

# 京大炉におけるビーム利用のための次期中性子源検討WS

日時: 2013年1月18日(金) 9:00~16:30

セッション1 座長:川端祐司(京大炉)

9:00~ 9:30 日野正裕(京大炉)「京大炉の次期中性子源検討について」

9:30~10:00 安部豊(京大工)「KURRI パルス中性子源核的特性の予備評価」

10:00~10:30 石禎浩(京大炉)「FFAG 加速器の現状とパルス中性子源に向けたビーム増強計画」

10:30~10:45 休憩

セッション2 座長:岩下芳久(京大化研)

10:45~11:15 田中浩基(京大炉)「BNCT のための加速器中性子源」

11:15~11:45 広田克也(理研)「京大理学部小型中性子源 KUANS」

11:45~12:15 山形豊(理研)「理研の小型中性子源 RANS」

12:15~13:30 昼食

セッション3 座長:日野正裕(京大炉)

13:30~14:00 三島賢二(東大 ICEPP)「超冷中性子源について」

14:00~14:30 勅使河原誠(J-PARC)「J-PARC 大型核破砕パルス中性子源」

14:30~15:30 鬼柳善明(北大工)「北大と世界の中小型中性子源」

15:30~16:30 まとめと議論

※上記講演時間には質疑の時間も含まれます。

# 京大炉の次期中性子源 検討について

京都大学原子炉実験所

日野正裕



2013年1月18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  
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

2013年1月18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WS」@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)

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)

重水設備  
照射室

原子炉

重水タンク

黒鉛熱中性子柱

黒鉛圧気輸送管

世界で最高  
の治療実績  
をもつ  
BNCT設備

世界唯一の極低温照射装置

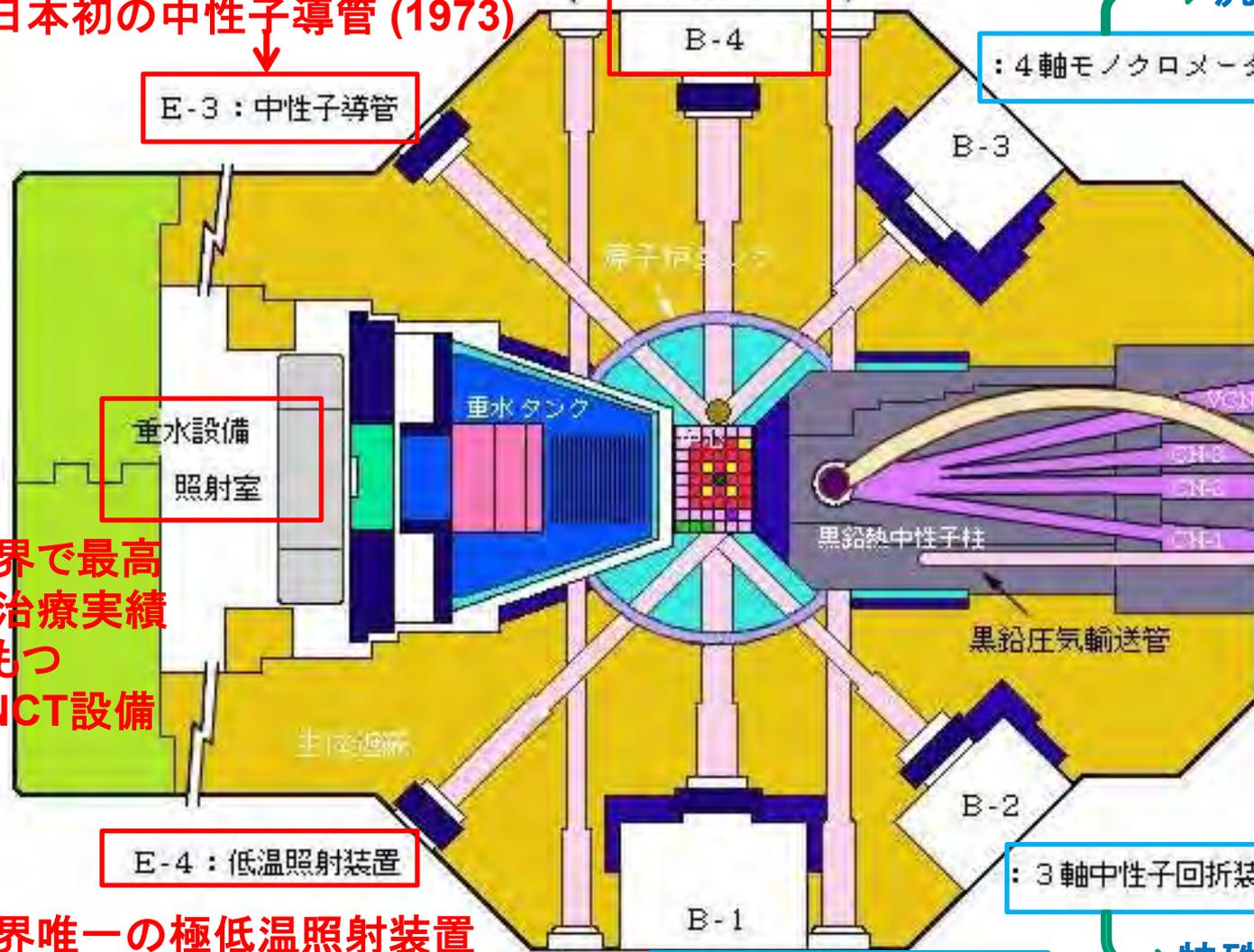
E-4 : 低温照射装置

：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

：鉄フィルタービーム設備

E-1 : 照射孔



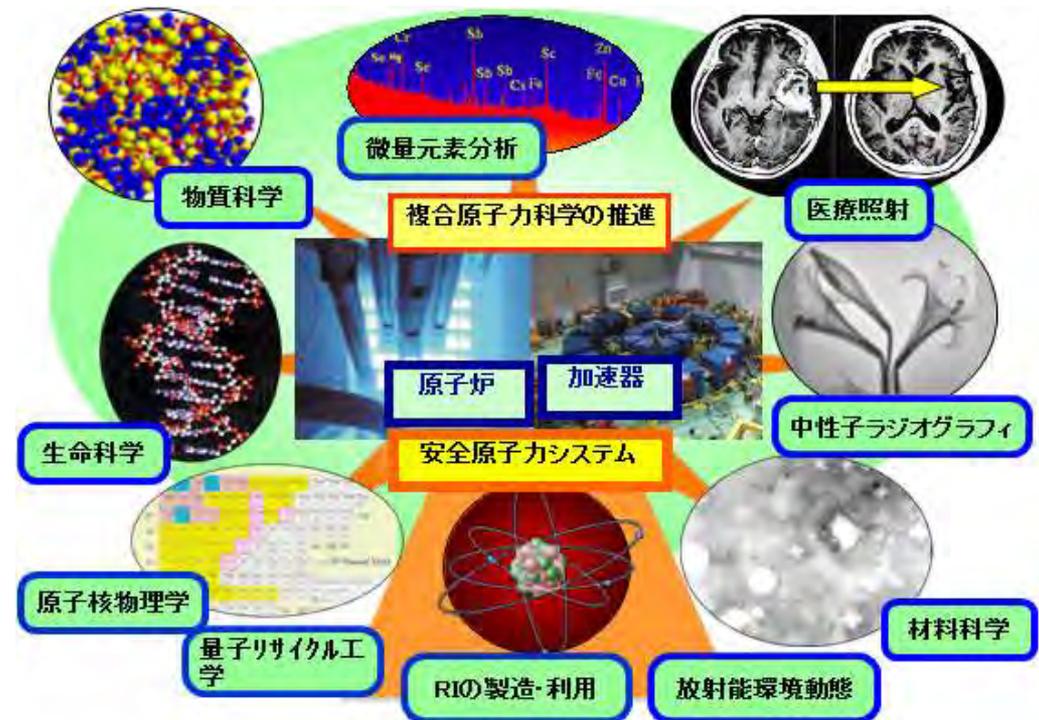
# 特徴的研究として 世界のBNCT施設



# 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。



# 大型施設に対する将来ビジョン

複合原子力科学の推進: 研究炉・加速器を用いた共同利用・共同研究

- 中長期的: 中性子源を確保して積極活用
- H22年度よりKURは新燃料にて再稼働 → 10年程度の運転  
(ただし使用済燃料問題: 2016まで)
- 中期的: KUR/HLの積極活用 → できるだけ長期にわたり利用
- 長期的:
  - KUR後の検討 → 加速器駆動未臨界炉による中性子源
  - FFAG増強によるパルス中性子源の実現

## コミュニティの要望

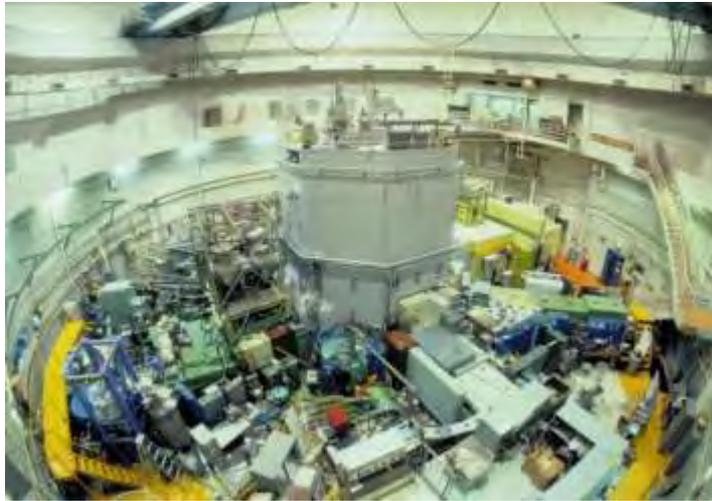
→ 必要とされる研究施設

原子炉実験所の実績に基づく独自性と有用性

→ 原子炉実験所の長所を生かしたユニークな施設

2号炉計画の失敗とその前後の迷走・研究活性低下に対する反省

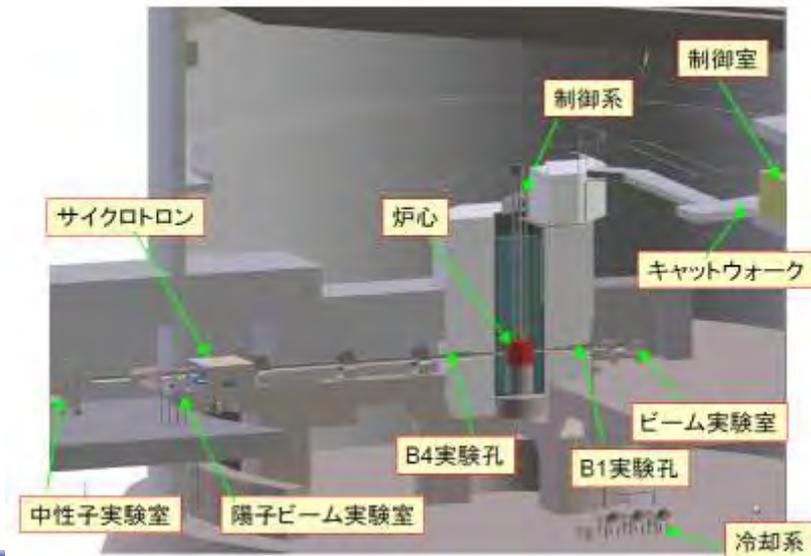
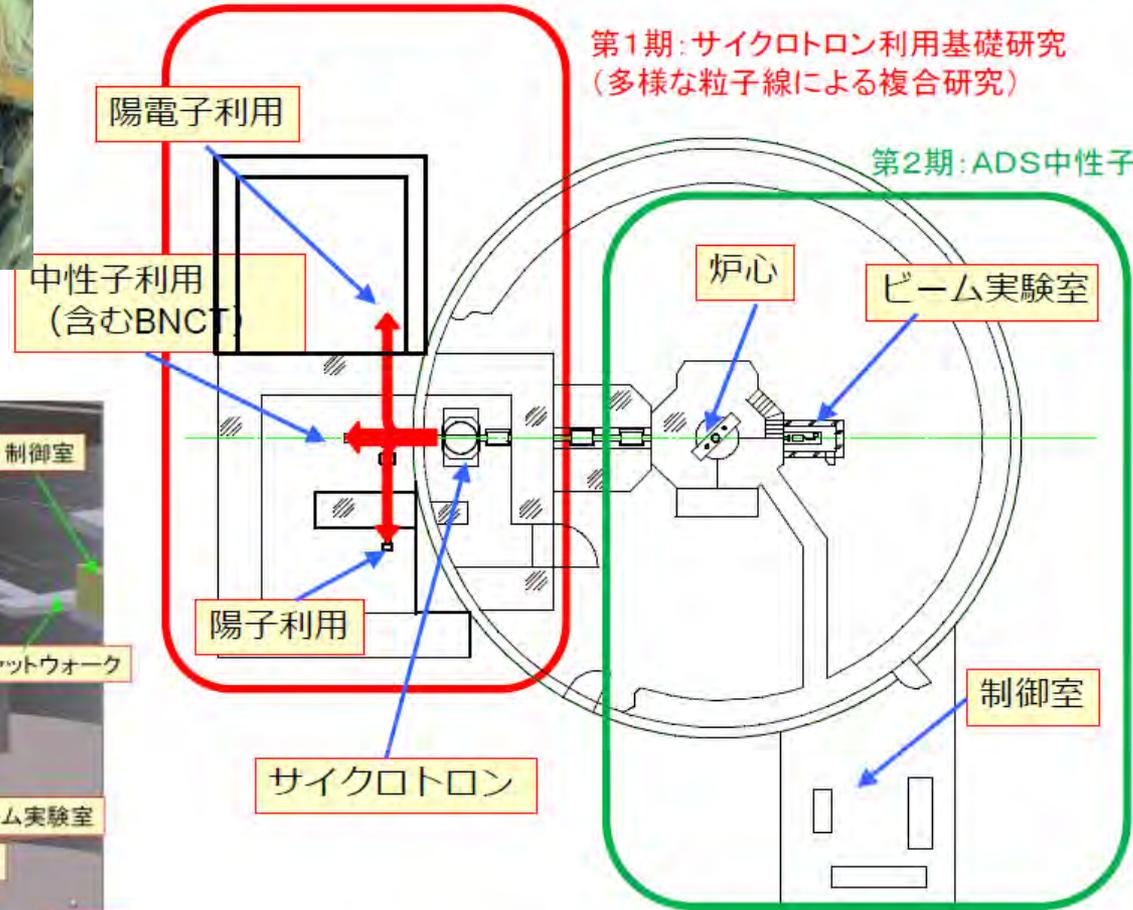
# KUR施設を利用したADS中性子源可能性の検討



## KUR廃炉を視野に入れた 長期的検討

第1期:サイクロトロン利用基礎研究  
(多様な粒子線による複合研究)

第2期:ADS中性子源建設



# ADS研究 (KUCA-FFAG結合実験)

核破碎反応で  
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



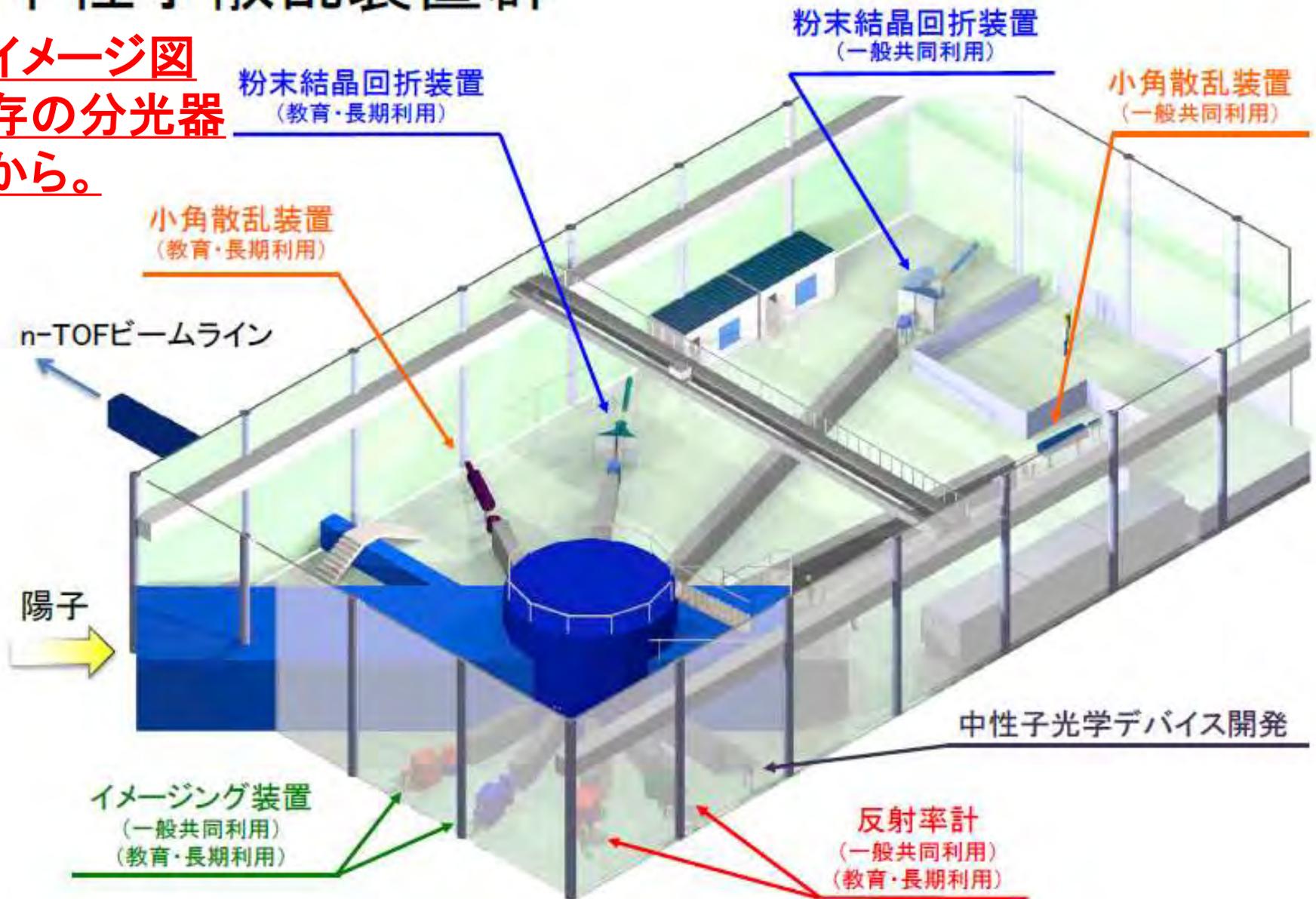
陽子を 100 MeVまで加速

世界で唯一の原子炉と  
加速器の結合システム



# 中性子散乱装置群

**※イメージ図**  
**既存の分光器**  
**等から。**



# 20年後

FFAG(700MeV,40 $\mu$ A?,10Hz)の実現。  
J-PARCの1/10程度パフォーマンス目指す  
(Running costは1/100以下)

## J-PARC 2<sup>nd</sup> Target稼働

# 10年後

FFAG(150MeV,5 $\mu$ A,10Hz)の実現。  
コンパクト中性子源+高性能中性子光学。  
高S/N。KENSを超える実効強度。KURの分光器の性能>x100倍(NR)。関西地区の中性子散乱施設として国内のハブに。

中規模中性子源の理想型の具現化

# 数年後

FFAG(150MeV,1 $\mu$ A,30Hz)の実現。  
中性子源のテスト実験  
→簡単な物性実験(共同利用?)  
→建設のデザイン確定。  
→中性子導管等、製作開始。  
KUR停止後すぐに、1-2台の分光器は実験出来るように。

KUR(低flux)でもユーザーを育て(共同利用活性化)、JRR-3,J-PARC等、国内外の大型施設でも活躍。

# 現在

2013年1月18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WS」@事務棟大会議室

# このワークショップで議論(を開始?) させて頂きたいこと

中規模のビーム利用中性子源開発にあたり、  
小型、大型加速器中性子源の現状を勉強させて  
頂くと共に、後発の中型開発を含めて  
どんな連携が出来るか？

大型(J-PARC)

中型(post-KUR: FFAG中性子源)

小型(RANS, KUANS)

# 小型 (RANS,KUANS) — 中型 (post-KUR) — 大型 (J-PARC) 中性子源高度化の連携の可能性

- 中性子科学分野を盛り上げる(ユーザー開拓、育成、デバイス開発等)の協力は可能  
[http://www.jsns.net/jp/html/committee/Next\\_Reactor\\_Final\\_Report\\_2012Dec.pdf](http://www.jsns.net/jp/html/committee/Next_Reactor_Final_Report_2012Dec.pdf)
- 開発項目の共有化などまで可能か？(先発(大型、小型)中性子源開発の経験→後発(中型)に活きるのは当然だが、後発の中型が小、特に大型へ貢献可能か？)
- 中型は共同利用が必須であるが、大型より自由度ある。ただし存在意義を出すしかけは必要。
- 原子炉とは違い、加速器中性子源ならではの開発におけるメリットを活かしたい(冷中性子源の形状等かなりチャレンジングなことが可能など)

# 陽子加速器による中性子発生(超)基本事項確認

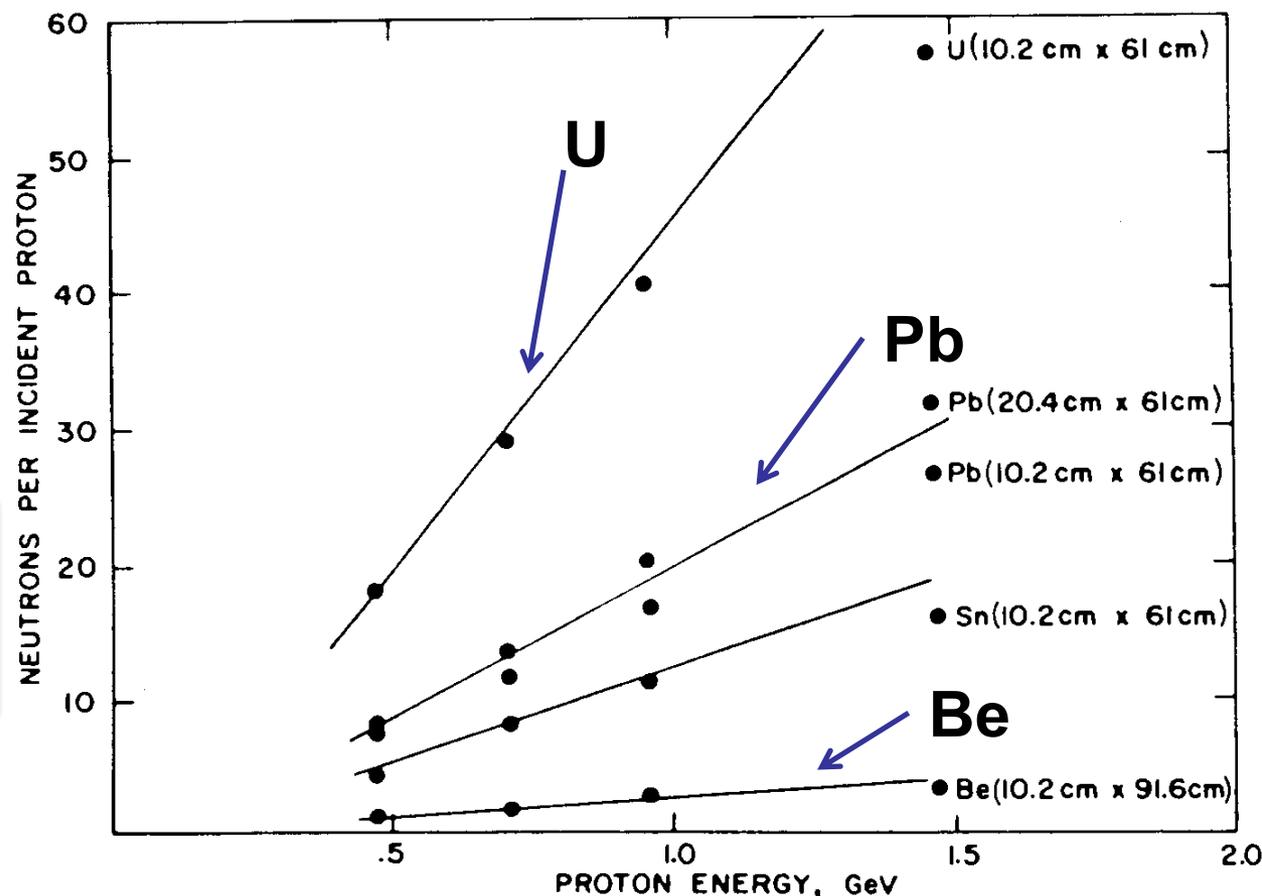
- 陽子ビームの単位(A:アンペア)が使われる。  
A=C/s (C:クーロン)  
~1/(1.602 × 10<sup>-19</sup>)~6.24 × 10<sup>18</sup> protons/sec
- 速中性子数Iはこれに陽子の運動エネルギー依存の発生率Y(E,A)をかけたもの。
- 熱中性子は速中性子を弾性散乱、非弾性散乱を用いて水等で減速する(熱平衡にする。仕組みは原子炉と同じでビリヤード散乱で減速。パルス中性子源とした場合、その時間構造は体系からの脱出時間の寄与が大きい。)

# 高エネルギー(>200MeV)陽子ビームの場合

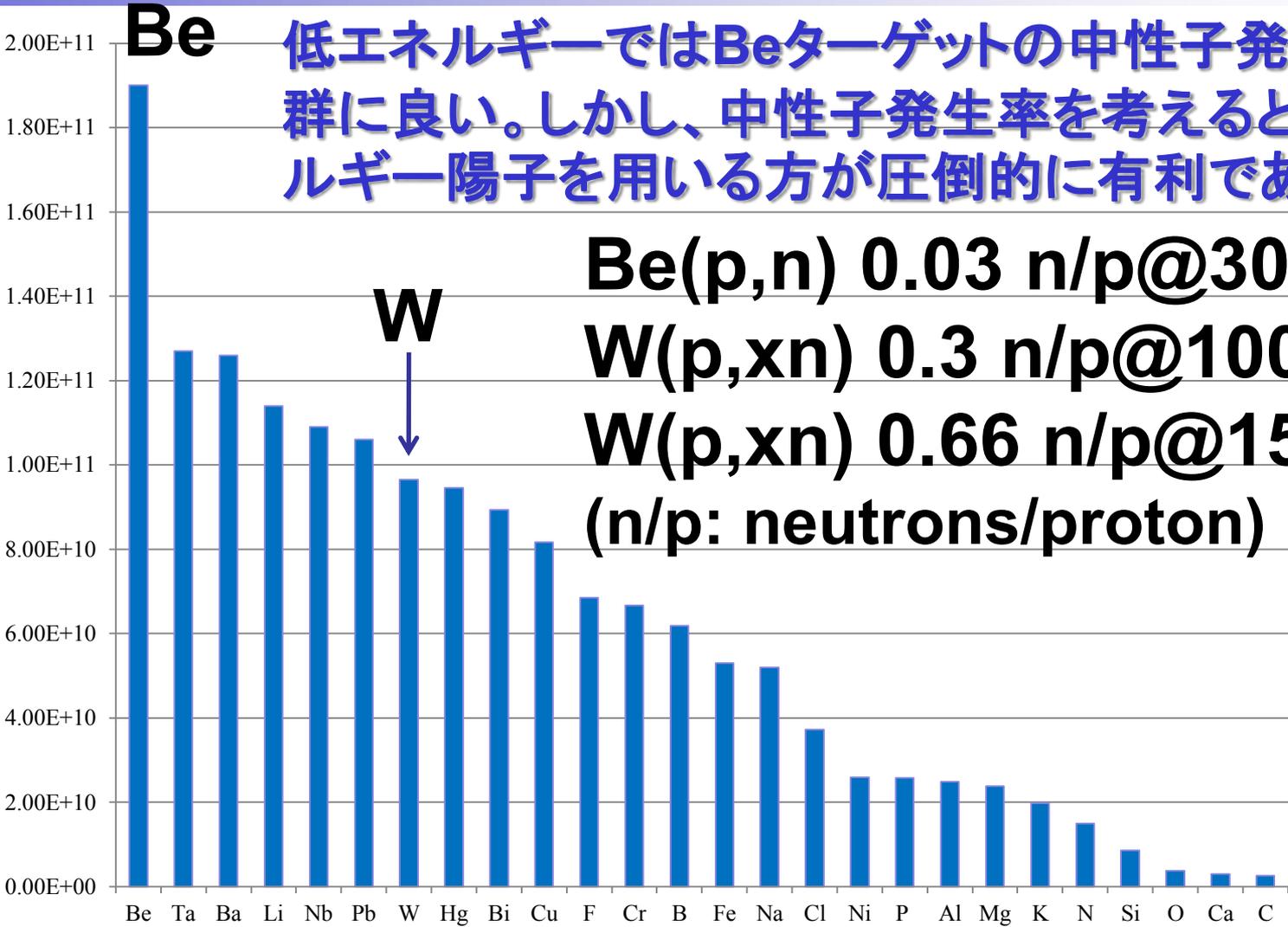
$$Y(E, A) = \begin{cases} 0.1(E_{\text{GeV}} - 0.120)(A + 20), & \text{except fissionable materials} \\ 5.0(E_{\text{GeV}} - 0.120), & {}^{238}\text{U} \end{cases}$$

中性子の発生率  
Y(E,A)は経験式  
で記述可能

高エネルギーで重い原子核ターゲットにあてれば  
中性子発生率は高い。



# Neutrons/ $\mu$ A/sec@30MeV

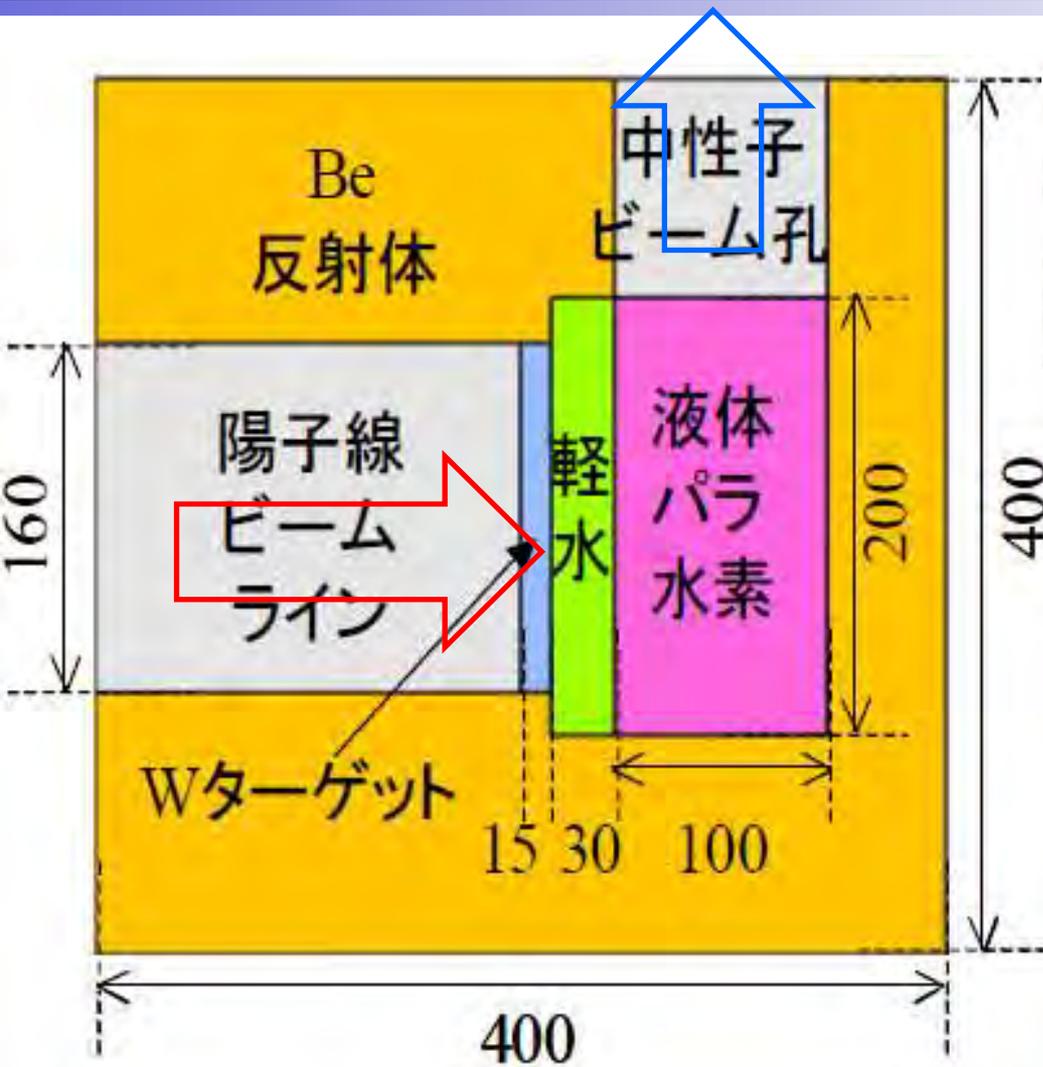


**Be** 低エネルギーではBeターゲットの中性子発生率が抜群に良い。しかし、中性子発生率を考えると、高エネルギー陽子を用いる方が圧倒的に有利である。

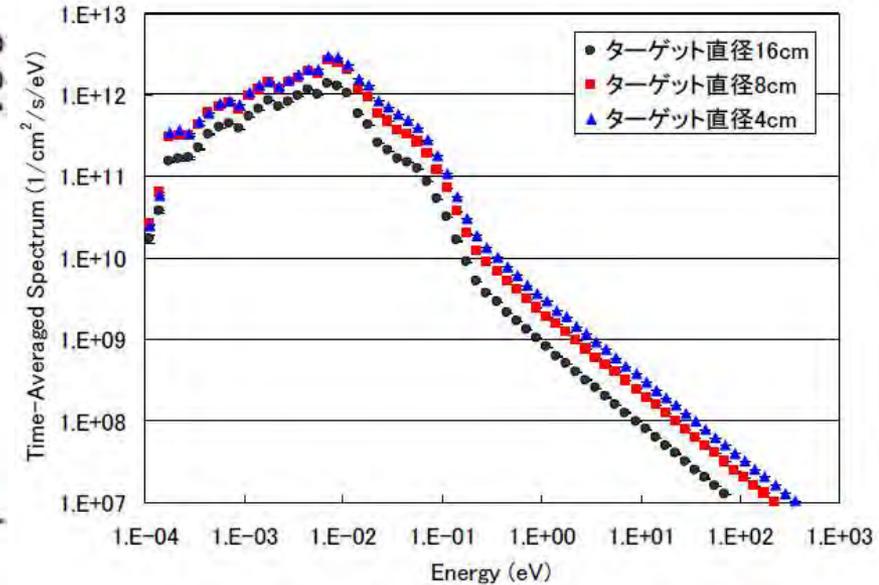
**Be(p,n) 0.03 n/p@30MeV**  
**W(p,xn) 0.3 n/p@100MeV**  
**W(p,xn) 0.66 n/p@150MeV**  
 (n/p: neutrons/proton)



# 検討した典型体系(使用コードPHITS)



陽子エネルギー (MeV)	150
パルス幅 (ns)	40
パルス内平均電流 ( $\mu$ A)	12.5
周波数 (Hz)	10
出力 (kW)	0.75



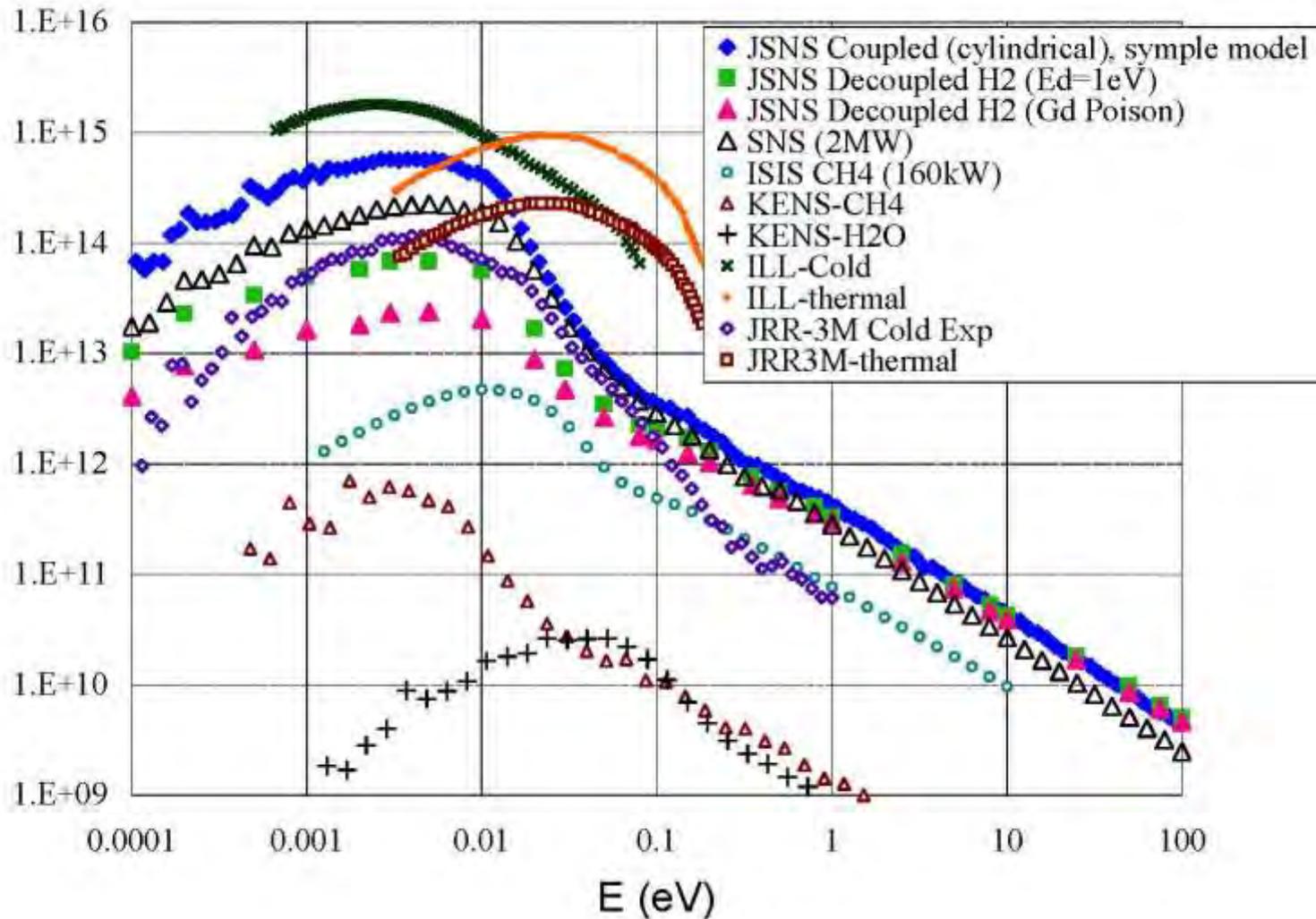
# 中性子源としてKENSレベル出せる可能性は有る。 ただし液体水素利用(KENSは固体メタン)

	KURRI 中性子源モデル(*)	KENS
中性子ピーク強度(1/cm <sup>2</sup> /s)	$1.4 \times 10^{13}$	$3.1 \times 10^{13}$
パルス幅(μ s)	220	100(**)
時間平均中性子束(1/cm <sup>2</sup> /s)	$7.0 \times 10^{10}$	$6.1 \times 10^{10}$
中性子の最確エネルギー(meV)	7	3
陽子エネルギー(MeV)	150	500
陽子時間平均電流(μ A)	5	6
周波数(Hz)	10	20
陽子加速器出力(kW)	0.75	3
中性子 Yield	0.66	19
1パルスあたり的高速中性子発生数	$2.1 \times 10^{12}$	$3.6 \times 10^{13}$
変換効率η	6.7	0.86

詳細は安部さんの発表

2015年1月18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WS」@事務棟大会議室

# KENSレベルとは？ J-PARCの1/1000



# KENS レベルとは(@試料位置)?

## KENS SWAN

Accelerator power : 5 kW

Intensity :  $2 \times 10^4$  n/sec @ sample with CNS

Beam size :  $2 \times 2$  cm<sup>2</sup>

## KUR SANS(CN2)

Reactor power : 5MW → 1MW

Intensity:  $2 \times 10^{13}$  n/sec/ cm<sup>2</sup> (thermal) → x1/5

$7 \times 10^{12}$  n/sec/ cm<sup>2</sup> (cold source) → ×

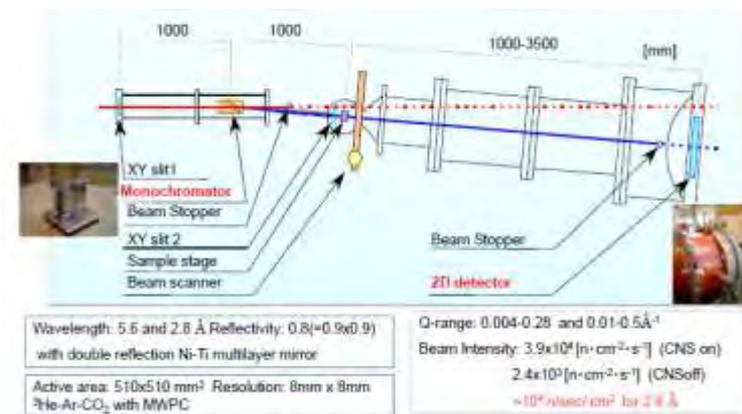
Intensity :  $1.0 \times 10^4$  n/sec @ sample with CNS → ×

@5.5Å :  $5.0 \times 10^2$  n/sec @ sample without CNS → x1/5

→ @2.8Å :  $2.5 \times 10^3$  n/sec @ sample without CNS (5MW)

$1.0 \times 10^3$  n/sec @ sample without CNS (1MW)

Beam size :  $0.5 \times 0.5$  cm<sup>2</sup>



短波長用モノクロメーターを利用@KURRI

現在のKUR-SANSはKENS(SWAN)の1/20(試料小なら1/5)。このビーム強度でも共同利用を活性化できている。

**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！**

**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、粉末回折等は既存の原子炉の  
装置は大きく上回れる可能性大！**

**(京大炉では製膜技術の向上により、スーパーミ  
ラー導管の自作も可能→BL06建設でテスト)。**

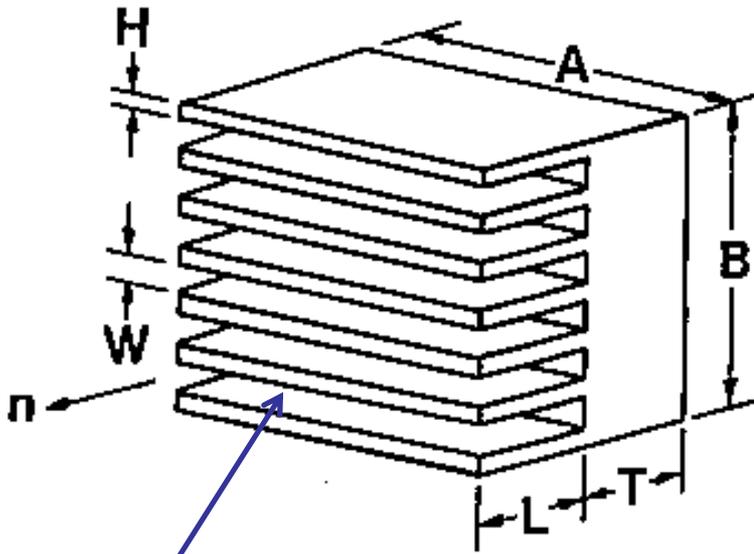
# KUR(KENS)を上回るだけで、良いのか？

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？

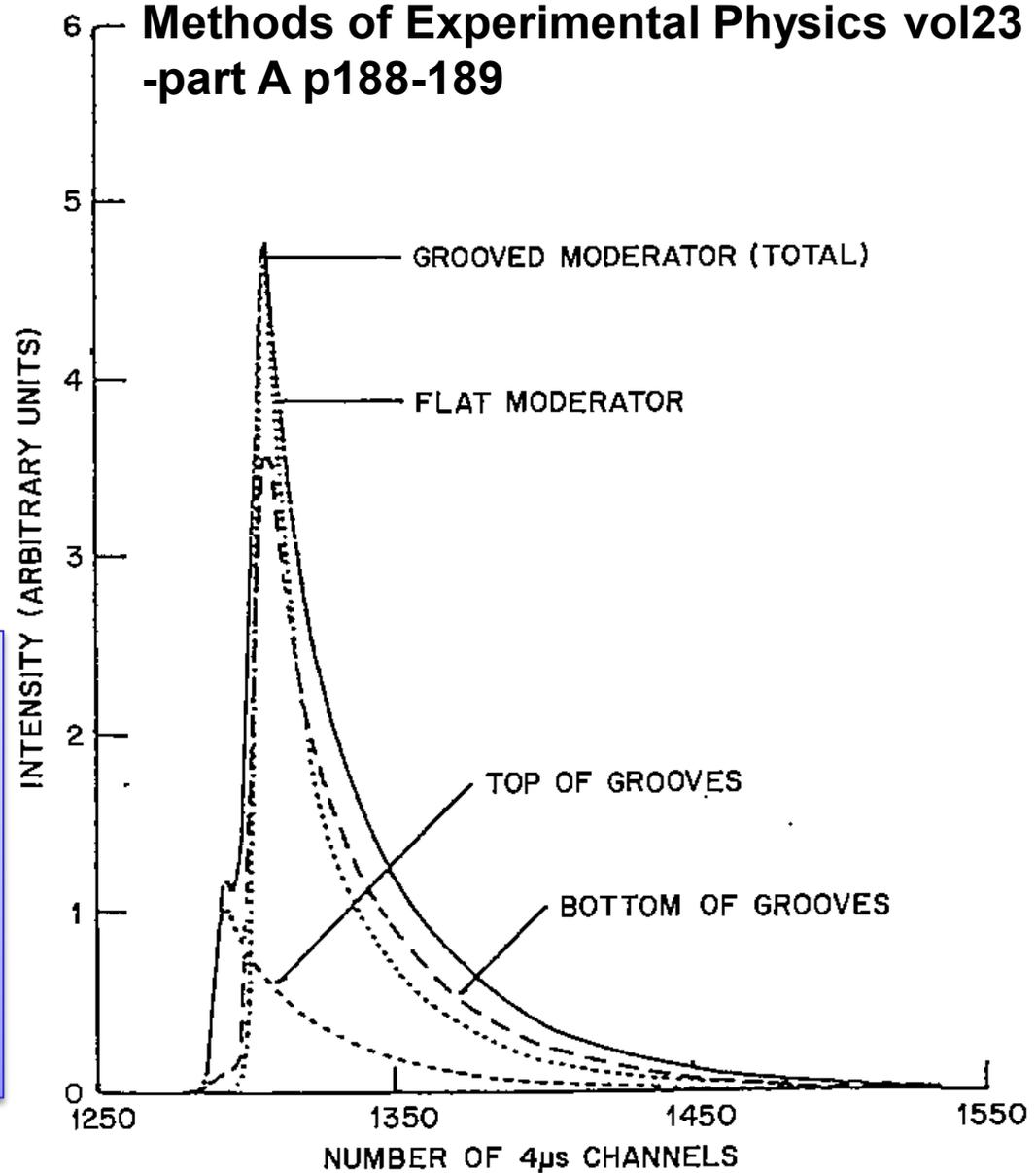
冷中性子源の高度化、可能ならば革新的冷中性子源設計の道を、J-PARC 2<sup>nd</sup> ターゲット等も意識して、探りたい。

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



例えば、Grooveに光学デバイス(ミラー)等を挿入するなどして、もっと低温の中性子orもっと発散角なども制御した中性子ビームが取り出せないか？工学的に困難？



# Storage of very cold neutrons in a trap with nano-structured walls (PLB 679 (2009) 186)

E.V. Lychagin et al. / Physics Letters B 679 (2009) 186–190

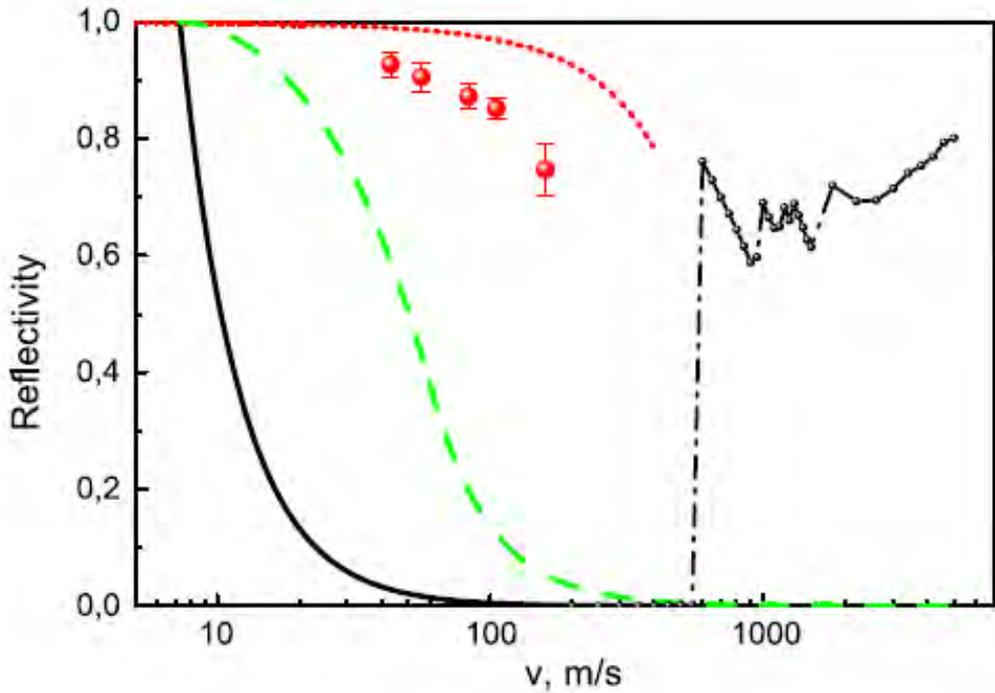
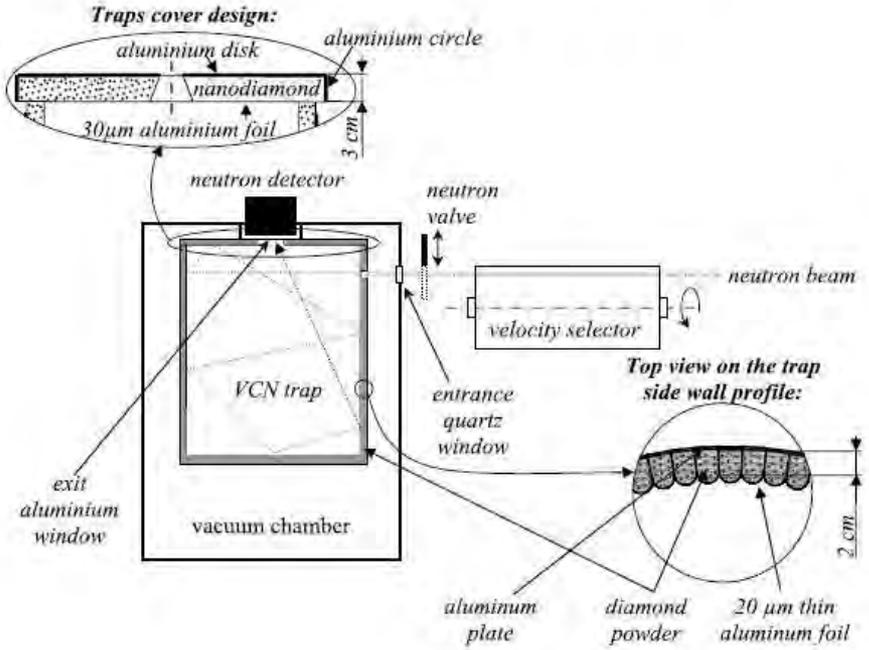


Fig. 9. The elastic reflection probability for isotropic neutron flux is shown as a function of the neutron velocity for various carbon-based reflectors: (1) Diamond-like coating (DLC) (thin solid line), (2) The best supermirror [16] (dashed line), (3) Hydrogen-free ultradiamond [15] powder with the infinite thickness (dotted line). Calculation. (4) VCN reflection from 3 cm thick diamond nanopowder at ambient temperature (points), with significant hydrogen contamination [this Letter]. Experiment. (5) MCNP calculation for reactor graphite reflector [2] with the infinite thickness at ambient temperature.

様々な粒径Diamond powderと配置等をうまく配置することでVCNの強度は劇的に上がる可能性あり？しかし、強度は弱いので一般的な物性利用は難しいか(分光法開発要素有り?)



# 第1回 京大炉におけるビーム利用のための次期中性子源検討WS

セッション1 座長:川端祐司(京大炉)

9:00~ 9:30 日野正裕(京大炉)「京大炉の次期中性子源検討について」

9:30~10:00 安部豊(京大工) 「KURRI パルス中性子源核的特性の予備評価」

10:00~10:30 石禎浩(京大炉) 「FFAG 加速器の現状とパルス中性子源に向けたビーム増強計画」

10:30~10:45 休憩

セッション2 座長:岩下芳久(京大化研)

10:45~11:15 田中浩基(京大炉)「BNCT のための加速器中性子源」

11:15~11:45 広田克也(理研)「京大理学部小型中性子源 KUANS」

11:45~12:15 山形豊(理研)「理研の小型中性子源 RANS」

12:15~13:30 昼食

セッション3 座長:日野正裕(京大炉)

13:30~14:00 三島賢二(東大 ICEPP)「超冷中性子源について」

14:00~14:30 勅使河原誠(J-PARC) 「J-PARC 大型核破砕パルス中性子源」

14:30~15:30 鬼柳善明(北大工)「北大と世界の中小型中性子源」

15:30~16:30 まとめと議論

※上記講演時間には質疑の時間も含まれます。