

平成30年度中性子イメージング専門研究会
H30/12/27, 京都大学複合原子力科学研究所

北海道大学中性子施設の現状と X線複合ラジオグラフィの研究

(北海道大学) 加美山 隆

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, 35 μ Aの電子ビーム～1.2kW
 - 繰り返し周波数: Single / 10～50 Hz



- ▶ 中性子発生源
 - 発生反応: 電子線制動放射 → 光核反応
 - 線源強度: 1.6×10^{12} neutron/sec



冷中性子源

- 結合型冷中性子源
- メシレンモデレータで稼働(温度～20K)

熱中性子源

- 結合型熱中性子源
- PEモデレータ(温度～300K)
- X線ターゲットと遠隔操作切り替え式

北海道大学 札幌キャンパス

瞬間強力パルス状放射線
発生装置研究室

J-PARC

工学部



45MeV電子線形加速器施設のアップグレード計画

• HUNSアップグレード計画

北大施設＝小型施設のパイオニア、貴重なパルス中性子源
学生教育にも使用
加速器老朽化のため、加速器本体のリプレイス計画を推進

加速器の種類は？・・・北大としてはこれまで通りの電子線形加速器が最適

- ・枯れた技術で、非常に安定している
- ・年間150～200日の稼働が期待できる
- ・維持コストが低い

技術職員一人でも何とか維持可能

電気代 350万円/年(週5日全80時間)＋他の維持に100万円/年

旧加速器

電子線エネルギー 45MeV(1.2 kW 時、34MeV)
尖頭電流 1mA(100mA)
平均電流 35 μ A
パルス幅 0.01 μ S～3 μ S
パルス繰返数 単パルス、10～200→10～50P.P.S

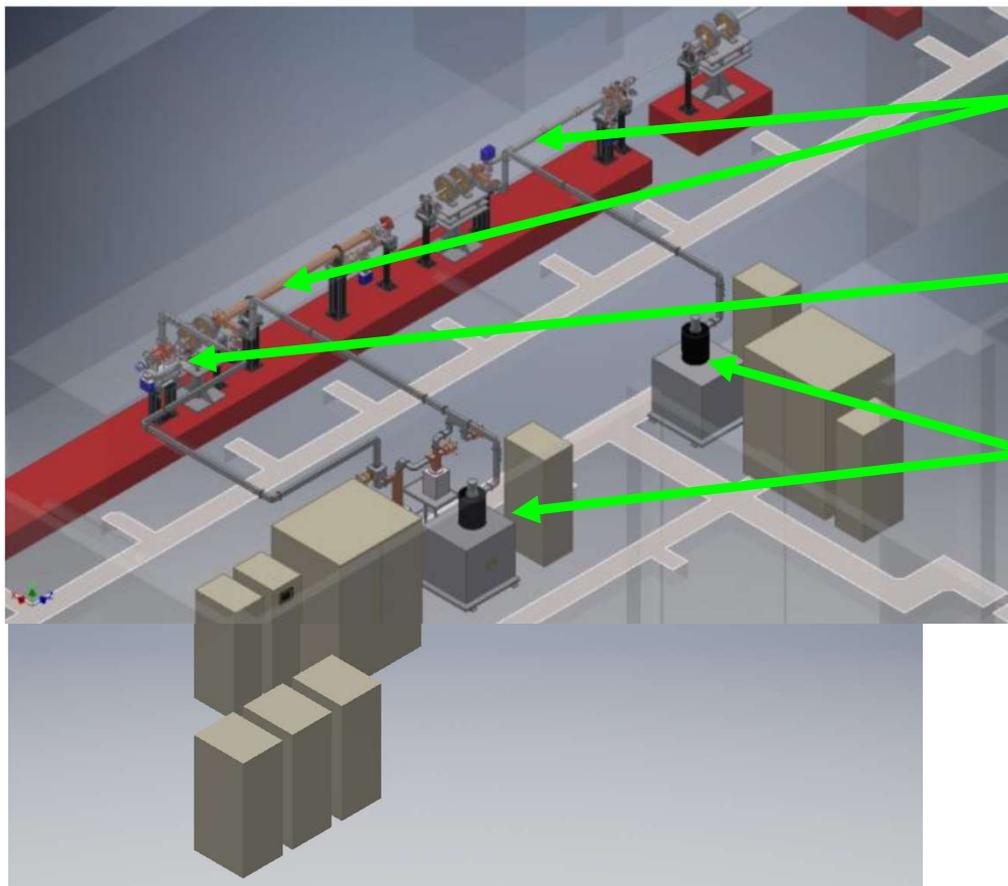


新加速器

45MeV(3.5 kW 時、35MeV)
尖頭電流 250 mA
平均電流(100 μ A)パルス幅 0.01 μ S～4 μ S
パルス繰返数 単パルス、10～100 P.P.S

出力を3倍に！

HUNS新加速器のシステム構成



加速管

旧: $2\text{m} \times 3$

新: $3\text{m} \times 2$

入射器

3MeV

クライストロン

$7.5\text{MW} \times 2$

新加速器:

中性子パルス: $4\ \mu\text{s}$ 100 pps
0.04% duty

ピーク電流: 0.25A,

平均電流: 100 μA

$\Rightarrow 30\ \text{MeV}, 3\ \text{kW}$

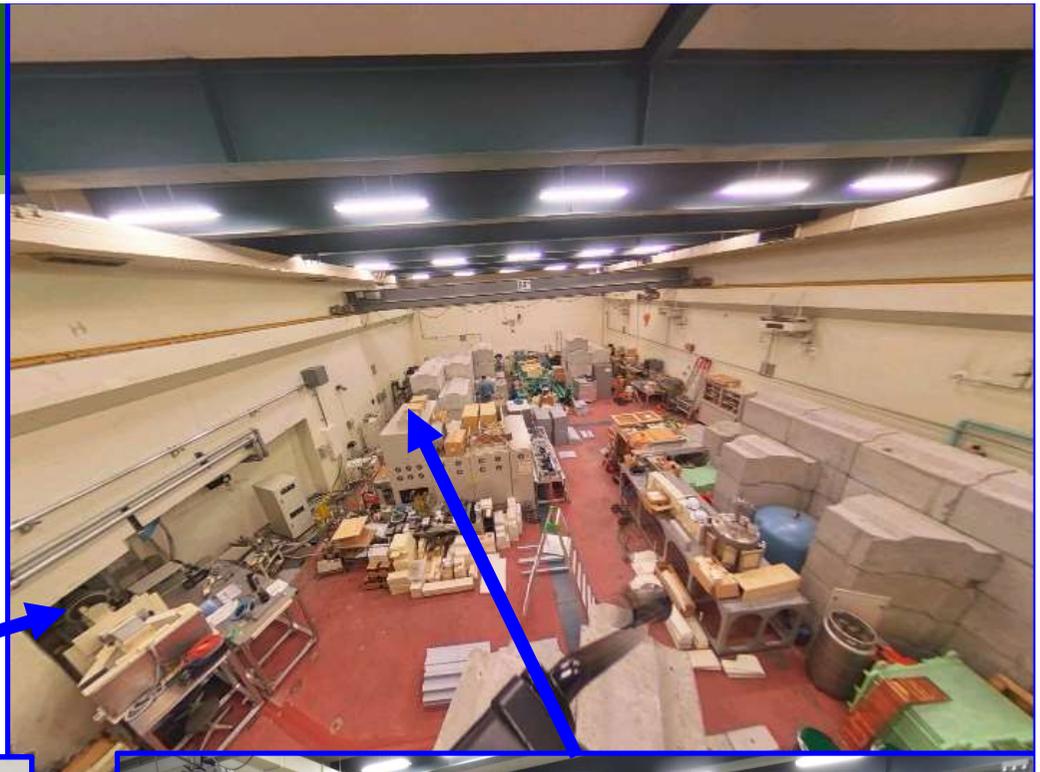
旧加速器: 34MeV $3\ \mu\text{s}$ 50 pps, 1.2 kW



新旧加速器の要目比較

	旧ライナック	新ライナック
ピーク電流	210 mA	250mA
ビームエネルギー	46 MeV (50 mA時) 31.5 MeV (210 mA時)	~32 MeV (250 mA時) (計画値)
ビームパルス幅	0.01 ~ 3 μ s	0.1 ~ 4 μ s
繰り返し	1 ~ 100 pps (通常 50 pps で運用)	1 ~ 100 pps
ビーム出力	~1.9 kW (100 pps時)	~3.2 kW (計画値)
モジュレータ数	3 台	2 台
クライストロン出力	5 MW	7.5 MW

ビームラインの状況



2018年12月21日現在の状況

北大の加速器で最も長期間稼働していたのが45MeV電子線形加速器であった。

2017年10月31日に加速器の稼働を停止。

- 停止翌日から撤去準備作業を開始
- 翌週11月13日～24日で加速器を撤去
- 11月27日から新加速器設置準備
- 12月11日から設置作業開始
- 2018年1月22日に大型機器設置作業終了
- 5月30日まで機器間接続、配線、冷却水/ガス/真空配管
- 5月31日に中性子発生確認
- 以後、ビーム調整&エージング、初期不良点の改修を実施
地震による真空悪化→誘導部の分解、不良個所の交換
- **10月12日に施設検査合格**
→ラジオグラフィの撮影試験を実施
- 11月12日～24日メタン冷中性子源の試験に成功
→12月12日～14日**冷中性子小角散乱実験**を実施
- 12月17日～**高分解能ブラッグエッジ実験**を実施

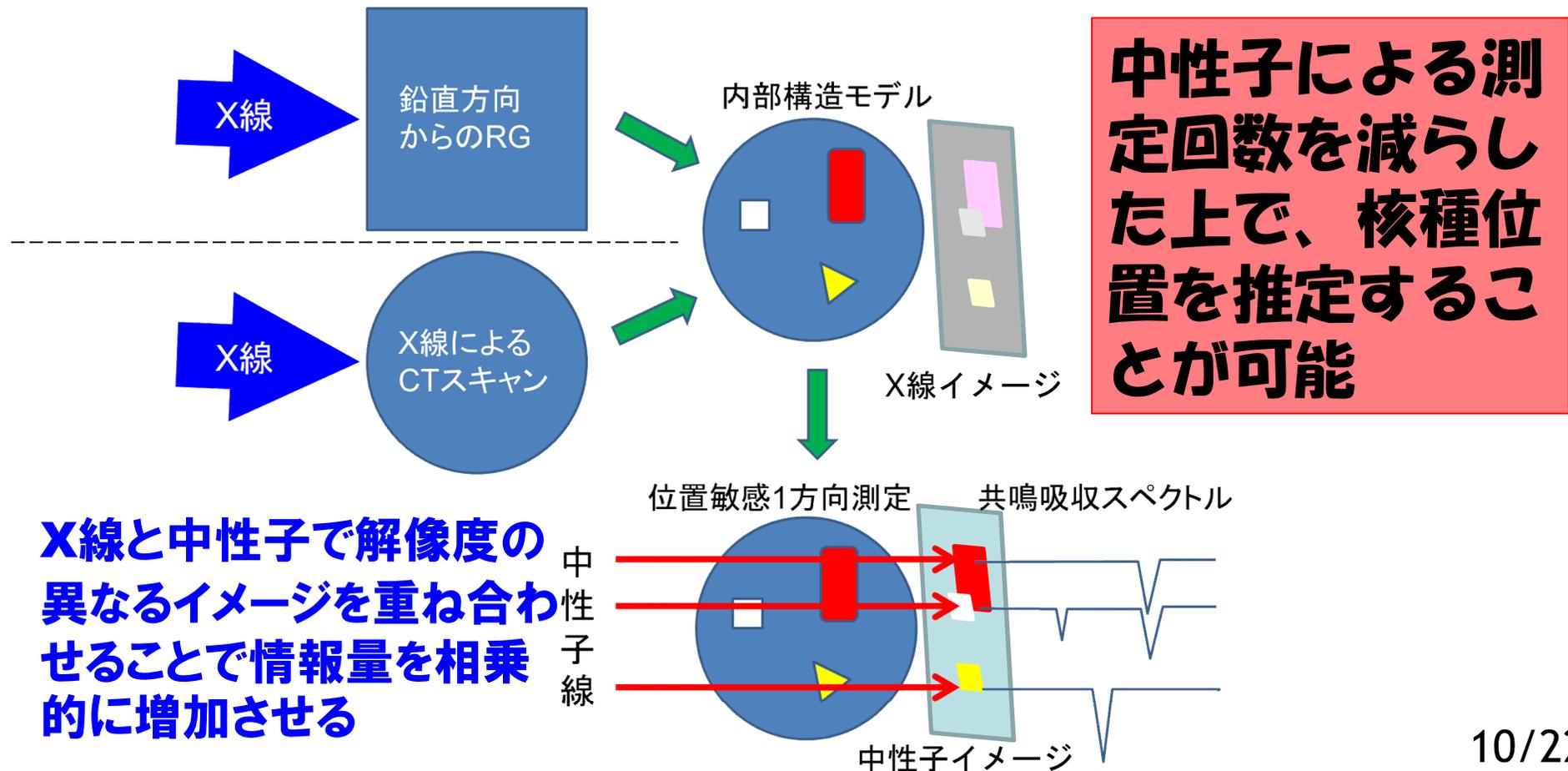
中性子/X線イメージングの複合化

本研究は、特別会計に関する法律(エネルギー対策特別会計)に基づく文部科学省からの受託事業として京都大学が実施した平成29年度「次世代原子炉燃料の健全性評価のための非破壊分析技術の開発」の成果を含む。

中性子/X線イメージングの融合による測定効率化

N-DeMAIN

- 中性子共鳴吸収解析による密度・温度を用いたCT
→膨大な測定時間が必要。
- X線CTによる形状データに、中性子による密度・温度データを付加することで、中性子測定の方角を減らす。



中性子/X線複合イメージングの流れ

N-DeMAIN

① 中性子/X線イメージングの実施

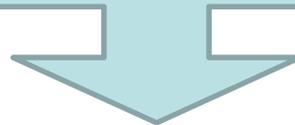
中性子：共鳴を利用した密度・温度イメージング、ラジオグラフィ
X線：高精細なラジオグラフィ、CT撮像

② 中性子画像とX線画像の位置合わせと高解像度化

中性子とX線は異なる検出器（撮像系）を用いるので、
複合化のために画像の位置・寸法合わせ及び解像度の調整を行う。

③ 相乗イメージングによる元素分布図の作成

中性子とX線の断面積の違いを活かした手法により
試料内部の元素分布を求める



高精細な密度・温度イメージの作成

相乗イメージングにより作成した高精細な元素分布の画像に対し、
中性子イメージングによって得た密度・温度情報等を付与する

相互情報量による位置合わせの原理①

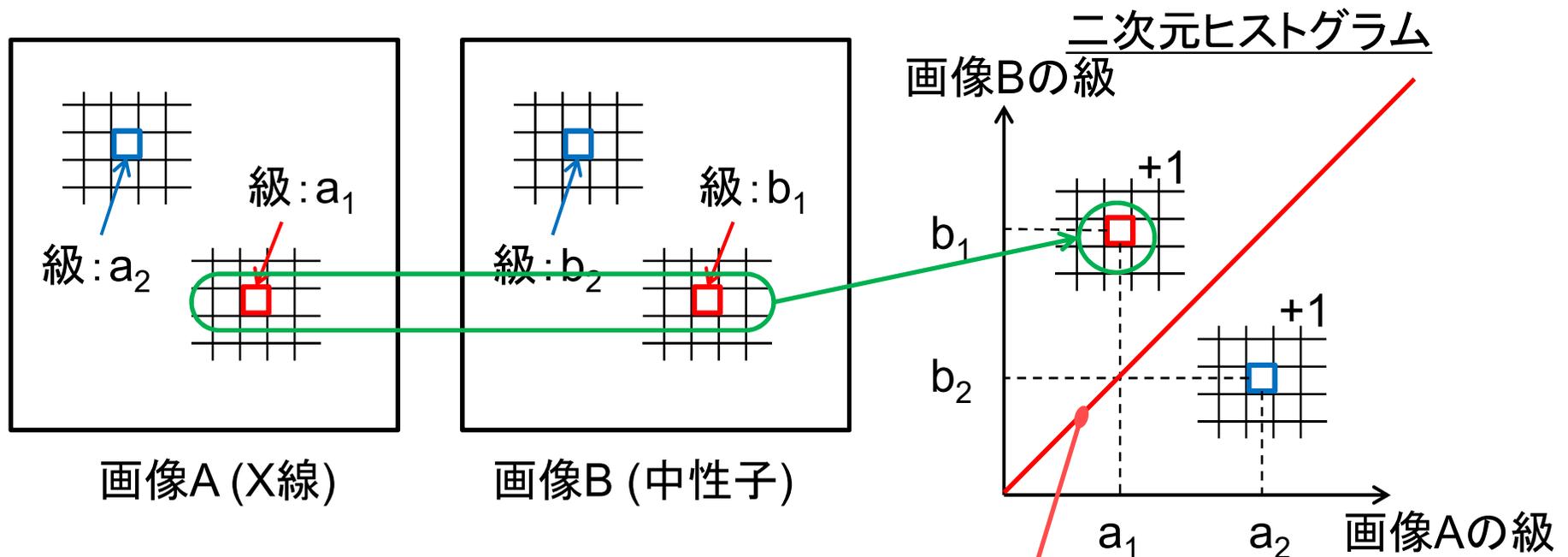
N-DeMAIN

相互情報量による位置合わせ法

2つの画像AとBの位置合わせを行う際の指標として「相互情報量 (MI: Mutual Information)」を用いる。

① 二次元ヒストグラムの作成

位置合わせをする画像A, Bの画素*i*がそれぞれ a_i, b_i という級(強度)を持つ時、二次元ヒストグラムでは座標 (a_i, b_i) に1カウントされる



画像A, Bが一致→二次元ヒストグラムは傾き45度の直線を描く

相互情報量による位置合わせの原理②

N-DeMAIN

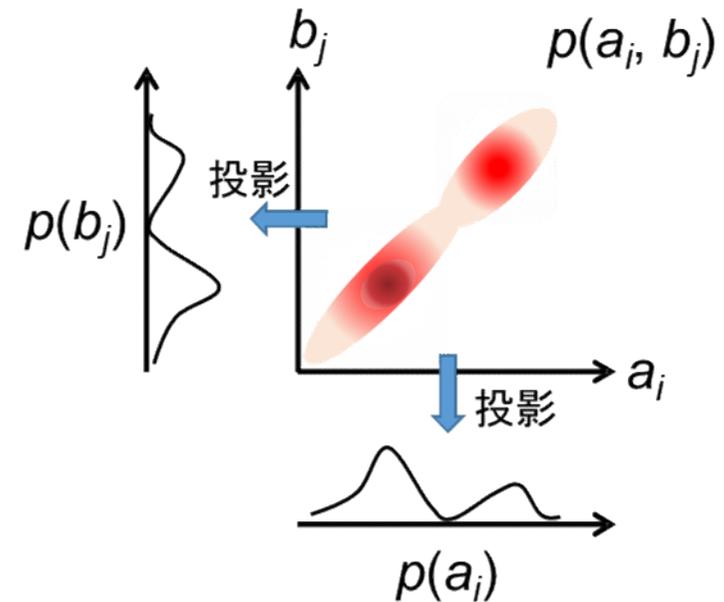
②相互情報量MIの計算

二次元ヒストグラム上の座標を (a_i, b_j) とした時、画像A,Bに関するMI(A,B)は次の式で定義される。

$$MI(A, B) = \sum_{i=1} \sum_{j=1} p(a_i, b_j) \log_2 \frac{p(a_i, b_j)}{p(a_i)p(b_j)}$$

$p(a_i), p(b_j)$: 周辺確率分布

$p(a_i, b_j)$: 2次元確率分布



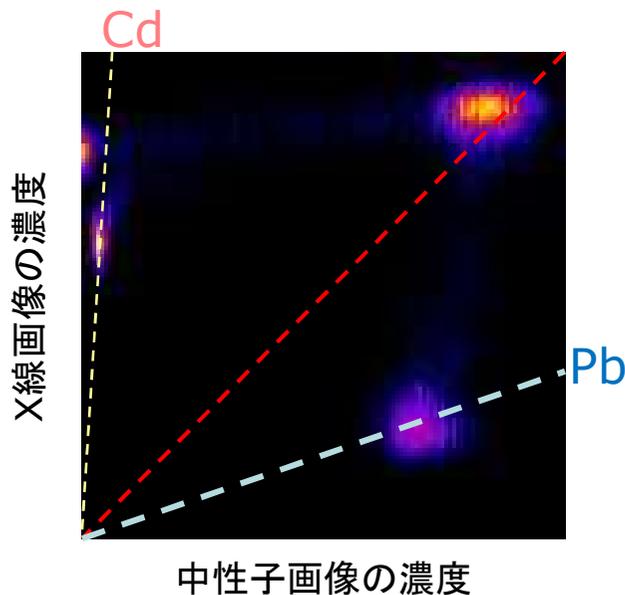
MIが大きいほど2つの画像の一致度が高くなる。
つまり、MIが最大になるように一方の画像を移動することで位置合わせを行うことが可能。

断面積の原子番号依存性

N-DeMAIN

中性子画像とX線画像との間においては、2次元ヒストグラムは45°の傾きを持つ直線にはならない

→ 中性子とX線では元素ごとの断面積の大きさが異なるため



MIの2次元ヒストグラム



スポットの位置で弁別すれば、元素(核種)を区別したイメージングが可能

= 相乗イメージング (Synergy Imaging)

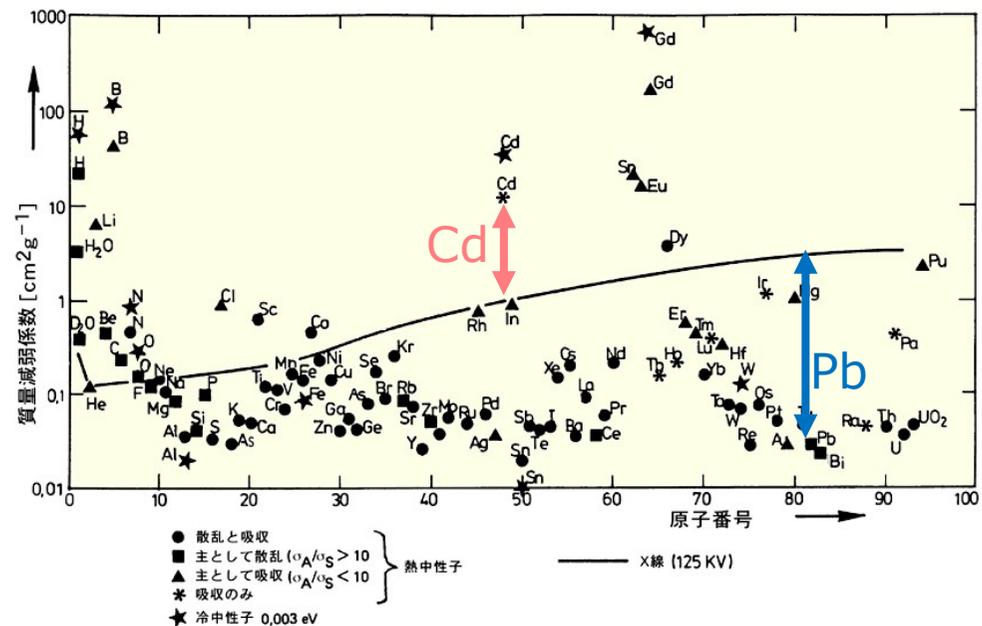


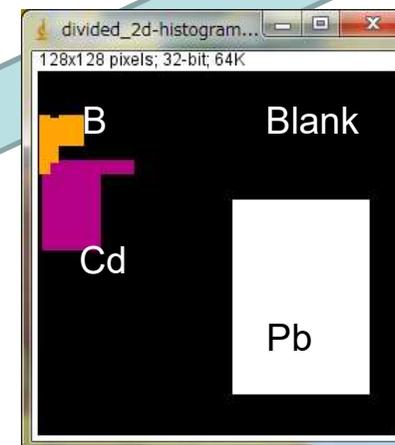
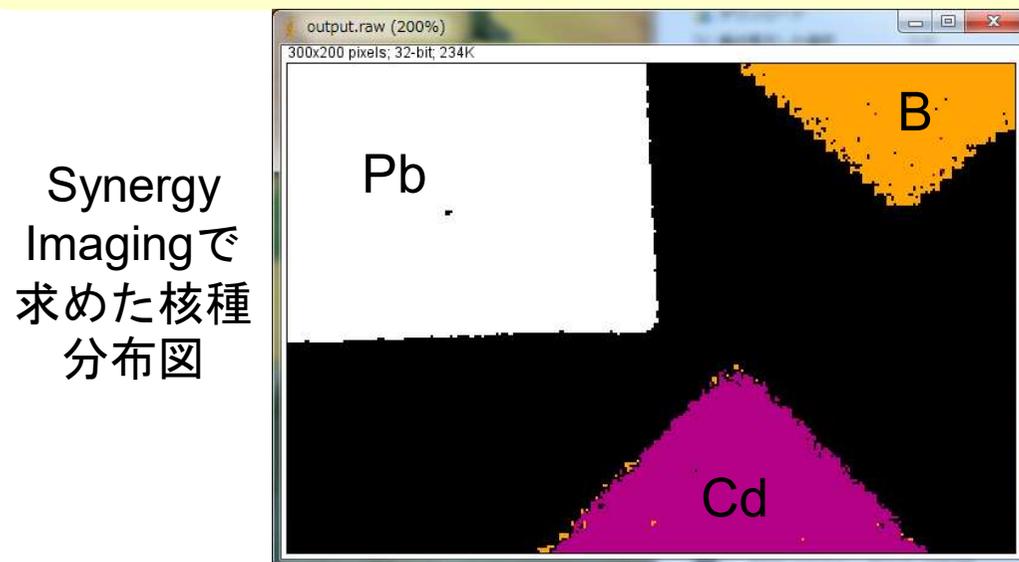
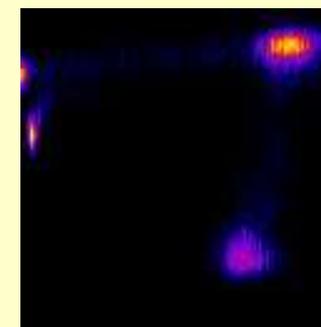
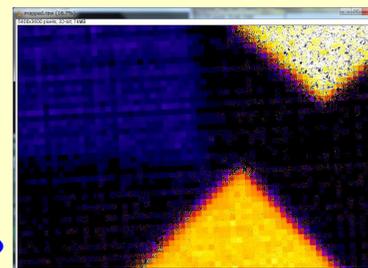
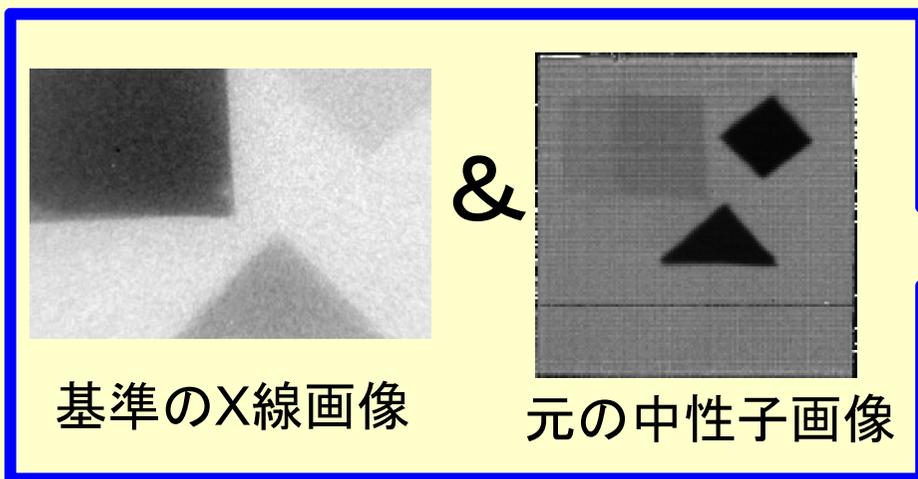
図1 異なるエネルギーを持つ中性子およびX線に対する質量減弱係数

[出典]P.von Der Hardt and H.Rotger eds.: "Neutron Radiography Handbook", (D.Reidel Publishing Company, Dordrecht, 1981)20

相乗イメージングの原理

N-DeMAIN

X線と中性子に対応した画像A,Bから相互情報量MIの2次元ヒストグラムを作ると、2次元面上に複数のスポットが現れる。



中性子/X線複合イメージングの流れ

N-DeMAIN

① 中性子/X線イメージングの実施

中性子：共鳴を利用した密度・温度イメージング、ラジオグラフィ
X線：高精細なラジオグラフィ、CT撮像

② 中性子画像とX線画像の位置合わせと高解像度化

中性子とX線は異なる検出器（撮像系）を用いるので、
複合化のために画像の位置・寸法合わせ及び解像度の調整を行う。

③ Synergy Imagingによる元素分布図の作成

中性子とX線の断面積の違いを活かした手法により **3次元化**
試料内部の元素分布を求める

高精細な密度・温度イメージの作成

Synergy Imagingにより作成した高精細な元素分布の画像に対し、
中性子イメージングによって得た密度・温度情報等を付与する

3次元データへの中性子情報の付与

N-DeMAIN

Synergy Imagingを3次元へ拡張し、ボクセルデータへ中性子情報を付与する手順

- (1) X線CTにより、高精細な3次元形状データ(ボクセルデータ)を取得
- (2) 試料の2~3方向(例えば、x, y, z軸方向)からの中性子透過画像を取得
= 中性子測定回数を減らす

(3) X線によるボクセルデータから3方向それぞれの投影画像を作成し、中性子画像と相乗イメージングを行う。

(4) 相乗イメージングの結果できた3方向の元素分布図の数値をボクセルデータに逆投影して足していく。

(5) 元素分布図の数値の組み合わせによりボクセルデータに入る数値が決まるので、各ボクセルにおける元素の弁別が可能となる。

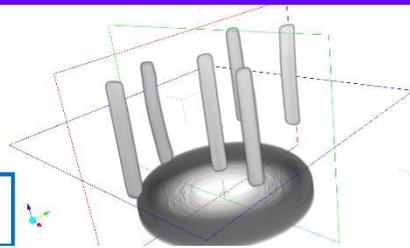
3次元相乗イメージング

N-DeMAIN

試料: Al円筒(20mm ϕ × 10mm h) + 1mm ϕ 金属線 (Ta, W, Pb, In, Ag)

X線CTによるAl円筒
内部構造の取得

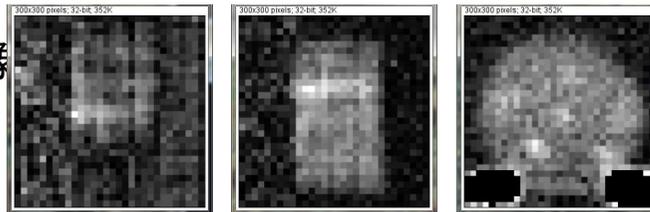
ボクセルサイズ: 33 μ m³



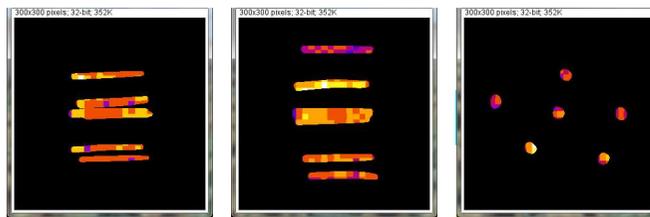
X線RG投影画像
(CT結果の再投影)



中性子RG投影画像
(GEM検出器)



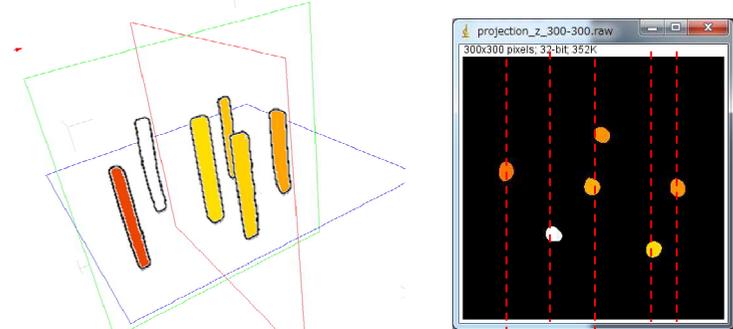
x,y,z方向に関する
相乗イメージング



再構成 & 閾値の設定



Al円筒中の金属線の
3次元相乗イメージング結果



3次元ボリュームデータのスライス結果



中性子とX線のラジオグラフィから物体内の物質分布が解析可能
中性子測定回数を大幅に削減、空間分解能を改善

まとめ

N-DeMAIN

HUNSアップグレード

- ・ アップグレード作業はほぼ終了。実験を開始。
- ・ 現在、不具合を調整中。

中性子/X線イメージング複合化の利点

- ・ 中性子利用による核種・密度・温度等の特徴的な情報
- ・ X線ラジオグラフィの高空間分解能、簡便なCT測定
- ・ 中性子あるいはX線単独では得られない情報

それぞれの特長を活かした様々な情報の分布を可視化することができる。

相互情報量MIの利用

- ・ 画像の位置、回転、拡大率をパラメータとした位置合わせ



相乗イメージング

- ・ X線と中性子の断面積の違いを利用して、元素(核種)の弁別が可能
- ・ X線CTと組み合わせて元素分布も3次元ボリュームデータ化可能
＝中性子測定特有の情報も3次元にマッピングすることができる。
- ・ 3次元化の際、中性子測定回数を大幅に減らすことに成功