

# 京大炉の次期中性子源 検討について(2)

京都大学原子炉実験所

日野正裕



2014年1月17日

「京大炉におけるビーム利用のための次期中性子源検討2  
ワークショップ」@京大炉・事務棟大会議室

研究用原子炉  
(KUR)

臨界集合体実験装置  
(KUCA)

イノベーションリサーチラボ  
(FFAG陽子加速器)

## 原子炉実験所の主要3施設

KUR: 1964年初臨界 → 全国共同利用研究の遂行

KUCA: 1974年初臨界 → 原子力教育・炉物理実験

イノベーションリサーチラボ: 2004年竣工 → ADS, 加速器BNCT

**KURRI** neutron optics

2014年1月17日「京大炉におけるビーム利用の  
ための次期中性子源検討WS2」@事務棟大会議室



外部機関(理研)  
長期占有利用中

世界初の本格的スーパーミラー導管設備 (1985)

E-2 : 中性子  
ラジオグラフィ

T-1 : オンライン  
アイソトープセパレータ

日本初の中性子導管 (1973)

汎用小型中性子回折計  
へ改造中

E-3 : 中性子導管

：中性子導管  
B-4

：4軸モノクロメータ

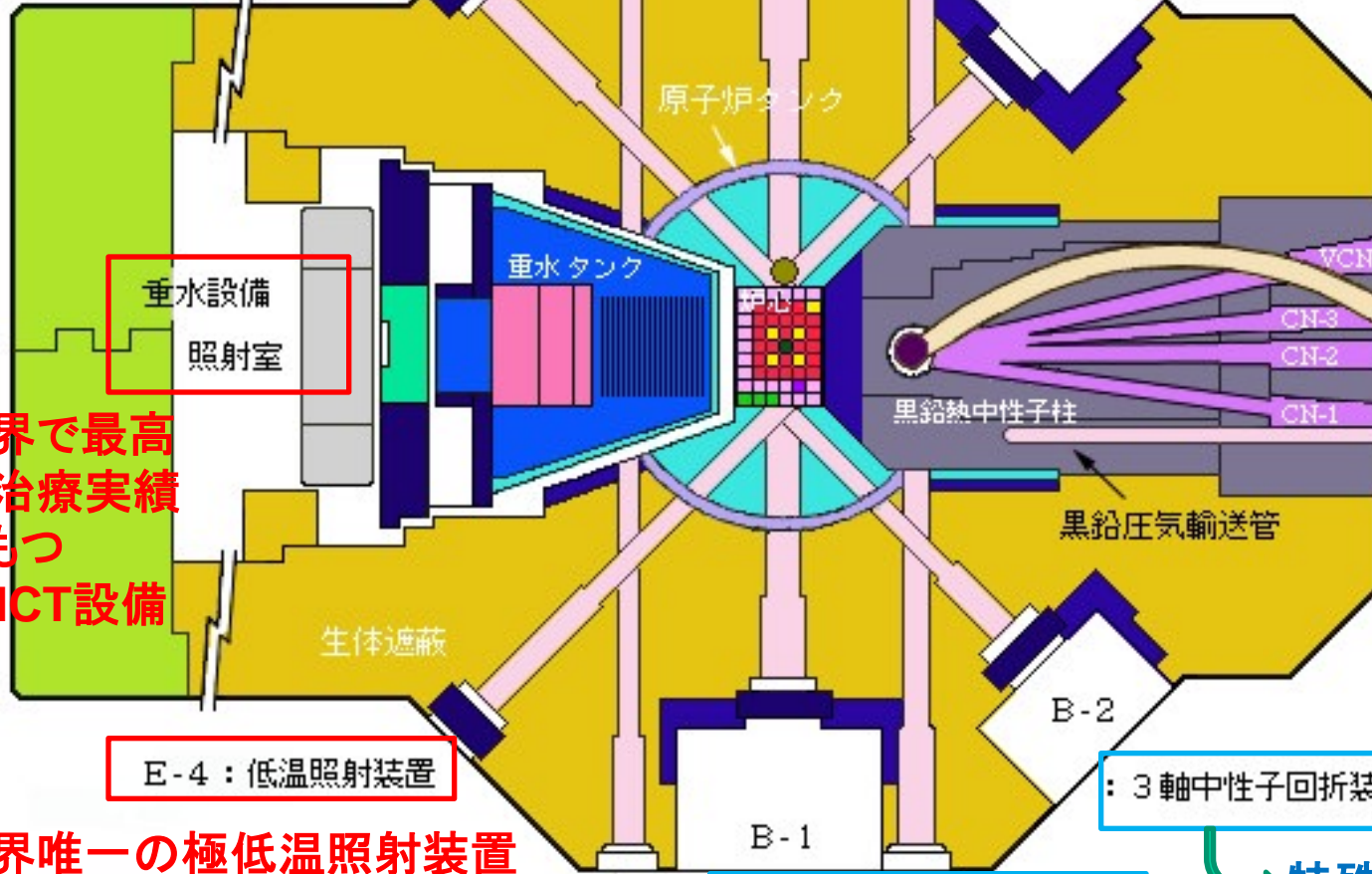
【炉心近傍照射設備】

■ 水圧輸送管 (炉心中央)

■ 圧気輸送管 (反射体内)

● 傾斜照射孔 (反射体外)

■ 長期照射プラグ (反射体内)



重水設備  
照射室

原子炉タンク

炉心

重水タンク

黒鉛熱中性子柱

黒鉛圧気輸送管

黒鉛設備 (CNS)  
中性子導管群

冷中性子源液化槽

日本初の冷中性子源  
(1987)

世界で最高  
の治療実績  
をもつ  
BNCT設備

生体遮蔽

E-4 : 低温照射装置

：3軸中性子回折装置

特殊照射装置へ改造中  
陽電子照射装置へ改造中

世界唯一の極低温照射装置

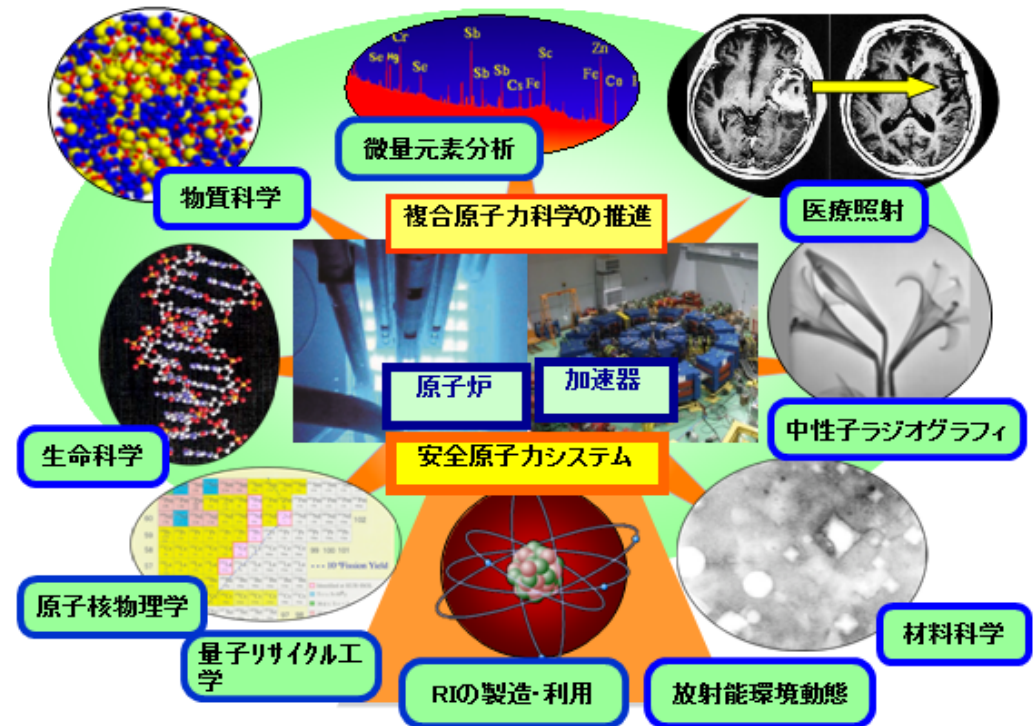
：鉄フィルタービーム設備

E-1 : 照射孔

# 複合原子力科学の有効利用に向けた先導的研究の推進 (京大炉将来計画) 大型計画マスタープランに採択中!

- 大規模研究計画(大型施設計画ではない)

人類社会の持続的発展には原子力・放射線の利用が必要である。本計画では、**研究炉・加速器**を用いる**共同利用・共同研究**を軸に、複合的な原子力科学の発展と有効利用に向けた先導的研究を推進し、その拠点を形成する。



# ADS研究 (KUCA-FFAG結合実験)

核破砕反応で  
中性子を発生

核分裂連鎖反応  
で中性子を増倍

陽子の生成

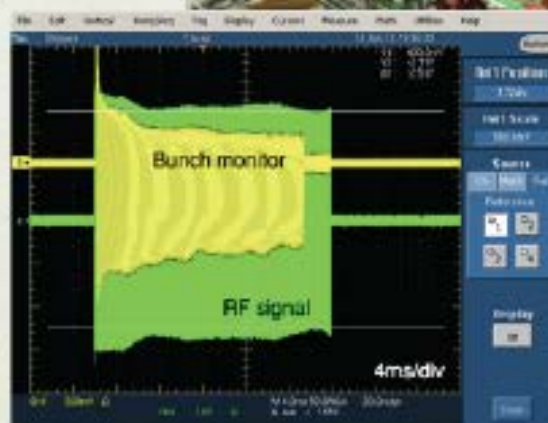
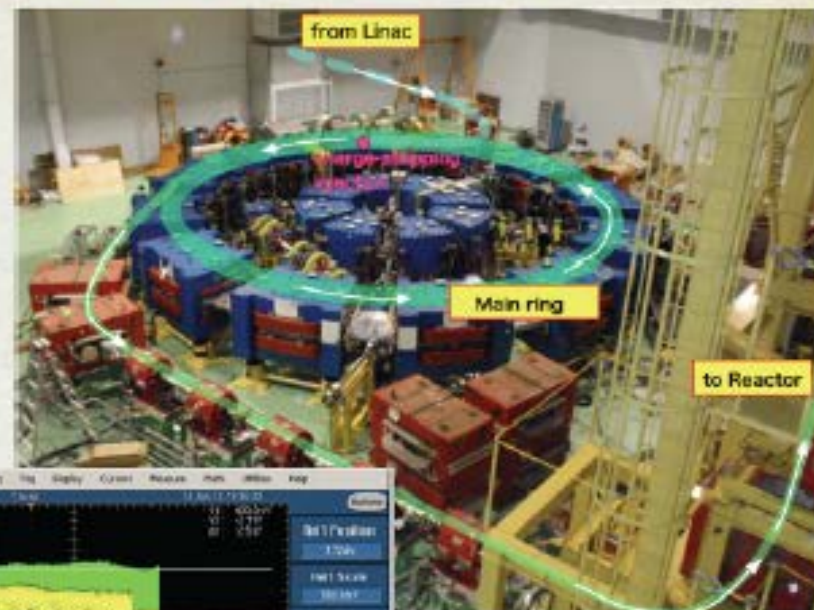


陽子を 100 MeVまで加速

世界で唯一の原子炉と  
加速器の結合システム

# R&D HISTORY

- 2003 Project start
- 2004 Innovation Lab. completion
- 2006 First beam from FFAG injector (Ion-beta)
- 2008 First beam from FFAG Main Ring (E=100MeV)
- 2009 Success of ADS experiment (FFAG-KUCA)
  - Uranium loaded cores
- 2010 Thorium fuel loaded ADS experiment
- 2011 Intensity upgrade with H- injector: x100times → 0.1μA @100Hz equivalent
  - Experimental studies of irradiation damages and thermal conductivity on ADS target
- 2012 Energy upgrade: 100MeV→150MeV →



# Present status of KURRI-FFAG development

- A 150-MeV proton FFAG complex has been developed and constructed at KURRI.
- The beams from FFAG have been used for the ADS basic experimental study and other applications.
- The beam intensity of FFAG reached up to  $0.1\mu\text{A} @ 100\text{Hz}$  with a newly adopted H- injection system, but still large beam loss of  $<1/30$  at beam injection was observed. ← It has a capability of the beam intensity of  $>\mu\text{A}$ . Need more study to improve.

→2013年9月時点 現状は石さんの講演で！

原子炉も50年。再延長があったとしても、10年。喫緊の将来計画として、中性子ビーム利用グループとしては、パルス中性子源としてFFAGに期待している。下記スペックで検討。

**Proton beam energy 150MeV**

**Average beam current 1~5 $\mu$ A**

**Pulse width 40 ns(12.5A@ 5 $\mu$ A)**

**Frequency 10Hz**





第1回目(2013年1月18日)の発表(日野、安部)から(PHITSを用いた数値計算より)、

FFAGが予定通りの出力(150MeV,5 $\mu$ A)出れば、比較的シンプルな冷中性子源でもKENSレベルは充分可能であり、かつ光学系から一新して高度化できるので、5MWのKURの分光器の性能を、小角散乱、反射率、粉末回折等は大きく上回れると結論

# KUR(KENS)を上回るだけで、良いのか？

京大炉の特長(光学デバイス開発&ユーザーグループ等)としては、長波長中性子(低繰り返し周波数~10Hz)に重きをおいて、特長のある中性子源開発を行いたい。そこに革新的な(萌芽的な)開発項目はあるか？

冷中性子源の高度化、可能ならば革新的冷中性子源設計の道を、J-PARC 2<sup>nd</sup> ターゲット等も意識して、探りたい。

2019年にはESSも稼働し始める。アジアでは中国が120(→500)kwのパルス中性子源開発を進めている。京大炉としても、世界を見て、意義のある「開発」を適切な時間スケールでやれるか？

中性子源以降の輸送系、検出系、分光法、データ処理等、中長期的な中性子の基礎基盤技術の向上を上図に取り込むことの方が大事な場合もある→基盤技術開発をまとめる重要性

熱以下の中性子**ビーム**強度が欲しい。

例えば、JRR-3(熱以下の中性子 $>10^{13}$ n/cm<sup>2</sup>/s)  
のMINE2反射率計( $\lambda=0.88$ nm: $\sim 10^4$ n/cm<sup>2</sup>/s)  
は9桁もビーム強度が違う。

ガイドや集光は重要。もっと上流でそれに適したビーム、指向性中性子源は作れないか？  
→体積線源なので工学的難しい。

→指向性のある冷(極冷)中性子源は？

# 波長 $\lambda$ と立体角 $\Omega$ の2階微分散乱断面積:

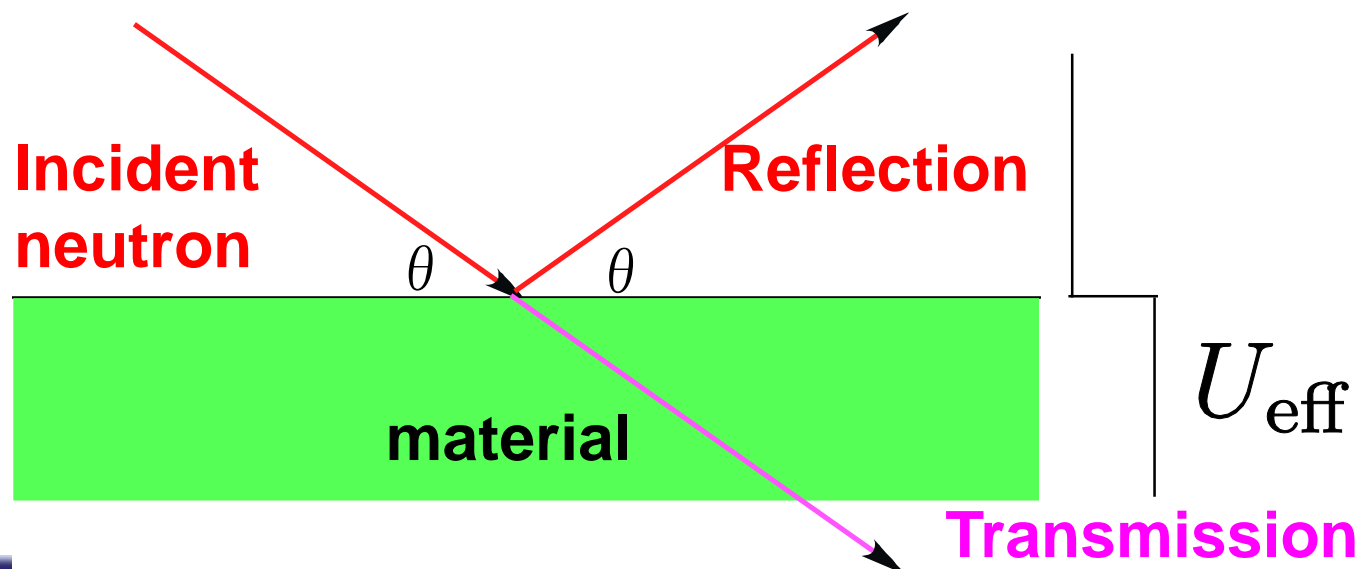
$$\left(\frac{d^2 I}{d\Omega d\lambda}\right) = 2\left(\frac{\lambda_T^4}{\lambda^5}\right)e^{-(\lambda_T/\lambda)/2}$$

$\lambda_T$ は熱平衡になった中性子源の温度であり、この $\lambda_T$ から波長が大きくなるほど、中性子ビーム強度は波長の5乗に近づいて減衰する。しかし $\lambda_T$ は4乗で増加するので、熱平衡になる中性子の温度を下げるほど効果的だが、中性子の温度が低くなると、非弾性散乱を引き起こす準位が無くなっていくので、減速材の温度が低くするだけでは中性子は冷えない。闇雲に冷減速材の温度を下げれば良い訳ではないところが難しい。  
→ちょっと視点を変える。

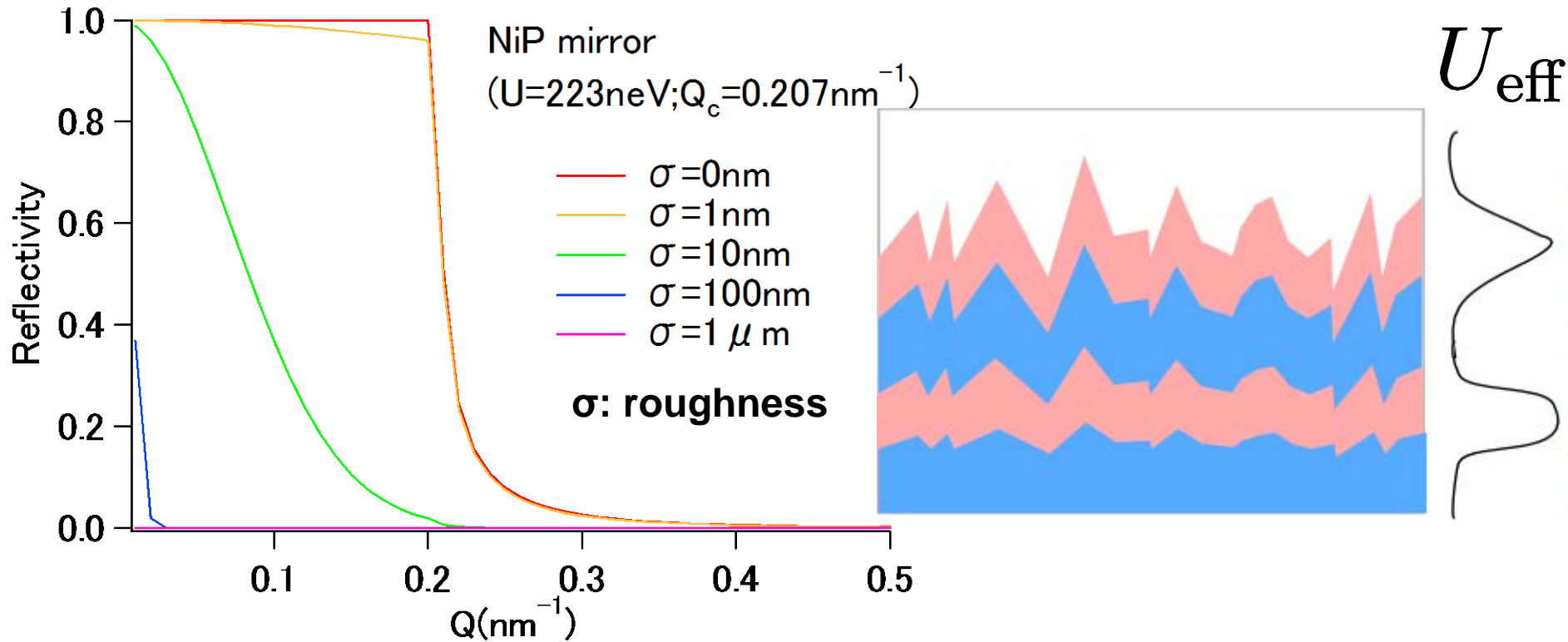
We need neutron beams.

The neutron beam from source is transported by guide system.

The guide consist of neutron mirror.  
The mirror surface must be very smooth.

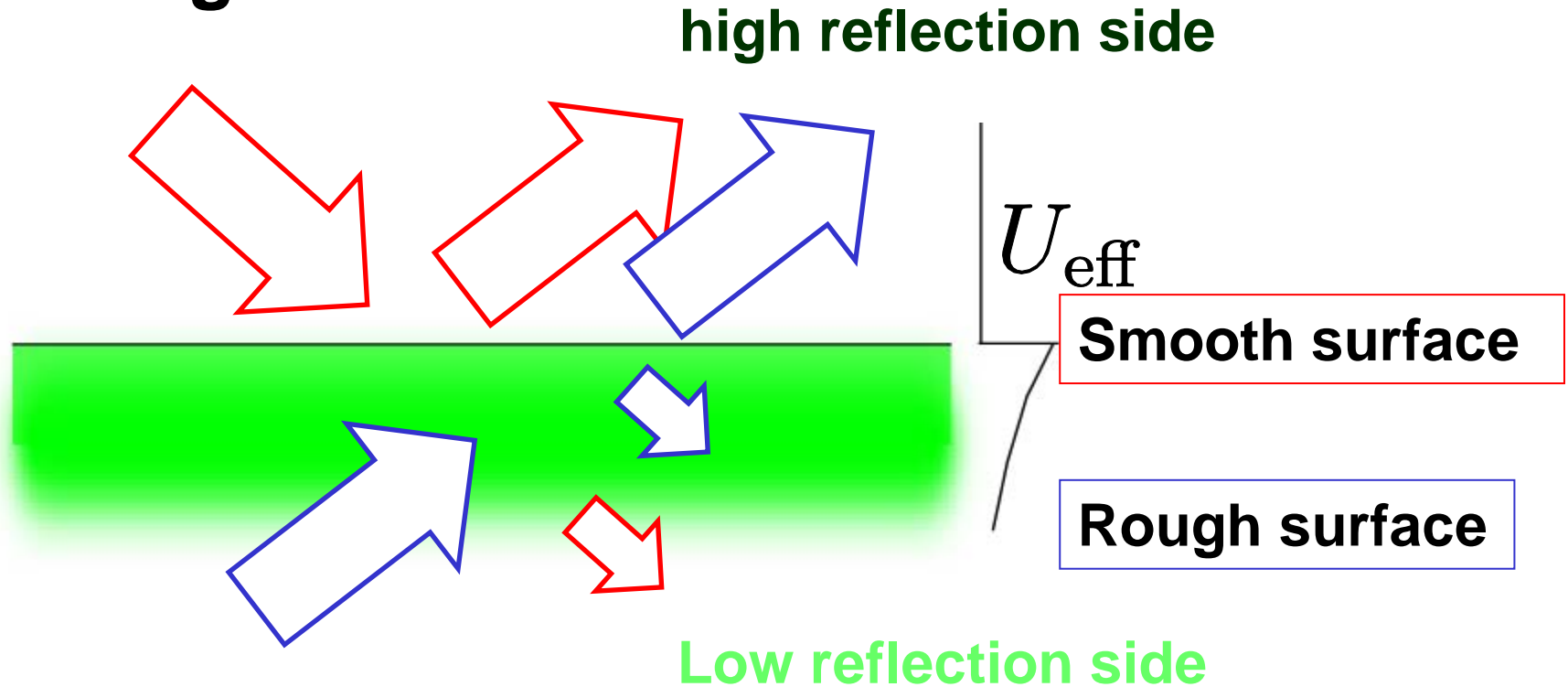


# Let's consider reflection of rough surface.



$U_{\text{eff}}$  Optical effective potential is smaller with surface roughness. The transmission increase with roughness.

Let's consider the layer that has very smooth and rough surface.



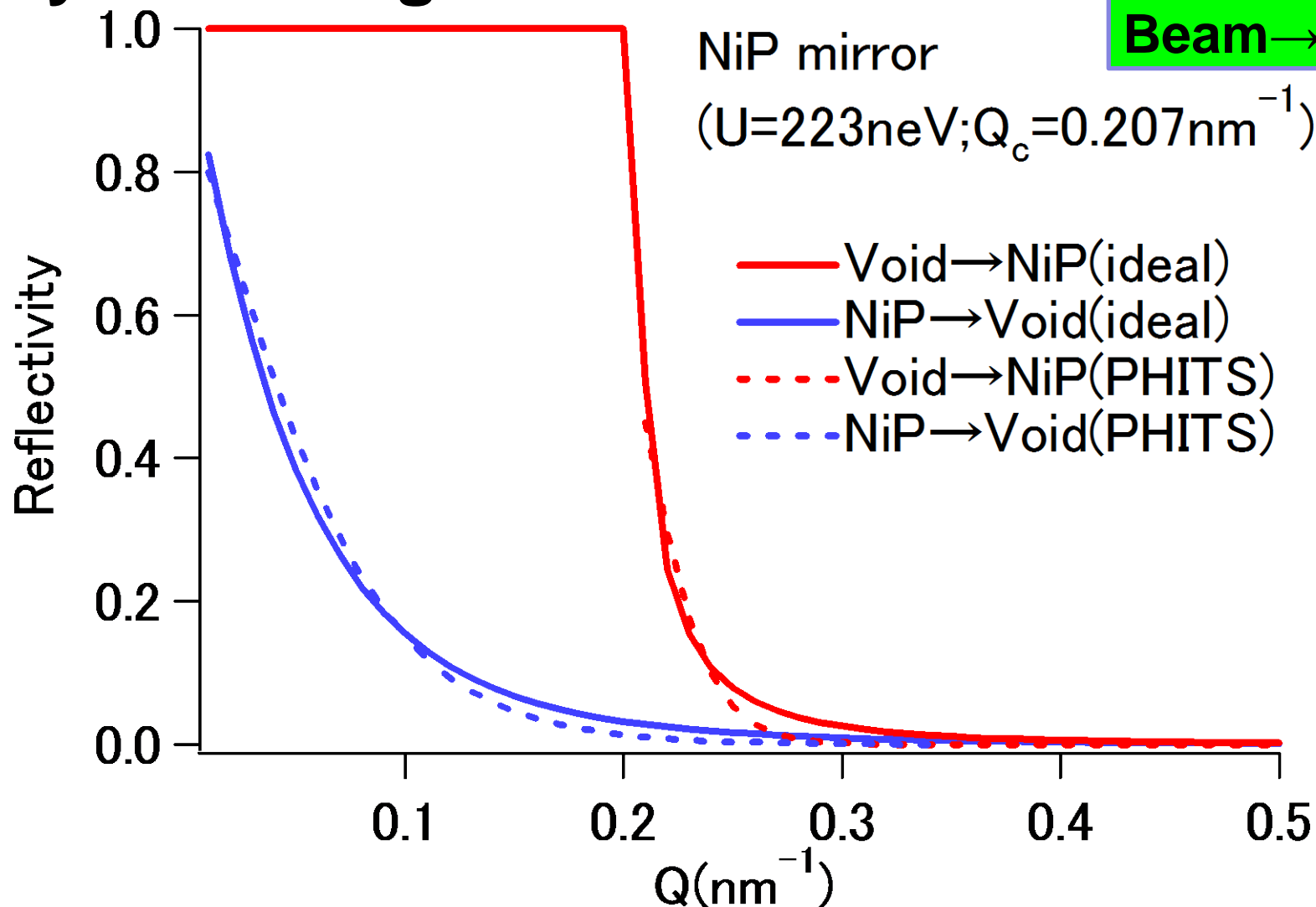
One side polishing silicon wafer is good candidate.  
If we need larger total reflection angle, electroless nickel(NiP) on thin aluminum is also candidate.

# The reflectivity of smooth NiP layer on rough aluminum

Beam →

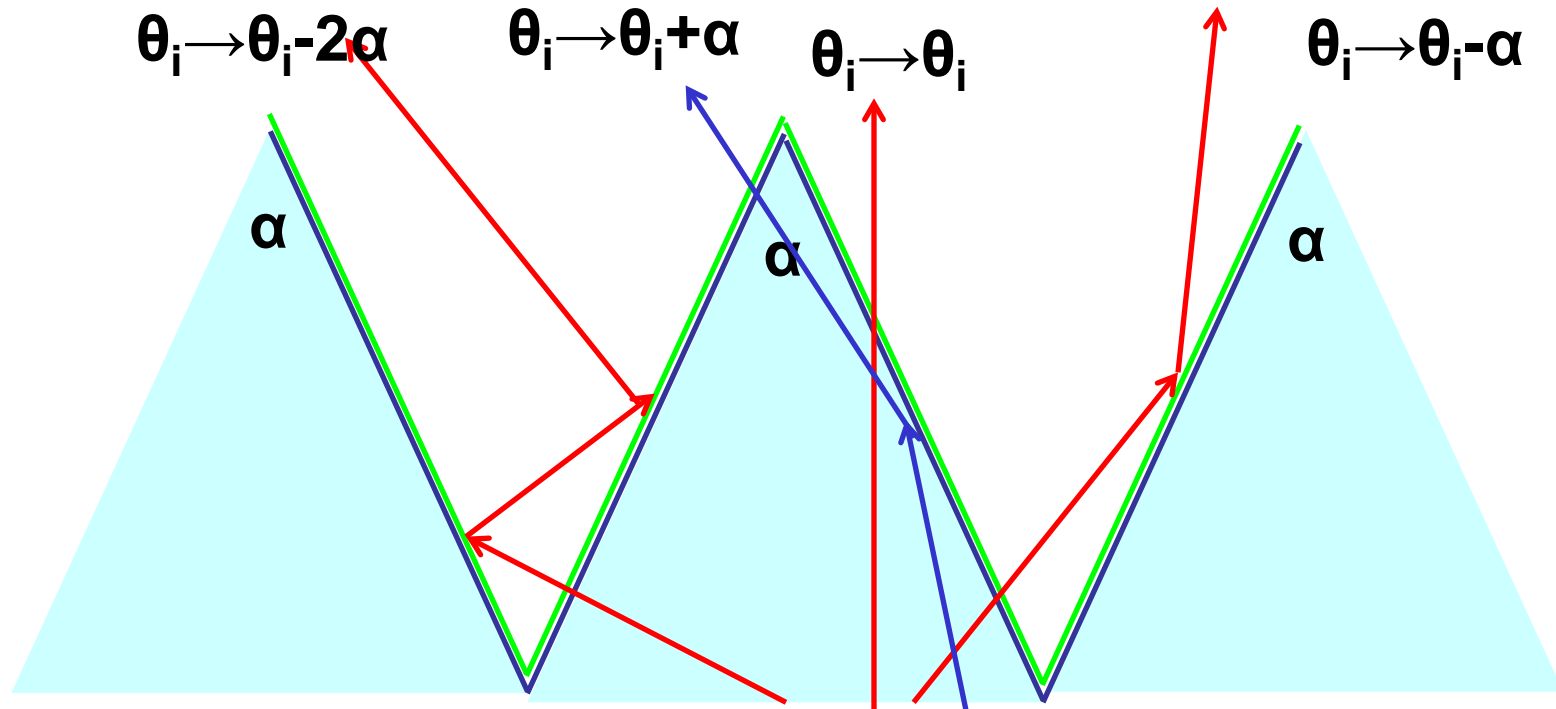


Beam →



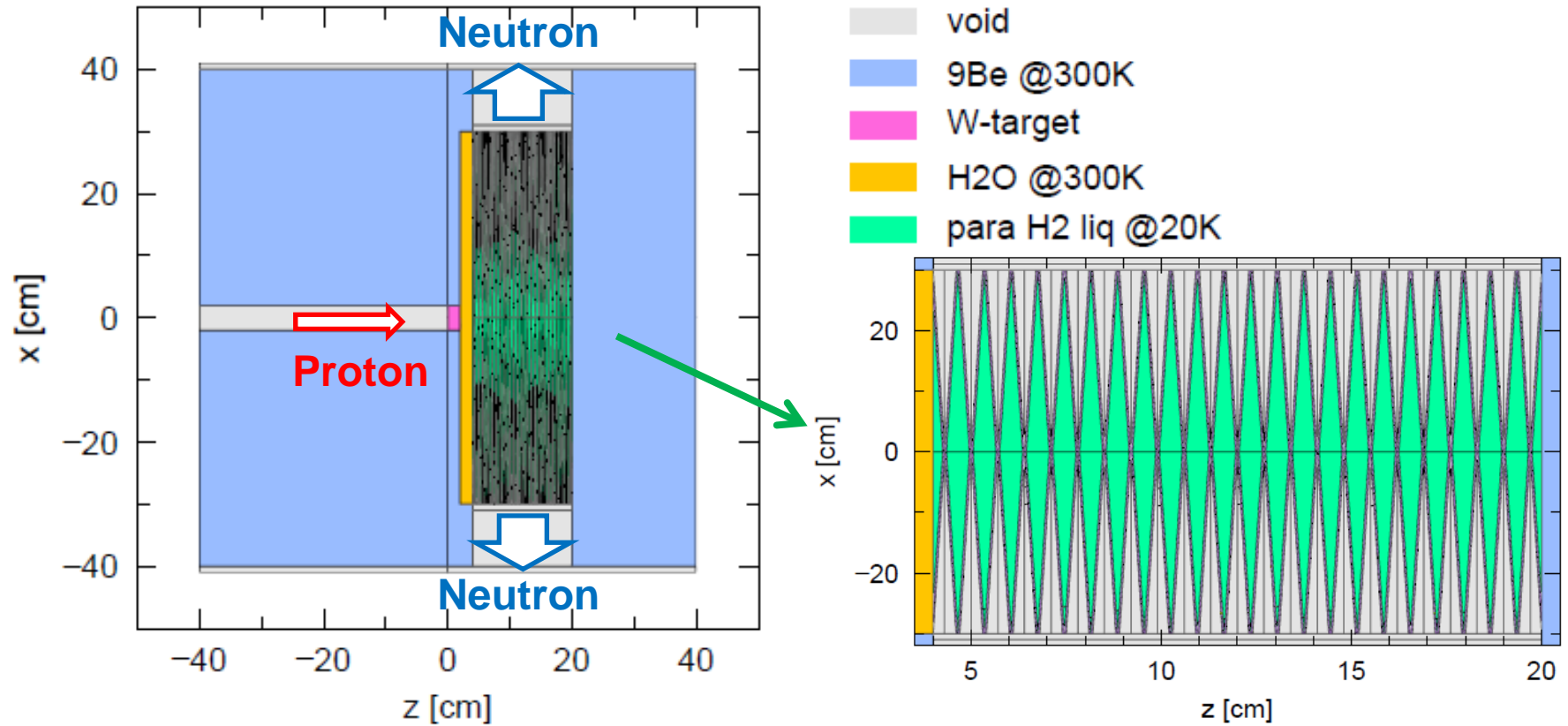


# Is it possible to condense & converge collimated neutron intensity?

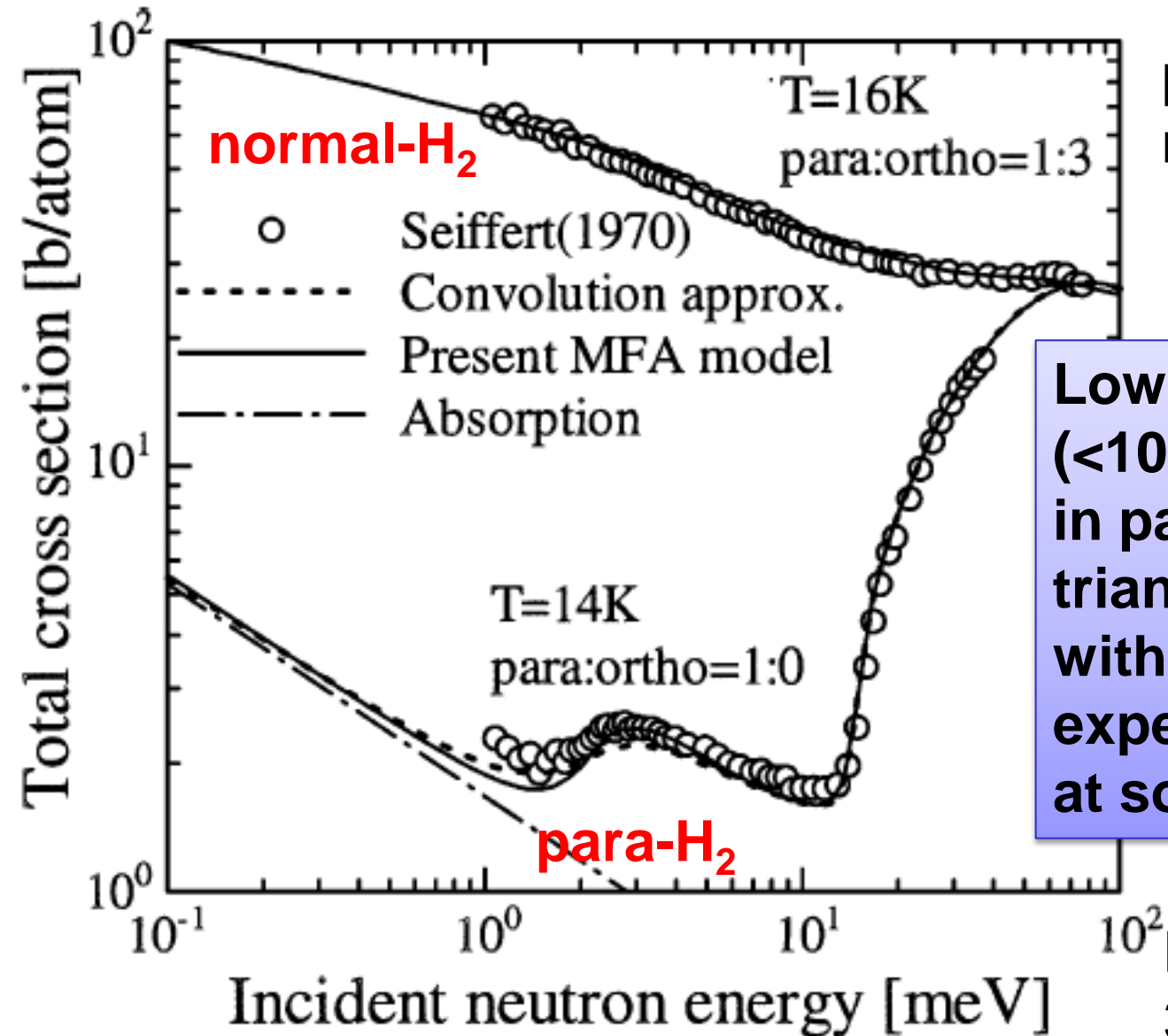


If the triangle is fulfilled with moderator material, we can get more intense collimated beam, in particular, low energy neutron?

# W型冷中性子源のPHITS計算体系図



# Total cross sections for liquid hydrogen



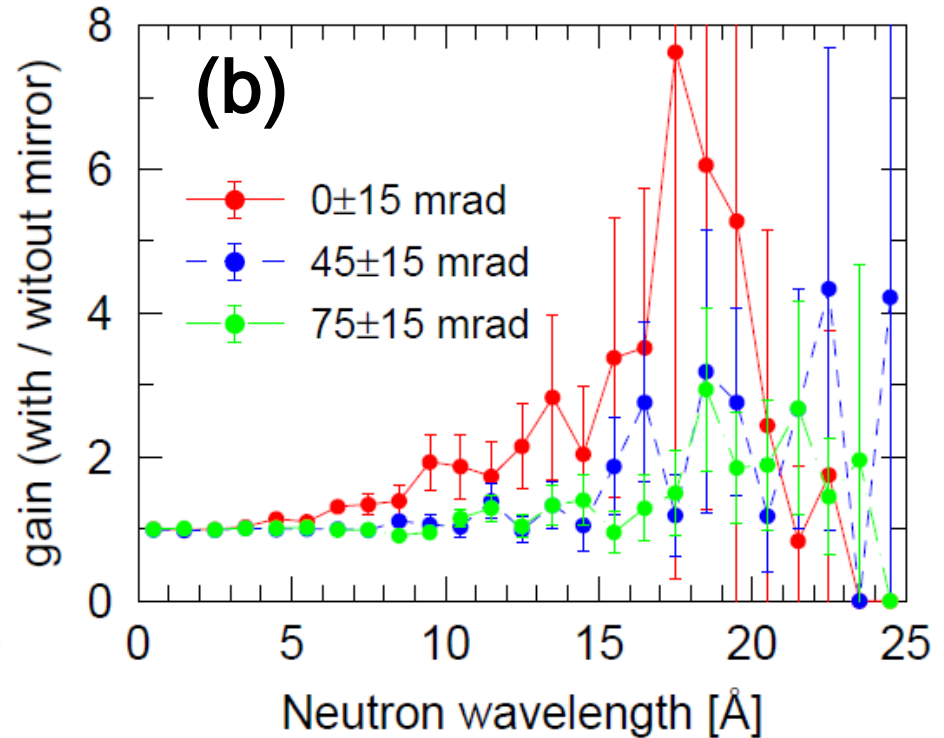
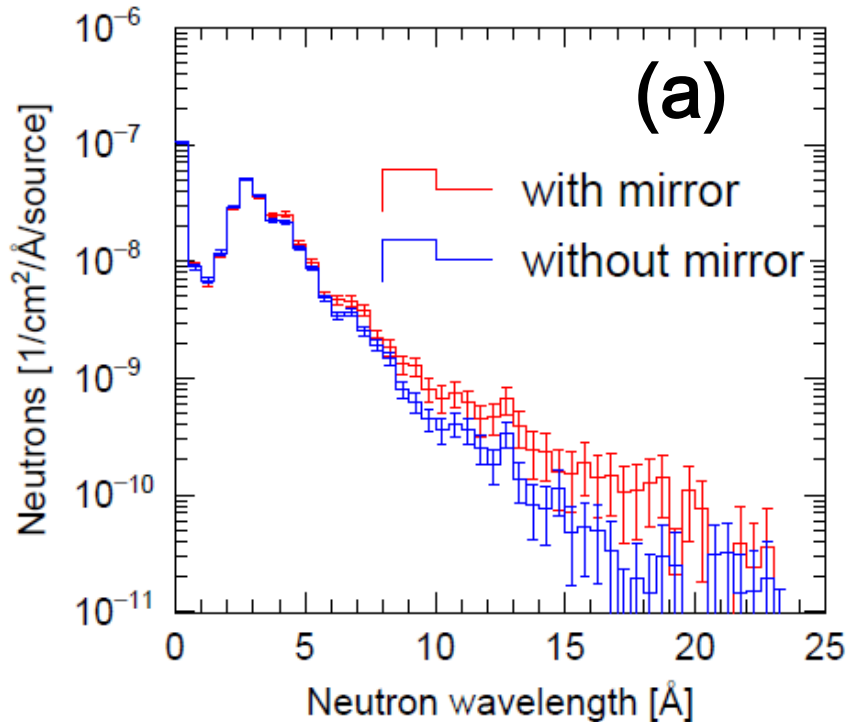
para-H<sub>2</sub>@14 K  
normal-H<sub>2</sub>@16K

Low energy neutron (<10meV) is transparent in para-H<sub>2</sub>. If the triangle shape better with para-H<sub>2</sub>, we can expect much intensity at solid methane...

N. Morishima et al.  
Nuclear Energy  
31 (2004) 737.

# 理想的なダイオードミラーでの強度比較

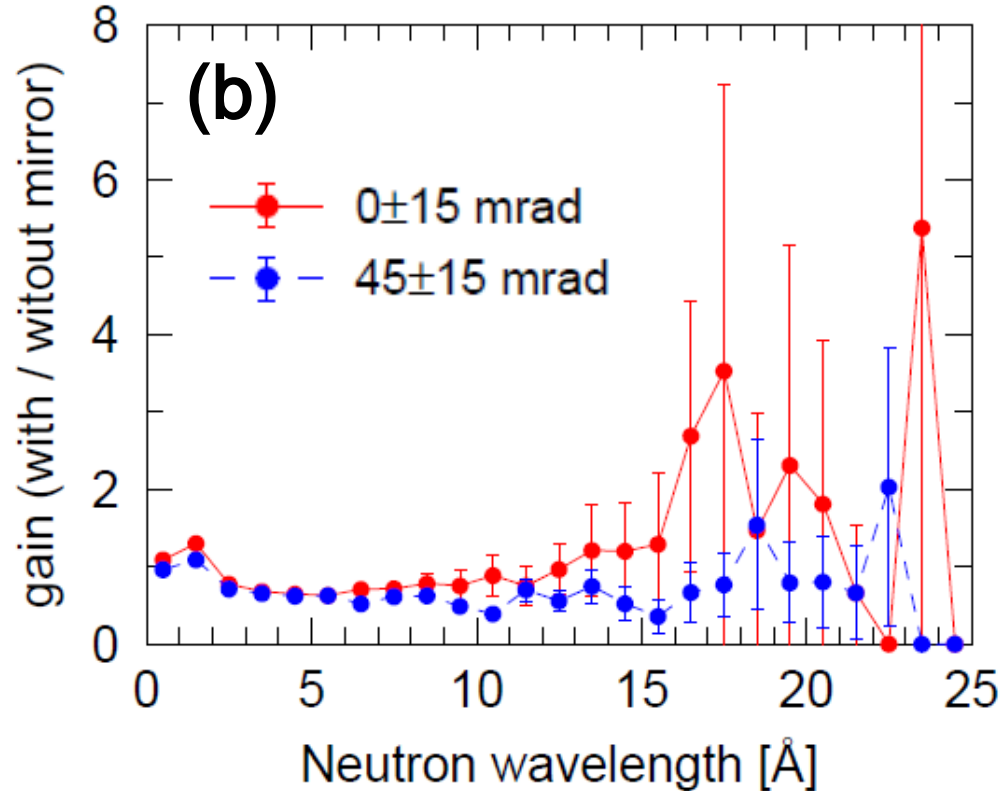
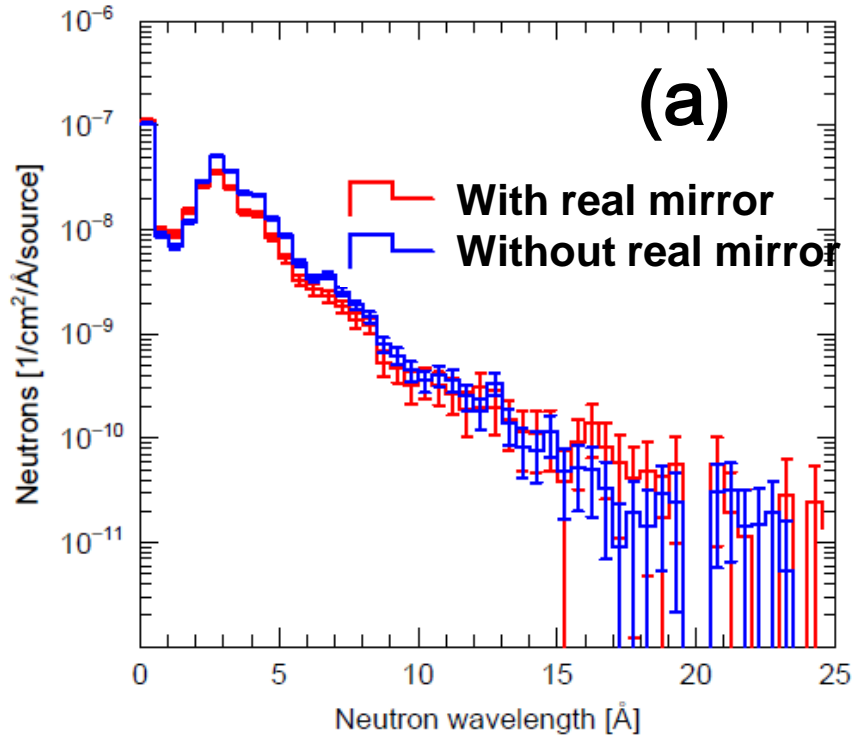
理想的:ミラーの厚みや散乱、吸収は0



(a) 発散角30mradのW形状における中性子ビームのTOFスペクトル(赤がミラー有り、青がミラー無し), (b) 発散角30mradでミラー効果の有り/無しの比。赤:ビーム進行方向がW形状に平行(陽子ビームに垂直: 0mrad)、青: 45mrad傾けた場合、緑: 75mrad傾けた場合。

# 現実的なダイオードミラーでの強度比較

現実的：NiP厚みを $20\mu\text{m}$ 、アルミ厚みを $0.5\text{mm}$



(a) 発散角 $30\text{mrad}$ のW形状における中性子ビームのTOFスペクトル(赤がミラー有り、青がミラー無し), (b)ミラー効果の有り/無しの比。赤:ビーム進行方向がW形状に平行(陽子ビームに垂直:  $0\text{mrad}$ )、青:  $45\text{mrad}$ 傾けた場合。

# まとめ

- ダイオードミラーのアイディア紹介(要実証)。W形状のダイオードミラーに最も不利な減速材であるパラ水素を用いたが、長波長中性子の強度のゲインが確認出来た。
- 固体メタンなど、水素の密度が高く、冷中性子の発生量は多く取り出しにくい減速材で最適形状をさぐる。  
→KUANSでのテスト検討。
- 特に固体冷減速材ならば、そのままでも形状維持ができるため、減速材のみで鏡面とW形状が出来れば、理想的なゲインが期待出来る。
- 長波長中性子であればあるほど有効であるので、指向性を持つ超冷中性子ビームも期待できる。固体重水素で検討を開始している(可能ならKUANS)。