

J-PARCパルス中性子イメージング装置の建設と デバイス開発

日本原子力研究開発機構 J-PARCセンター 篠原武尚



「物質情報3次元可視化装置」の建設

世界で最初のパルス中性子イメージング専用ビームライン



コンセプト

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

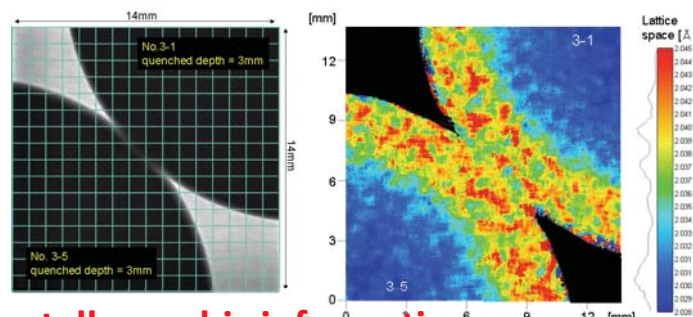
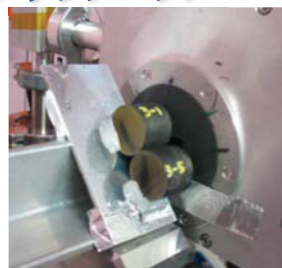
これまでのスケジュール

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
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
	第2回パルス中性子イメージング研究会開催
2013年度より	機器の詳細設計・建設を開始

パルス中性子イメージング

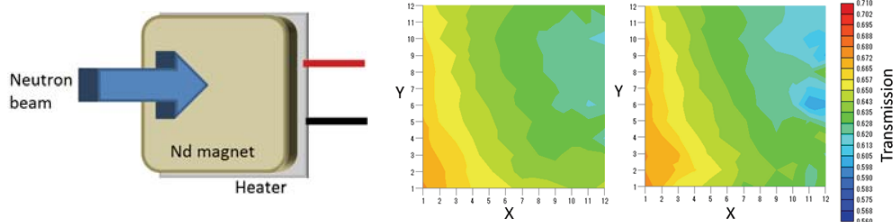
- ✓ エネルギー分析型中性子イメージング

ブラッグエッジ



Crystallographic information

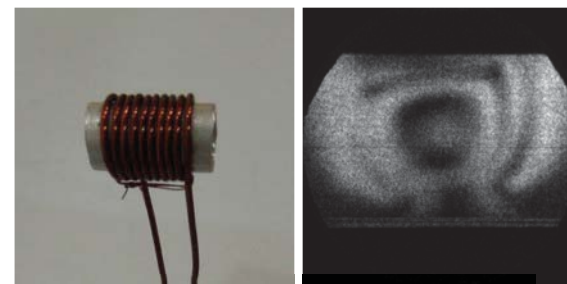
共鳴吸収



Nd-Fe-B magnet with temperature distribution (Nd-146 4.36eV)

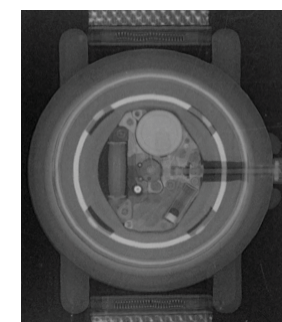
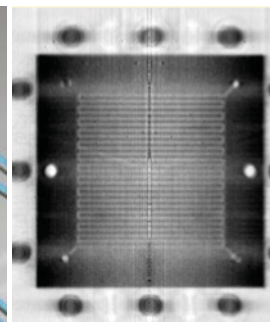
Elemental, thermal information

偏極



Magnetic field information

- ✓ 通常の中性子ラジオグラフィ・トモグラフィ



対象となる分野



- Crystallographic structure
- Magnetic field
- Element
- Temperature
- Radiography

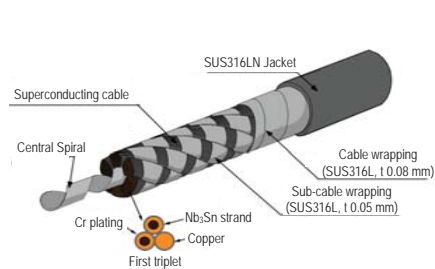
Material science

- Steel samples ● ●
- Superconductors ● ●
- Magnetic materials ● ●
- Hydrogen storage materials ●
- Material synthesis ● ● ● ○



Industrial application

- Electric motors ● ● ● ○
- Fuel cells ● ● ● ○
- Batteries ● ● ● ○
- Electric devices ● ● ● ○
- Concretes ● ● ● ○
- Aerospace equipment ● ● ● ○



Cultural heritage

- Paintings, Pictures ● ○
- Old objects ● ● ○



装置概要



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

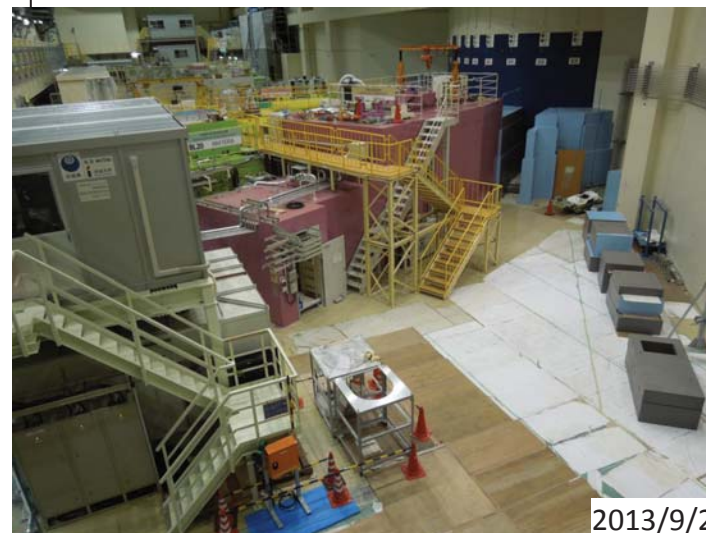
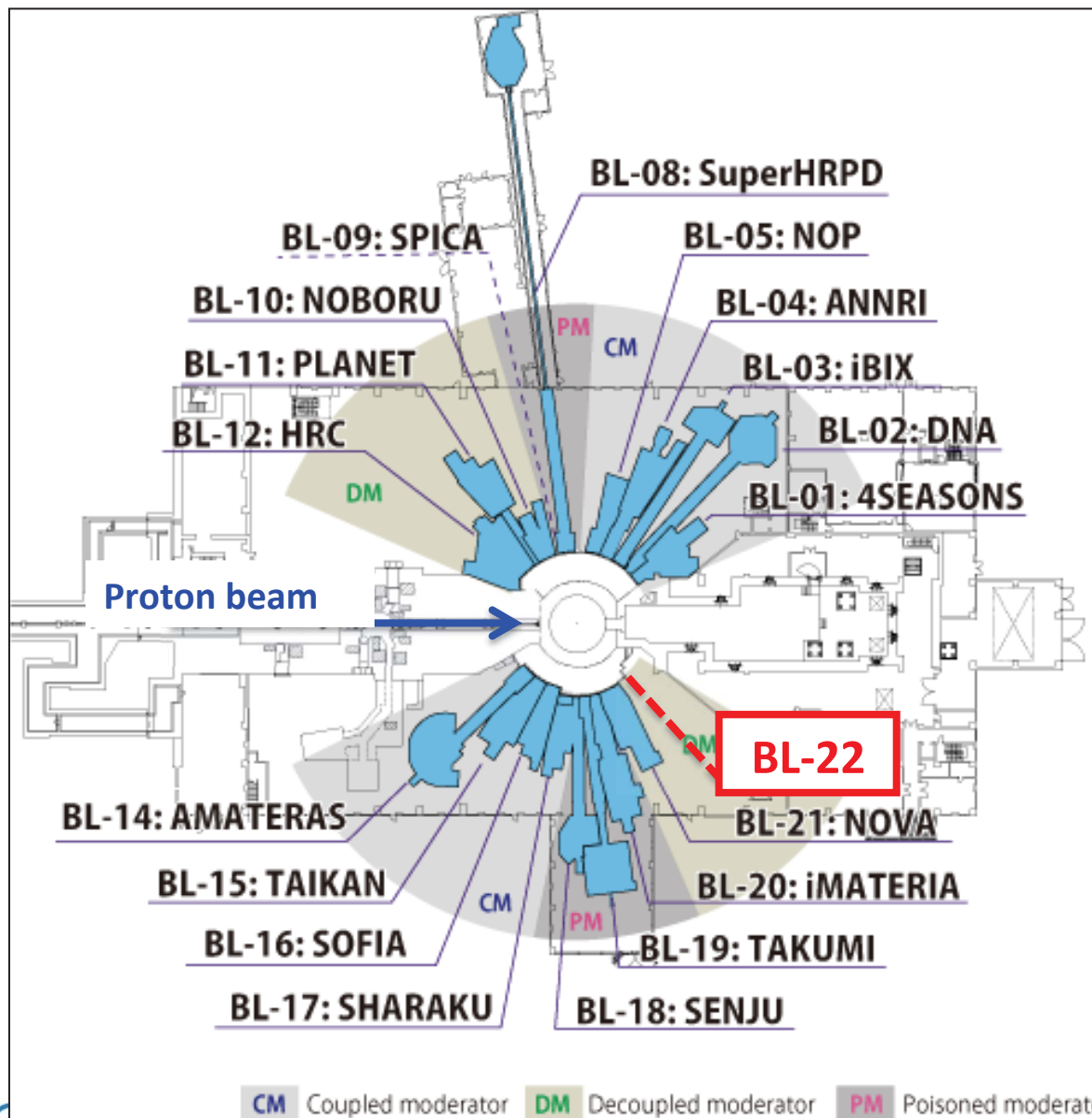
→ 複数の試料位置が必要

・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

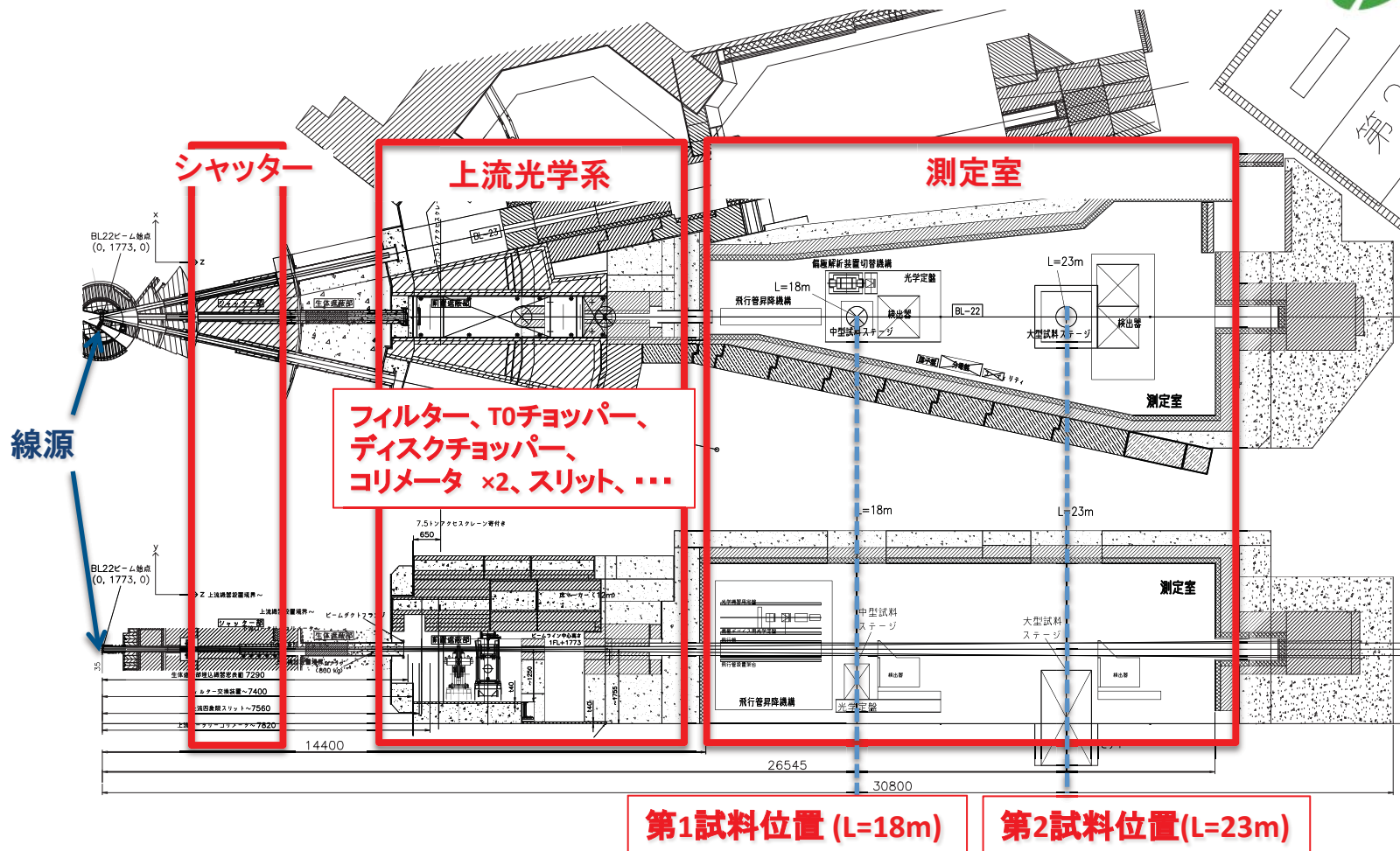
→ 広い測定空間の確保、適切なコリメータを選択可能



MLF実験ホール



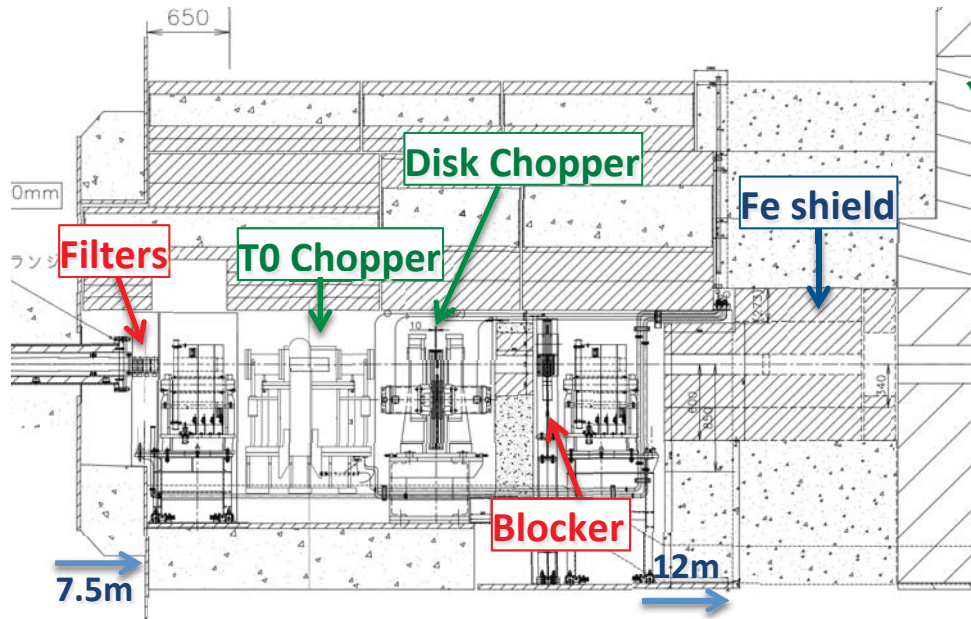
ビームライン構成



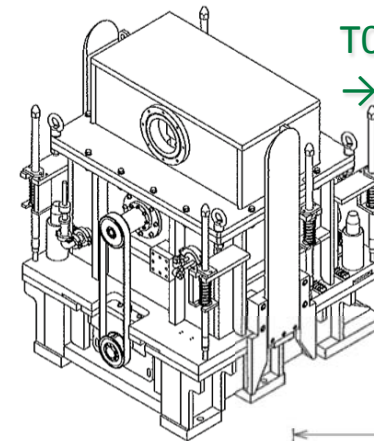
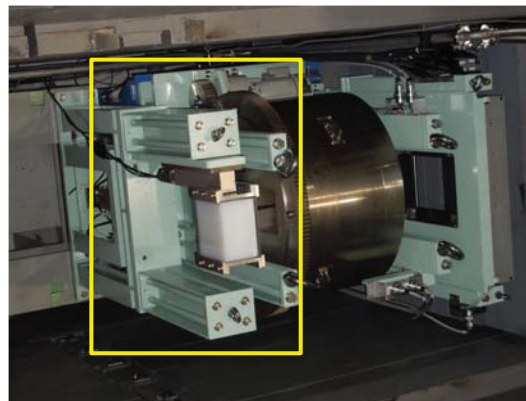
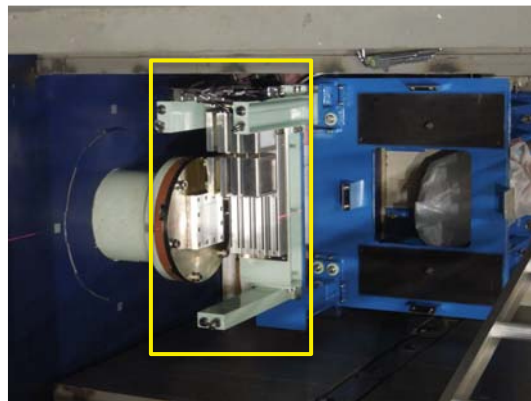
L=18m: 波長範囲: $\lambda < 8.8 \text{ \AA}$ 、波長分解能: $\Delta\lambda/\lambda = 0.26\%$
 中性子強度: $9.8 \times 10^7 \text{ n/sec/cm}^2$ (L/D=180)

L=23m: 波長範囲: $\lambda < 6.9 \text{ \AA}$ 、波長分解能: $\Delta\lambda/\lambda = 0.20\%$
 中性子強度: $5.8 \times 10^7 \text{ n/sec/cm}^2$ (L/D=230)

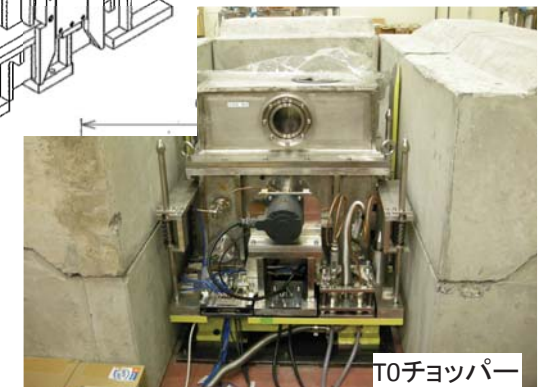
上流光学系 エネルギー選別機器(チョッパー・フィルター)



✓チョッパー機器
 低速ダブルディスクチョッパー (25/12.5Hz)
 →波長範囲を規定



T0 チョッパー
 →高速中性子を除去
 25/50Hz



✓フィルター

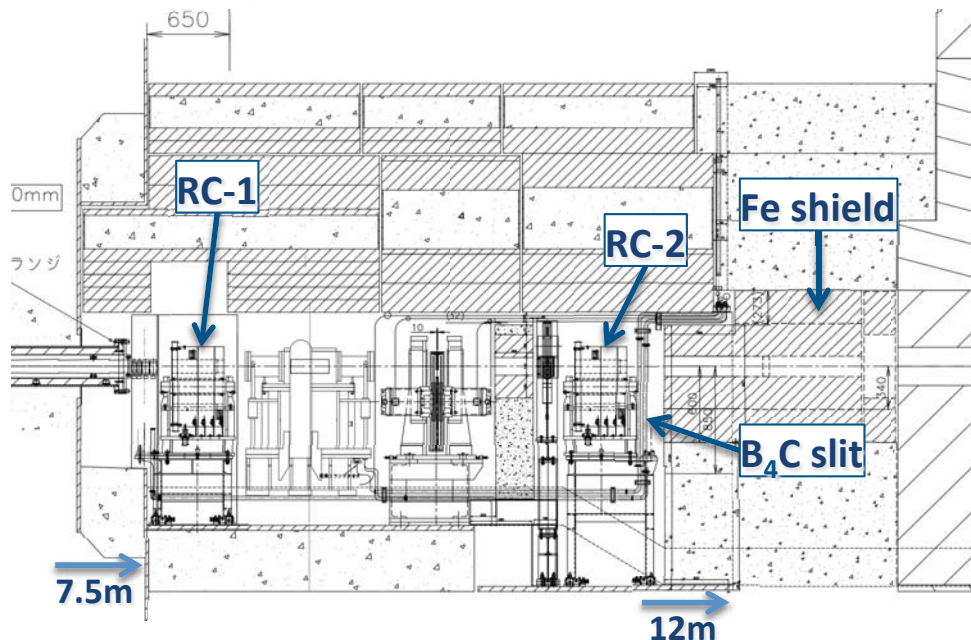
Pb: ガンマ線除去
 Cd: 低エネルギー中性子除去
 ポリエチレン: 中性子強度減衰

✓中性子ブロッカー

(高速シャッター)
 不要なビーム照射による放射化を防ぐ



上流光学系 ビーム整形機器(コリメータ・スリット)



- ✓シャッター内コリメータ (L=3m, 4.3m)
250~300mm角の大面積ビーム
- ✓ロータリーコリメータ-1 (L=8m)
4種類の大きさのピンホールを選択可能
- ✓ロータリーコリメータ-2 (L=8m)、B₄Cスリット
入射ビームサイズの調整

試料-検出器間距離が100mmとすると・・・
 $100/(L/D値) = 空間分解能(mm)$

選択可能なL/D値とビームサイズ

Shutter section

Rotary Collimator

	Collimator	100x100	50.1mmφ at 3.1m	26.4mmφ at 4.3m	15mmφ at 8m	5mmφ at 8m	2mmφ at 8m
L=18m	L/D	180	298	520	667	2000	5000
	Beam Size	100 mm	173 mm	221 mm	91 mm	113 mm	120 mm
L=23m	L/D	230	398	720	1000	3000	7500
	Beam Size	100 mm	250 mm	300 mm	144 mm	173 mm	181 mm
Relative Flux		100	30	9.6	5.3	0.59	0.09



試料周辺機器



・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

駆動軸:θ(±173°)、X、Y、Z(±300mm)

耐荷重:約1.0t テーブルサイズ:700mm-φ/1.2×1.2m²

大型の試料、試験機等の大型試料環境機器用

中型試料ステージ:L=18m位置付近に設置

駆動軸:θ、X、Y、Z、スイベル(2軸)

耐荷重:600kg テーブルサイズ:700mm-φ/300mm-φ

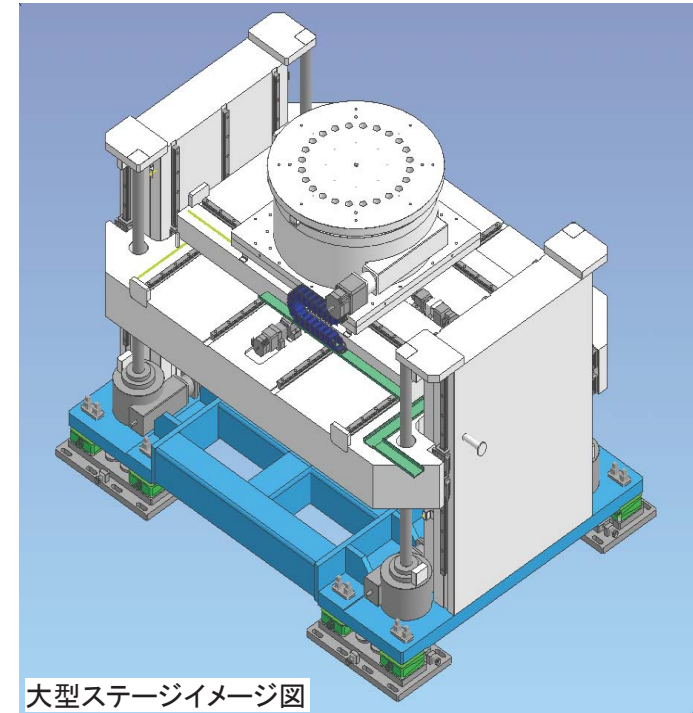
一般の試料、電磁石などの試料環境機器用

小型試料ステージ:中型・大型試料ステージ上に設置

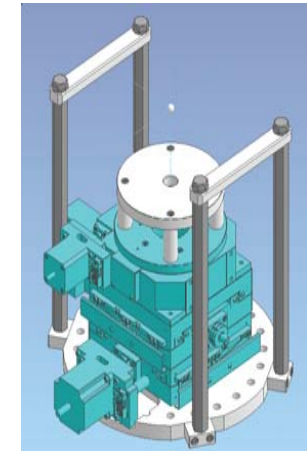
駆動軸:θ、スイベル(2軸)

耐荷重:10kg テーブルサイズ:100mm-φ

CT実験、小型試料用



大型ステージイメージ図

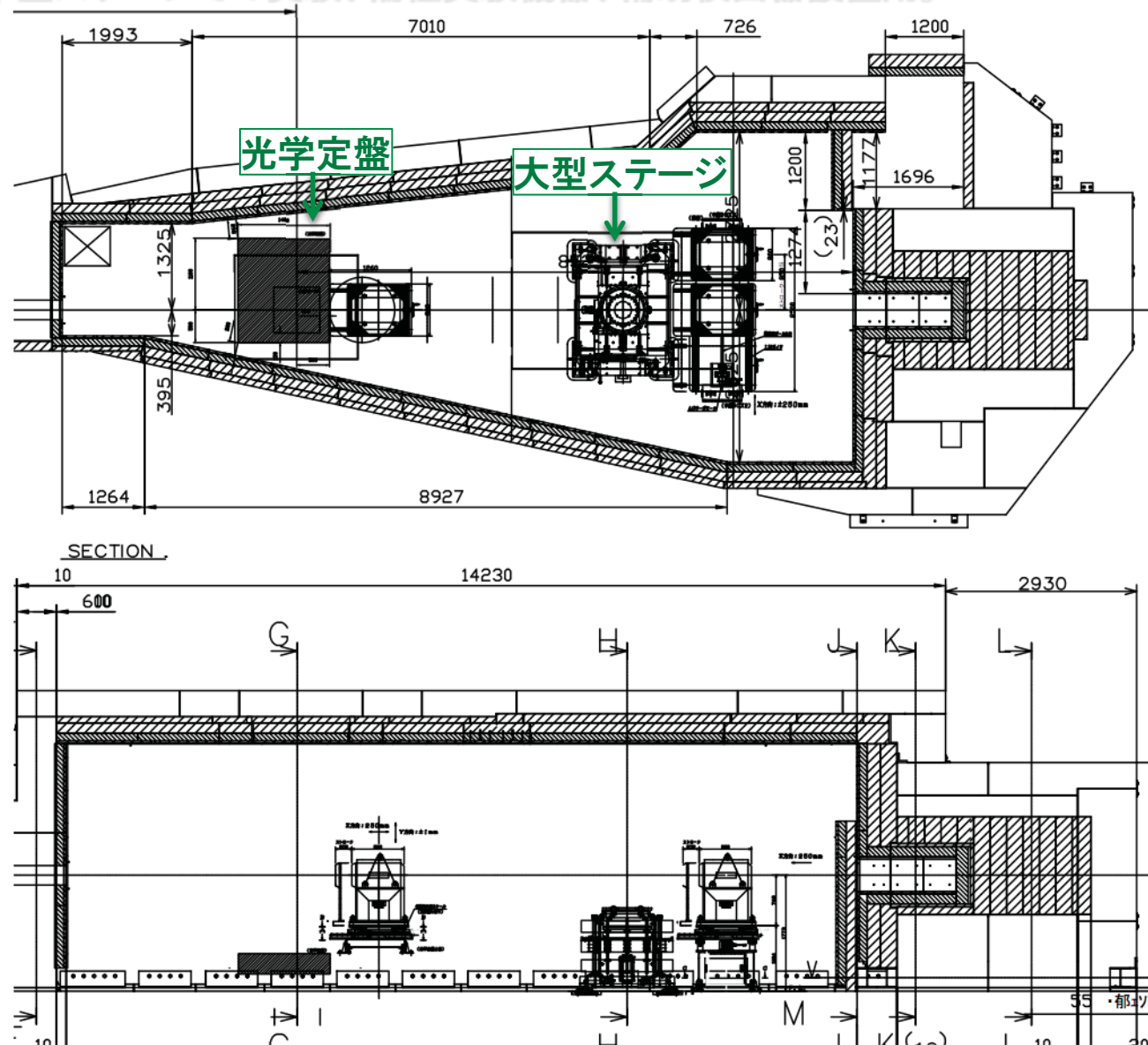


小型ステージイメージ図

試料周辺機器

・光学定盤 (L=17~19m)

L=18m付近に設置。中型ステージでの実験、偏極実験機器、補助検出器設置用。

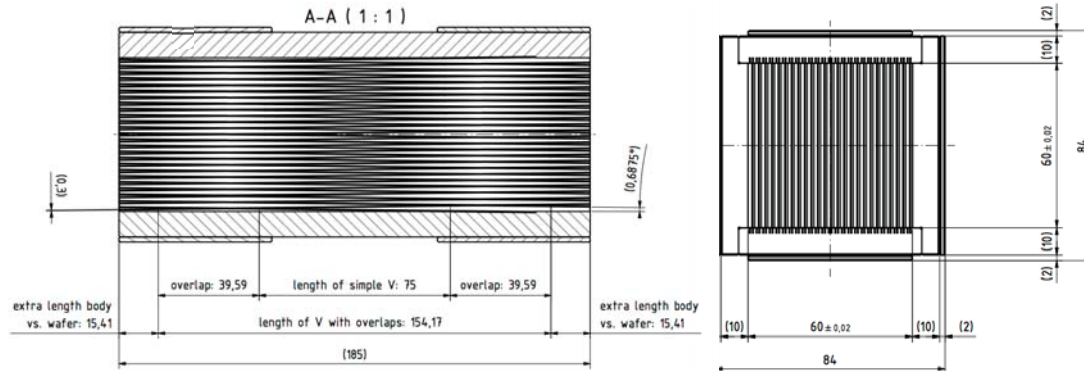


偏極実験用機器

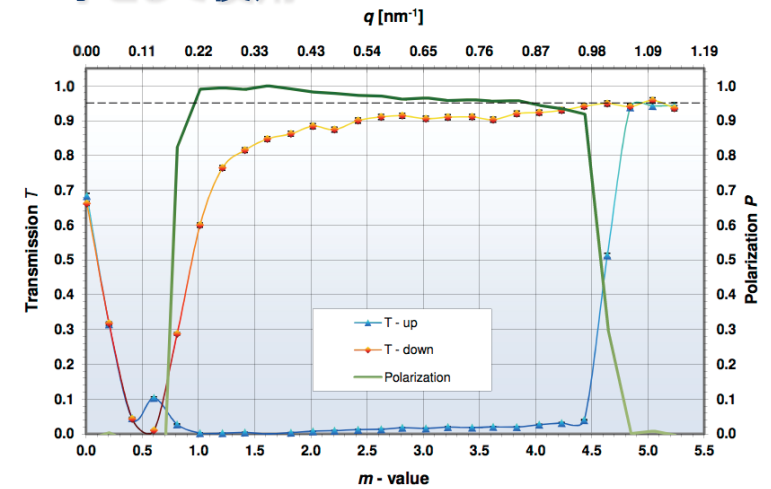
・偏極・検極素子

Fe/Siスーパーミラー (m=4.5)

断面: 60mmW×60mmH、長さ180mm

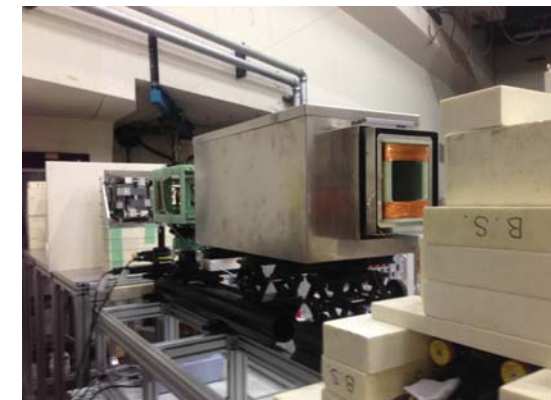
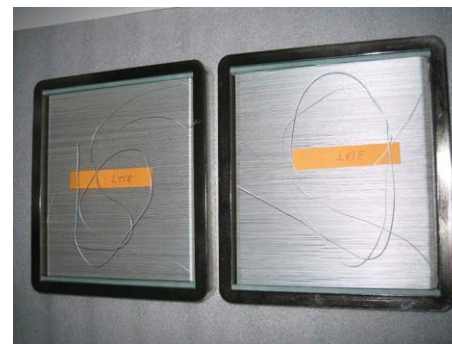


- ・V字型のミラー配置
- ・キャビティ2台を直交配置して偏極素子として使用



・偏極度解析用機器

スピン回転子、磁気シールド



検出器



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

・計数型検出器 ... 高時間分解能(10nsec)、中程度の空間分解能(> 100 μ m)

ピクセル検出器 Liガラスシンチレータ+マルチアノードPMT

検出面サイズ: 50mm \times 50mm, 256ピクセル 空間分解能: 約3mm

時間分解能: 10nsec

計数率: \sim 12MHz

GEM検出器 10 Bコート GEMシート

検出面サイズ: 100mm \times 100mm (128 x 128ピクセル) 空間分解能: 0.8mm

時間分解能: 10nsec

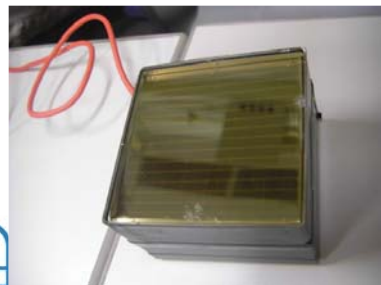
計数率: \sim 12MHz

μ PIC検出器 3 Heガス

検出面サイズ: 100mm \times 100mm 空間分解能: 約0.2mm

時間分解能: 10nsec

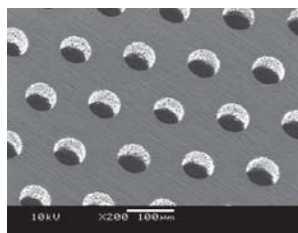
計数率: \sim 1MHz



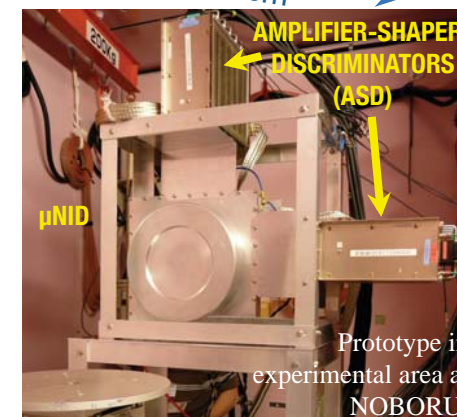
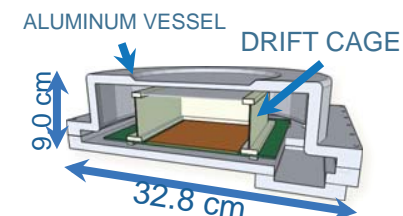
Pixel detector



GEM



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



μ PIC

検出器

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

・カメラ型検出器 ... 高空間分解能(> 10 μ m)、低時間分解能(> 1 μ sec)
中性子-光変換 + 光学レンズ + CCD/CMOSカメラから構成

・中性子-光変換:

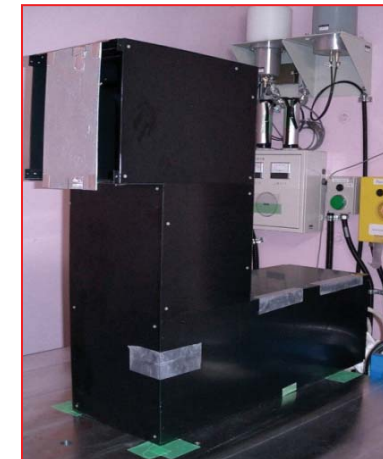
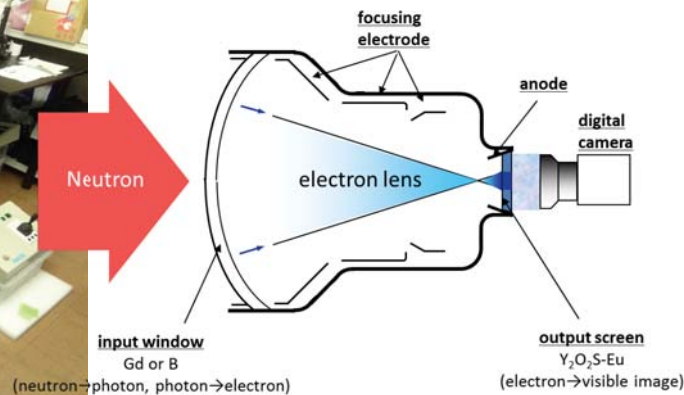
中性子イメージインテンシファイア

最大視野: 4インチ、9インチ(高空間分解能測定用)

シンチレータ

最大視野: 300 \times 300mm(大面積ビーム実験用)

$^{10}\text{B}_2\text{O}_3 + \text{ZnS}$ (0.3mm)と $^6\text{LiF} + \text{ZnS}$ (0.3mm、0.1mm)を準備



検出器

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

・カメラ型検出器 ... 高空間分解能($> 10\mu\text{m}$)、低時間分解能($> 1\mu\text{sec}$)
中性子-光変換 + 光学レンズ + CCD/CMOSカメラから構成

・CCDカメラ

高速度カメラ(信号積算型) ... CCDとCMOSのハイブリッド型センサー

(受光部、電荷積算部をCCD素子、読み取り部をCMOS素子で構成し、信号積算と低読出しノイズを実現)

→ ループ状にCCDメモリを配置することで、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 → 通常のラジオグラフィ用 (単色/白色での撮像)
画素数2k×2kピクセルの冷却型CCD

Sensors 2010, 10

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

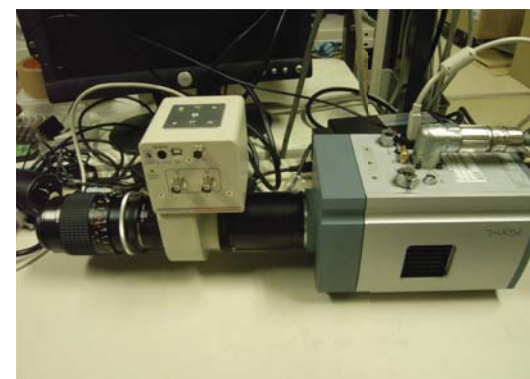
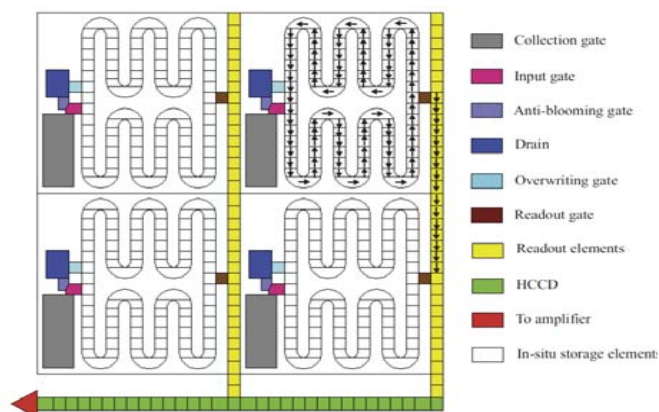


Figure 6. Scheme for direction change for two-phase transfer: (a) Configur electrodes and barriers; (b) Transfer scheme.

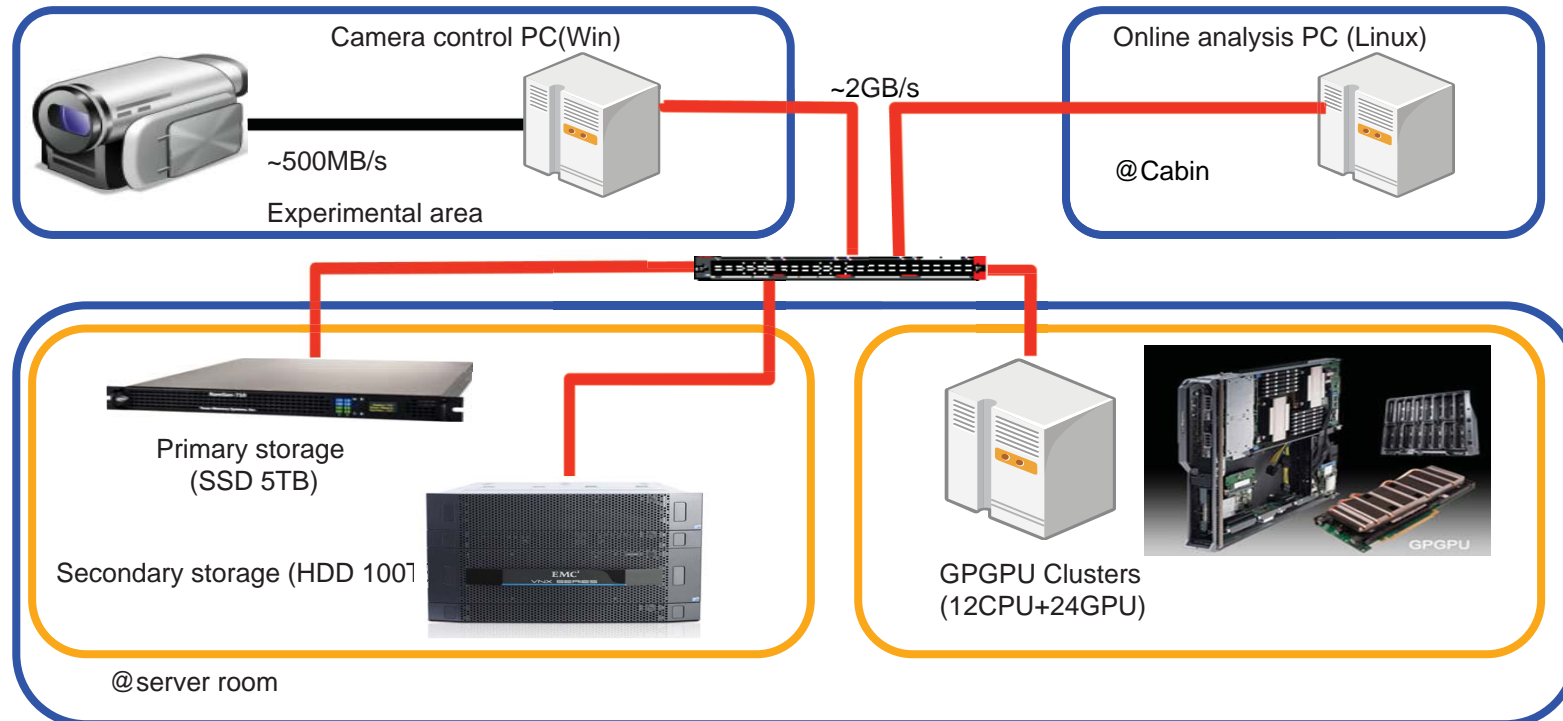
計算機環境

大容量高速転送ストレージ

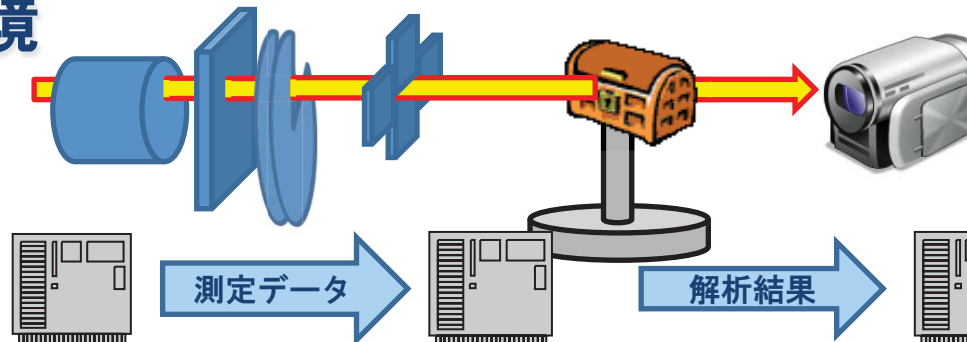
- ・データ生成量: **最大1TB/day**
- ・転送速度による測定時間の制限: **最大~50%**
- 高速主ストレージ (SSD 5TB) + 大容量副ストレージ (HDD 100 TB)
- 高速ネットワーク (10GbE, Fibre Channels)

GPGPU並列計算機システム

- ・**高速CT再構成**
- ・**エネルギー依存透過率分布データの解析**
- ・FEMやモンテカルロ法による数値計算



ソフトウェア環境



制御ソフトウェア
ビーム制御機器、
検出器の集中制御

データ処理ソフトウェア
測定データを解析し、
物理量の分布を評価

CT再構成ソフトウェア
透過画像群から3次元
構造を構成

□測定に必要な機器、検出器の集中制御

2次元中性子検出器(計数型、カメラ型)、補助検出器(n , γ)
シャッター、ロータリーコリメータ、スリット、ブロッカー、
チョッパー、偏極デバイス、試料ステージ、試料環境装置

□Experiment Scheduler (IROHA標準機能) による自動測定

□遠隔監視・警報機能 (将来)

測定データを解析し、物理量を評価

□ ブラッグエッジイメージング

- 試料の**結晶情報**の2次元分布を評価
- 結晶組織構造解析コード**RITS***を高速・GUI化

□ 共鳴イメージング

- **元素、温度**の2次元分布を評価
- 簡易型捕獲 γ 線分析(PGA)による核種分析との連携

□ 磁場イメージング

- 偏極中性子実験の解析により**磁場**の2次元分布を評価

試料を回転して得た透過画像群から3次元構造を構成

□ 2種のアルゴリズムを利用

FBP (フィルタ逆投影法): 一般的手法、高速演算可能 / SART: (連立代数的再構成法): 投影数が不十分でも計算可能

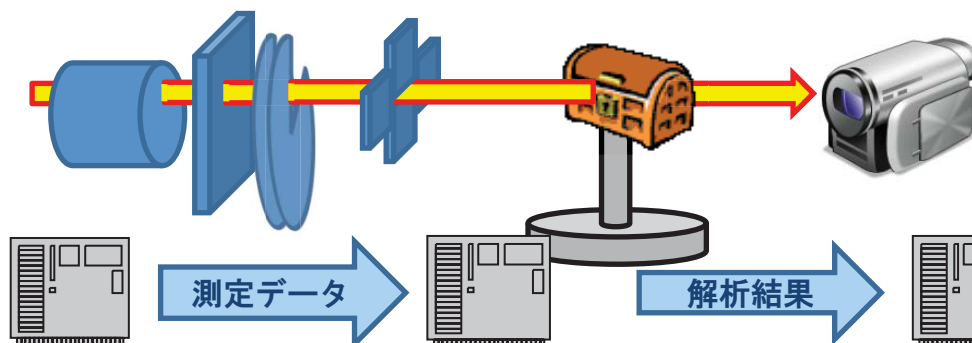
□ GPU並列計算機による高速演算 & PCでの計算

□ 3次元データ表示: 既存ソフトウェアを使用可能に

VCAD (理研) / VG Studio (事実上の業界標準、多くの中性子CT施設で使用) / AVS/Express (JAEA計算機センターが利用支援)

□ J-PARC以外の施設での導入も目指す

ソフトウェア環境



制御ソフトウェア
ビーム制御機器、
検出器の集中制御

データ処理ソフトウェア
測定データを解析し、
物理量の分布を評価

CT再構成ソフトウェア
透過画像群から3次元
構造を構成

測定に必要な機器、検出器の集中制御

2次元中性子検出器(計数型、カメラ型)、補助検出器(n , γ)
シャッター、ロータリーコリメータ、スリット、ブロッカー、
チョッパー、偏極デバイス、試料ステージ、試料環境装置

Experiment Scheduler (IROHA標準機能) による自動測定

遠隔監視・警報機能 (将来)

測定データを解析し、物理量を評価

ブラッグエッジイメージング

- 試料の**結晶情報**の2次元分布を評価
- 結晶組織構造解析コード**RITS***を高速・GUI化

共鳴イメージング

- **元素、温度**の2次元分布を評価
- 簡易型捕獲 γ 線分析(PGA)による核種分析との連携

磁場イメージング

- 偏極中性子実験の解析により**磁場**の2次元分布を評価

試料を回転して得た透過画像群から3次元構造を構成

2種のアルゴリズムを利用

FBP (フィルタ逆投影法): 一般的手法、高速演算可能 / SART: (連立代数的再構成法): 投影数が不十分でも計算可能

GPU並列計算機による高速演算 & PCでの計算

3次元データ表示: 既存ソフトウェアを使用可能に

VCAD (理研) / VG Studio (事実上の業界標準、多くの中性子CT施設で使用) / AVS/Express (JAEA計算機センターが利用支援)

J-PARC以外の施設での導入も目指す

建設スケジュール



→ **ビームコミッショニング**

J-PARC MLFのBL22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」を建設中

本格的なエネルギー分析型中性子イメージング実験

ブラッグエッジ・共鳴・偏極

大面積・高空間分解能のラジオグラフィ・トモグラフィ実験

300mm×300mm、L/D<7500

様々な試料環境機器の利用

高速CT演算・データ解析用計算環境の整備

- 2013年度内に遮蔽体・上流光学機器・大型ステージの設置が完了
- 2014年度後期にビーム受入れ、コミッショニング開始
- 2015年度には本格的な一般課題の受入れを予定

装置建設メンバー



全体統括	鬼柳善明 (名大)
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)
画像処理	横田秀夫 (理研)
	世良俊博 (九大)
	広田克也 (名大)
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)
IACメンバー	山形豊 (理研)
	大沼正人 (北大)
	江藤剛治 (立命館大)
	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)	

