

小型中性子線源で用いる 可搬型イメージング装置の開発

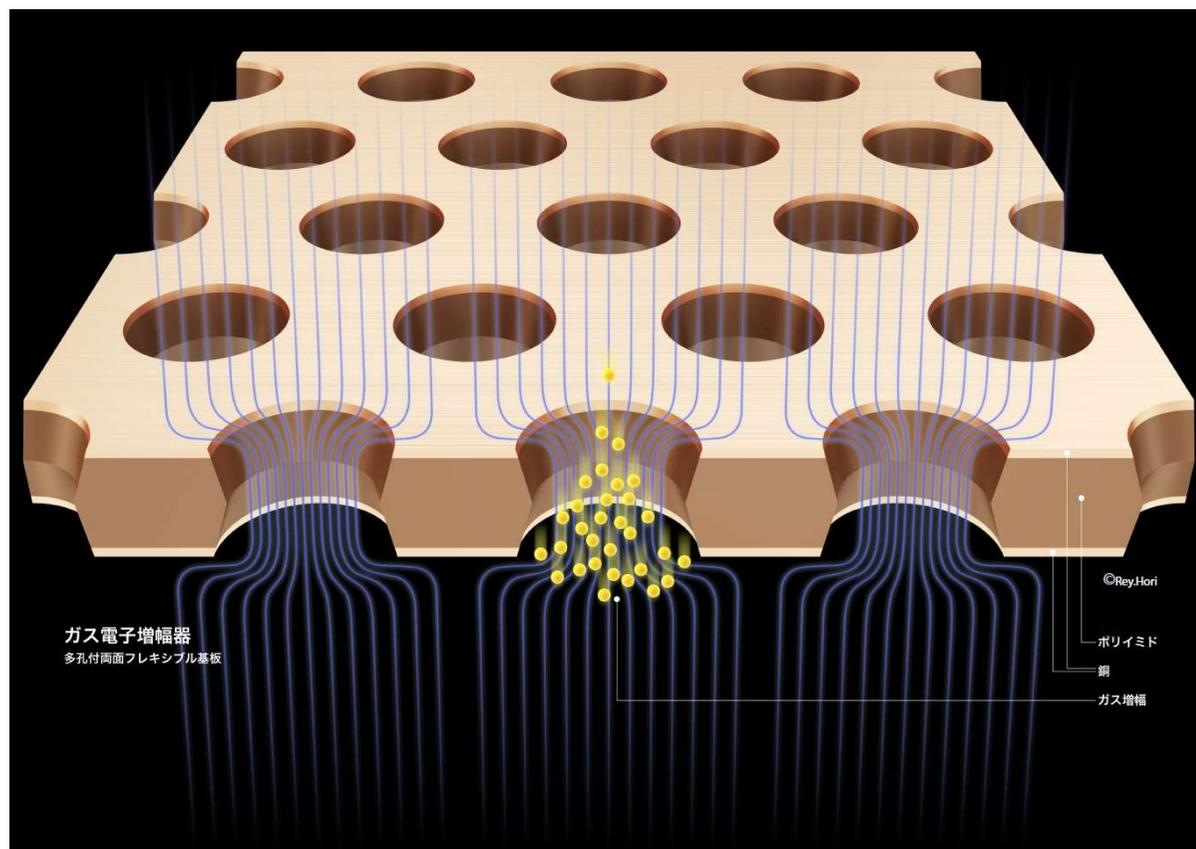
宇野彰二 KEK

2016.11.10

ガス電子増幅器 (GEM)

両面フレキシブル基板

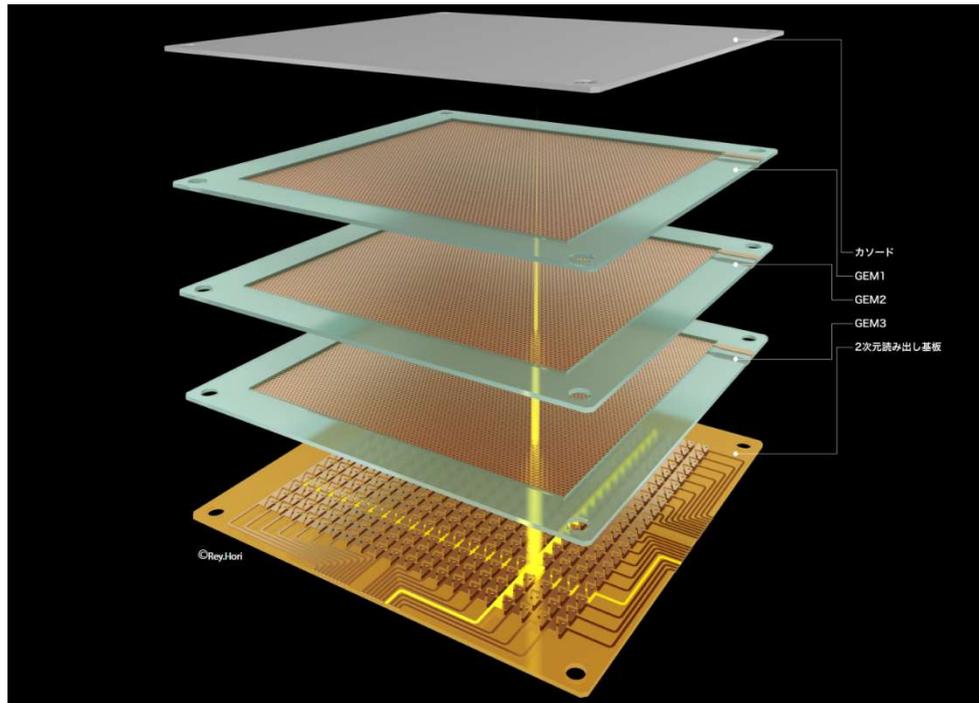
電気力線



| | |
|--------|-------------|
| 穴径 | 70 μ m |
| 穴ピッチ | 140 μ m |
| 絶縁材の厚さ | 50 μ m |
| 銅箔厚さ | 5 μ m |

F.Sauli (CERN) によって1997年に提案
NIMA 386(1997)531

GEMの特徴



多段化可能
独立した読み出しパターン

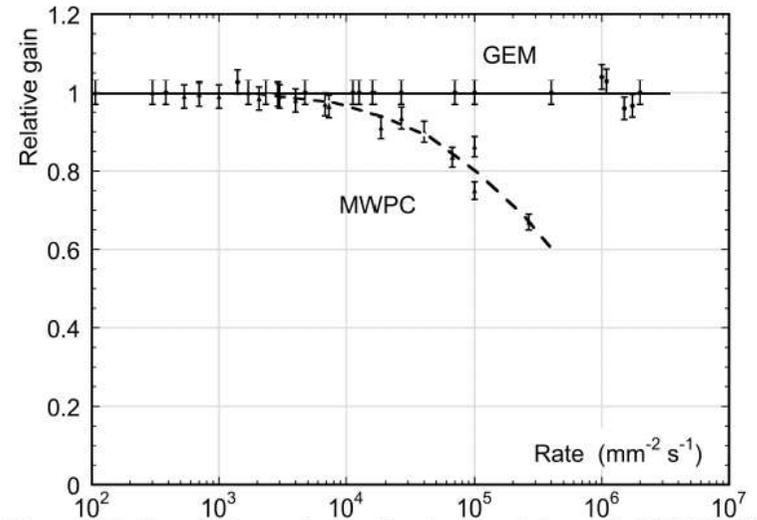
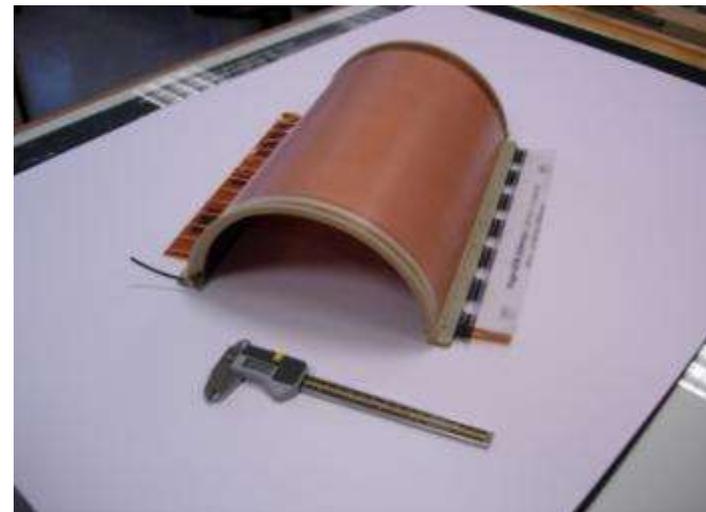


Figure 31.9: Normalized gas gain as a function of particle rate for MWPC [72] and GEM [86].

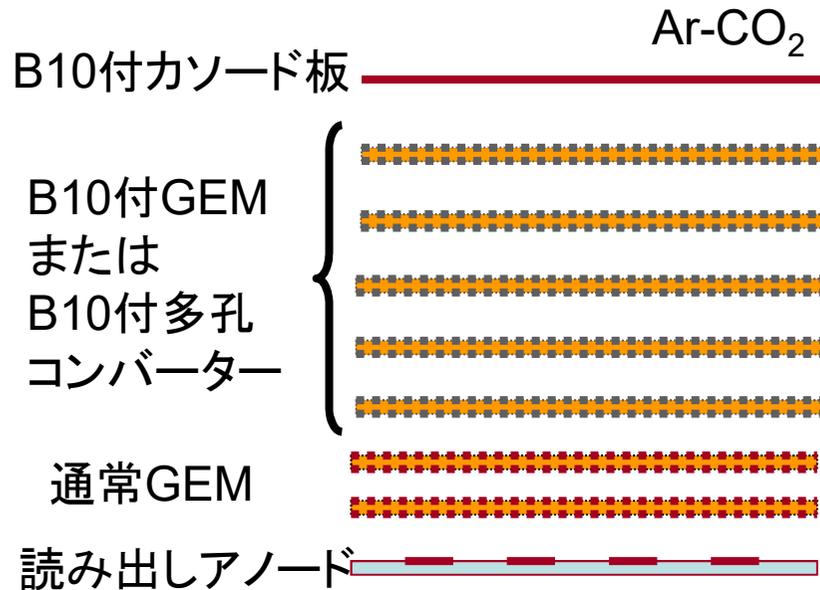
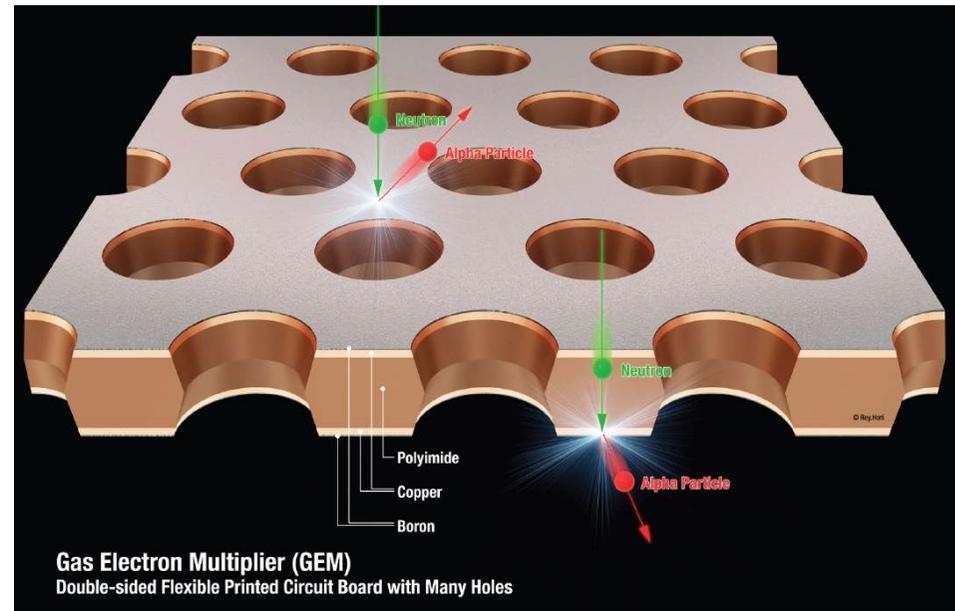
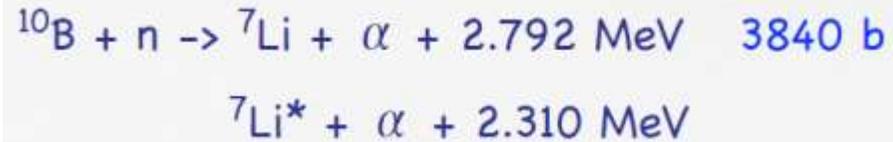
高計数率 $>10^6 \text{ Hz/mm}^2$



曲げられる。円筒形

中性子検出器への応用

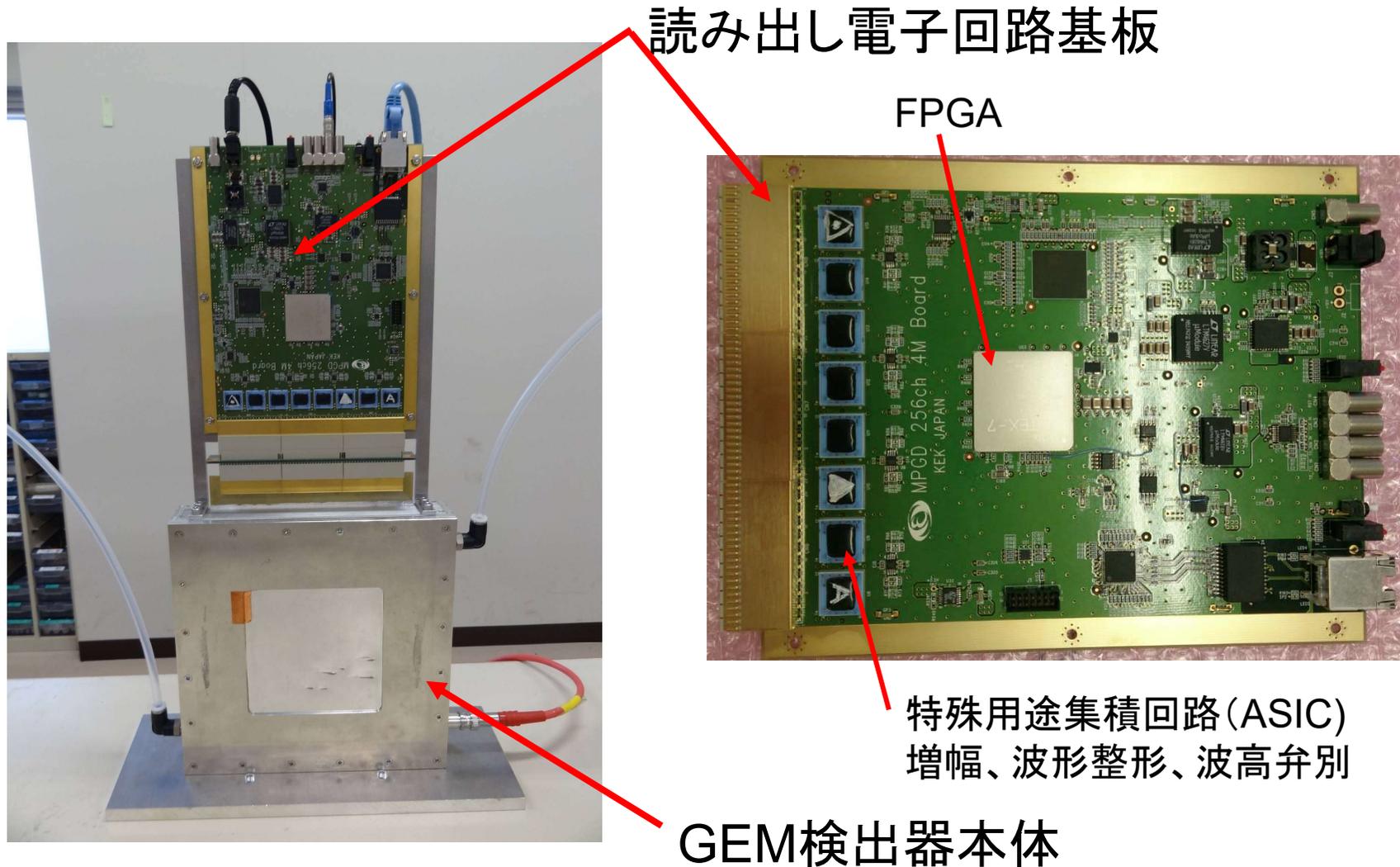
中性子検出器への応用



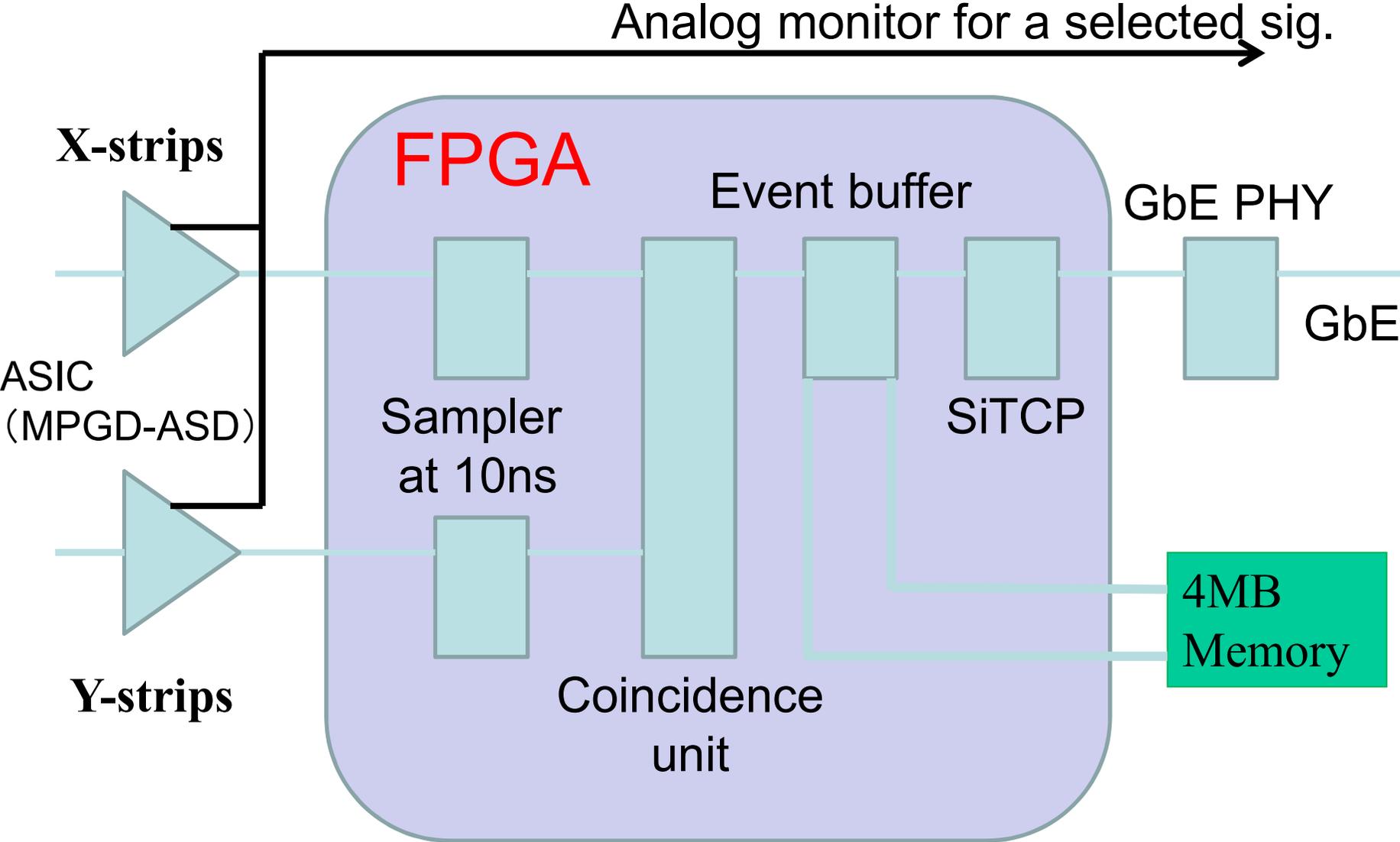
128-128 XY ストリップ (0.8mm ピッチ)

- 高価な ³He ガスが要らない
 - 圧力容器が要らない
- 自由な読み出しパターン
- 高分解能
 - 位置、**時間**
- ガンマ線に不感
- 高計数率

GEM型中性子検出器



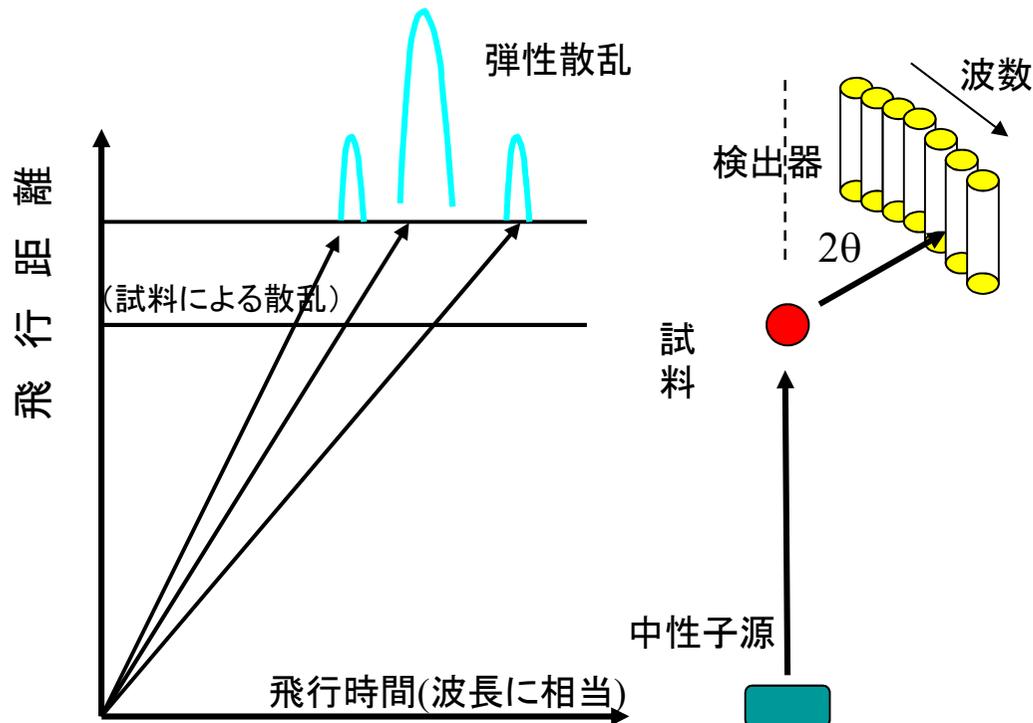
Block diagram



飛行時間法による弾性散乱実験

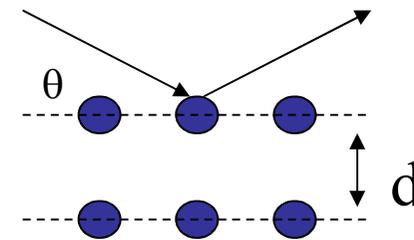
J-PARC(KEK 東海キャンパス)-物質・生命科学実験棟など

中性子の波動性(回折)を利用した構造研究



ブラッグの条件

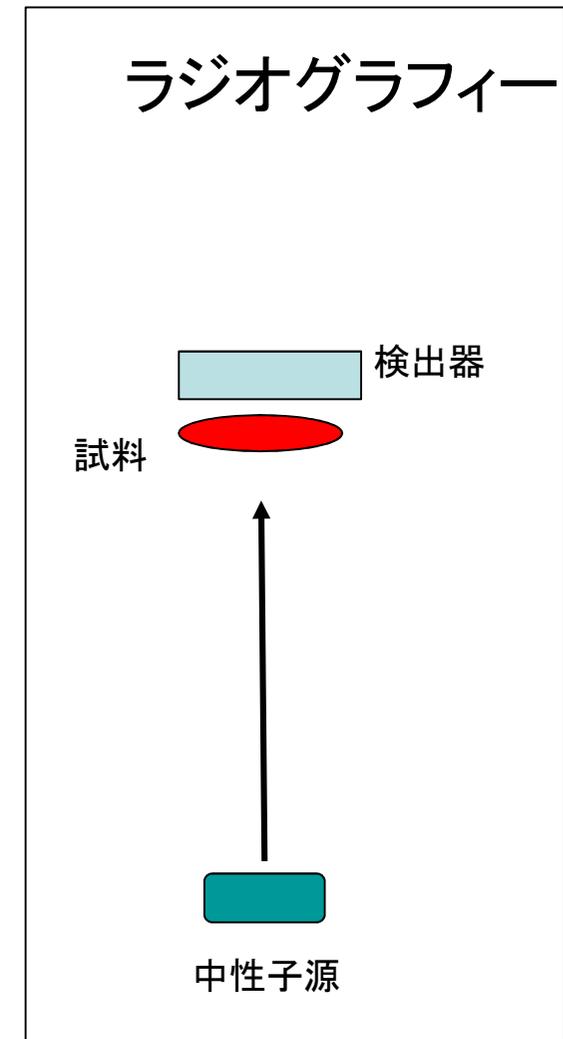
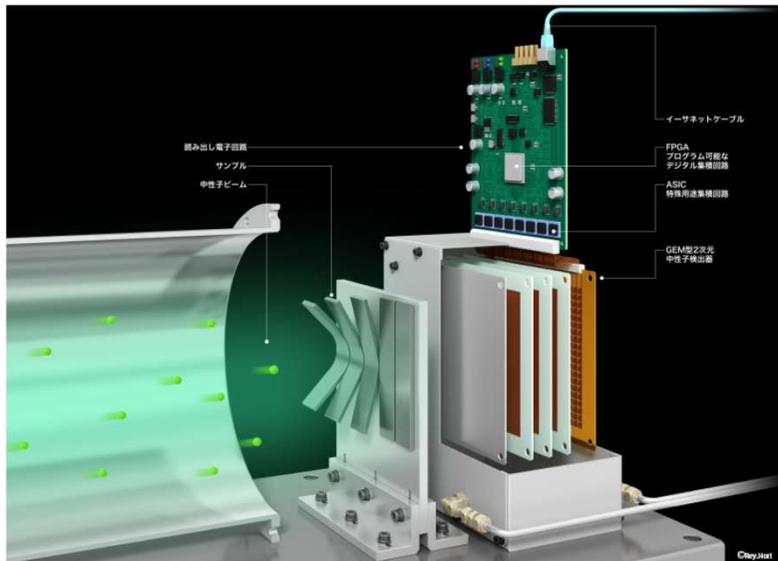
$$\lambda = 2d \sin \theta$$



- 1点1点の位置情報に加えて**時間情報が必要**
 - 時間 → 中性子のエネルギー(波長)
 - X線との違い。単なる画素ではダメ。
- GEM(MPGD)向き

パルス中性子源

- 散乱実験において、
 - 散乱角と波長の測定
 - 1点1点の位置情報に加えて**時間情報が重要**
 - 飛行時間 → 中性子の速度(波長)
- 中性子ラジオグラフィー
 - 波長別に反応断面積が異なる。
 - 波長別に吸収画像を得る。
 - 過去にあまり研究されていない
 - 新しい分野

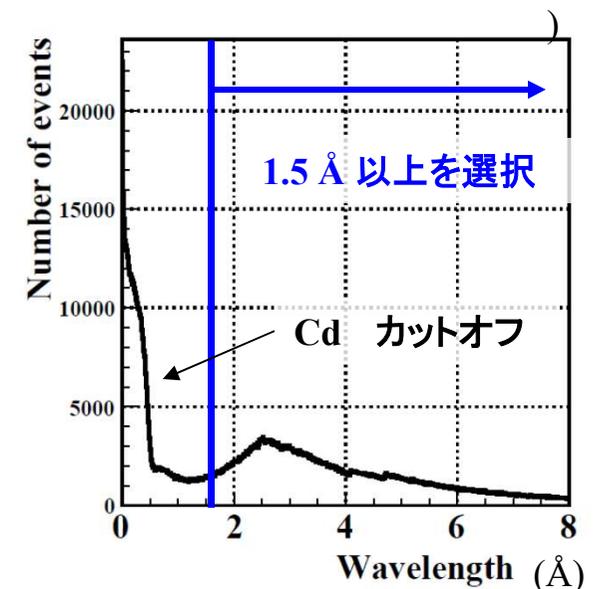
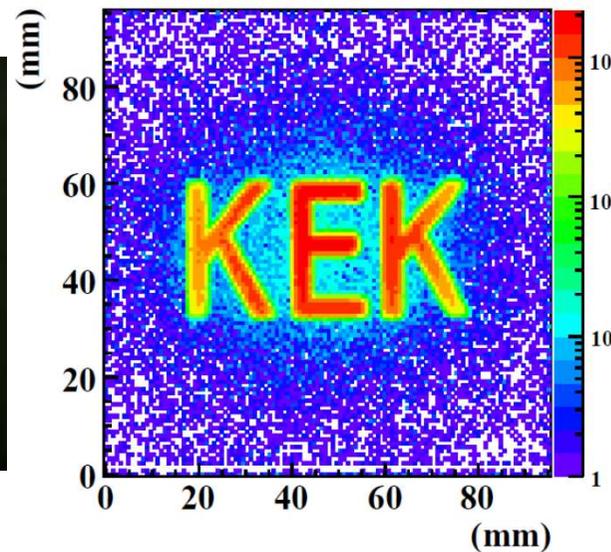
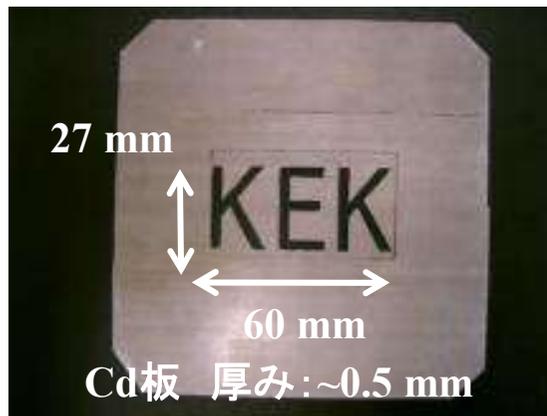
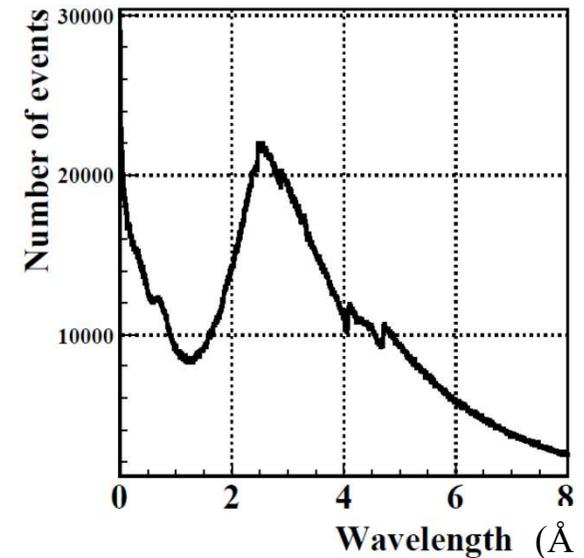
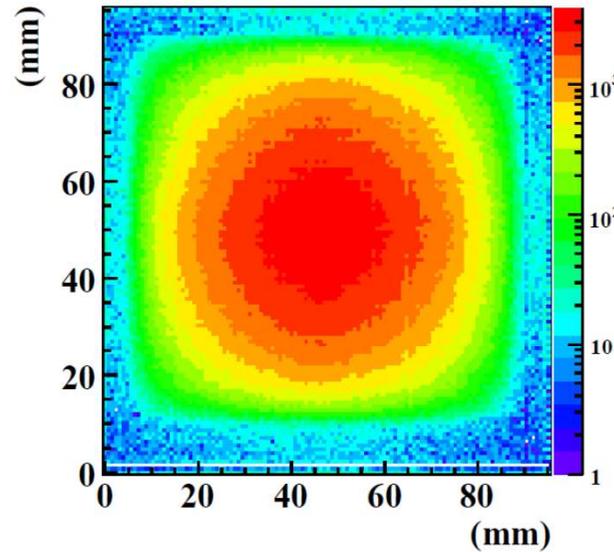


中性子ビームモニター

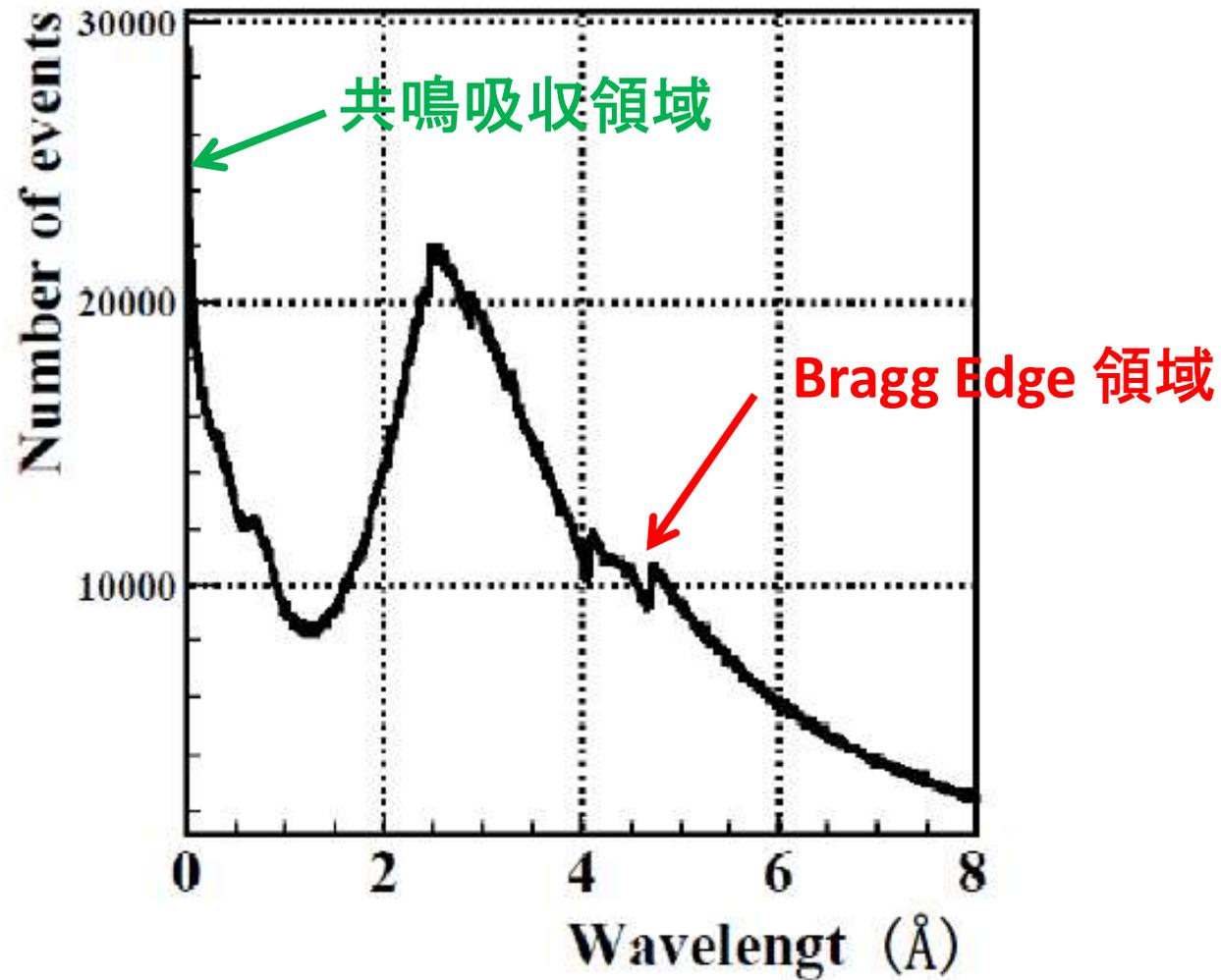
BL21 in J-PARC MLF

ソースポイントから18.8 m
のビームライン上に検出器
を設置

ビームプロファイルと
飛行時間
(中性子波長)

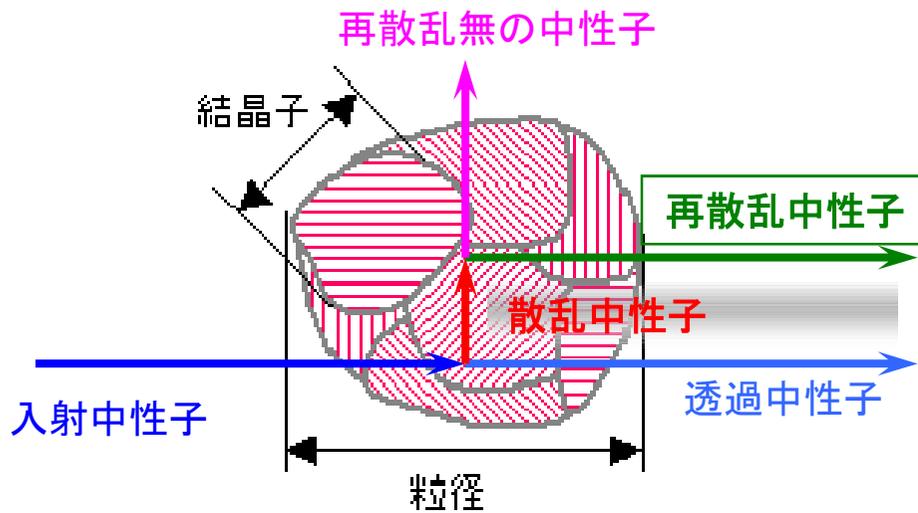


波長別中性子ラジオグラフィ



微細構造によるBragg edgeへの影響

結晶子内での再散乱による
散乱効果の抑制



微細構造の2次元イメージ化
S : ビーム進行方向に沿った結晶子サイズ

北海道大学工学部の
佐藤氏のスライドより

Sabine function

$$E_{hkl}(\lambda, F_{hkl}) = E_B \sin^2 \theta_{hkl} + E_L \cos^2 \theta_{hkl}$$

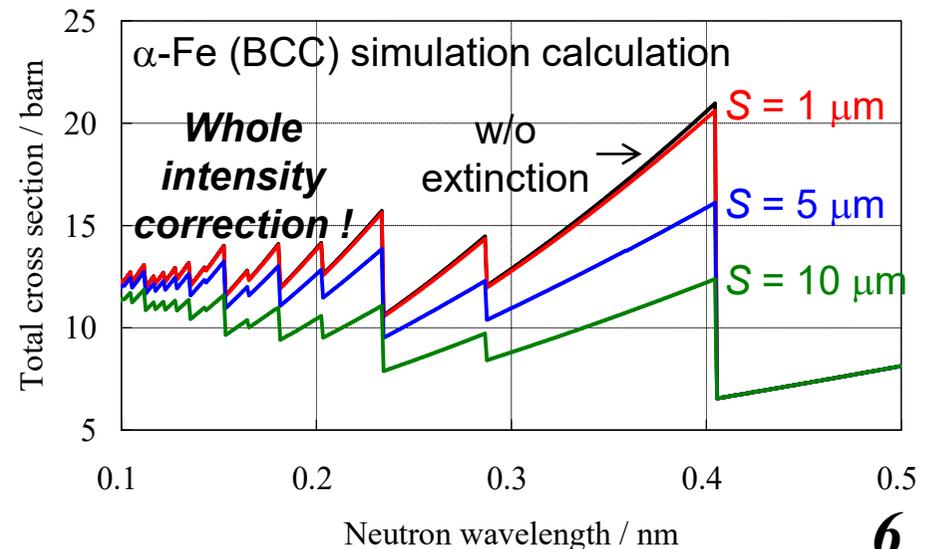
$E_B = \frac{1}{\sqrt{1+x}}$ ↑ Bragg component ← Laue component

$$E_L = 1 - \frac{x}{2} + \frac{x^2}{4} - \frac{5x^3}{48} + \dots \quad \text{for } x \leq 1$$

$$E_L = \sqrt{\frac{2}{\pi x}} \left[1 - \frac{1}{8x} - \frac{3}{128x^2} - \frac{15}{1024x^3} - \dots \right] \quad \text{for } x > 1$$

$$x = S^2 \left(\frac{\lambda F_{hkl}}{V_0} \right)^2$$

○ : Refinement parameter

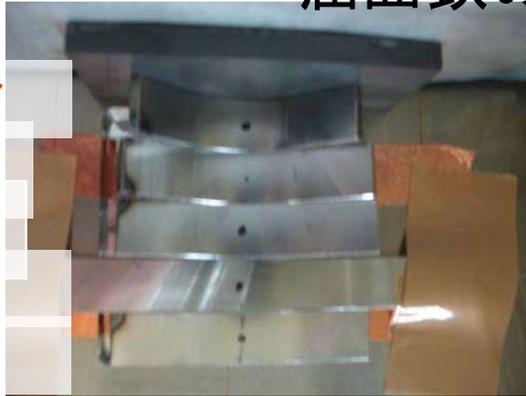


屈曲鉄解析イメージング

屈曲鉄の配置

北大工学部との共同研究

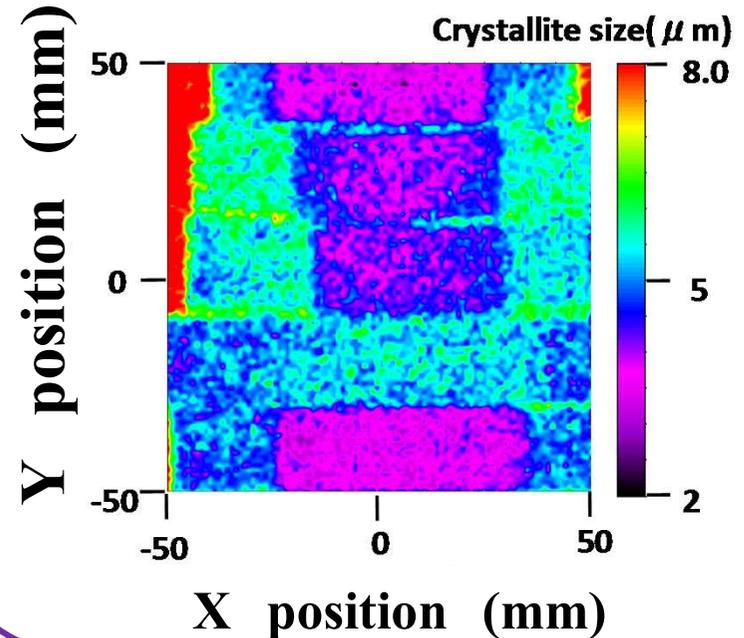
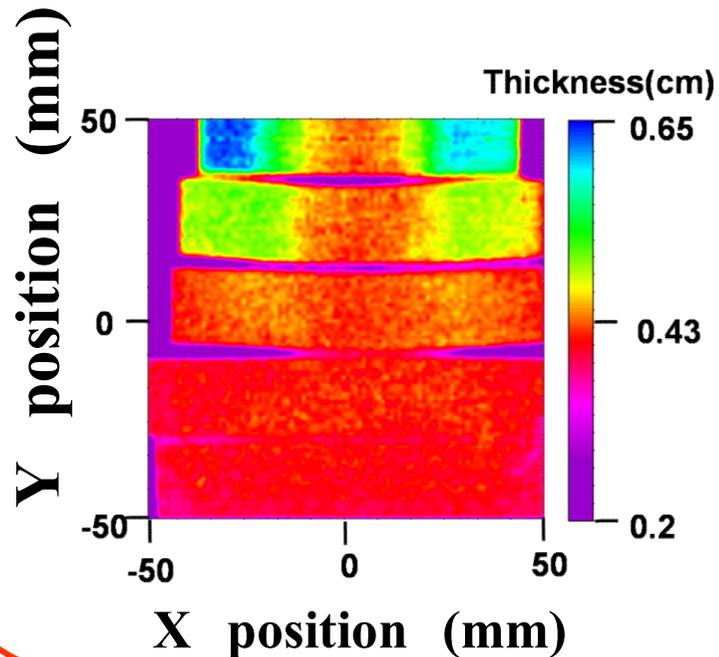
90° 曲げ
60° 曲げ
30° 曲げ
標準鉄
曲げ戻し



標準鉄の厚さ=0.5cm

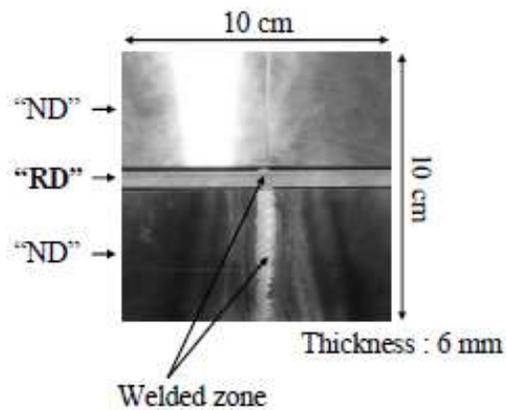
結晶子サイズイメージング
→変形を中心およびその周辺において
結晶子微細化が著しい。

実効厚さ分布イメージング

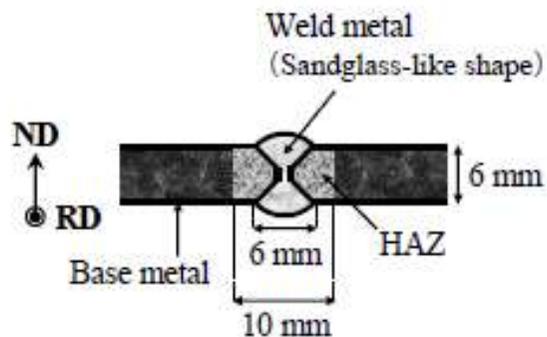


鉄溶接部の状況

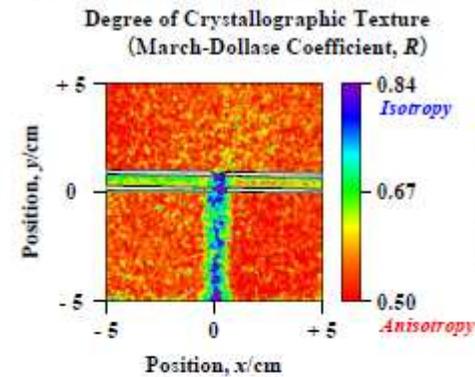
(a) Photograph of the specimens



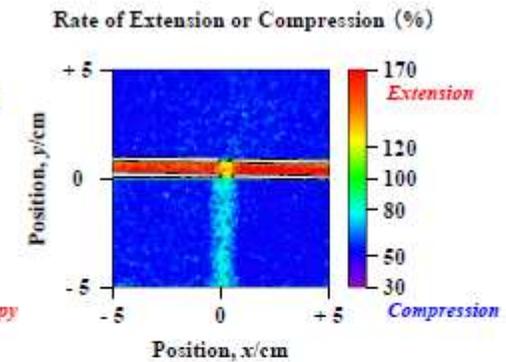
(b) Schematic view around the welded zone (View to RD)



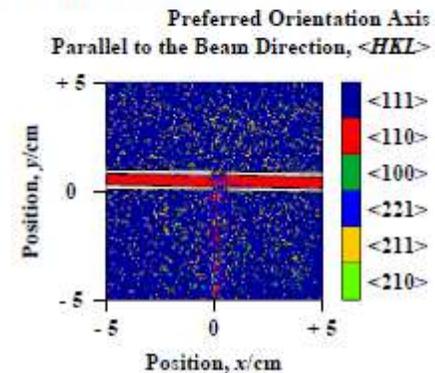
(a) Crystal orientation anisotropy



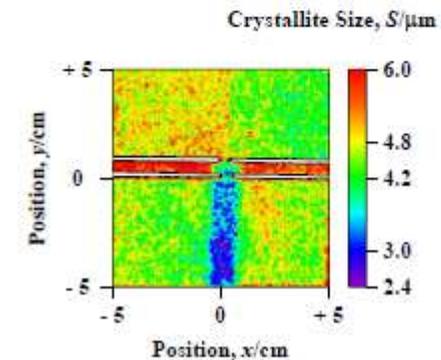
(b) Plastic deformation rate



(c) Preferred orientation



(d) Crystallite size



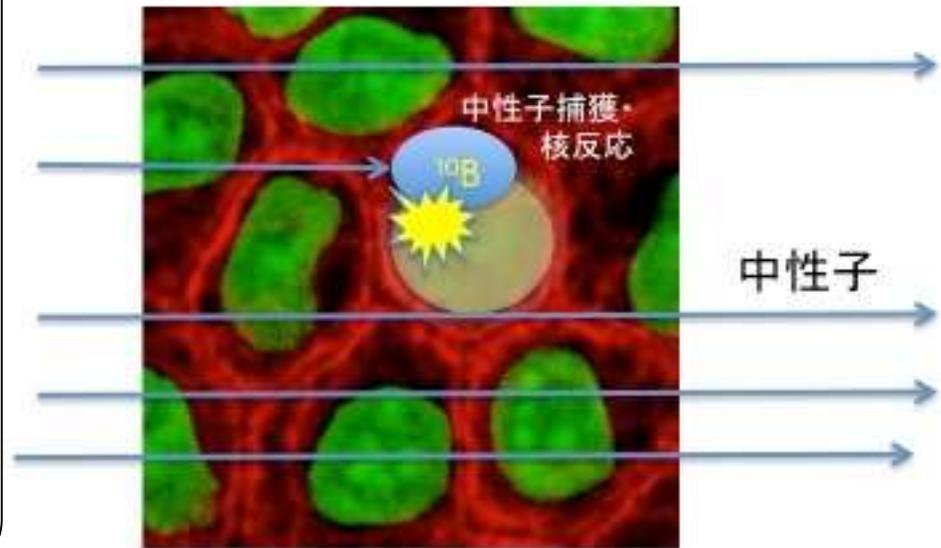
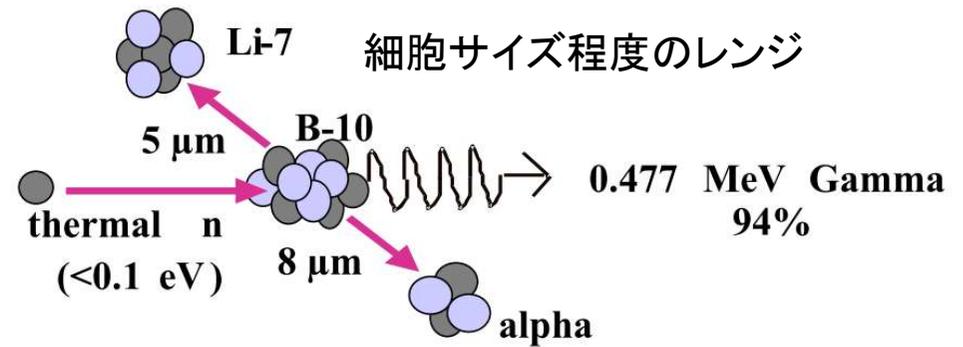
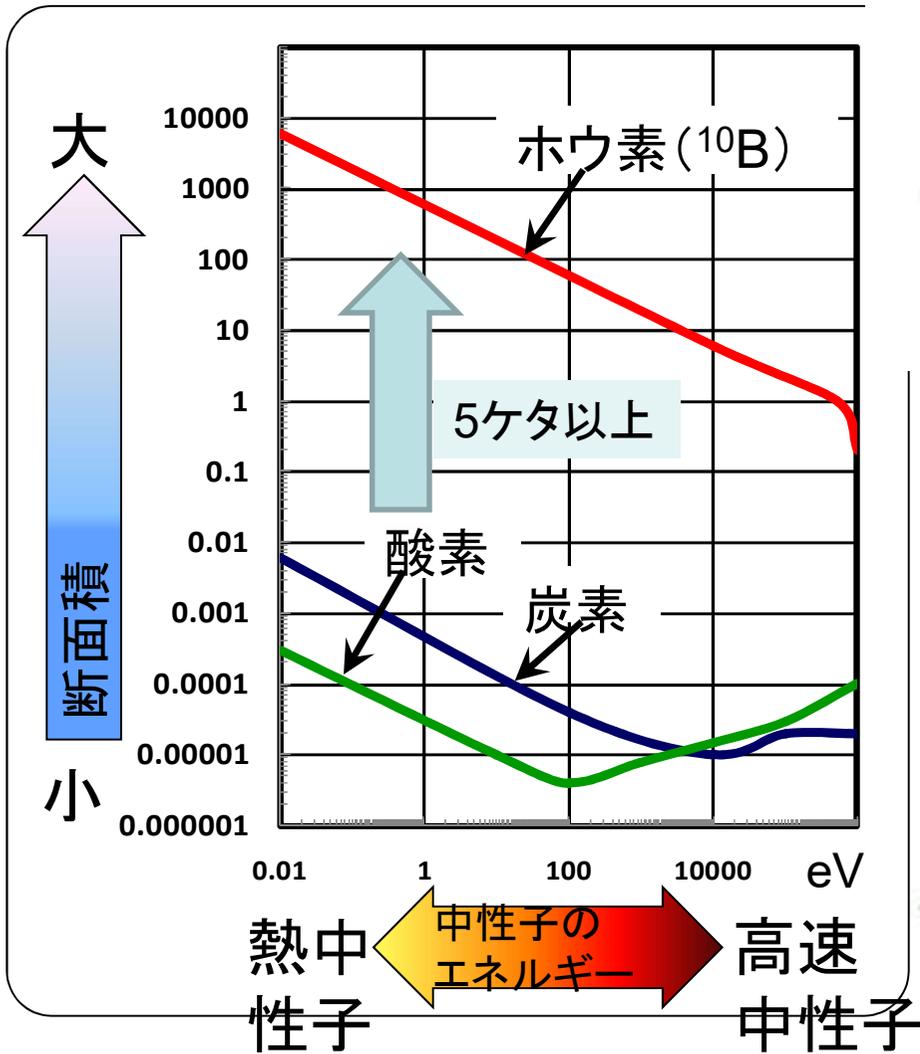
Hirota Sato et al.,
Materials Transactions,
Vol.52 No.06 (2011) pp.1294-1302

ホウ素中性子補足療法 (BNCT)

- ・ 放射線を正常細胞には影響を与えずに、癌のみを集中的に殺したい。
- ・ 中性子は、ガンマ線よりも透過力が高い。つまり、正常細胞には影響をあまり与えない。
- ・ 中性子はホウ素と反応するとアルファ粒子、またはリチウム原子核が放出される。それらの粒子の透過力は非常に小さいので(細胞内で止まってしまいうくらい)、ホウ素がある細胞のみに放射線の影響を与えることが可能である。
- ・ ホウ素を薬剤につけて投与。

BNCTとは

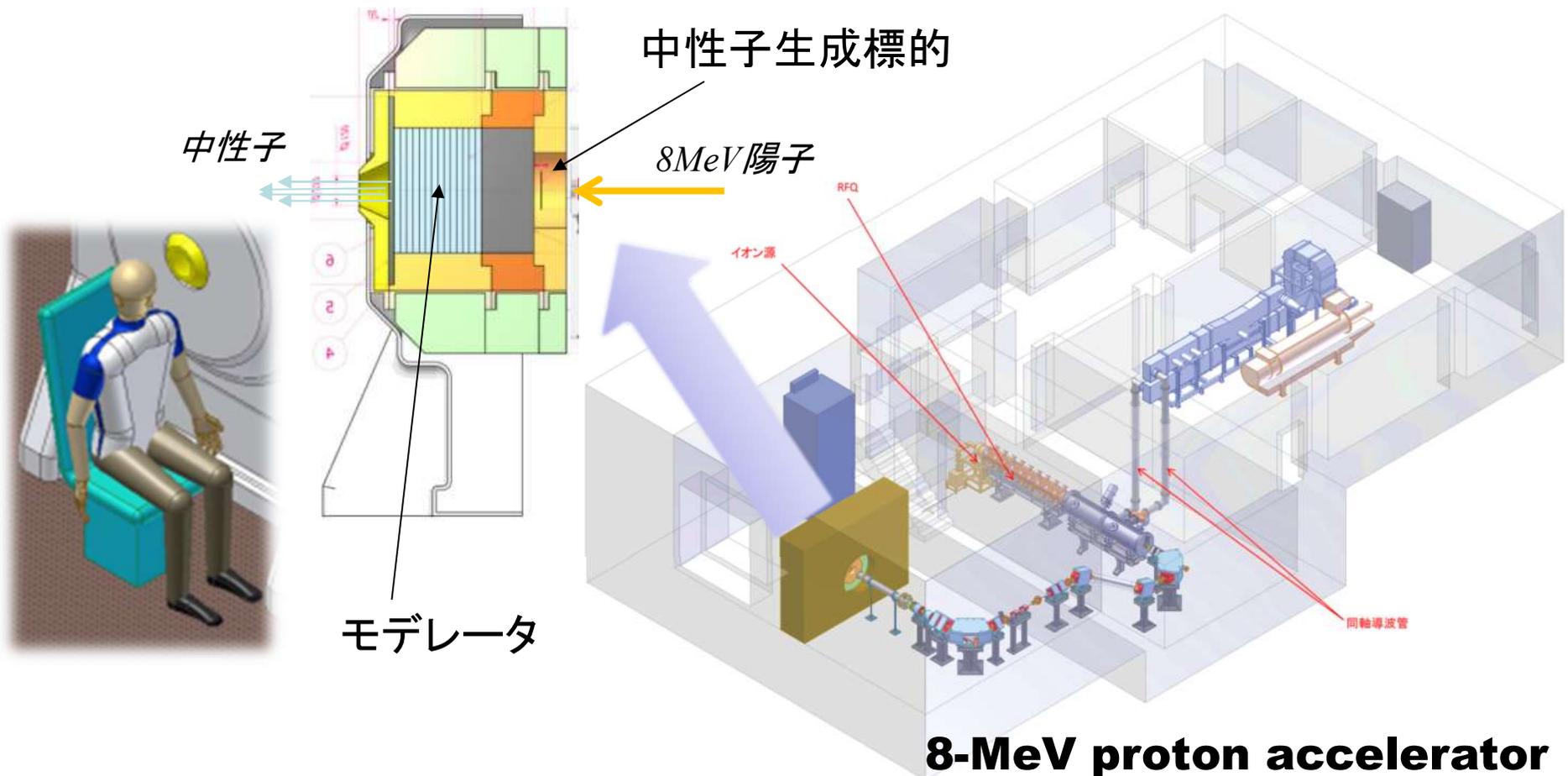
16



小型で大強度の中性子源が待望

17

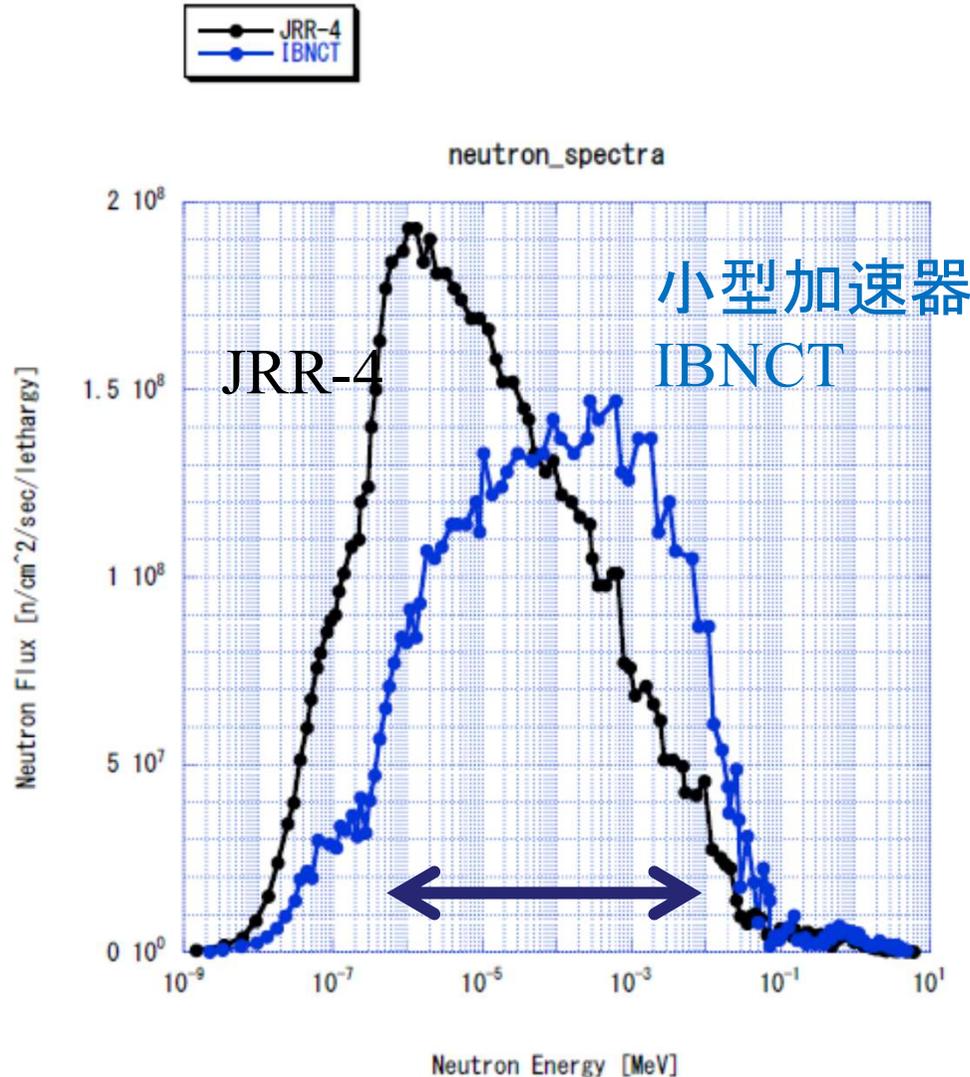
原子炉→小型加速器を用いた治療用中性子源



8-MeV proton accelerator

期待される中性子束

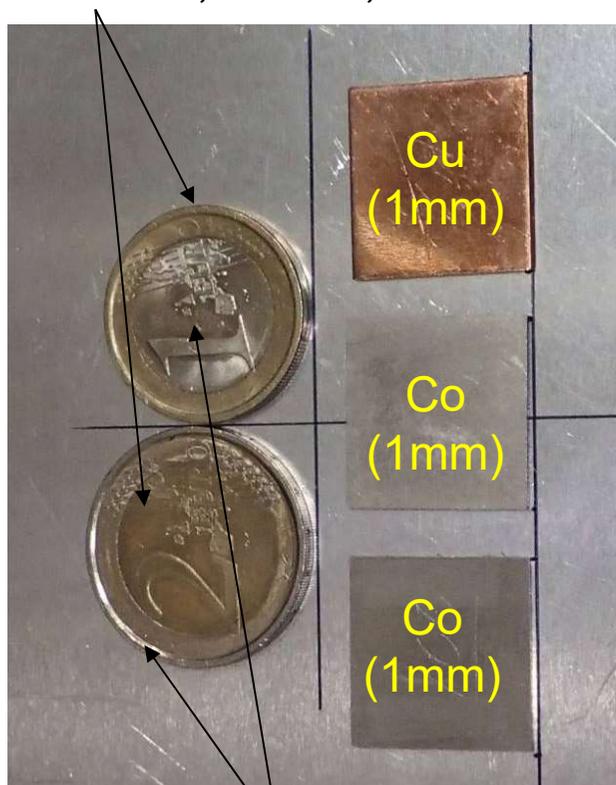
18



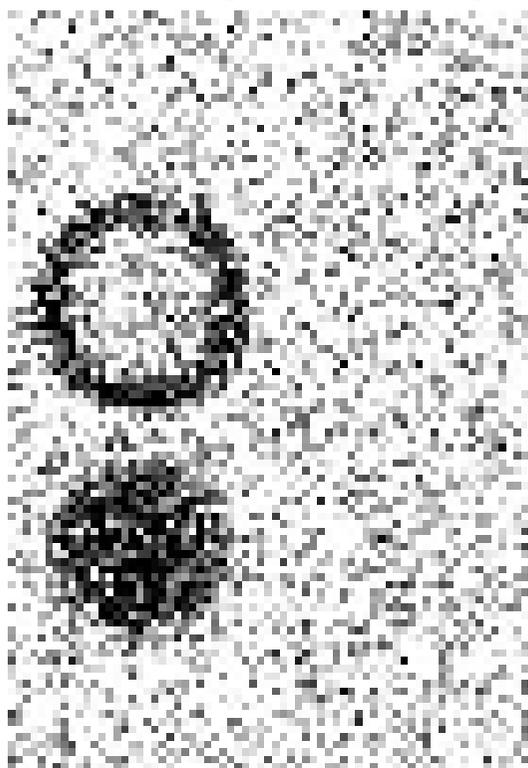
- 実績のある原子炉 (JRR-4) とほぼ同等の強度が期待される。
 - 熱外中性子領域 (0.5eV-10keV) で IAEA-TECDOC-1223 の仕様 $10^9 \text{n}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$ を満足
 - 30分一度で治療完了
- 高いエネルギーで優位
 - 深部まで大きな治療効果

熱外中性子の共鳴イメージング

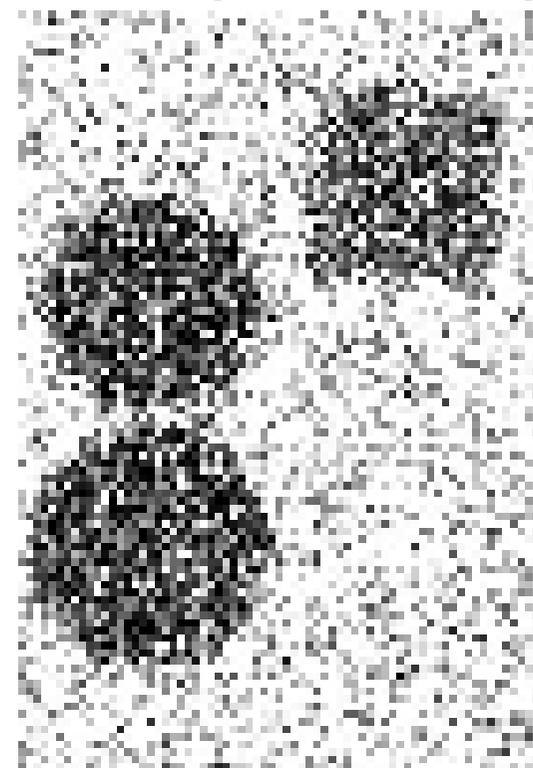
75%Cu,20%Zn,5%Ni



Zn (517 eV)



Cu (2.04 keV)



75%Cu,25%Ni

熱外中性子を捕らえてイメージングできることの証明
ガンマ線バックグラウンドが少ない

まとめ

- GEMを利用した放射線画像検出器の開発を行っている。
- ASIC、FPGAなどを搭載した読み出し電子回路基板と合わせてコンパクトな検出器システムを開発した。
- 最大の特徴は、2次元位置と正確な時間情報を量子1個1個測定可能であることである。
- 中性子への応用を進めている。
 - BNCTのビーム診断にも適応しようとしている。