



RIKENセミナー
中性子シリーズ 第3回
(2012・2・27)

小型加速器施設におけるパルス中性子利用の実際 ～北大の中性子発生・輸送・利用研究

北海道大学 加美山隆

内容

1. 北大工学部の加速器施設の紹介
2. パルス中性子源向け冷減速材の開発
3. 中性子利用デバイスの開発
4. 小型集束型中性子小角散乱装置の開発
5. 中性子透過分光法の開発
6. 中性子共鳴吸収分光法の開発
7. おわりに



北大工学部の加速器施設

加速器: 45MeV電子線形加速器
工学部の施設(共同利用施設ではない)

瞬間強力パルス状放射線発生装置研究室

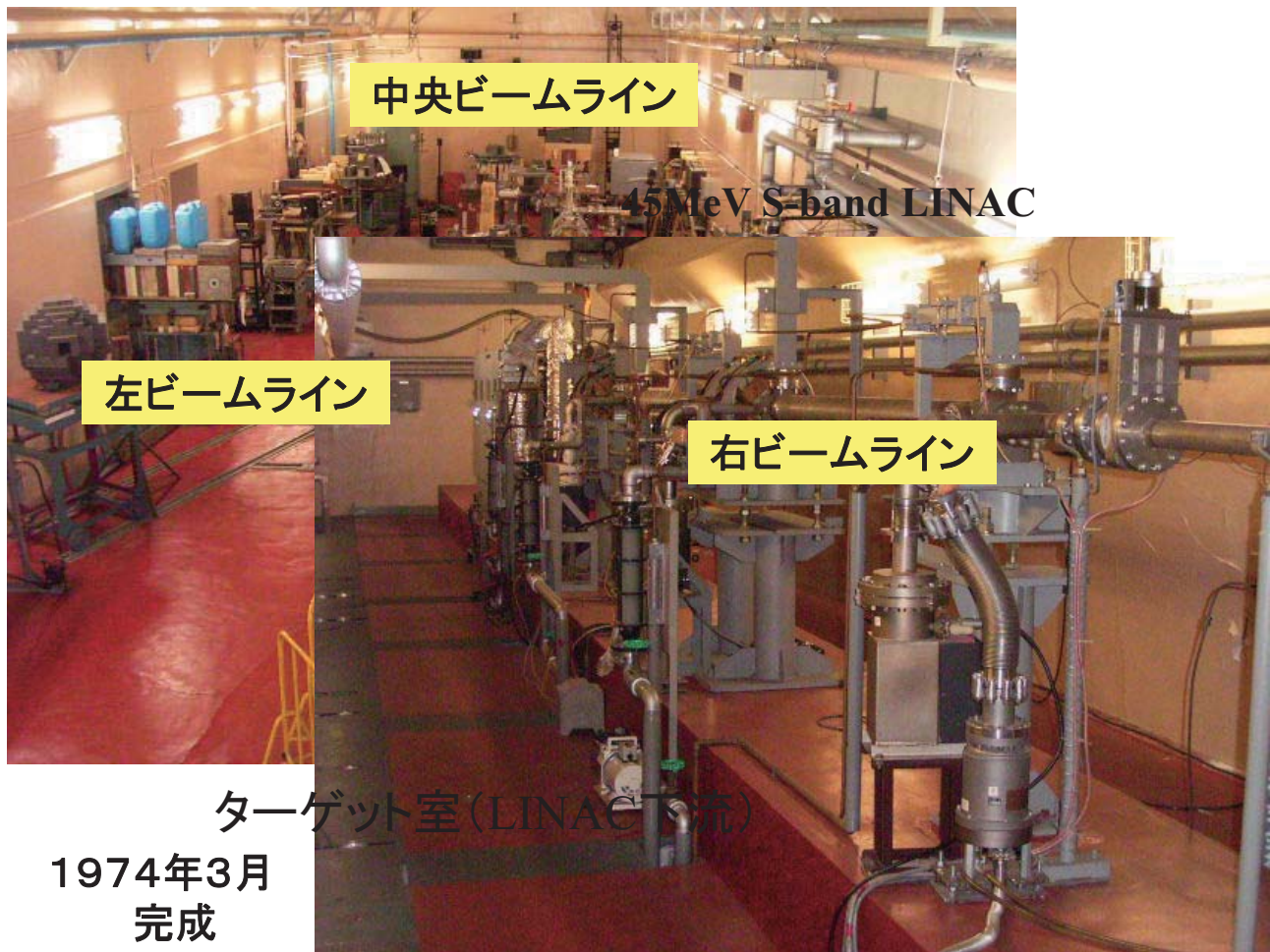
スタッフ: 施設長(兼任) 古坂道弘
准教授 木野幸一
技術職員 佐藤孝一(加速器運転)
北市雅敏(放射線管理)

**中性子研究グループ
(2研究室)**
教授×2、准教授×1、
PD×1、学生数名

**パルスラジオリシスグループ
(1研究室)**
教授×1、助教×1、
学生数名

**ビーム計測グループ
(1研究室)**
准教授×1、助教×1、
学生数名

外部の利用者(共同研究)

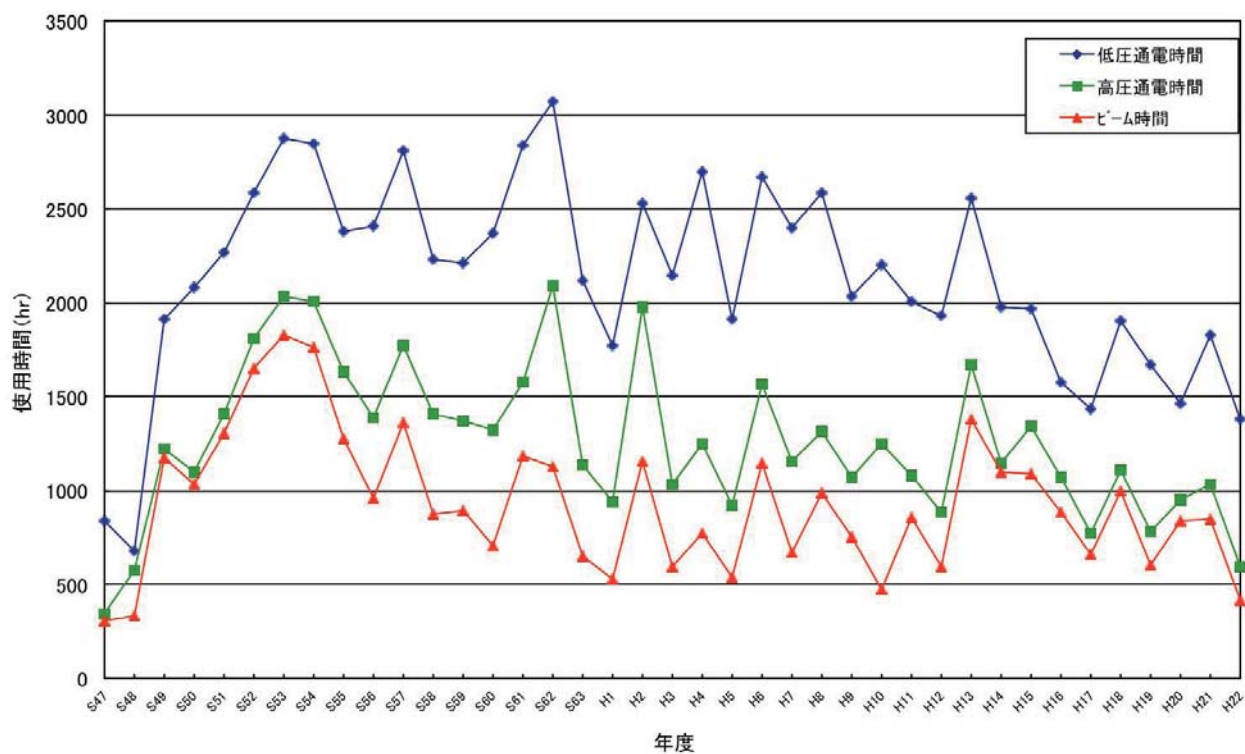


45MeV LINACの仕様

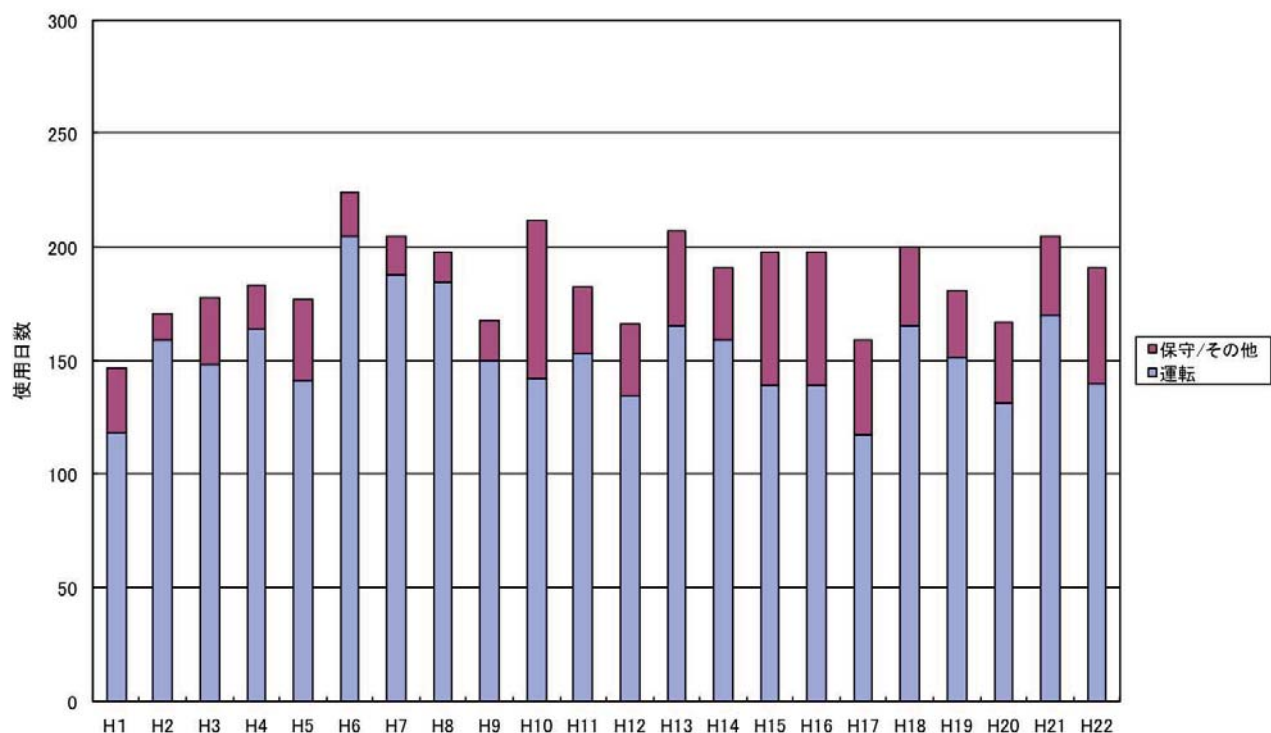
1973年度完成

項目	仕様	結果
電子線エネルギー	尖頭電流 1mA のとき	尖頭電流 1mA のとき
	45 MeV 以上	46 MeV
	尖頭電流 100 mA のとき	現在 最大33MeVで運転
	30 MeV 以上	
電子線電流	加速管出口で尖頭電流	CENTER出口で
	100 mA 以上	230 mA
	最大平均電流	33MeV、3 μ s、50pps 運転で、5 μ A
	60 μ A 以上	
電子線パルス	0.01 ~ 3 μ s	0.01 ~ 3 μ s
	10 ~ 200 PPS	10 ~ 200 PPS
	単パルス	現在 最大50ppsで運転
ビーム直径	加速管出口で	CENTER出口で
	15 mm ϕ 以下	12 mm ϕ

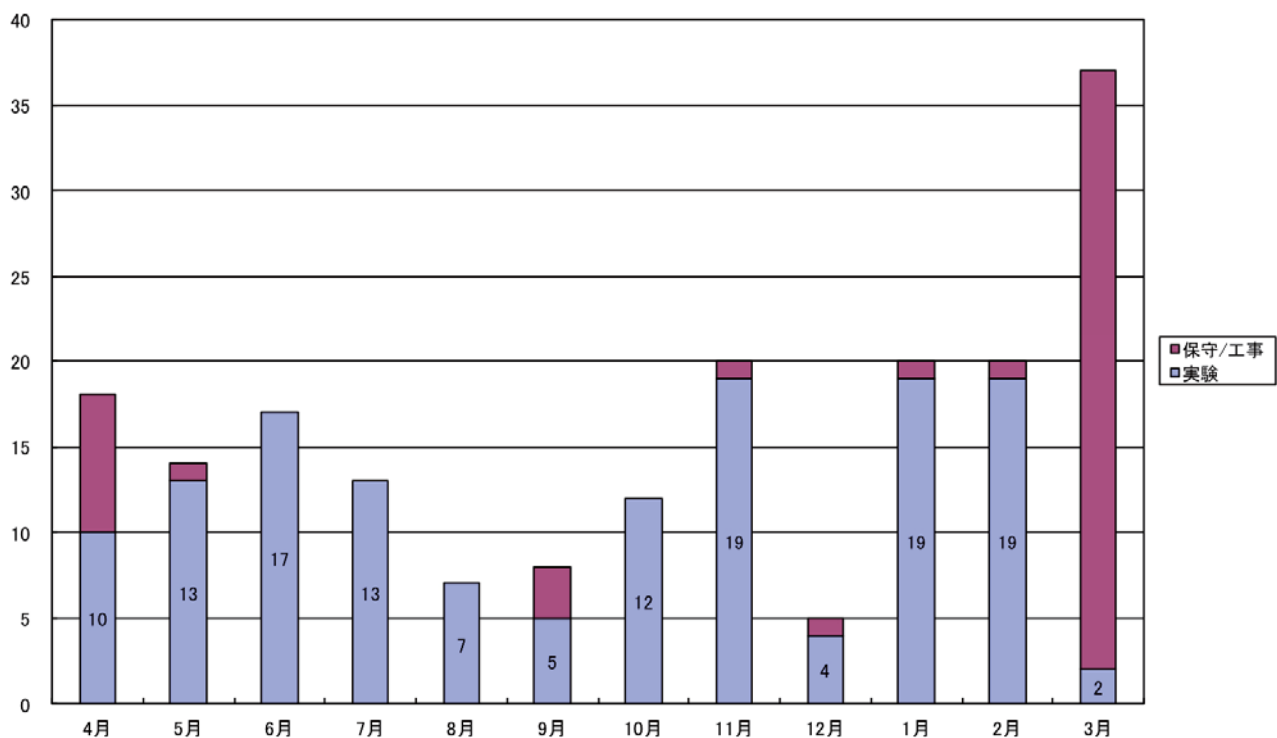
年度別運転時間(昭和47年～平成22年度)



年度別 稼働日数



平成22年度 月別 稼働日数



現在の状況

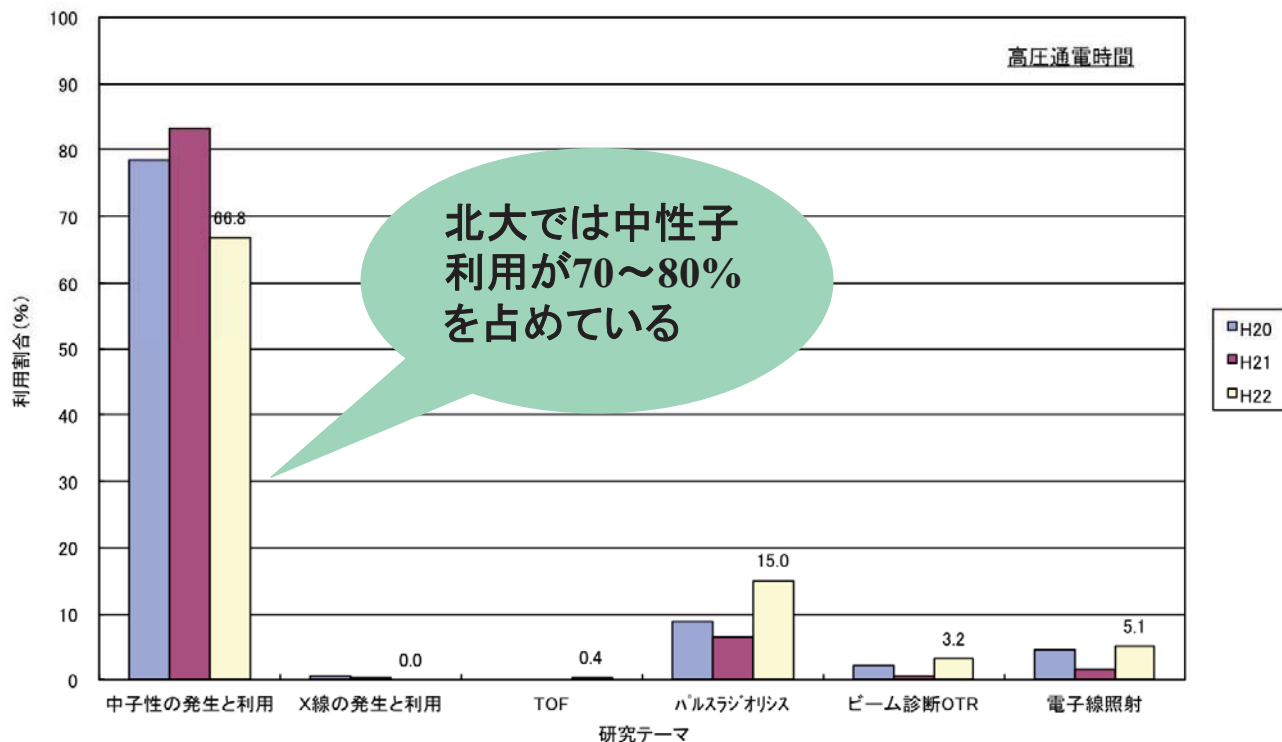
• 運転状況

概ね順調に稼働中(H23年度は高圧電源修理で3カ月停止)
老朽化のため故障の確率が高い
高額部品保護のため、繰り返しを最大200ppsから
50ppsに落としている

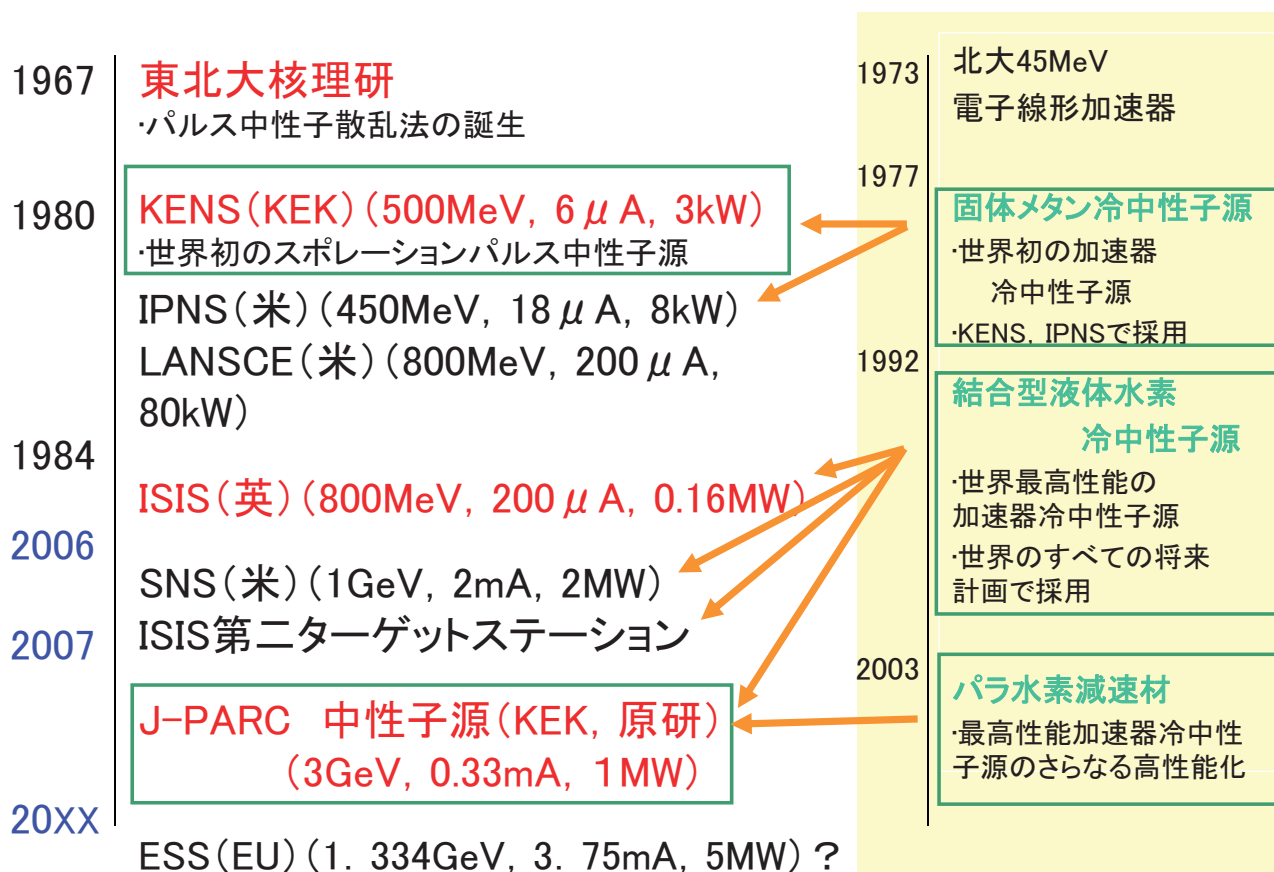
• 維持費の状況

平成12年度で特殊装置維持費の打ち切り
利用者からの維持費協力金で運営

最近の3年間の主な研究テーマ



加速器パルス中性子源の進歩と北大加速器



2. パルス中性子源向け 冷減速材の開発

北大加速器を用いた高 性能中性子源の開発

- ◎北大は加速器冷中性子源の
発祥の地
 - ◎加速器中性子源研究の
世界の中心
- 大型ハドロン時代から開発研究

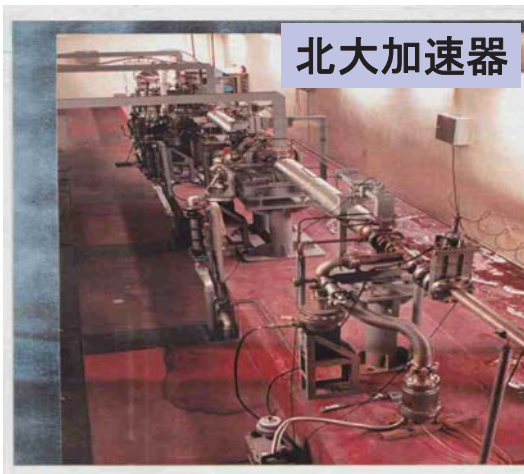
大型加速器施設 J-PARC(多目的施設)



原研:
シミュレーション

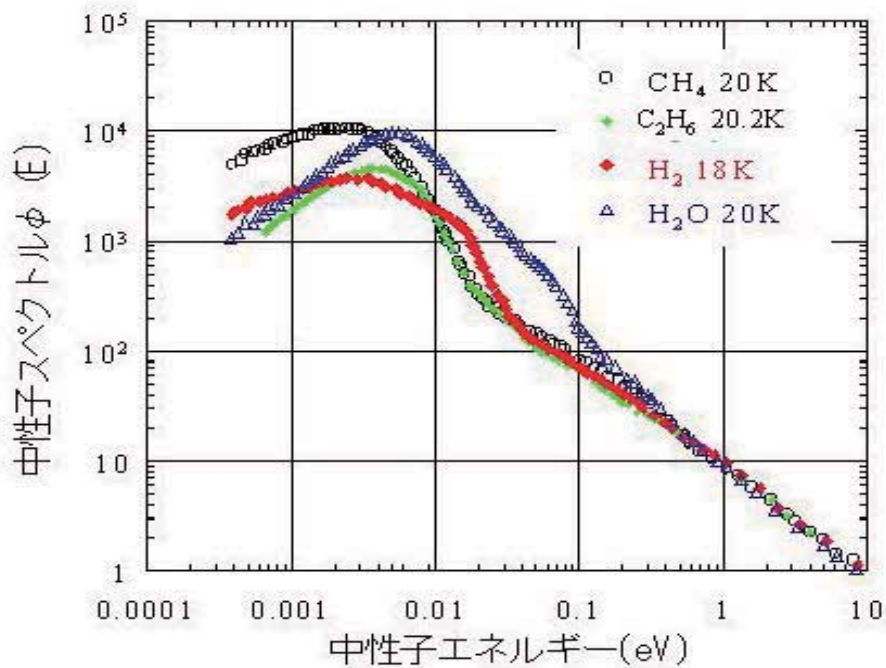
北大:
シミュレーションと実験による検証

日本に世界最高性能の中性子源を！



北大加速器

種々の低温減速材物質からの中性子エネルギースペクトル



(注)

熱中性子
減速材は
軽水が良い

KENSは
メタンと水

中性子減速材の選択

遅い中性子の発生



低温にした減速材物質との相互作用で減速



放射線損傷に強い物質



液体水素

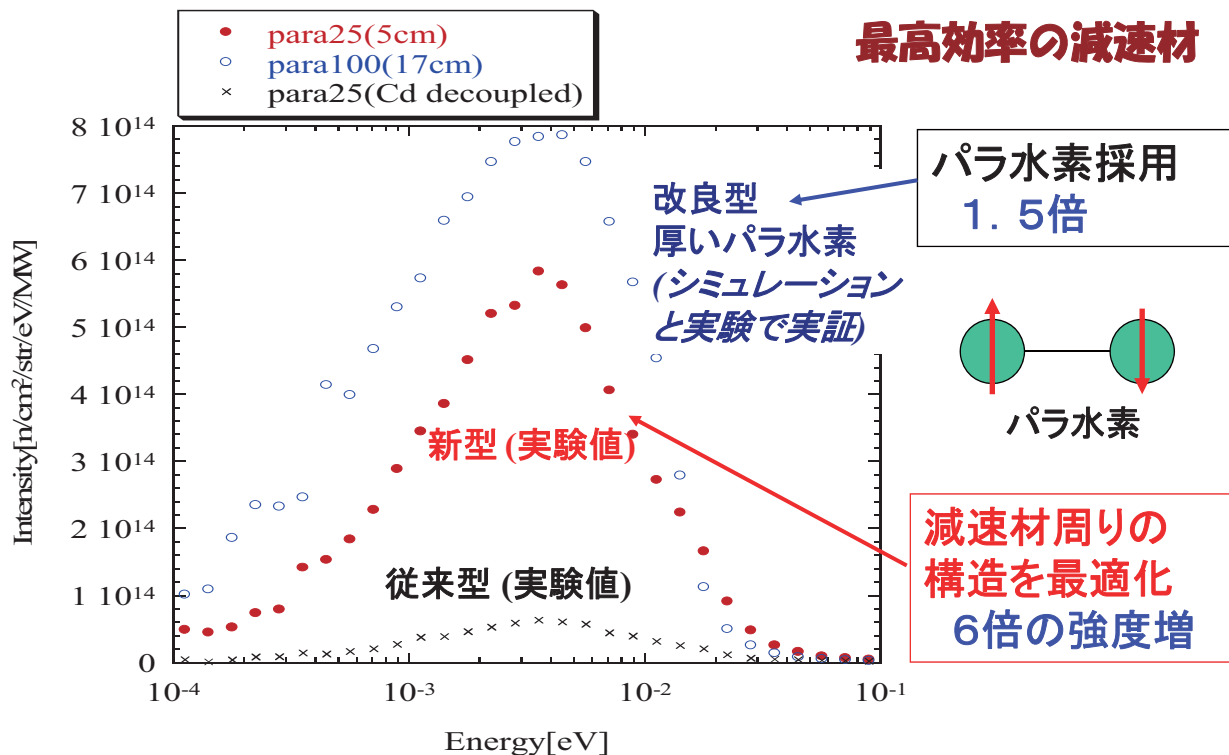


これまでの方式では性能が悪い



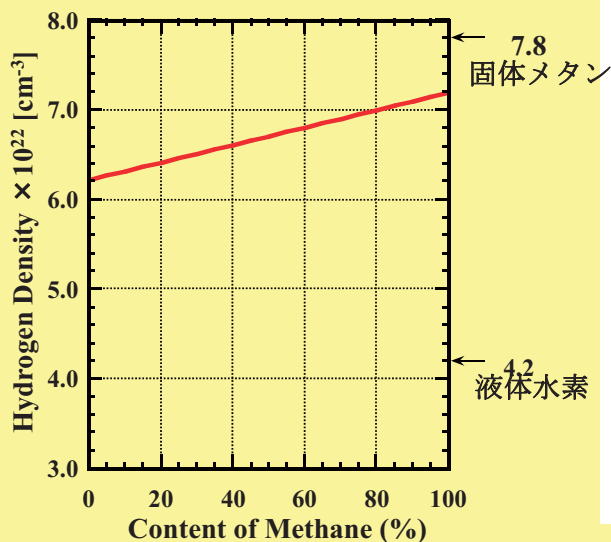
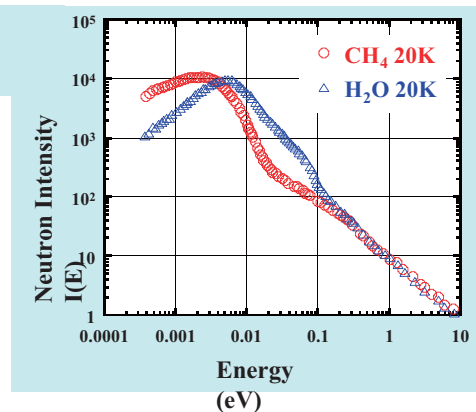
特性を向上させるにはどうするか？

液体水素減速材における強度改善



中性子減速材としてのメタンハイドレート

固体メタン減速材 → Peak~2meV
軽水氷減速材 → Peak~6meV

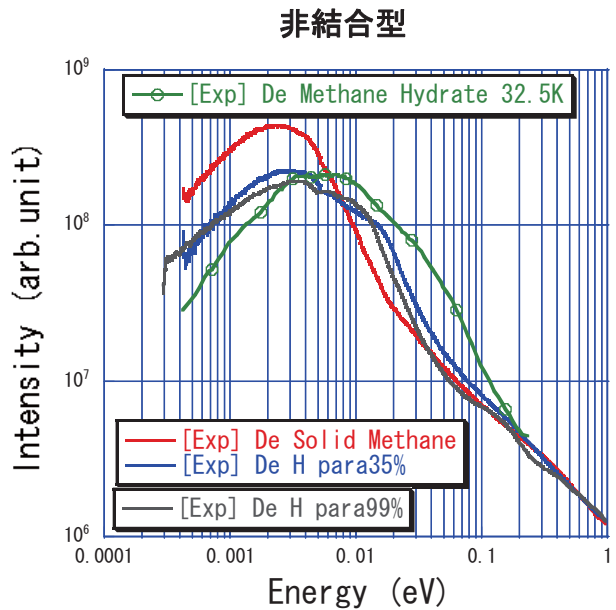
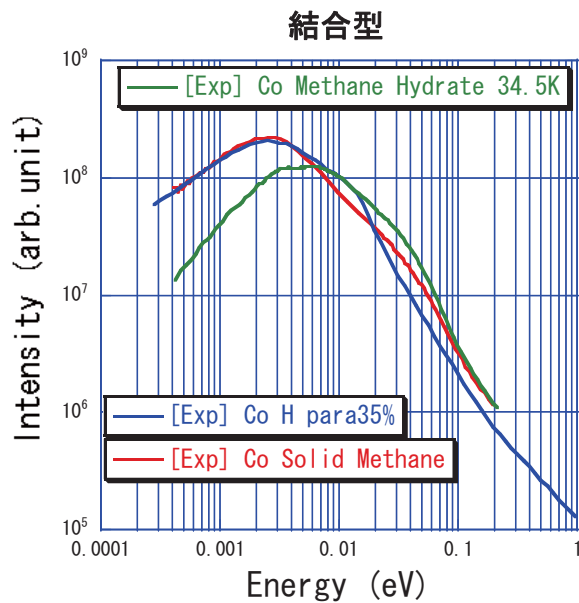


メタンハイドレート(氷+メタン)

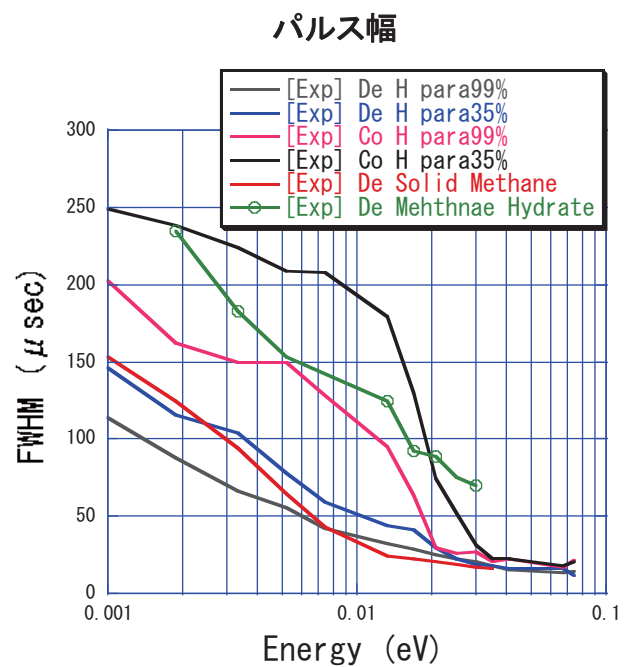
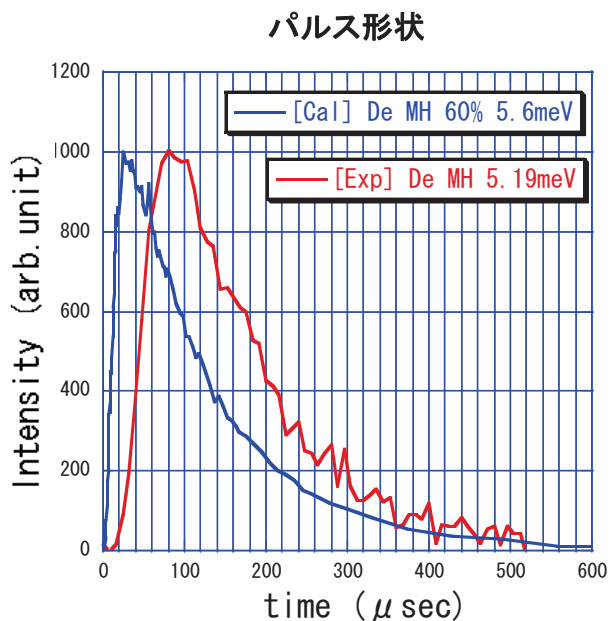
- ・広いエネルギー範囲で中性子強度が増加
- ・液体水素より高い水素数密度
- ・メタン回転による多数の低エネルギー準位

メタンハイドレートの水素数密度

メタンハイドレート減速材の中性子スペクトル



非結合型MH減速材のパルス形状





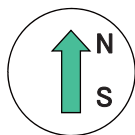
3. 中性子利用デバイスの開発

磁場による中性子の集束と発散: 磁気中性子レンズ

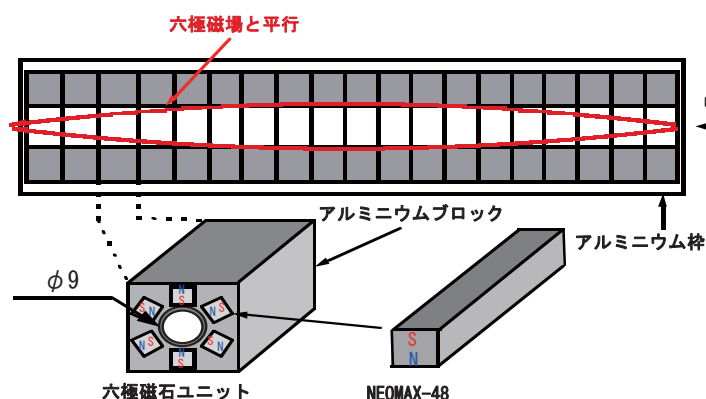
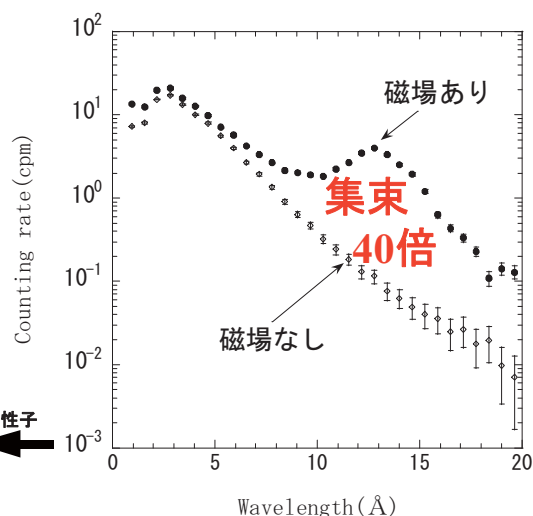
中性子を狭い領域に集めることが出来れば、小さな物でも調べられる。

中性子は小さな磁石

磁場を使って中性子を集束



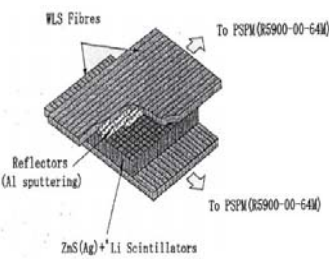
理研NOPグループが、世界で初めて、
北大加速器を用いて実験に成功
→ 中性子光学素子開発 (科学振興調整費)



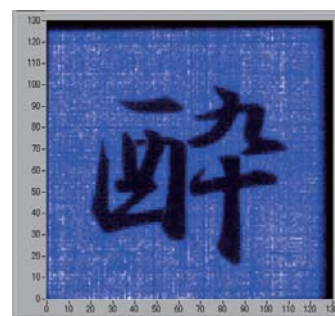
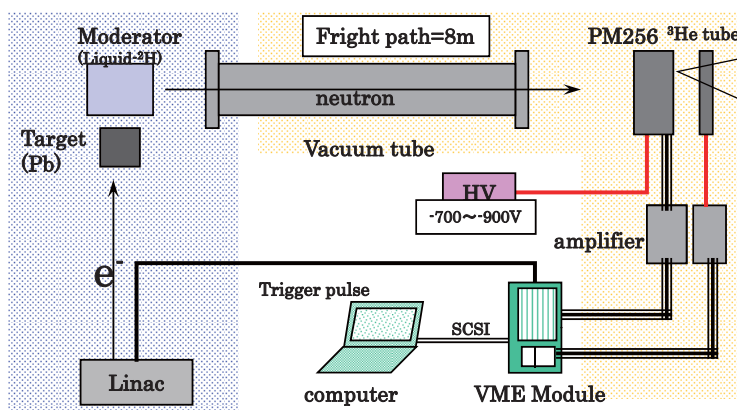
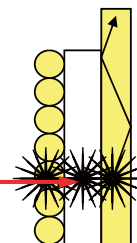
中性子位置敏感型検出器の開発

中性子位置敏感型検出器

- ・シンチレータ: ZnS(Ag)+6Li
- ・光電変換: マルチアノードPMT(64anode)
- ・有感面積: $50 \times 50 \text{ mm}$
- ・空間分解能(ファイバー径): 0.4 mm
- ・画素数: $128 \times 128 = 16384$
- ・検出効率: cold neutron に対して 50% 以上
- ・検出頻度: 2 MHz



Neutron



画像データの1例

透過イメージング用検出器 (北大テスト分)

カウンティング型

カウント数の絶対測定に有利。
ピクセルサイズが大きく、最大計数率が限られる。

検出器	有効面積	Pixelサイズ	Pixel数	最大計数率
^6Li ガラス64ch	$18 \times 18\text{mm}^2$	$2.3 \times 2.3\text{mm}^2$	8×8	$\sim 27\text{MHz}$
^6Li ガラス256ch	$48 \times 48\text{mm}^2$	$3 \times 3\text{mm}^2$	16×16	$\sim 12.8\text{MHz}$
GEM型	$100 \times 100\text{mm}^2$	$0.8 \times 0.8\text{mm}^2$	120×120	$\sim 12\text{MHz}$
μPIC 型	$100 \times 100\text{mm}^2$	$\sim 0.5 \times 0.5\text{mm}^2$	$\sim 200 \times 200$	$\sim 9\text{MHz}$
MCP型	$14 \times 14\text{mm}^2$	$0.055 \times 0.055\text{mm}^2$	256×256	?

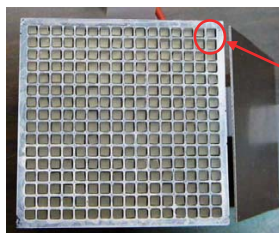
光変換型

中性子を光に変換後、輝度値として強度を取得。
高空間分解能。
輝度値のゲインを大きく取れるため、大量の中性子でも飽和しにくい。

光変換デバイス	有効面積	組合わせるカメラ
真空管式イメージンテンシ ファイア(シャッタ機能無)	4.5インチ Φ	高速度カメラ (最大25000fps、 $160 \times 134\text{pixels}$)
真空管式イメージンテンシ ファイア(シャッタ機能付)	4.5インチ Φ	高精細カメラ (バルブ撮影、 $5616 \times 3744\text{pixels}$)

Liガラスシンチレータ直読式(256ch,64ch)

256(16×16)チャンネル直読式Liガラスシンチレーションカウンター
検出面: $2.1\text{mm} \times 2.1\text{mm}$ のピクセルが
0.9mmの間隔で並ぶ(3mmピッチ)



2.1mm角
($16 \times 16\text{pixel}$)



検出器

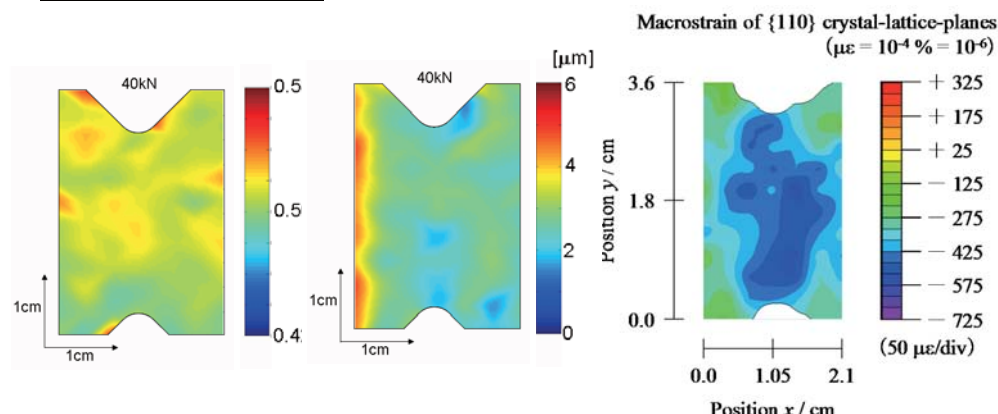
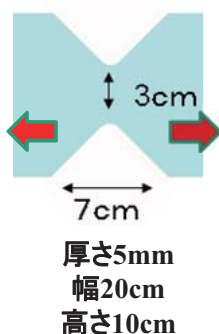
Fe引っ張り試験(BL19)のRITSによる解析(40kN)

測定試料: Fe

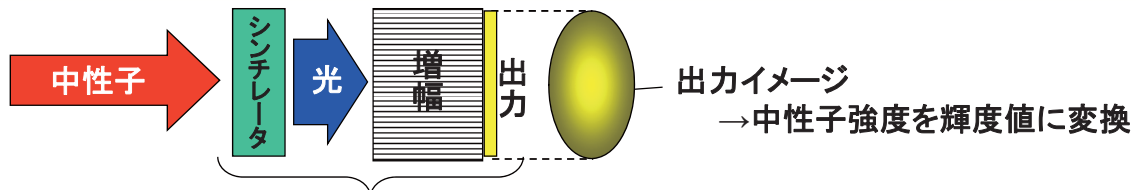
March-Dollase係数

結晶子サイズ

{110}面の歪



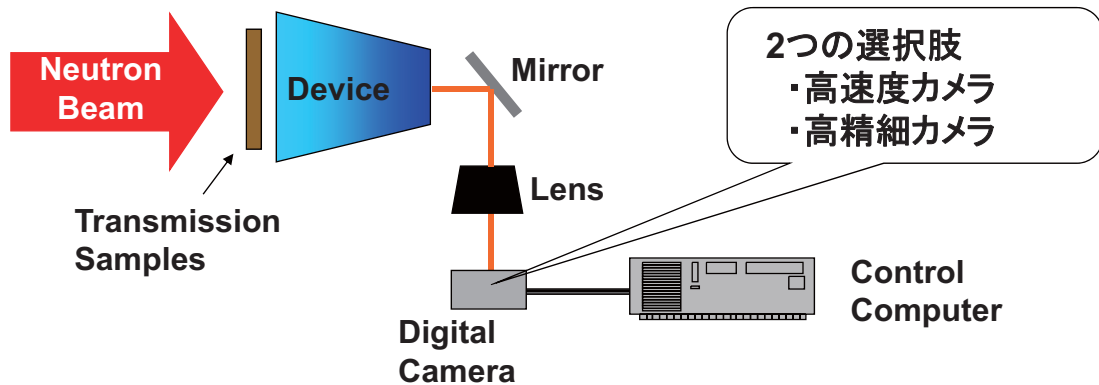
中性子-光変換型2次元検出デバイス



中性子-光変換型2次元検出デバイス

- ・適当な光学機器の選択により、光の2次元分布を高解像度で記録可能。
- ・記録用光学機器のダイナミックレンジにより大強度の中性子でも飽和しにくい。
- ・変換デバイスの応答速度が速ければ輝度変化の飛行時間分解が可能。

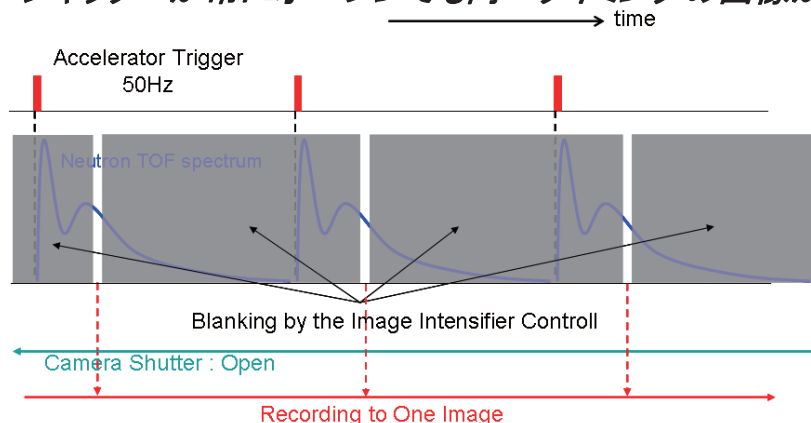
→ 大強度中性子線源で稼動する透過型のイメージング用検出器に向く。



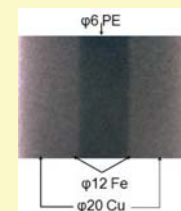
シャッター機能付NII+高精細カメラ

ブランキング型NII : NIIの作動タイミングを集束電極の電源ユニットで制御

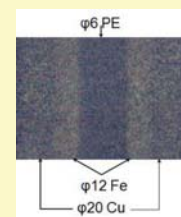
NIIのシャッター開放タイミングを加速器トリガーに同期すれば、カメラのシャッターが常にオープンでも同一タイミングの画像が積算される。



通常のラジオグラフィ



ブラッグエッジ強調ラジオグラフィ



3重円筒試料のブラッグエッジ強調イメージング

- ・シャッタータイミングを調整し、ブラッグエッジ領域の断面積差を利用してFeとCuを区別

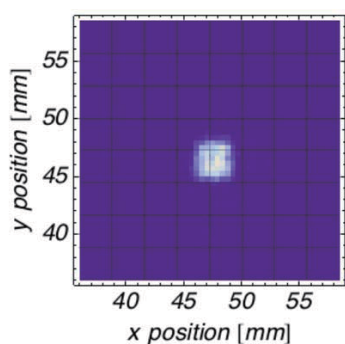
高精細カメラ(EOS5D mk.II)を使用→ピクセル分解能8μm

4. 小型集束型中性子小角散乱装置の開発

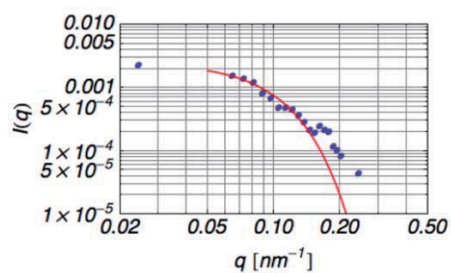
mf SANS

垂直、水平の楕円型
中性子反射ミラー

→ 小角装置のコンパクト化



集束ビーム形状
約2.5 mm角



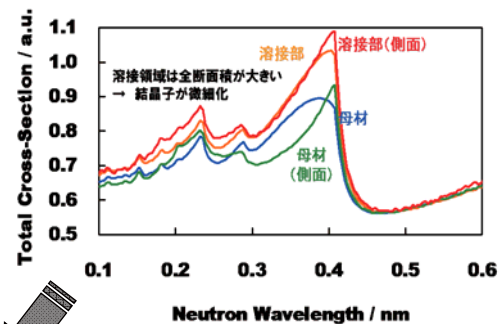
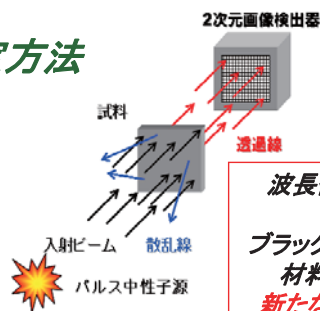
鉄の微粉末からの
小角散乱 (preliminary)

5. 中性子透過分光法の開発

パルス中性子透過分光法による材料組織解析

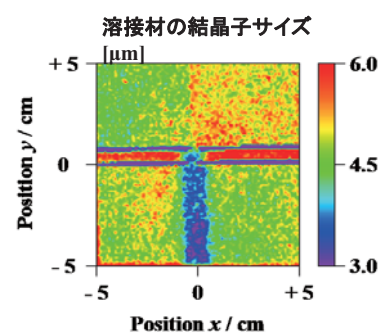
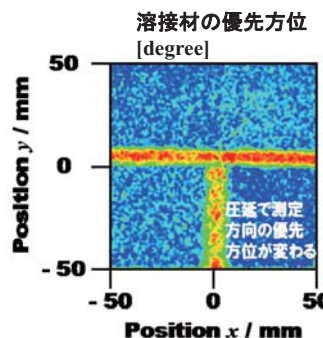
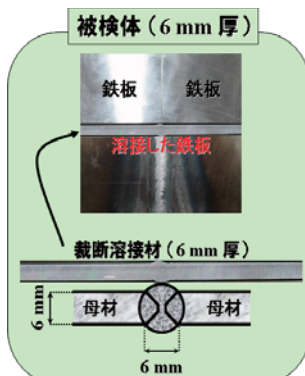
ブラッグエッジスペクトルの実空間分布を解析

測定方法



空間依存の組織変化(鉄溶接片の例)

→母材、溶接部、熱影響部の詳細な組織解析や歪解析



パルス中性子透過分光法による日本刀の非破壊検査

日本刀

- ・鎌倉時代から室町時代にかけて、製法が成立。
- ・「超鉄鋼」に匹敵する微細な結晶組織、特性の異なる材料を張り合わせる「傾斜機能材料」など、現在の先端技術を先取りして実現している。
- ・現代の日本刀の評価内容は伝承と観賞面が中心であり、材料科学面での研究はほとんど行われていない。

大強度施設では放射化の可能性
→小型施設での測定が望ましい

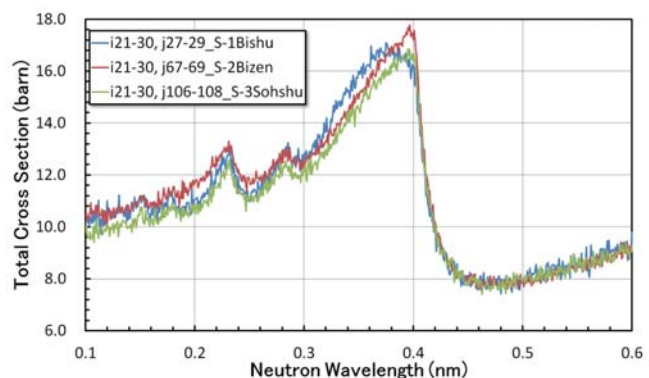
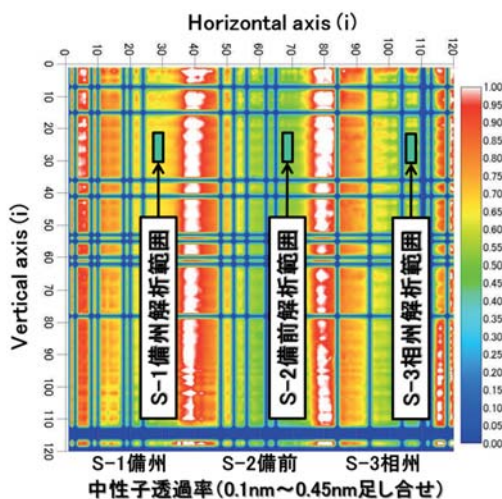


北大で測定

飛行距離5.3m
GEM検出器
～23時間

- S-1: 備州長船祐定→現岡山県、16世紀半ば
S-2: 備前國住長船七兵衛尉祐定→現岡山県
寛文三年八月吉日→1663年(17世紀後半)
S-3: 無銘(相州と伝わる)→現神奈川県、16世紀半ば

刀毎のブラッグエッジスペクトルの違い



刀ごとの中性子全断面積

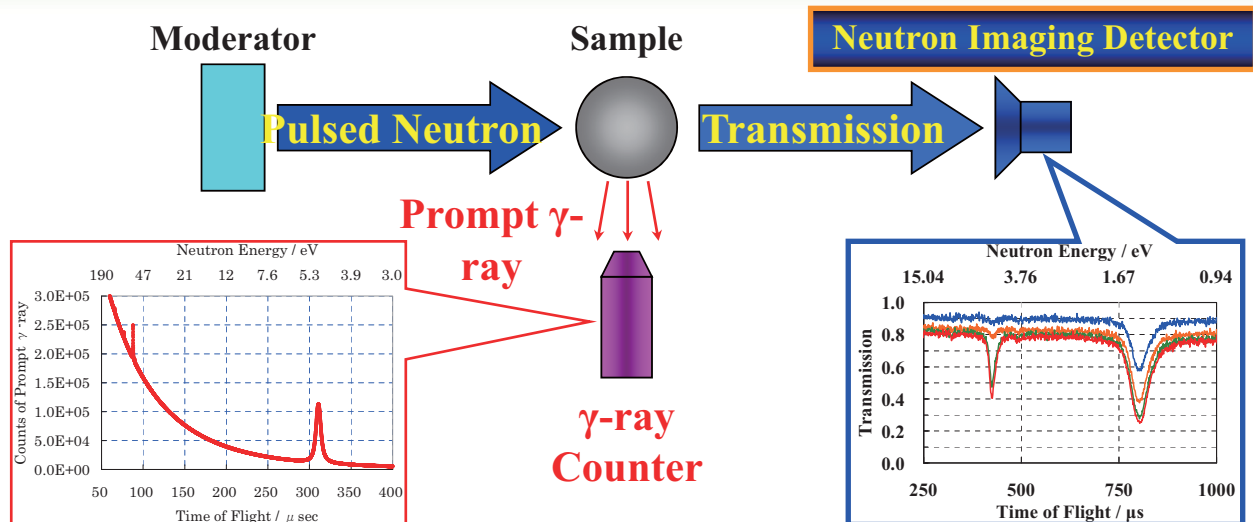
RITSコードによる組織情報解析結果

	S-1備州	S-2備前	S-3相州
結晶子サイズ(μm)	2.99	2.93	3.70
結晶方位異方性	1.99	0.90	1.34

- ・結晶子サイズは、備前(現岡山県)で製造されたS-1備州とS-2備前が比較的近い。
- ・結晶方位異方性は、備前のS-1備州とS-2備前が大きく異なる。

6. 中性子共鳴吸収分光法の開発

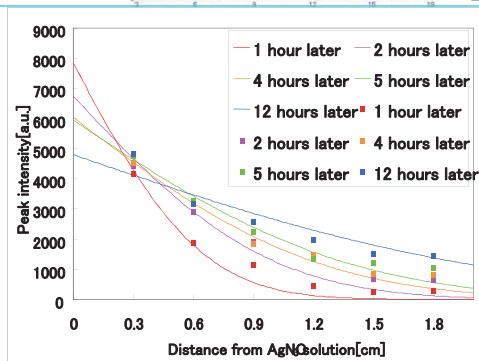
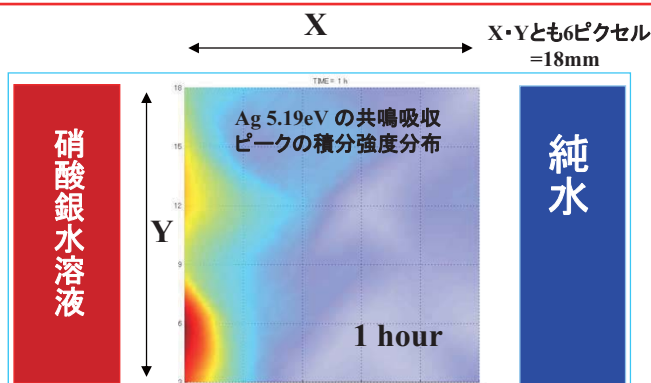
北大線源における中性子共鳴吸収分光断層撮像



- 共鳴エネルギーは核種固有の値を持つ。→ **核種の同定**や**核種毎の解析**
- 共鳴吸収強度は密度と透過厚さに依存する。→ **核種の定量**
- 共鳴吸収ピーク幅は原子の熱振動に起因するドップラー効果によって広がる
→ **ダイナミクスの解析**や**温度の測定**
- ☆ 中性子透過法では**2次元画像検出器**が使える。→ **イメージング**が容易

中性子共鳴吸収を利用したAgイオンの拡散測定

2次元位置敏感型Liガラスシンチレータ検出器を利用した共鳴吸収ピークの透過測定
核種密度分布の時間的・空間的変化→拡散係数の導出



5.19eVのピーク積分強度の空間分布

想定される応用例

- 非破壊測定
= 同一試料の長期間モニタリング
- 同位体の区別
= 自己拡散の測定
- 空間的な核種分布
= 土壌・岩石中の実際的な核種移動の測定

拡散係数

$$c(x, t) = c_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right) \equiv c_0 \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right)$$

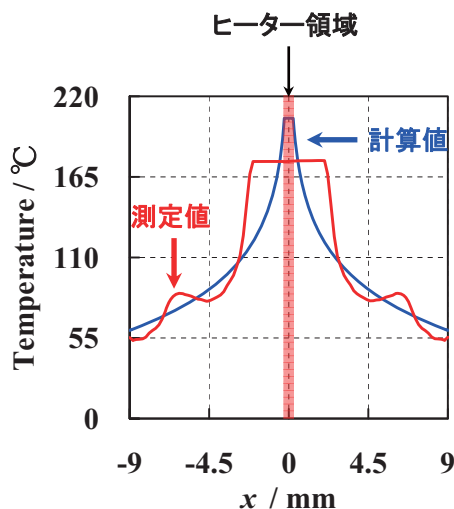
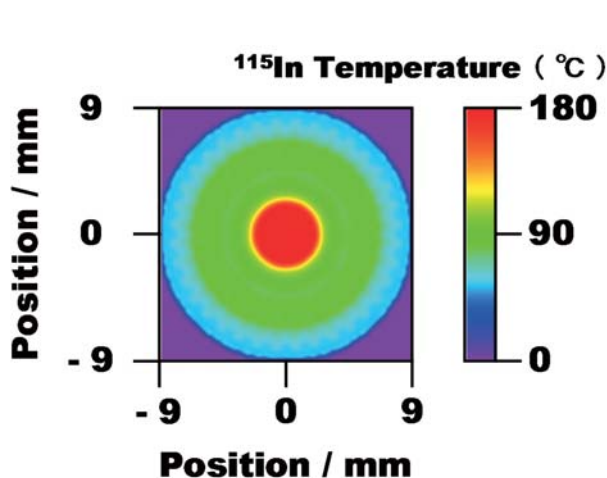
$$D = 3.03 \times 10^{-5} [\text{cm}^2/\text{s}]$$

プロットは測定値、曲線はフィッティング結果

スペクトル解析パラメータのCT再構成－実効温度

二重円筒試料の共鳴「透過」測定（北大中性子源）

円筒内全域に分布している ^{115}In の原子振動を解析 → 温度を再構成



物体内部の温度を非破壊・非接触で直接測定できる唯一の方法

7. おわりに

北大加速器中性子源 HUNS

北大加速器施設 — 完成から39年を経過

中性子関連研究を完成時から継続

- ・線源開発
- ・デバイス開発
- ・利用手法開発
- ・応用研究+外部との共同研究

現在も活発に活動
→まだまだテーマは尽きない

現時点における問題点

- ・スタッフ数、スタッフの高齢化
- ・老朽化(含建物)
- ・運転資金

当面は加速器の老朽化を防ぎつつ、
電子線加速器の置き換えを模索

大学の加速器施設の役割：教育および研究

↓

北大中性子Grの目標：教育や研究を通した中性子利用の普及(大型/小型に関わらず)

小型加速器中性子源により、

- ・新しい世代への教育・継承・・・全ての体系が手作り、一通りがわかる人材を育成。
- ・新しいアイデアの展開・・・思い付きの試行。
- ・未開分野の開拓・・・失敗しても次がある。

小型中性子源施設の立ち位置

大型施設：J-PARC級(>100kW)、同時に複数の実験Gr.

利点 ・ 大強度、感度の低い実験も可能

→最先端科学、決め手となる実験

欠点 ・ 融通の無さ、マシンタイム、放射化、・・・・・・・・

中型施設：KENS級(1kW~100kW)、同時に複数の実験Gr.

利点 ・ ある程度の強度と自由度、比較的安価な装置群、ビームは人任せ

→物性研究者にとっては最も使い易い？

欠点 ・ 施設そのものは高価

小型施設：北大級(<1kW)、1度の1つの実験Gr.

利点 ・ 線源までいじれる高い自由度 =教育にも最適

・ 余裕のあるマシンタイム =弱かったら時間をかける

・ いつもの場所で行実験できる =他の装置と連携可能

・ 安価 =クローズされた装置としても成立可能

欠点 ・ 強度

} 自由な発想の
実験が可能

→多数の施設ができることで中性子利用のレベルアップに繋がる