

A 3D architectural rendering of a complex facility, likely a synchrotron radiation facility, shown in white. Numerous orange and red lines radiate from a central point, connecting to various parts of the structure, suggesting a network or data flow. The background has a light blue and white halftone pattern.

RADENにおける 稼働中実用製品のイメージング

日本原子力研究開発機構 J-PARCセンター

篠原 武尚

光・量子融合連携研究開発プログラム ～重点事項と取組（例）～

<概要>

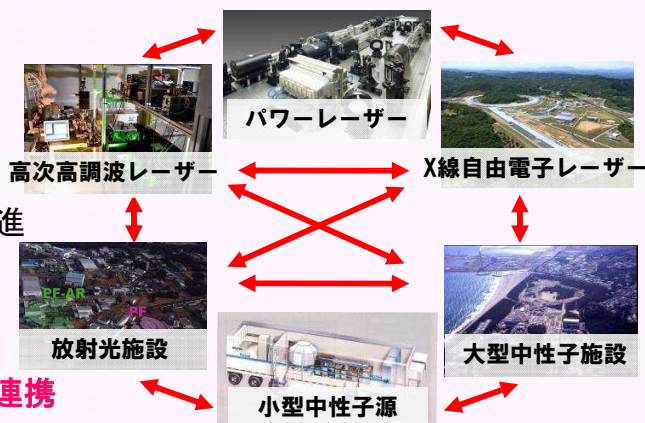
光科学技術・量子ビーム技術の融合により学術研究から産業応用・基盤技術開発にいたる幅広い新たなアプローチによる**グリーン・ライフ**イノベーションへの貢献を実現し、課題解決型の研究開発を促進する。

<重点的な推進事項>

- ①産業競争力の強化を実現する先導的研究開発の推進によるイノベーションの促進
- ②横断的利用の成功事例となる利用研究とその実現に向けた技術開発の推進
- ③産業界を含めた利用者の裾野を大きく広げる研究開発等の推進
- ④研究開発と一体的な若手研究者等の育成の推進

これら先導的研究開発の推進により、光・量子ビーム研究開発の融合・連携を促進し、イノベーションの創出と国際競争力の強化に貢献する！

<融合・連携研究を促進する研究開発のイメージ図>



<取り組むべき課題解決型研究開発のテーマ>

グリーン・イノベーション

新エネルギー変換等を目指した光反応ダイナミクスの解明

省エネルギー社会の実現を目指した摩擦ダイナミクスの解明

分散エネルギーシステムの実現を目指した電池用電解質膜の高性能化

新物質材料の創出を目指した高エネルギー密度現象の解明と制御

コンパクトERL放射光レーザー

中性子ミュオンビーム

イオンビーム
γ線
電子線
中性子

パワーレーザー
XFEL

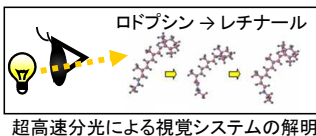
光科学技術

量子ビーム技術

ライフ・イノベーション

光触媒反応等の応用を目指した生命の電子構造ダイナミクスの解明

創薬や機能性材料開発への貢献を目指したタンパク質の化学反応プロセスの解明

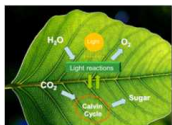


基盤技術開発

光・量子ビーム科学を支える加速器等の高度化・小型化を目指した研究開発の推進



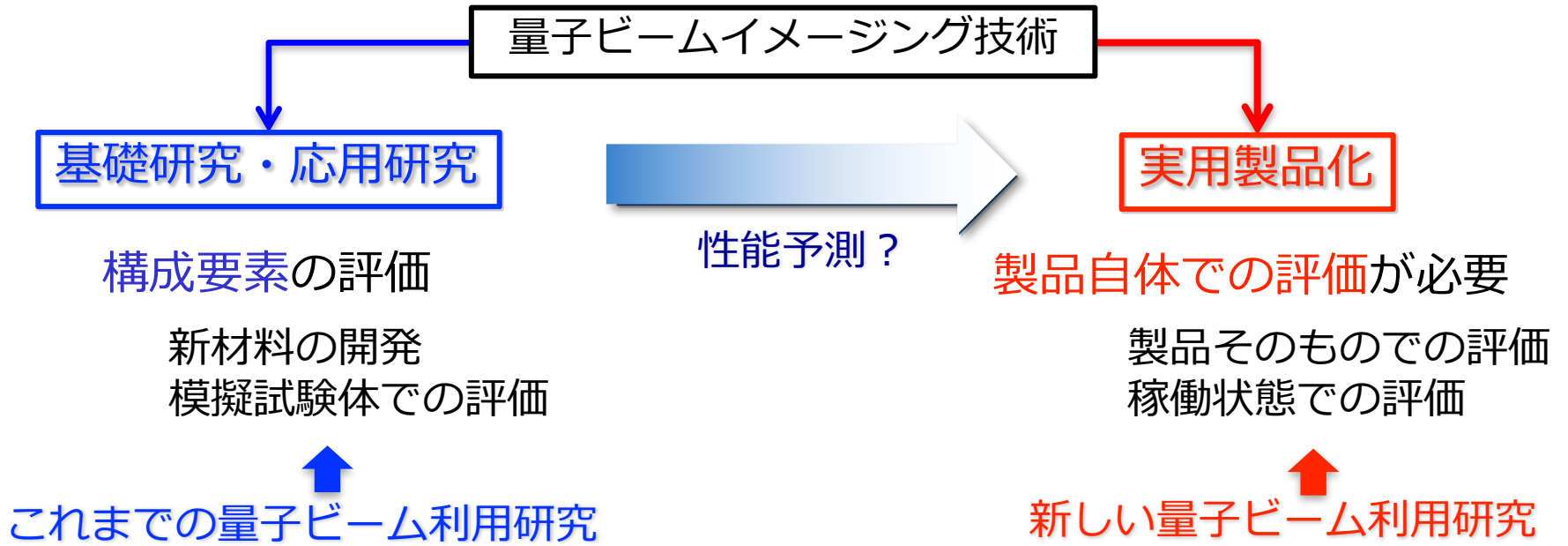
高度化・小型化により、大型研究施設レベルの装置を研究施設レベルへ



(左) 超高速で起こる光合成反応を解明し、人工光合成の実現へ

(右) 超高压状態での新物質創成とその物性の解明

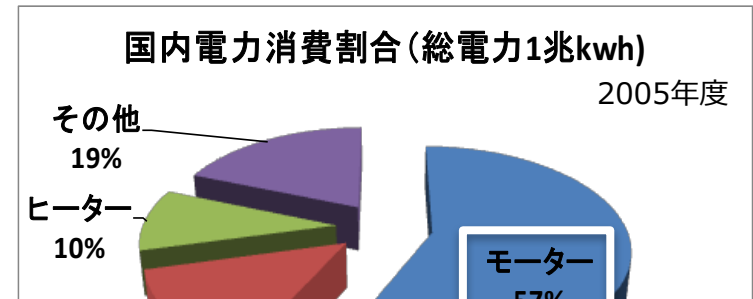
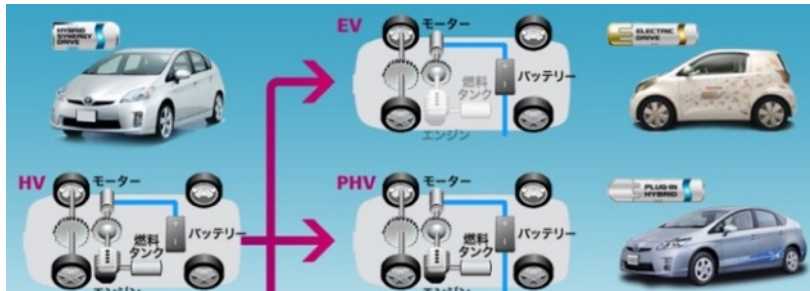




量子ビームを用いた直接観察技術
 これまで見えなかった製品内部を観察する技術を開発
 → 製品性能を直接評価・高精度で製品性能を予測
 製品性能の向上・製品開発のスピードアップへ

稼働状態の実製品の直接観察による性能向上への貢献

⇒ **エネルギー利用の高効率化・社会インフラのグリーン化**



研究・開発内容

- ・ **中性子・X線・ミュオンを活用した直接観察技術の開発と実用化**
- ・ **実用製品の観察と性能評価への展開**

要素技術の開発

- パルス中性子イメージング技術の高度化
- ブラッグエッジ・共鳴吸収・偏極中性子
- X線・ミュオンビームを用いた観察技術の開発
- 元素分析・ミュオンラジオグラフィ

実用機器の観察

モデル機器の評価→静止状態の実用機器の評価→稼働状態での評価

中性子・ミュオンイメージングによる実用製品の直接観察

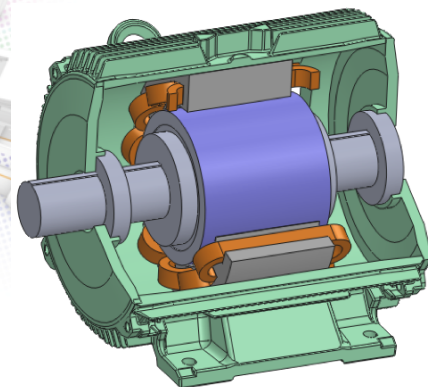
TOYOTA

Liイオン電池・
自動車部品



HITACHI
Inspire the Next

モーター・トランス



国立研究開発法人
日本原子力研究開発機構
Japan Atomic Energy Agency

パルス中性子イメージング
高度化・実用化研究

J-PARC パルス中性子

**エネルギー分析型
中性子イメージング装置
BL22 RADEN**

中性子線・X線
複合利用技術の開発

北大小型中性子源

東京都市大学
TOKYO CITY UNIVERSITY

**ミュオン基礎科学
実験装置
D2ライン**



KEK 高エネルギー加速器研究機構
物質構造科学研究所
Institute of Materials Structure Science

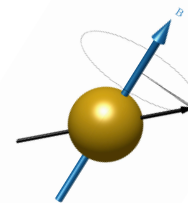
ミュオンラジオグラフィ・
元素分析技術の開発

J-PARC ミュオン

磁場中での中性子スピンの回転

$$\frac{d\vec{\sigma}_n}{dt} = \gamma \vec{\sigma}_n \times \vec{B} \quad \vec{\sigma}_n = \frac{\vec{\mu}}{|\vec{\mu}|}$$

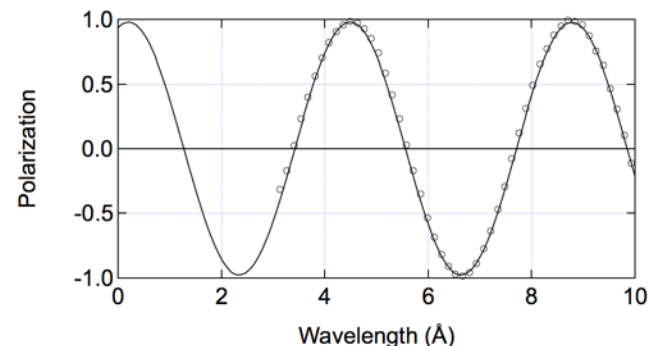
$$\omega_L = \frac{g\mu_n}{\hbar} B = \gamma_n B$$



スピン回転角 φ

$$\varphi = \omega_L t = \frac{\gamma_n}{\nu} \int_{path} B ds = \frac{\gamma_n m_n \lambda}{h} \int_{path} B ds$$

中性子速度
中性子波長
磁場積分 = 磁場強度



3次元偏極度解析

$$\mathbf{P}(t) = D\mathbf{P}(0) \quad D = \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{yx} & D_{zx} \\ D_{xy} & D_{yy} & D_{zy} \\ D_{xz} & D_{yz} & D_{zz} \end{bmatrix}$$

スピン回転行列 (減偏極行列) D

偏極度の波長依存性の解析
→ スピン回転角の絶対値の
解析が可能

回転行列 D の各要素には

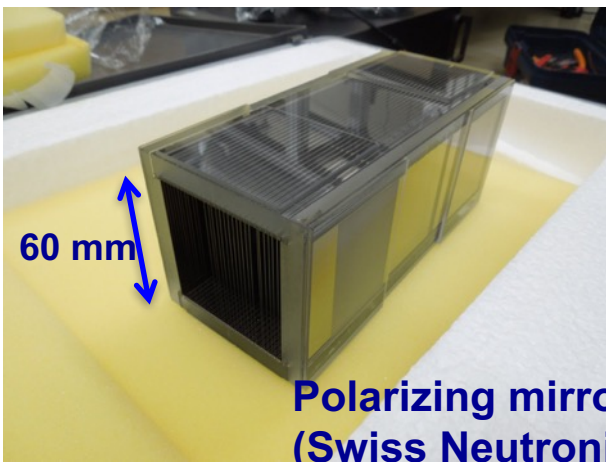
φ と 磁場の方向余弦 (n_x, n_y, n_z)
が含まれる

$$D_{ii} = 1 - (1 - \cos \varphi) \cdot (1 - n_i^2)$$

$$D_{ij} = 1 - (1 - \cos \varphi) n_i n_j - n_k \sin \varphi$$

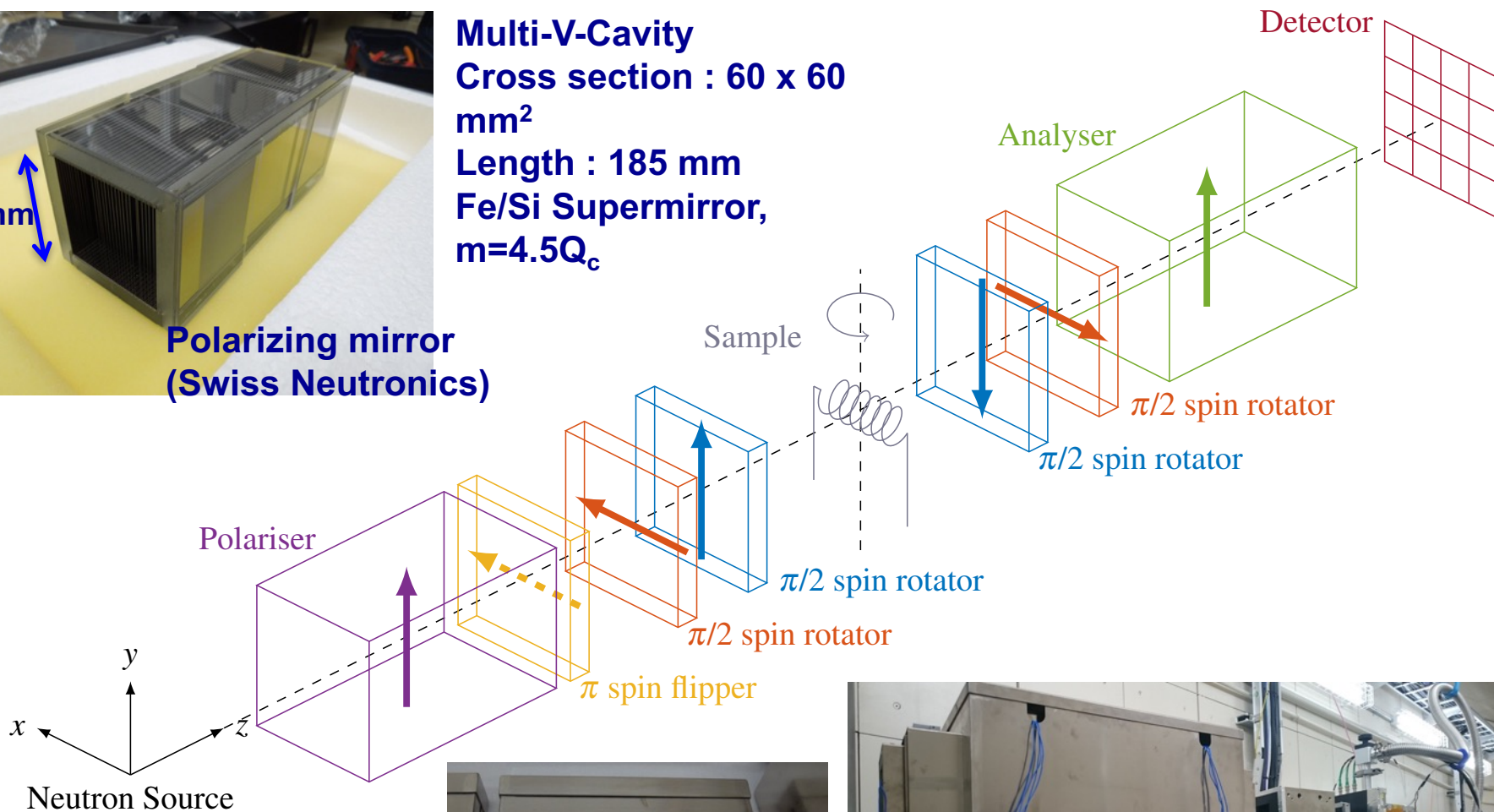
$$i \neq j \neq k$$

3次元偏極度解析装置

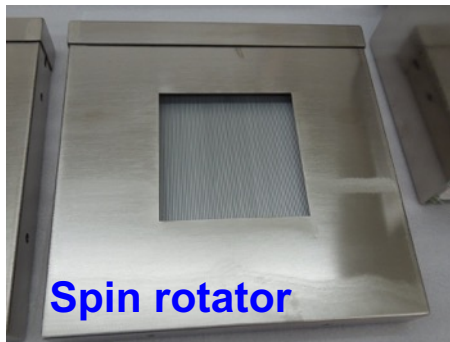


Multi-V-Cavity
Cross section : 60 x 60 mm²
Length : 185 mm
Fe/Si Supermirror, $m=4.5Q_c$

Polarizing mirror
(Swiss Neutronics)



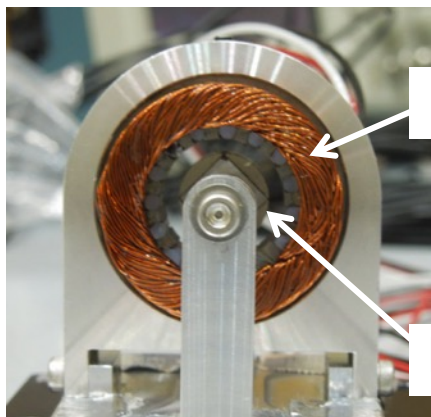
T. Shinohara, et al., J. Phys.: Conference Series 862, 012025 (2017).



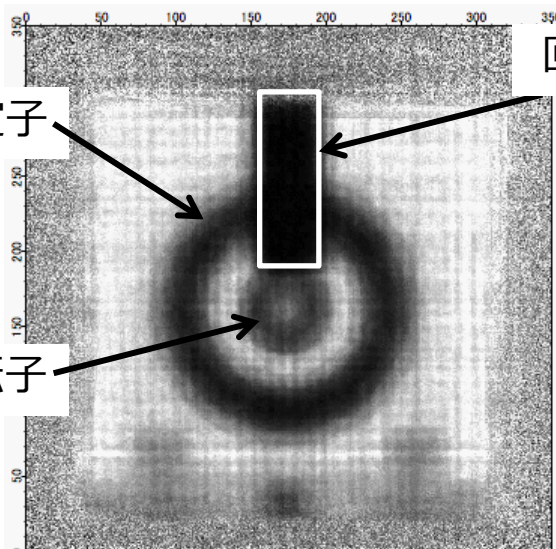
Spin rotator



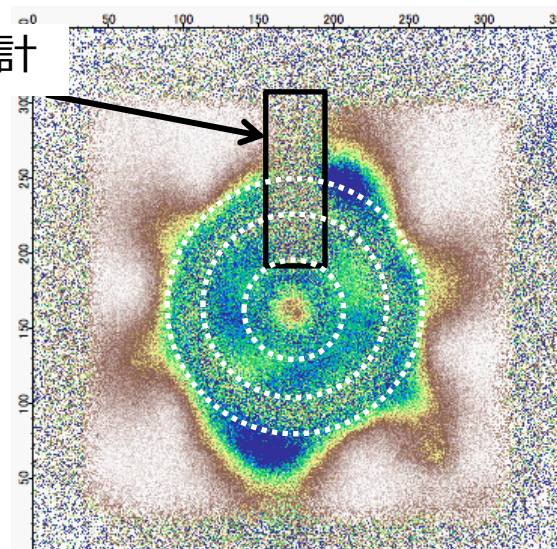
稼働状態のモーターの磁界を中性子で可視化する



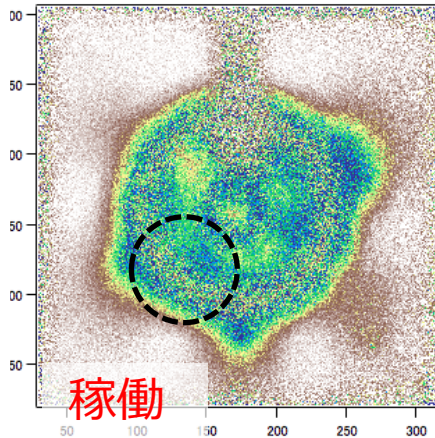
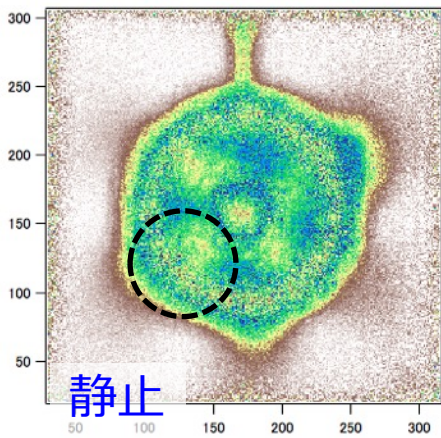
モデルモーター
回転周期
21.5Hz



中性子透過強度像



中性子スピン情報画像



稼働状態と静止状態

→ 中性子の透過像が違う

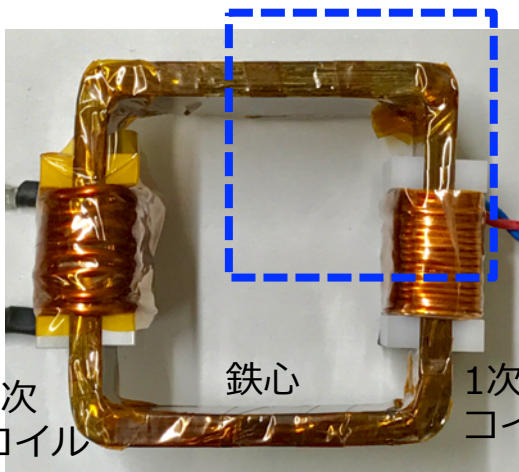
稼働状態での磁界の様子の変化を取得

= 稼働時の損失を反映

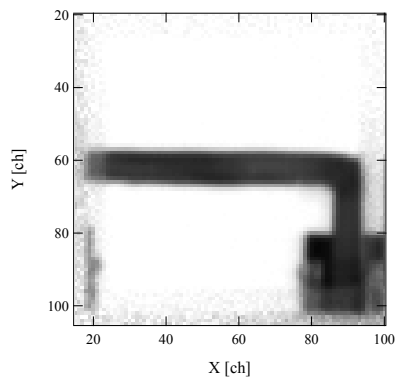
トランスからの漏洩磁場観察

偏極度分布像

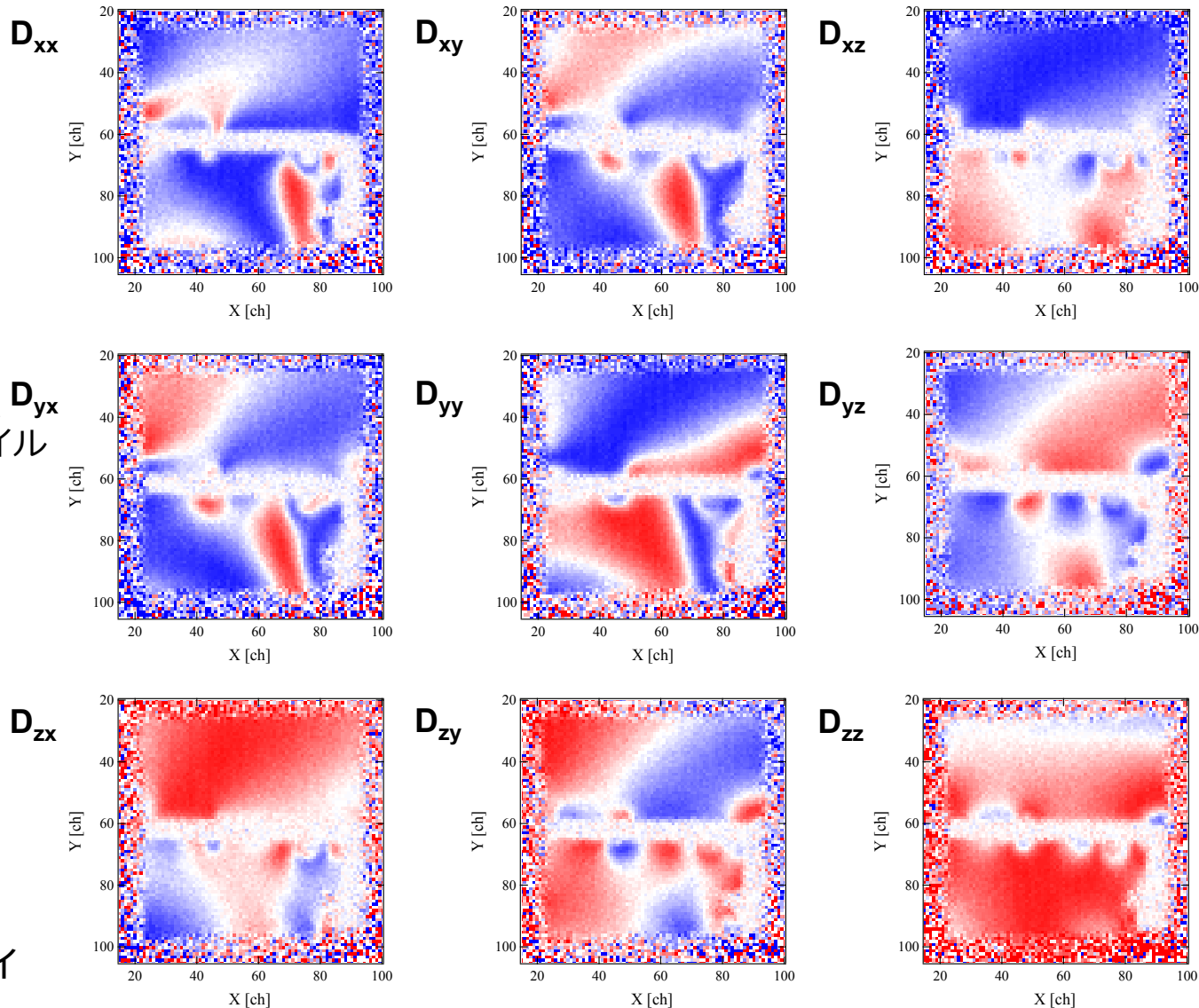
小型モデルトランス



小型変圧器

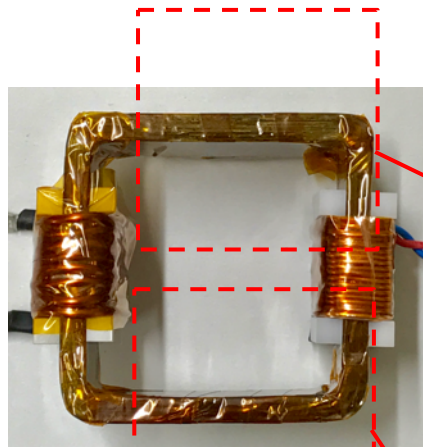


中性子ラジオグラフィ

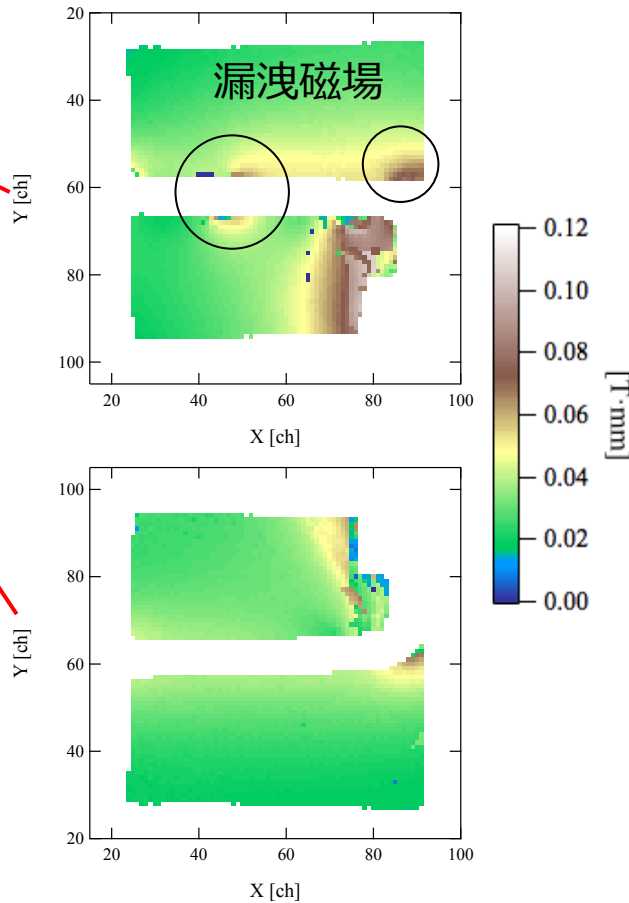


変圧器周囲の漏洩磁場による偏極度分布の変化を検出

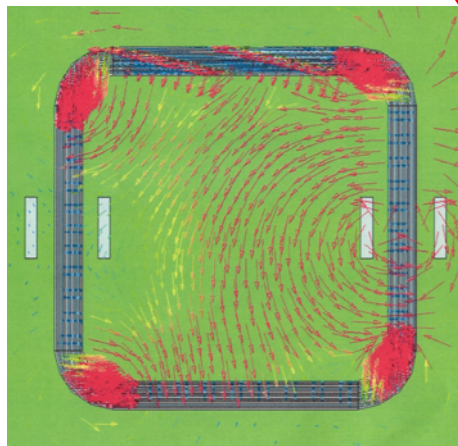
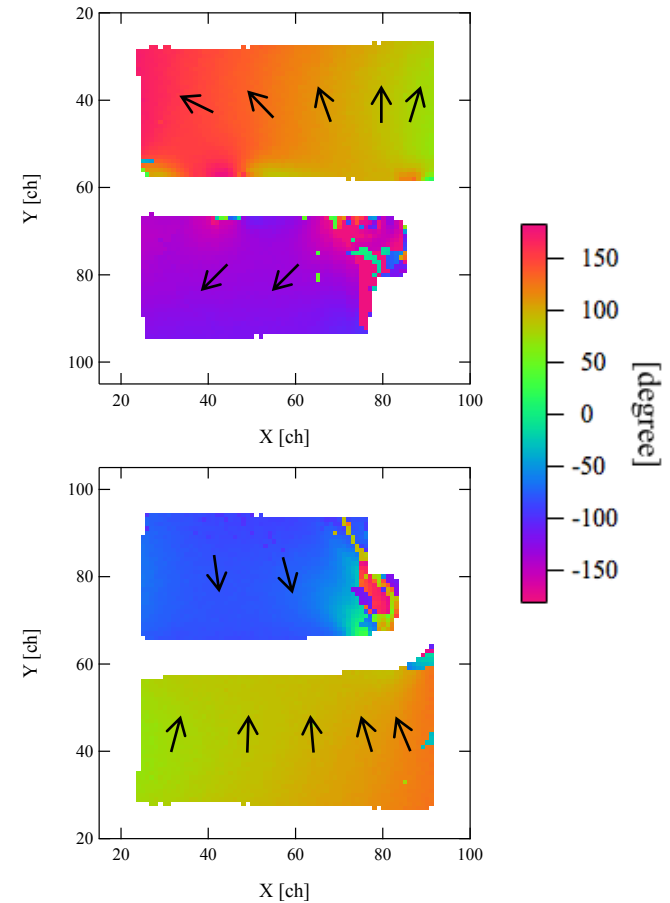
DC電圧印加時の磁場分布の画像化



磁場積分強度



面内角度分布

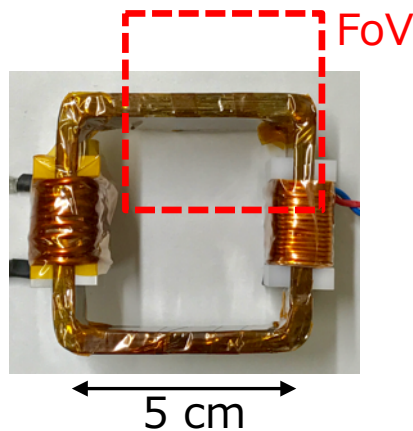


面内磁場方向分布の計算結果

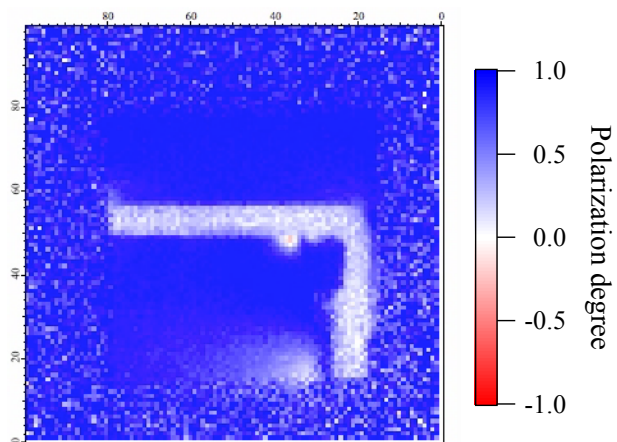
- 解析により得られた磁場分布は予測と概ね一致
- **ステップラップの継ぎ目やコア端部からの漏洩磁場の分布を可視化**

トランスの交流磁場への応答

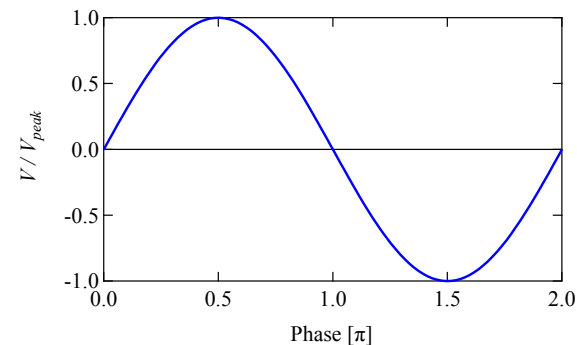
小型モデルトランス



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



$1/10\pi$

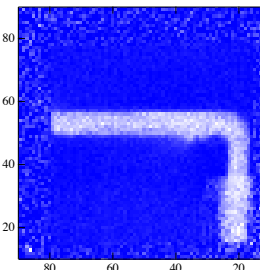
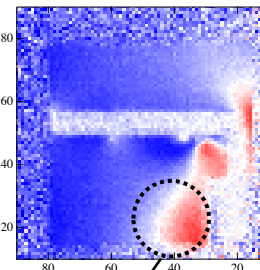
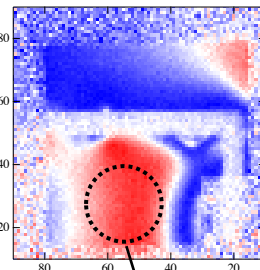
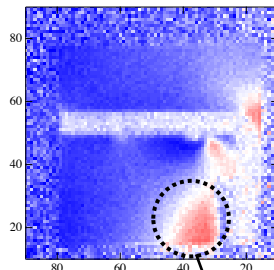
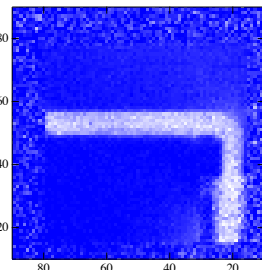
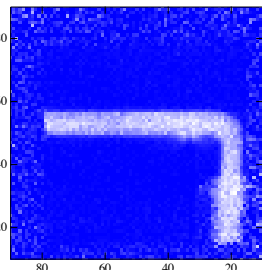
$3/10\pi$

$5/10\pi$

$7/10\pi$

$9/10\pi$

$11/10\pi$

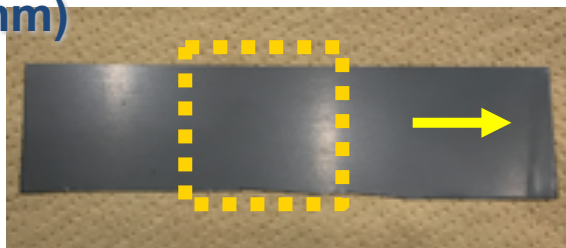


漏洩磁場による偏極度変化

- 小型トランス内外に生じる漏洩磁場を偏極度の変化を通して観察
- 印加電圧に対する漏洩磁場の位相遅れも観察された

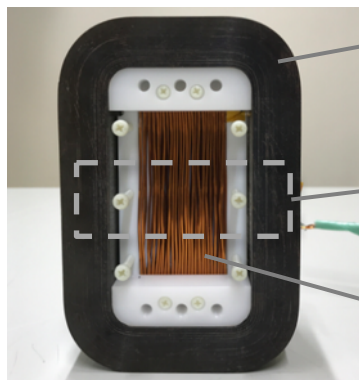
電磁鋼板の磁区観察

Sample : grain-oriented electric steel sheet (t = 0.23 mm)

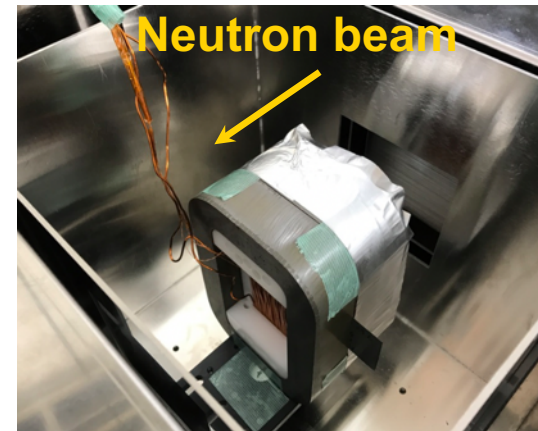


FOV=50mm x 50mm

Sample holder



Iron yoke
Sample
Driving coil



0.20A

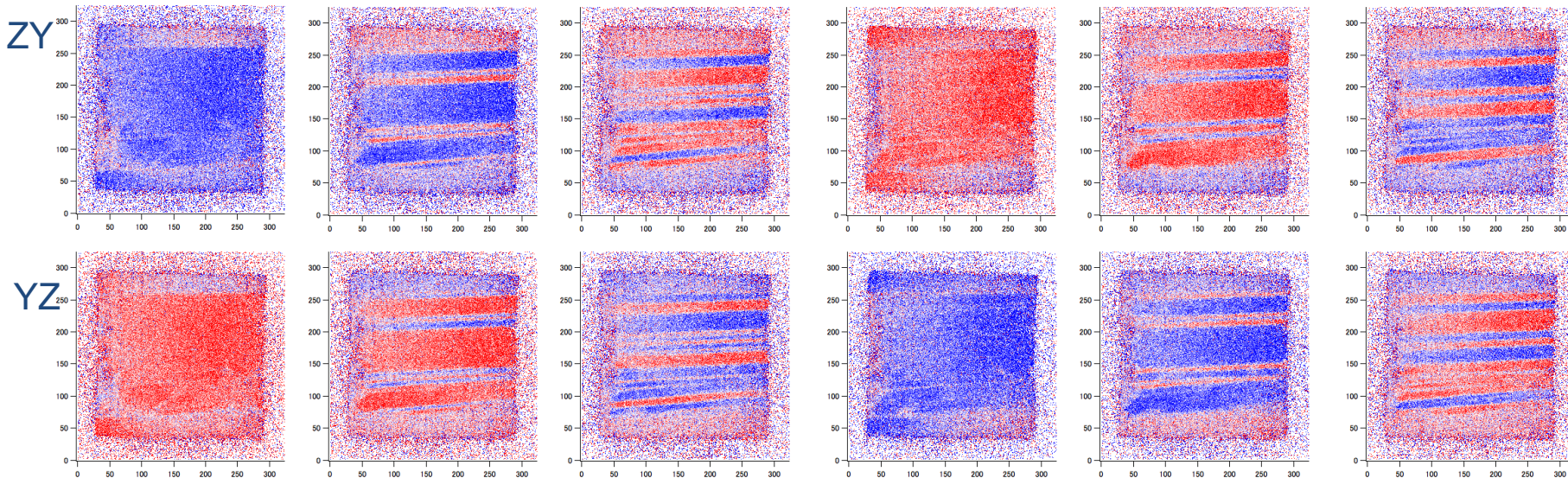
0.0A

-0.01A

-0.20A

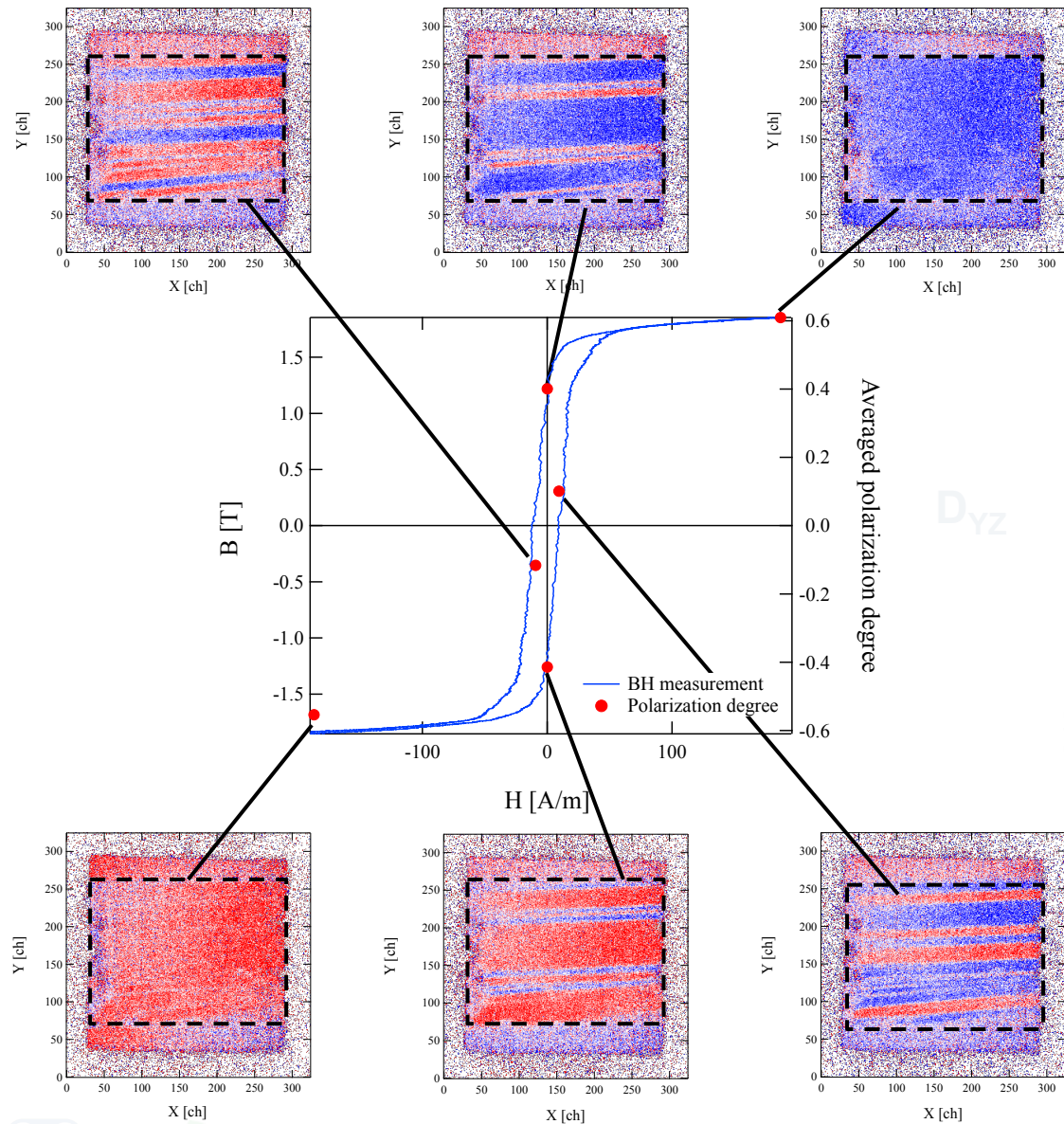
0.00A

0.01A

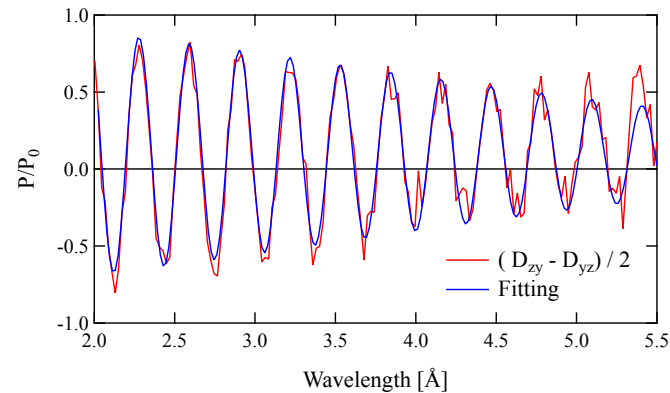


$\Delta=200\mu\text{m}$

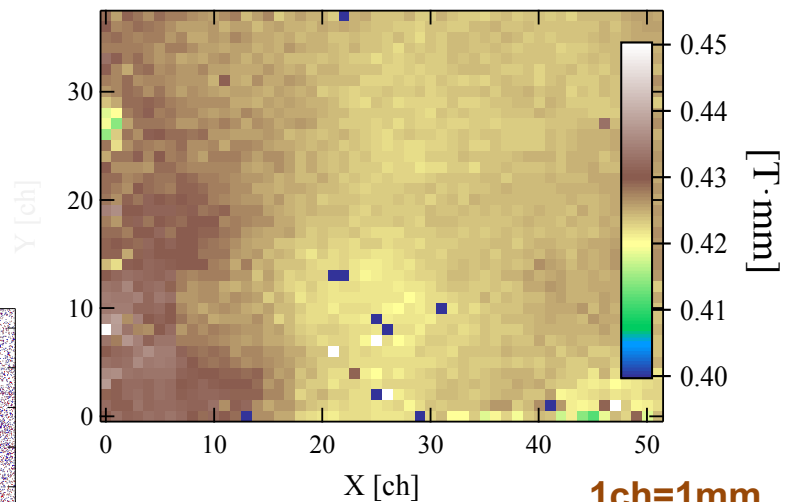
電磁鋼板の磁区観察



Wavelength dependence of polarization



Oscillation period \rightarrow $B=1.82 \text{ \AA}$



1ch=1mm

Integrated magnetic flux density

RADENでは、光・量子融合連携研究開発プログラムの元で中性子・ミュオン・X線を複合的に利用したイメージング技術の開発と実用製品開発への応用研究を実施中

- 技術開発

パルス中性子を用いた分光イメージング技術の高度化・実用化
 中性子・X線・ミュオンを用いた元素分析技術開発
 中性子画像処理の実時間処理システムの構築
 ミュオンラジオグラフィの実現

- Liイオン電池の充放電量の分布の観察

Liイオン電池のハイレート劣化における内部現象の理解に向けて、中性子およびミュオンを用いた観察技術試験を実施。

- 磁場関連製品の観察

偏極中性子を用いた交流磁場観察技術を開発し、稼働中のモデルモーター、トランス等の磁場分布の可視化を実施。

螺鈿メンバー

甲斐哲也、及川健一、中谷健、瀬川麻理子 (J-PARC)
林田洋寿、J.D. Parker、松本吉弘 (CROSS)
鬼柳善明 (名古屋大学)



光量子融合連携研究開発プログラム

(Photon and Quantum Basic Research Coordinated Development Program by MEXT)

廣井孝介、蘇玉華 (JAEA)
加美山隆、原かおる、佐藤博隆 (北大)
持木幸一 (都市大)
松本清市、藤巻寿隆 (トヨタ)
今川尊雄 (日立)
三宅康博、反保元伸、河村成肇 (KEK)



TOYOTA

HITACHI
Inspire the Next

