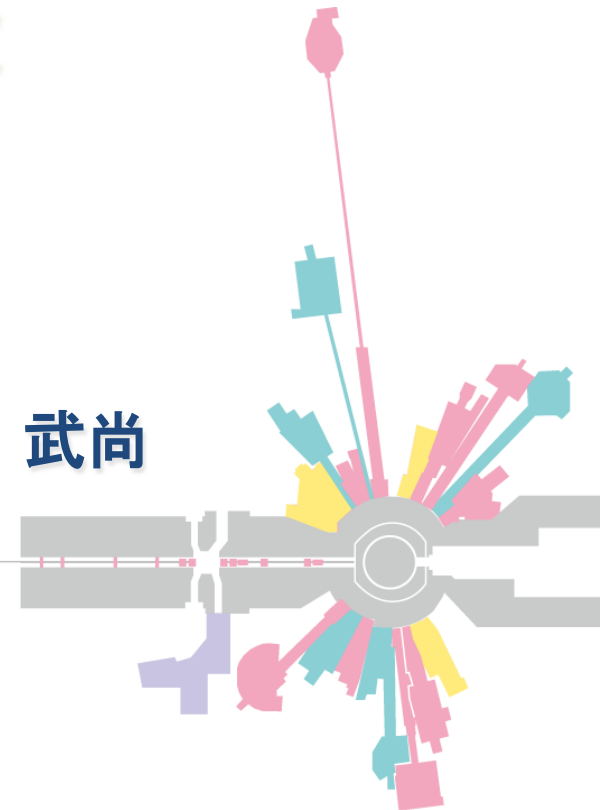


J-PARCにおけるパルス中性子イメージング専用 ビームラインの建設

原子力機構J-PARCセンター 篠原 武尚



パルス中性子イメージング専用ビームライン 「物質情報3次元可視化装置」



コンセプト

「観測対象が持つ物理量の定量化とその実空間分布の取得・画像化」

本格的なエネルギー分析型中性子イメージング装置

- ・パルス中性子の特徴を活かして高効率・高精度の測定
- 観測対象の構成核種情報・結晶組織情報・温度情報・磁場情報...

高性能中性子ラジオグラフィ装置

- ・100mm \square ～300mm \square のビームサイズ、広い範囲でL/D値を選択可能
- ・FOVと空間分解能に応じて検出器を選択可能
- ・高速CT再構成用計算環境を整備

スケジュール

- 2010年 装置検討開始
- 2010年7月 パルス中性子イメージングライン研究会開催
- 2010年9月 実験装置提案書合格
- 2012年4月 共用促進法に基づき予算化・装置建設を開始(3年〇債)
- 2012年5月 国際アドバイザー委員会開催
- 2012年9月 実験装置詳細計画書合格
パルス中性子イメージング研究会開催
- 2013年度夏期停止期間に遮蔽体等を設置
- 2014年度よりコミショニング開始予定
- 2014年度後半から順次共用を開始予定

建設メンバー

全体統括	鬼柳善明 (北大)
装置建設	篠原武尚 (J-PARC)
	甲斐哲也 (J-PARC)
	大井元貴 (J-PARC)
	原田正英 (J-PARC)
	及川健一 (J-PARC)
	酒井健二 (J-PARC)
	加美山隆 (北大)
	佐藤博隆 (北大)
	木野幸一 (北大)
	平賀富士夫 (北大)
検出器開発	呉田昌俊 (基礎工)
	瀬川麻里子 (基礎工)
	曾山和彦 (J-PARC)
	持木幸一 (東京都市大)
計算環境	中谷健 (J-PARC)
	櫛田慶幸 (計算科学セ)
画像処理	横田秀夫 (理研)
	世良俊博 (阪大)
	広田克也 (理研)
解析技術	飯倉寛 (量子ビーム)
	酒井卓郎 (量子ビーム)
	斎藤泰司 (京大炉)

アドバイザー	新井正敏 (J-PARC)
	神山崇 (J-PARC)
	相澤一也 (J-PARC)
	ステファヌス・ハルヨ (J-PARC)
	松林政仁 (量子ビーム)
	安田良 (量子ビーム)
	前川藤夫 (原子力機構)
	鈴木淳市 (CROSS)
	山形豊 (理研)
	大沼正人 (物材機構)
江藤剛治 (立命館大)	
IACメンバー	中西友子 (東大)
	川端祐司 (京大炉)
	E. Lehmann (PSI)
	B. Schillinger (TUM)
	N. Kardjilov (HZB)
	W. Kocklemann (ISIS)

- ・2012年10月(RUN#44)より300kW相当で運転中
- ・現在はRUN#45を終了し停止中、1/13よりRUN#46開始

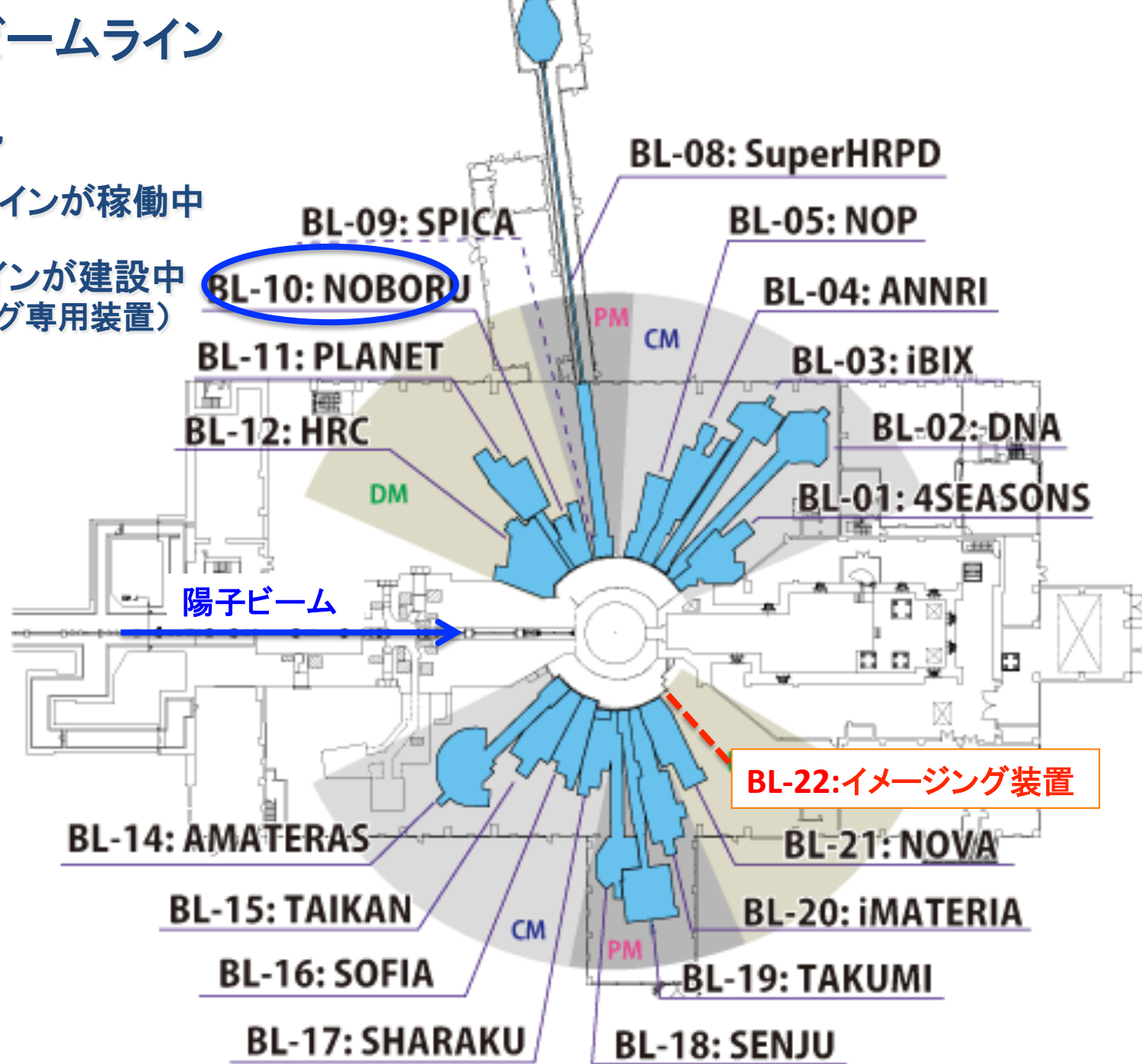


MLF 中性子ビームライン

23本のビーム孔

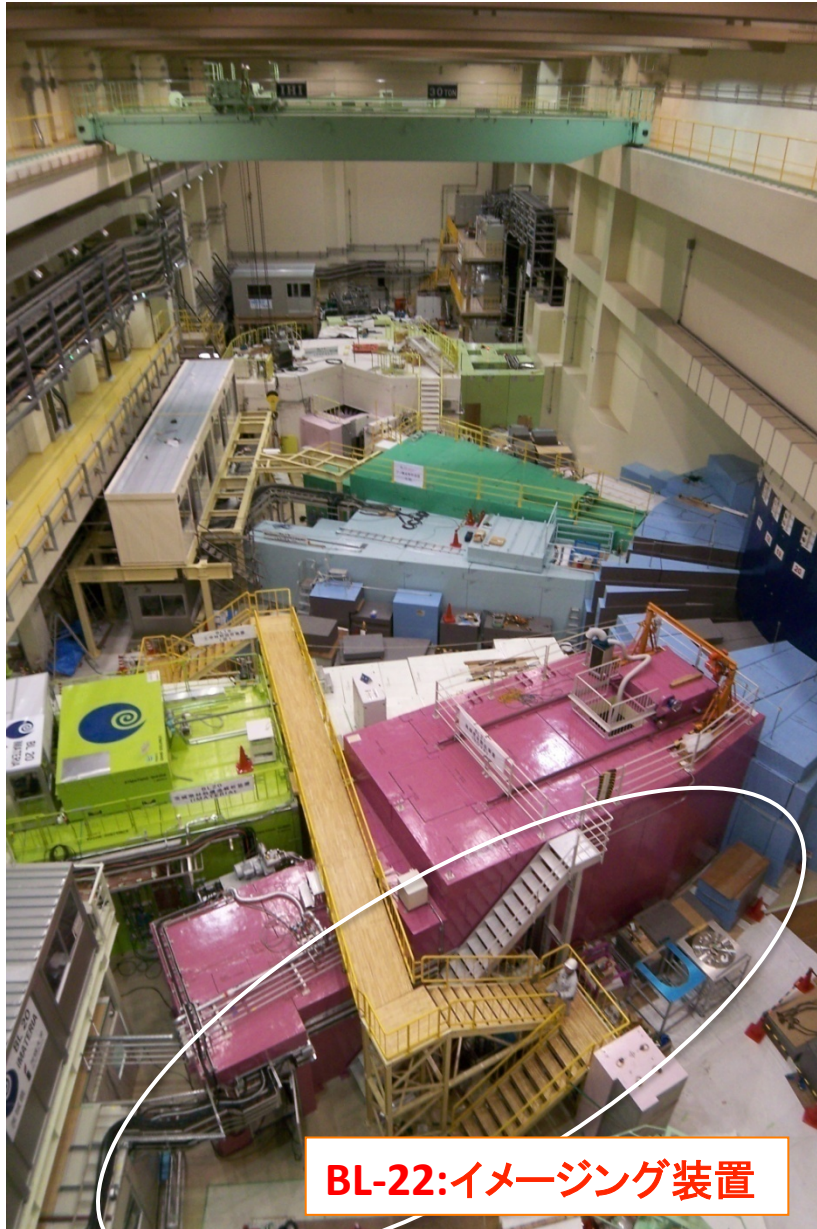
18本のビームラインが稼働中

3本のビームラインが建設中
(1本はイメージング専用装置)

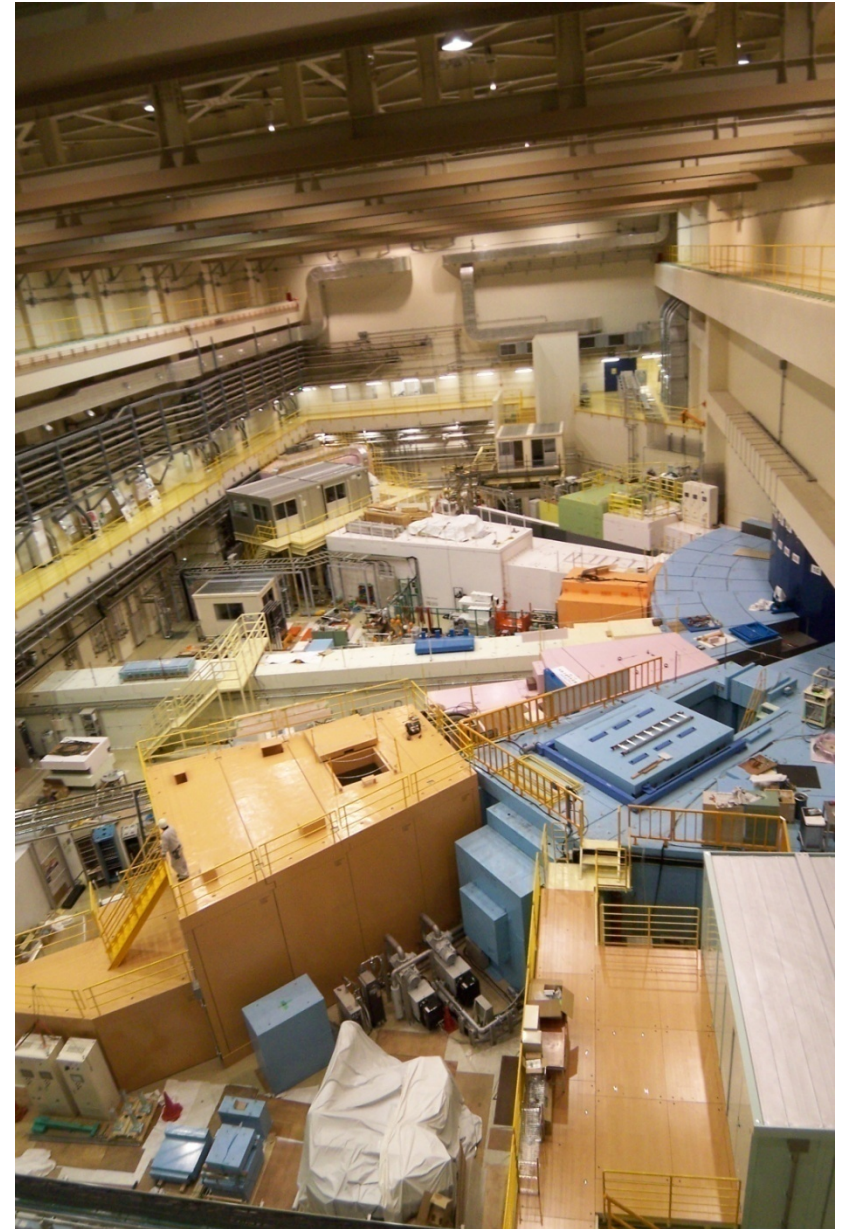


The Hall #2

The Hall #1



BL-22:イメージング装置

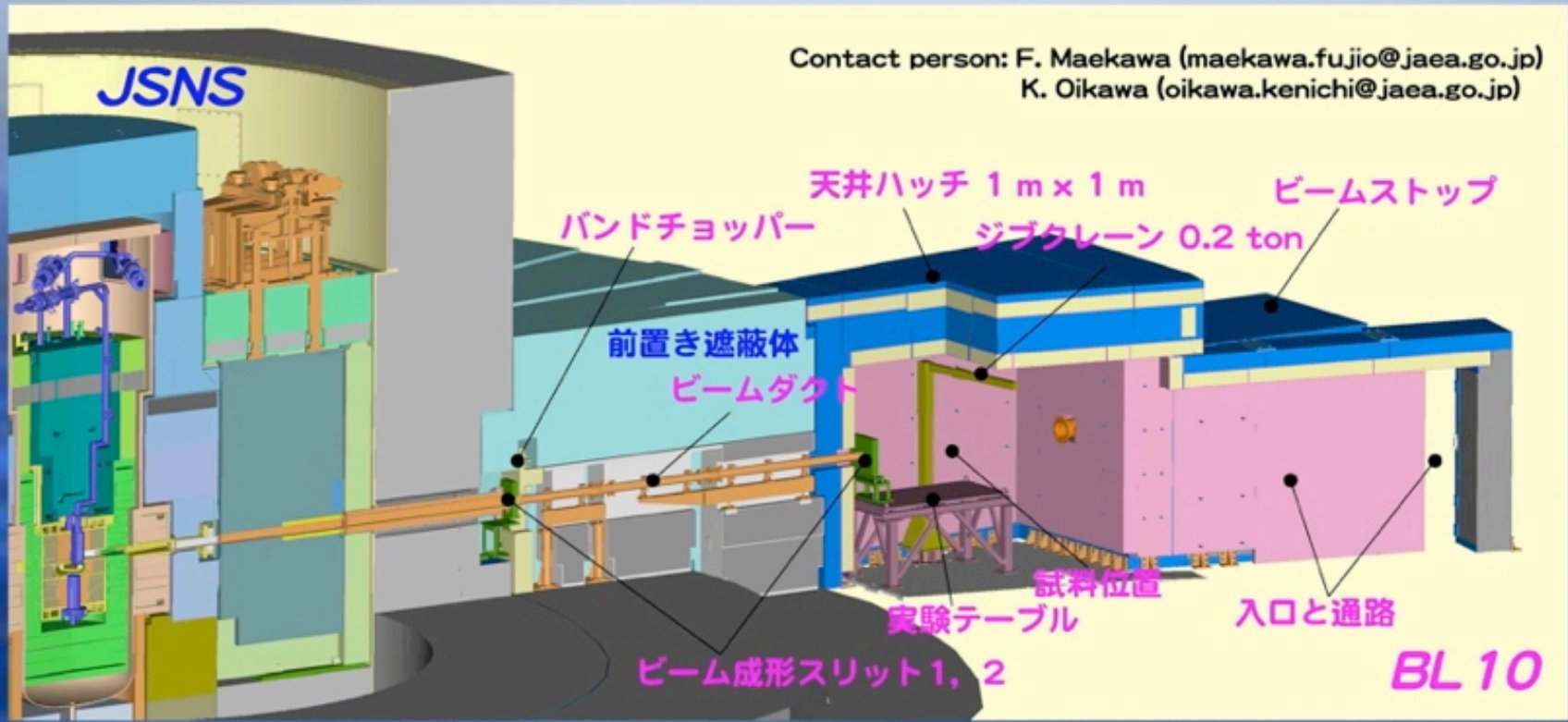


NeutrOn Beam-line for Observation and Research Use (NOBORU)

★中性子源施設として自ら責任を持って中性子ビーム性能を把握し、質の高い中性子ビームをユーザーに提供すること。

★ビーム制御、検出器開発などを含むテストポートとしての利用。

Contact person: F. Maekawa (maekawa.fujio@jaea.go.jp)
K. Oikawa (oikawa.kenichi@jaea.go.jp)



- ◇ Wide band width up to 9\AA due to the short L1 (14m) and long pulse interval (40ms/25 Hz)
- ◇ Intense cold neutron flux ($4.8 \times 10^7 \text{ n/s} \cdot \text{cm}^2$ at 1MW)
- ◇ Small beam divergence due to neutron guideless beam-line design
- ◇ Versatile experimental space of $2.5 \text{ (W)} \times 3.5 \text{ (L)} \times 3.0 \text{ (H)} \text{ m}^3$ to introduce various experimental setups
- ◇ Strong radiation shield to accept large samples

Upgrading the "NOBORU" instrument



for Energy-resolved imaging

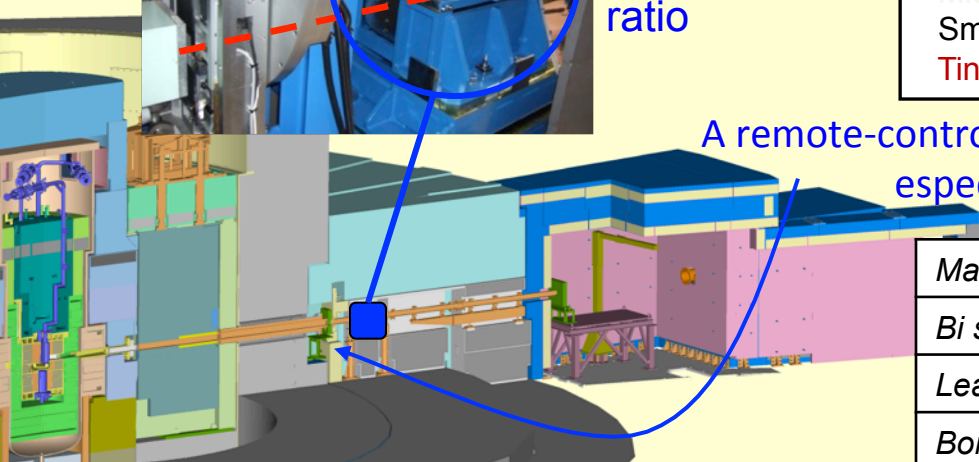
Rotary collimator



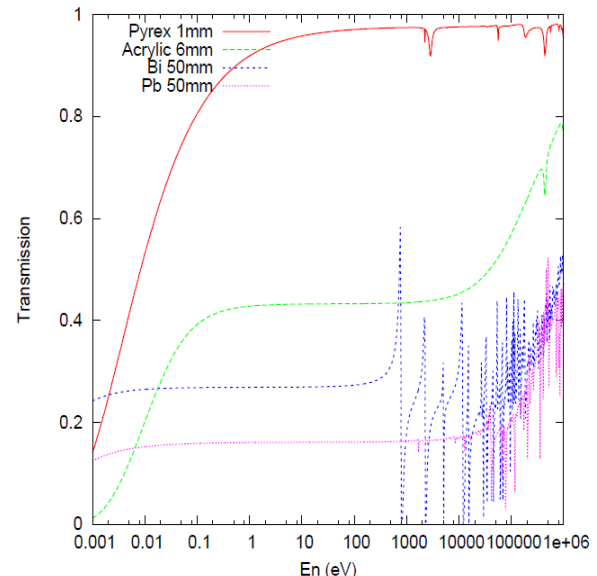
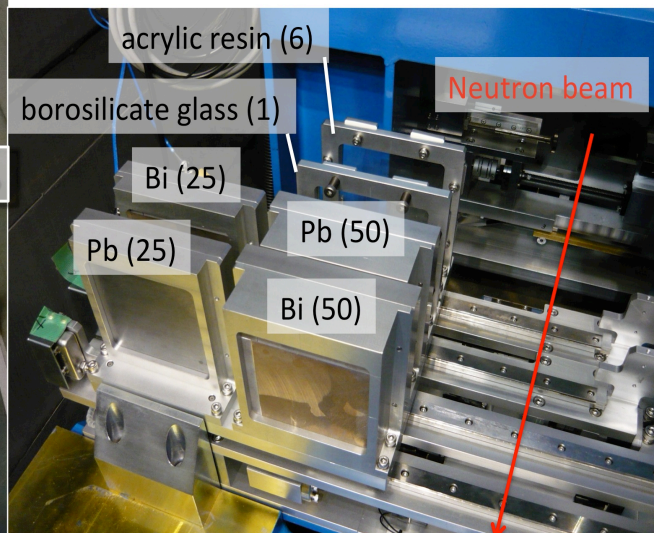
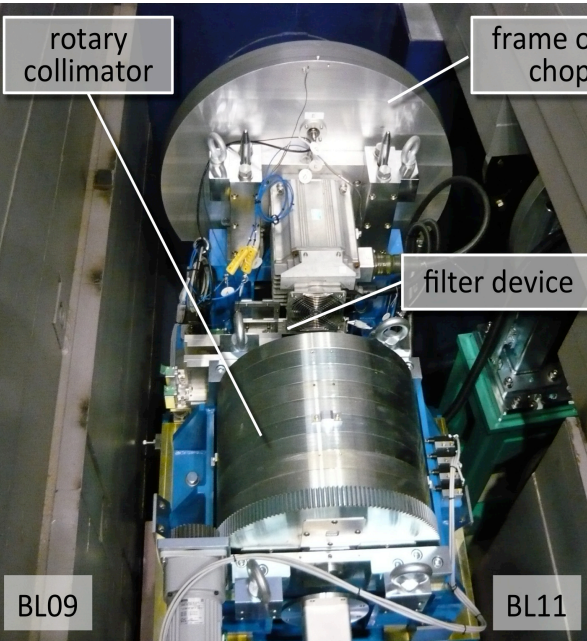
Collimator size was changed for higher L/D ratio

	Pinhole size	L/D	Area (mm ³)
Open	100 x 100 mm	140	10,000
Large	31.6 x 31.6 mm	190	1,000
Middle	17.8 x 17.8 mm	337	300
Small	10.0 x 10.0 mm	600	100
Tiny	3.2 x 3.2 mm	1875	10 new!

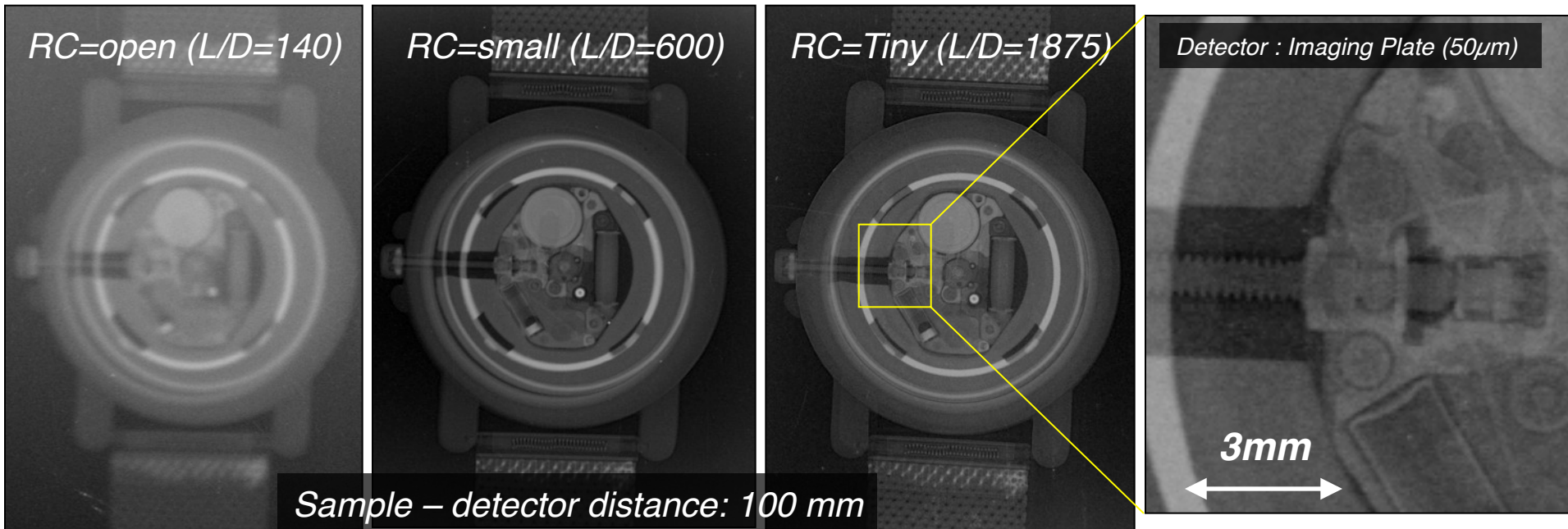
A remote-controlled filter was installed to improve n/γ fields, especially for detectors exposed by the direct beam.



Material	Thickness	Target radiation
Bi single crystal	25, 50, 75 mm	Flash gamma
Lead	25, 50, 75 mm	Flash gamma
Boric-silicic-acid glass	1 mm	Cold neutron
Acrylic resin	6 mm	Epi-thermal neutron



Benefit of fine collimation and filters



- ✧ Good energy resolution ($\Delta t/t$: 0.3%) due to the short pulsed source and the decoupled moderator
- ✧ Variable and high collimator ratio (L/D = 140, 190, 600, 1,875)
- ✧ Epi-thermal and fast neutrons, and even gamma-rays available
- ✧ High n/ γ ratio by the TOF separation
- ✧ Large field of view (100 \times 100 mm²), the largest in MLF

要求性能	E or λ resolution	E or λ range	Spatial resolution	Beam size	L/D	Comments
Bragg-edge	$\Delta\lambda/\lambda < 0.2\%$	$\lambda < 7 \text{ \AA}$ Thermal & cold neutrons	$< 1\text{mm}$	$> 100 \times 100 \text{ mm}^2$	1000	Large experimental area is necessary for various sample accessories.
Resonance absorption	$\Delta\lambda/\lambda < 1\%$	$1 < E < 1000 \text{ eV}$ Fast and Epithermal neutrons	$< 1\text{mm}$	$> 100 \times 100 \text{ mm}^2$	1000	Higher energy neutrons are preferable.
Polarization	$\Delta\lambda/\lambda < 0.2\%$	$\lambda < 9 \text{ \AA}$ Thermal & cold neutrons	$< 1\text{mm}$	$50 \times 50 \text{ mm}^2$ (cross section of polarizing devices)	> 1000	λ range depends on the magnitude of field integral
Conventional	none	-	$> 10 \mu\text{m}$	$300 \times 300 \text{ mm}^2$	Variable (L/D > 100 is at least necessary.)	Large experimental area

→ 強度重視の測定と分解能を必要とする測定の両立が必要

▪ 波長分解能を実現しつつ、大強度を確保する

→ BL22 非結合型モデレータを選択

▪ 大きなビームサイズ、高い波長分解能が欲しい・・・ 試料位置をできるだけ下流に

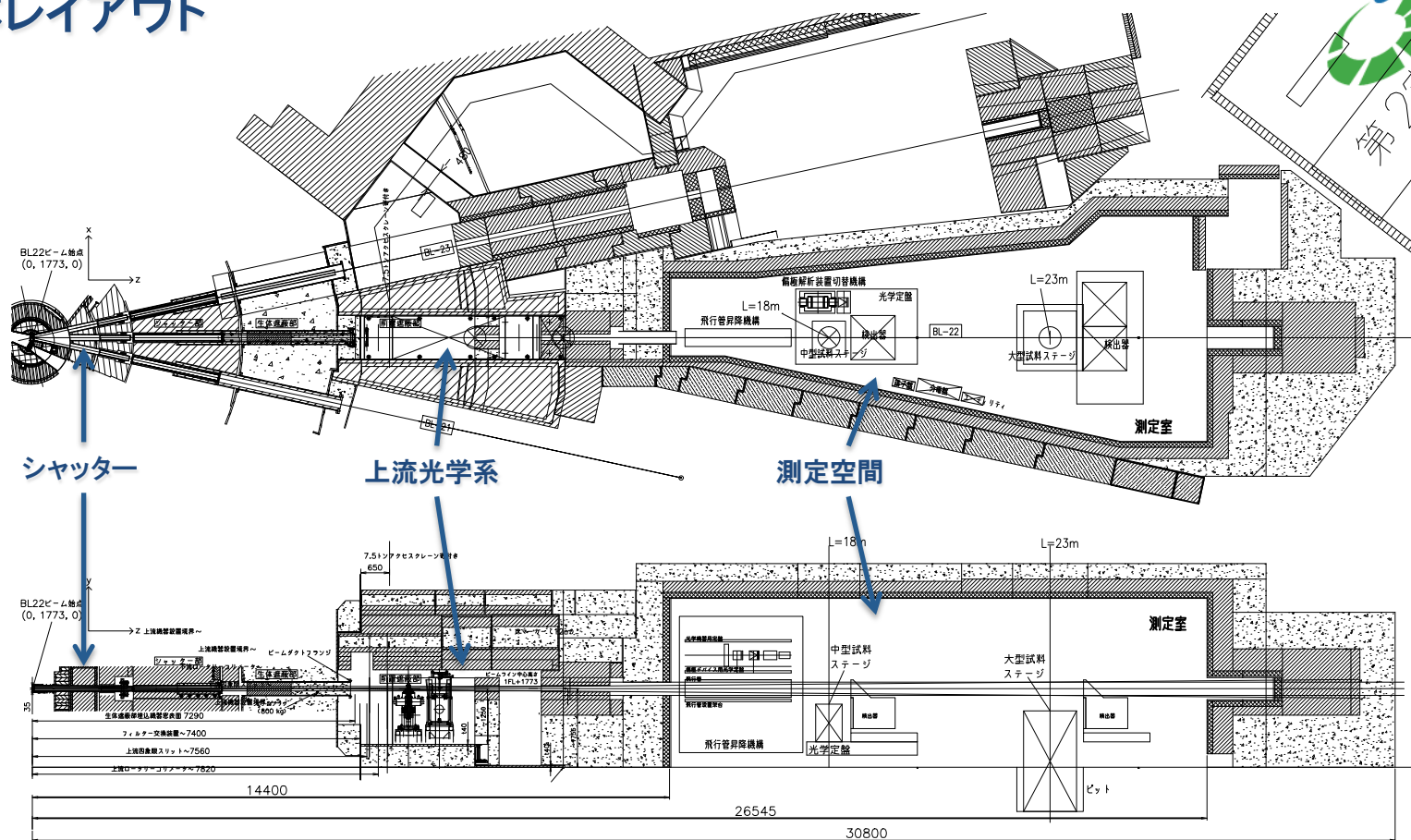
▪ 大きな中性子束、広い波長範囲を利用したい・・・ 試料位置をできるだけ上流に

→ 複数の試料位置が必要

▪ 実験条件、試料サイズに適したビームサイズと空間分解能が必要

→ 広い測定空間の確保、様々なL/Dとビームサイズを選択可能

全体レイアウト



- ・シャッター位置(L=2~4m)と前置遮蔽体内部(L=8m)にピンホールコリメータを設置
→シャッター:2種類、前置内RC:4種類 + ビーム整形用RC:4種類
- ・高速中性子除去用T0チョッパー、波長帯域規定用ダブルディスクチョッパー
- ・広い測定空間(L=14.5m~26.5m、高さ3.8m、幅4m@L=23m)
- ・L=18mとL=23mにサンプル位置。L=23mには大型ゴニオステージを設置。

基本性能(計算値)

・波長帯域

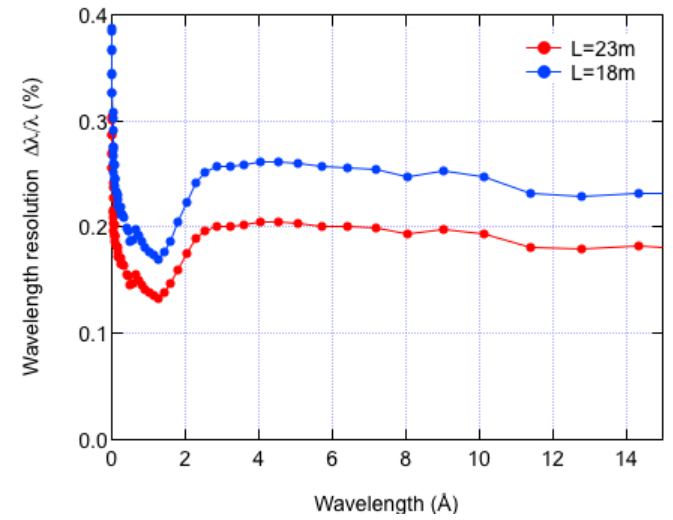
$\lambda < 8.8 \text{ \AA}$ @L=18m / $\lambda < 6.8 \text{ \AA}$ @L=23m (第1フレームのみ)

・波長分解能

$\Delta\lambda/\lambda = 0.26\%$ @L=18m / $\Delta\lambda/\lambda = 0.20\%$ @L=23m

・中性子束

$9.8 \times 10^7 \text{ n/sec/cm}^2$ @L=18m, L/D=180
 $5.8 \times 10^7 \text{ n/sec/cm}^2$ @L=23m, L/D=230



利用可能なL/Dとビームサイズ (シャッター位置と上流側RCによるコリメーションで実現される値)

	Collimator	100x100	47.8mmφ at 3m	25.2mmφ at 4.3m	15mmφ at 8m	5mmφ at 8m	2mmφ at 8m
L=18m	L/D	180	313	543	667	2000	5000
	Beam Size	100 mm	213 mm	213 mm	91 mm	113 mm	120 mm
L=23m	L/D	230	418	742	1000	3000	7500
	Beam Size	100 mm	300 mm	300 mm	144 mm	173 mm	181 mm
Relative Flux		100	30	9.6	5.3	0.59	0.09

・試料ステージ → 3種類のステージを整備

大型試料ステージ:L=23m位置に固定

駆動軸:θ、X(水平)、Y(鉛直)、Z(進行方向)

耐荷重:1.5t テーブルサイズ:1.2×1.2m²

中型試料ステージ:L=18m位置付近に設置(取外し可能)

駆動軸:θ、X(水平)、Y(鉛直)、Z(進行方向)、スイベル(2軸)

耐荷重:600kg テーブルサイズ:700mm-φ×300mm-φ

小型試料ステージ:CT用、中型・大型試料ステージ上に設置

駆動軸:θ、スイベル(2軸)

耐荷重:10kg テーブルサイズ:100mm-φ

・光学テーブル

除振機能付き光学定盤:L=18m付近に固定

耐荷重:1.5t

・恒温チェンバー

→ 2種類を整備。サイズは内寸600mmW×600mmT×900mmH程度。回転ステージ付き。

恒温・恒湿チェンバー:植物などを対象。室温付近で温度および湿度を調整可能。

特殊環境チェンバー:-30~80°Cまでの範囲で温度調整可能。希ガス置換可能。

・フライトチューブ・切替機構

試料位置までのパスにヘリウムガスの飛行管を設置し、中性子の減衰を抑制する。

最上流位置は、昇降機構で自動で切替える

→ 偏極実験用の機器や他の光学機器を設置出来るようにする

計数型2次元検出器とカメラ型検出器を複数整備し、実験目的に応じて選択可能とする

・計数型検出器

256chピクセル検出器 (Liガラス+PMT。低空間分解能・高時間分解能・イベント方式)

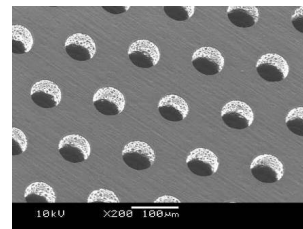
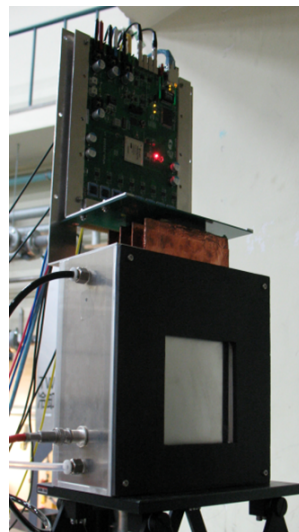
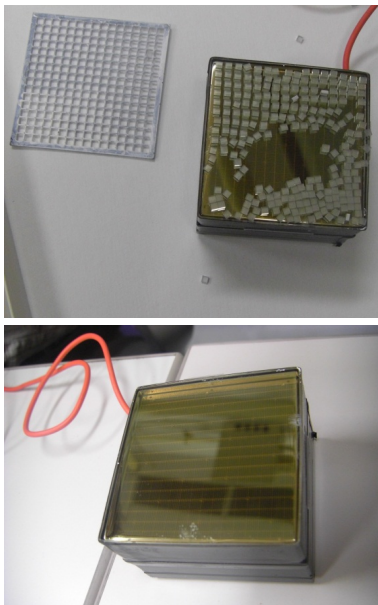
検出面サイズ: 50mm×50mm程度 空間分解能: 3mm
時間分解能: 10nsec 計数率: 12.8MHz

GEM検出器(ガス検出器。中空間分解能・高時間分解能・ヒストグラム方式)

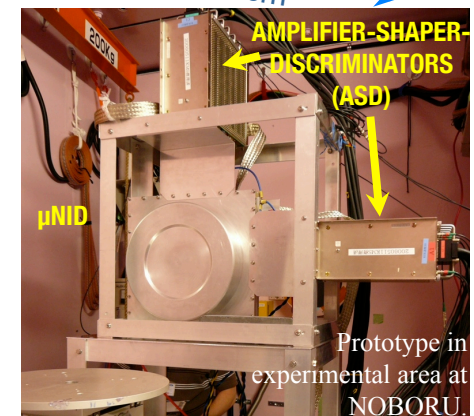
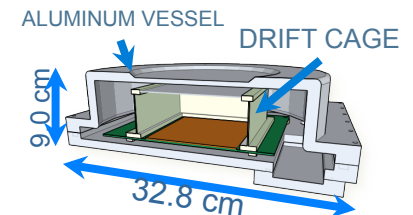
検出面サイズ: 100mm×100mm程度 空間分解能: 1mm程度
時間分解能: 10nsec 計数率: 12MHz程度

μ PIC検出器(ガス検出器。中空間分解能・高時間分解能・イベント方式)

検出面サイズ: 100mm×100mm程度 空間分解能: 0.2mm程度
時間分解能: 10nsec 計数率: 1 MHz程度



Hole diameter 70mm
Hole pitch 140mm
Thickness 50mm
Cu thickness 5mm



計数型2次元検出器とカメラ型検出器を複数整備し、実験目的に応じて選択可能とする

・カメラ型検出器

高速度カメラ(従来型) → 高速現象の撮像

高速度カメラ(信号積算型) → 新規開発機器。パルスに同期して信号を積算
画素数: 480×480pix、時間チャンネル: 84 or 168、時間分解能: 1usec以上

高精細カメラ → 時間ゲートをかけて単色での撮像、またはぜんスペクトルを用いた白色での撮像
2k×2kピクセルの冷却型CCD

・中性子-光変換

シンチレータ: 大面積用。300mm²のシンチレータを整備。
¹⁰B₂O₃タイプ(0.3mm)と⁶LiFタイプ(0.3mm、0.1mm)

中性子イメージンテンシファイア:

高空間分解能用。4インチと9インチ(短残光型)を整備。
ブランキング(高速シャッター)機能付き。

Sensors 2010, 10

1 pixel

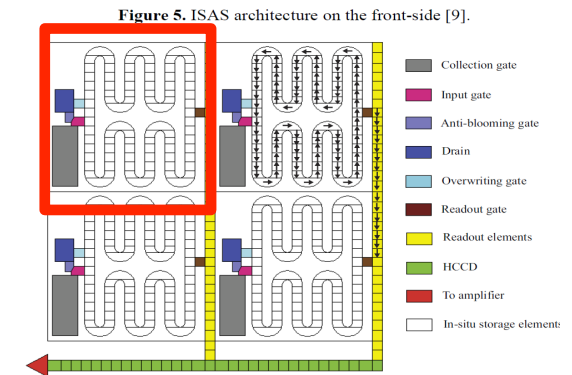


Figure 5. ISAS architecture on the front-side [9].

Figure 6. Scheme for direction change for two-phase transfer: (a) Configur electrodes and barriers; (b) Transfer scheme.

「ブラッグエッジイメージング」「共鳴吸収イメージング」「偏極中性子イメージング」を標準で実施可能

・ブラッグエッジ

23m位置を基本として、大型試料ステージに各種の試験機を設置して実験可能

波長分解能： $\Delta\lambda/\lambda=0.2\%$

空間分解能： $\Delta>10\mu\text{m}$

補助として、回折測定用の ^3He PSDを整備し、解析精度および確度を向上。

→多相試料や多成分試料の解析における初期データとして使用する。

各種試験機はBL19の機器を借りる予定。

・共鳴吸収

18m位置を基本として、中型試料ステージに試料を設置。高温炉等の利用も可能。

エネルギー分解能： $\Delta E/E<1\%$

エネルギー範囲： $E<1\text{keV}$ （検出器の時間分解能次第でより高エネルギー中性子も利用可能）

空間分解能： $\Delta>10\mu\text{m}$

補助として、 γ 線測定用のGe検出器とシンチレータ検出器を整備し、即発 γ 線分析の同時測定を可能とすることで、測定精度を向上

・偏極中性子

18m位置を基本として、偏極度解析を実施可能。ゼロ磁場環境下での3次元偏極度解析、電磁石等の磁場環境機器の利用も可能。

ビームサイズ： $50\text{mm}\times 50\text{mm}$ 以下

波長範囲： $\lambda>1.5\text{Å}$ （将来的には ^3He フィルターにより1eV程度まで拡張予定）

空間分解能： $\Delta>100\mu\text{m}$

- ・計数型検出器 膨大なデータが生成 → 1日あたりTB規模のデータ
- ・カメラ型検出器 高速度カメラの転送時間が測定時間を律速

これまでの中性子散乱装置と比較して桁違いのストレージ容量・高速データ転送が必要
(パルス中性子小角散乱装置(BL15)でも1RUNで数TBのデータ)
→ 高速1次ストレージ(SSD 5TB)と大容量2次ストレージ(とりあえず100TB)を整備。

- ・高速CT演算 飛行時間(またはエネルギー、波長)毎にCT画像を構築
- ・多ピクセルデータの並列解析
ピクセル毎にエネルギースペクトルを解析して、物理量を抽出
- ・シミュレーション 構造情報・物質情報を基に数値シミュレーションを実施

比較的大規模の計算が要求される

- GPUクラスターを利用した並列計算機を整備(12CPU+24GPU(Tesla K10))。
ストレージとデータ解析用計算機間には高速ネットワークを利用

- ・機器制御 J-PARC MLFの他の実験装置とできるだけ共通化(リソースの有効活用)
実験ホール外の増築建家から遠隔で操作。
→ 計算機は基本的にLinux。(ただし、画像処理等にはWindowsも利用)

データ表示機能は最低限のものを整備する

→ 高度な可視化処理はVCAD等の既存のソフトを活用する

エネルギー分析型イメージングのデータ解析

・ブラッグエッジ: 北大で開発されたRITSコードを実用化する。

高速化、デバッグ、GUIの整備。

ブラッグエッジCTについても将来的には導入をする予定。(現在開発中)

・共鳴吸収: 共鳴ピークのサーチ機能と核種の候補選定の自動化。 γ 線データの同時利用。

対象核種の濃度、温度解析機能の整備。

定量化に向けた解析方法の開発は現在進行中。

・偏極中性子: 偏極度の波長依存性の自動フィッティングにより、磁場強度・方向を解析。

定量化に向けた解析方法の開発、偏極中性子CT法の開発は現在進行中。

オンラインモニタ・可視化

→ 測定データと解析データの比較、スペクトルの表示等

CT再構成ソフト

FBP法とSART法を用いてCPUマシンおよびGPUクラスターでCT計算ができるようにする

今年度よりJ-PARCにパルス中性子イメージング専用ビームライン「物質情報3次元可視化装置」の建設を開始

**「本格的なエネルギー分析型中性子イメージング装置」
「高性能中性子ラジオグラフィ装置」の実現を目指す**

遮蔽体などの主要部分の建設は来年度の夏期停止期間に行う。

→ H26年度より順次コミッショニングを開始し、H26年度後半には限定的に共用も開始する