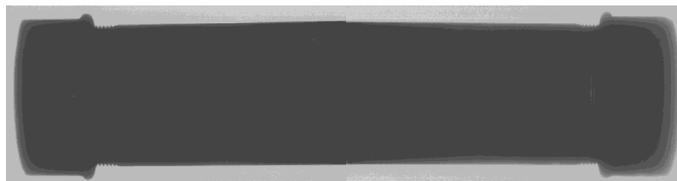
中性子を利用した物質内部を非破壊で観察する技術

模擬爆弾

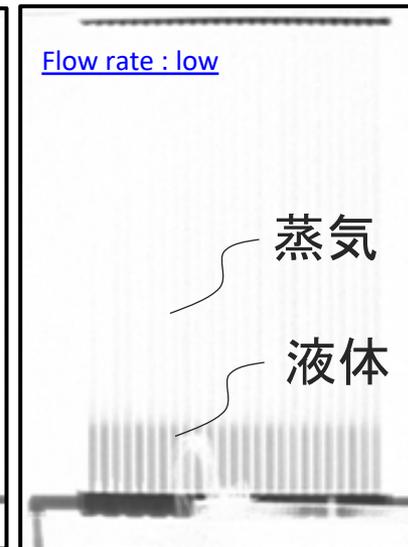
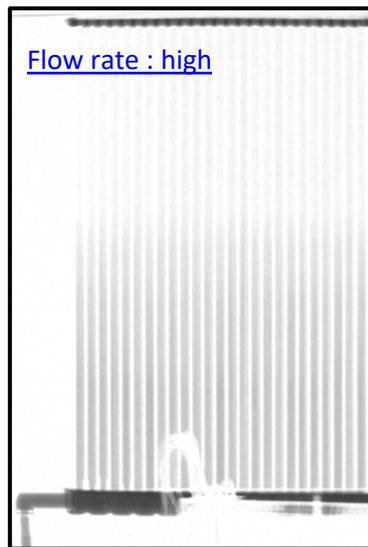
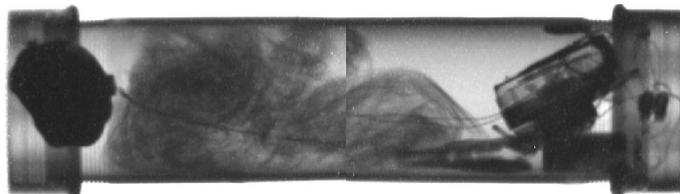
外観



X線
(150kV)



中性子
(25meV)



B. Schillinger, et al., DGZfP Proceedings BB 67-CD 83-86 (1999).

中性子を使うと **分厚い金属の中身も
軽い元素(水素等)の情報が** 見える

原子炉中性子源と加速器中性子源

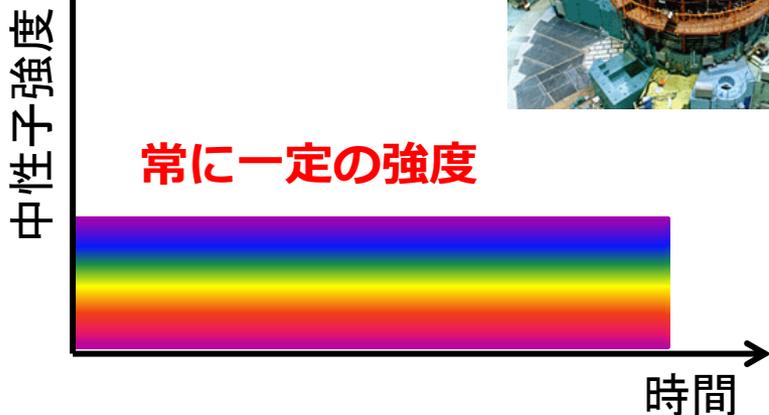


原子炉

定常中性子源



常に一定の強度



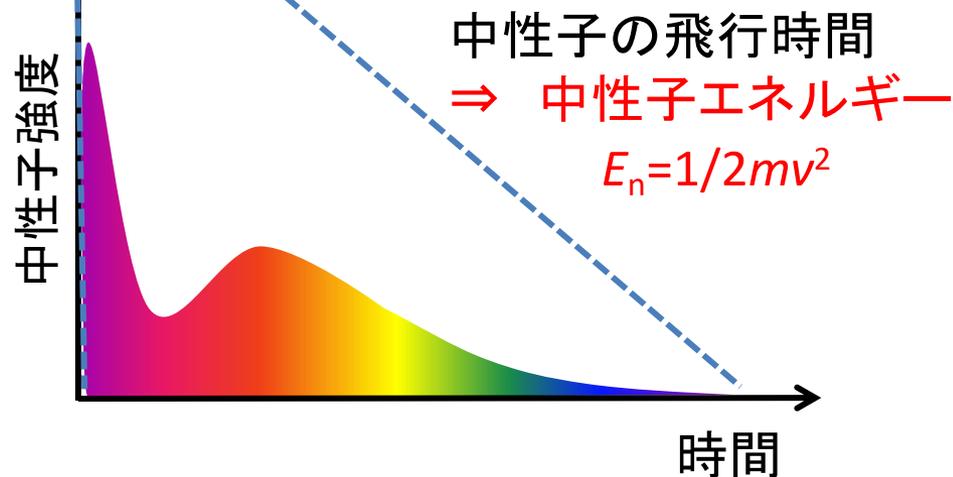
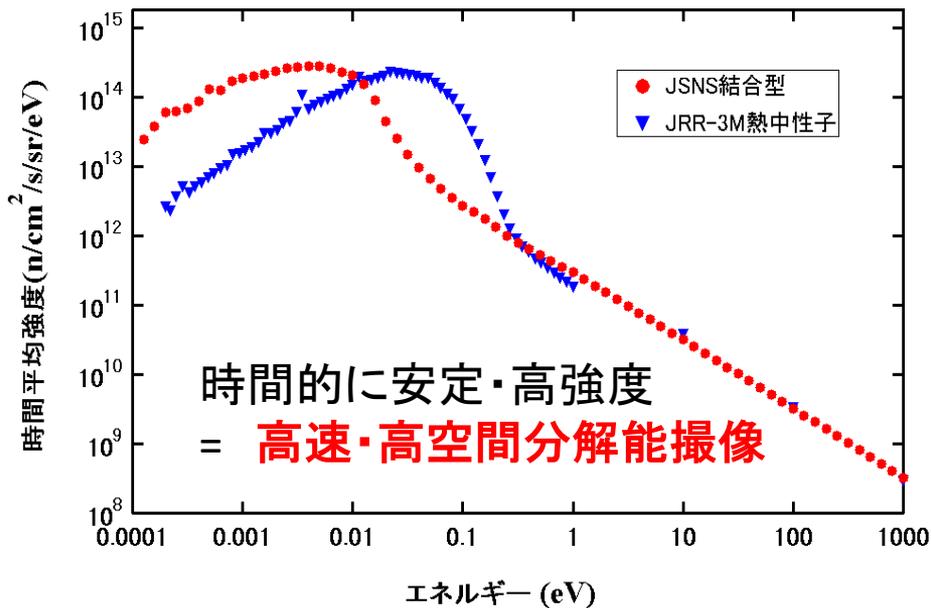
加速器

パルス中性子源



周期的に中性子が発生

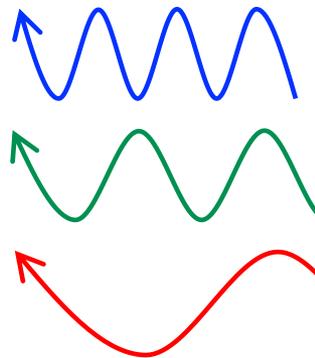
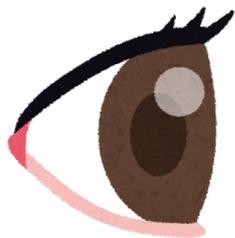
40msec



エネルギー依存性を高効率・高精度に測定 3

エネルギー(波長)依存情報？

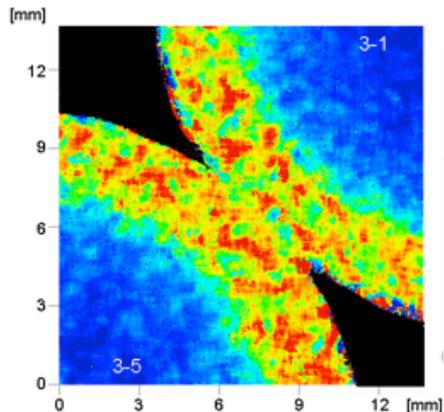
可視光



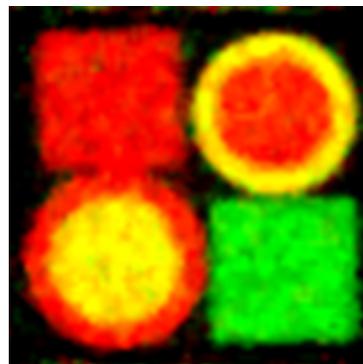
あり 波長情報 なし



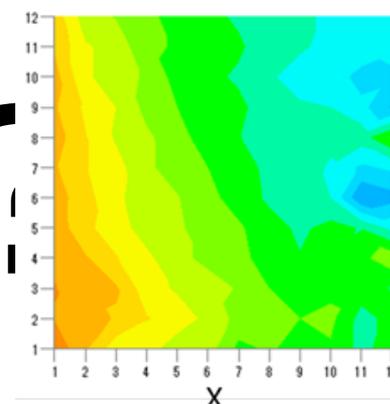
中性子イメージング



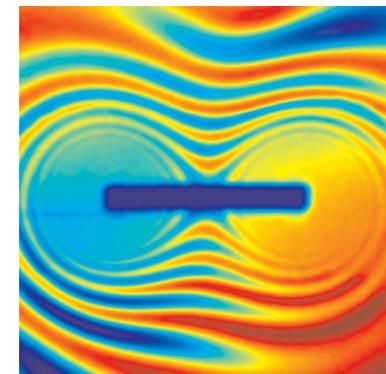
結晶構造



元素



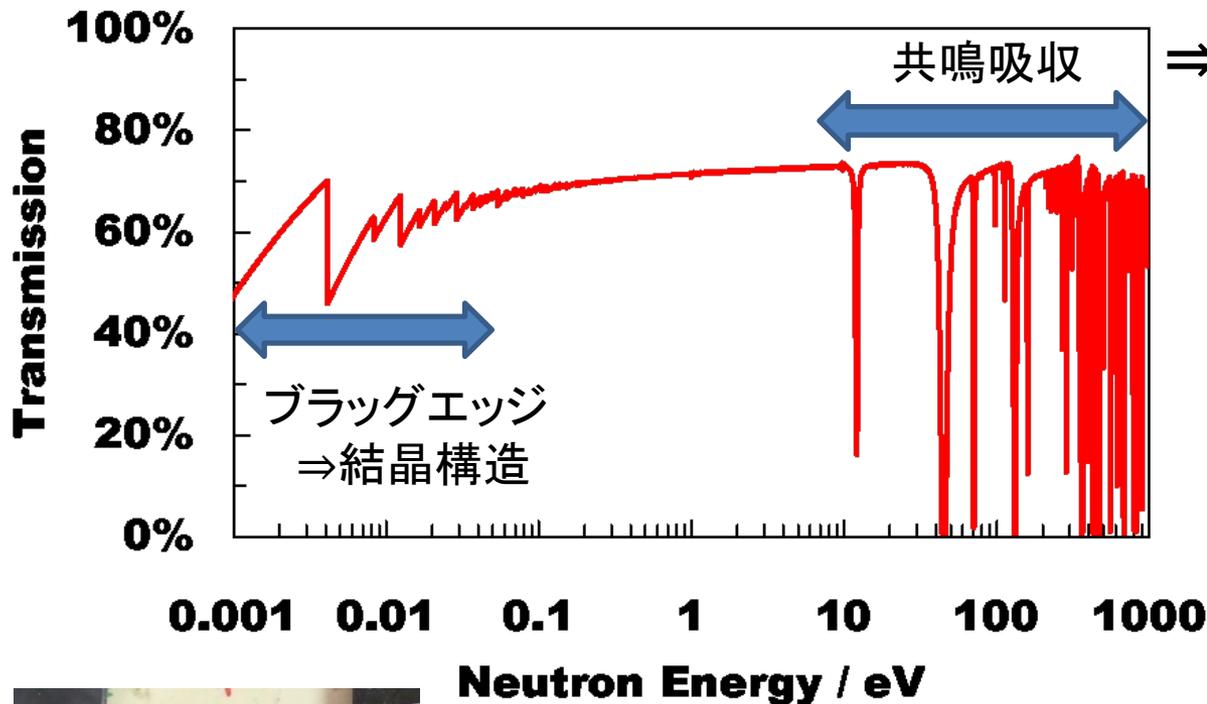
温度



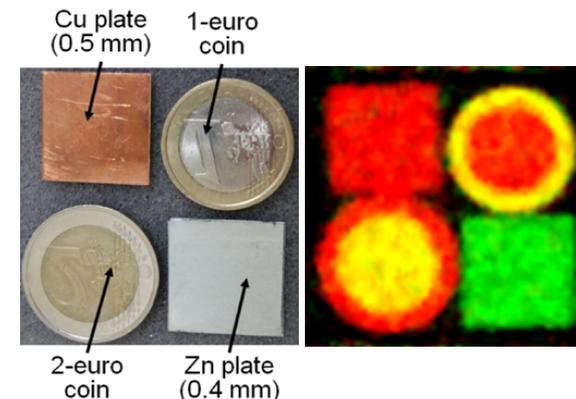
磁場

エネルギー分析型中性子イメージング

Moの中性子透過スペクトル



⇒ 構成元素
温度情報

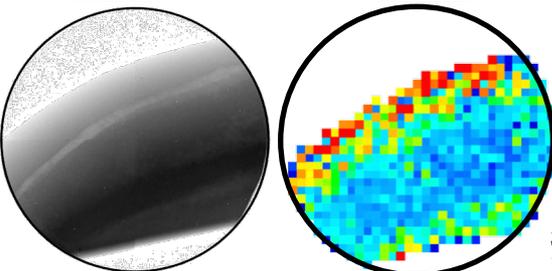


元素・温度情報



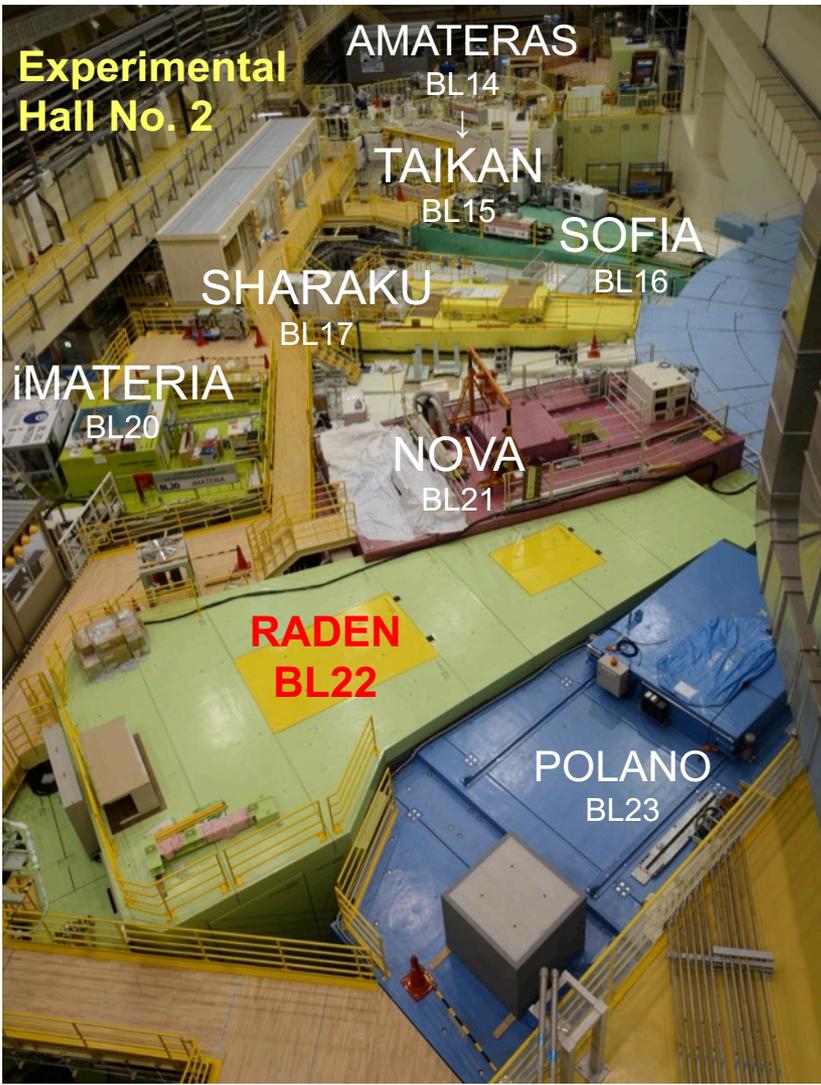
中性子エネルギー(波長)に依存した透過率
変化を位置ごとに解析

⇒ 観察対象の内部の物理/化学情報の
2次元分布を画像化



結晶構造情報

世界で最初のパルス中性子イメージング専用装置



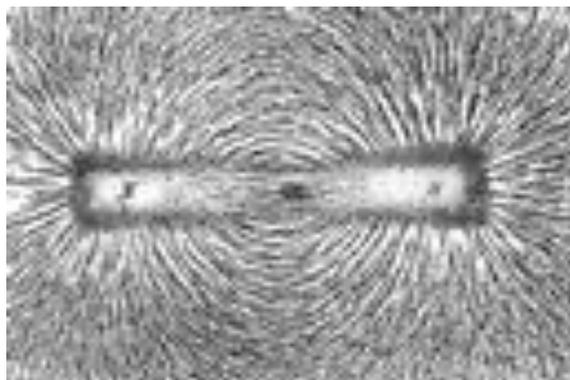
2014年11月 建設完了
2015年 4月 ユーザー受け入れスタート

エネルギー分析型中性子イメージング装置
MLFのパルス中性子を活用した新しいイメージング
手法の開発

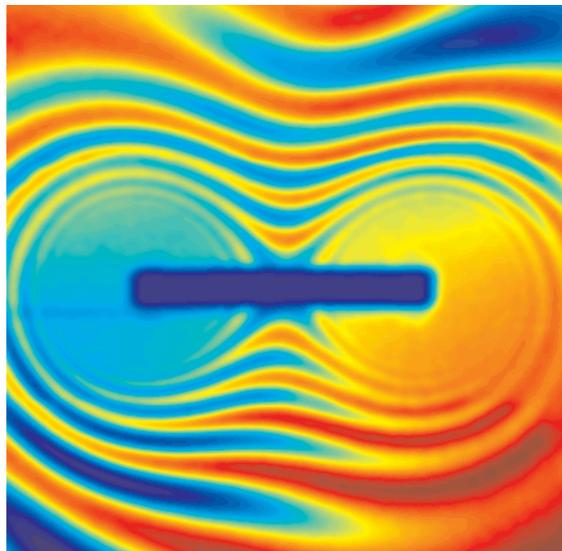
高性能中性子ラジオグラフィ装置

- ・100mm□～300mm□のビームサイズ
- ・ $>50\mu\text{m}$ の空間分解能
- ・大型試料、特殊環境、その場観察の実験環境

中性子磁気イメージング



砂鉄による磁力線の可視化

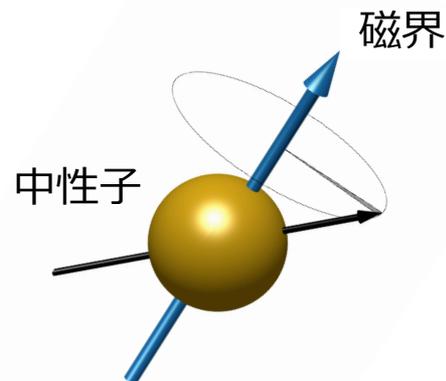


中性子偏極度による磁界の可視化

(Nature Physics, vol.4, pp399-403, (2008))

中性子 = 非常に小さい磁石

→ 磁界の周りで回転
(スピン状態の変化)



スピンの回転角度

$$\varphi = \omega_L t = \frac{\gamma_n m \lambda}{h} \int B \cdot ds$$

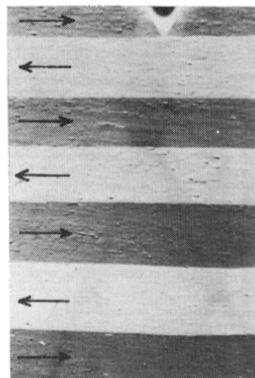
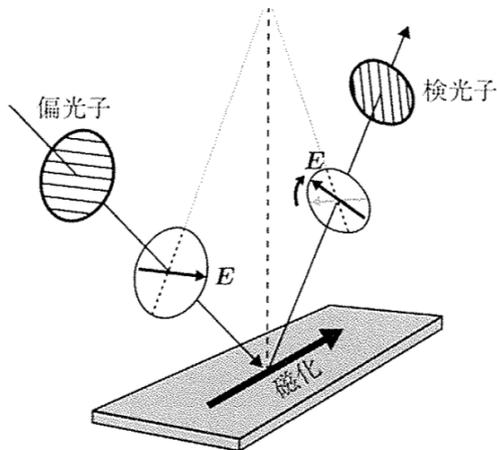
波長

磁場の積分強度

中性子磁気イメージングの特徴

他の磁気イメージング手法

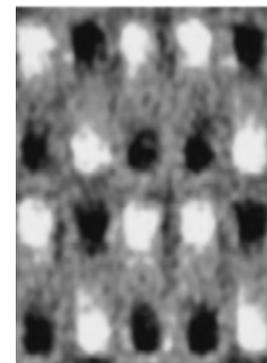
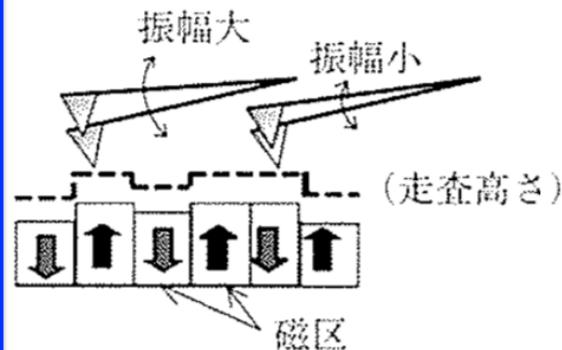
Kerr顕微鏡



T. Ichiyama, J. ISIJ (1983)

磁気力顕微鏡 (MFM)

磁石探針



物質表面近傍を高空間分解能で観察

中性子磁気イメージング

試料を透過した中性子を解析 ⇒ **バルク試料内部の磁場・磁束**
空間分解能 ~ 0.2 mm、**視野: 数cm** □

物質内部の磁場をマクロに観察



電気モーター

国内電力の57%を消費
損失：563億 kWh/年



変圧器(トランス)

総発電量の約2%を消費
損失：260億 kWh/年

課題

製品が設計で予測したエネルギー効率を実現しない
材料の劣化？、設計からのずれ？

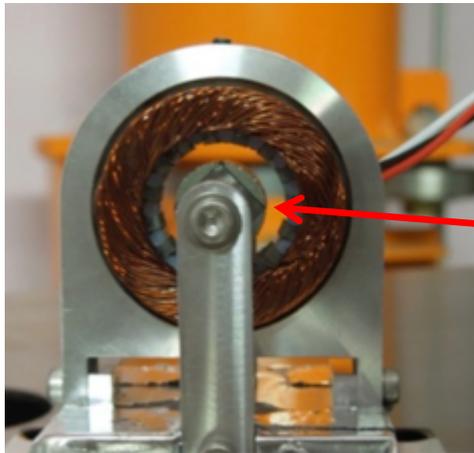
⇒ **実製品が発する磁場の評価技術が必要**

中性子磁気イメージングを磁気製品の観察に応用
⇒ **製品開発へのフィードバック**

- ① 稼働状態のモーターが発する磁場の観察
- ② トランスからの漏洩磁場の観察

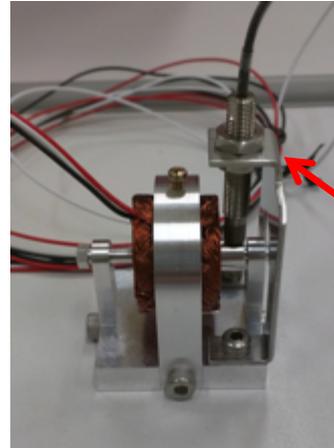
稼働状態のモーターが発する磁場の可視化

(正面)



回転子
(ローター)

(側面)



小型モデルモーター

交流電流周波数

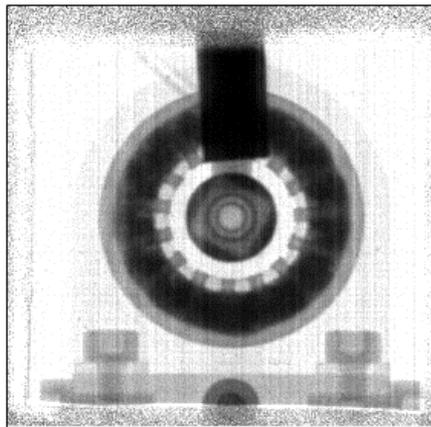
$$f = 21.5 \text{ Hz}$$

回転計

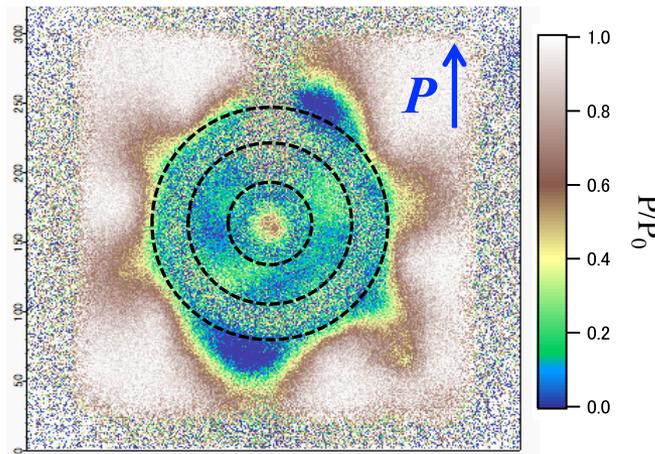
→ ローター回転の情報を取得

35 mm

中性子透過像



偏極度分布像
(偏極方向: y , $\lambda = 4 - 8 \text{ \AA}$)

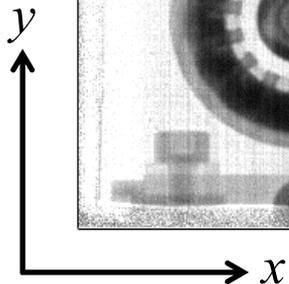


中性子透過像

⇒ ローターの回転

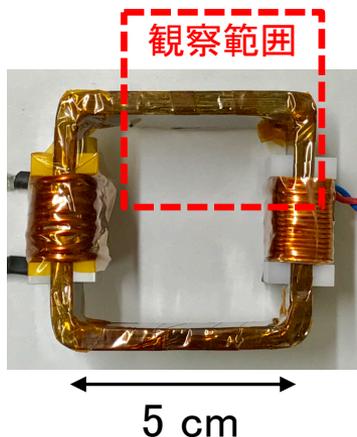
偏極度分布像

⇒ **磁場方向の分布**

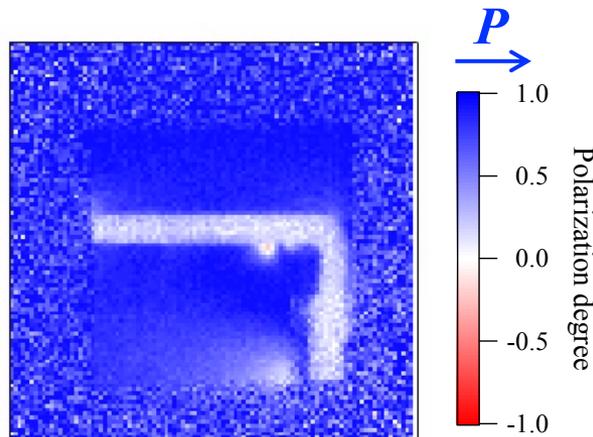


トランスからの漏洩磁場の観察

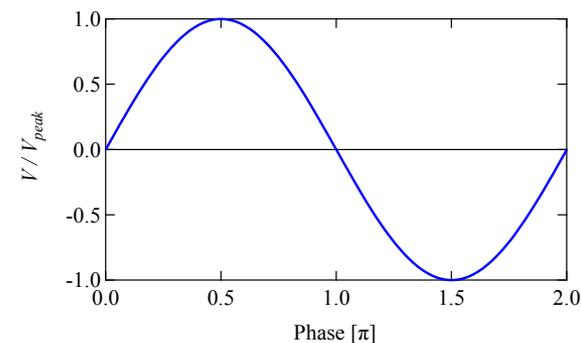
小型モデルトランス



偏極度分布像 (偏極方向X, $\lambda = 2.5 \text{ \AA}$)



AC電圧 $f = 50.25 \text{ Hz}$
正弦波形



$1/10 \pi$

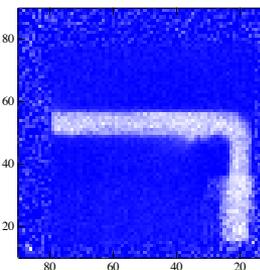
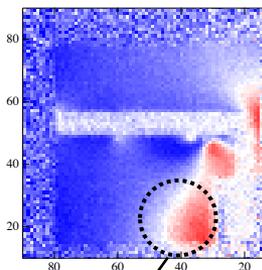
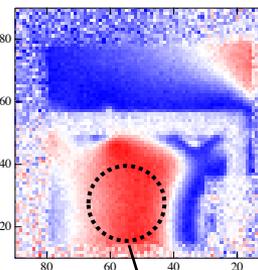
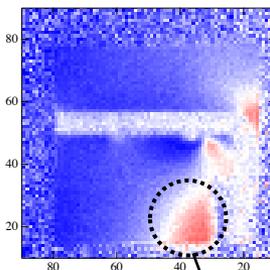
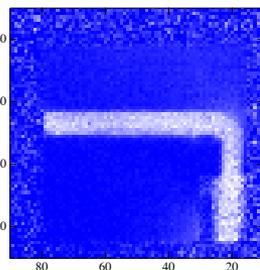
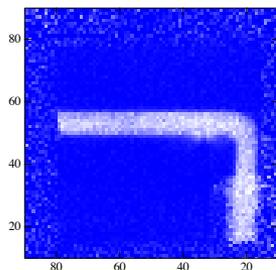
$3/10 \pi$

$5/10 \pi$

$7/10 \pi$

$9/10 \pi$

$11/10 \pi$

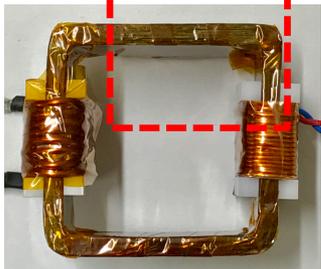


漏洩磁場による偏極度変化

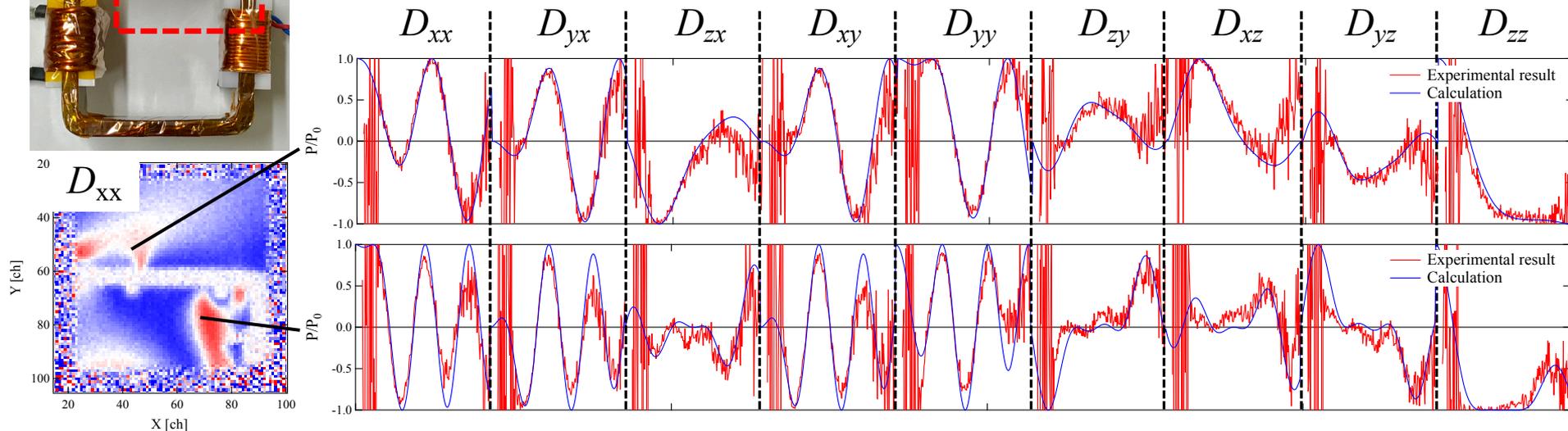
印加電圧に対して漏洩磁場の位相が遅れる
⇒ 鉄心内部の損失に由来

トランスからの漏洩磁場の観察

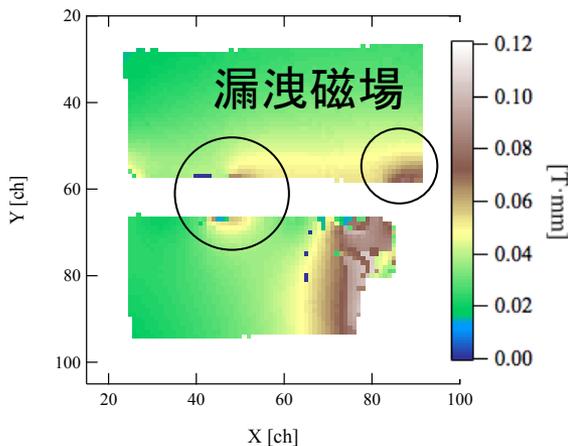
観察範囲



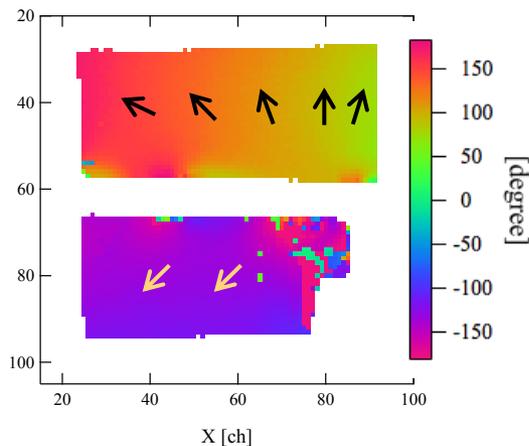
偏極度の波長依存性から中性子スピンの回転を解析
 ⇒ トランス周辺の磁場を定量評価



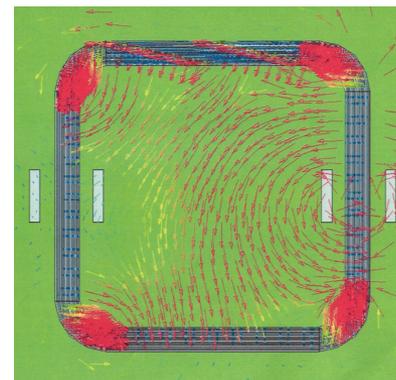
磁場積分強度



面内角度分布



シミュレーションによる予測



解析により得られた結果は
 予測と概ね一致

本日のまとめ



J-PAEC MLFのイメージング装置「螺鈿」では中性子のスピン情報を利用した磁気イメージング法の開発とそれを利用した応用研究が進められている

中性子磁気イメージング法の特徴を活かし、モーターやトランス等磁気製品が発する磁場の観察研究を企業ユーザーと共同で実施

イメージング実験により得られた磁場情報は製品の磁場設計モデルの高度化に活用され、磁気製品の開発に貢献

今後は

- ・解析技術・実験環境の高度化
(より強磁場の解析 温度可変環境の整備)
- ・磁石・超電導材料内部の磁気構造の観察研究