

# 中性子ビーム利用高度化技術の開発

研究代表者

加倉井和久(日本原子力研究開発機構)

研究責任者

鬼柳善明(北海道大学)

山田和芳(東北大学)

清水裕彦(高エネルギー加速器研究機構)

高橋浩之(東京大学)

谷森 達(京都大学)

## 発表内容

はじめに

中性子、定常 & パルス源

デバイスの高度化

偏極

検出

集光

まとめ

将来展望

# 中性子

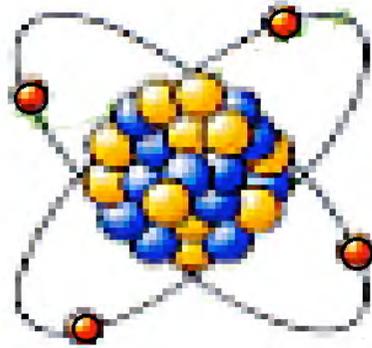
中性子の発見者



James Chadwick

1932年に発見

1935年にノーベル物理学賞

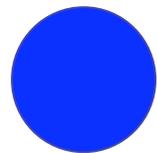


陽子と共に原子核を形成する粒子  
( $m_n = 1.6747 \cdot 10^{-24} \text{ g}$ )

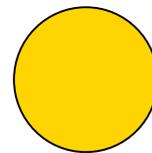
中性である

小さな磁石

平均寿命 896秒



中性子

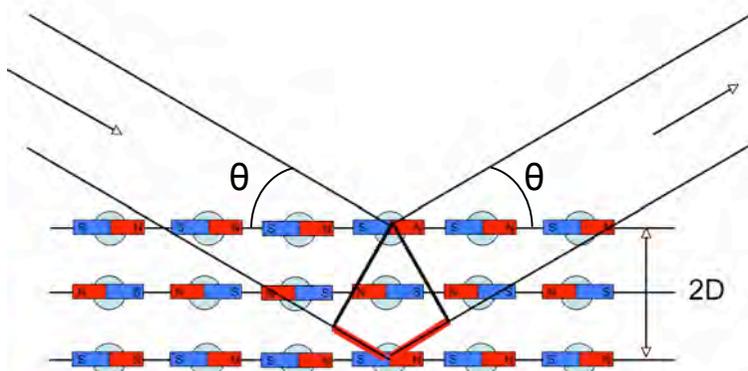


陽子

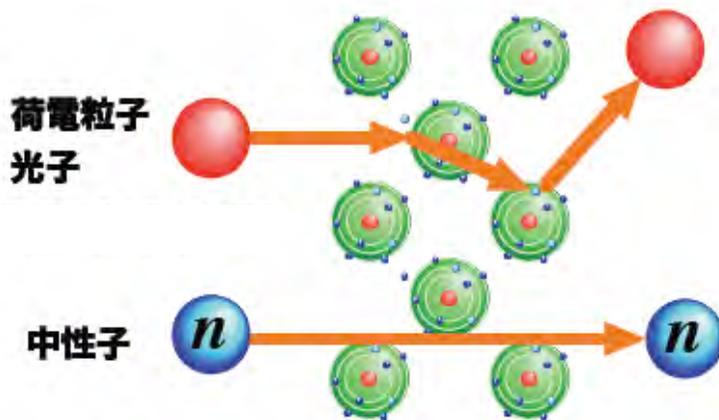
+ 電子 + ニュートリノ

# 中性子の特性

## 中性子磁気解析能力

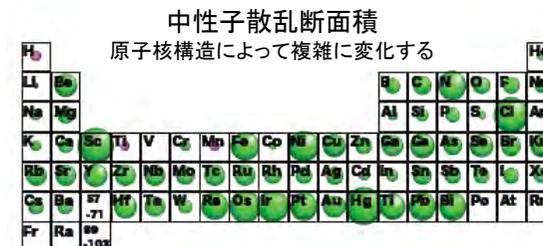


$$2(2D)\sin\theta = n\lambda$$



## 強い物質透過力

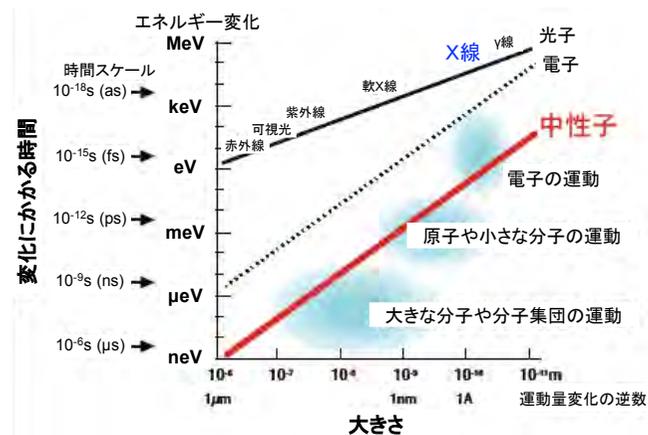
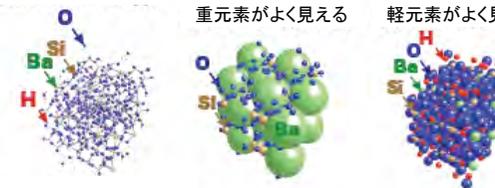
## 高い軽元素識別能力



例えばこんな物質を

X線で見ると  
重元素がよく見える

中性子で見ると  
軽元素がよく見える



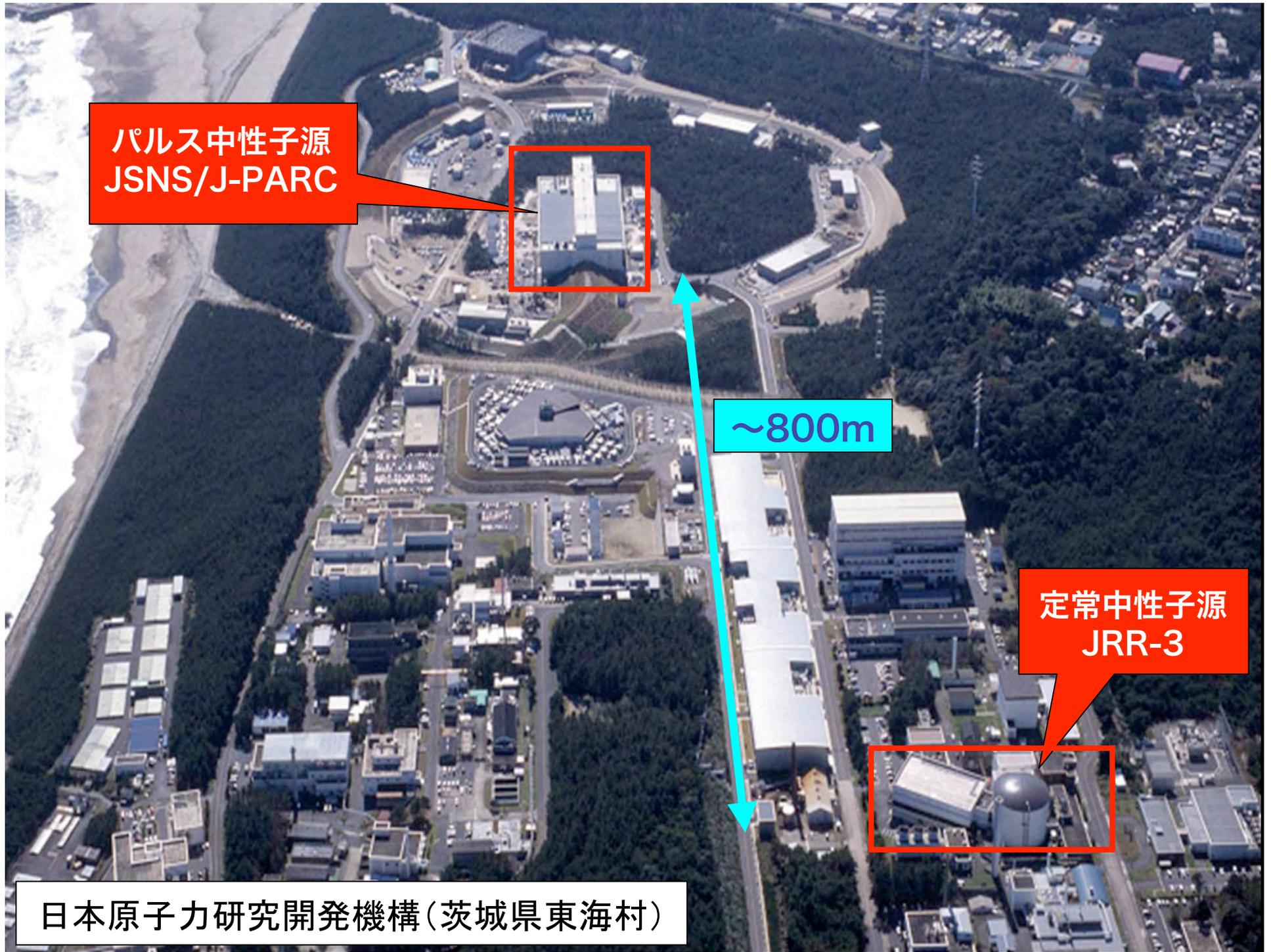
## 動的状態観察力

パルス中性子源  
JSNS/J-PARC

~800m

定常中性子源  
JRR-3

日本原子力研究開発機構(茨城県東海村)



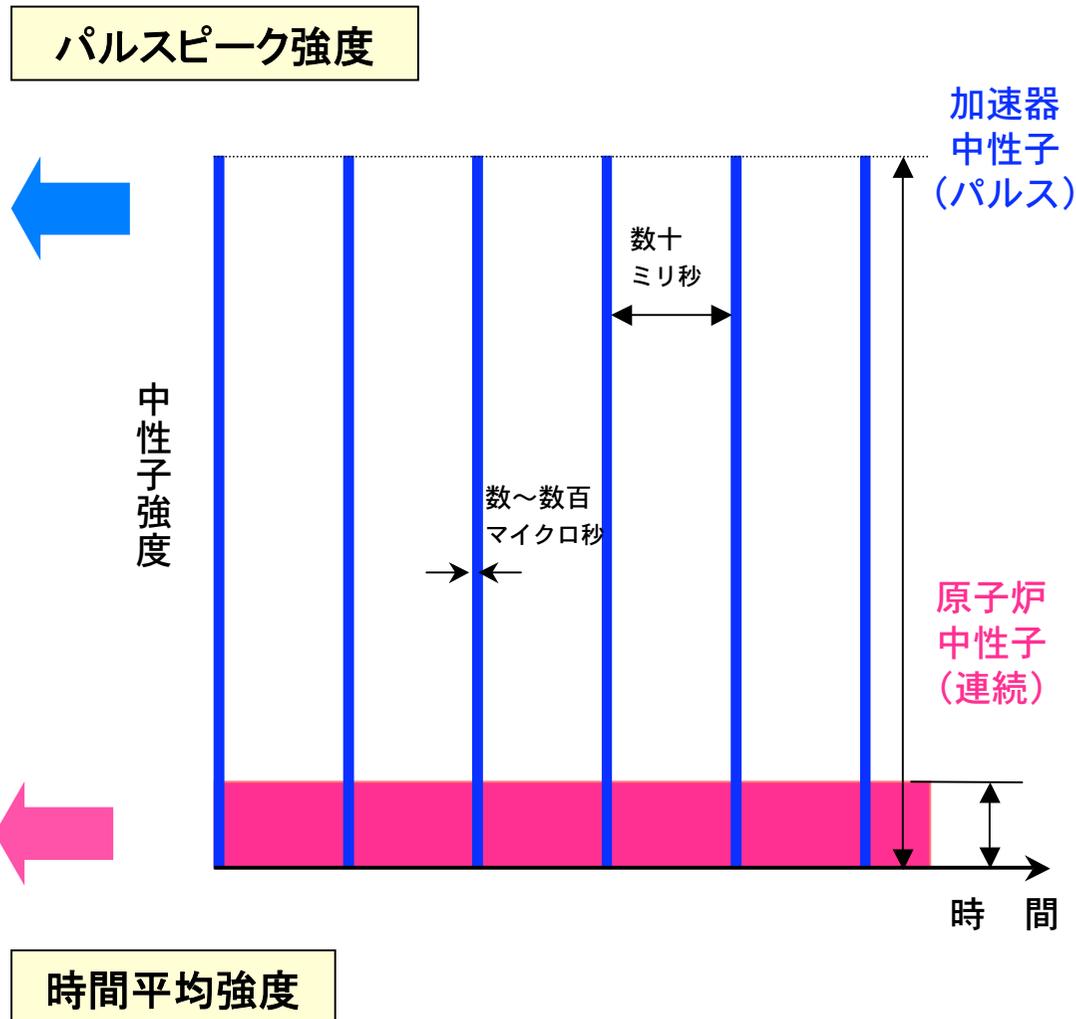


# 定常中性子源とパルス中性子源

J-PARC (加速器)



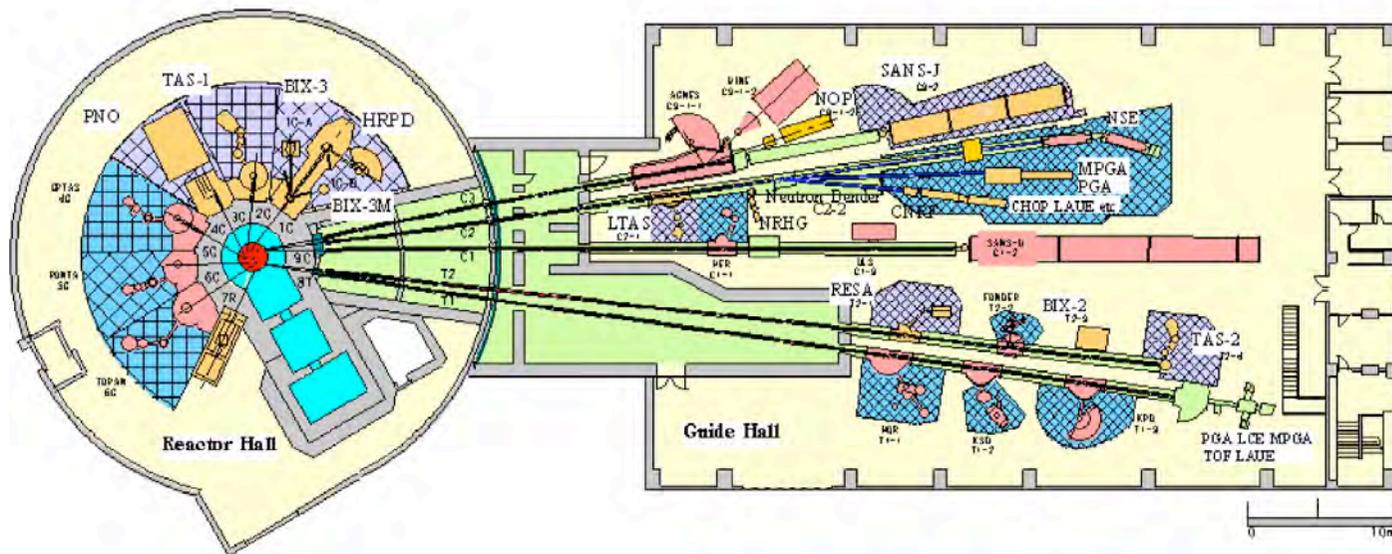
JRR-3 (原子炉)





# JRR-3 原子炉

- 1962 建設, 1990 全面改造
  - 熱出力 20MW, 冷中性子源CNS設置,
  - 中性子束  $3 \times 10^{14}$  n/s.cm<sup>2</sup>
- 2007 ランドマーク賞受賞

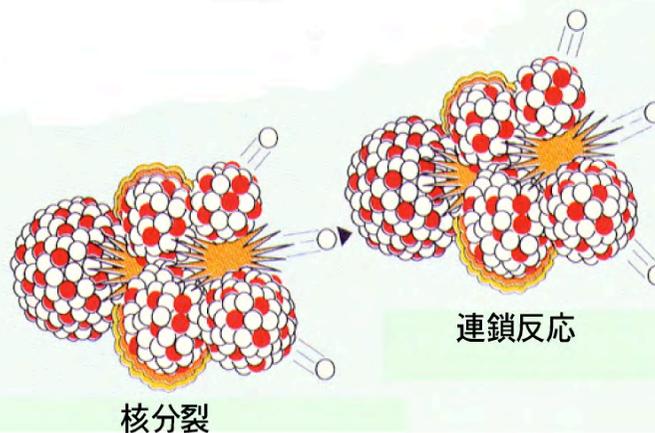


原子炉室

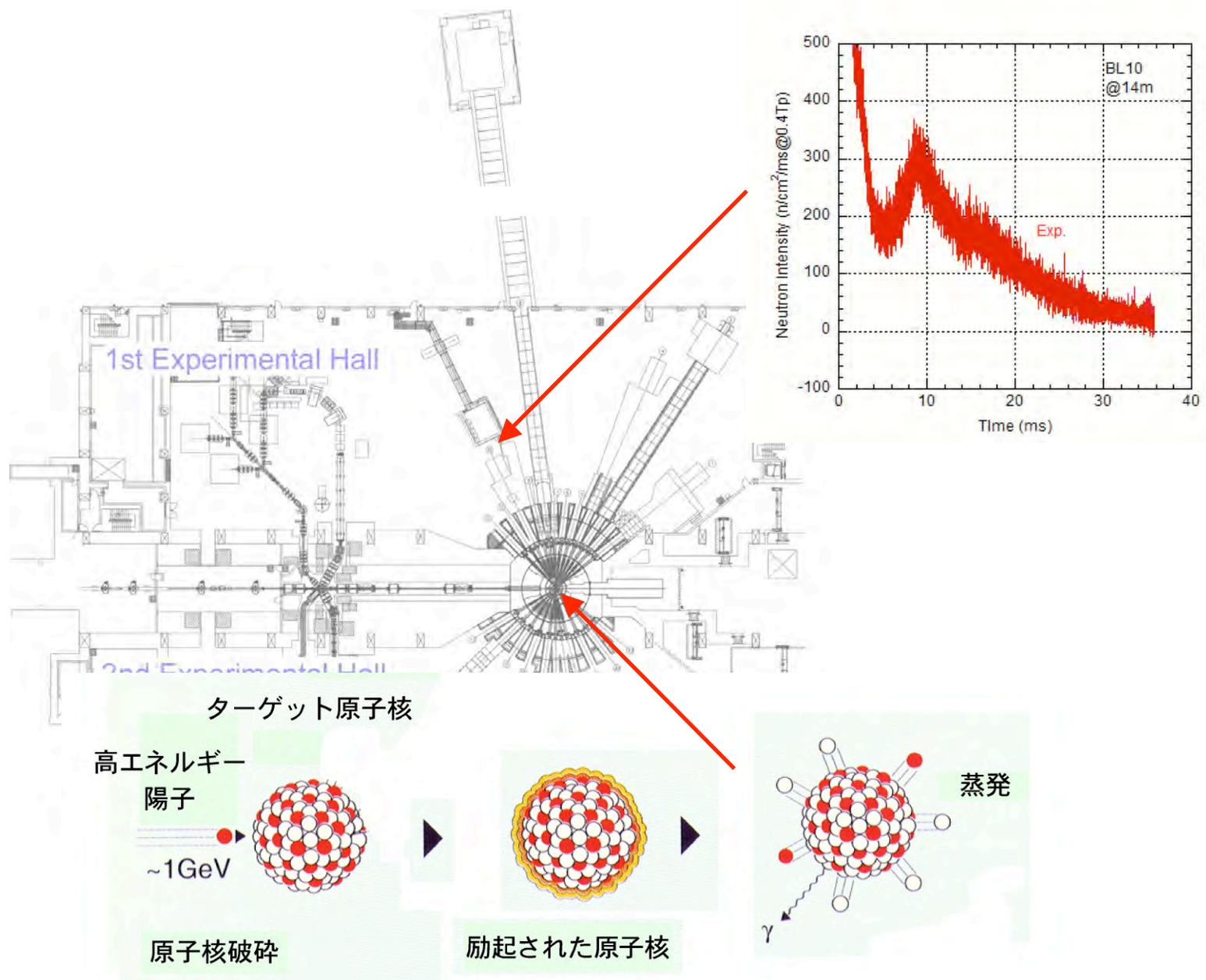
ガイドホール



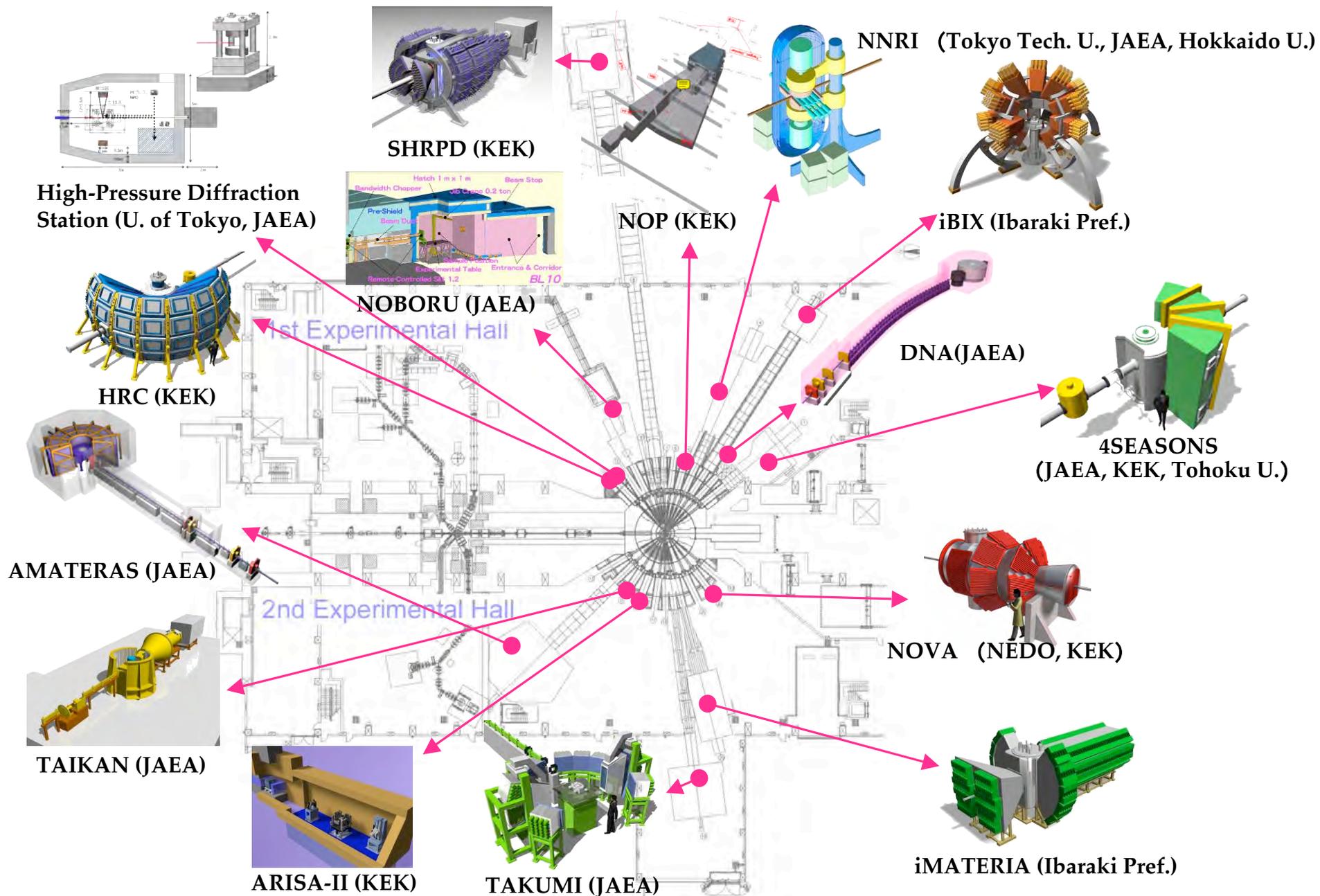
原子核分裂



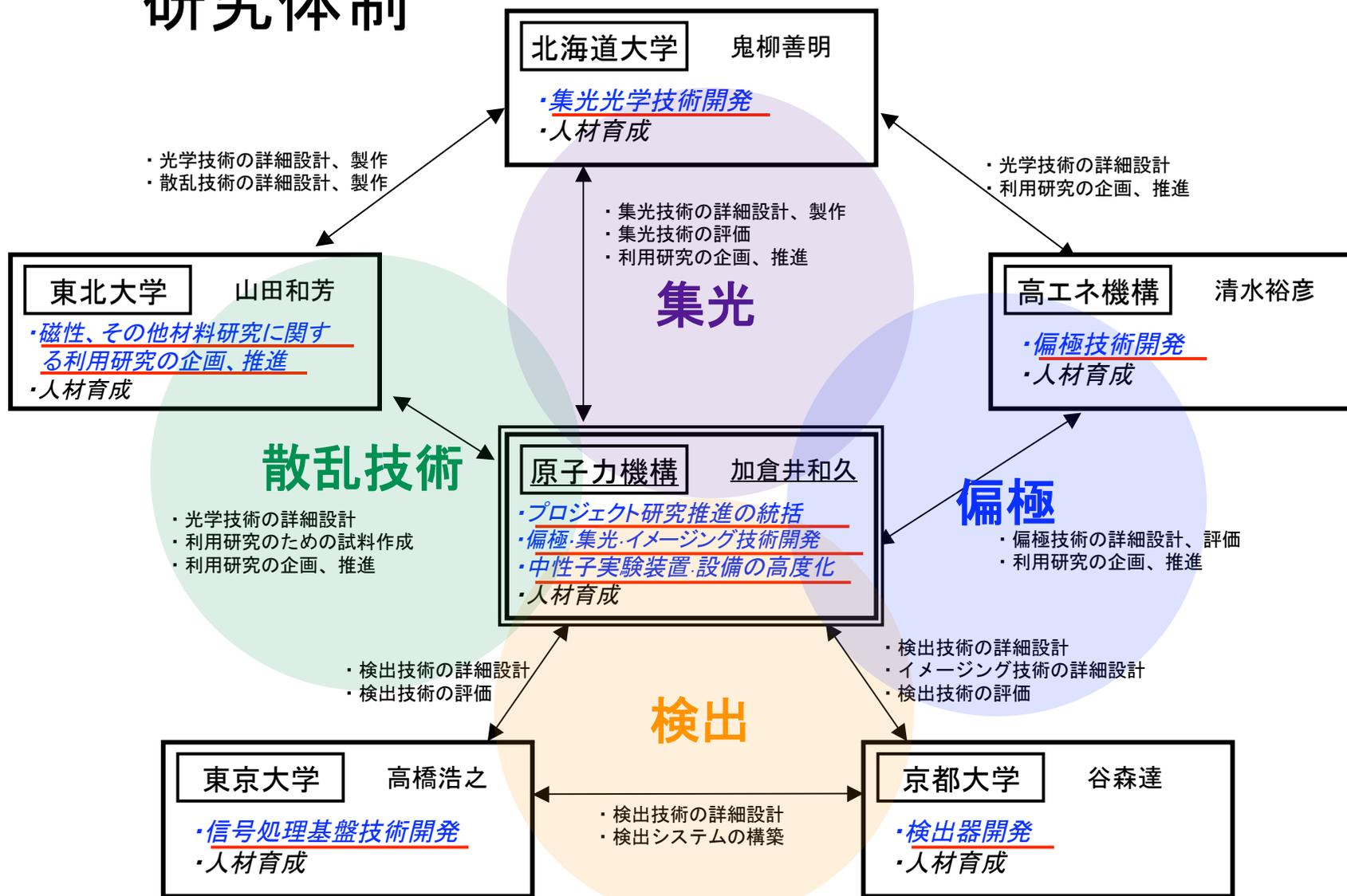
# Beam lines in MLF, J-PARC



# Instrument Suite in MLF, J-PARC



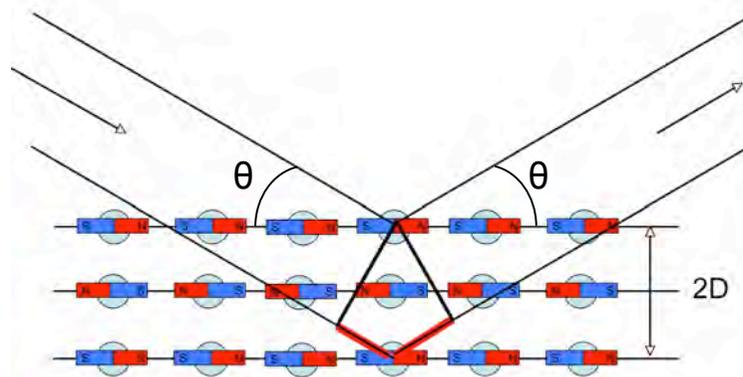
# 研究体制



# デバイスの高度化 -1-

## 偏極

中性子磁気解析能力



$$2(2D)\sin\theta = n\lambda$$

# Magnetic Analysis of Fe-N nano-Particle

**Fe<sub>16</sub>N<sub>2</sub> nano-particles diameter: 17nm**

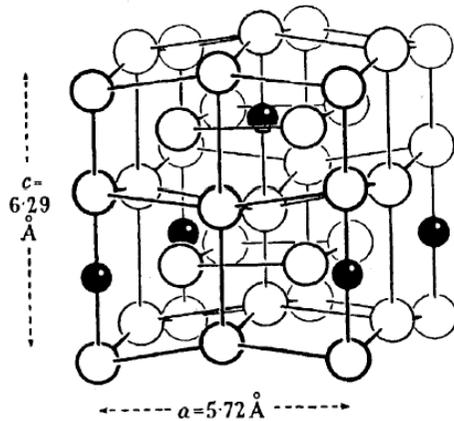
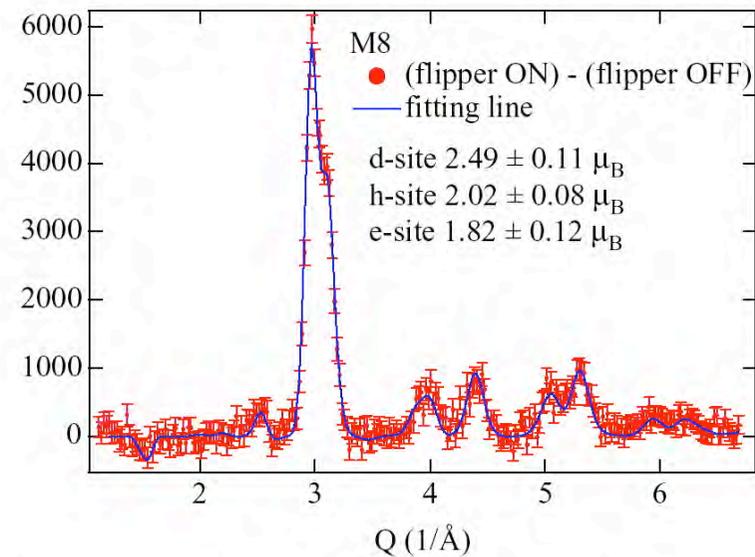
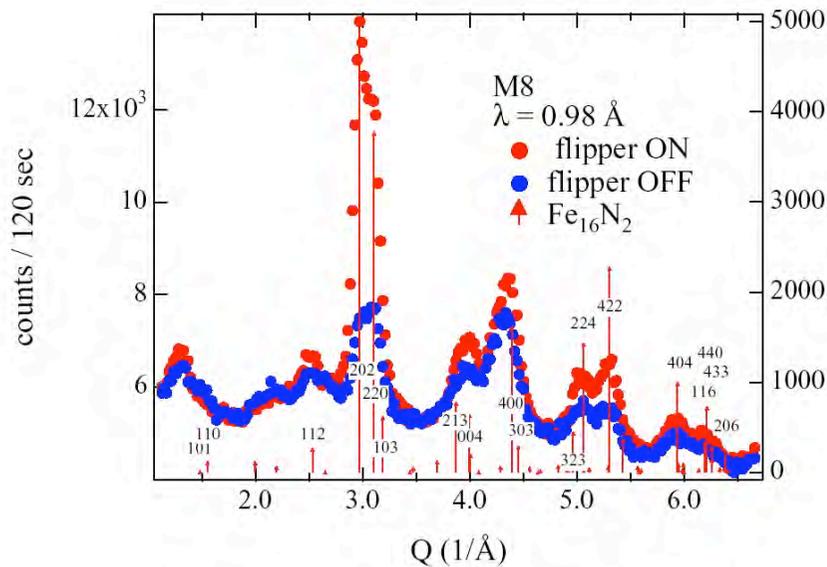
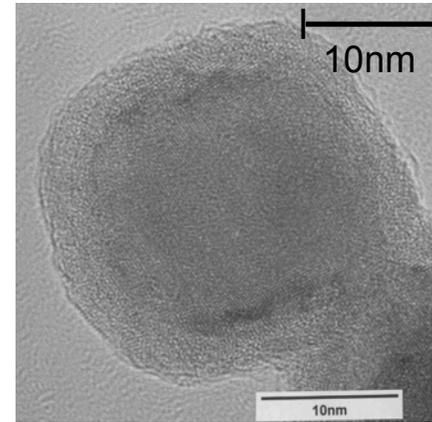


FIGURE 1. The structure of tempered nitrogen-martensite ( $\alpha'$ ). ○, iron atom; ●, nitrogen atom.

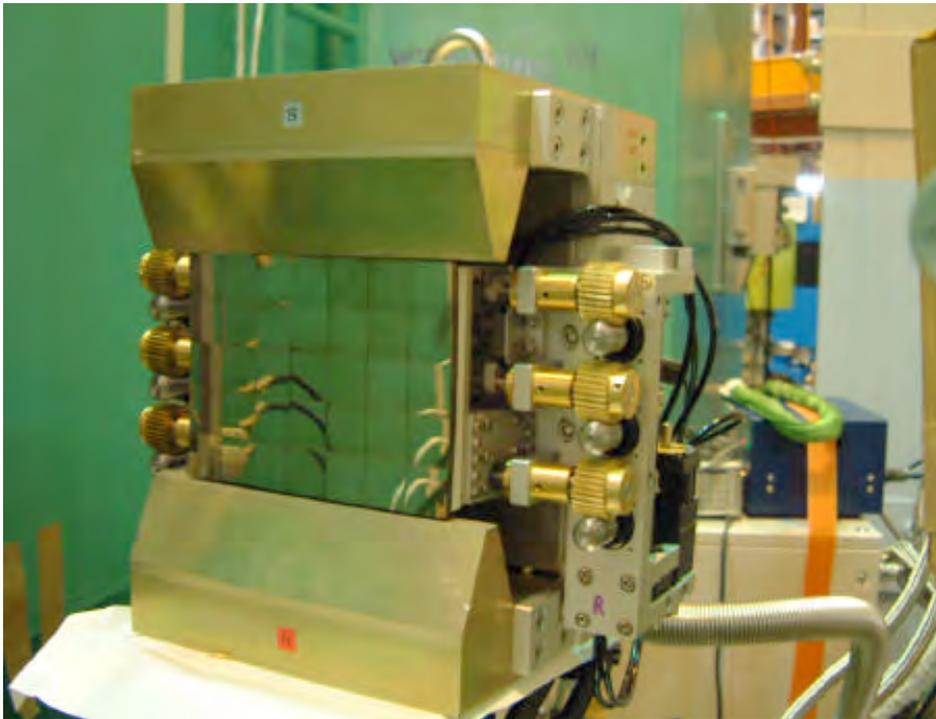


sample M8:  $\lambda=0.98\text{\AA}$  polarized neutron diffraction pattern and the difference spectrum

## Magnetized single crystal monochromator

e. g.  $\text{Co}_{0.92}\text{Fe}_{0.08}$  (200) reflection, Heusler alloy  
 $\text{Cu}_2\text{AlMn}$  (111) reflection

### NEW Heusler monochromator



**Vertical bent: optimized for 30.5meV**  
**Horizontal bent: variable**

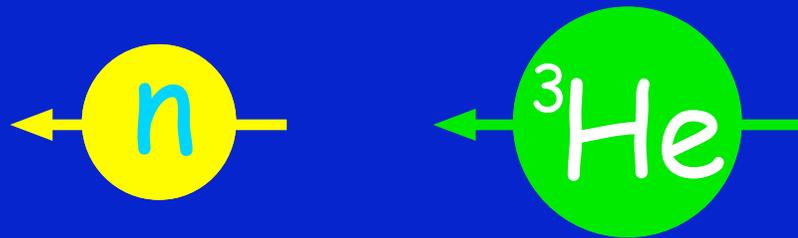
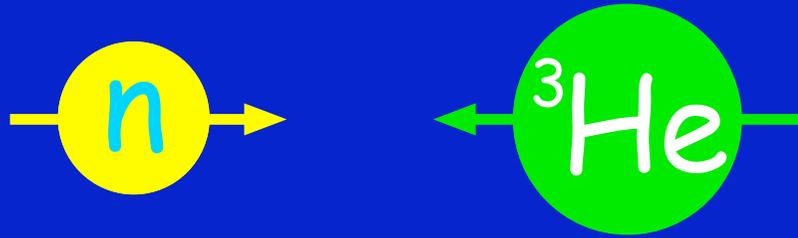


Heusler crystals supplied by P. Courtois, ILL

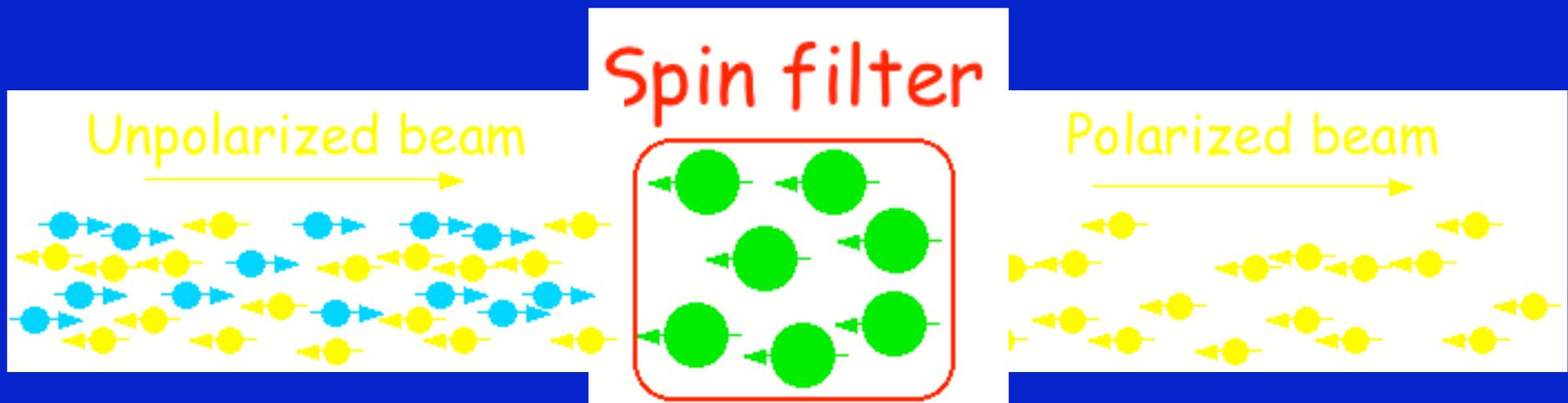
# Neutron Spin Filter

Thermal neutron cross section

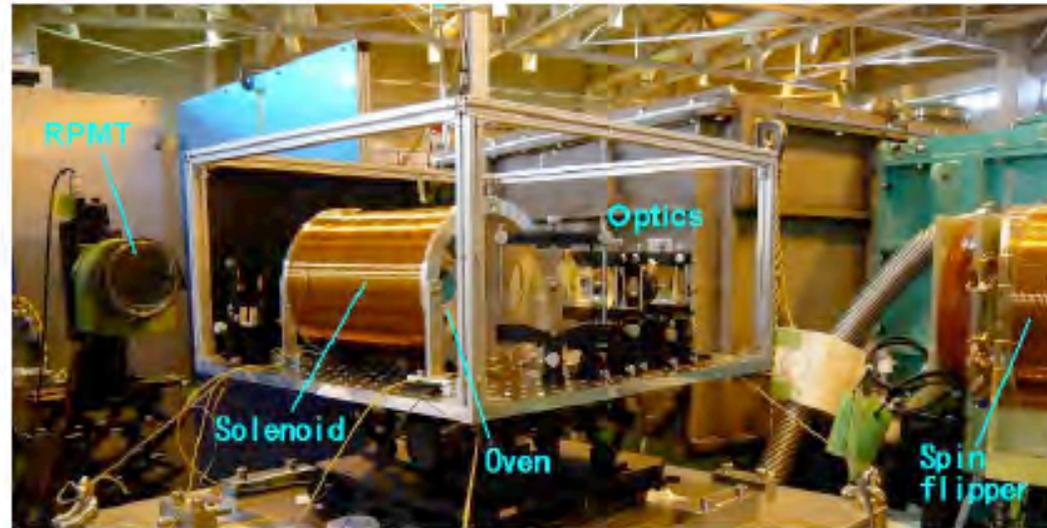
10000 barns



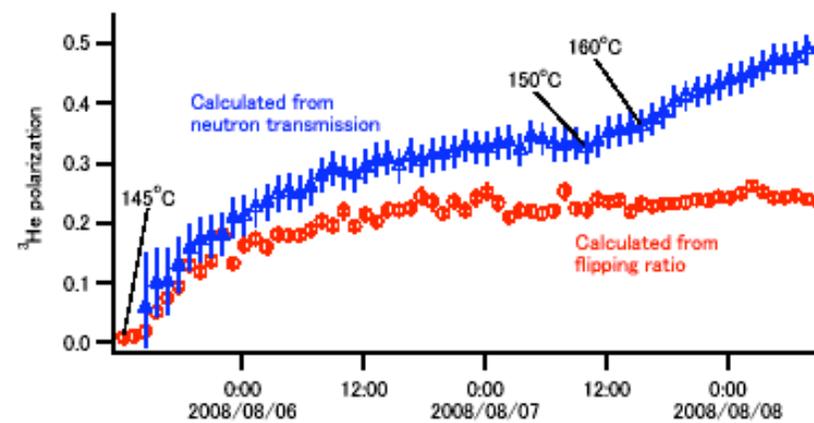
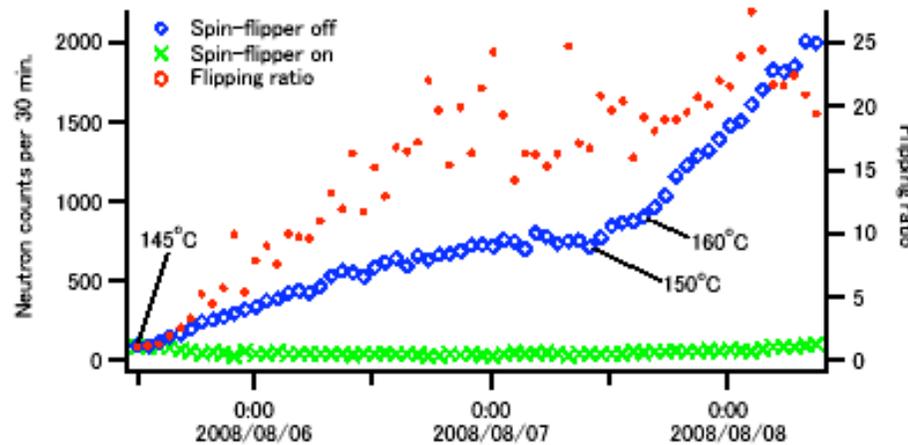
5 barns



# Test of $^3\text{He}$ polarizing filter (SEOP)

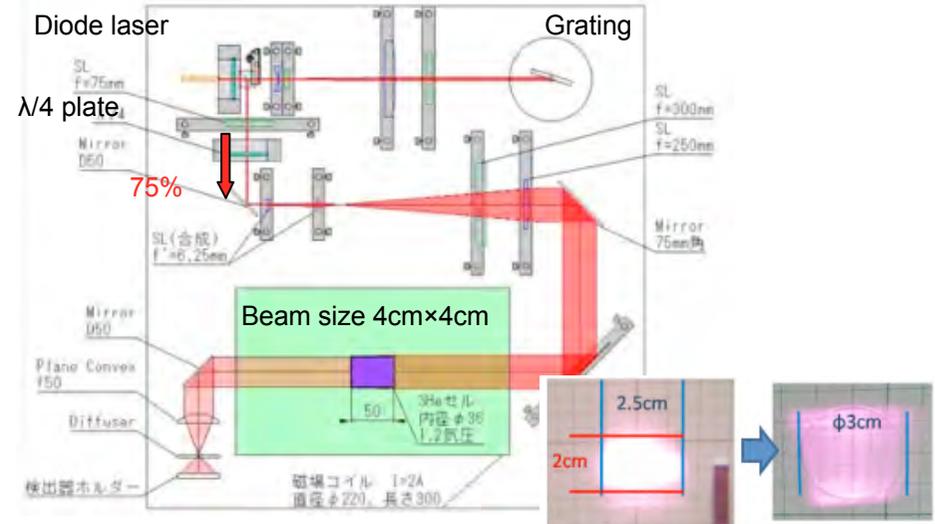
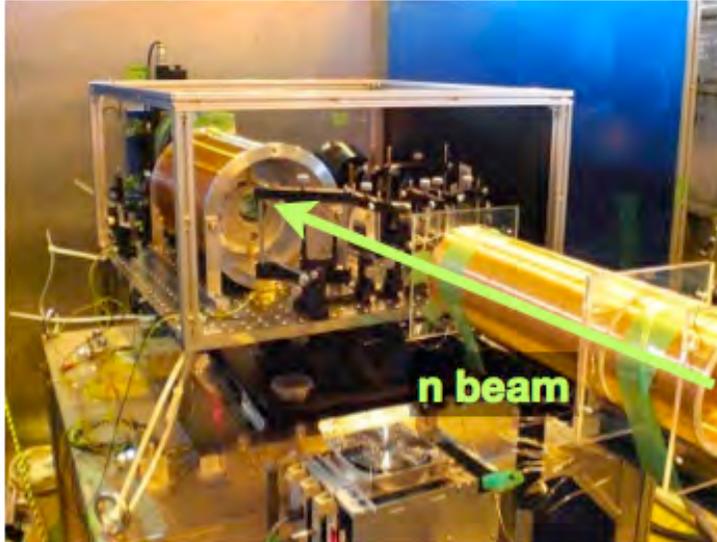


SEOP system on the NOP beam line in JRR-3 neutron guide hall (Ino et al. KEK)



# In-situ SEOP

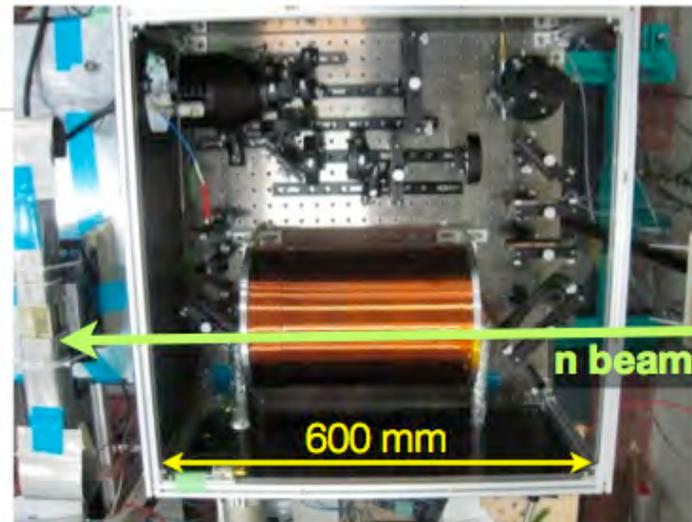
Improvement of optical system,  
Kira, Sakaguchi, Oku *et al.*



Initial development,  
Ino, *et al.*

3cmφ×5cm  
P=2atm

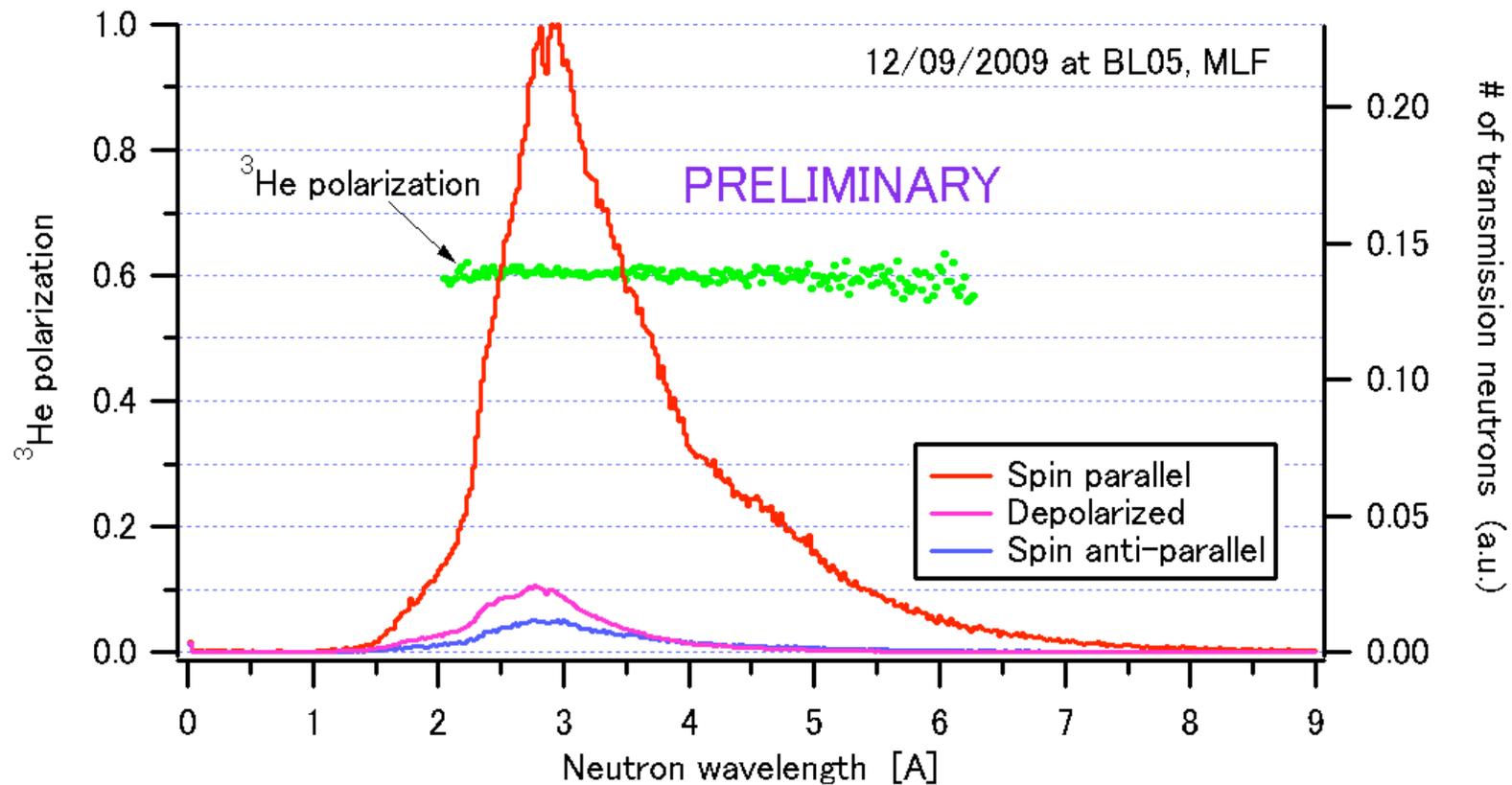
Laser power,  
Frequency narrowing 794.7 nm,  
Intensity distribution



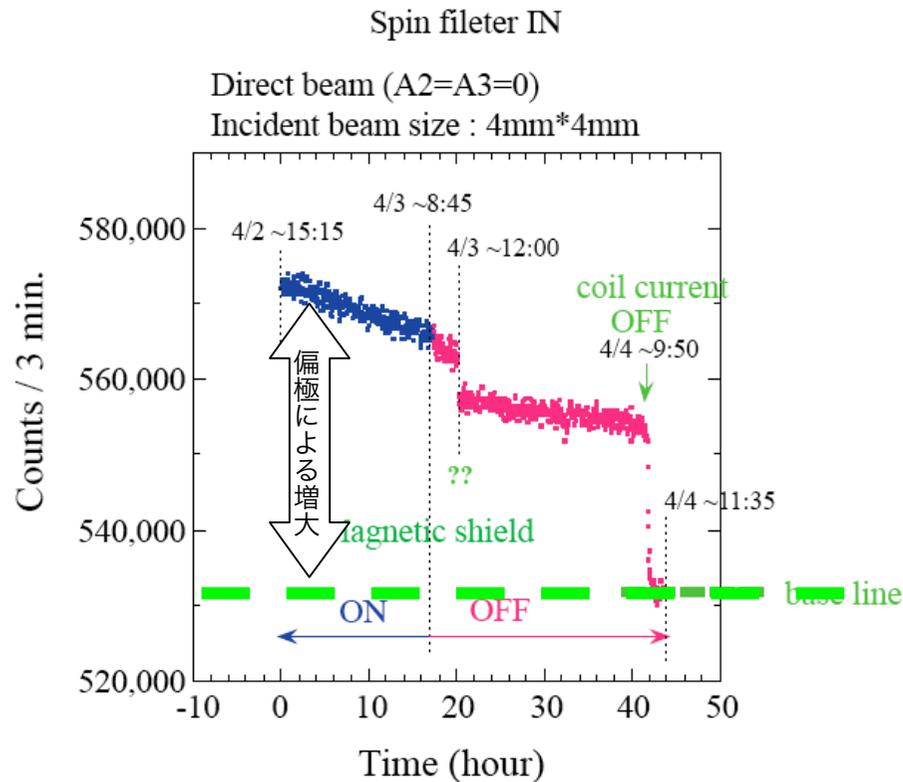


Test measurement on BL05 at  
MLF/J-PARC

The cell was polarized at KEK  
 $^3\text{He}$  gas: 17 atm·cm.  
adiabatic fast passage NMR used  
to flip the  $^3\text{He}$  polarizaton



# プロジェクトの成果



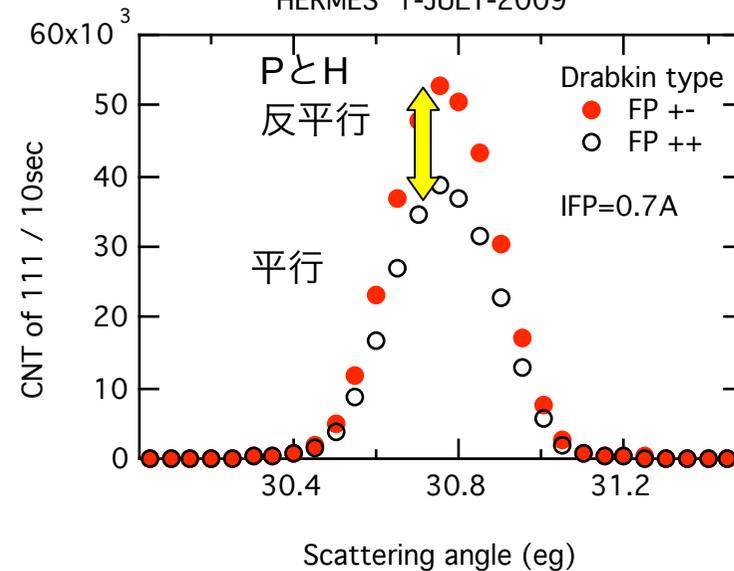
金研装置で $^3\text{He}$ フィルターを用いて  
緩和時間100時間以上を実現

物性実験が可能であることを実証  
⇒ 平成22年度実施へ

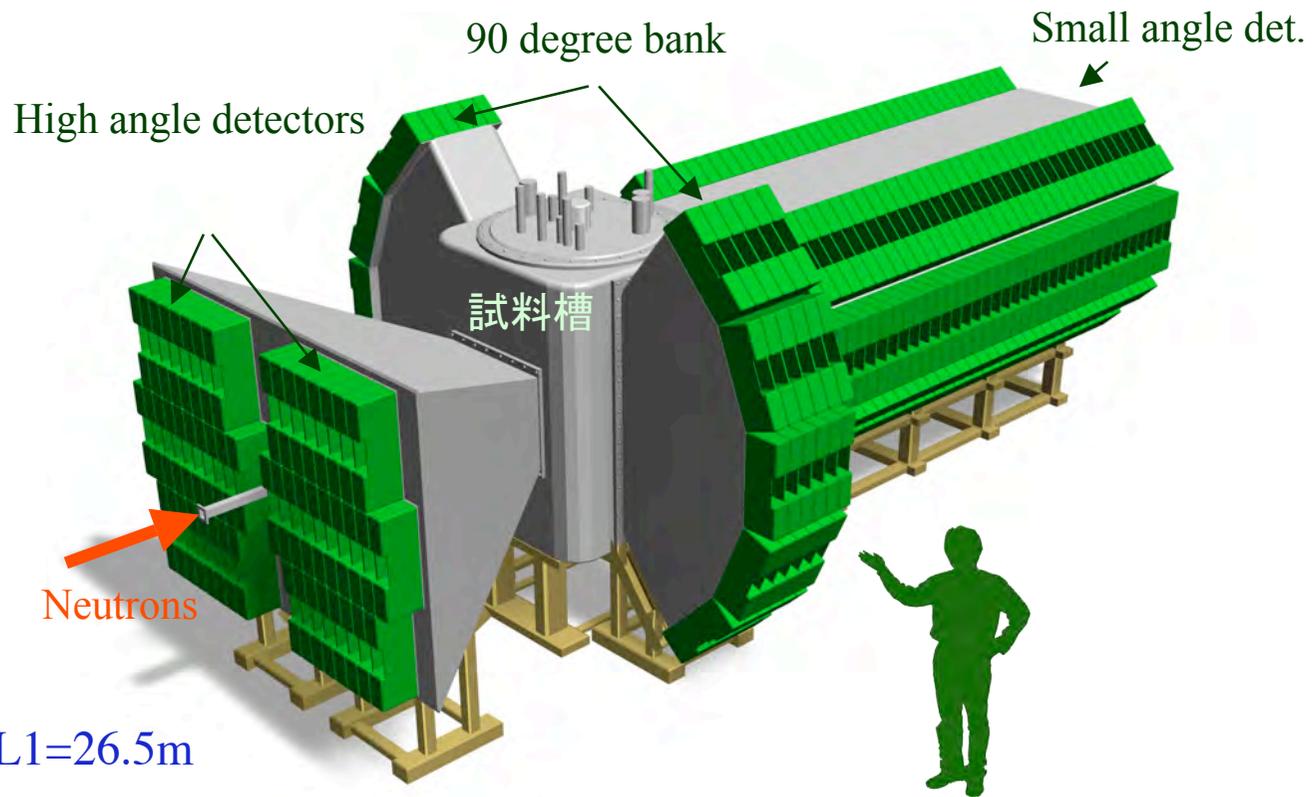
## 金研HERMESでの偏極実験



HERMES 1-JULY-2009



$\text{Cu}_2\text{MnAl}$  (111)反射で偏極の実測に成功

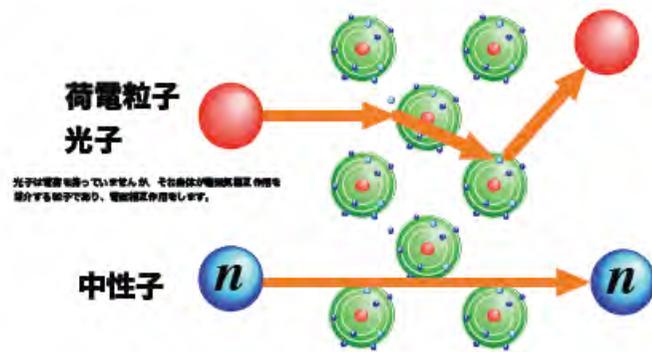


## Ibaraki prefecture high intensity powder diffractometer iMATERIA

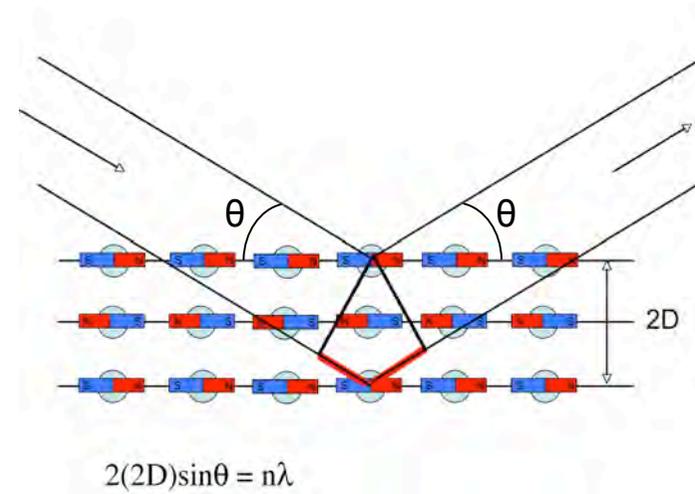
$^3\text{He}$  polarizing filter

# デバイスの高度化 -2-

## 検出



強い物質透過力



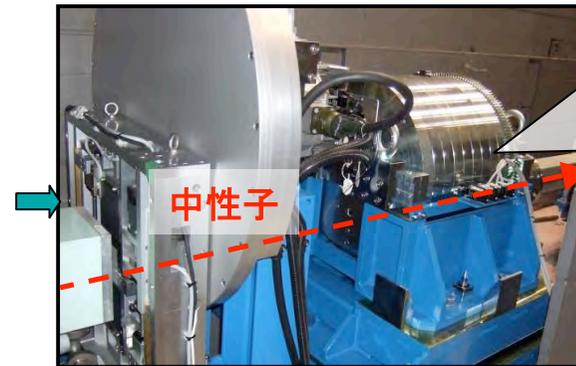
中性子磁気解析能力

# イメージング (J-PARCセンター, 量子ビーム応用研究部門, 原子力基礎工研究部門)

J-PARCパルス中性子源で,

## イメージング実験環境を整備

- 中性子源特性試験装置 (BL10) 利用
- H20-21, ロータリーコリメータ導入 (プロジェクト予算)
- コリメータによりビームの平行度(L/D比)が向上し, より鮮明な画像が取得可能に.



ロータリーコリメータ  
回転式, 4つのビーム孔寸法選択により, 中性子ビーム平行度. そして, 画像の精細度を可変に.

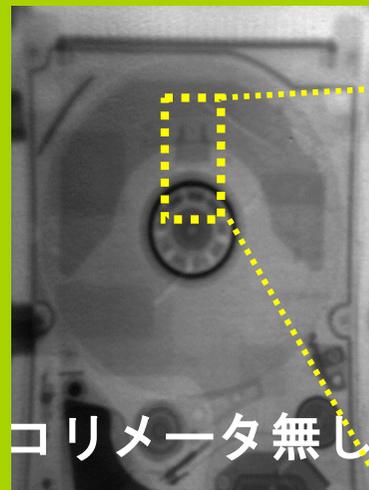


ロータリーコリメータの効果

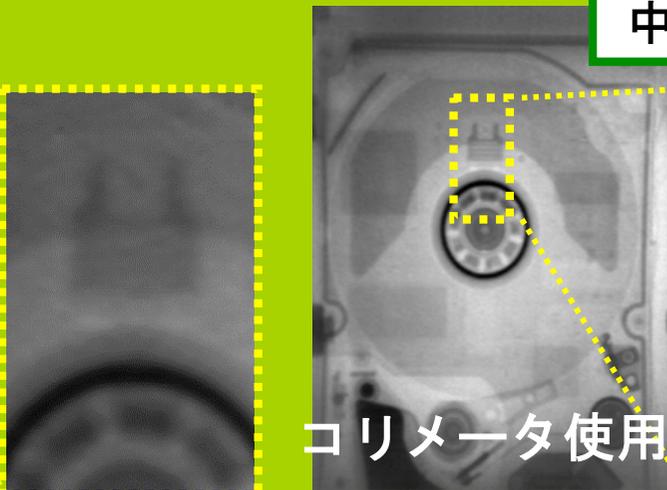
可視光画像



試料 : HD



コリメータ無し

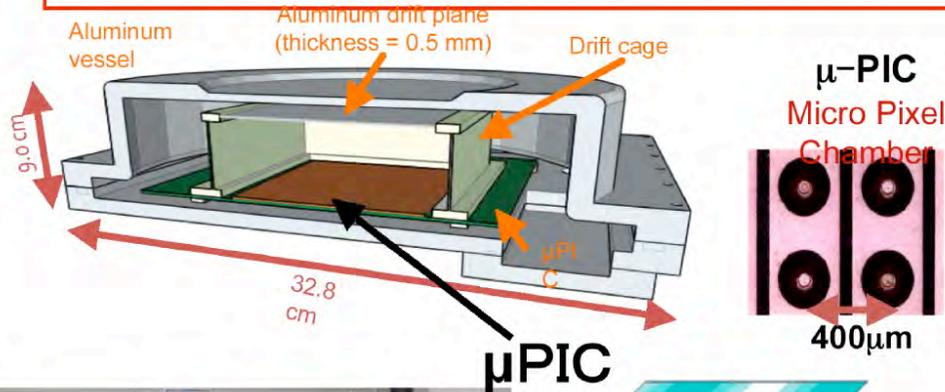


コリメータ使用

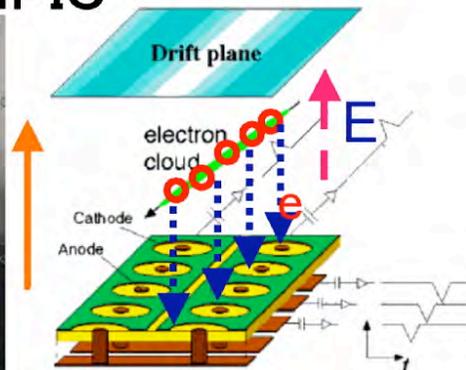
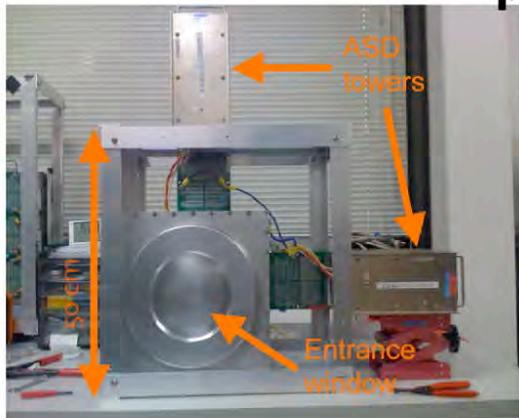
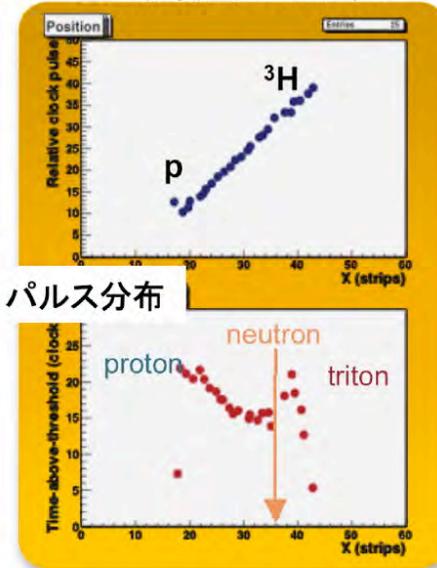
中性子透過画像

# 京大中性子時分割イメージング装置

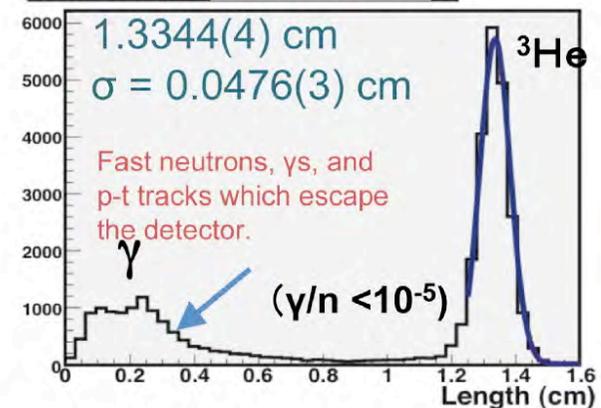
- He-3の崩壊長を3次元で測定
- 崩壊長分布からガンマ線を分離 ( $\gamma/n < 10^{-5}$ )
- TOF (0.1  $\mu$  秒以下)
- 位置分解能 目標 100  $\mu$  m (5気圧) 現在  $\sim < 500 \mu$  m (2気圧)



<sup>3</sup>He崩壊トラック測定



Track length (崩壊長分布)

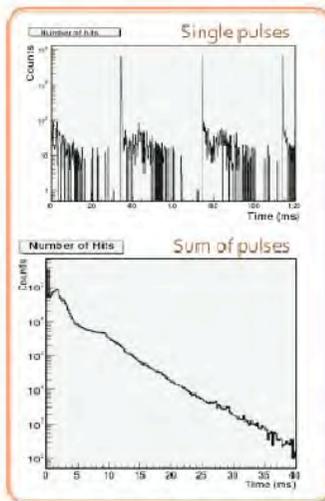
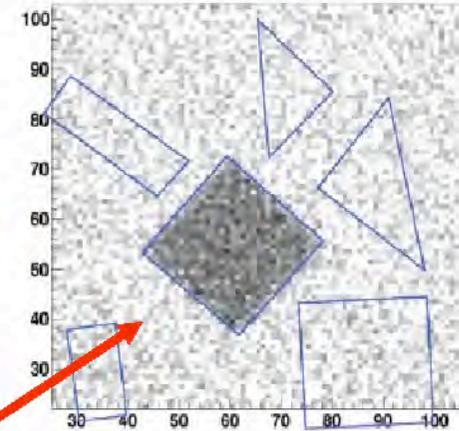
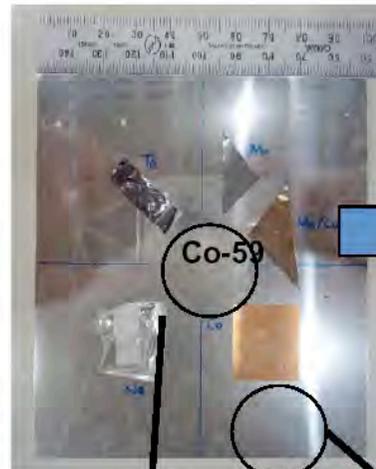
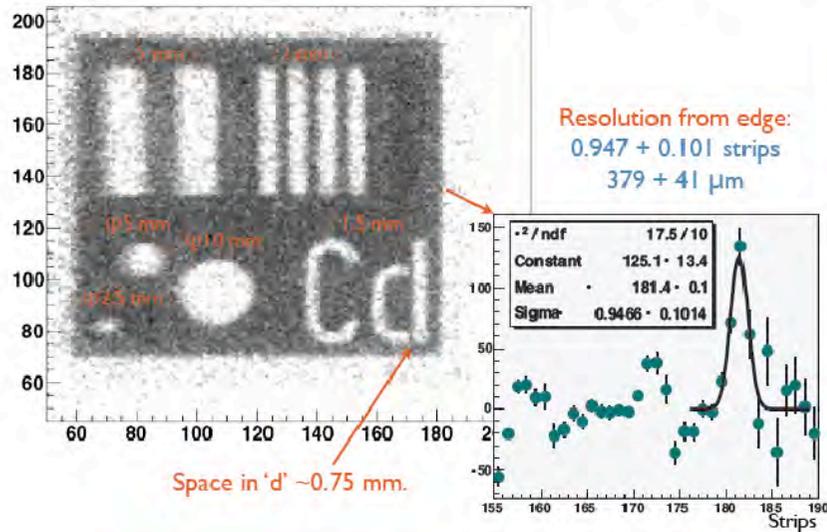


# J-PARC実験

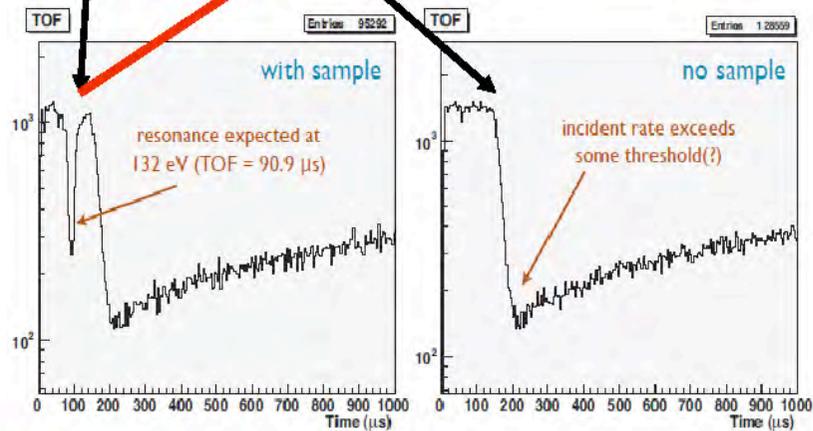
09年11月100KW @Noboru

TOF-Radiography & SANS @ 1MHz av. ~10MHz(max)

Position resolution from Cd test chart

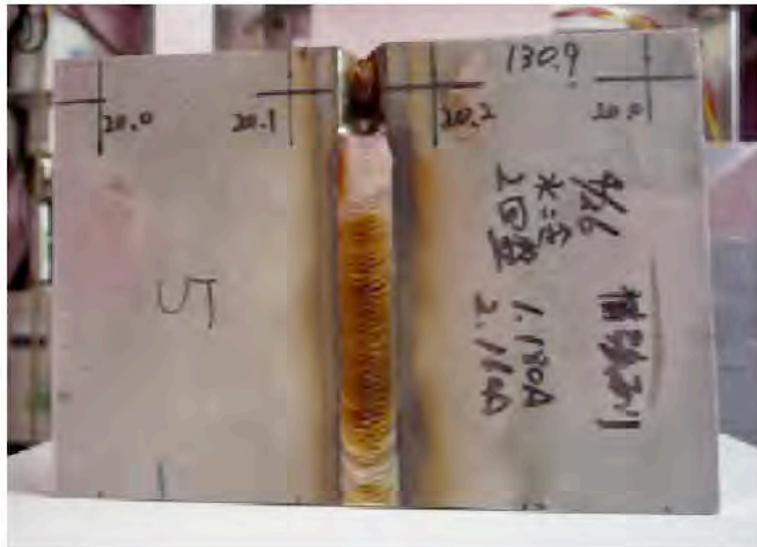


ToF

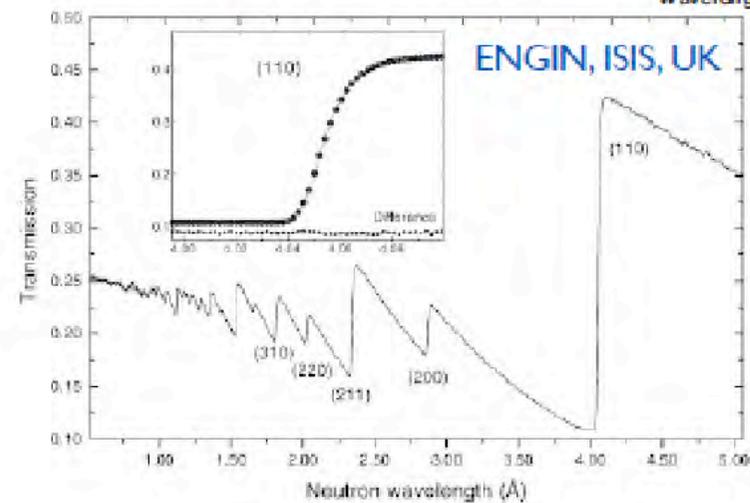
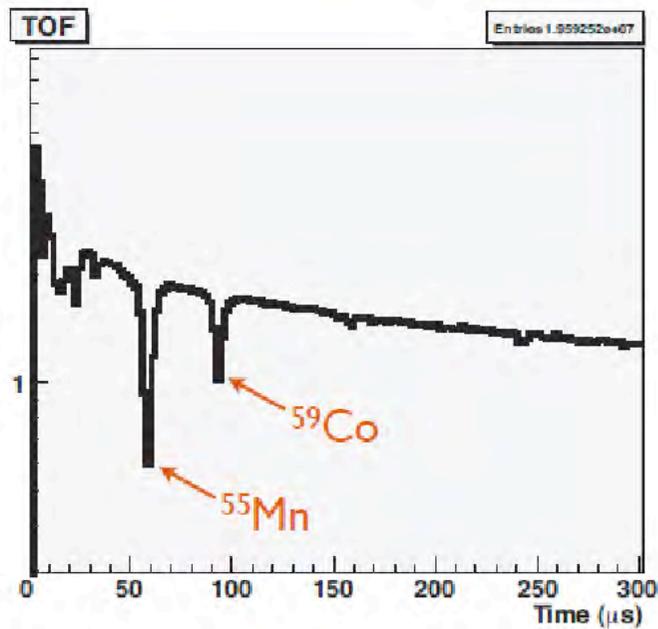
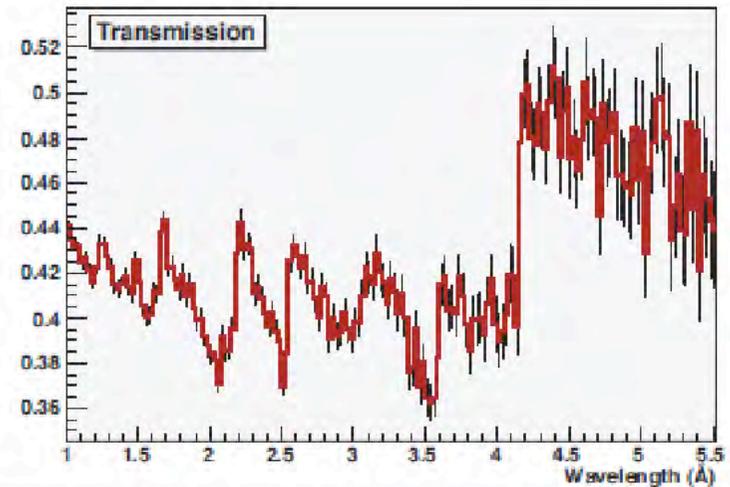


Preliminary Results (Analysis ongoing)

# Welded steel plate



- Transmission as function of neutron wavelength.
- Compared to data from ISIS (iron powder, 2.5-cm thickness).



ENGIN, ISIS, UK

# 中性子イメージインテンシファイアの加速器中性子源への適用

(北大 鬼柳先生;原子力機構)

中性子イメージインテンシファイア検出器(カラーI.I.<sup>TM</sup>、東芝製)

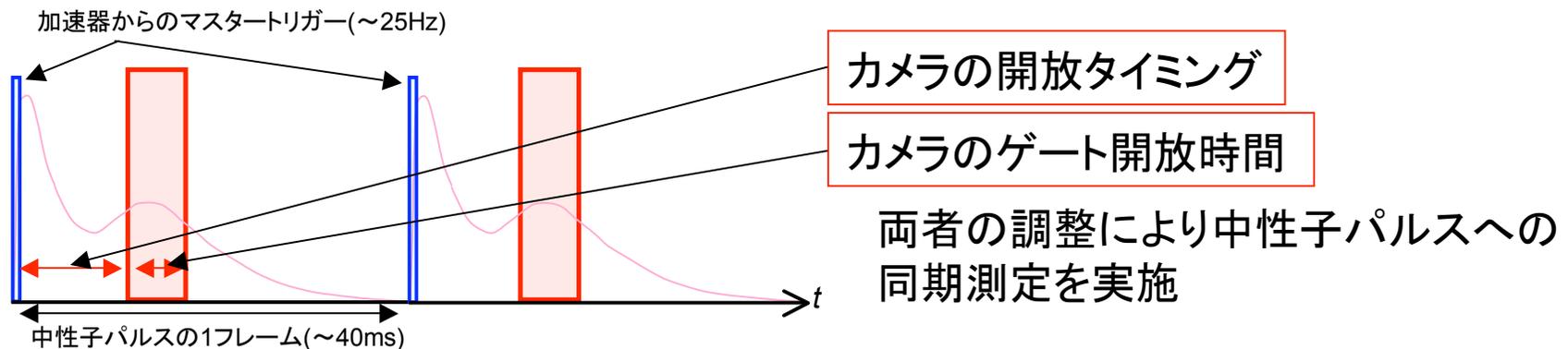
これまで、

原子炉線源(JRR-3M)を用いた熱中性子ラジオグラフィに成功  
パルスX線源と同期をとった測定を実施

→北大パルス中性子源と同期を取った測定による評価



## 加速器トリガーに対する同期性能の評価実験



実験では、1万枚の画像を積算し、開放タイミングをずらした画像と差分することで、1フレーム内の特定の時間領域に対する画像を取得

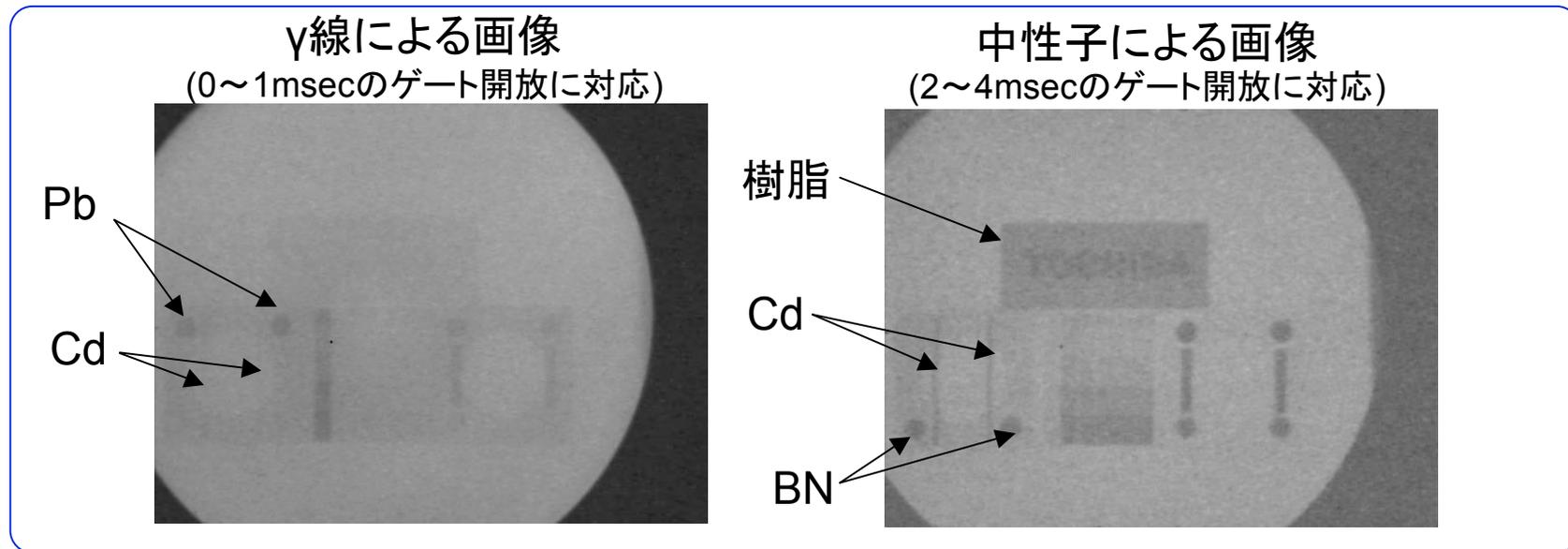
# 遅延時間の異なる画像の差し引きによる中性子・ $\gamma$ 線画像

遅延時間0msecから1msecを差し引き

→樹脂やBNは見られず、PbやCdが写っている。=  $\gamma$ 線による画像

遅延時間2msecから4msecを差し引き

→Pbが写らずに樹脂やBN、Cdが写っている。= 中性子による画像

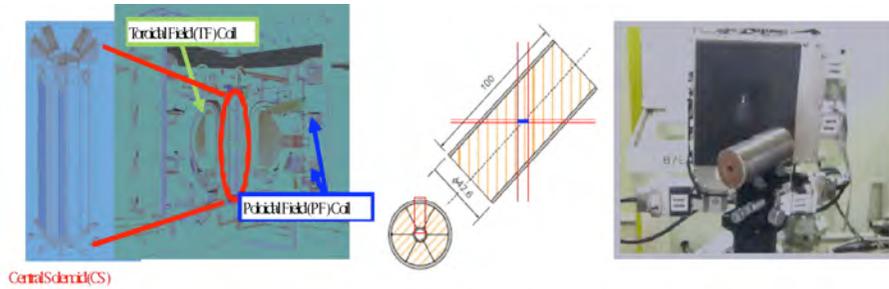


北大加速器中性子源では、電子ビームがターゲットを叩いた瞬間にX線が放出される。  
=短時間側で $\gamma$ 線量が多くなり、その後減速された中性子が多くなる。

→結果は線源の放射線放出の状況に対応しており、中性子源への同期性能が確認された。

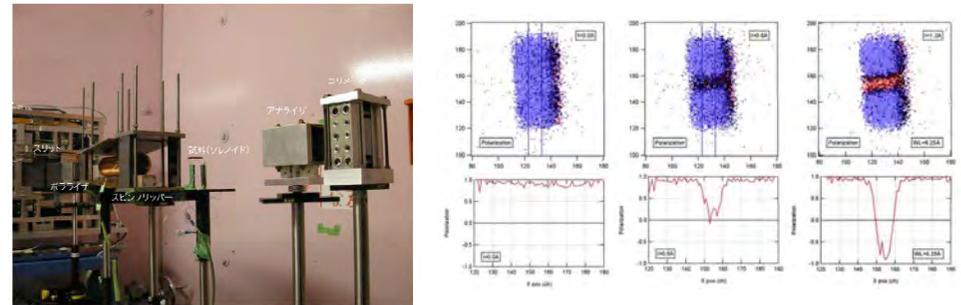
現在は、高速度カメラによる1フレーム内時分割測定の実験を実施中

# イメージングと応力解析を活用したその 場材料評価技術開発

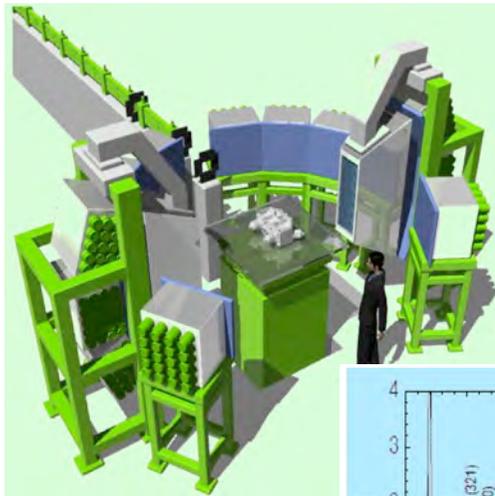


Central Solenoid (CS)

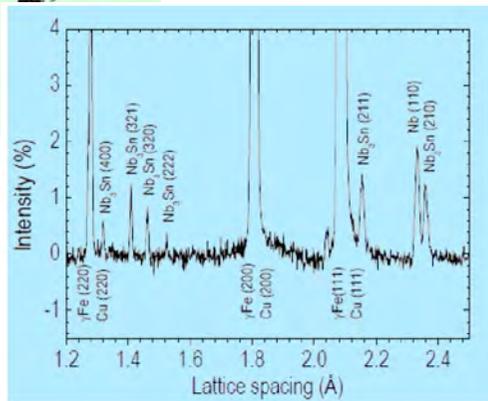
# 偏極中性子磁気イメージング



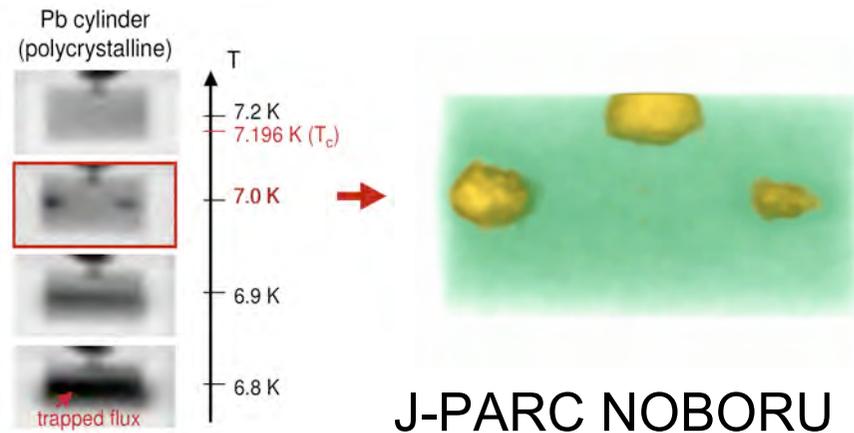
# 核融合炉用導体の歪状態の解明



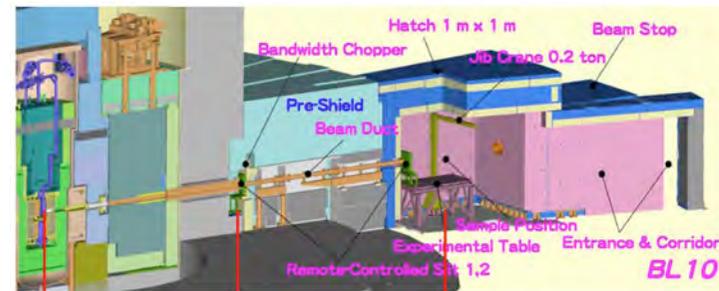
J-PARC  
匠



# 磁場分布の可視化



J-PARC NOBORU





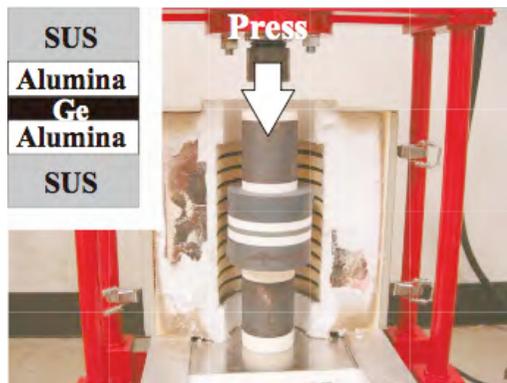
# 東北大

「モノクロメータ結晶開発」

高性能Ge, Cu, Si単結晶モノクロメータ素子の開発

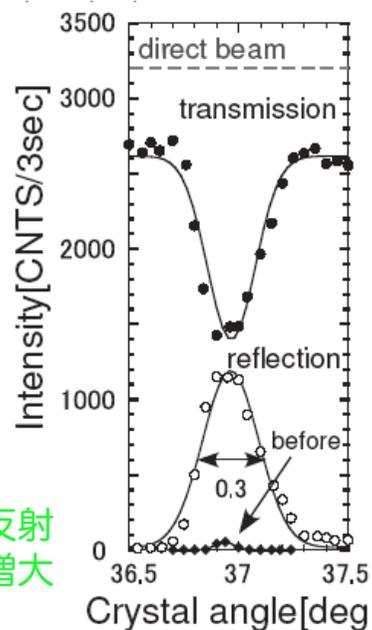
Ge単結晶の高反射率化

ホットプレス装置



ホットプレスによるブラッグ反射強度の増大

Miyake, J. Physics; Conf. Ser. (09)



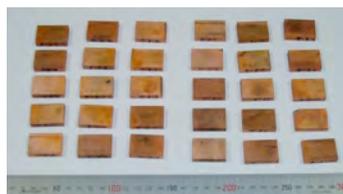
大型高反射率Ge結晶モノクロメータ



高エネルギー実験用大型Cu単結晶育成

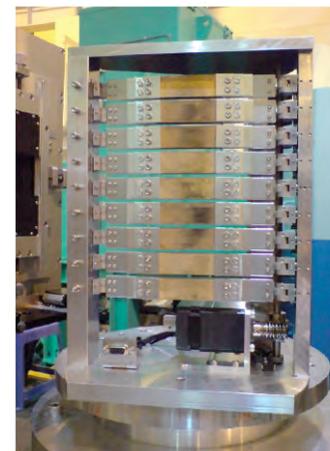


by 金研 結晶育成グループ



結晶性のチェック、軸出し、切断

JAEAのTAS-2分光器にセット



# 中性子集光ミラーの開発(北大、JAEA)

## 1. 小型高精度集光ミラー

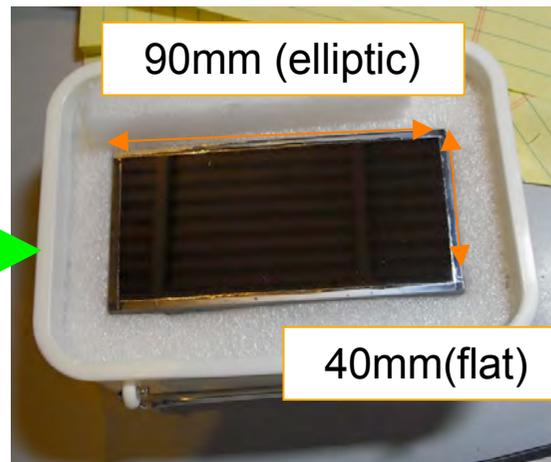


NC-LWEによる基板の  
高精度表面形状創成  
(阪大との共同研究)



イオンビームスパッタによる  
高性能スーパーミラー成膜

楕円型集光ミラー試作

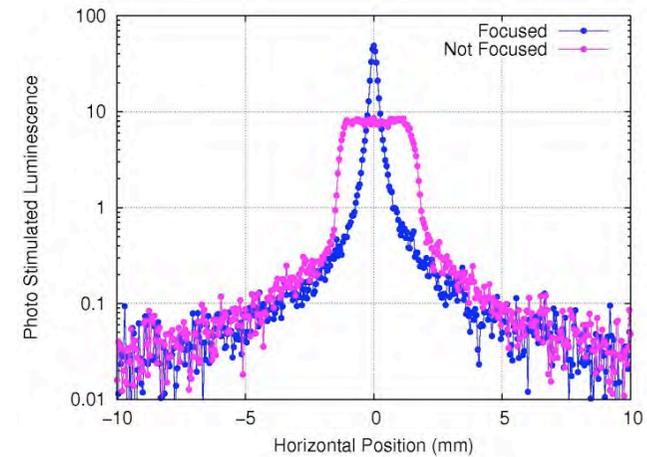


Focal Length: 1050+1050 mm

Figure Error: 1740nm (PV)

Roughness: 0.863nm (rms)

白色中性子ビームの  
集光に成功



CHOP(C2-3)@JRR-3

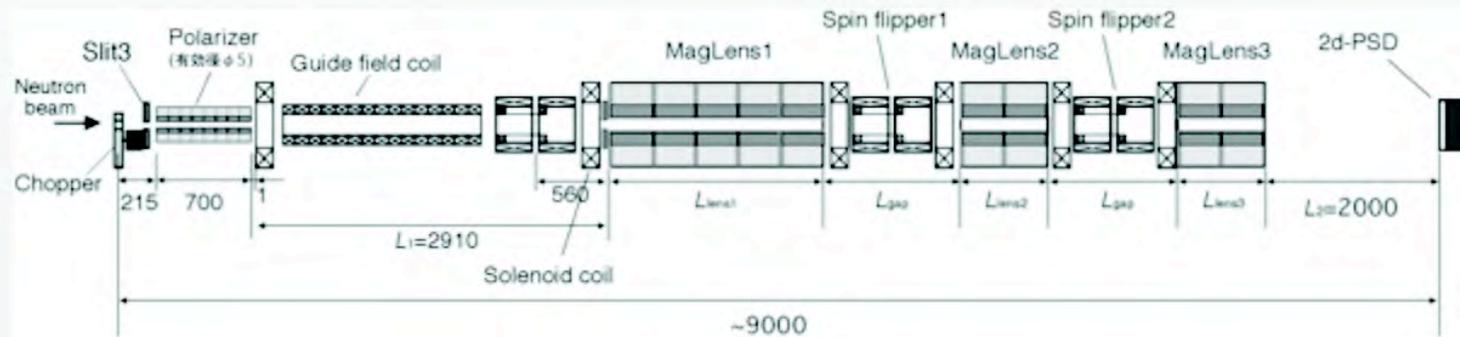
白色ビーム:  $\lambda > 3 \text{ \AA}$ ,

集光サイズ 0.23mm

強度ゲイン ×6

小型小角散乱装置群の開発 ライフサイエンス (北大, 古坂先生)

# Triple Lens System



Schematic layout of the experimental setup of the triplet lens system.

Beamline JRR-3 C3-1-2-1 NOP

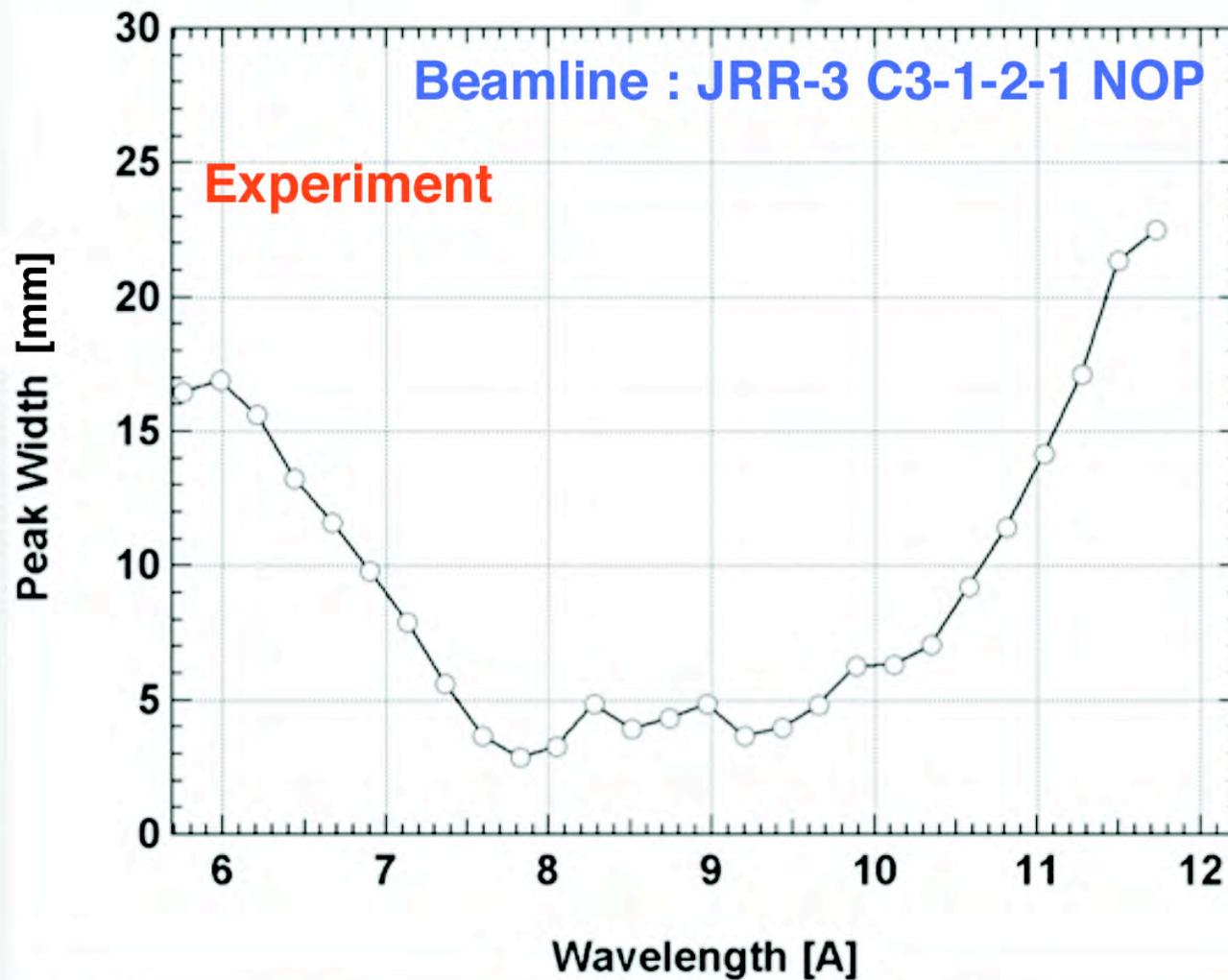


Experimental setup

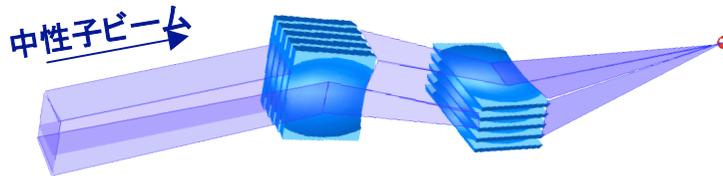
Neutrons with  $\lambda > \sim 7\text{\AA}$  are available at NOP beamline

(Oku, Suzuki et al.)

# Tentative Experimental Result of the Triplet Lens System

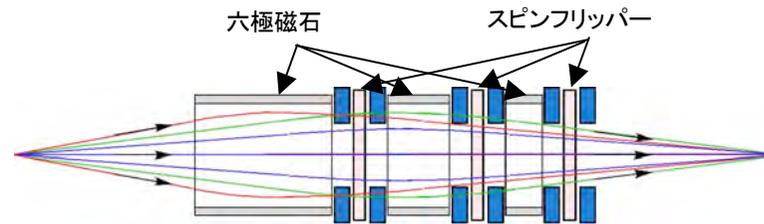


(Oku, Suzuki et al.)



非球面集光スーパーミラー

開発目標・反射臨界角:  $m \geq 3$   
 ・反射率:  $R > 80$  @  $m=4$



複合磁気レンズシステム

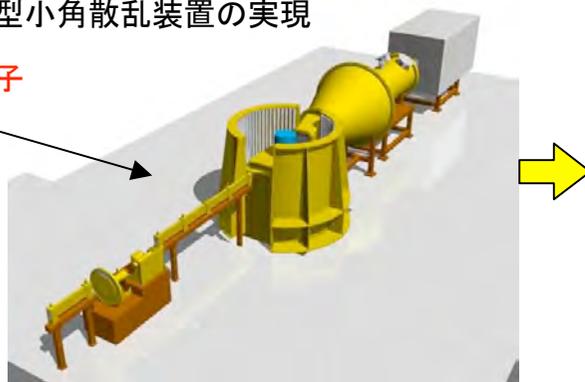
開発目標  
 ・集光波長帯域幅  $\Delta\lambda \geq 0.25\text{nm}$

六極磁石の集光(正極性  
 スピン)、発散(負極性ス  
 ピン)機能を組合せてパルス  
 中性子を一定の焦点距離  
 で集光する。

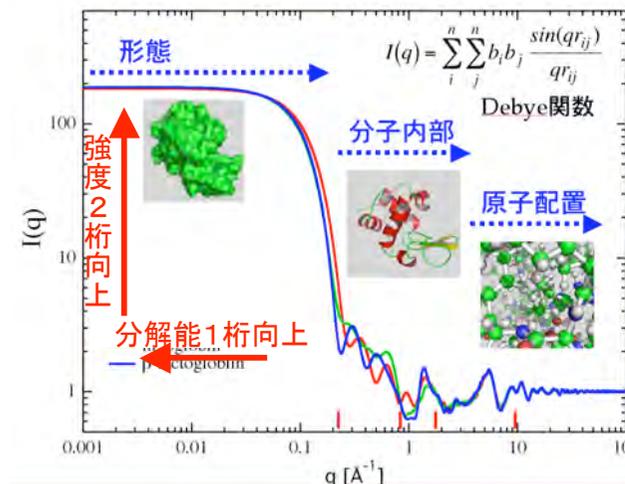
利用研究

パルス中性子集光型小角散乱装置の実現

パルス白色中性子  
 集光素子



J-PARC大強度小角散乱装置(HI-SANS)



ナノメートルからマイクロスケールの階層構造を一気に解析。

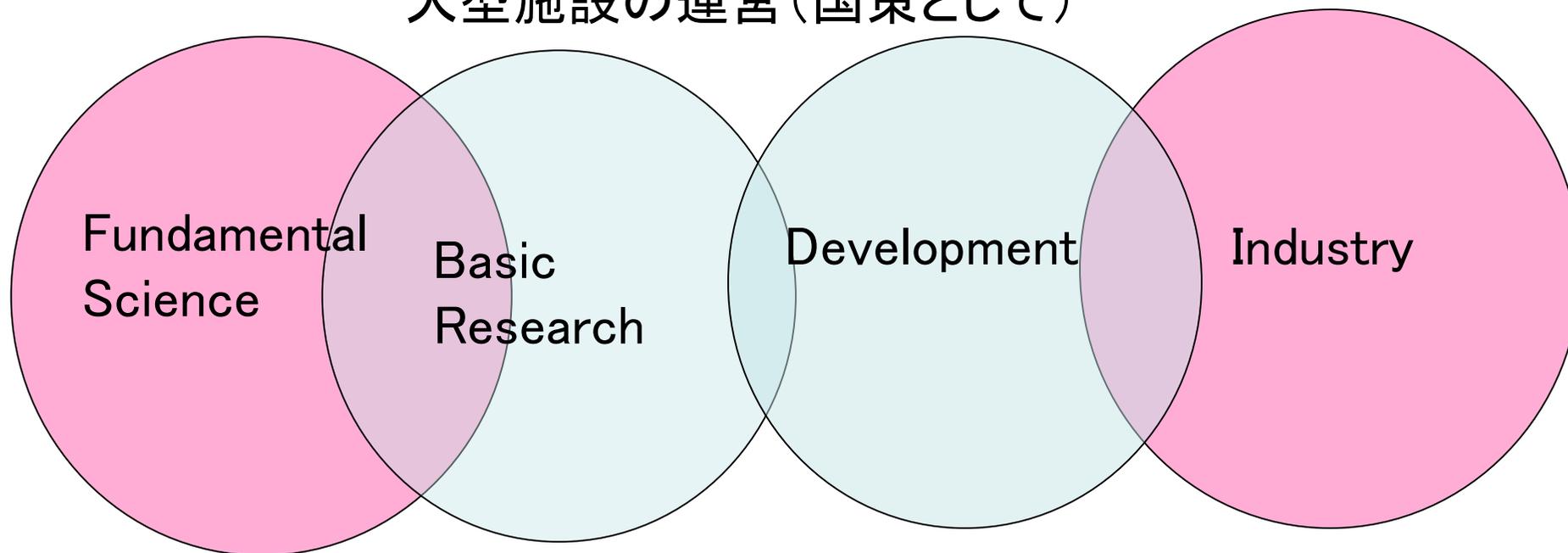
Summary

Future perspectives

Steady state source

Steady state + pulsed source

大型施設の運営(国策として)

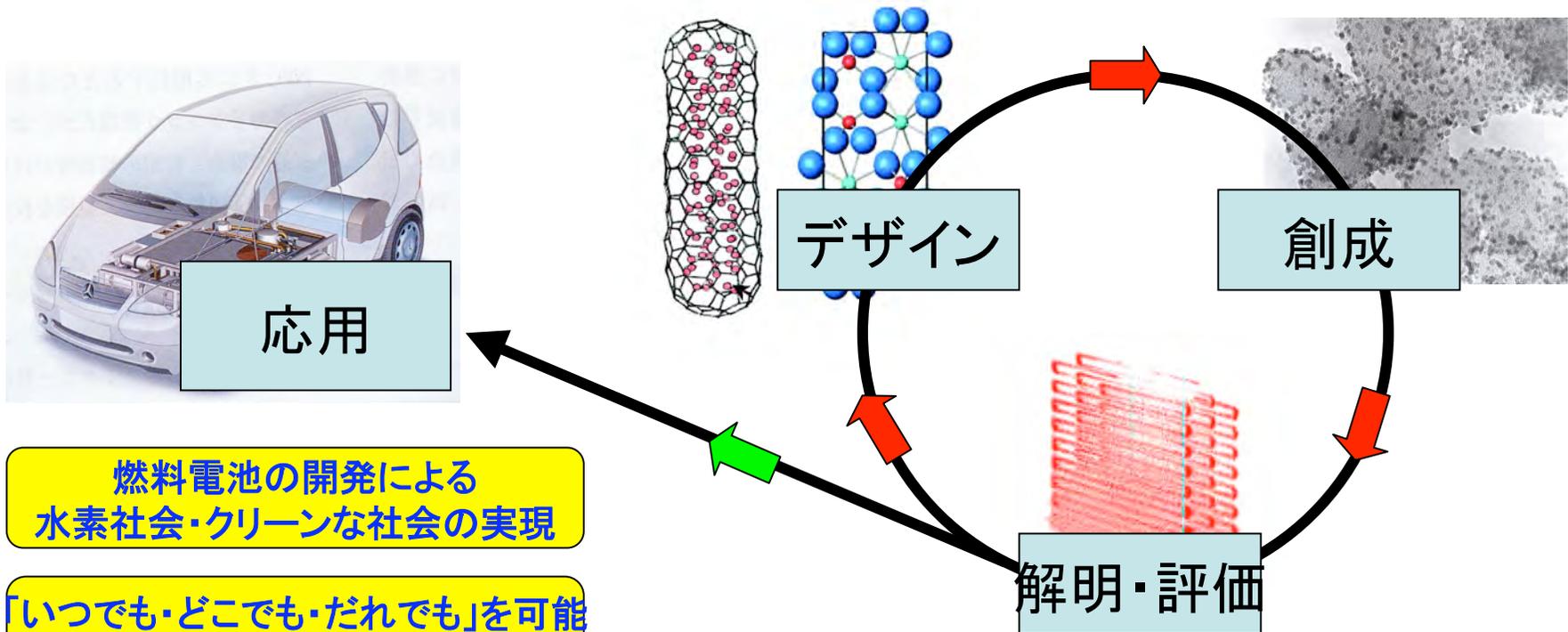


基礎基盤研究促進

トライアルユース等の促進事業

産官学の連携が重要

# 中性子新機能物質開発サイクル



燃料電池の開発による  
水素社会・クリーンな社会の実現

「いつでも・どこでも・だれでも」を可能  
にするユビキタス社会の実現

国民の健康、安全・安心な生活の実現

他の量子ビーム利用研究  
との相補的活用を目指す

## 中性子利用研究

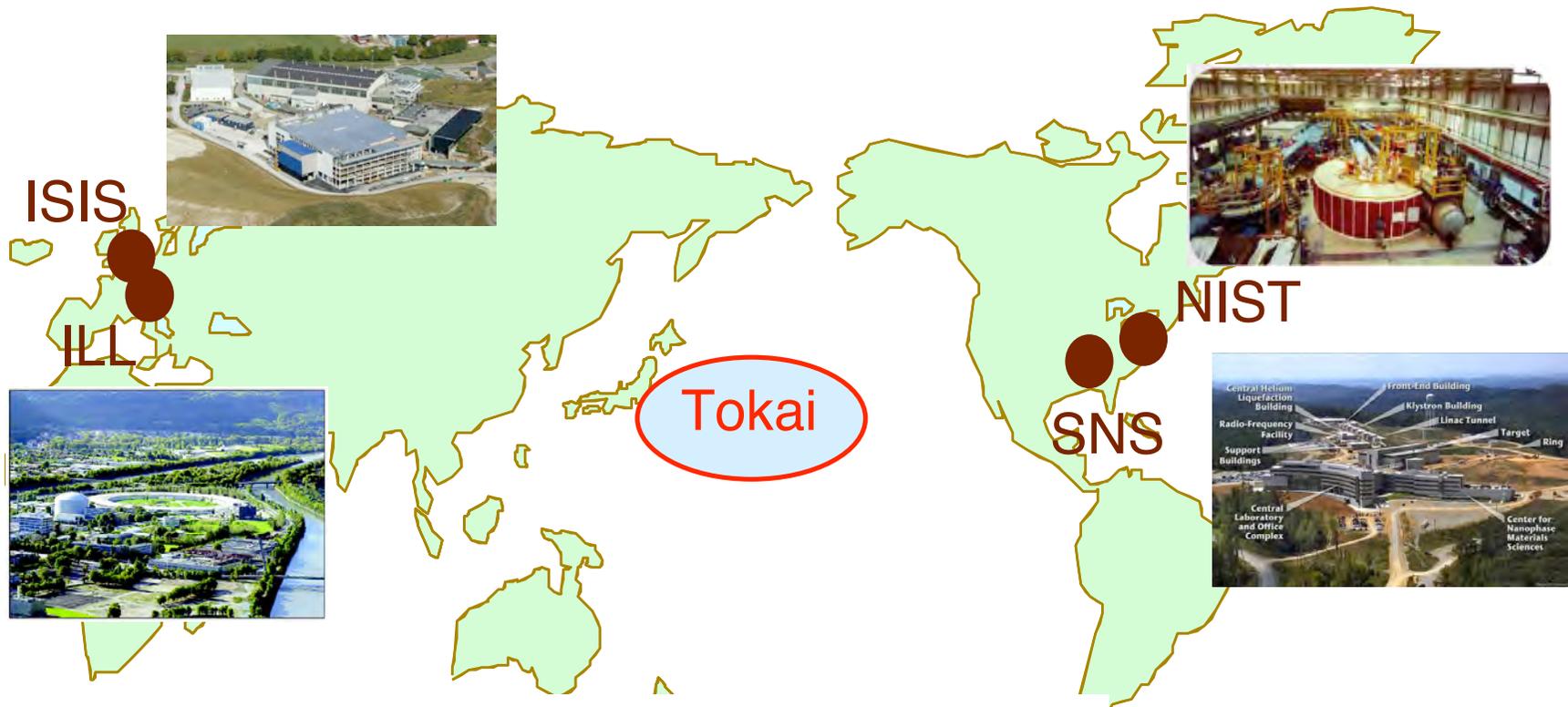
JRR-3

MLF/J-PARC



# 国際的中性子利用研究拠点としての東海サイト

中性子物質・生命科学研究 ; 世界三大拠点の一つ。アジア・オセアニアの中核施設



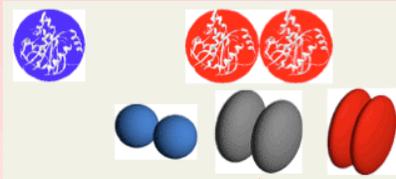
国内外に開かれた中性子  
利用研究拠点を旨す。

安心・安全で質の高い生活のできる国

国際競争力があり持続的発展のできる国

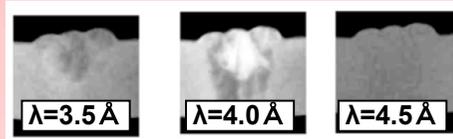
### ライフサイエンス

溶液中のタンパク質の会合状態の観測  
↓  
アルツハイマー病の発病因子の解明等



### 工業材料等

中性子エネルギー選別イメージング  
→破壊メカニズムの評価



鉄の溶接部

### ナノテクノロジー

磁気構造評価

- ・高密度磁気記録媒体(製品と同状態で観測)
- ・微小GMRヘッドなど



中性子利用効率

100

10

1

集光・整形  
生体物質

検出  
工業材料

偏極

機能性材料の研究

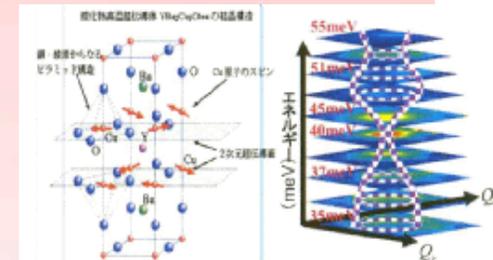
- ・高温超伝導体
- ・マルチフェロイック

小角散乱

イメージング

ナノ磁性体  
スピントロニクス

広角散乱



中性子測定自由度