2013.01.18

北大と世界の中小型中性子源

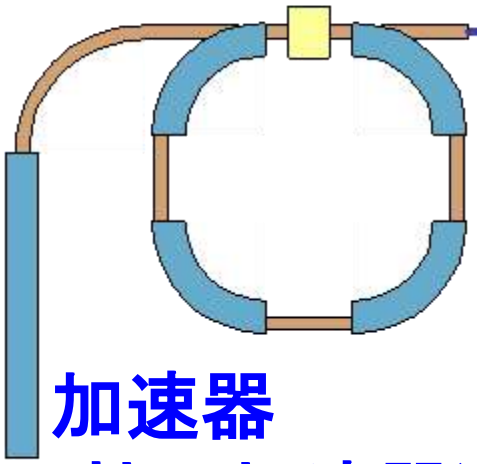
鬼柳善明
工学研究院量子理工学部門

内　容

- 加速器中性子源
- 世界の加速器中性子源
- 加速器中性子源設計
- 加速器中性子源を用いた研究（北大）
- まとめ

加速器中性子源

最近の用途

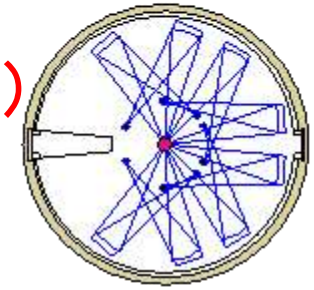


p（陽子）、e（電子）

加速器
(粒子加速器)

中性子源

n（中性子）

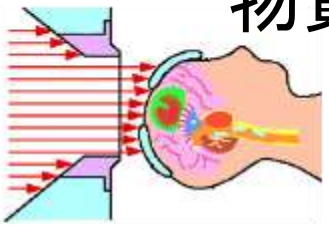


実験装置

応用
構造解析
運動状態
イメージング

物質を探る

n（中性子）



中性子捕捉療法によるガン治療

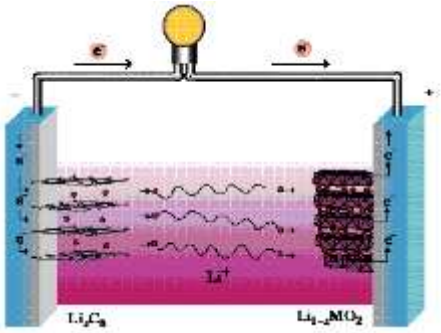
ガンを治す

核データ測定、微量分析などの中性子源もある。

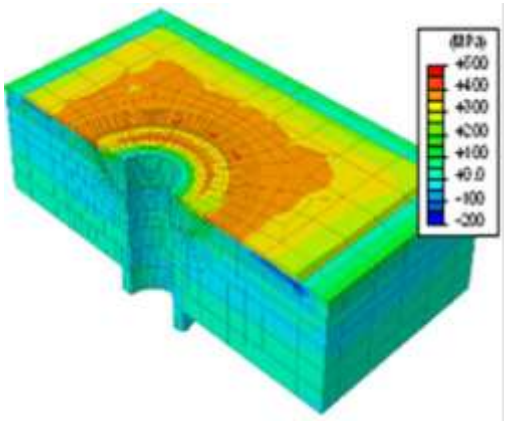
中性子の特長

＊**軽元素**（水素、リチウムなど）に対する感度が良い。
＊**透過力が強い**ため、金属などの中を見ることができる。
＊**磁気モーメント**があるため、磁気相互作用を調べることができる。
その他、エックス線などでは見えにくいものを見ることができる。

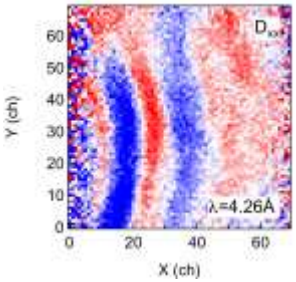
Li電池のLIの位置



金属バルク材の歪



磁性材料の　磁場分布



高分子の構造

物質・生命科学、材料創生、産業応用に役立つ。

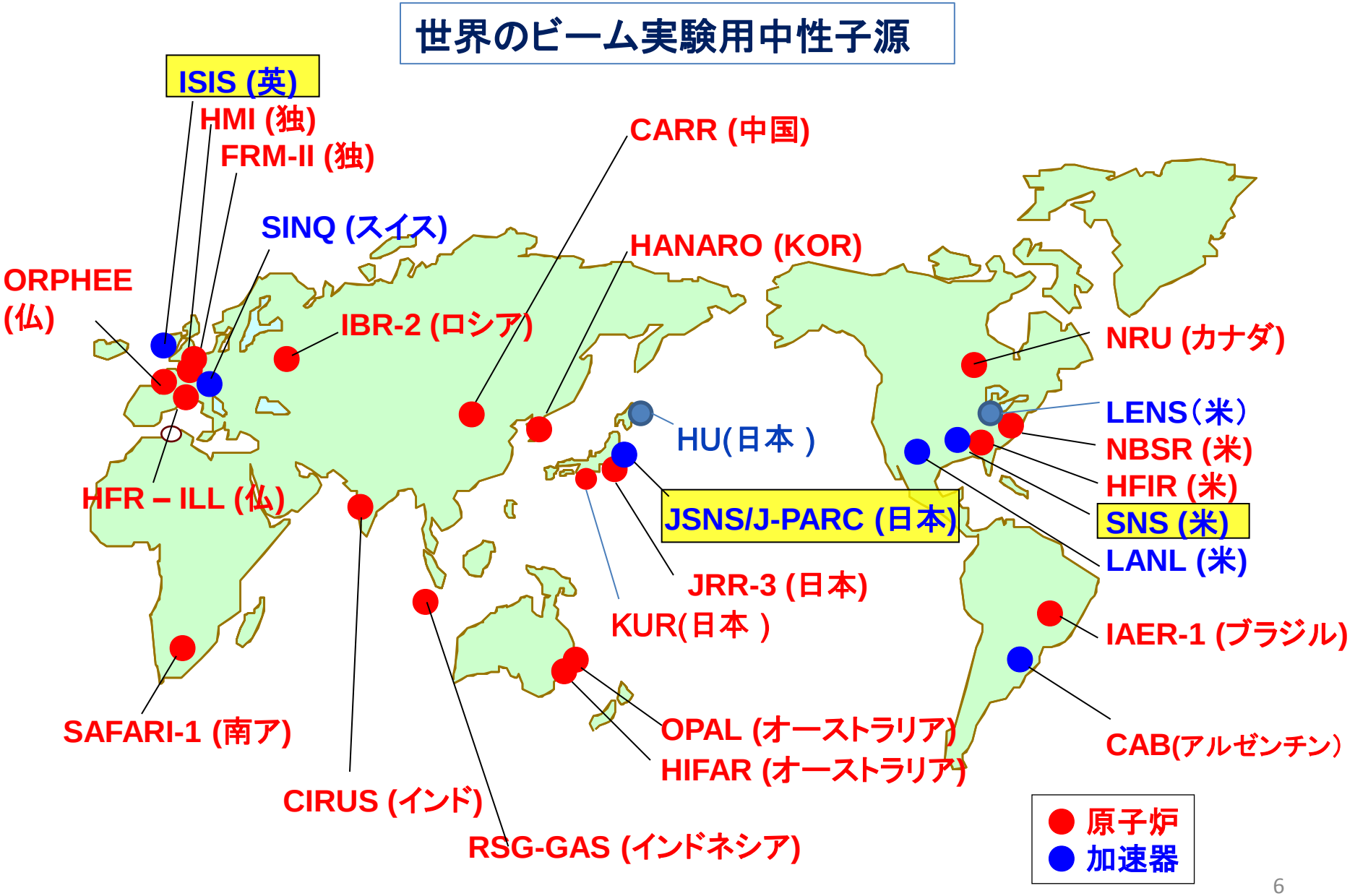
中性子科学会
次世代研究炉検討特別委員会報告（案）

（中小型関係）

中性子科学の活性化のためには、臨界後20年を経過したJRR-3の高経年化対策を継続的に実施し、J-PARCとの共存を念頭に実験装置の更新や冷中性子源の高度化を優先的に実施することが望まれる。そしてJ-PARCや小型・中規模中性子源と有機的に連携し、相補的な利用を行うべきである。

最後に、小型中性子源と中規模施設（強度は弱いが共同利用等が運営される規模）の役割に言及する。小型中性子源は、その即応性、適応性の高さが特徴であり、強度は低いものの、萌芽的研究の推進、予備実験、大学や企業での日常的な利用による中性子の有用性の理解と普及、分野の拡大に役立つ。産業界からもその実現を強く要望されている。将来的には、野外での活用も可能となり、新たな利用分野の拡大へつながることが期待される。

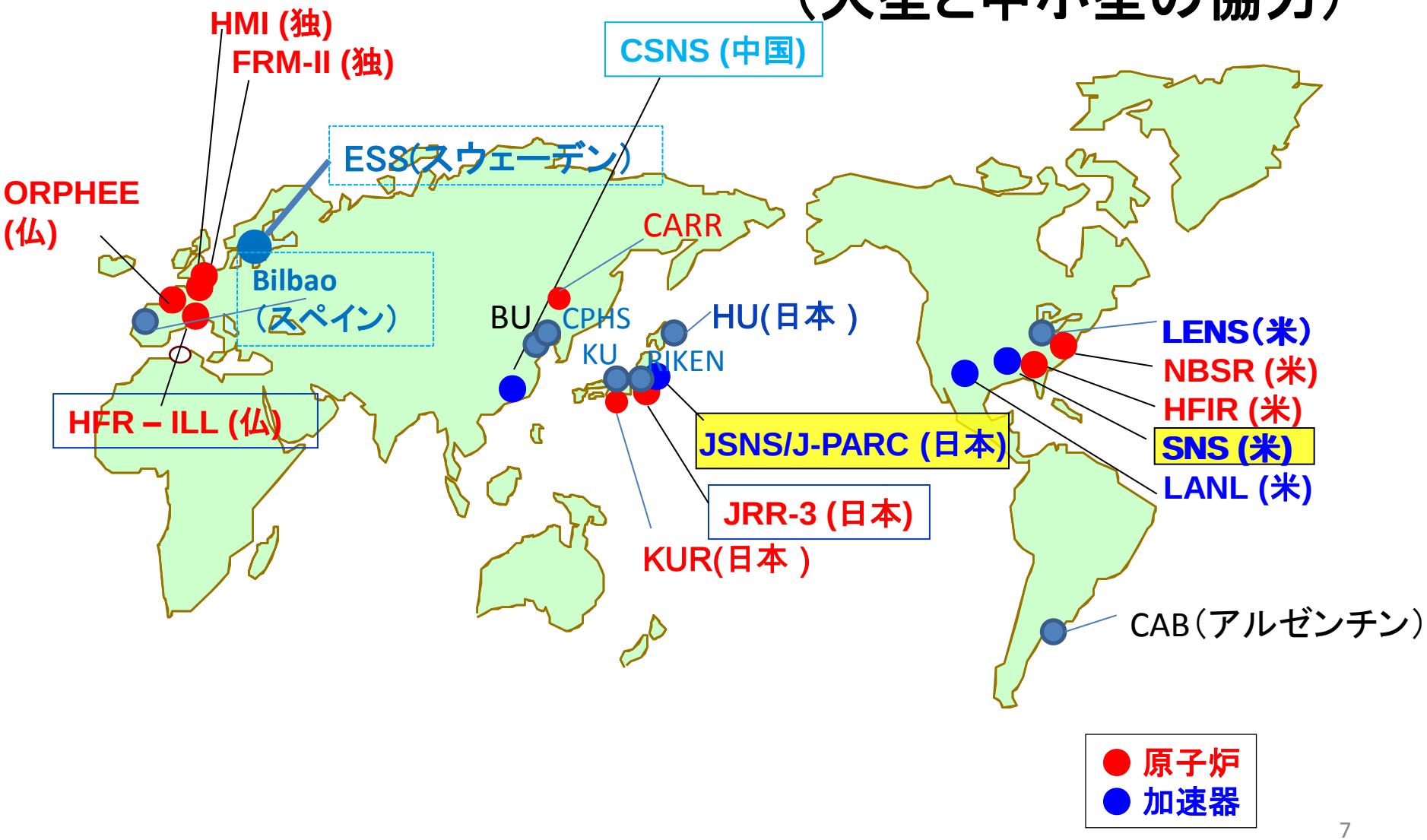
世界の加速器中性子源



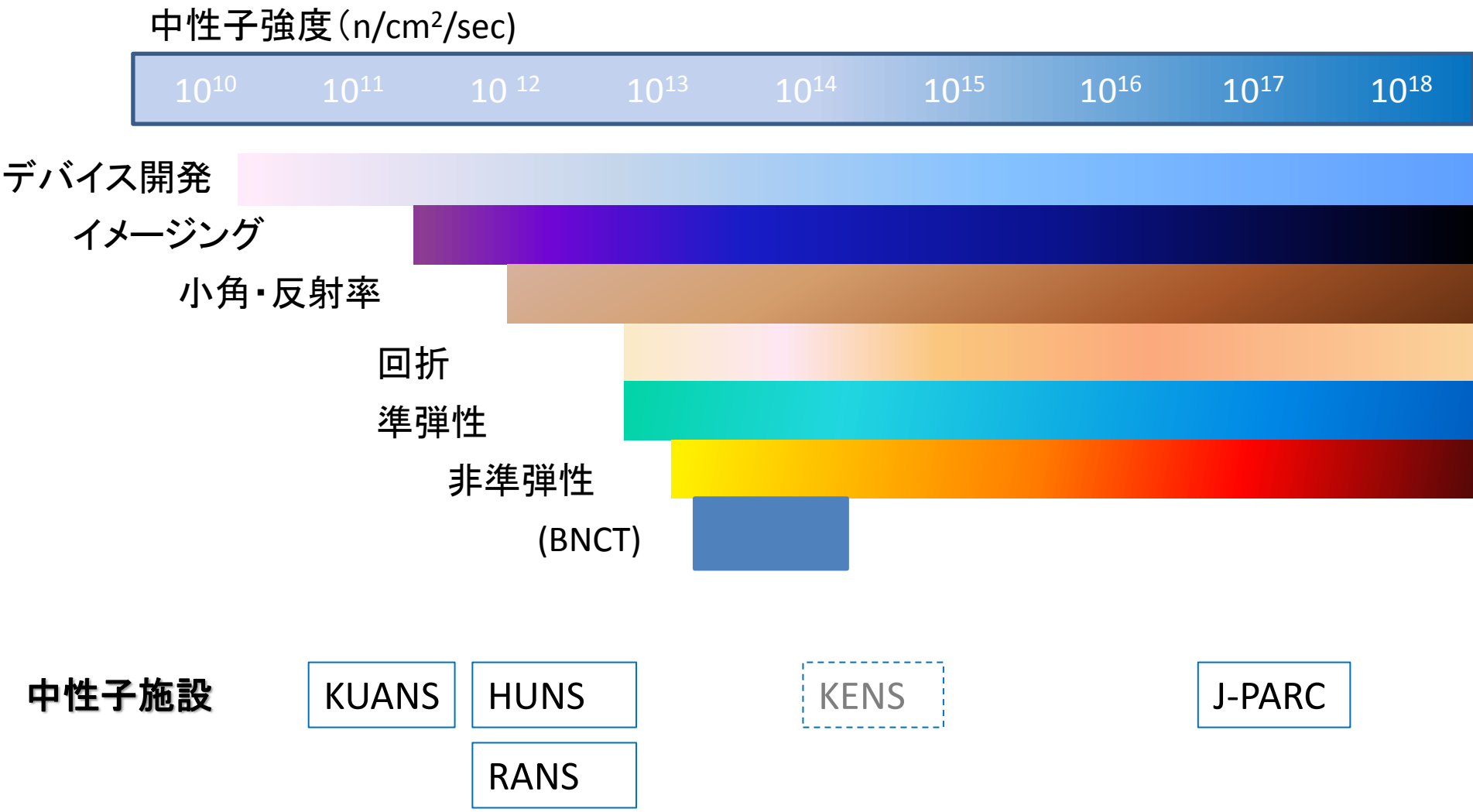
CROSS　藤井先生の資料から改編

中小型中性子源の現状

（大型と中小型の協力）



中性子強度と可能な実験およびパルス中性子施設



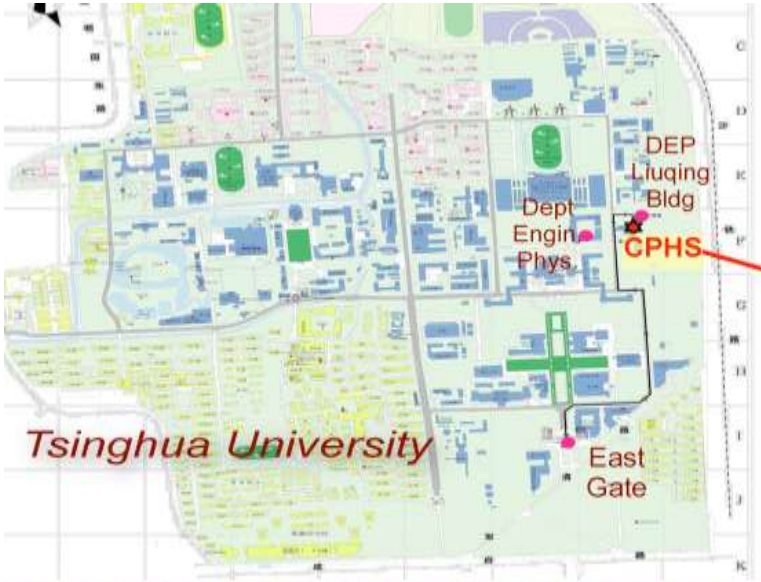
Indiana大学のLow Energy Neutron Source (LENS)とSNS

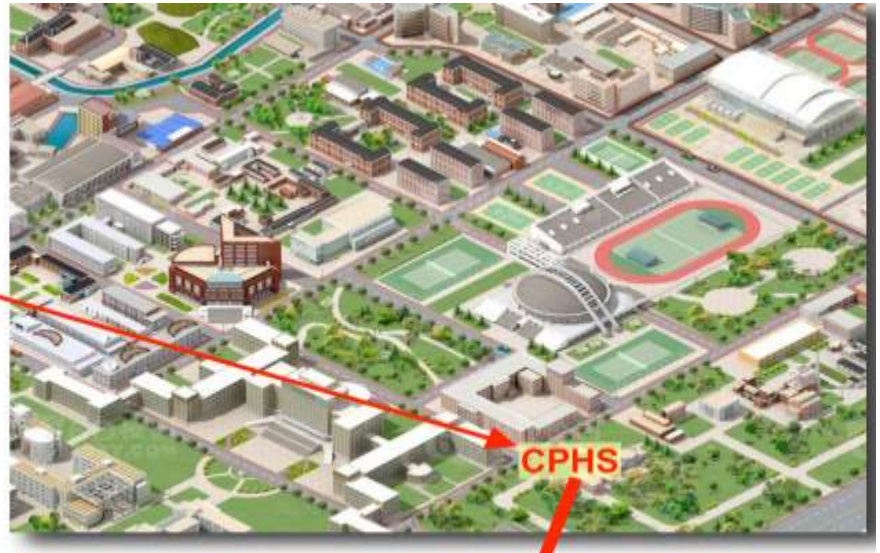
SNS(1.4MW)/LENS(~13kW)
J-PARC-北大の関係を模したもの。

LENS ~10kW
~10^{13} n/s
SNS 2MW
~30,000x10^{13} n/s

*小角散乱装置、反射率装置による散乱実験
*SNS 2nd-ターゲット用パラ水素減速材実験*新しい中性子減速材システムの開発
*減速材用材料の断面積測定
*ソフトエラー実験

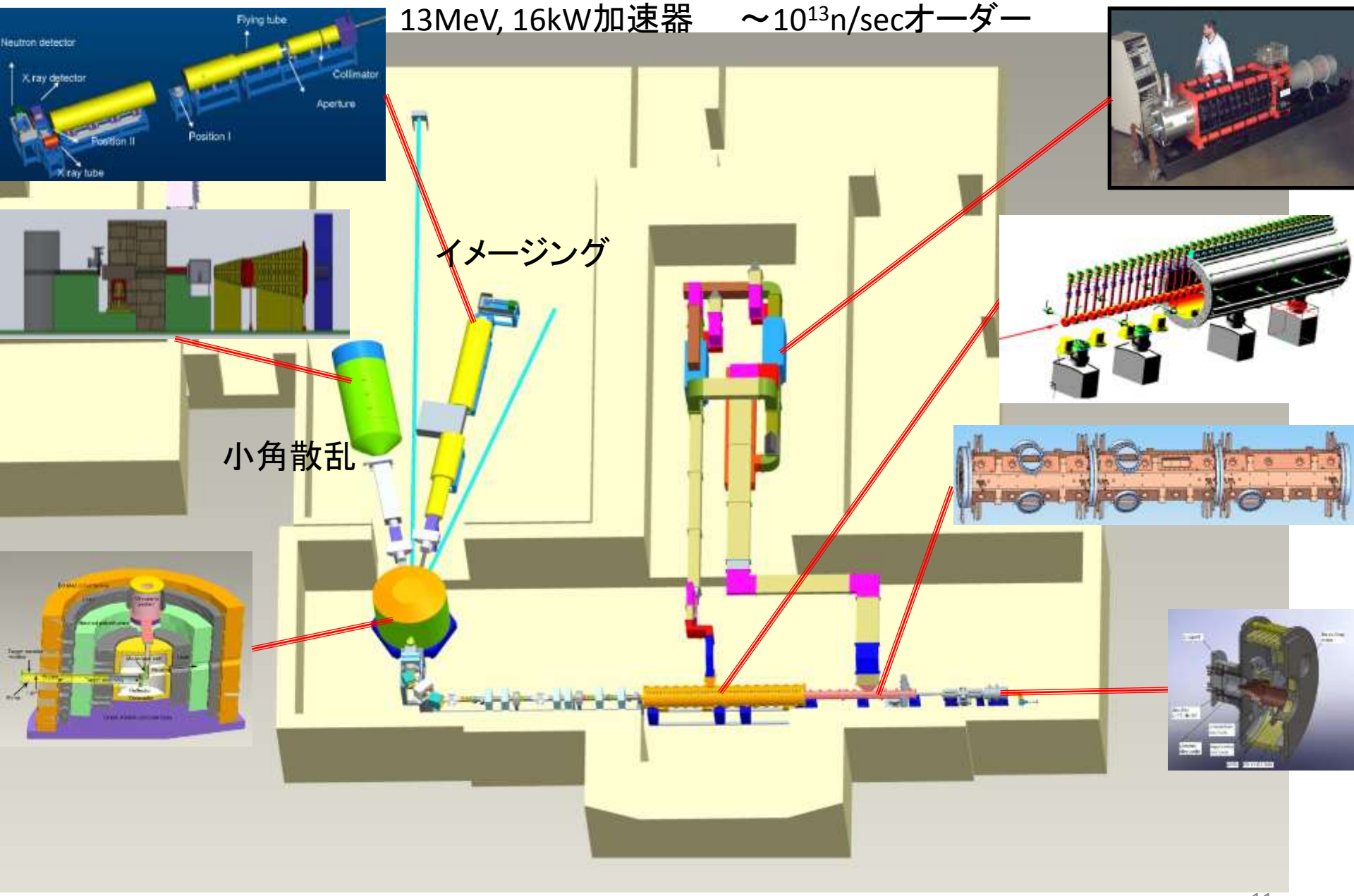
清華大学の中性子源：CPHS(China Pulsed Hadron Source)建設中





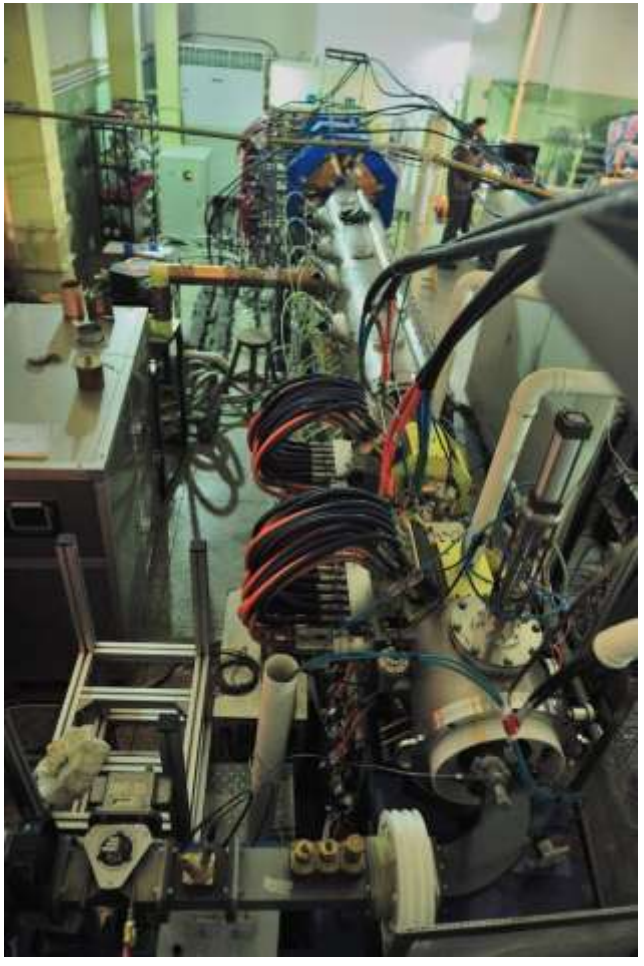
CPHSのレイアウト

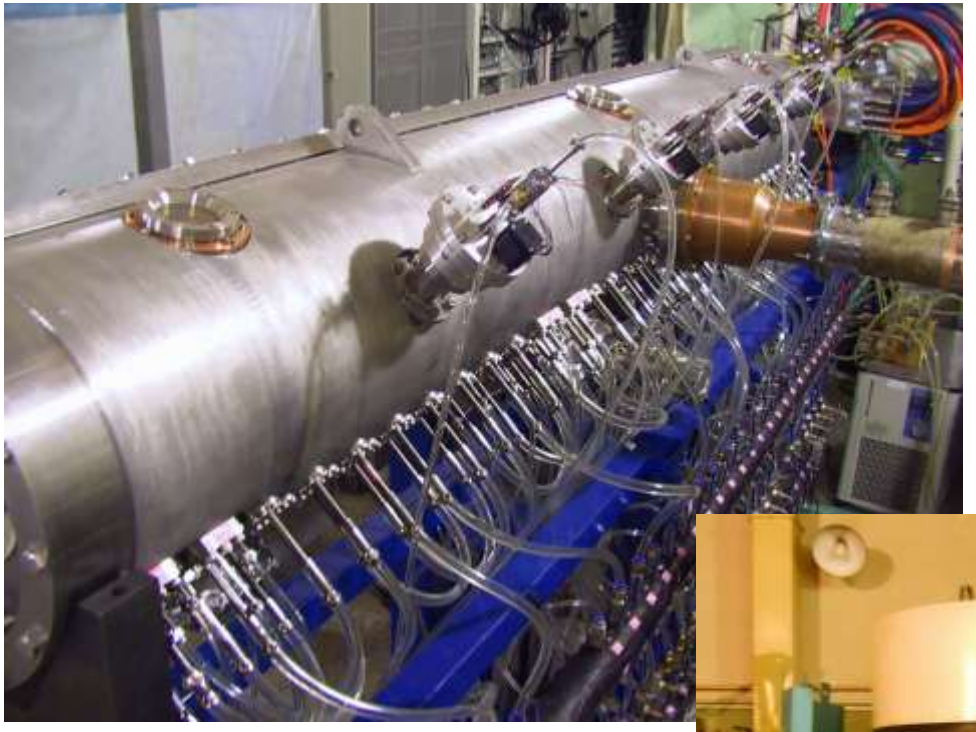
13MeV, 16kW加速器　～10^{13}n/secオーダー



PKUNIFTY

Bird's eye view





RFQ

Target-Moderator - Reflector System

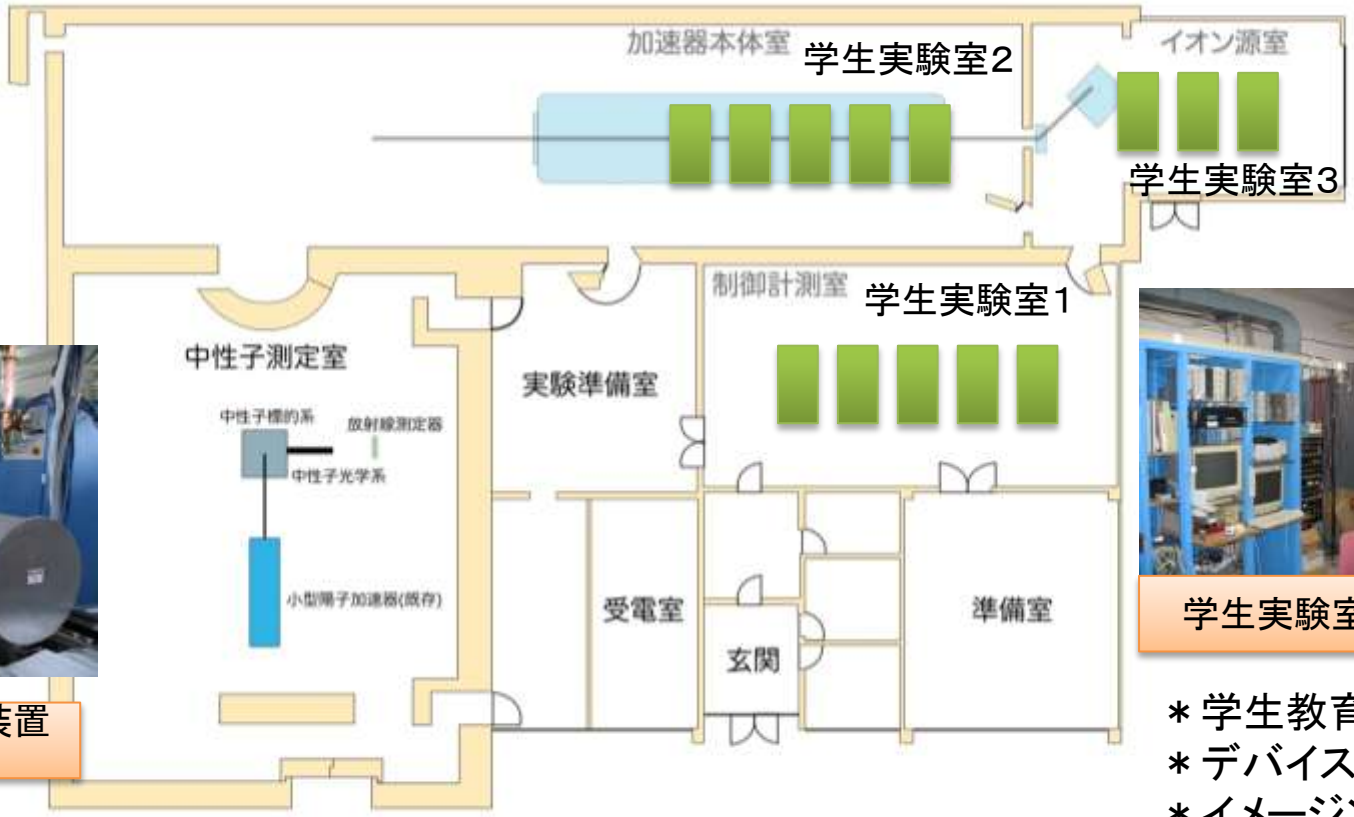
スペインのBilbaoの加速器中性子源(建設予定)とスウェーデンのESS(建設予定)

スウェーデンLundの
ESS(5MW)

スペイン
ESS-Bilbao(～80kW)
　ESSのための加速器テスト、中性子教育、中性子・プロトン応用

京都大学理学部小型加速器中性子源　KUANS
（建設中）

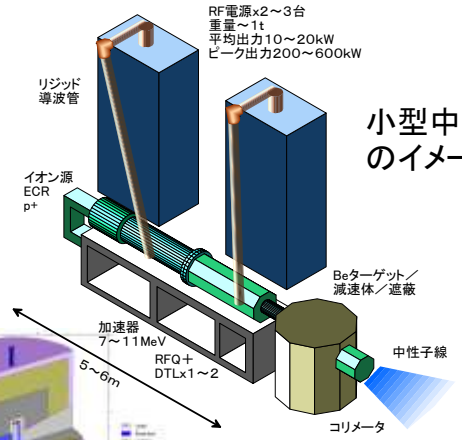
中性子ビーム発生装置の整備



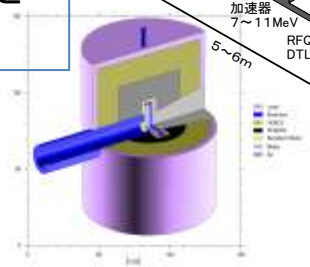
学生実験室の整備

＊学生教育
＊デバイス開発
＊イメージング
＊（小角散乱？）

理化学研究所　ものづくり高度計測技術開発チーム
小型中性子源　RANS （建設中）



小型中性子源
のイメージ図



想定されるターゲット
モデレータステーショ
ンの構造

目的

小型陽子加速器を用いた中性子源を構築し、主にものづくり分野の企業や大学・研究機関と共同で中性子イメージングに関する研究開発を行い、その有用性を実証することを目的とする。

構築予定設備の概要

小型陽子加速器（7MeV 平均電流100μA）を購入し、Be(p,n)反応を利用した小型中性子源を構築する。発生中性子量は10^{12}n/sec、イメージング用熱中性子ビームラインのフラックスは10^{4}n/cm^{2}/sec程度と予想される。

応用分野

・自動車産業（バッテリー、構造体の非破壊検査）
・航空産業（CFRP,　構造体の非破壊検査）
・鉄鋼業（小角散乱等による構造分析）
・大型構造物分野（高速中性子イメージング、可搬型中性子源（将来））

技術的課題

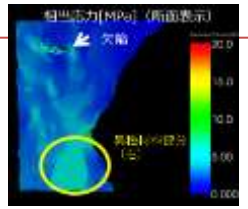
・高耐久性Beターゲットの開発
・コンパクトな放射線遮蔽の開発（自己遮蔽）
・減速体の最適化
・検出器開発、画像処理技術開発と一体となったアプリケーション開発

現在までの中性子関連研究開発

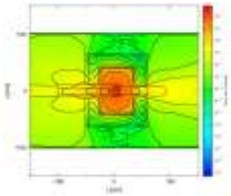
放射線検出器
中性子光学素子
画像処理・シミュレーション技術
（VCADシステム）

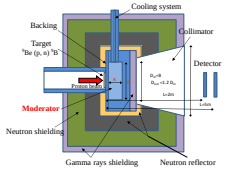
中性子集光ミラー

中性子検出器
（RPMT検出器、ピクセル型検出器）



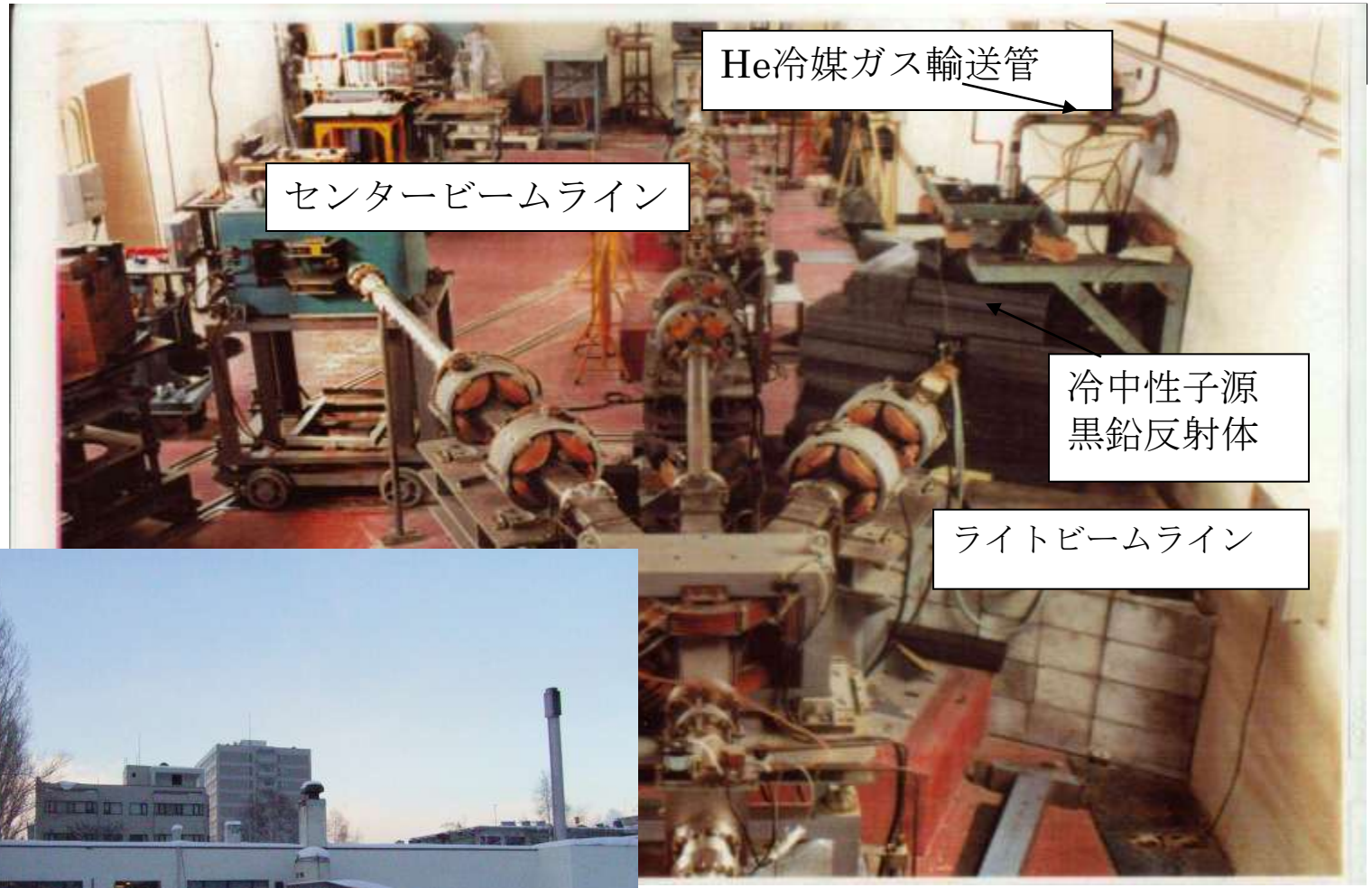
高度構造解析シミュレーション
（内部欠陥予測等）





PHITSコードによるターゲット・減速材・遮蔽体の最適化

北海道大学中性子源(HUNS)

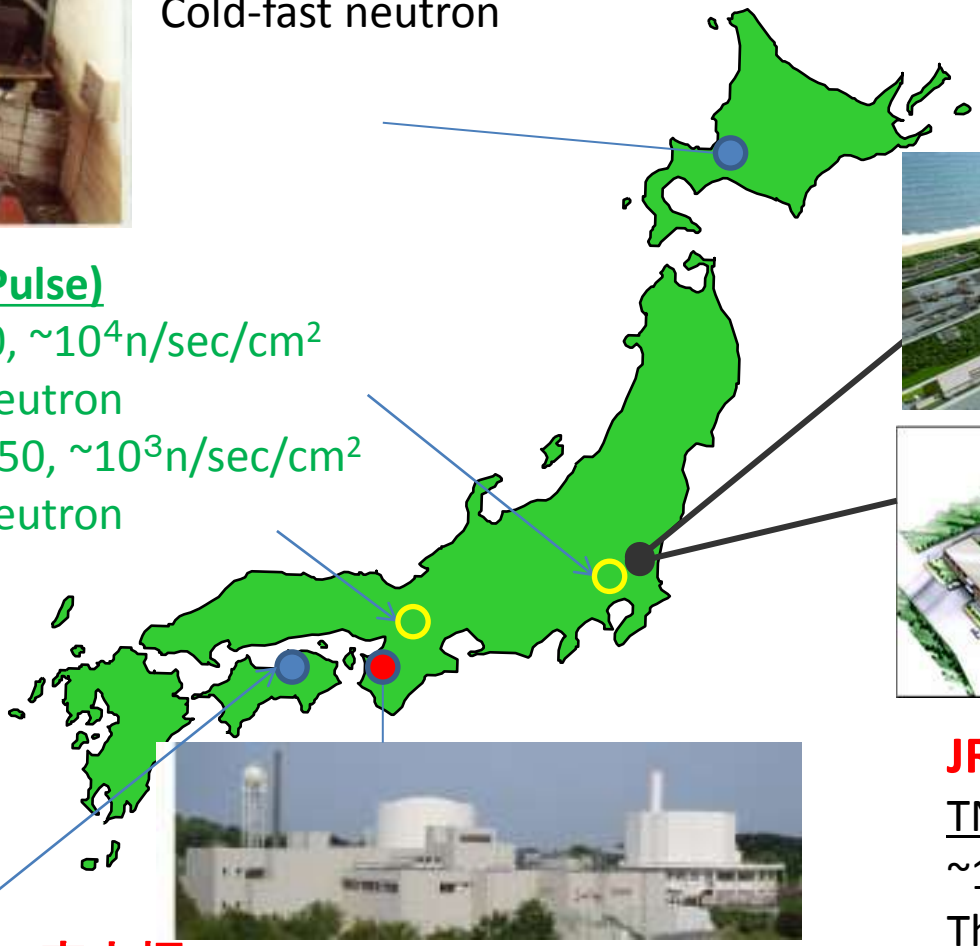


HU linac 0.16x10^{13}n/sec

日本の小型中性子源とイメージング仕様

北大HUNS(Pulse)
L/D~50, ~10^4n/sec/cm^2 (cold)
Cold-fast neutron

J-PARC
BL10
BL22



建設中 (Acc., Pulse)
***RANS**: L/D~50, ~10^4n/sec/cm^2
Thermal neutron
***KUANS**: L/D~50, ~10^3n/sec/cm^2
Thermal neutron

住友重工
L/D~44,
~5x10^5n/sec/cm^2
Thermal

京大炉: Thermal
E2: L/D~100, ~4x10^5n/sec/cm^2@5MW
B4: L/D~100, ~$10^{6\sim7}$n/sec/cm^2@5MW

JRR-3
TNRF: L/D~175
~10^8n/sec/cm^2
Thermal neutron
CNRF: ~10^7n/sec/cm^2
Cold neutron

小型中性子源の仕様

既存（日本）

Name	Type	Particl	Reaction	Intensity	Pulse	Moderator	Application
HUNS（Hokkaido University Neutron Source)	Linac	Electron, 35MeV, current 30 uA (50pps)	(e, X), (X, n)	1.6×10^{12} n/sec at 35 MeV and 1kW	single-100Hz (Usually up to 50Hz)	Water thermal moderator and coupled methane moderator	Imaging, SANS, device development, nuclear data
RIKEN Accelerator-driven Neutron Source(RANS)	proton Linac	Proton	Be(p,n)	10^{12}n/s (100uA, 7MeV by simulated)	width 30-200usec Repetition 20 - 200Hz duty 1% peak current 10mA , average current 100uA	thermal, polyethylene (1st phase) cold, mesitylene(2nd phase)	thermal: imaging, detector development cold: SANS, pulse imaging
Kyoto Univ. Accelerator-driven Neutron Source(KUANS)	proton Linac	proton	Be(p,n)	10^{11}n/s (100uA, 3.5MeV by simulated)	width 30-200usec repetition 20 - 200Hz duty 1% peak current 10mA , average current 101uA	thermal, polyethylene	imaging, detector development, education

既存（海外）

Name	Type	Particl	Reaction	Intensity	Pulse	Moderator	Application
Compact Pulsed Hadron Source (CPHS)	proton Linac	proton, energy: 3MeV (stage 1) / 13MeV(stage 2), peak current: 50mA, pulse duration: 500μs, frequency: 50Hz, average current: 1.25mA	Be(p, n)	~5×10^{13}n/s (1.25mA, 13MeV, by simulated)	pulse (pulse duration: 500μs, frequency: 50Hz)	Thermal, Polythene (stage 1); Cold, solid methane (stage 2)	SANS(BL1), neutron instrument development (BL2), imaging(BL3), detector development(BL4)
PKUNIFTY (Peking University Neutron Imaging Facility)	RFQ linac	Deuteron, 2 MeV, 40 mA (peak)	Be(d, n)	3×10^{12} n/sec at average current of 4 mA and 2 MeV (simulated) 3×10^{11} n/sec at average current of 0.4 mA and 2 MeV (current experiments)	Pulse, frequency 100 Hz, pulse width 0.2 - 1 ms	polyethylene and light water	imaging, education
BELINA	Van Der Graaf	protons, alpha and lithium. 7 MV. max cw curren 30 uA	Li7(p,n)Be7	3´10e8 n/sec at 2 MeV and 30 uA	Pulsed: frequency multiple of 330 ns. pulse width < 1 ns CW: max 30 uA	none. the neutron spectra is shaped by shaping the proton energy spectra	nuclear astrophysics, neutron activation, validation of nuclear data, next generation reactors data
LENS (Low Energy Neutron Source)	RFQ + 2 LINAC Sections	Protons, 13 MeV, 25 mA (peak) – current 18 MeV, 100 mA (peak) - planned	Be(p, n)	Target station 1 – 2 $x10^{10}$ n/cm^2/s current. 5 x 10^{11} n/cm^2/s (planned) Target station 2 – ~10^{13} n/s (current), ~$5x10^{13}$ n/s (planned)	Pulse, frequency 20 Hz, pulse width 0.015 – 0.6 ms (current), 0.015-2.0 ms (planned)	Target Station 1; User selectable – None, water, poly without light water reflector. Target Station 2: Solid methane at 4K with light water reflector	Target Station 1 Radiation effects – commercial and military electronics testing Neutron imaging (radiography and tomography) – geology, antropology, art Target Station 2 SANS – geology, materials science, biophysics Spin polarized reflectometer – biophysics, polymers Test Beam Line – detector and optics development, moderator research
CBA							

計画

Name	Type	Particl	Reaction	Intensity	Pulse	Moderator	Application
Consorcio ESS-BILBAO	proton Linac	proton	Be(p,n)	~1E15 n/sec at operating condition of current of 2.25 mA of protons at 50 MeV	Pulsed source, 20 Hz, 1.5 ms of pulse length	Cold moderator: Solid methane at 20 K with thermal water premoderator	We are not really sure about this point. Our idea is to "develop moderators and instruments for ESS", but we hope to do something else.
Neutron Application & Instrumentation Laboratory (NAIL), Sun Yat-Sen University	Neutron generator	Deuteron	Neutron generation D-D fusion	~10^{10} n/s global flux	CW but can be converted to pulsed mode	thermal and epithermal neutron generation	Neutron Activation Analysis, neutron imaging, & neutron therapy (preparatory)
LENOS (LEgnaro NeutOn Source)	RFQ -5 MeV- 50 mA CW)	Protons, 5 MeV, 50 mA	Li7(p,n)Be7	3´10^{14} n/sec at 5 MeV, 50 mA (simulated)	CW. in the second phase, pulsed with 125 kH rep rate, pulse width 2 ns	none. the neutron spectra is shaped by shaping the proton energy spectra	nuclear astrophysics, neutron activation, validation of nuclear data, next generation reactors data

加速器中性子源開発

大型中性子源から小型中性子源へ　**大型はESS、CSNSのみ**

日本では、

1）イメージング・物質材料評価用中性子源

研究所、主要大学、企業へ設置

必要に応じて使える装置へ

研究・教育・産業応用

＊目的とするエネルギーの中性子特性を最高へ

2）ボロン中性子捕捉療法用中性子源

病院併設のための加速器ベースの施設

安定性、

＊高速中性子混入率条件を満たすことが強度を支配

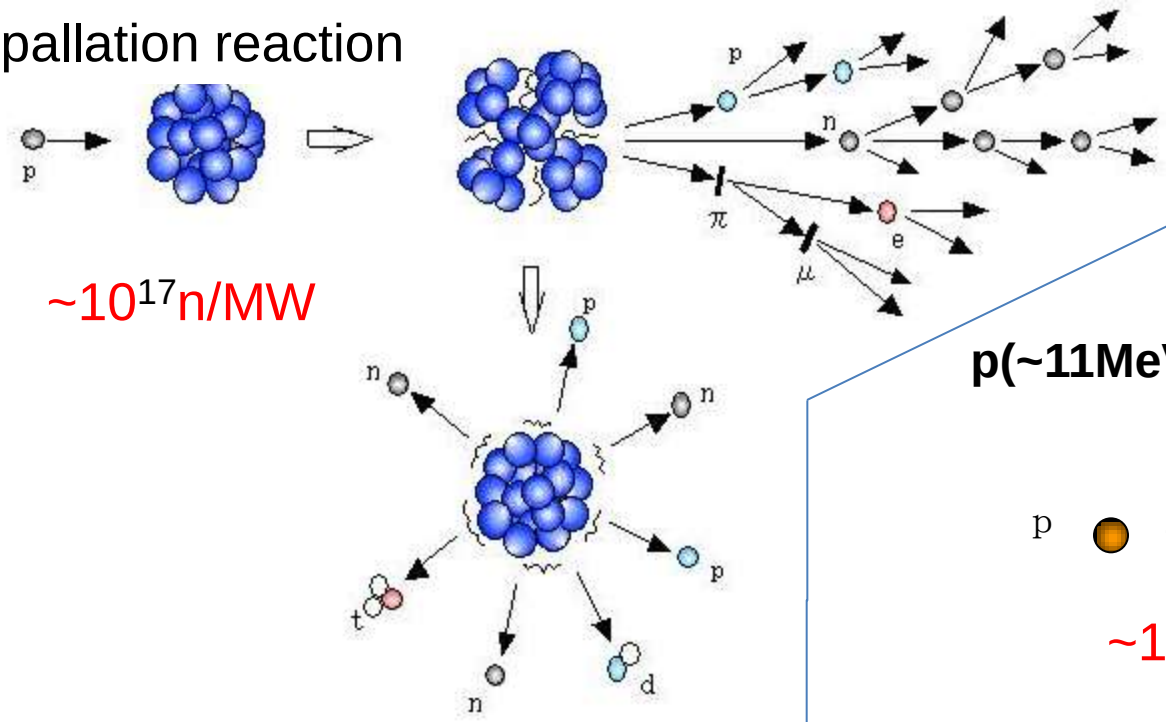
◎　ターゲット開発は共通の課題

（小型に要求されること）

低放射化（特にBNCT）：低エネルギー加速粒子、材料選択

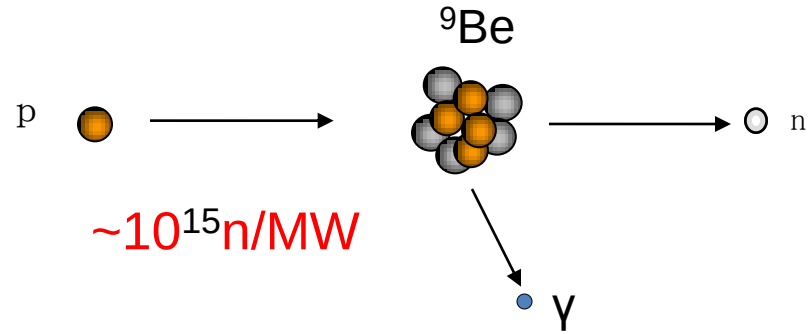
コンパクト化：遮蔽を含めたさらなる最適設計

Spallation reaction



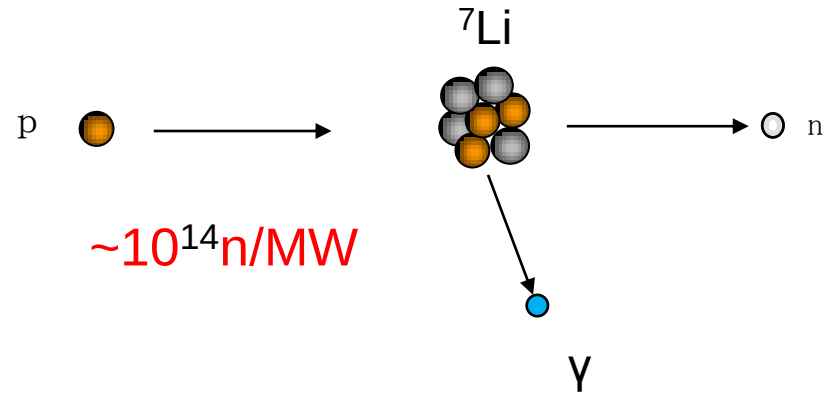
~10^{17}n/MW

p(~11MeV)（Be,n) reaction



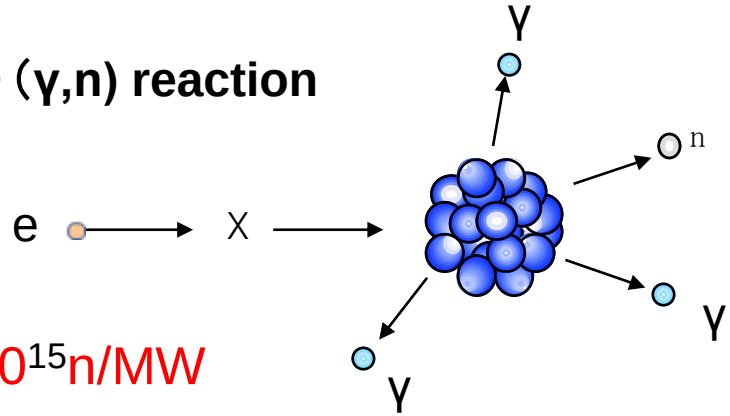
~10^{15}n/MW

p（~3MeV) (Li,n) reaction



~10^{14}n/MW

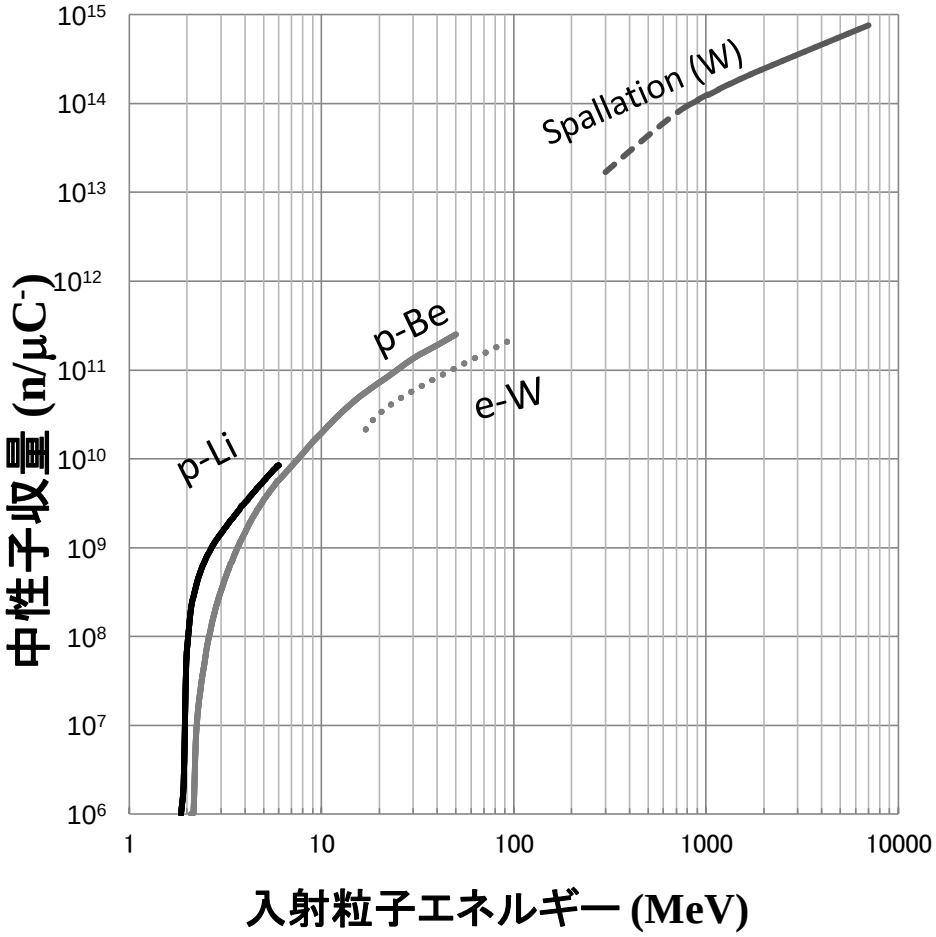
(e,γ)（γ,n) reaction



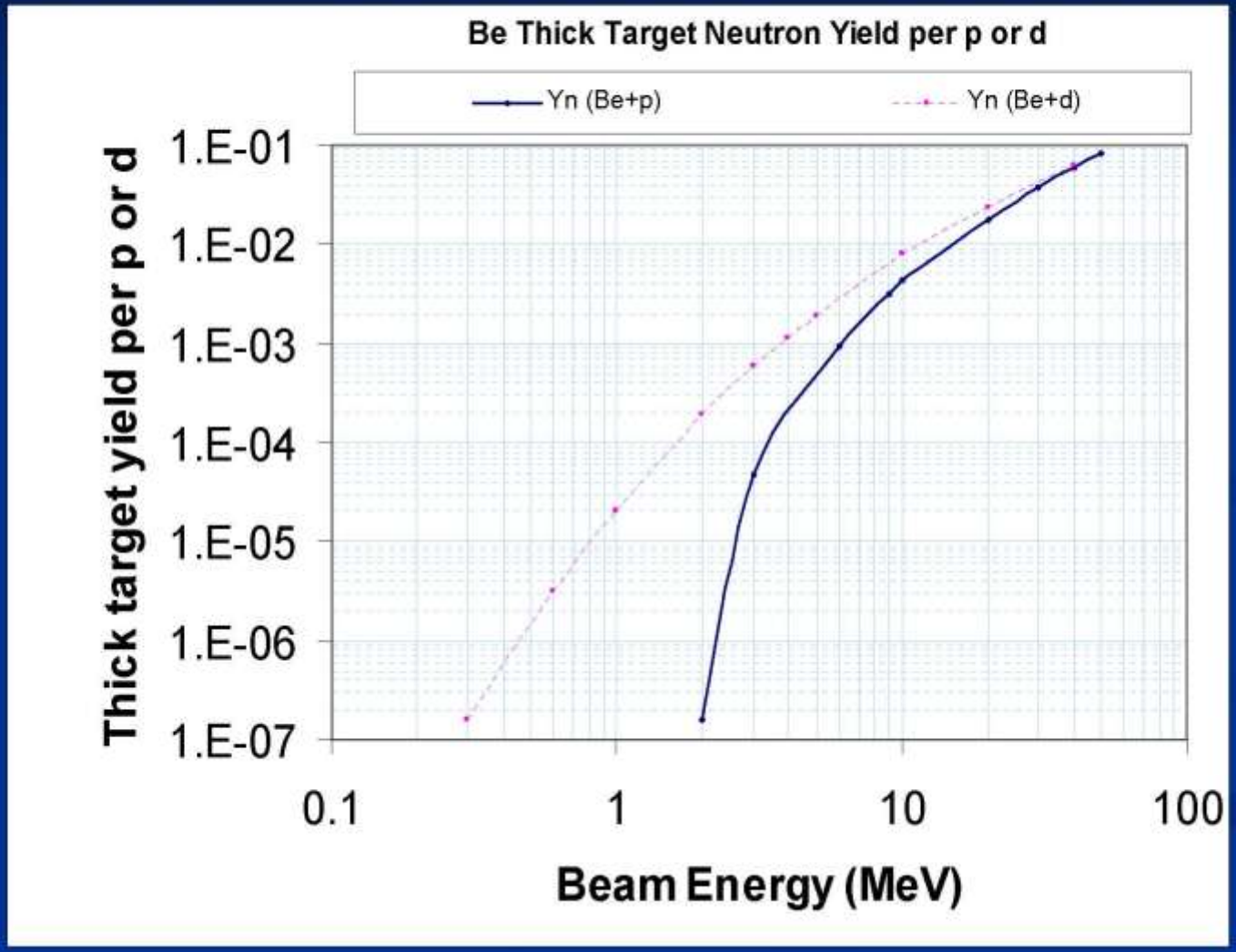
~10^{15}n/MW

主な中性子発生反応

入射粒子エネルギーと中性子発生量



n Source Reactions



中性子源設計にあたって

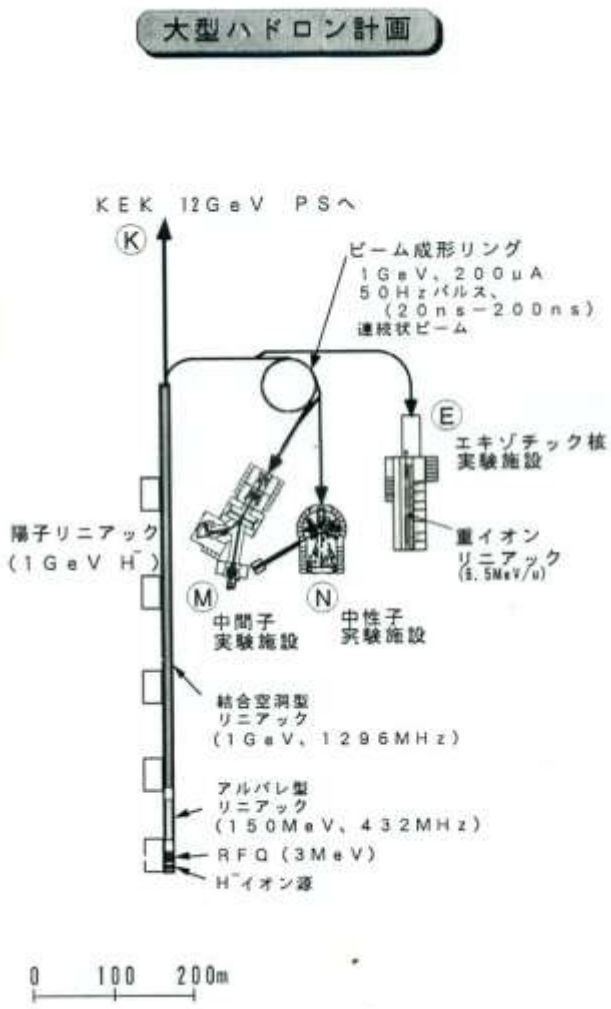
- ビーム実験の目的に合わせる。
  （加速器の仕様に引きずられない。）
  SNS：６０Hz、 J-PARC：３GeV、２５Hz
- ビーム実験者が中心になって（参加して）設計する。
  JHFからJ-PARC：渡邊先生（KENS分光器）
  鬼柳（LAM-40,LAM-80,LAM-D)
  古坂先生（SANS他）
  SNS:E. Iverson, F. Ferguson
  ISIS-TS2：S. Bennington(非弾性装置群の責任者）
- （加速器＋中性子源+デバイス＋分光器＋ソフト）の全体を最適化する。
  北大やKENSを設計したときとはデバイス等の性能が違う。

J-PARCへ向けて（開発の歴史）

- KEK:GEMINI計 oject：大型ハドロン)
  →JHF(Japan → J-PARC
  原研：中性子

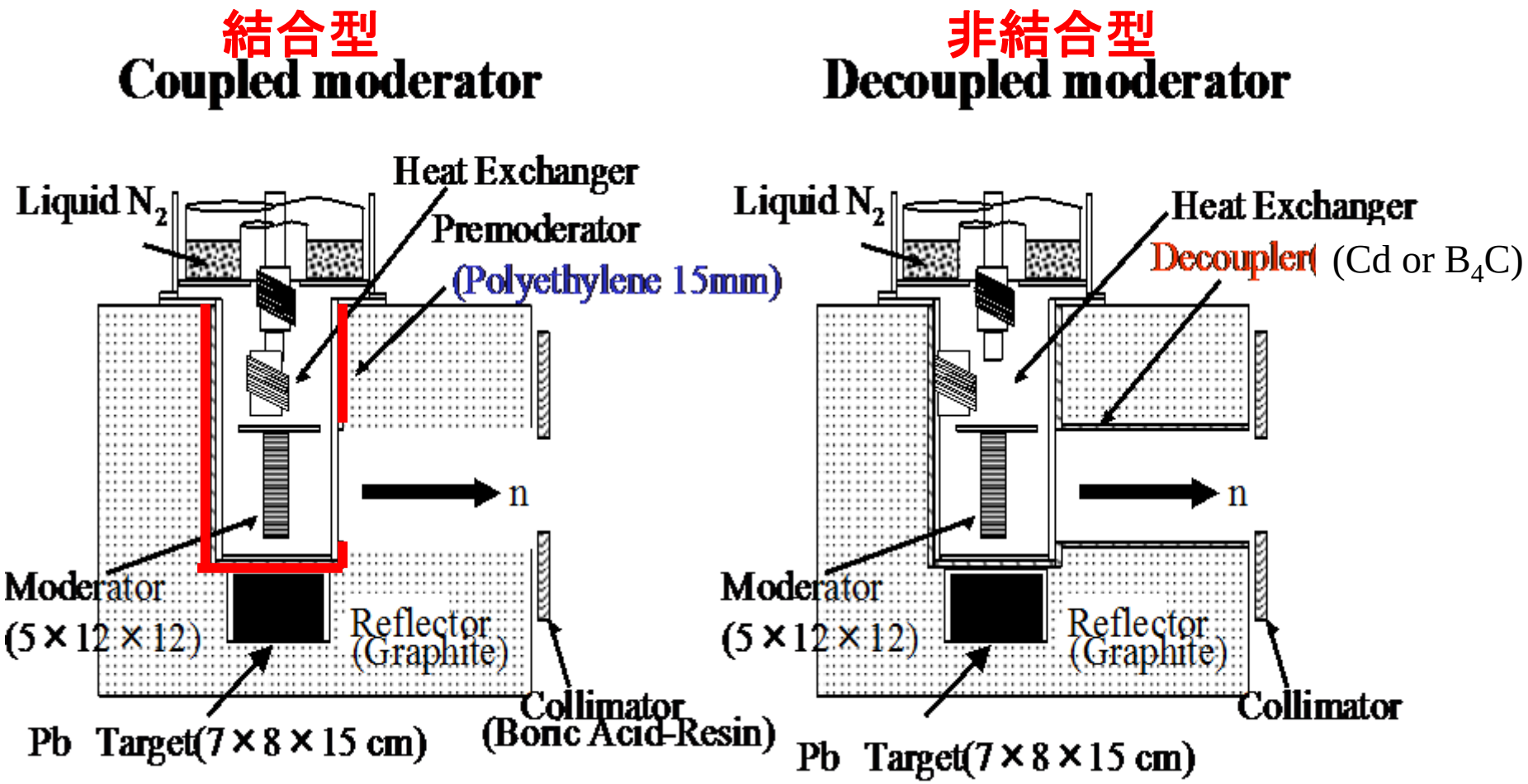
KENSでの中性 将来計画のた
めの中性子源 の共同研究）

- プロトンエネ
- 高性能中性
  KENSで使 使用不可
  液体水素
  液体水素 か？



ビーム実験用中性子源

減速材のタイプ



結合型減速材の性能

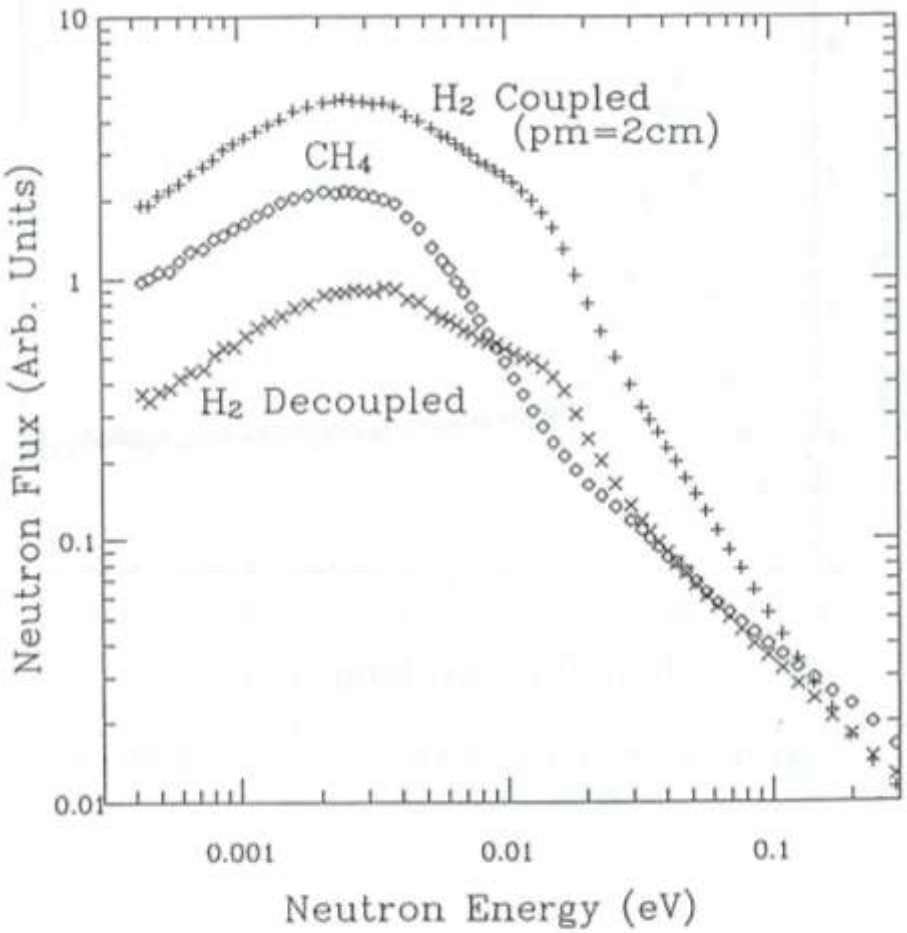


図6.12　カップリング型液体水素とデカップリング型固体メタンの中性子スペクトルの比較

これまで使われていたものと比べて約6倍の強度。非結合型固体メタンよりも強度が高い。

中性子放出時間分布の比較

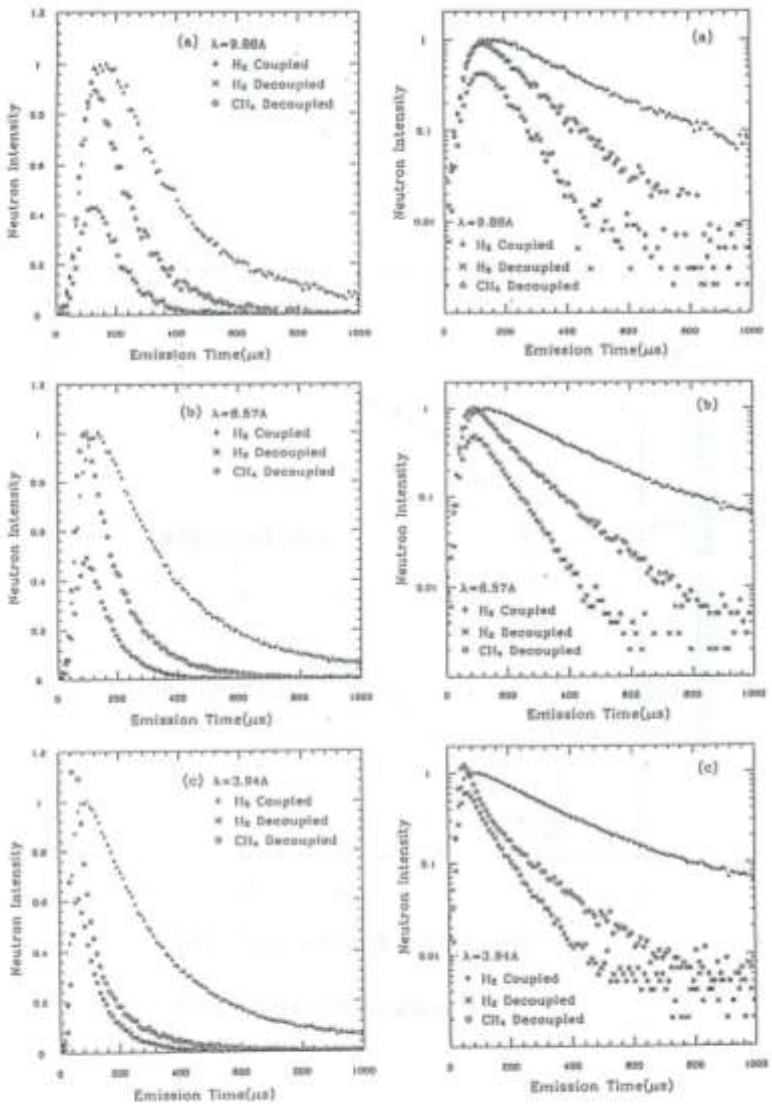
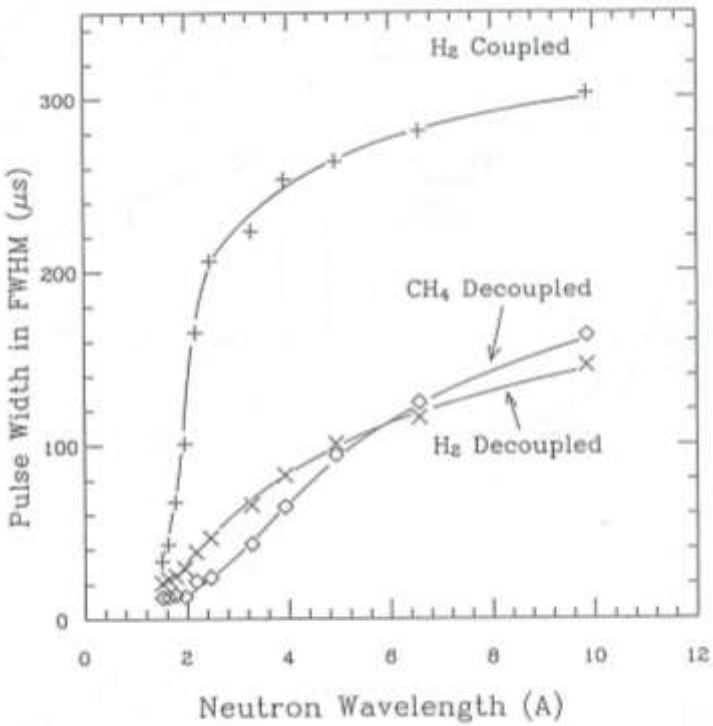


図6.19 冷中性子領域における放出時間分布の比較
左図：直線プロット

パルス形状の比較



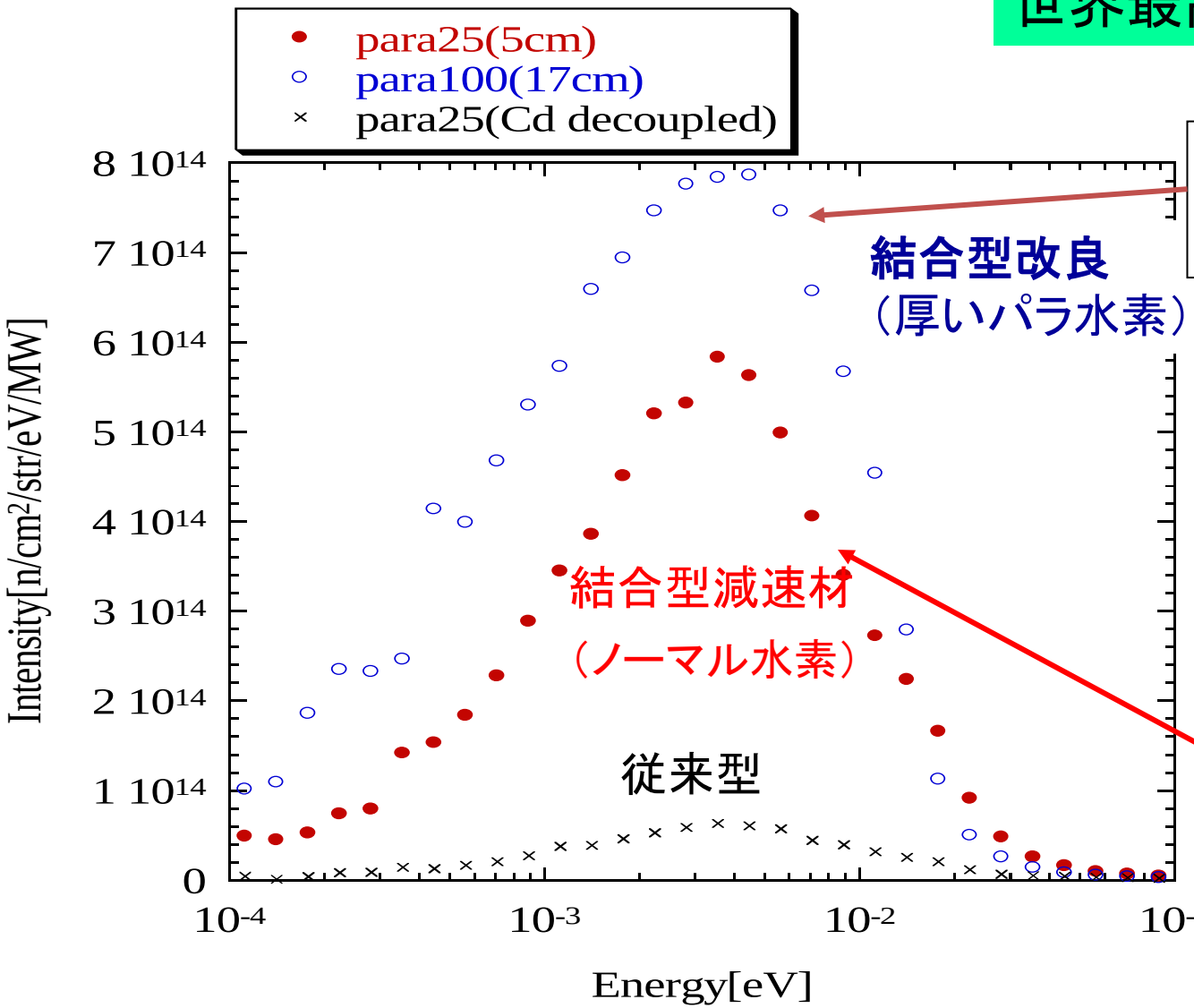
半値幅の比較

放出時間分布も極端に長くない。パルスピークが高い。

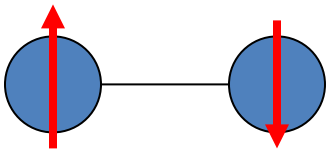
J-PARC用減速材として目途がたった。

パラ水素による液体水素減速材の特性改善

世界最高効率の減速材



パラ水素採用
約1．5倍

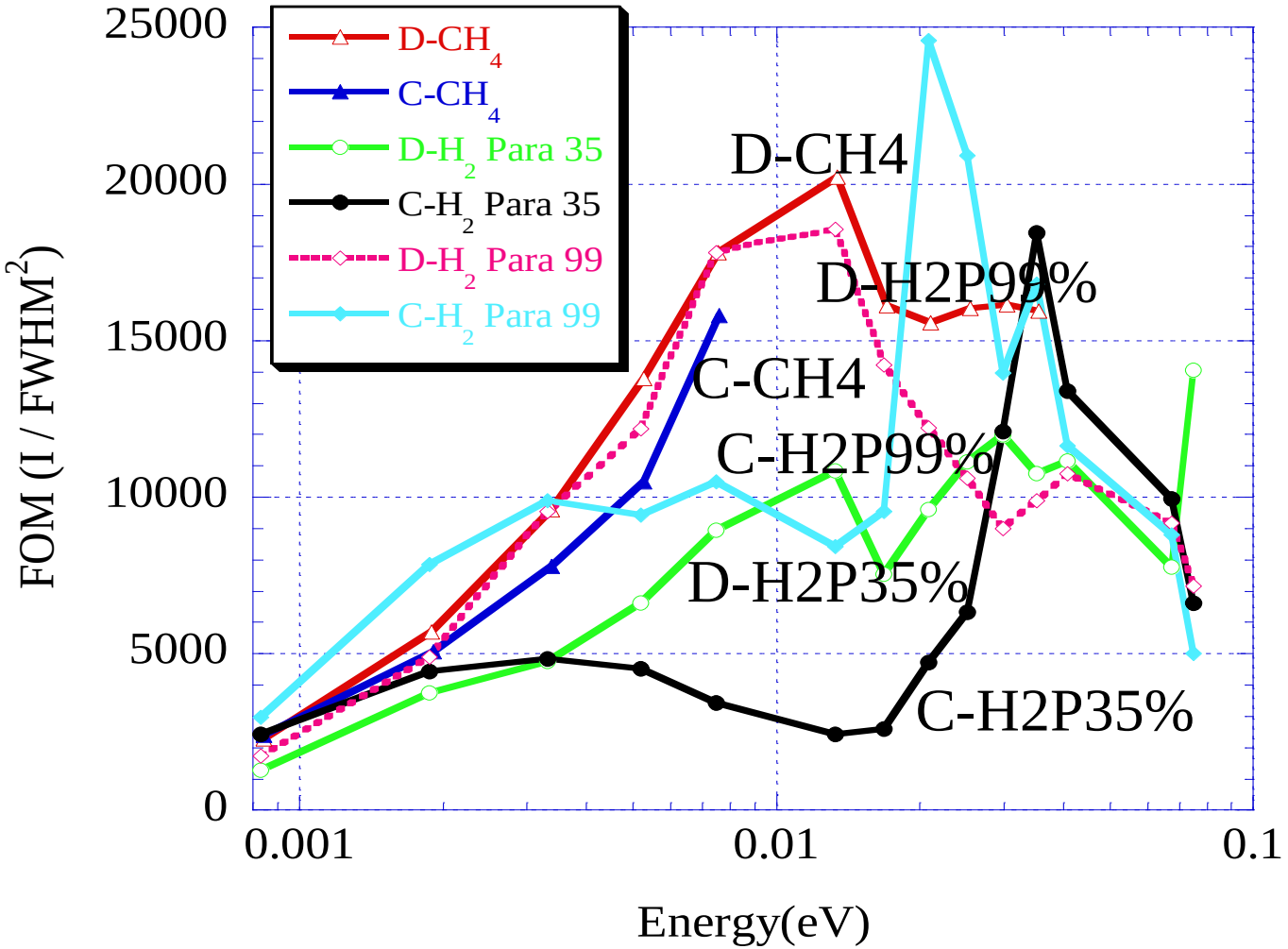


パラ水素

6倍の強度増

メタンと水素の利得指数比較
（実験　厚さ5cm）

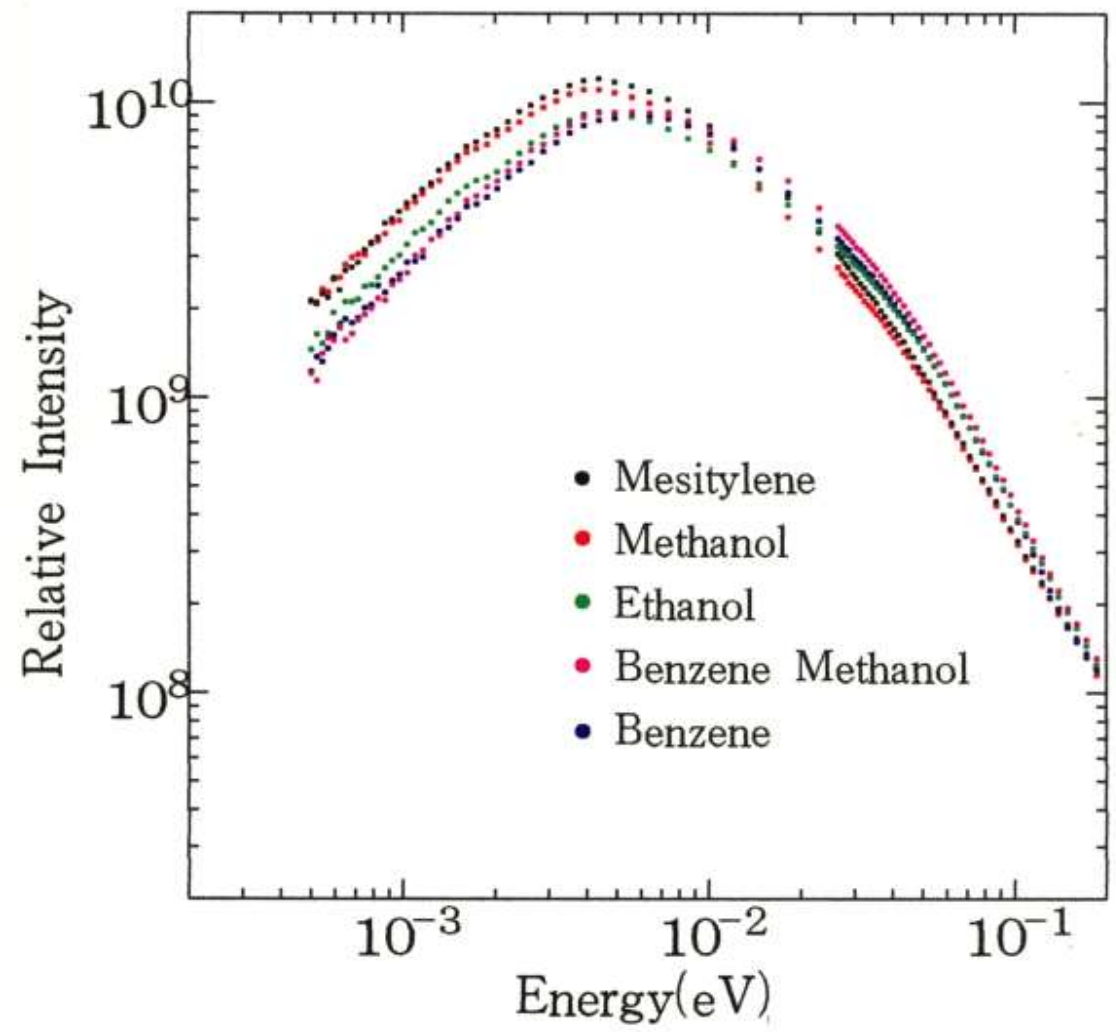
10^{14}n/sec（旧KENSの強度）を境にメタンを使用することに難しさが生じる。



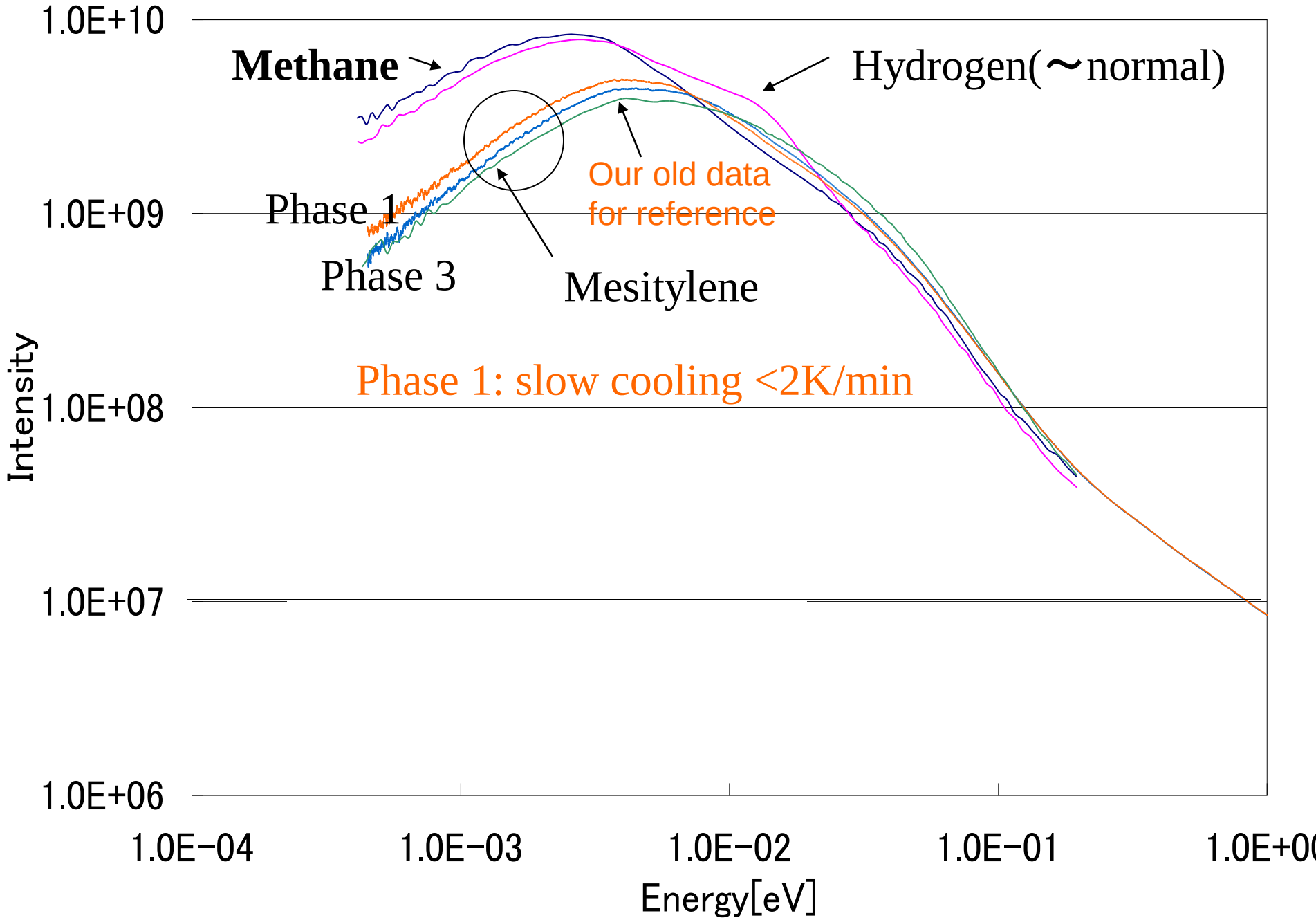
別の減速材物質の探索

非爆発性減速材物質の中性子スペクトル

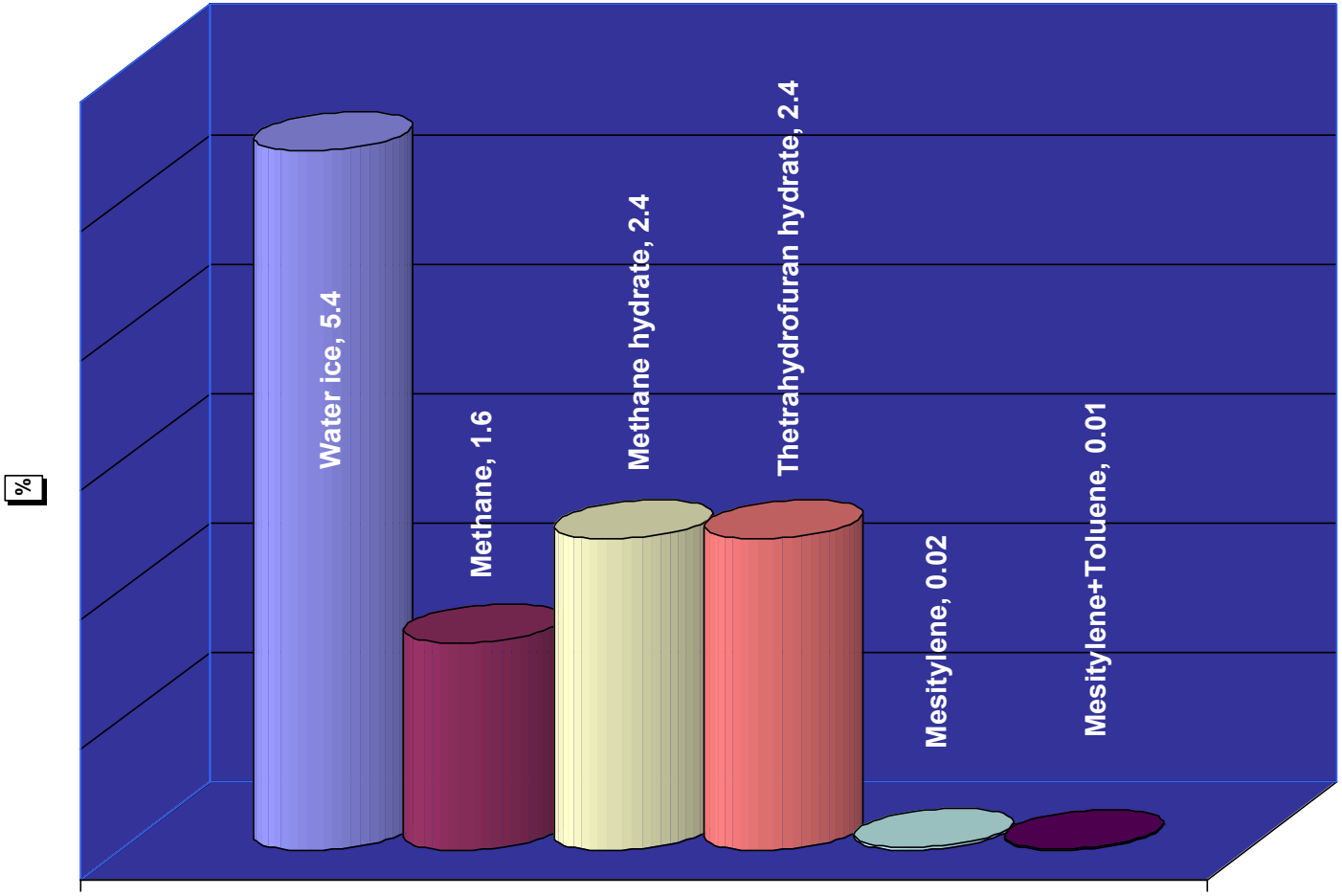
Mesitylene and methanol give almost the same highest intensity spectra.



Comparison of spectra from coupled moderators

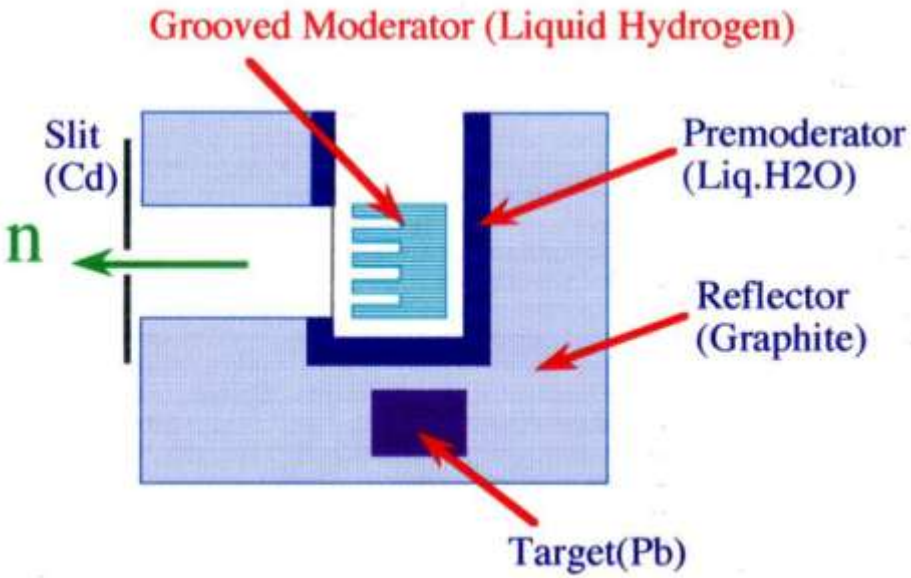


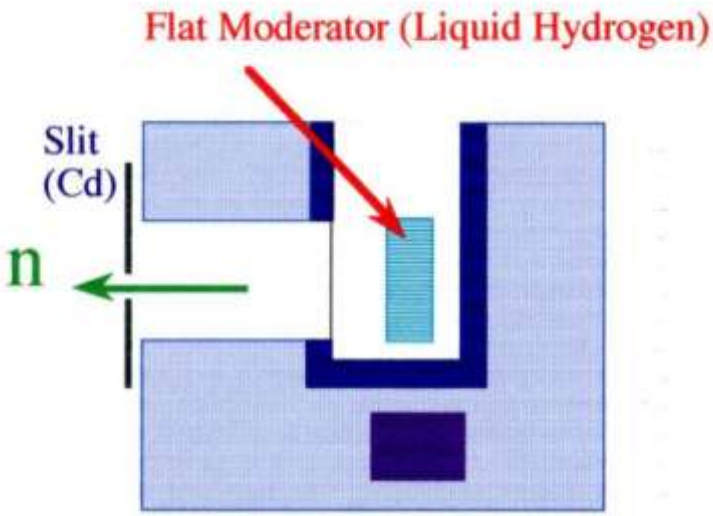
Radiation damage of the moderator materials (Kullikov et. al.)

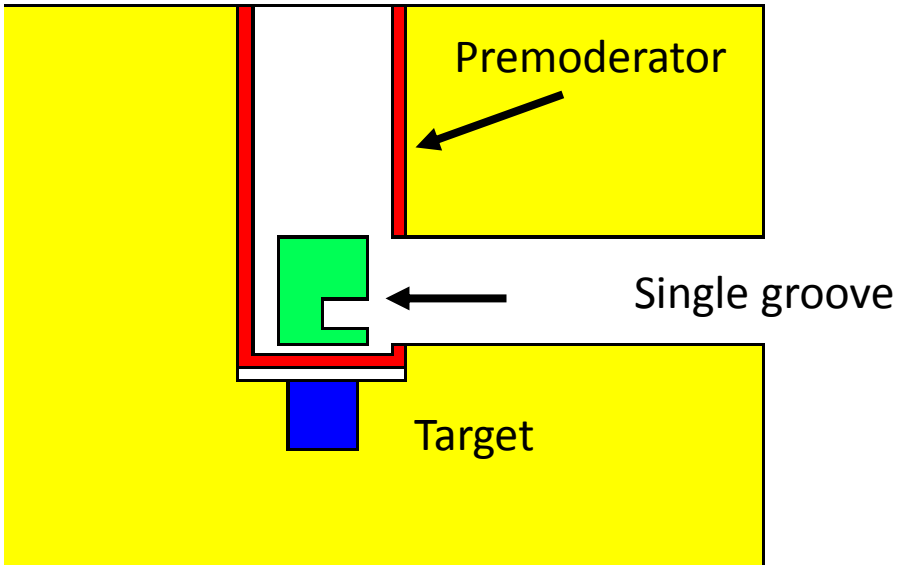


放射線損傷の観点からはメジチレン、性能からはメタン、パラ水素
10^{14}n/secが境目

グルーブド減速材


Grooved Moderator (Liquid Hydrogen)
Slit
(Cd)
n
Premoderator
(Liq.H2O)
Reflector
(Graphite)
Target(Pb)

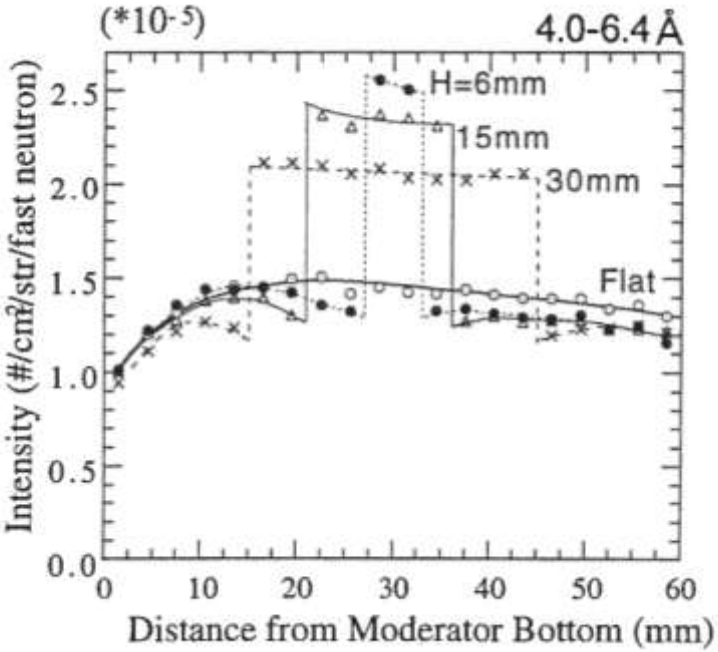

Flat Moderator (Liquid Hydrogen)
Slit
(Cd)
n

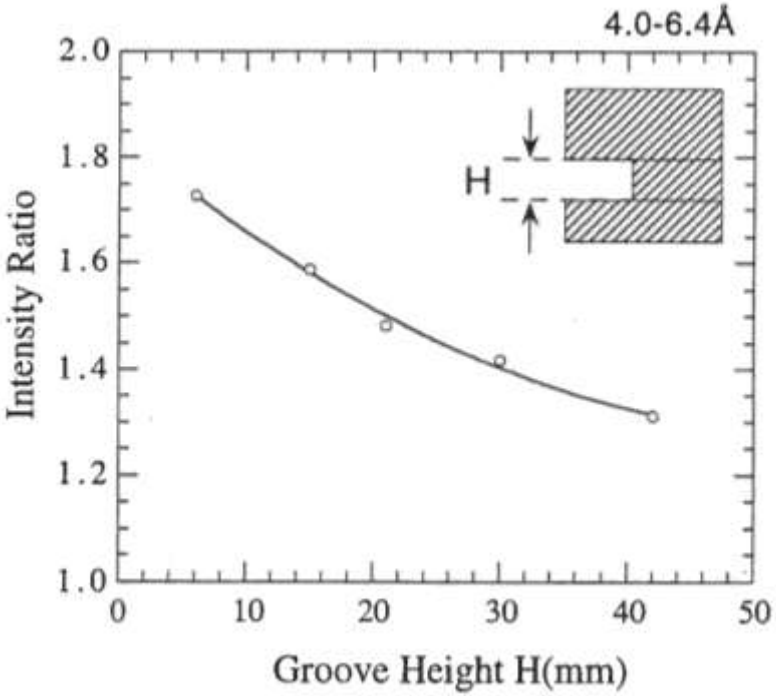

Premoderator
Single groove
Target

Shape optimization of a grooved surface

(Simulation study on a coupled moderator)

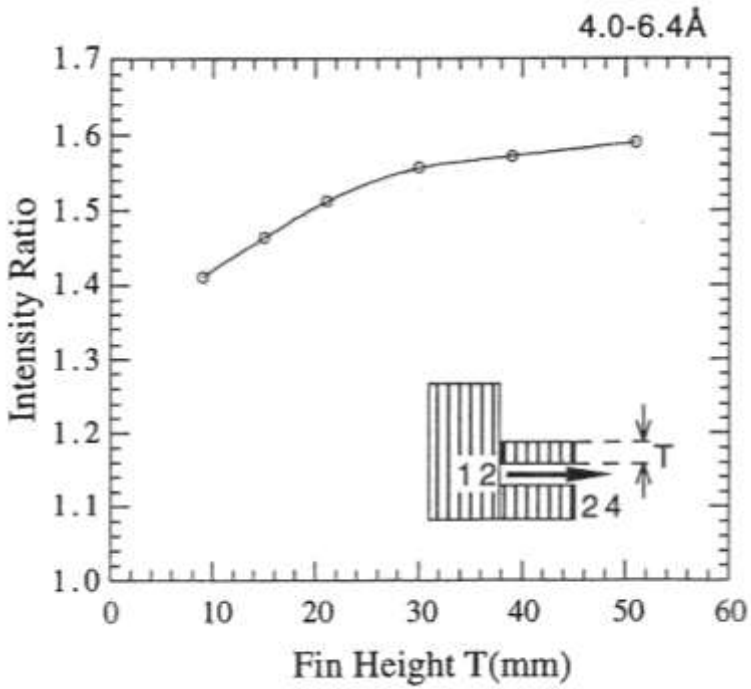
(a) Groove height



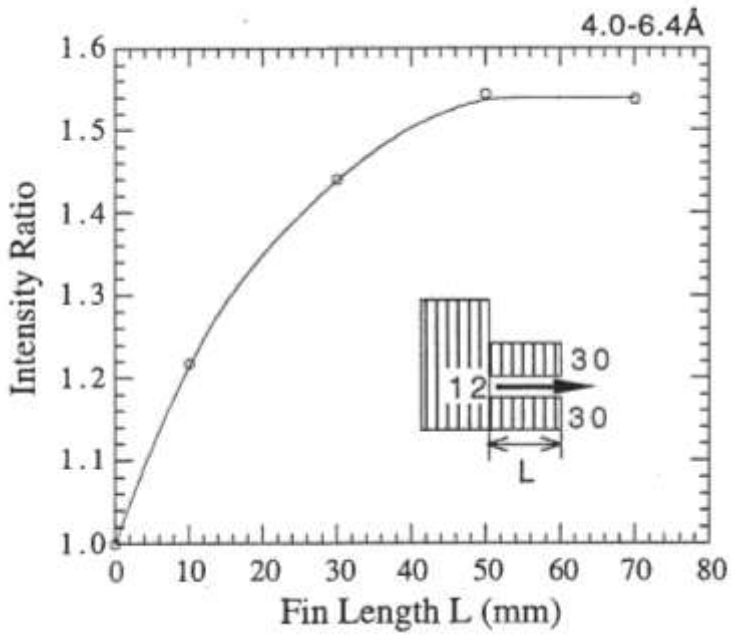


Thinner is better.

(b) Fin height

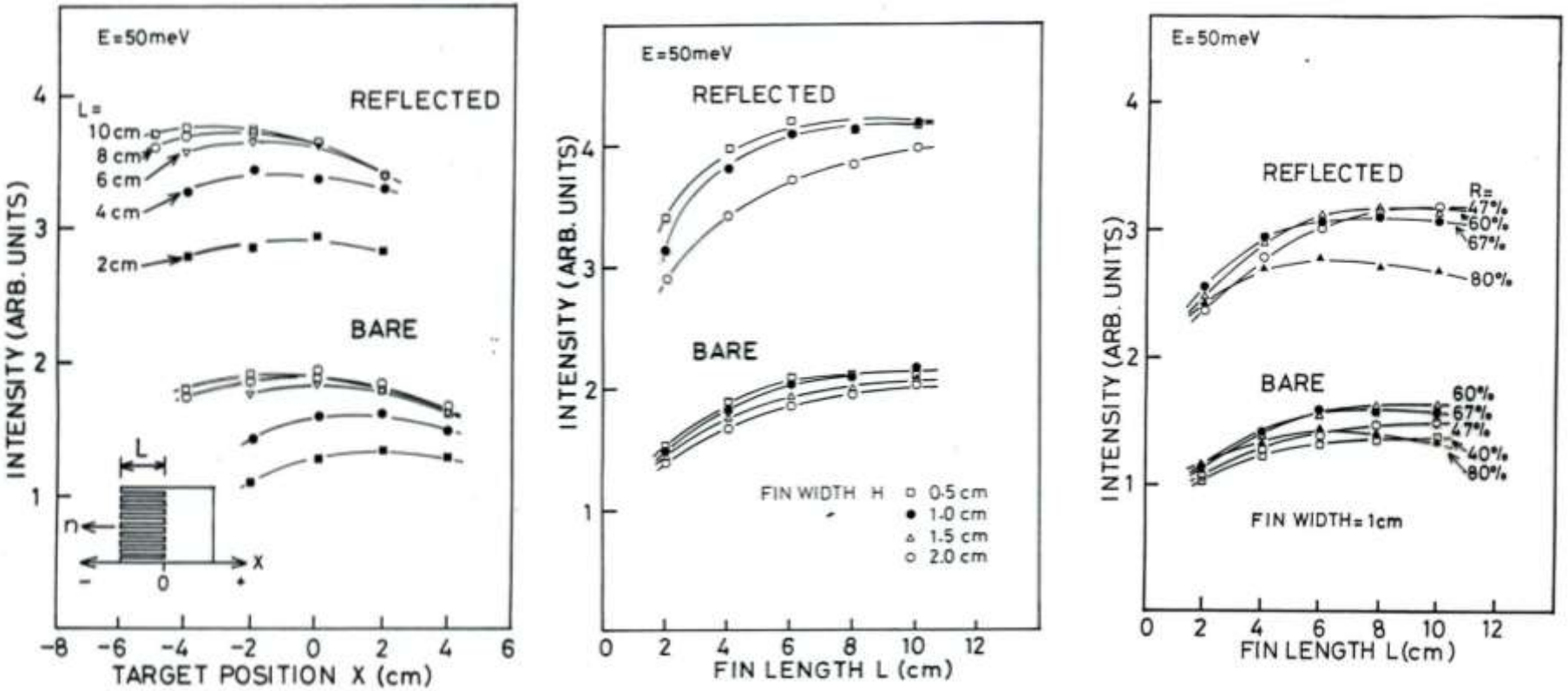


(c) Groove depth (Fin length)

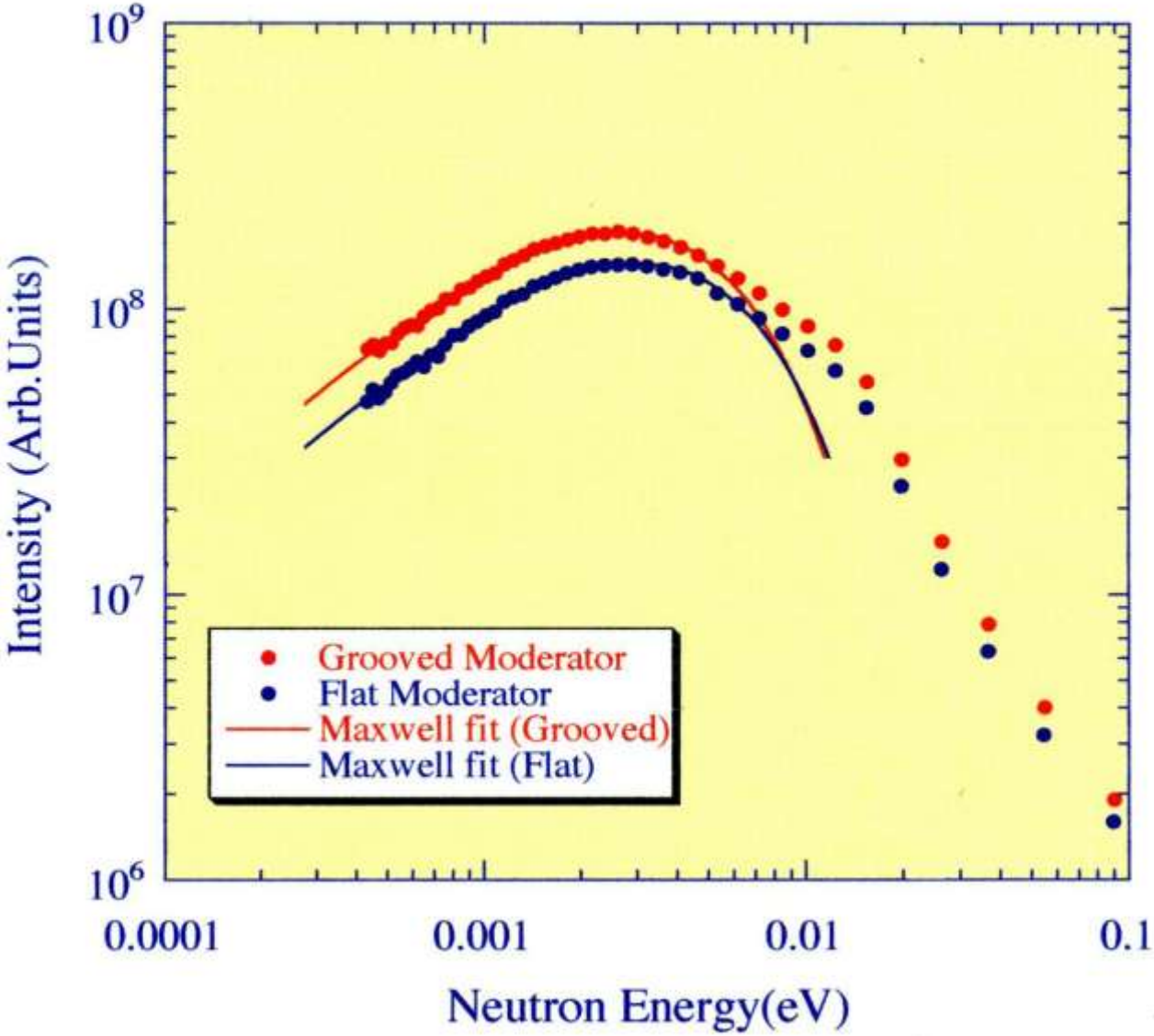


熱中性子源グルーブドの最適条件

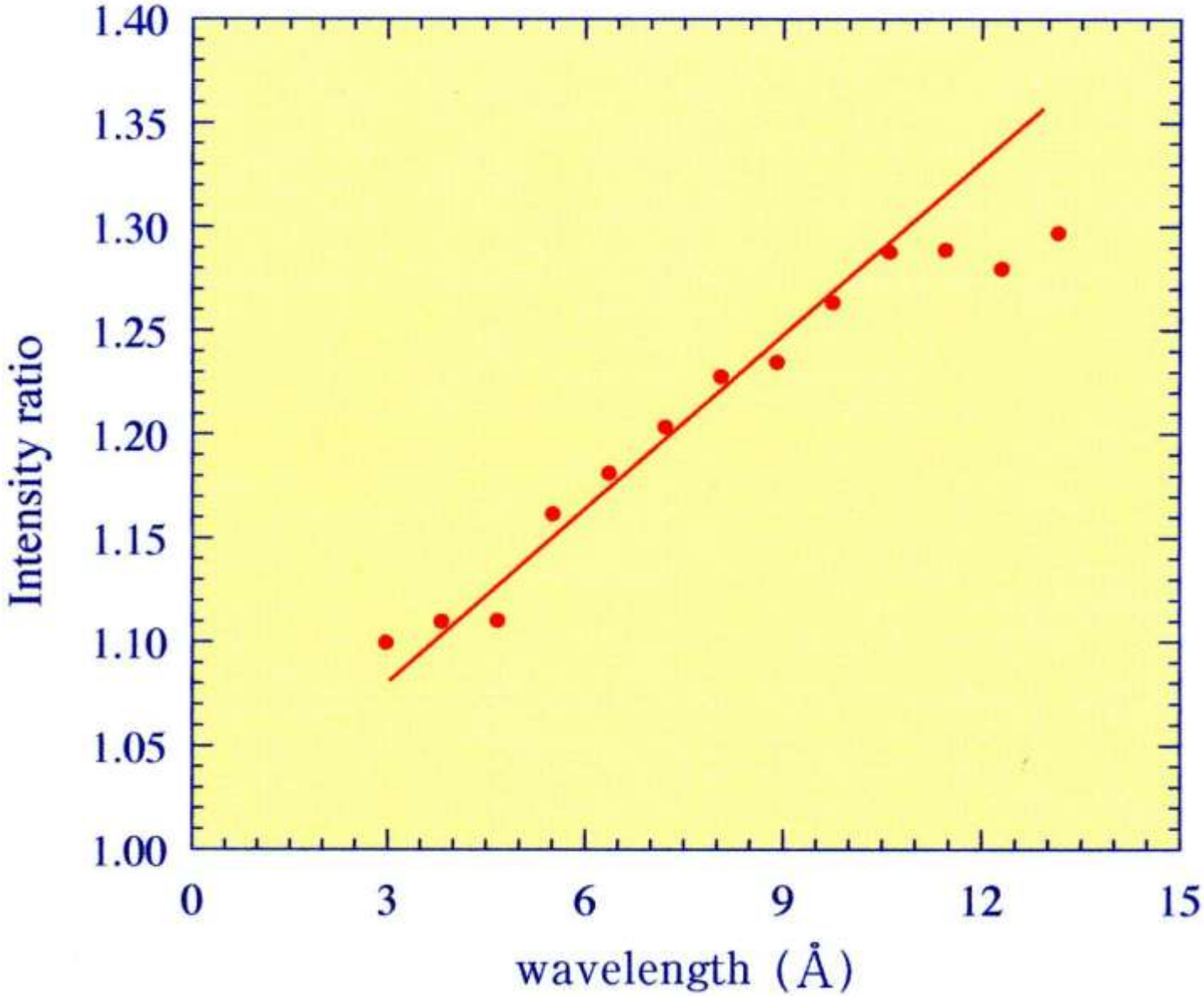
長さ　8cm、面積　60%程度



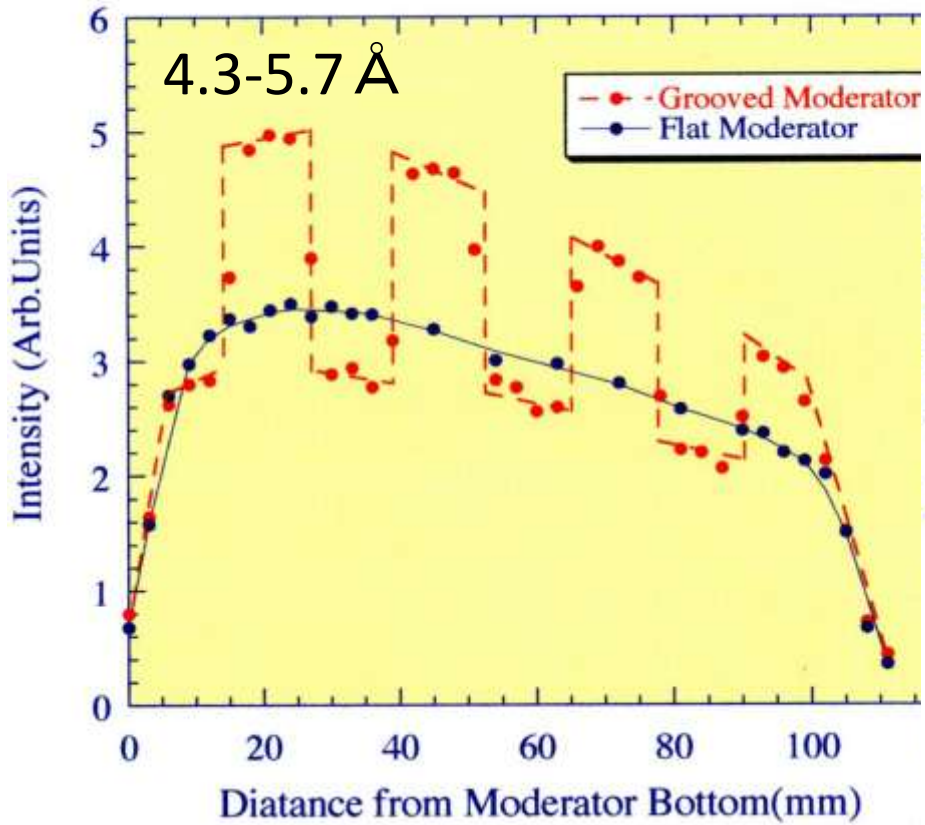
Energy Spectrum

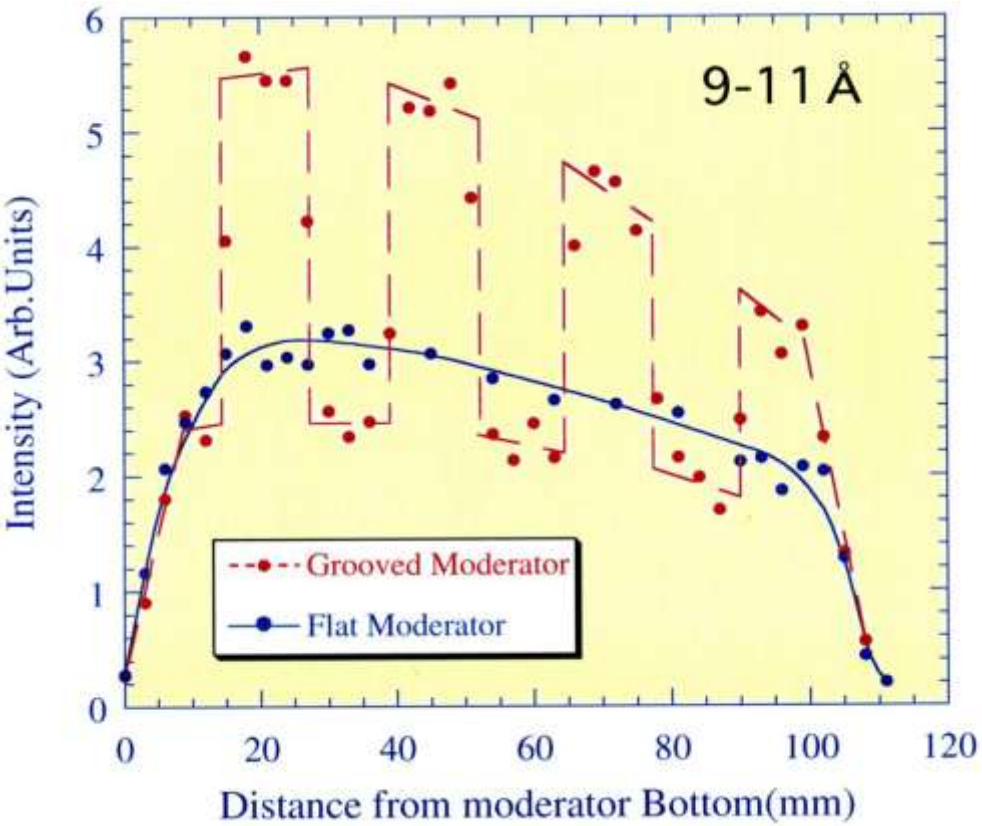


Intensity ratio



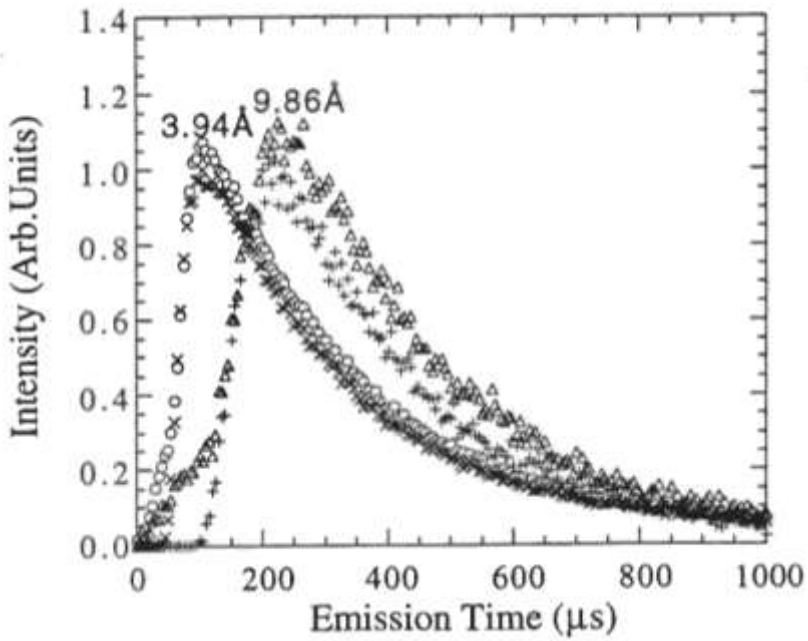
Spatial Distribution



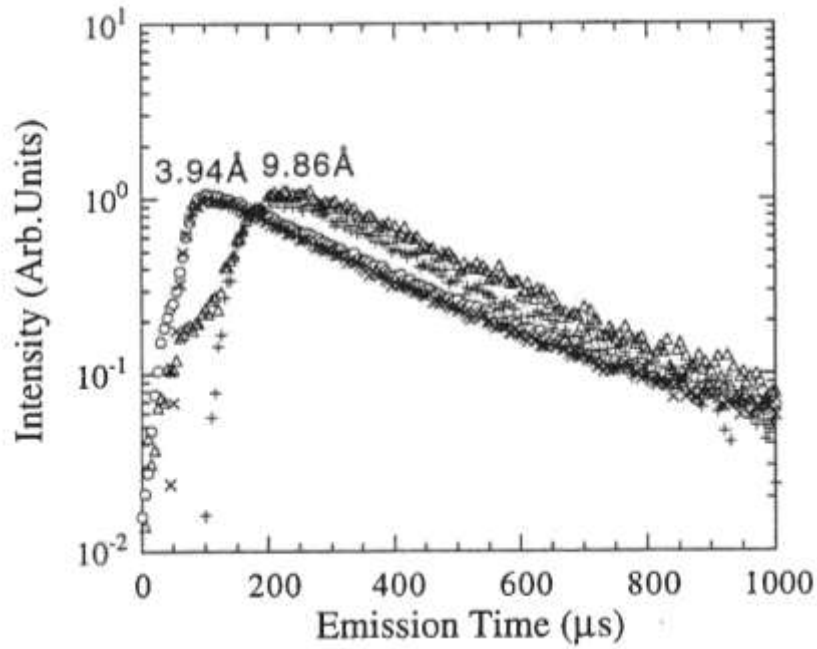


Comparison of pulse shapes (Flat and grooved)

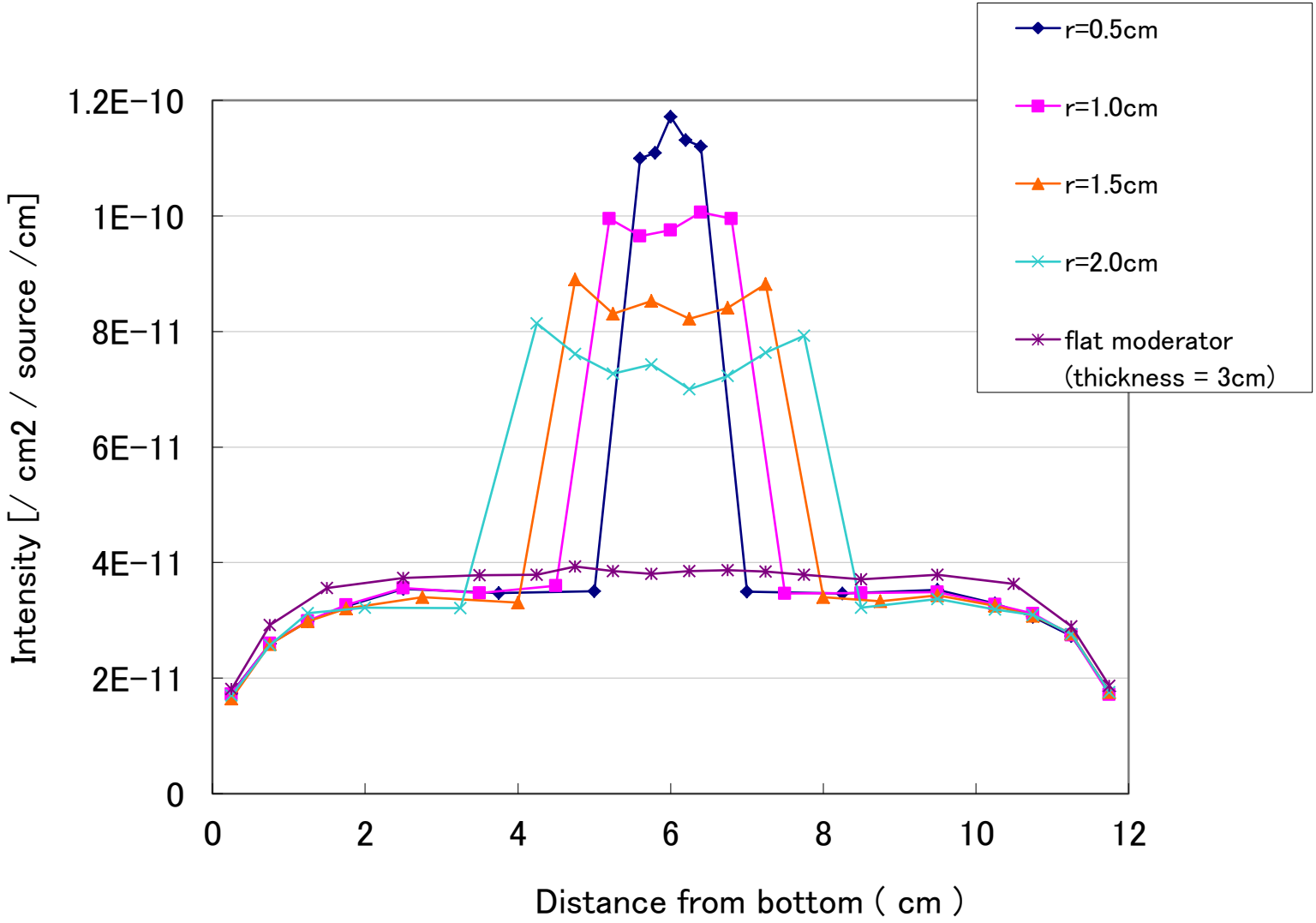
a) Linear plot



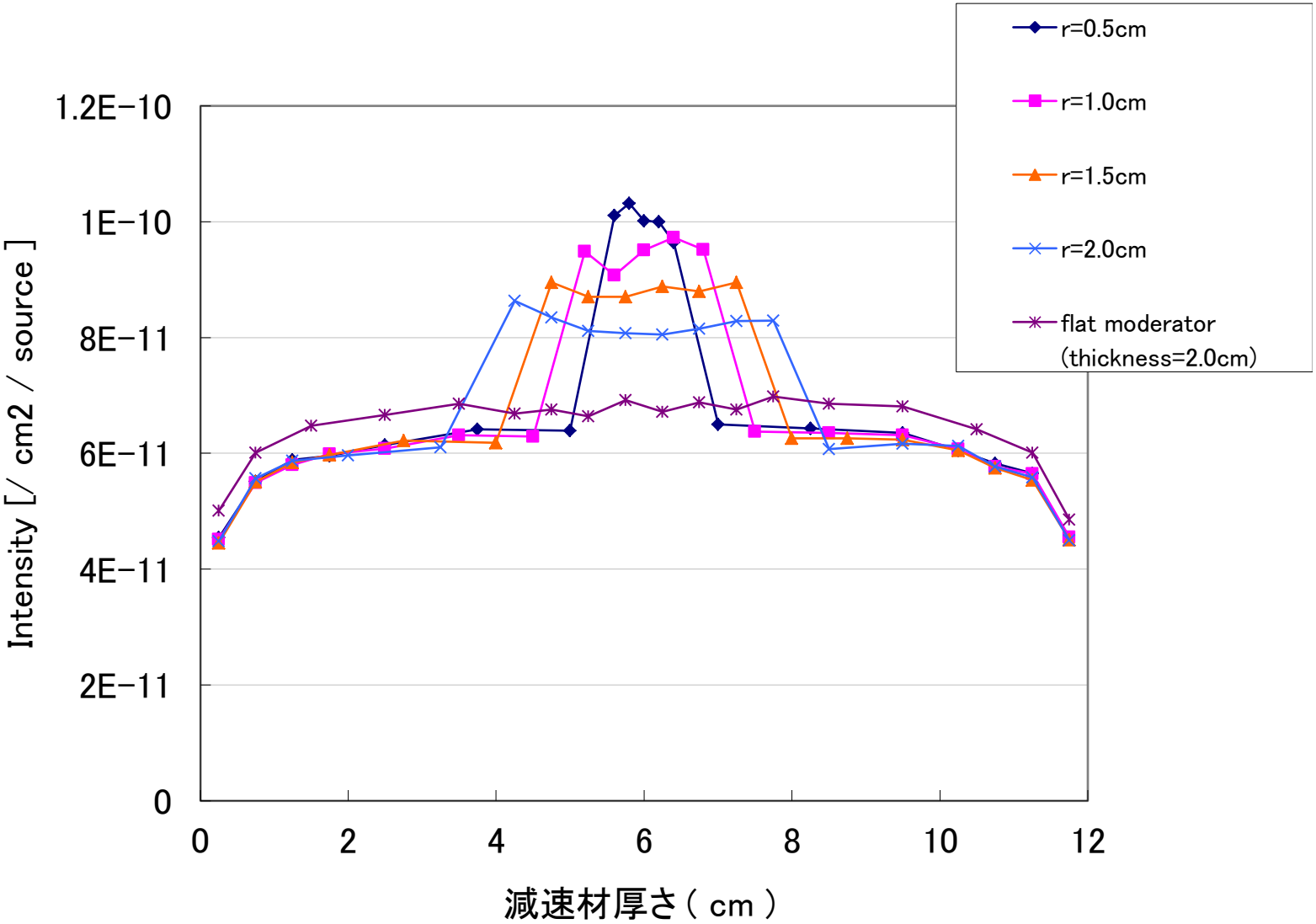
b) Semi-logarithmic plot



Spatial distributions
（Slab Mesitylene）

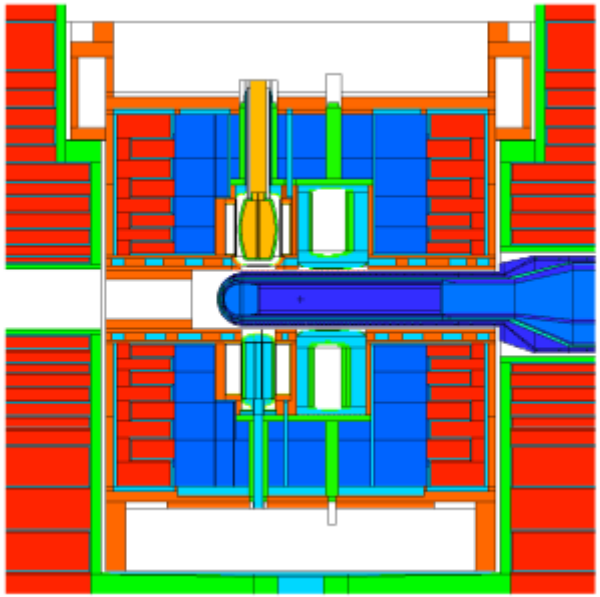


Spatial distributions
（Slab Methane）



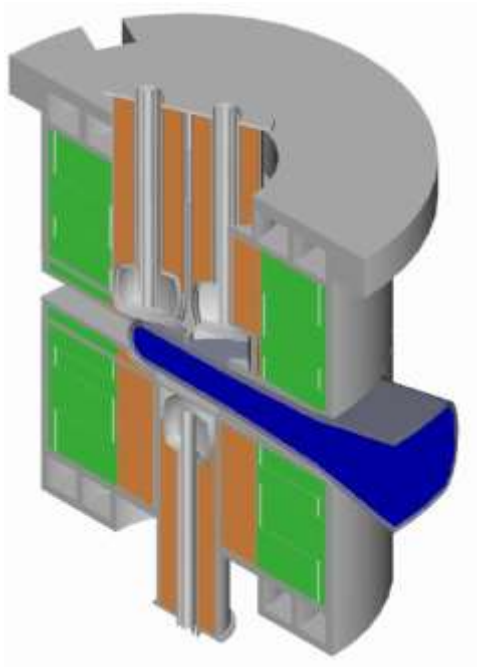
Target-moderator-reflector system

SNS



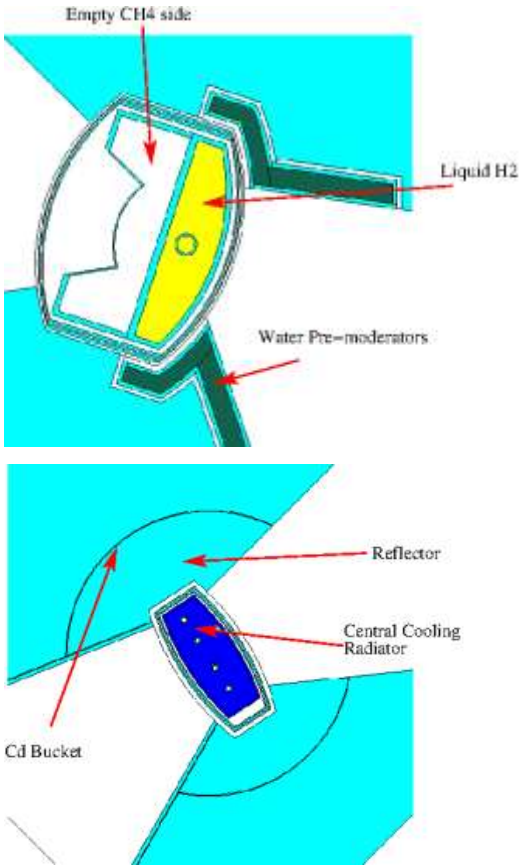
オルソ・パラ比不明
結合型と非結合型が隣接

J-PARC



パラ水素
結合型と非結合型が分離

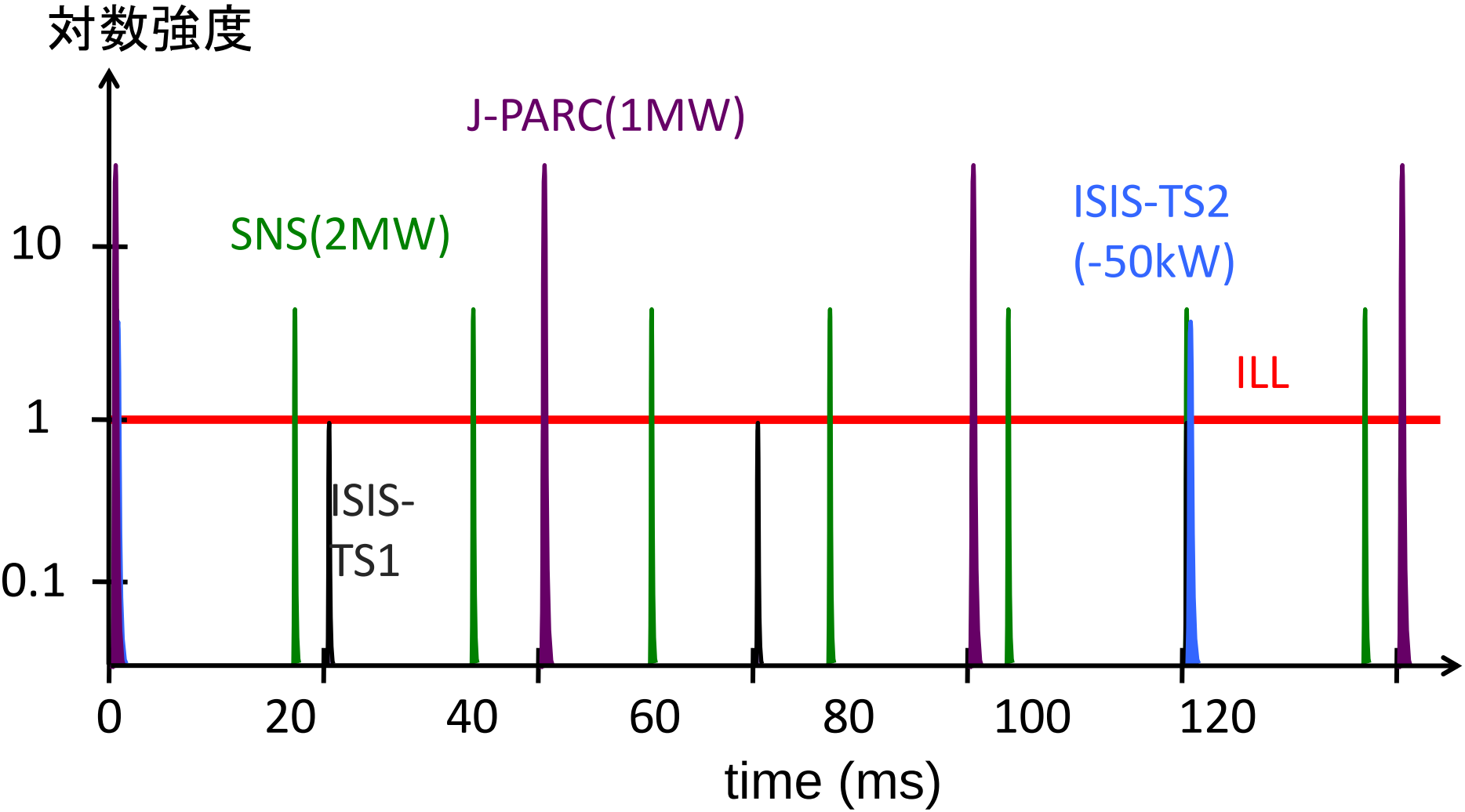
ISIS -TS2



メタンを使用
コンパクト設計

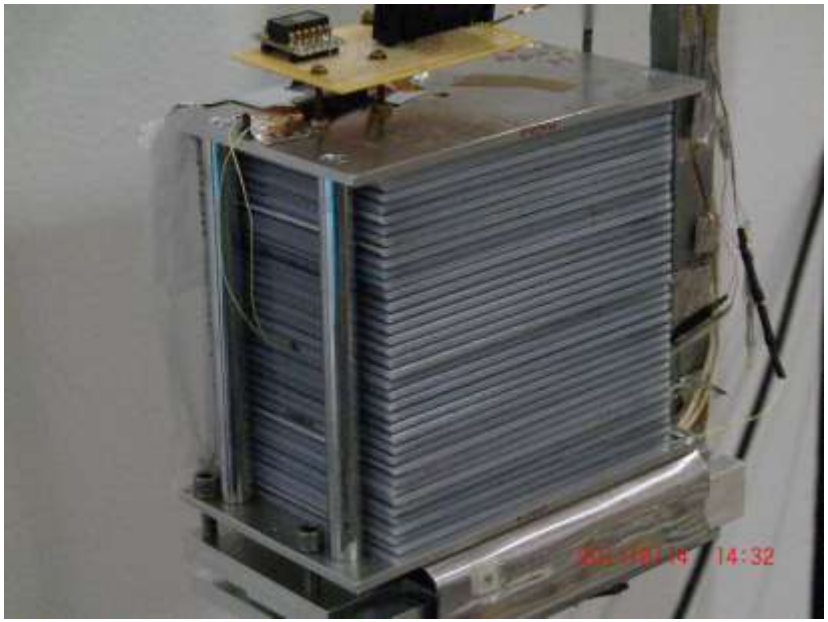
色々な施設の冷中性子パルス強度の比較

(ESSの報告より)



新しい減速材のアイデア

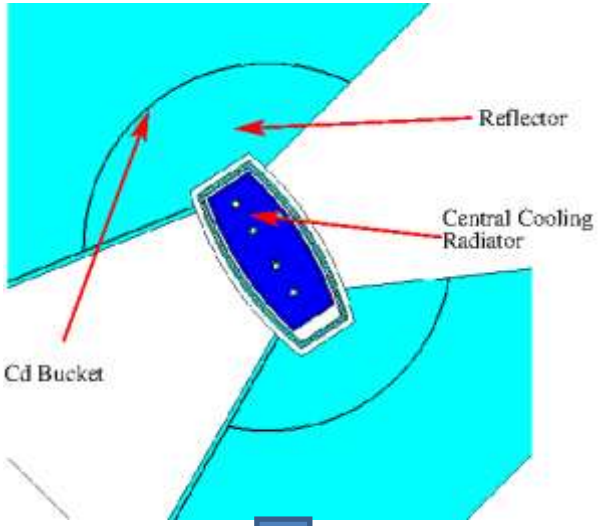
①



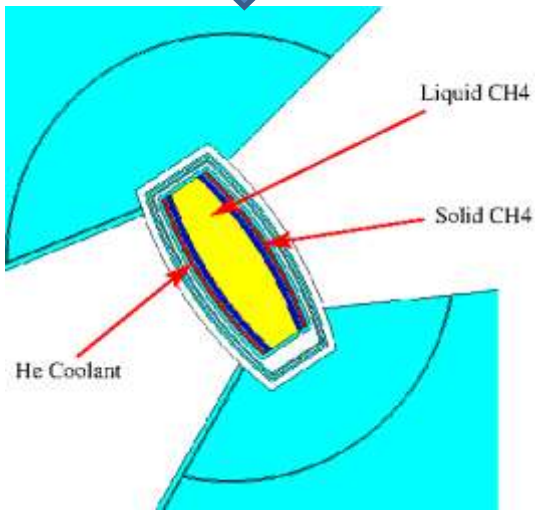
Siとポリエチを組み合わせたオリエントビーム
Bragg gain ？ E. Iverson

北大でグルーブとSiを組み合わせた
計算→ゲインなし？

②



S. Ansell



液体と固体の2層
スペクトル変化

③

極低温メタン
長波長中性子

加速器中性子源を用いた研究（HUNS＆J-PARC＆ISIS)

- パルス中性子イメージング
- ソフトエラー実験
- mfSANSと関連デバイス開発
- 核データ測定

パルス中性子を使ったイメージング

写真　　中性子では中が見える　　エックス線は中が見えない

RADIOISOTOPES　　Vol. 56, 1

図 1　一乗寺経塚出土経筒の概観[5]

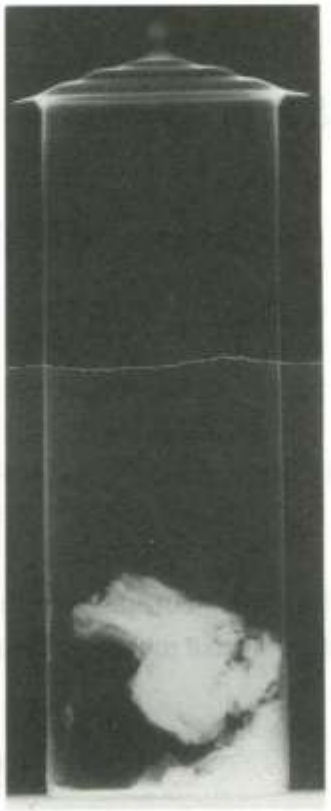


図 2　経筒の NR 画像[5]

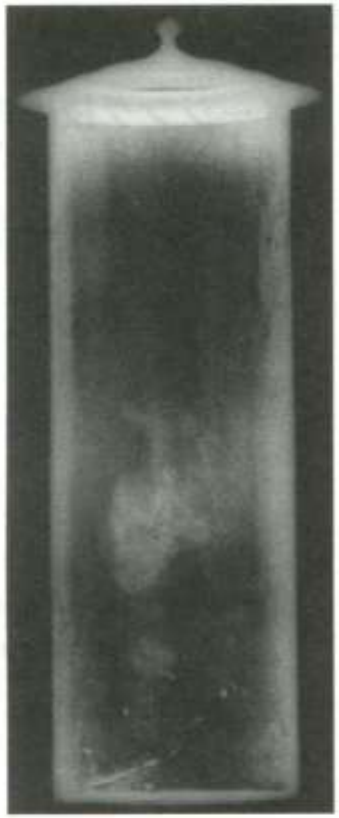
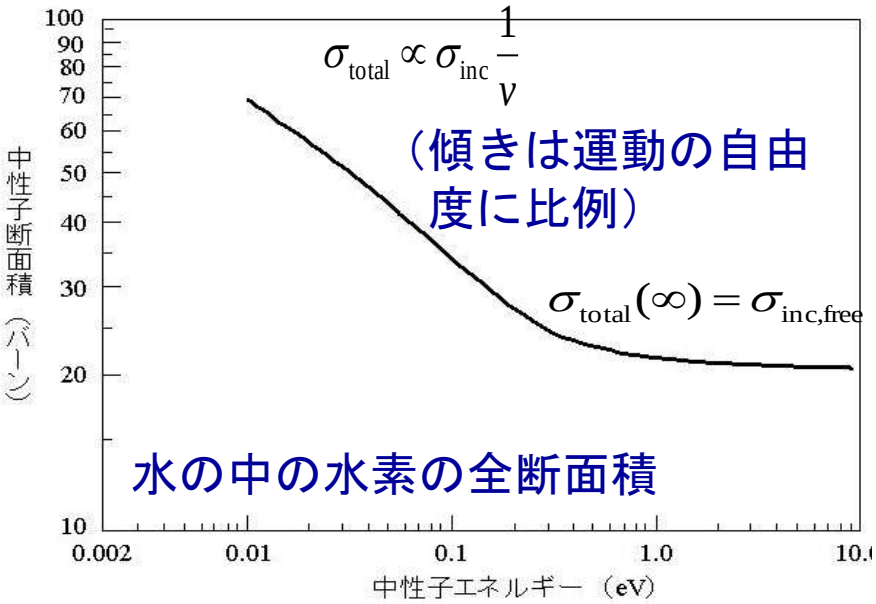
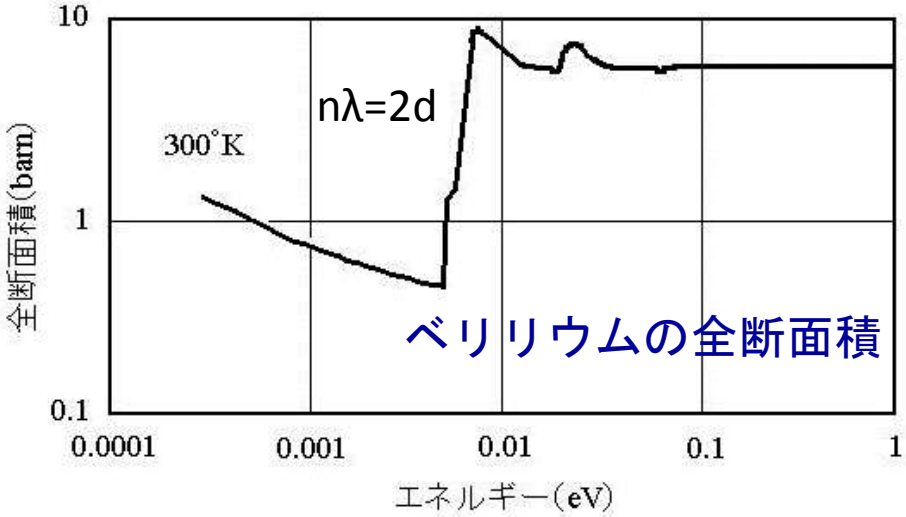


図 3　経筒の XR 画像[5]

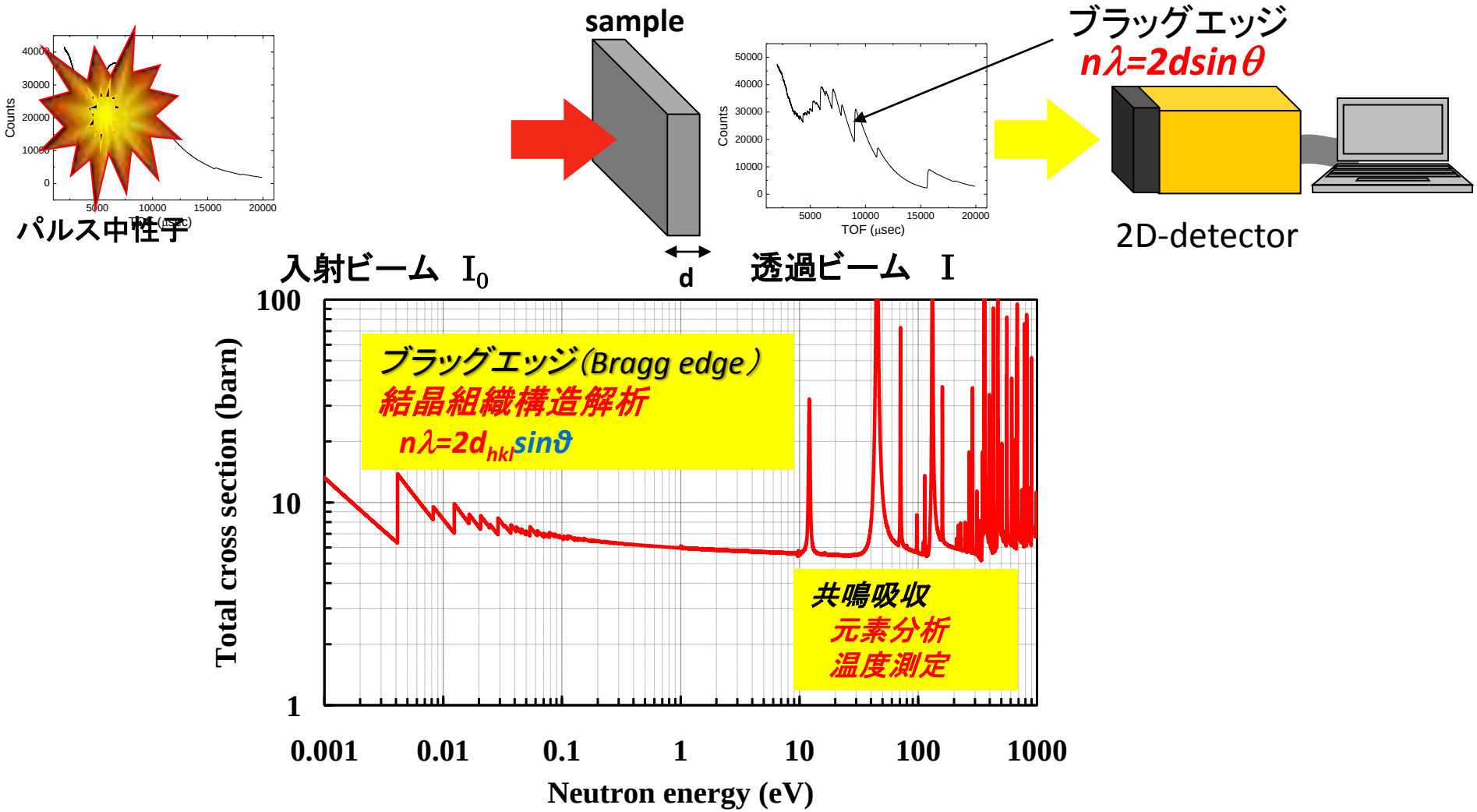
従来型の中性子イメージングでは中のものが知りたいがわからない！

- パルス中性子の特性を生かした中性子ラジオグラフィーができないか？
- パルス中性子では飛行時間法で簡単にエネルギー依存の透過データがとれる。
- これまでと違ったラジオグラフィーの可能性？





パルス中性子イメージングの原理と特徴



・それぞれのピクセルで全断面積が得られる。
（空間依存全断面積の取得→データ解析）

実験結果を再現して結晶情報を得るための解析コード　RITS　の開発

H. Satoh, et al.

$$\sigma_{coh}^{ela}(\lambda) = \frac{\lambda^2}{2V_0} \sum_{d_{hkl}=0}^{2d_{hkl}<\lambda} \left[|F_{hkl}|^2 \times d_{hkl} \times P_{hkl}(\lambda, d_{hkl}) \times O_{hkl}(\lambda, d_{hkl}) \times E_{hkl}(\lambda, F_{hkl}) \right]$$

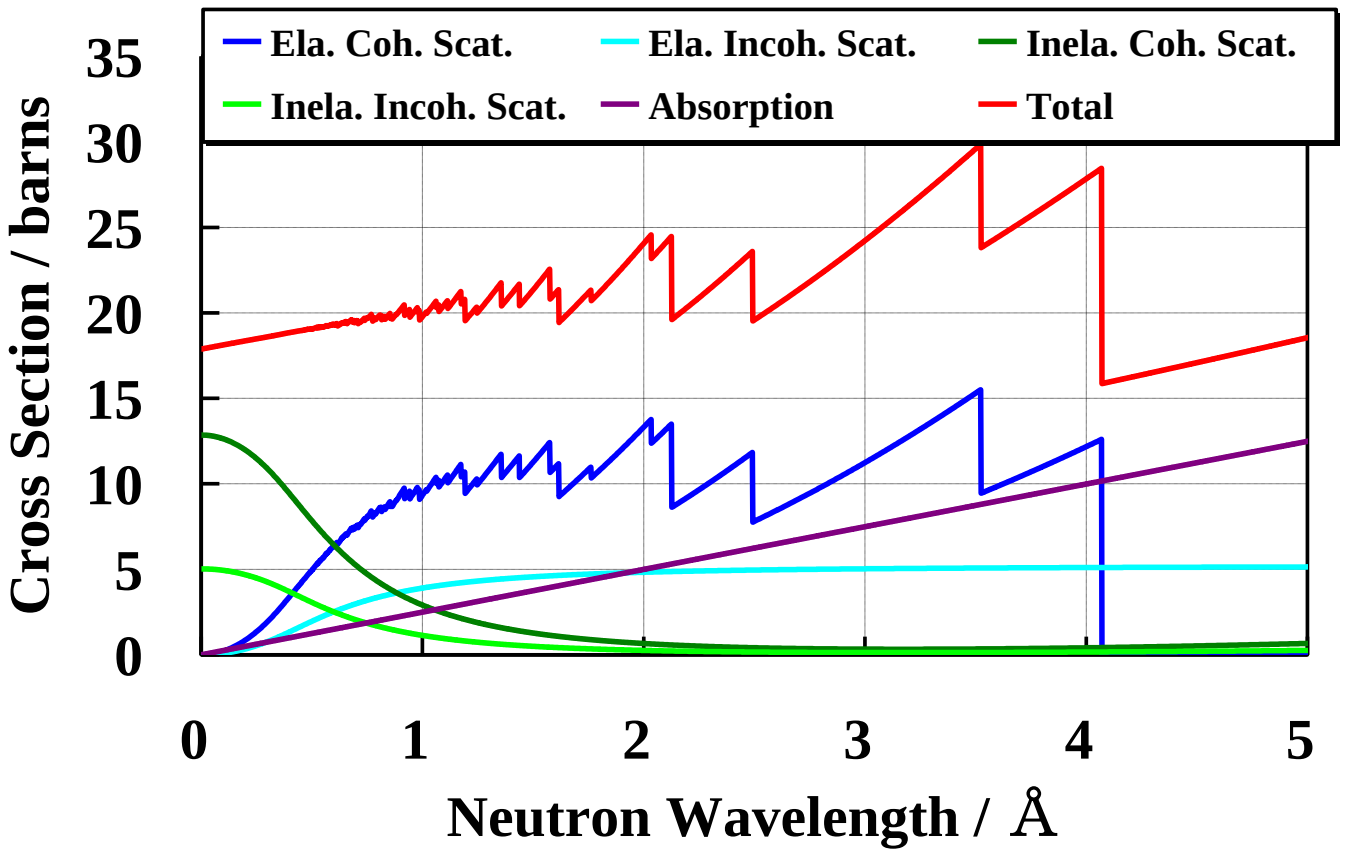
①
ブラッグエッジの位置
（結晶の歪）

②
March-Dollase関数
（選択配向）

③
消衰効果
(結晶子のサイズ）

V_0 : 単位胞の体積
d_{hkl} : (hkl) 面の格子面間隔
F_{hkl} : 結晶構造因子

結晶の全断面積の計算例 （Ni）



①ブラッグエッジ部の計算 （歪評価）

$$\sigma_{hkl,exp}^{el_coh}(\lambda) = \frac{\lambda^2 |F_{hkl}|^2 d_{hkl}}{2V_0}\left[1-\Theta(\Delta)\right]\otimes h(\Delta,\sigma,\alpha,\beta)$$

$$= \frac{\lambda^2 |F_{hkl}|^2 d_{hkl}}{2V_0}\left[\frac{1}{2}erfc\left(\frac{\Delta}{\sqrt{2}\sigma}\right) - \frac{\beta\exp(u)erfc(y) - \alpha\exp(v)erfc(z)}{2(\alpha+\beta)}\right]$$

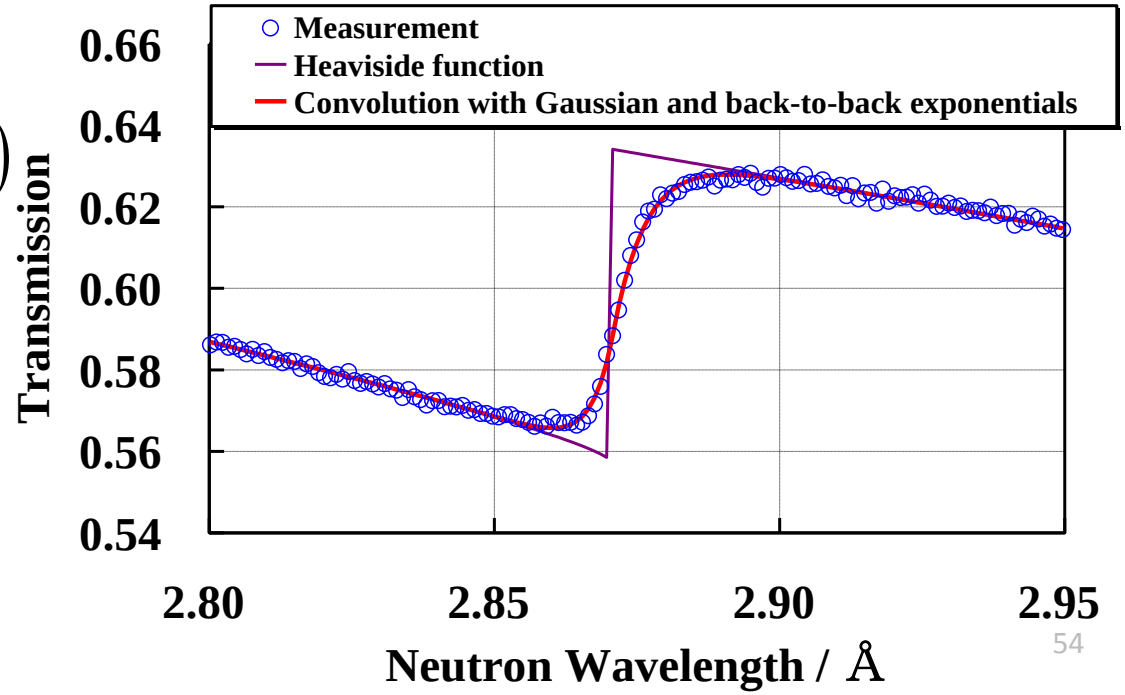
$$\Delta = \lambda - 2d_{hkl}$$

$$u = \frac{\alpha}{2}\left(\alpha\sigma^2 + 2\Delta\right)$$

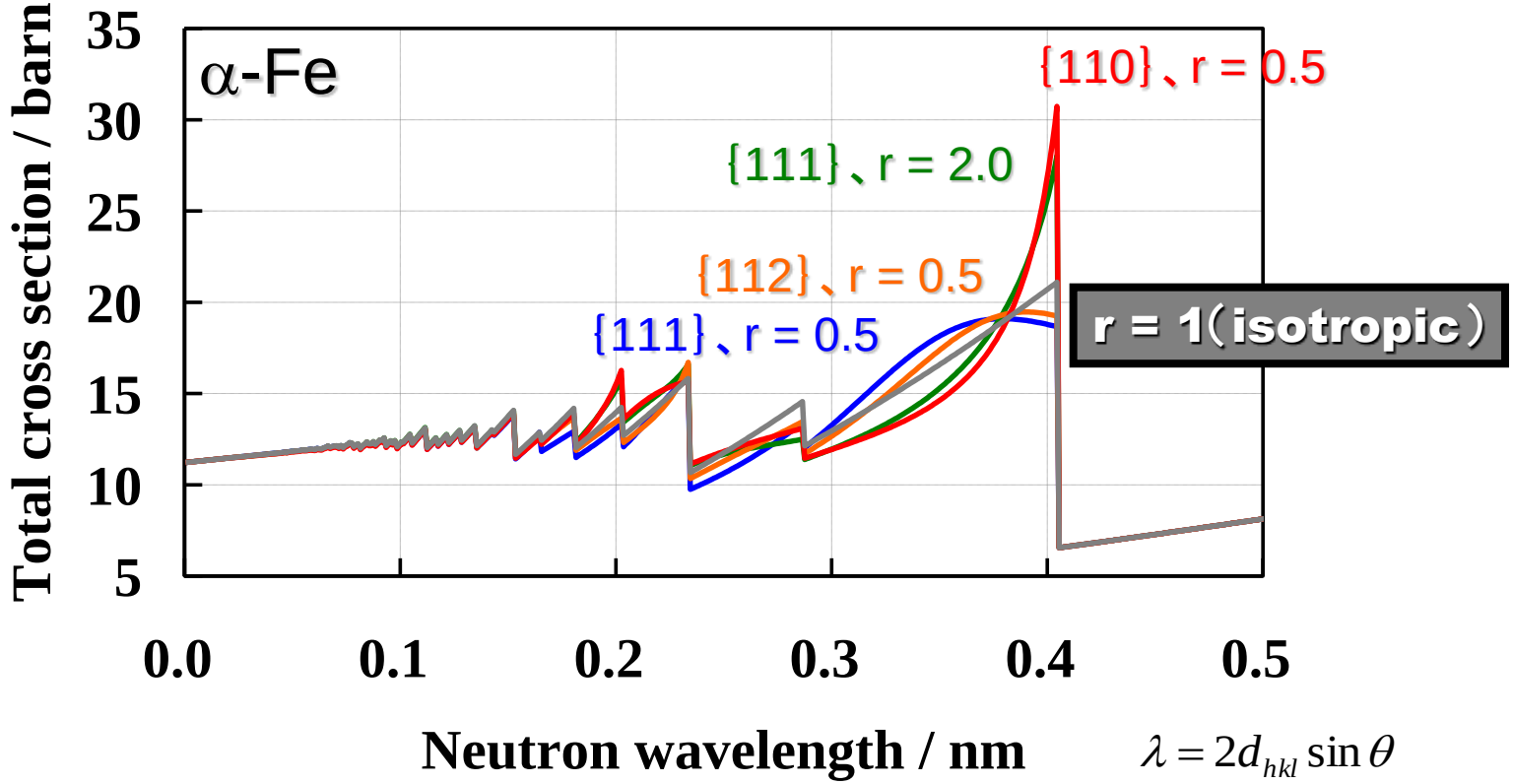
$$v = \frac{\beta}{2}\left(\beta\sigma^2 - 2\Delta\right)$$

$$y = \frac{\alpha\sigma^2 + \Delta}{\sqrt{2}\sigma}$$

$$z = \frac{\beta\sigma^2 - \Delta}{\sqrt{2}\sigma}$$



② March-Dollase 関数（選択配向の評価）



$\lambda = 2d_{hkl}\sin\theta$

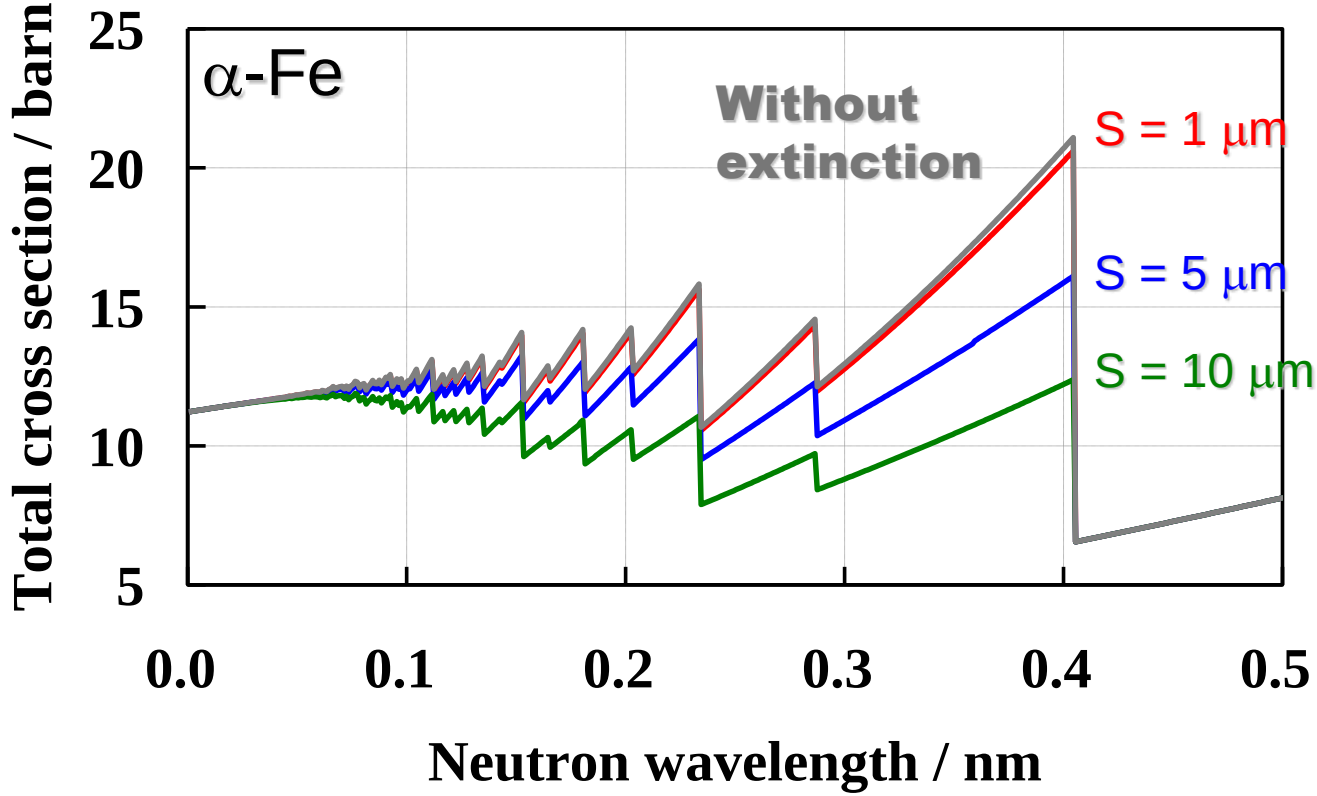
Angle between preferred orientation and（hkl）plane orientation

$$O_{hkl}(\lambda, d_{hkl}) = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}\left[\left(r^2 - \frac{1}{r}\right)\left(\sin\theta\cos A_{hkl} + \cos\theta\sin A_{hkl}\sin\phi\right)^2 + \frac{1}{r}\right]^{-\frac{3}{2}} d\phi$$

Degree of texture（r = 1→Random）

※ W.A. Dollase, *J. Appl. Cryst.* 19 (1986) 267 他

③ 消衰効果（結晶子サイズの評価）



$$E_{hkl}(\lambda, F_{hkl}) = E_b \sin^2\theta + E_l \cos^2\theta$$

$$E_b = \frac{1}{\sqrt{1+x}}$$

$$E_l = 1 - \frac{x}{2} + \frac{x^2}{4} - \frac{5x^3}{48} + \cdots (x<1)$$

$$E_l = \sqrt{\frac{2}{\pi x}}\left(1 - \frac{1}{8x} - \frac{3}{128x^2} - \frac{15}{1024x^3} - \cdots\right)(x>1)$$

Crystallite size

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

※ T.M. Sabine, *Aust. J. Phys.* 38 (1985) 507 他

マルテンサイト部の格子面間隔分布

パルス中性子イメージング用結晶組織構造解析コード「RITS」の高度化

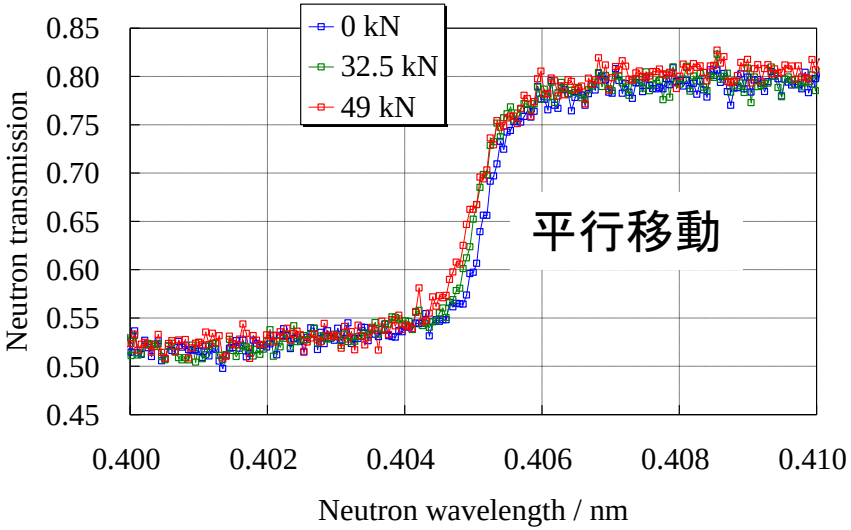
マルテンサイト部のミクロ歪を考慮した解析手法の開発

焼き入れ鉄
　焼き入れ部　7mm
　マルテンサイト

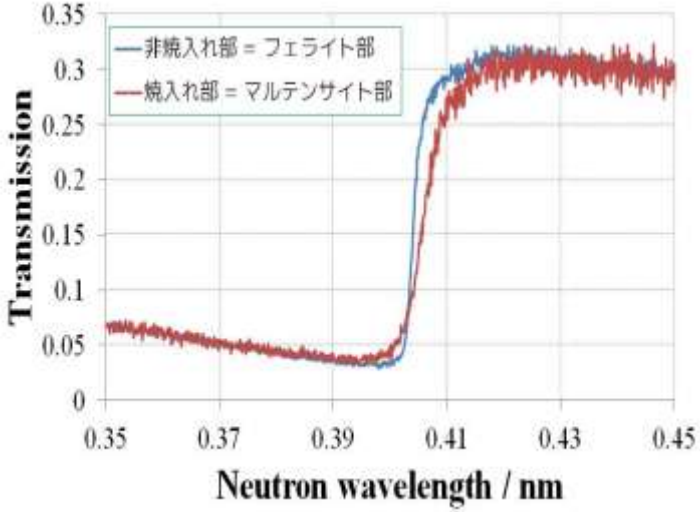
通常のイメージング
@J-PARC

通常の歪とマルテンサイトの違い

引っ張り試験による歪（通常）

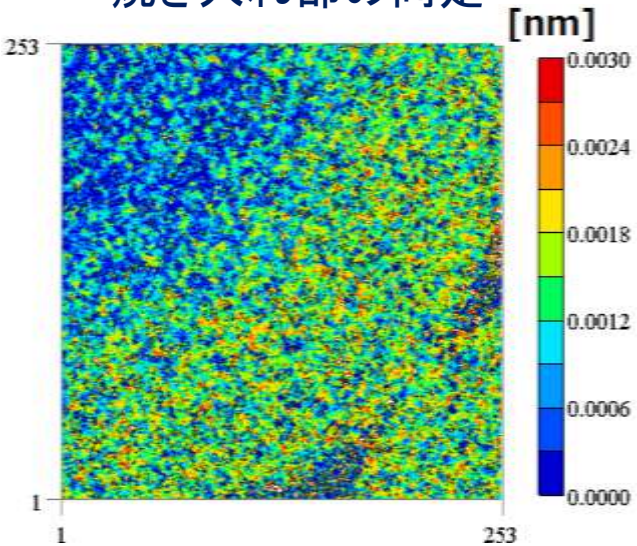


マルテンサイト部は通常の歪によるブラッグエッジの変化と異なる。
傾きに変化→格子面間隔の分布



格子面間隔分布の分散

焼き入れ部の同定



文化財の測定：日本刀

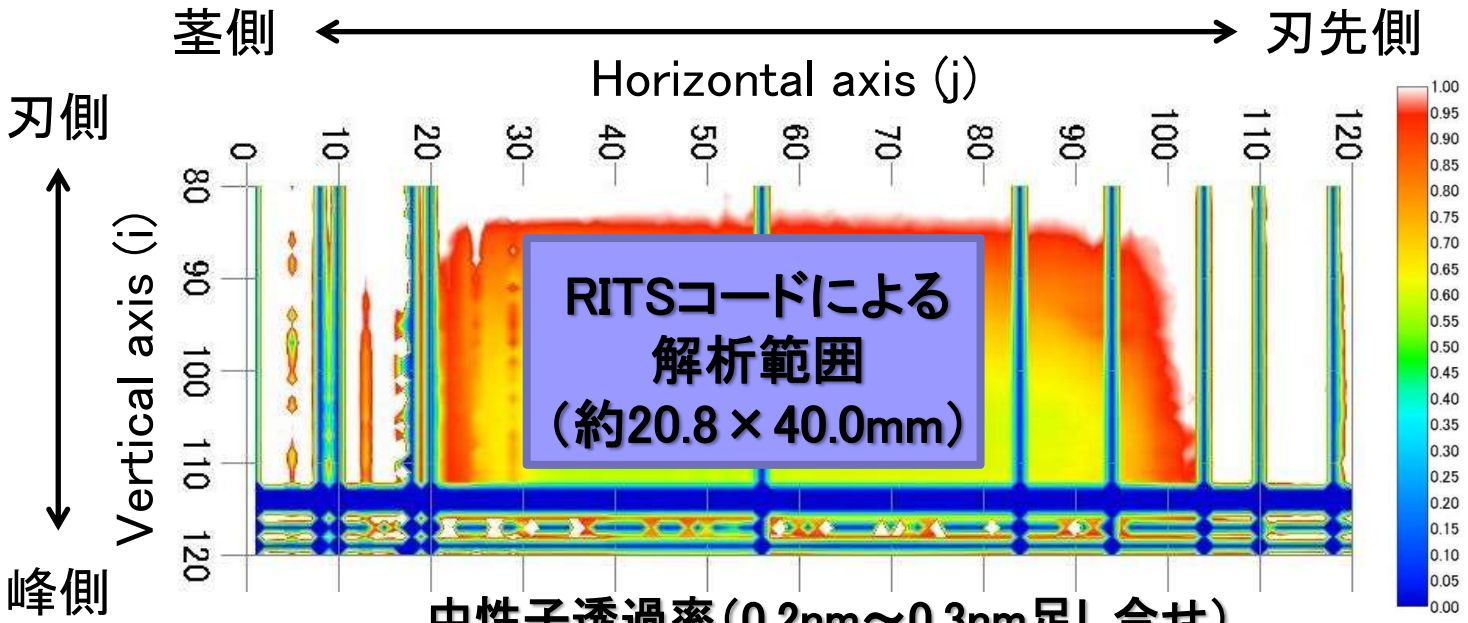
S-1：**備州長船祐定**→現岡山県、16世紀半ば
S-2：**備前國住長船七兵衛尉祐定**→現岡山県
　　寛文三年八月吉日→1663年（17世紀後半）
S-3：**無銘（相州と伝わる）**→現神奈川県、16世紀半ば

実験1（ISIS）	実験2（HUNS）
S-1備州を測定	S-1備州、S-2備前、S-3相州を一度に測定

試料提供：Dr. Francesco Grazzi, CNR-Istituto dei Sistemi Complessi section of Sesto Fiorentin, Florernce, Italy

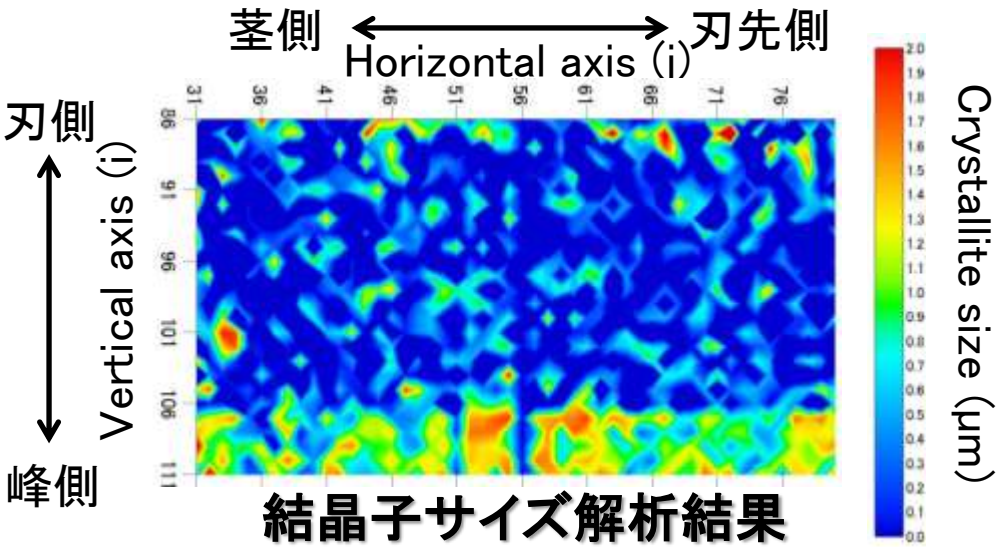
中性子透過率（イギリスのISIS）

ISIS実験の様子

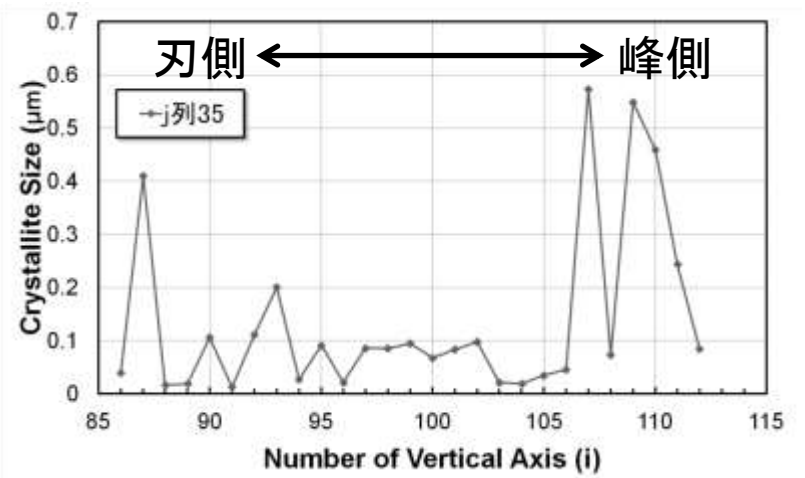


中性子透過率（0.2nm～0.3nm足し合せ）

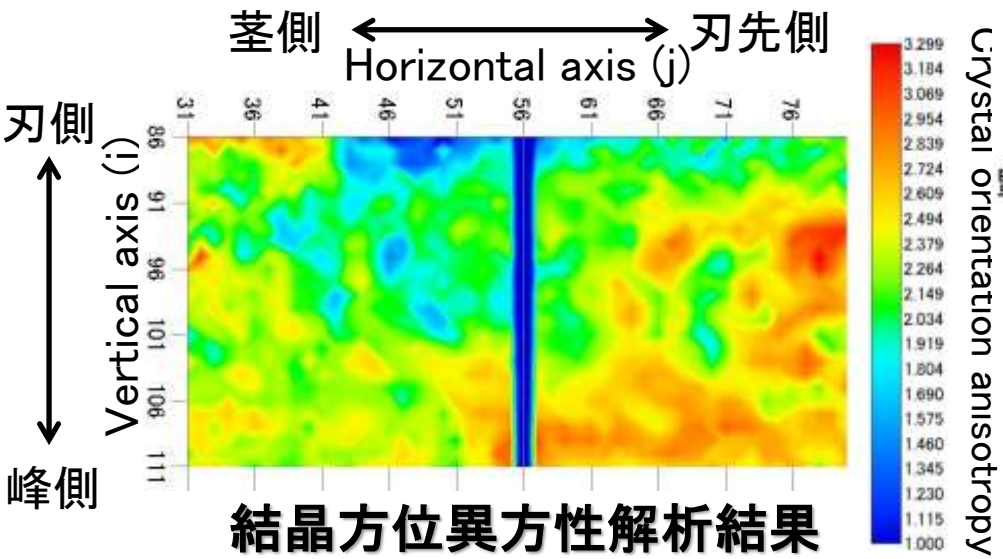
結晶組織情報解析結果（ISIS）



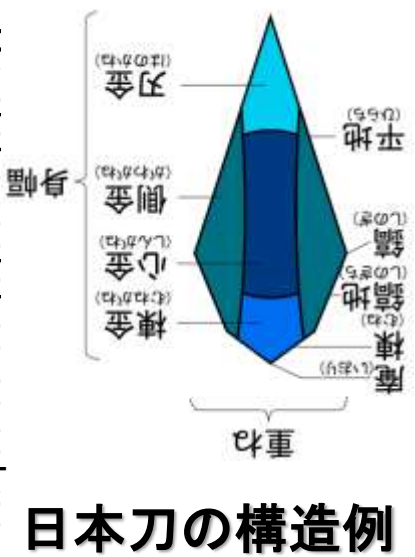
結晶子サイズ解析結果



j列35結晶子サイズ解析結果



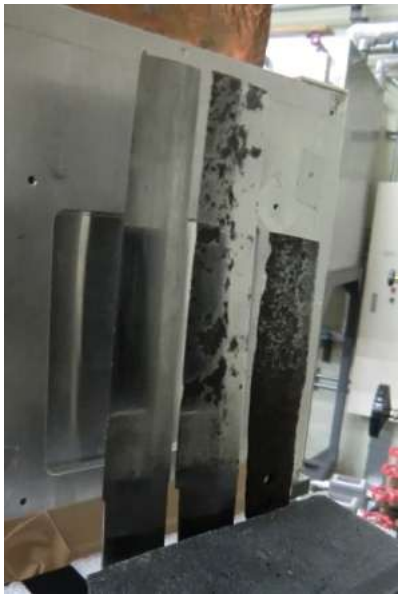
結晶方位異方性解析結果



日本刀の構造例

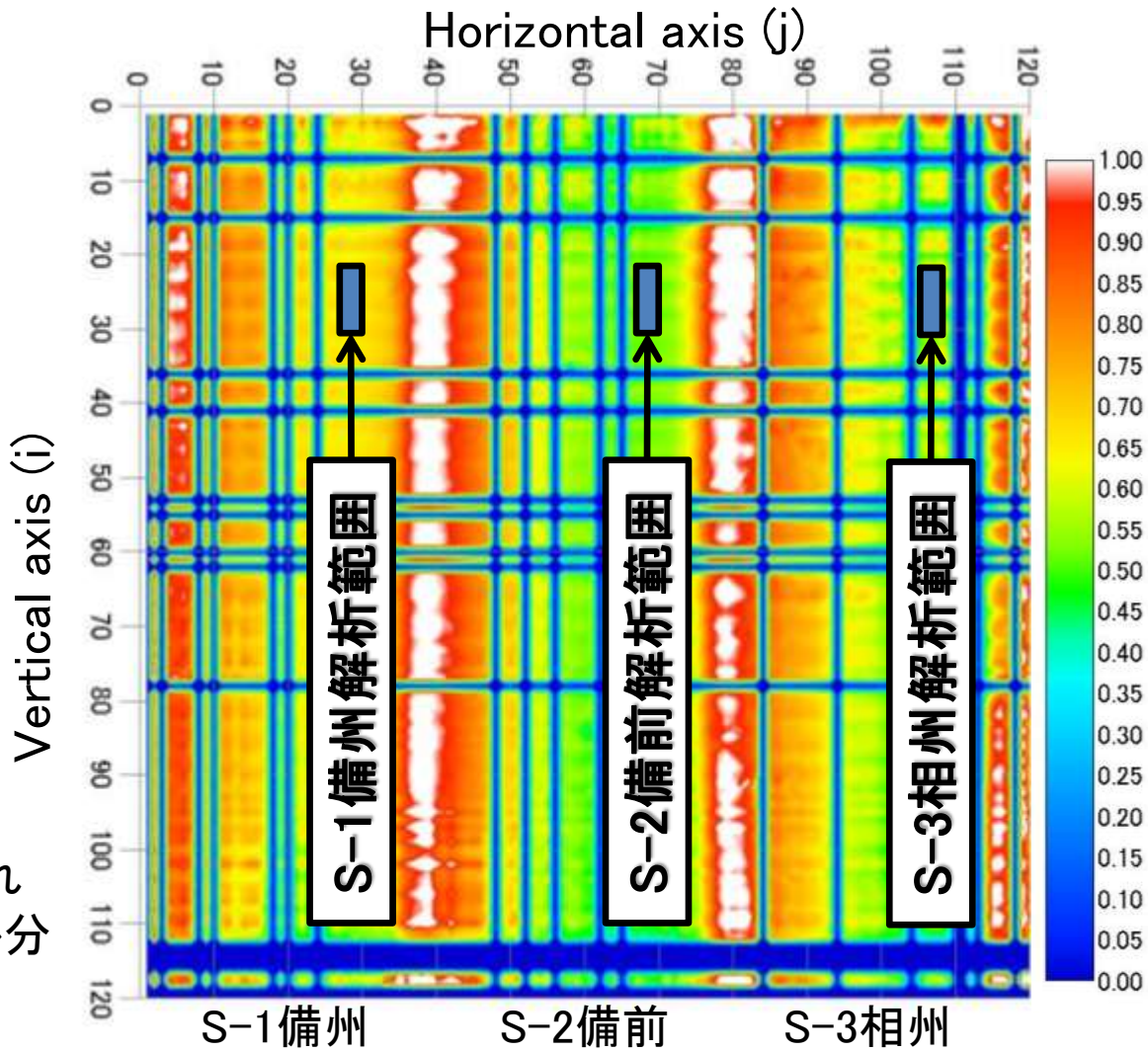
・刃から峰にかけて結晶子サイズが増加している。
・茎から刃先にかけて結晶方位異方性が増加している。

中性子透過率（北大：HUNS）



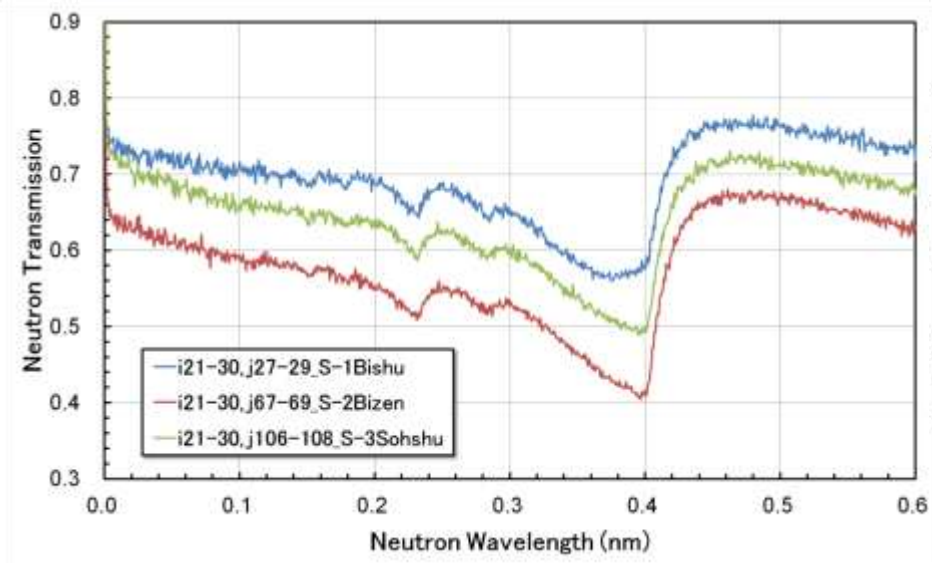
HUNS実験の様子

解析範囲はそれぞれ
峰に近い30ピクセル分
（約8.0mm×2.4mm）

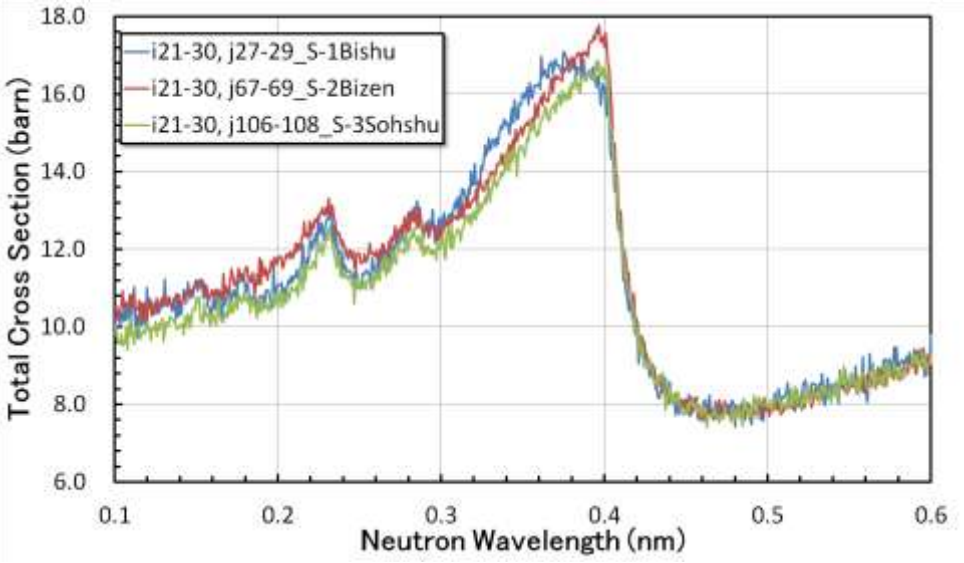


中性子透過率（0.1nm～0.45nm足し合せ）

刀によるスペクトルの違い



刀ごとの中性子透過率スペクトル



刀ごとの中性子全断面積

・刀によってスペクトルの形状に変化があることが確認できる。刀の指紋。

・スペクトルの形状から、S-1備州とS-2備前の結晶子サイズの大きさが近いこと、S-1備州の結晶方位異方性が大きいことが予想できる。

結晶組織情報解析結果（HUNS）

RITSコードによる結晶組織情報解析結果

	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

・結晶子サイズ解析結果は、備前（現岡山県）で製造されたS−1備州とS−2備前が比較的近い値であり、相模（現神奈川県）で製造されたS−3相州が大きい値である。
→産地による違いが現れた可能性がある。

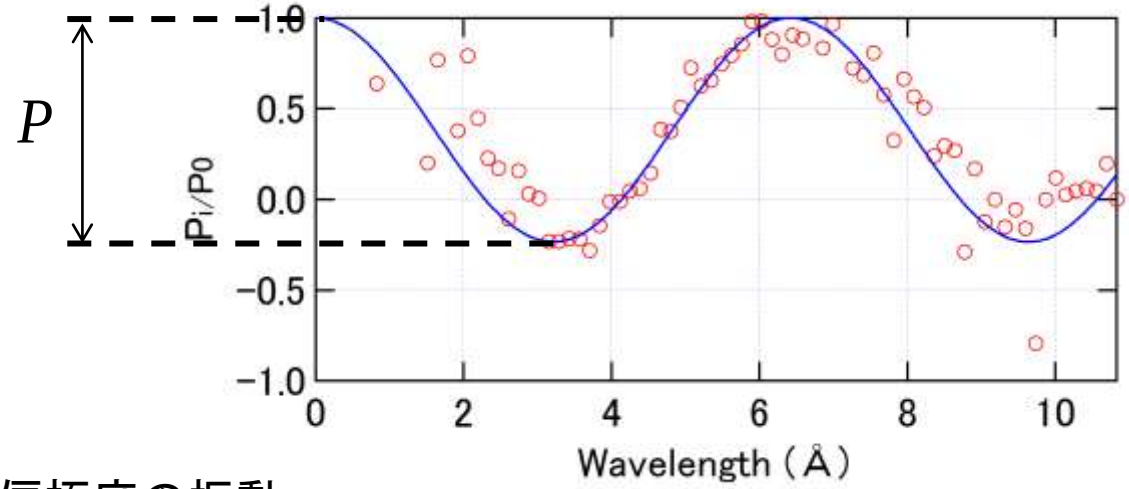
・結晶方位異方性解析結果は、備前で製造されたS−1備州とS−2備前が大きく異なる値となった。
→製造された年代の違いなどが影響している可能性がある。

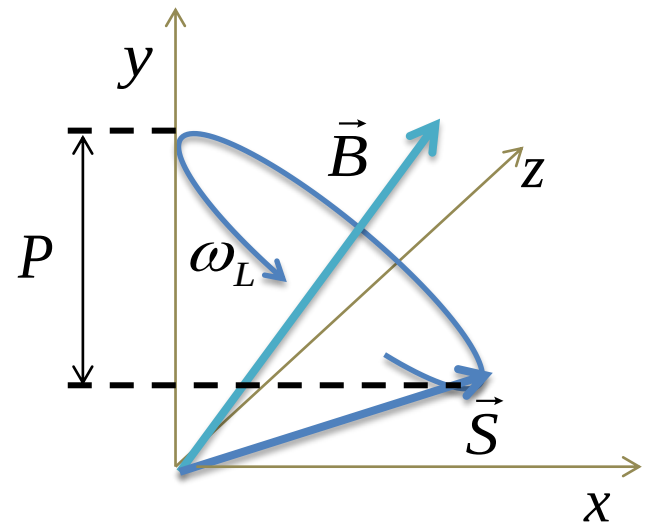
北大中性子源HUNSを用いた磁場イメージング手法の開発

・小型中性子源での可能性
・小回りの利く実験の実施
　　各種条件だし
　　予備実験

磁場情報の定量化

◆偏極度の波長依存性





偏極度の振動

$$P_i/P_0 = 1-(1-n_y^2)(1-\cos\varphi)$$

$$\varphi = \omega_P \lambda \quad (\omega_P：\text{Polarization frequency})$$

ω_P →磁場の強さ　　n_y →磁場の方向

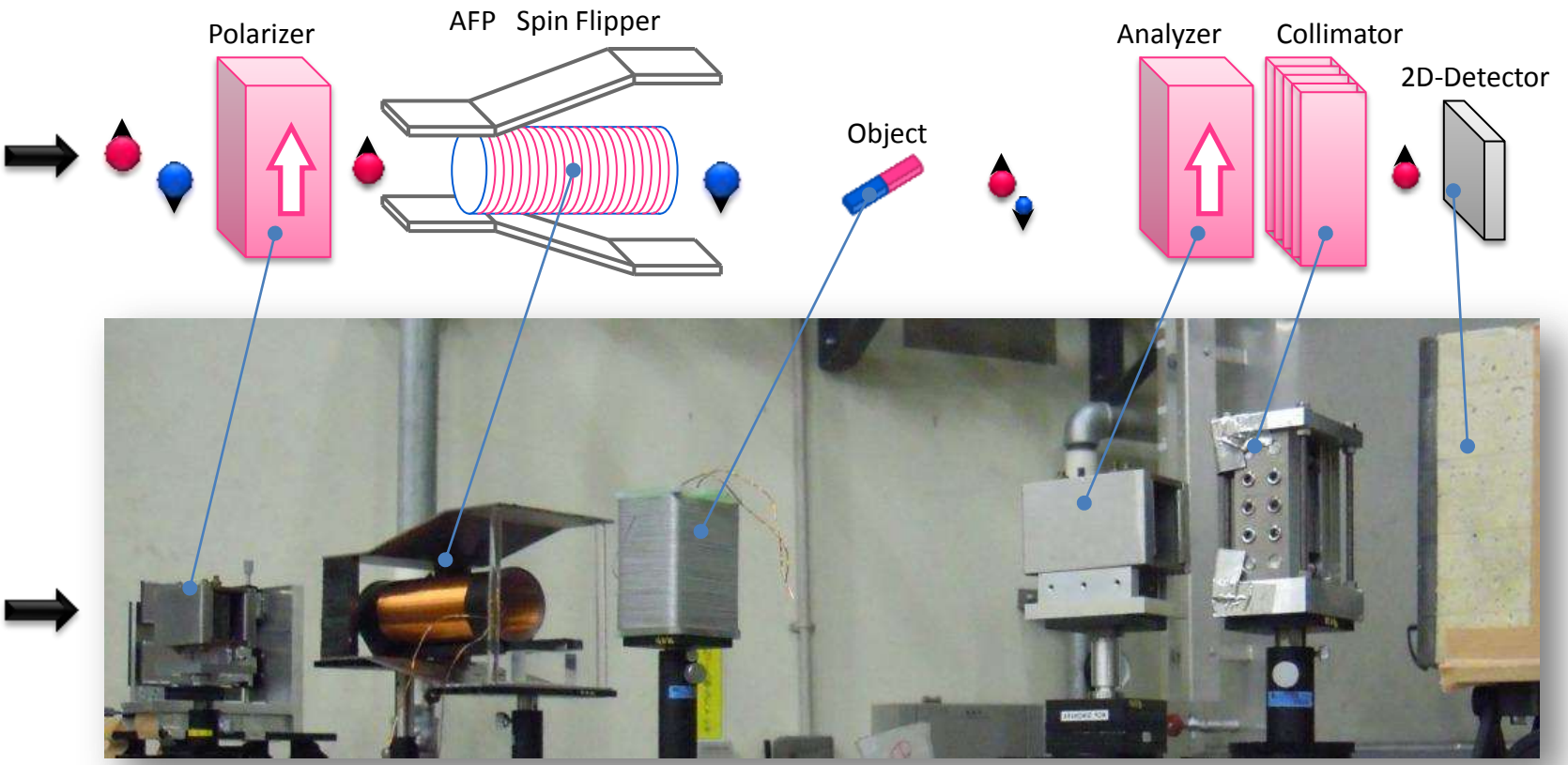
スピン回転角

$$\varphi = \omega_L t = \gamma B t$$

$$\boxed{B = \omega_P \frac{3956}{\gamma L}}$$

→パルス中性子を利用することによって、磁場の強さと磁場の方向を定量的に求めることが可能になる!!

実験条件

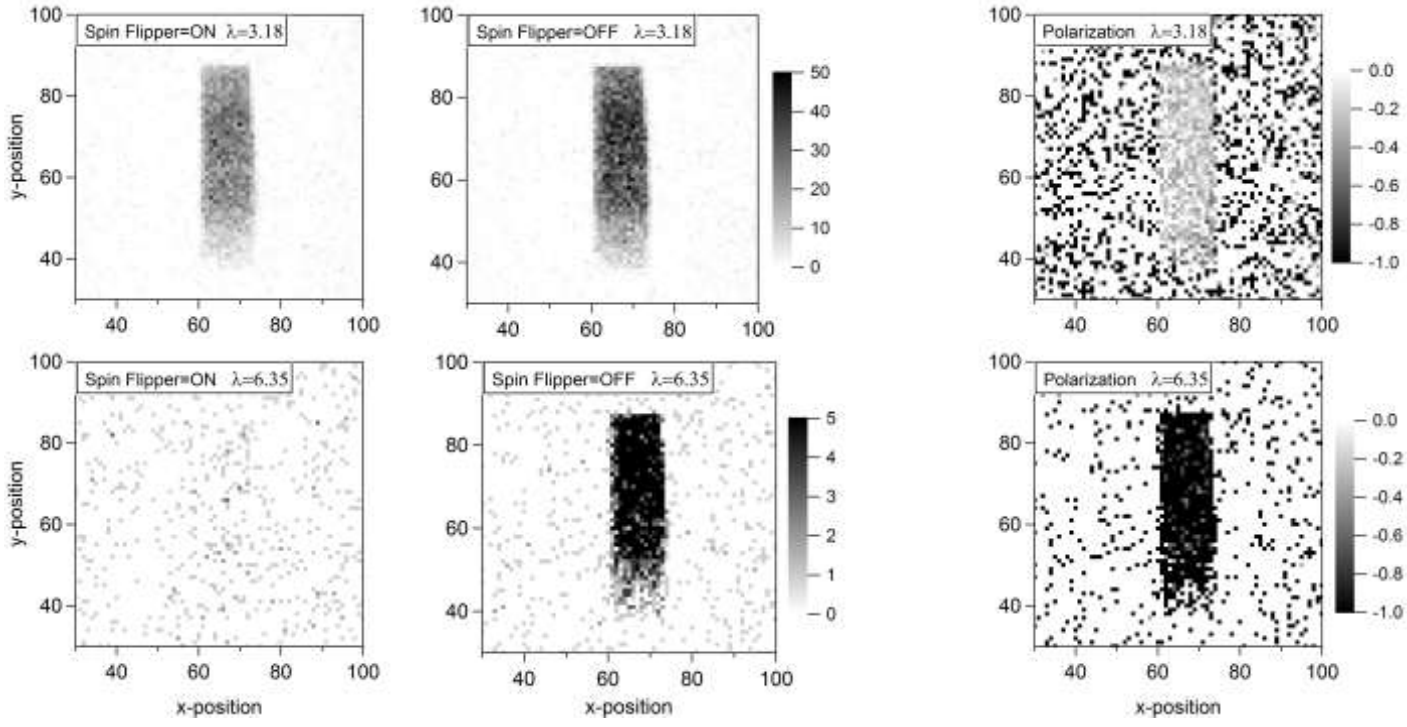


•中性子源	: 北大LINAC Right	•飛行距離	: 7.47m
減速材	: 固体メタン	•検出器	: 5-inch RPMT
ビームサイズ	: 20mmH × 10mmW	シンチレーター	: ZnS(Ag)/^{6}LiF
•偏極子	: 積層湾曲型磁気ミラー	ピクセルサイズ	: Δx=Δy=1mm
•測定時間	: 4.5時間（810,000pulse)		

北大中性子源における偏極性能

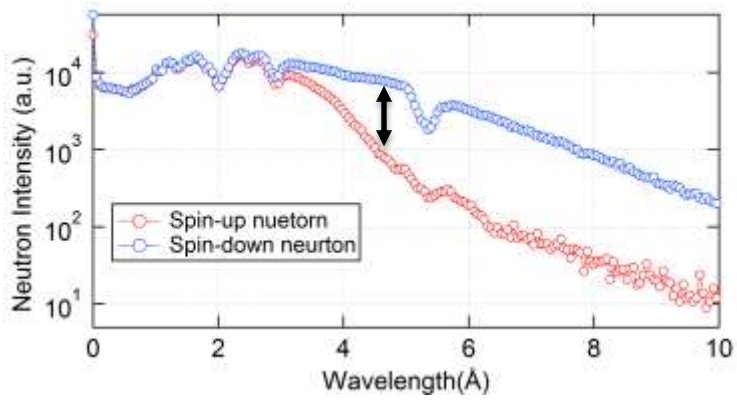
$$P = \frac{I_+ - I_-}{I_+ + I_-} \qquad \left(\begin{array}{ll} I_+ : & \text{Spin Flipper = OFF} \\ I_- : & \text{Spin Flipper = ON} \end{array} \right)$$

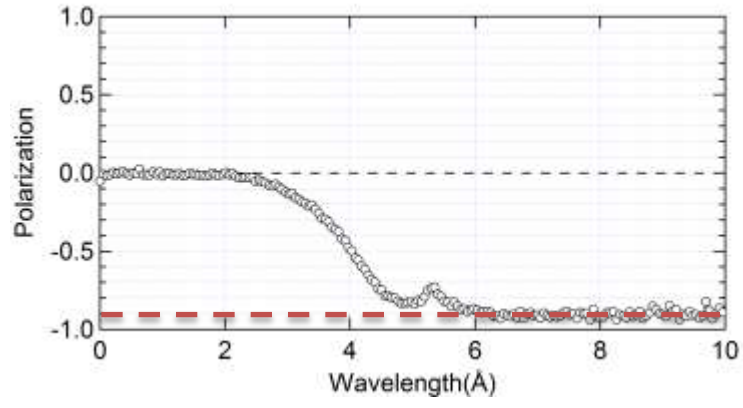
空間分布



波長依存性

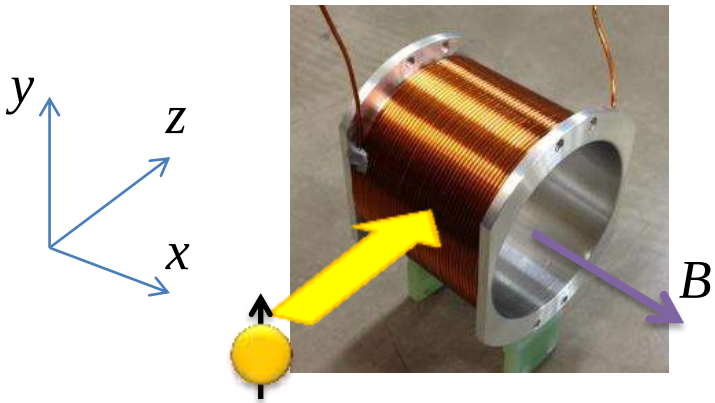
3Åを超えたあたりから偏極しはじめ、**6Å以上で、90%の偏極度**が得られた。



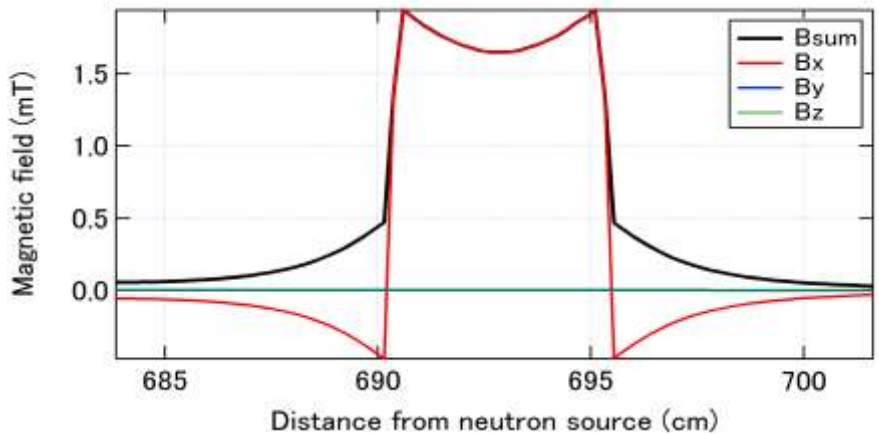


磁場のシミュレーション計算

観測対象となる磁場を発生させたコイル



有限要素法による中性子経路の磁場分布

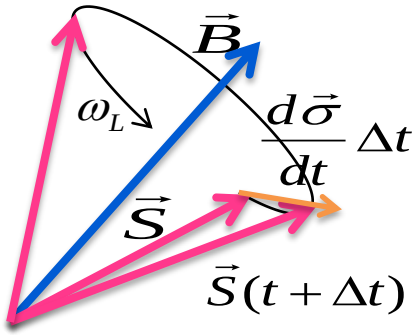


- ソレノイドコイル
  - 直径 :50mmϕ
  - 印加電流 :2.0A
- 中性子の偏極方向:y軸方向
- 磁場方向 :x軸方向

$$\frac{d\vec{\sigma}}{dt} = \gamma[\vec{\sigma} \times \vec{B}], \quad \vec{\sigma} = \frac{\vec{S}}{|\vec{S}|}$$

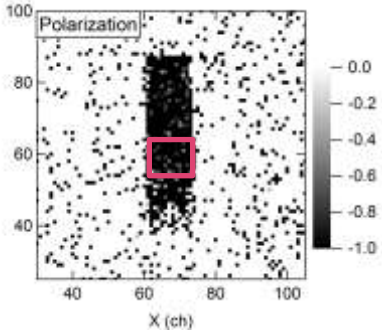
$$\vec{\sigma}(t+\Delta t) = \vec{\sigma}(t) + \frac{d\vec{\sigma}(t)}{dt}\Delta t$$

$$P(t) = \frac{[\vec{\sigma}(t)]_y}{\sqrt{[\vec{\sigma}(t)]_x^2 + [\vec{\sigma}(t)]_y^2 + [\vec{\sigma}(t)]_z^2}}$$

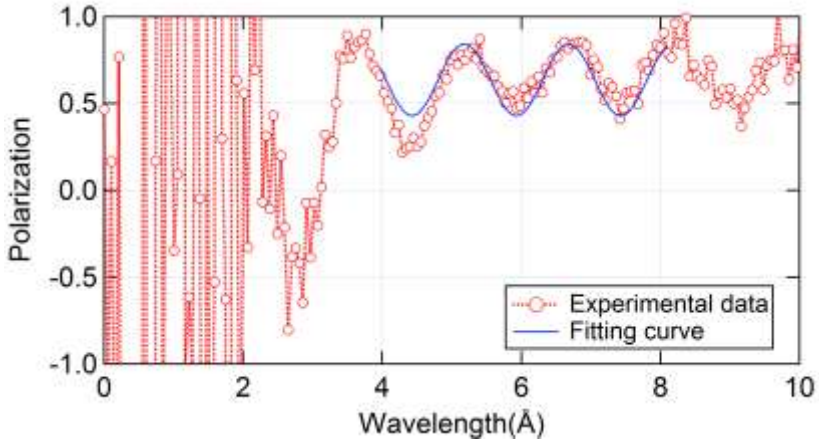


偏極度変化

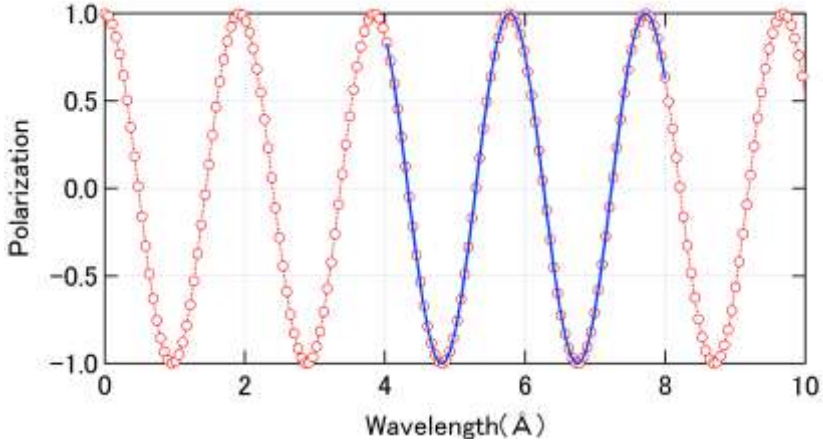
X=62~72, y=55~65ch
データについて計算



実験で得られた偏極度変化



シミュレーションによる偏極度変化



Sin関数でフィッティングすることによって磁場の強さを求める。

$$P = y_0 + A\sin(\omega_p \lambda + \theta)$$

$$\mathrm{BL} = \omega_P \frac{3956}{\gamma}$$

	ωp	BL	L(m)	B(mT)
シミュレーション	3.24	0.0701	5.00E-02	1.40
実験値	4.18	0.0904	5.00E-02	1.81

コイル中心付近での実測値…1.47mT

偏極度の振動から磁場の強さを定量的に求めることができた。
シミュレーションと実測値との差異がまだある、磁場の方向については定量化できない。

まとめ

大型だけでなく、中小型中性子源が併存することの重要性が世界的に認識されてきている。

小型中性子源が建設されていく気運にある。

用途が広がりつつある。

散乱実験、イメージング、ソフトエラー、BNCT、その他

大型施設

高分解能実験、基盤的実験、長期的実験など

中型施設

中間分解能実験、中程度数サンプル、予備実験、基盤的実験、多数頻度など

小型施設

簡単アクセス、低分解能実験、多数サンプル、予備実験、即応的実験、多数頻度実験など