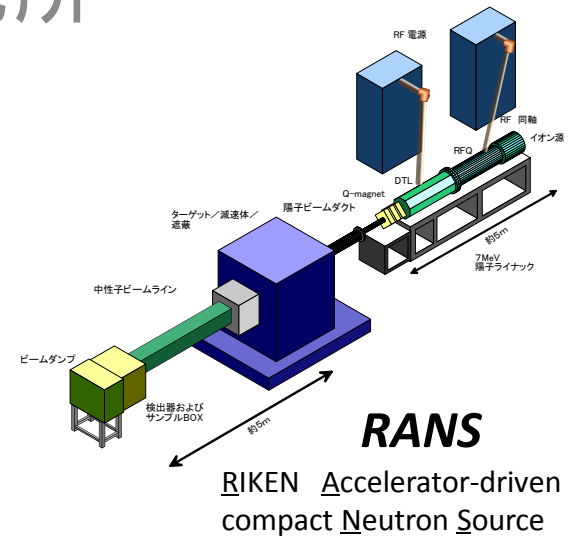


# 理研における小型中性子源 RANS

(独)理化学研究所  
山形 豊



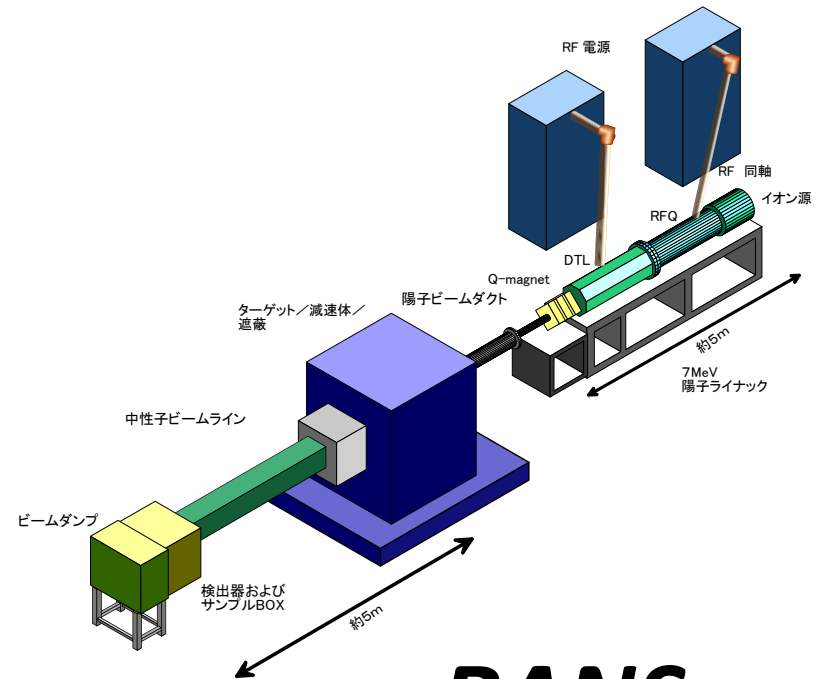
# 理研の小型中性子源計画

## • 特長

- 陽子線、低エネルギー核反応 $\text{Be}(p,n)$ を利用
- 7MeV、100 $\mu\text{A}$ の商用加速器を利用
- 遮蔽が小型化(自己遮蔽可能?)
- 産業界との連携を念頭に開発
- 可搬型にも適応可能(?)

## • 技術的課題

- 高耐久性ターゲット(Be)の開発
  - 長寿命ターゲットの開発
  - 低放射化によるメンテナンスの容易化
- 減速体の最適化
  - 高フラックス化、短パルス化のバランス
  - Mesitylene を用いた冷中性子源
- 小型・低コストな遮蔽体のデザイン
  - 複層型遮蔽をデザイン中



# RANS

RIKEN Accelerator-driven  
compact Neutron Source

# 小型中性子源の可能性

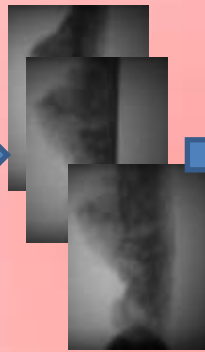
- 小型の弱い強度で役に立つことができるのか？



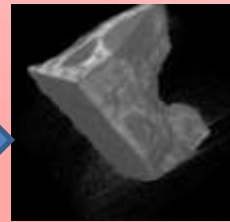
JRR-3 MUSASI  
 $8 \times 10^5 \text{ n/cm}^2/\text{sec}$



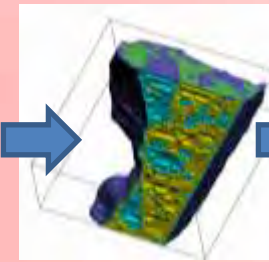
コンクリート片



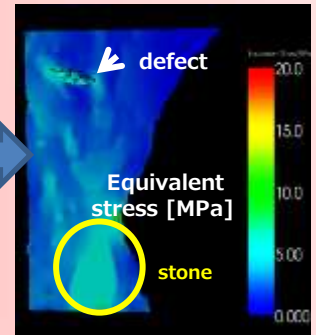
中性子  
ラジオグラフィ



CT再構築  
領域分割  
V-CAT



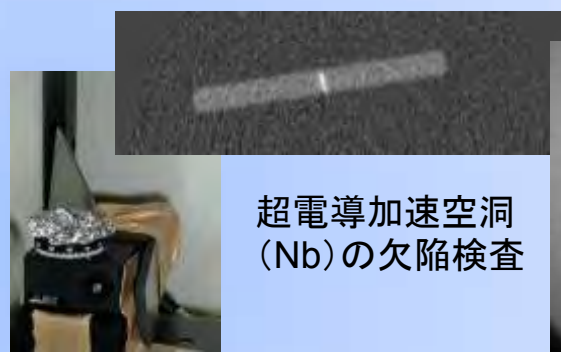
メッシュ化  
V-DualGrid



構造解析  
V-struct



KUR E-2



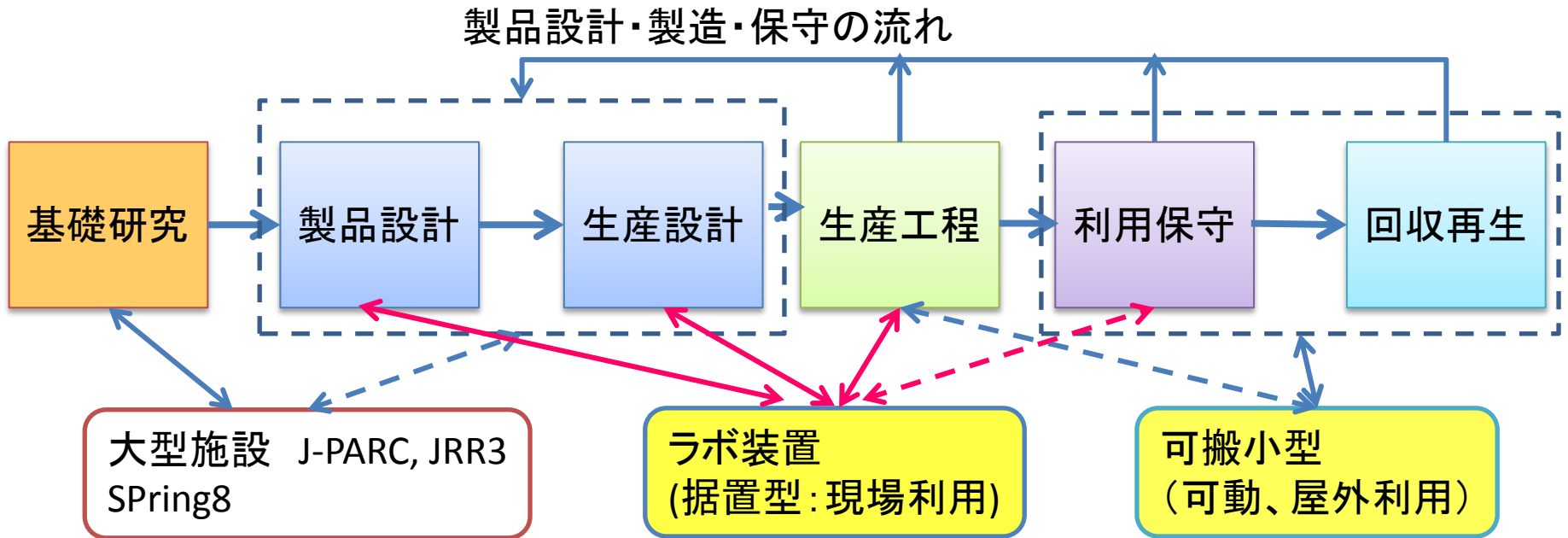
超電導加速空洞  
(Nb)の欠陥検査



E-2 ポート:  $\phi 15 \text{ cm}$  の熱中性子ビーム  $8 \times 10^4 \text{ n/cm}^2/\text{sec}$  (1MW)  $4 \times 10^5 \text{ n/cm}^2/\text{sec}$  (5MW)

静止画撮影、CT再構築では充分役に立つデータの取得が可能

# 産業における小型中性子源の利用

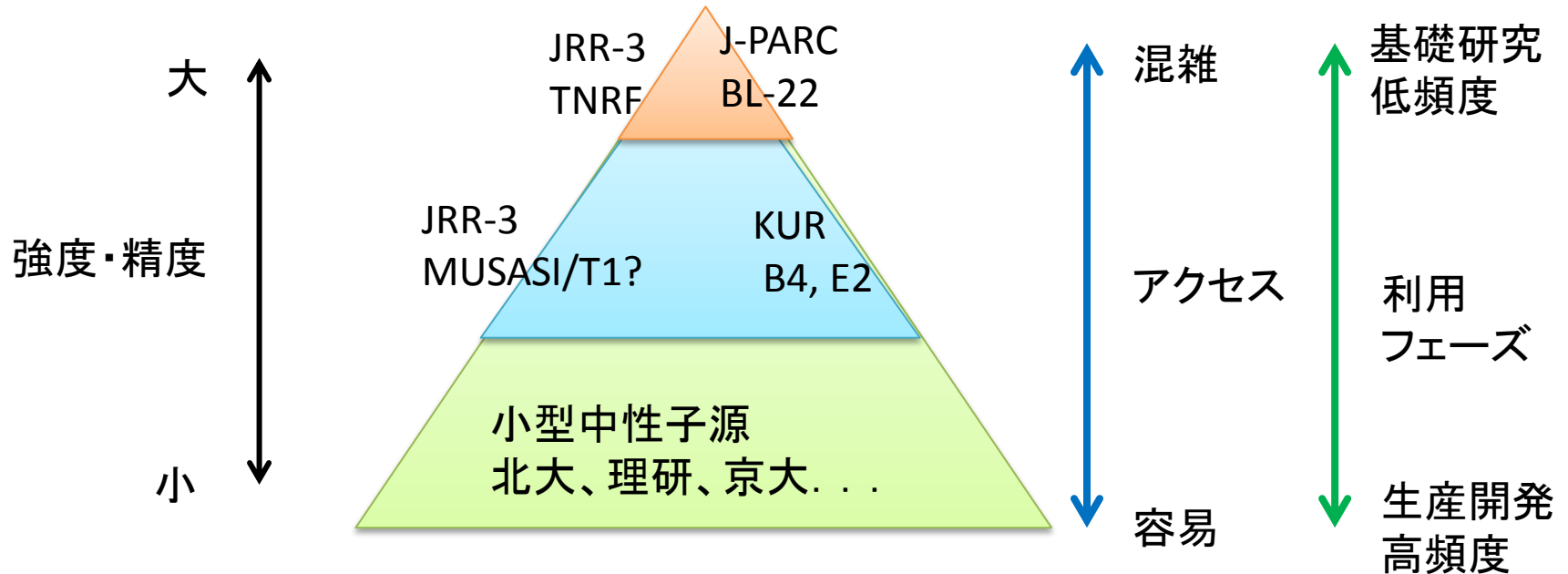


物質構造解析にも！

- 自動車産業、航空機／宇宙産業などでの利用が見込まれる。

# 小型中性子源の位置づけ

## アクセスが容易な中性子イメージング設備の拡充



- 具体的なアプリケーションに特化したイメージング手法の開発
  - 大型施設(デパート) ↔ 小型線源(専門店)
- 計測手法や画像処理手法の開発
  - 供用利用されている施設では、大幅な改造は容易では無い
  - 頻繁な更新により手法確立を進める

# 小型中性子源に適した発生手法

- 電子線ライナック(光核反応)
  - 加速器は小型・高性能
  - ガンマ線の遮蔽(コンクリート3~4m厚が必要?)
- プラズマ核融合管 比較的コンパクト
  - D-D反応
    - 発生中性子量( $10^8 \sim 10^9$ n/sec)、密度が低い
  - D-T反応
    - 発生量は比較的多い( $10^{10} \sim 10^{14}$ )が、放射性物質(Tトリチウム)の取り扱いが問題
- 重陽子線低エネルギー核反応(Be, Li)
  - 低エネルギーで中性子発生量を多く取ることが可能だが、加速器の放射化が問題(メンテナンスが困難)
  - ターゲットの寿命
- 陽子線 低エネルギー核反応
  - 放射化物の発生が少ない(メンテナンスが容易)
  - 発生量が比較的多い( $10^{11} \sim 10^{14}$ n/sec)
  - ターゲットの寿命

利点

問題点・課題

{ Be(p,n)  
 Li(p,n)

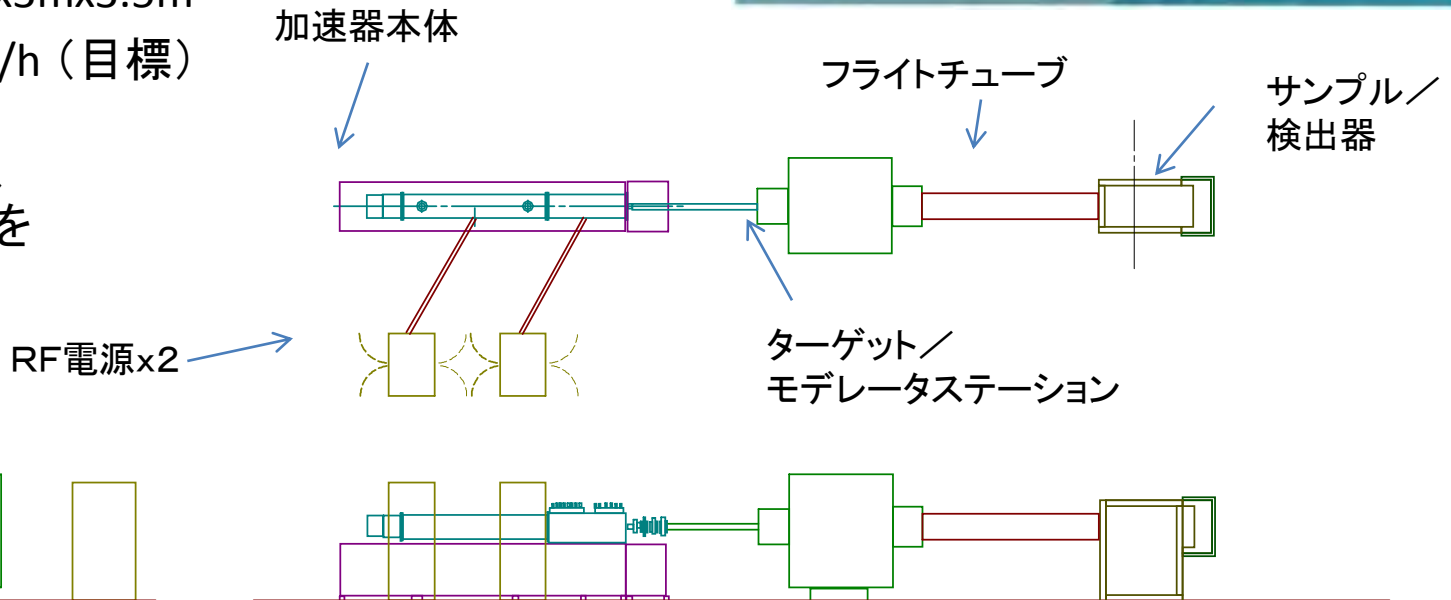
{ サイクロトロン  
 ライナック

# 理研和光小型中性子源-Phase-I

- 加速器: 7MeV, 100uA, 出力0.7kW Q-magnet
- ピーク電流10mA, パルス幅30-200us, 20-200Hz
- RF電源: 300kW(peak) duty 8%
- 必要用材: 電力 40kVA, 冷却水:75L/min
- 中性子発生量:  $10^{12}$ (n/sec)
- ビームライン: 熱中性子ビームラインx1
- 検出器: 中性子カメラ(ラジオグラフィー)
- 設置寸法: 18mx3mx3.5m
- 遮蔽線量: 1uSv/h (目標)



直線状に配置し、  
早期の立ち上げを  
目指す。



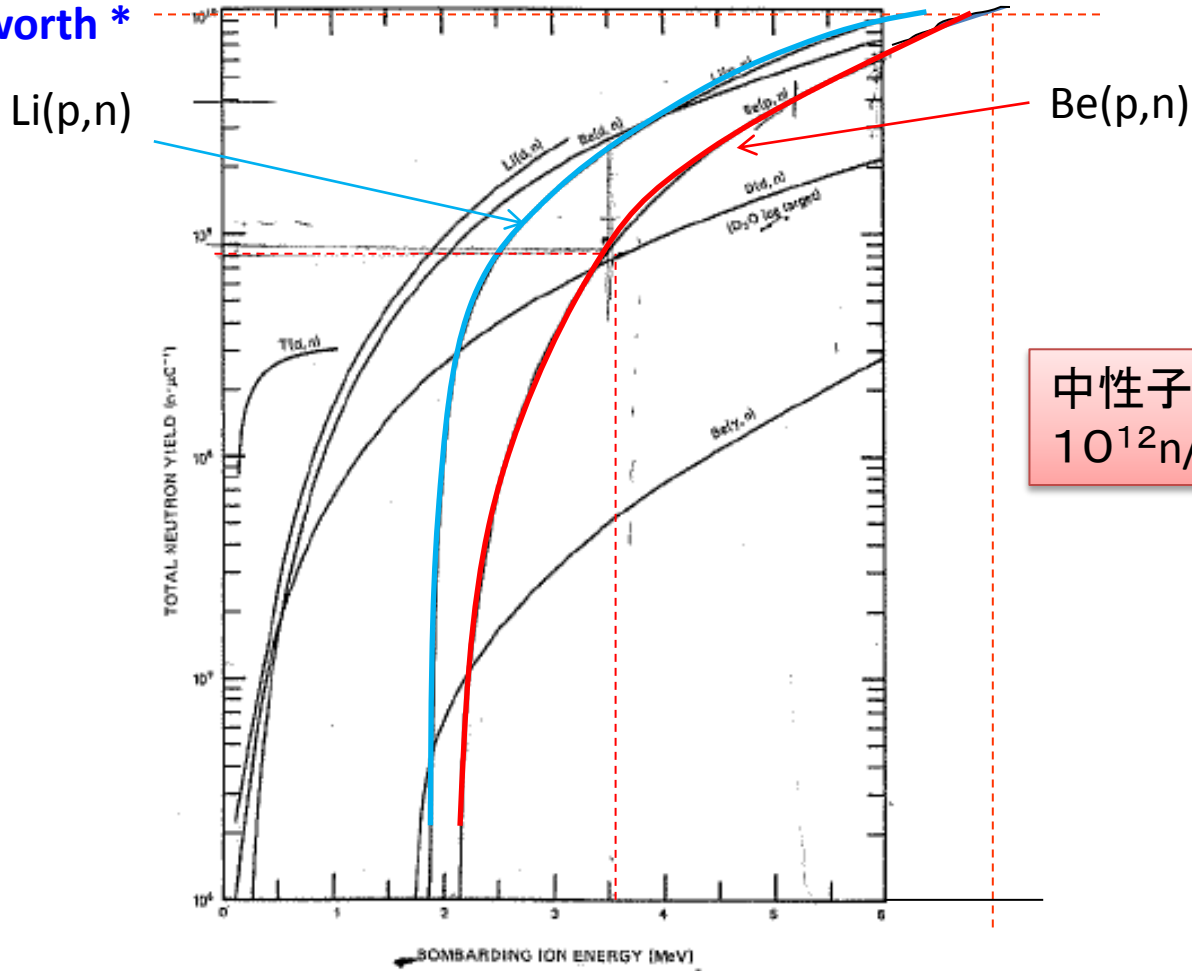
# PHITS コードによる小型中性子源 の性能予測と遮蔽設計



# 中性子発生量



◆ Total neutron yield extrapolated from the experimental data of M.R. Hawkesworth \*



中性子発生量：  
10<sup>12</sup>n/sec@100μA

◆ From an empirical formula\* \* :

$$Y_N(E_p) = 3.42 \times 10^8 (E_p - 1.87)^{2.05} \text{ (n/}\mu\text{C)}$$

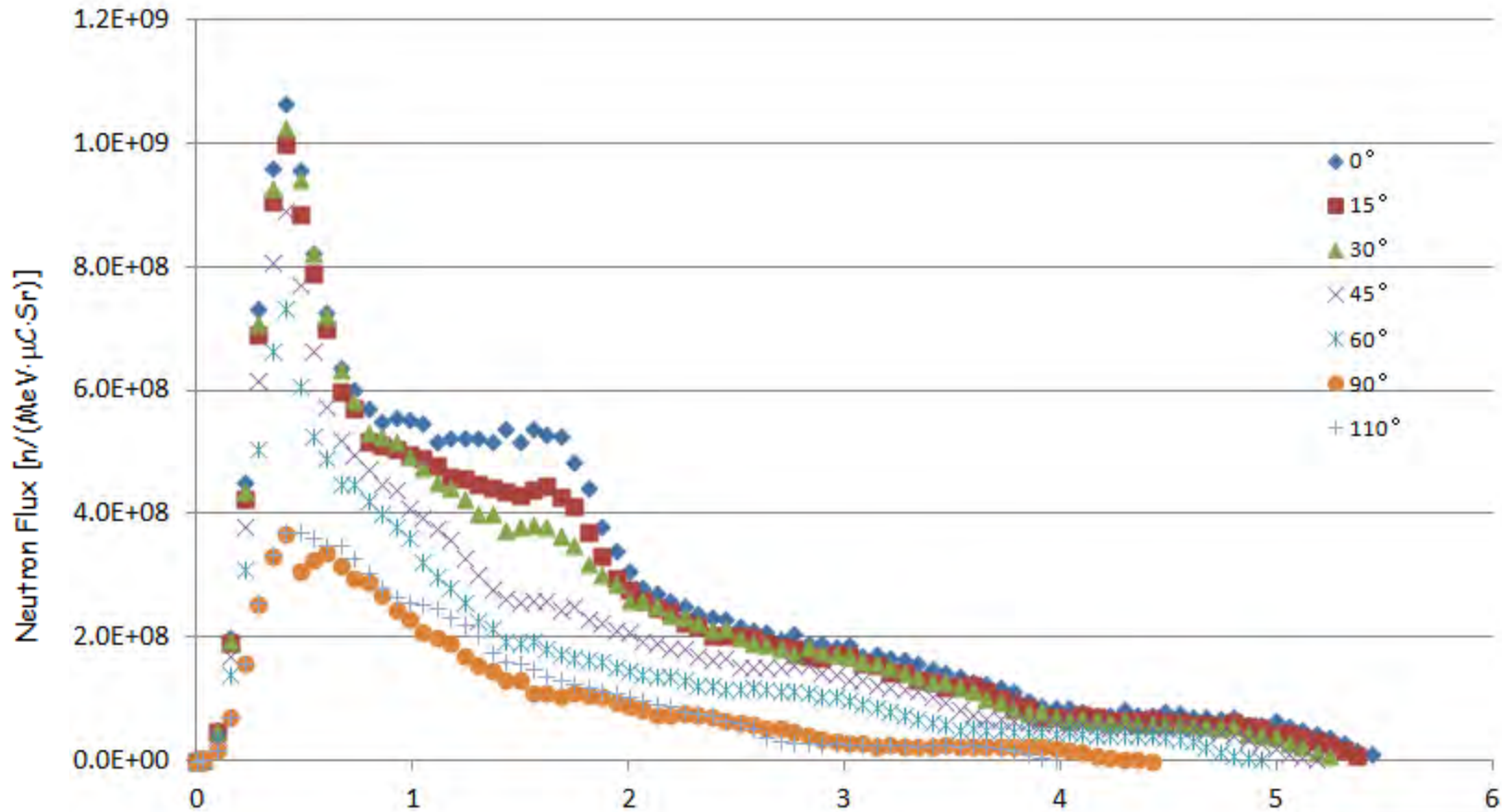
$$Y_N = 9.8E+9 \text{ n/}\mu\text{C}$$

\* M.R. Hawkesworth, Atomic Energy Review 15 2 (1977), p.169

\* \* C.M. Lavelle, et al, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 587 (2008) 324–341

# Neutron and Gamma Source Data

Neutron energy spectrum: Use TOHOKU Univ. data of 11 MeV\* \* for 7MeV by assuming linear relationship



\* \* 東北大学 サイクロトロン・RIセンター 鎌田創 et al, 厚いターゲットからの生成中性子スペクトルの測定—11 MeV陽子による $^{nat}\text{Be}(p, xn)$ 反応—, 2006年原子力学会春の年会

# Neutron and Photon Source Data

Photon data (from target) was based on the experimental data by J. Raisanen, et al \* :

Absolute  $\gamma$ -ray yields

Isotope	$E_\gamma$ <sup>a)</sup> [keV]	Reaction <sup>b)</sup>	Absolute $\gamma$ -ray yield <sup>c)</sup> [( $\mu\text{C sr}$ ) <sup>-1</sup> ]	
			7 MeV	9 MeV
<sup>7</sup> Li <sup>d)</sup>	429	2	4.33 (7)	2.23 (8)
	478	1	3.59 (8)	2.09 (9)
<sup>9</sup> Be	3562	3	1.95 (8)	1.86 (8)

➤ Photon only generated from  ${}^9\text{Be}(p,\alpha,\gamma){}^6\text{Li}$  when  ${}^9\text{Be}$  bombarded by proton with energy of 7.0 MeV, and the energy is 3.562 MeV

➤  $N_{\gamma 1} = 1.95\text{E}+8$  photons/( $\mu\text{C sr}$ )

➤ The spin of 3.562 MeV state in  ${}^6\text{Li}$  means the angular distribution of outgoing photon must be isotropic in the center of mass \* \*

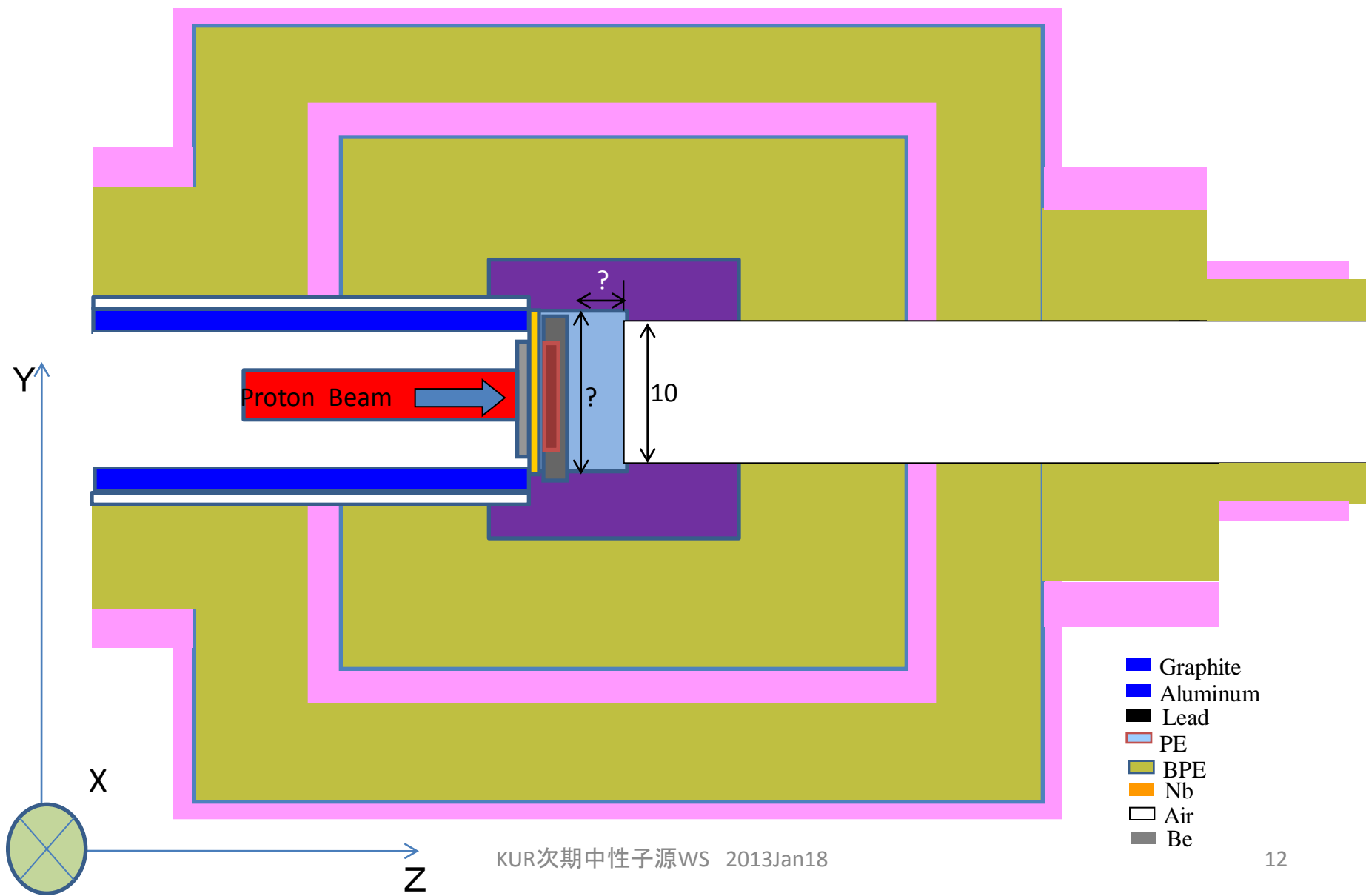
\* J. Raisanen, et al, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B28 (1987) 199-204

\*\* W. B. Howard et al, Nucl. Sci. Eng, 2001



# Moderator/Reflector/Shield calculation

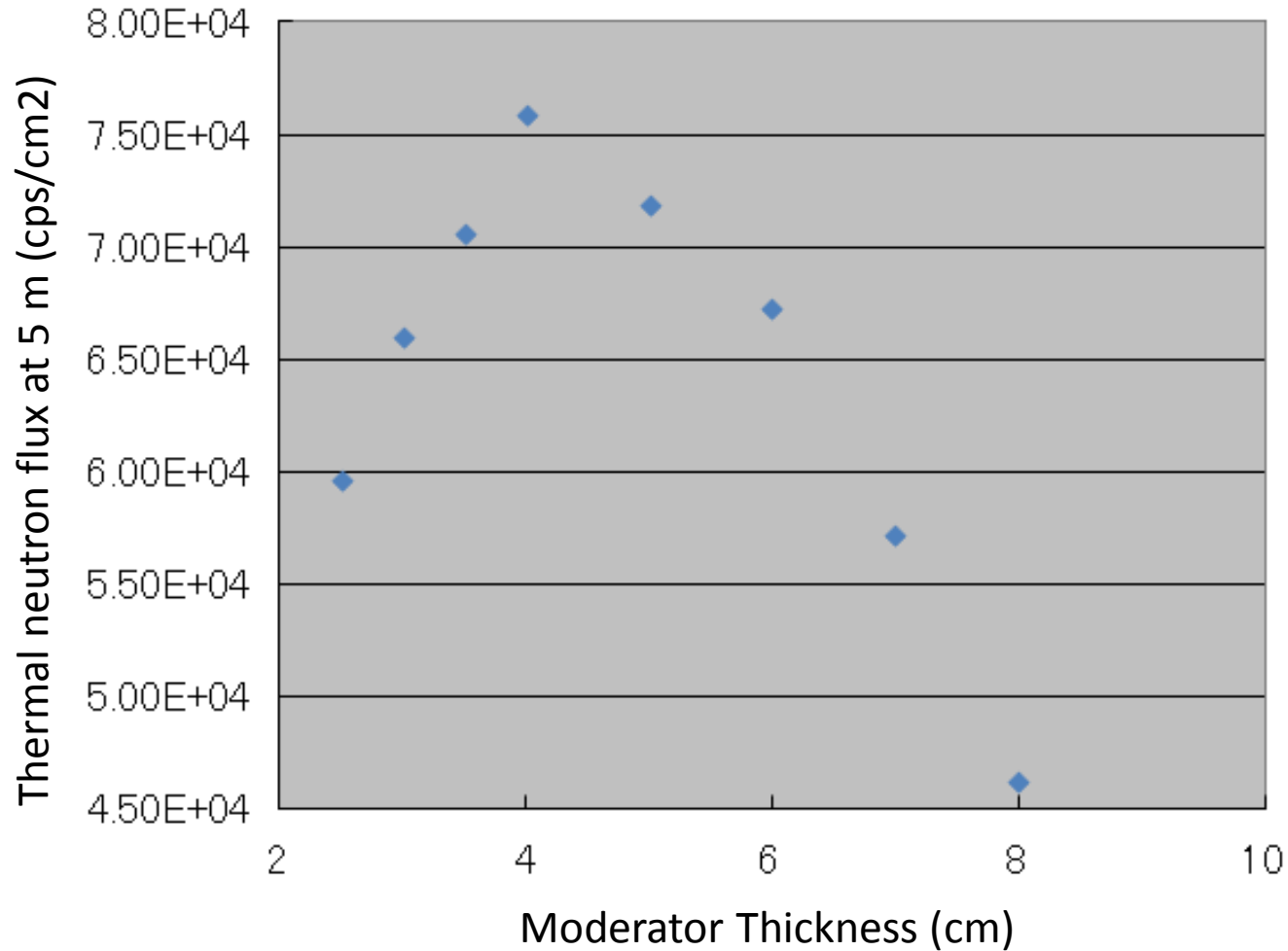
➤ Tool: Monte Carlo calculation with PHITS code



# Moderator/Reflector/Shield calculation (thickness)

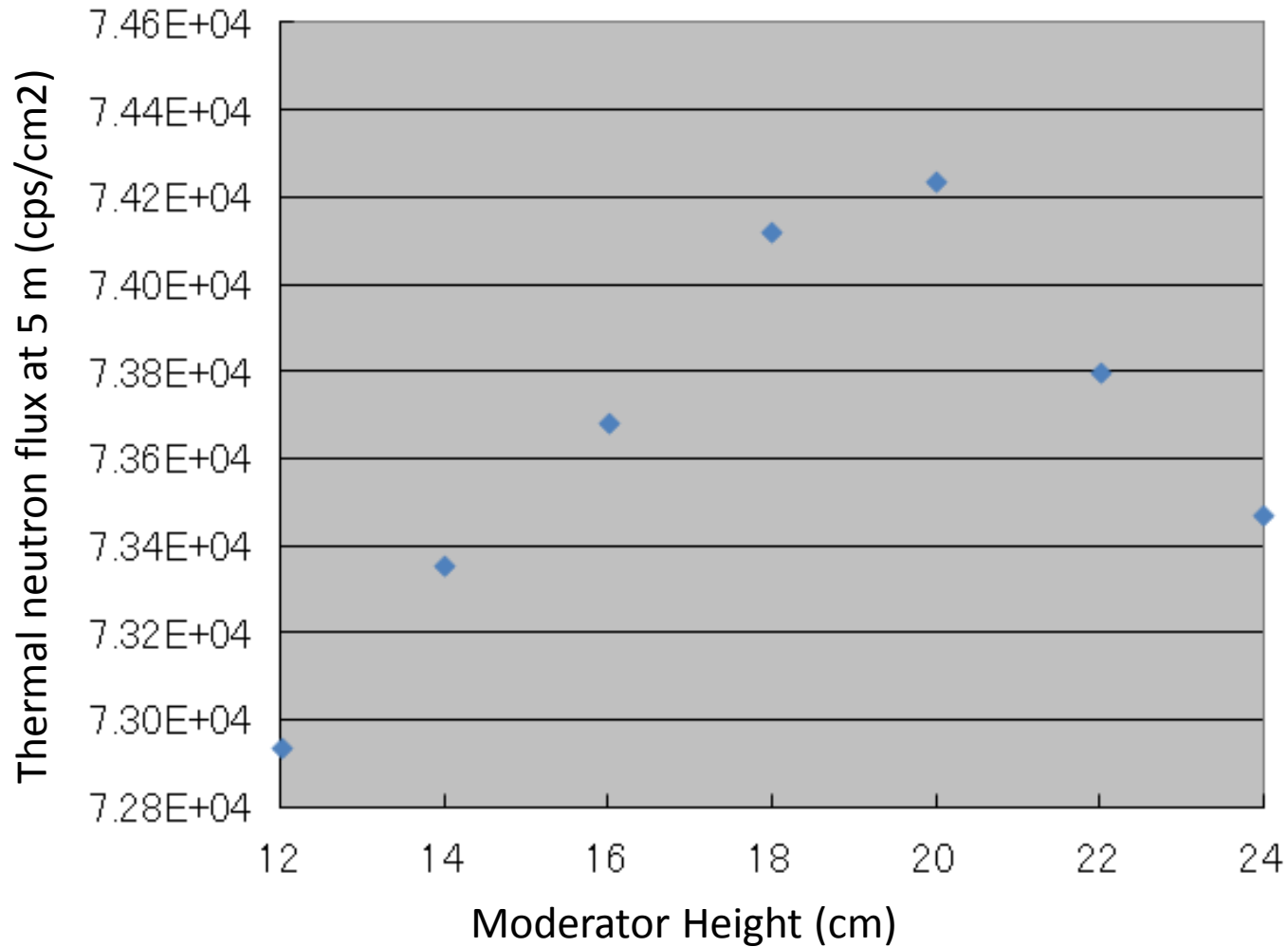
Material: PE

Thermal neutron:  $1.0\text{E-}9 \text{ MeV} \sim 5.0\text{E-}7 \text{ MeV}$



Moderator with thickness of 4 cm has best moderation effect

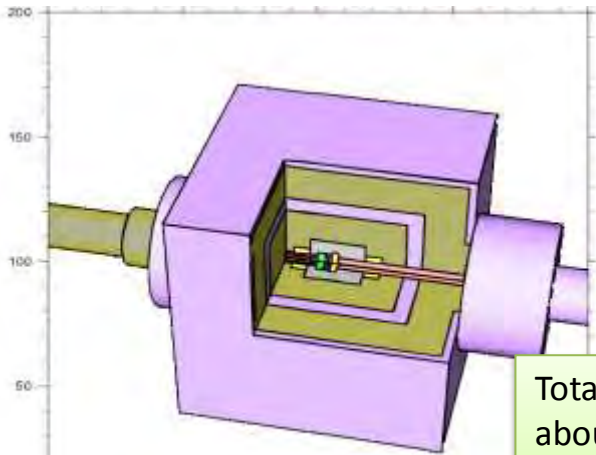
## Moderator/Reflector/Shield calculation (height)



Moderator with height of 20 cm has best moderation effect

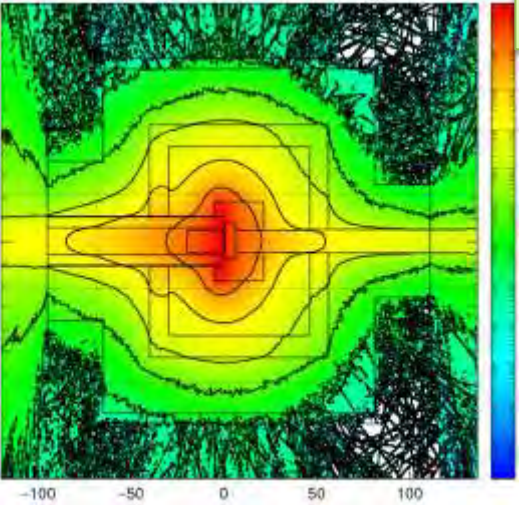
# Performance and radiation shielding estimation of RANS by PHITS code

Multi-layered shielding is designed and optimized by using PHITS code.



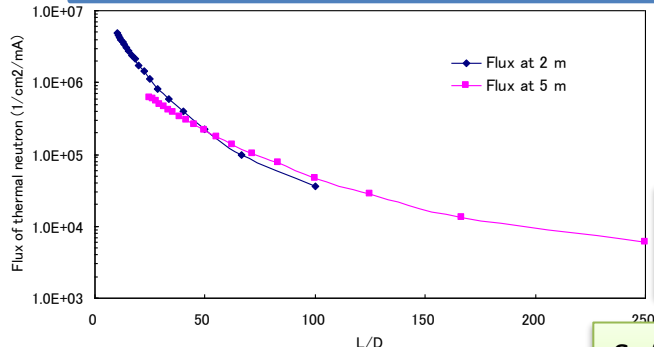
Total size of TMR shielding is about 1.8m cubic. Less than 25 tons.

Radiation dose at the surface of target station surface is below 100uSv/h (neutron + gamma)



## Thermal neutron flux vs L/D

Source data by J.H.Gibbons(1959)



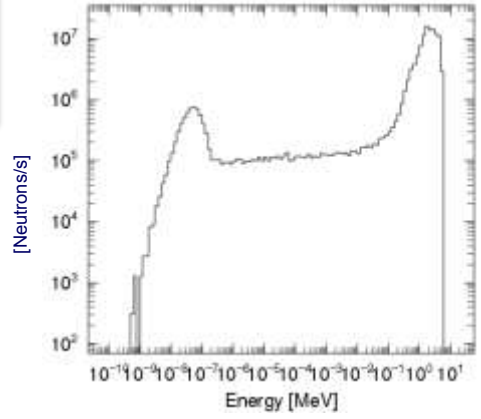
$2.2 \times 10^5 \text{ n/cm}^2/\text{s}$   
(5.4MeV 1mA)



Estimated flux of Riken-RANS

$4.8 \times 10^4 \text{ n/cm}^2/\text{s}$   
(7MeV 100uA)

Sufficient neutron flux for radiography.



Thermal neutron flux is estimated to be  $8 \times 10^4 \text{ n/cm}^2/\text{s}$ . Also fast neutrons can be utilized for non-destructive testing.

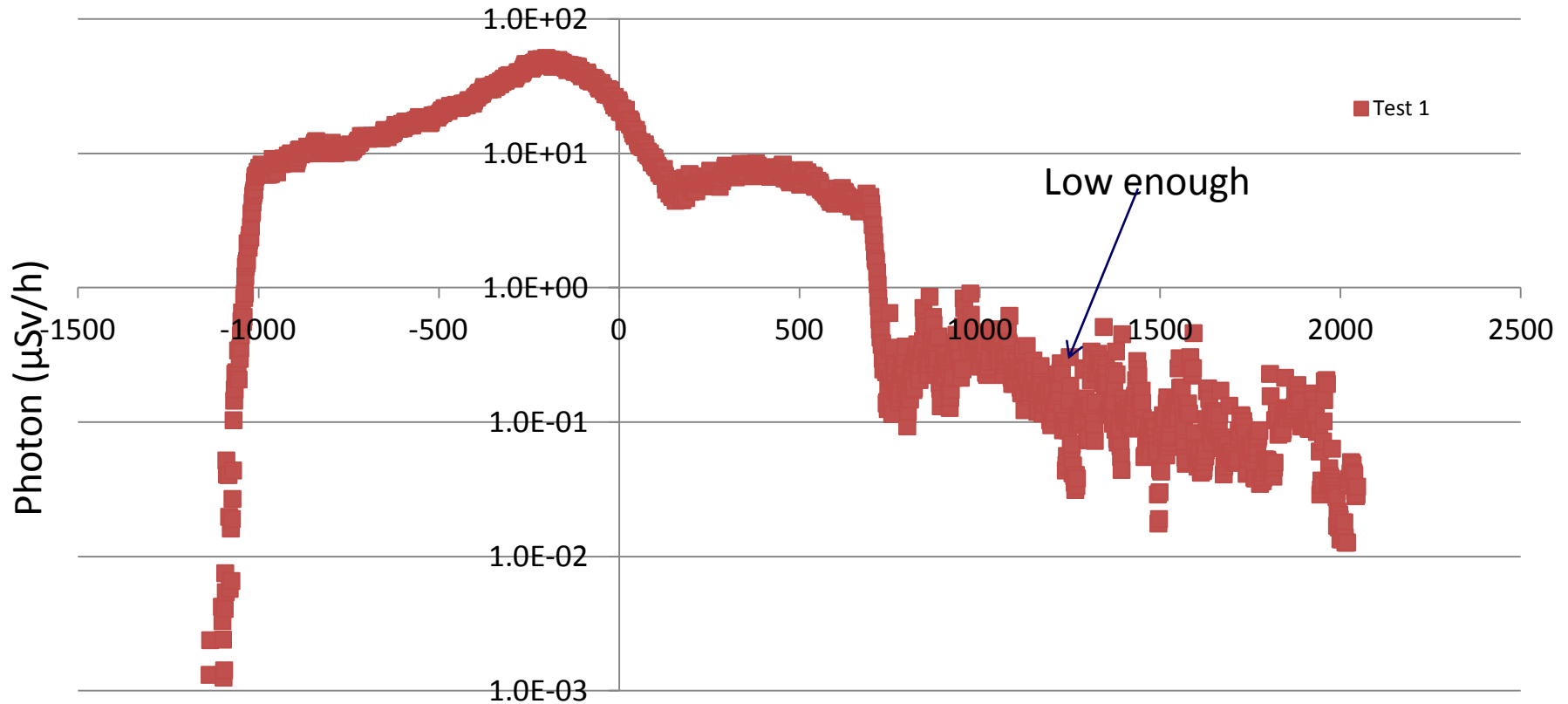
## Neutron Spectrum at 5m from target

Based on the source data by S.Kamata (2006)





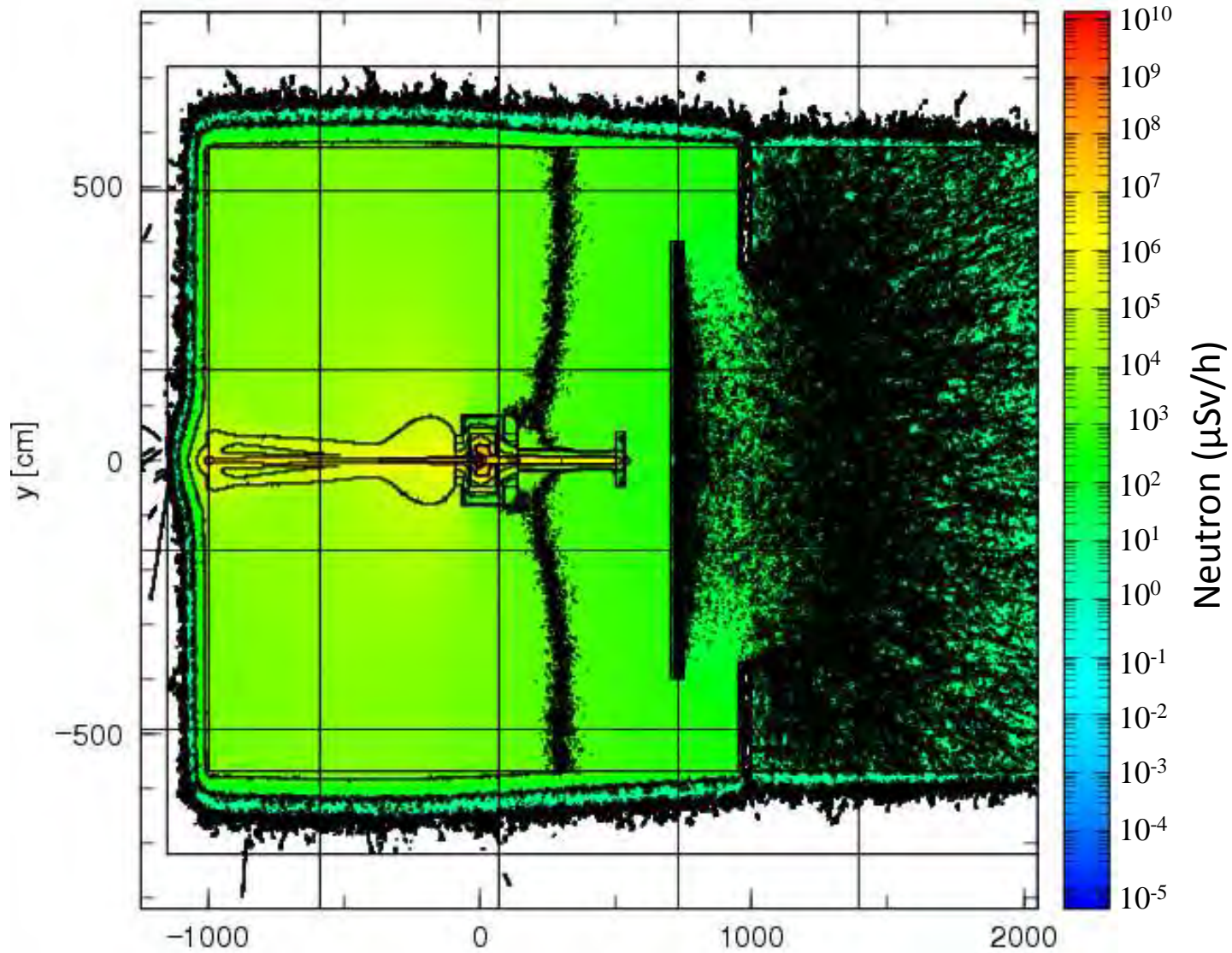
# Moderator/Reflector/**Shield** calculation



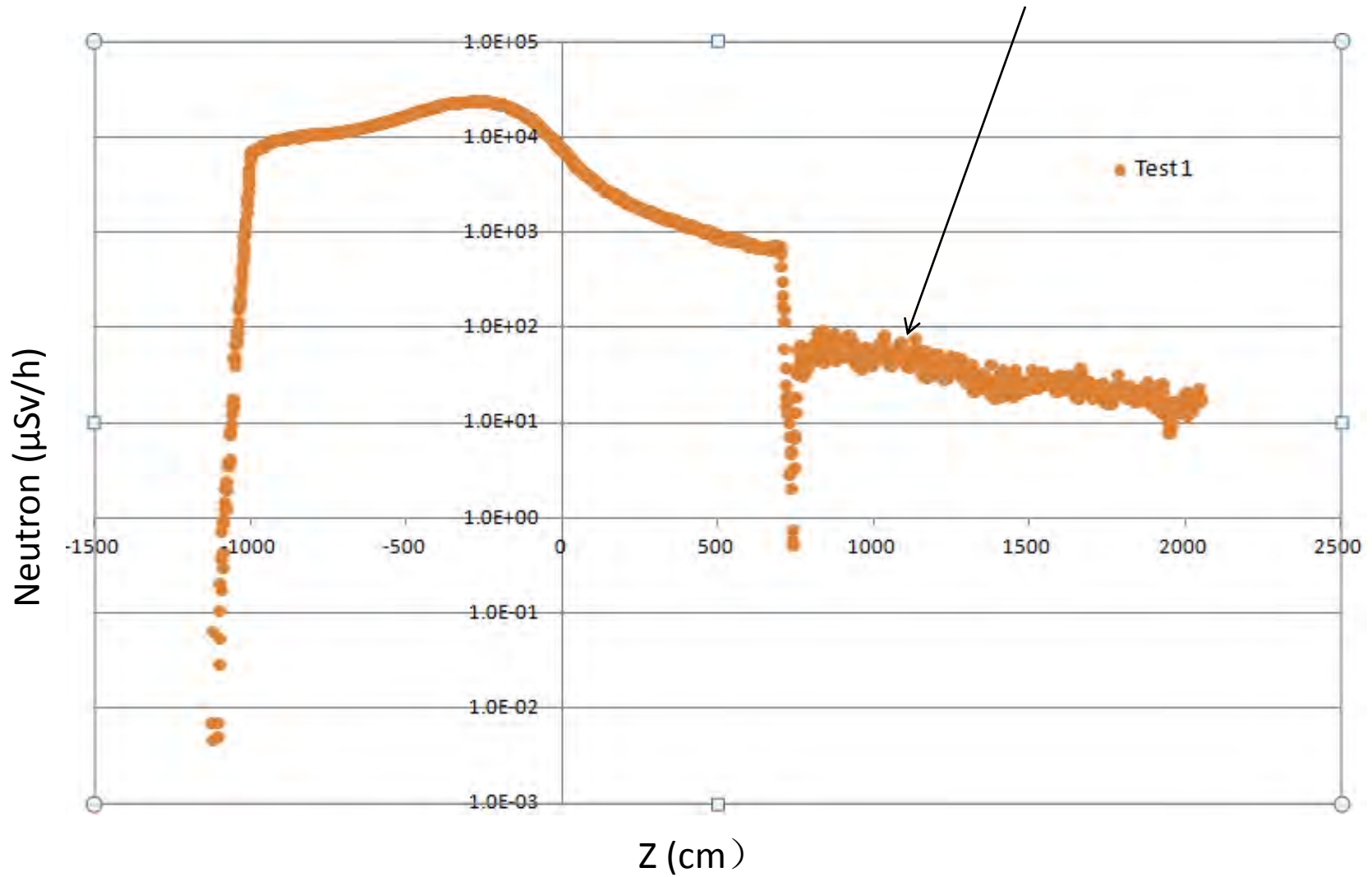
**The design for shielding photon is enough**

# Moderator/Reflector/**Shield** calculation

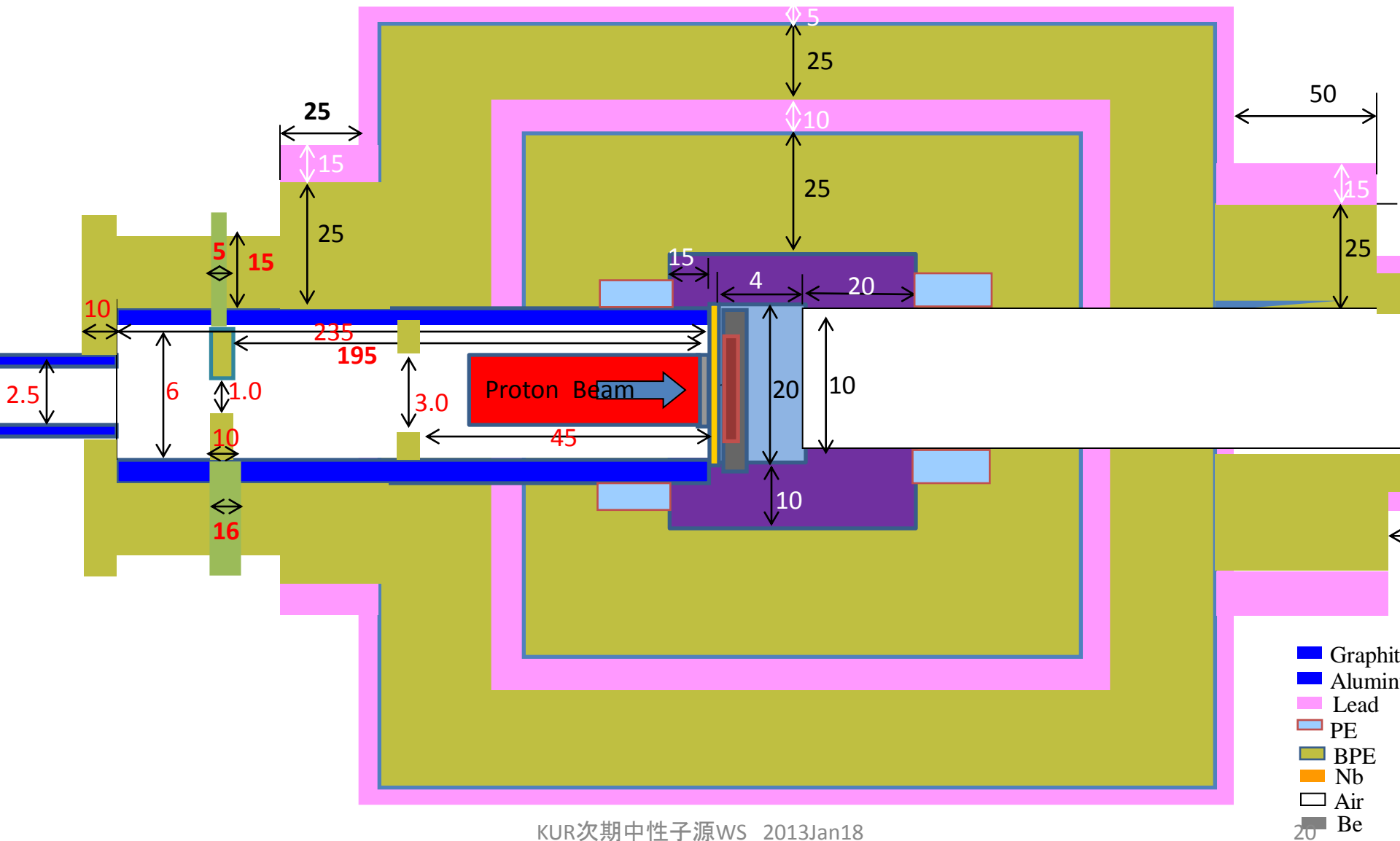
## Neutron Distribution (Top View)



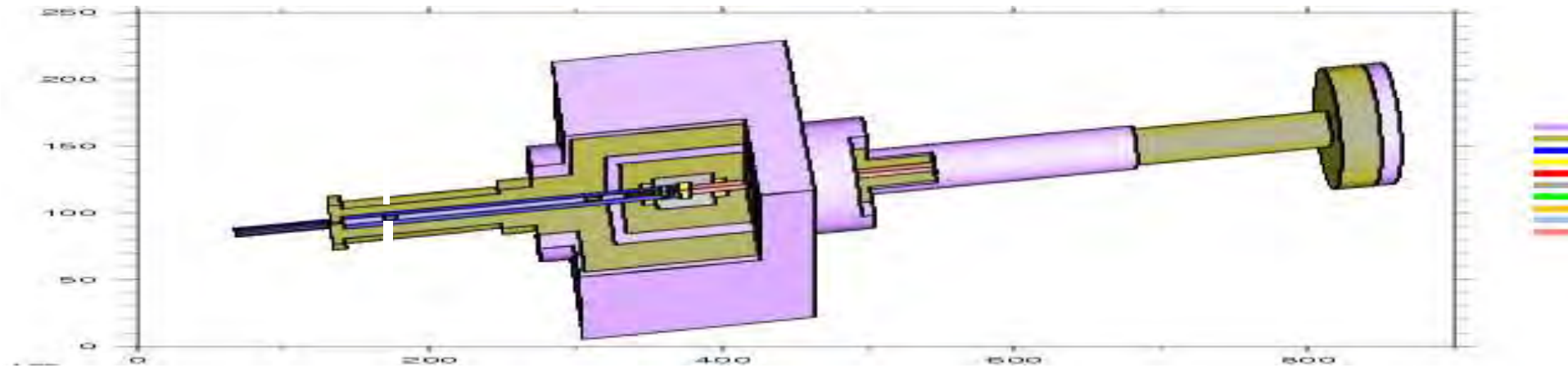
Too high, have to find the radiation source and take measures to reduce it



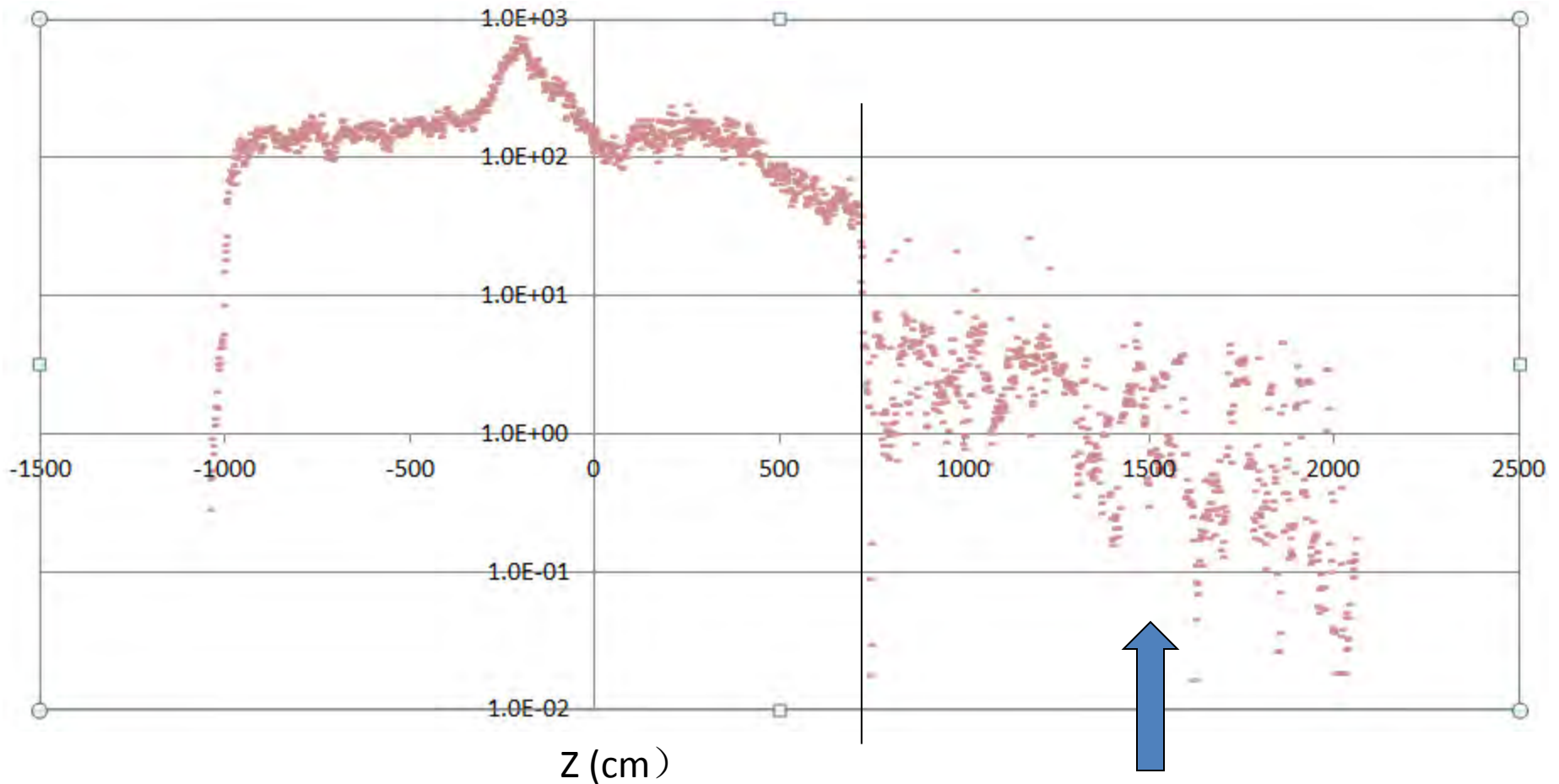
# Moderator/Reflector/Shield calculation



# Moderator/Reflector/**Shield** calculation



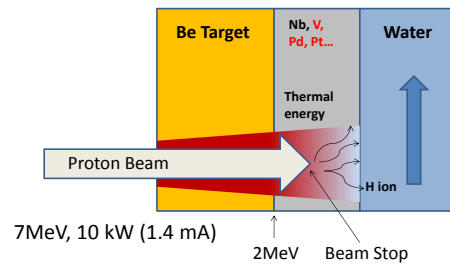
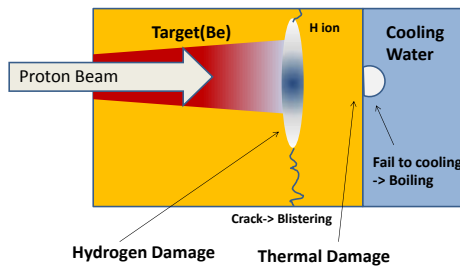
# Moderator/Reflector/**Shield** calculation



Averaged: 2.01  $\mu\text{Sv/h}$  with proton monitor hole

# 低エネルギー核反应用ターゲットの開発

- Be(p,n)などの低エネルギー核反应用ターゲットの大きな課題は、水素脆化によるターゲットの破壊 (Blistering) である。
- 新たに、水素拡散性合金基材とBeを接合したターゲットを考案し、その性能をイオン注入シミュレーション (SRIM)、有限要素法による拡散シミュレーション、熱流体解析、構造力学解析を組み合わせた計算により推定した。
- 新しく考案されたターゲットは、長時間の寿命を持つと推測される。
- 試作品の試験は、京都大学物理学教室で進行中である。
- 理研ターゲットはV基材を利用して作製



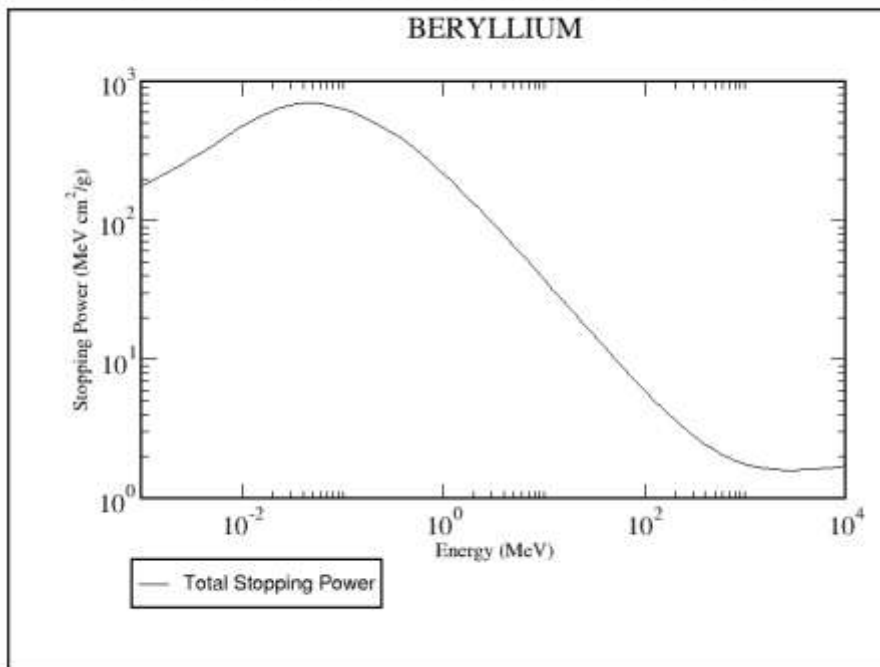
陽子ビームによるターゲット破壊のメカニズム (左) と新型ターゲット



試作された新型ターゲット 23

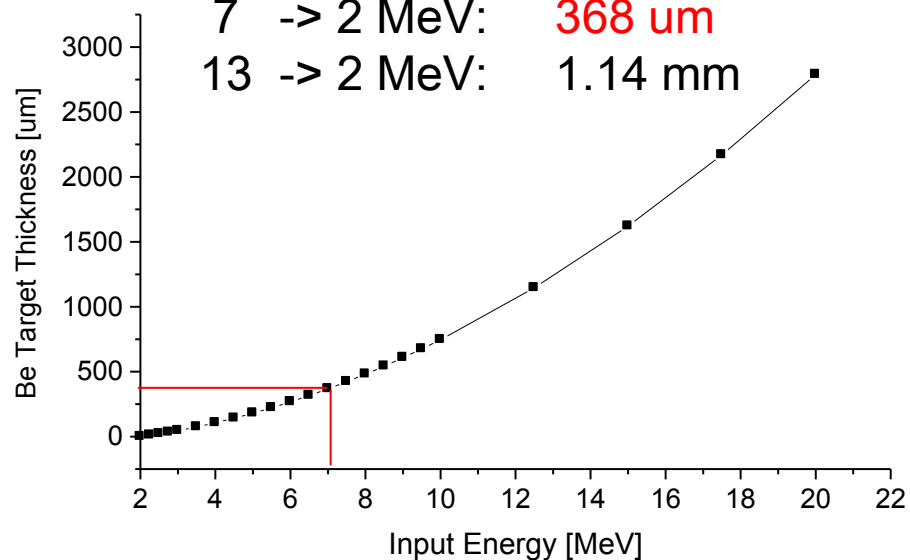
# Target thickness calculation by stopping power

PSTAR : Stopping Power and Range Tables for Protons

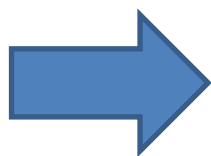


Be thickness

3.5 -> 2 MeV: 75  $\mu\text{m}$   
 7 -> 2 MeV: **368  $\mu\text{m}$**   
 13 -> 2 MeV: 1.14 mm



Stopping power calculated by PSTAR and required thickness of Be target



Required thickness for 7 MeV input is 368  $\mu\text{m}$



# Materials for hydrogen diffusible metal

	V	Nb	Ta	Pd	Al	Cu
Hydrogen diffusion coefficient [m <sup>2</sup> /s] @25 °C	5*10 <sup>-9</sup>	8*10 <sup>-10</sup>	2*10 <sup>-10</sup>	4*10 <sup>-11</sup>	10 <sup>-13</sup>	2*10 <sup>-14</sup>
Hydrogen embrittlement limit [mol/m <sup>3</sup> ]	3.5 x 10 <sup>4</sup> (H/V : 0.3)*	7.4 x 10 <sup>3</sup> (H/Nb 0.08)	-	-	-	-
Yield Strength [MPa]	80	110	180	34.5	30**	70***
Strength limit for design [Mpa] (Safety factor)	14.5 (5.5)	20 (5.5)	32.7 (5.5)	6.3 (5.5)	5.5(5.5)	12.7 (5.5)
Thermal conductivity [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	30.7	53.7	57.5	71.8	237	401
Melting point [°C]:	1910	2477	3017	1555	660	1084

\*Brittle mode of pure vanadium: (approx.) H/V 0.3 @ 200 K

\*\* Al1050-0

\*\*\* 99.9% Cu



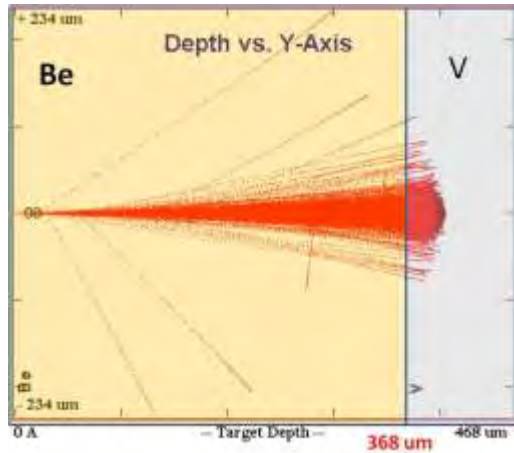
Relatively good performance

# Activation of metals by neutron

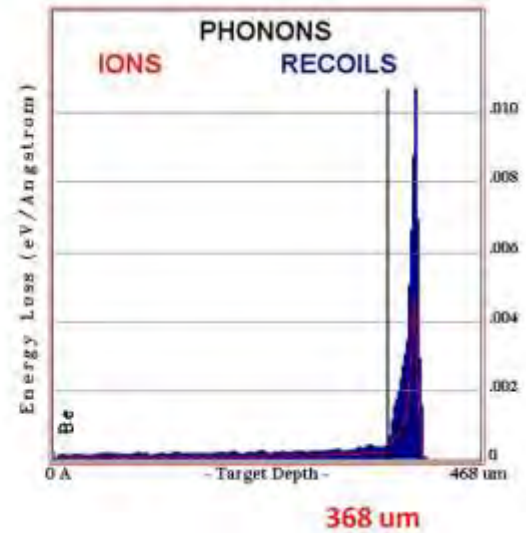
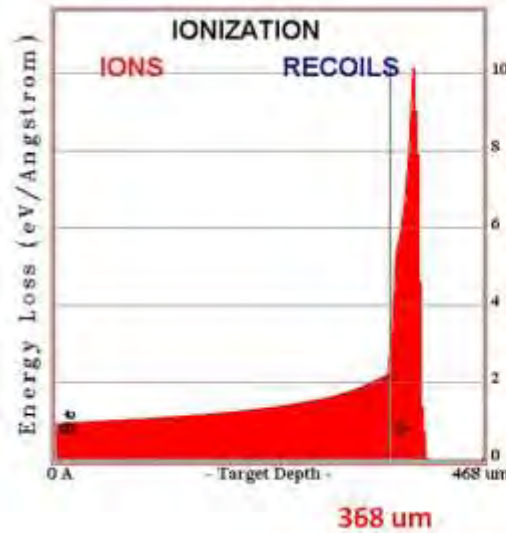
Element	Activated Product	Half-life
<b>V</b>	$^{52}\text{V}$	3.7m
<b>Nb</b>	$^{94}\text{Nb}$	$2 \times 10^4$ a
<b>Ta</b>	$^{182}\text{Ta}$	115d
<b>Pd</b>	$^{109}\text{Pd}$ , $^{103}\text{Pd}$ , $^{103\text{m}}\text{Rh}$	13.7h, 16.9d, 56.1m
<b>Al</b>	$^{28}\text{Al}$	2.2m
<b>Cu</b>	$^{64}\text{Cu}$ , $^{66}\text{Cu}$	12.7h, 5.1m

Activated product of Vanadium has very short half-life, so maintenance of target can be conducted shortly after the operation halt.

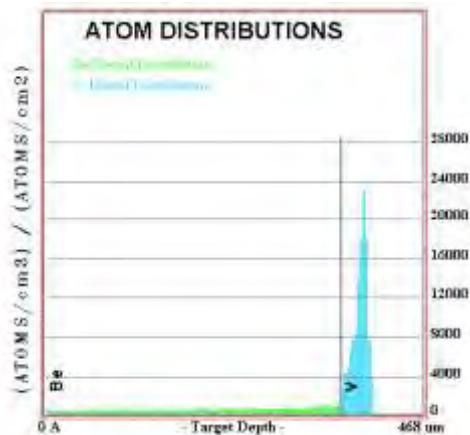
# Hydrogen and thermal energy distribution (vanadium case)



SRIM calculation



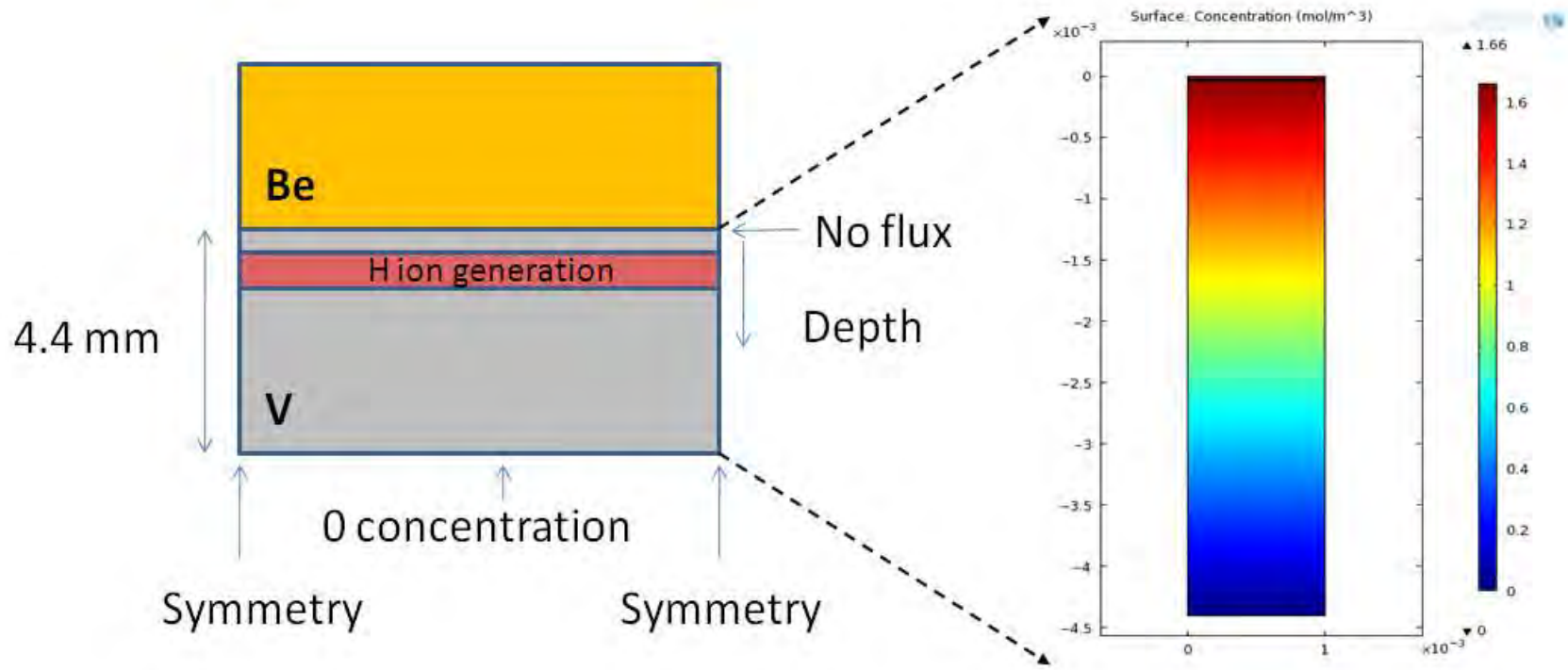
Thermal energy flux = Ionization + phonon



Proton stop on hydrogen diffusible metal

Sputtering effect by proton radiation was not observed

# Chemical consideration



Chemical consideration by COMSOL multiphysics, where thickness of vanadium is 4.4 mm



Maximum concentration of H ion is approximately 1.7 mol/m<sup>3</sup>

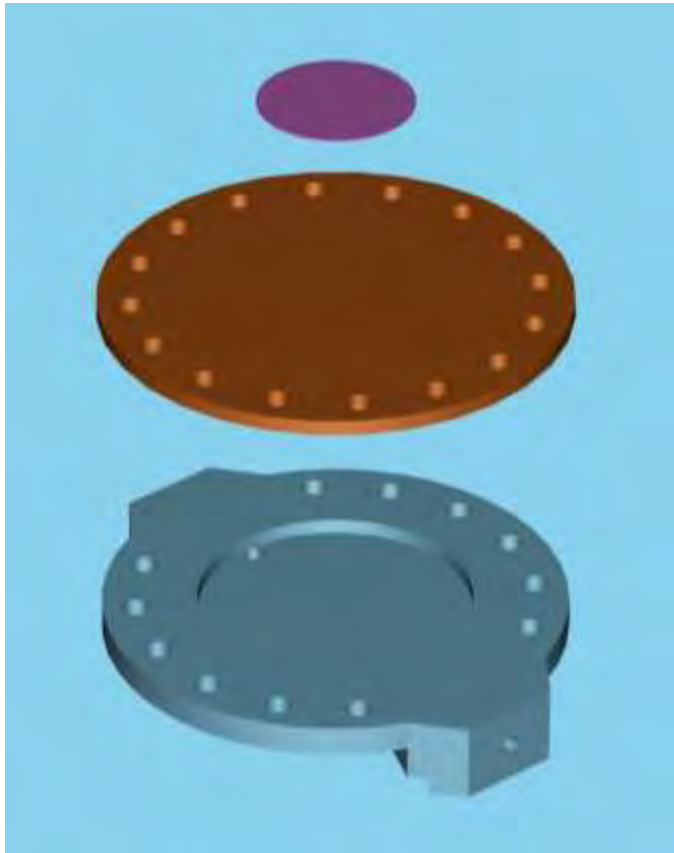
# Chemical consideration

	V	Nb	Ta	Pd	Al	Cu
Maximum concentration of hydrogen ion [mol/m <sup>3</sup> ] @ 10kW	1.7	8.9	29	310	1.4*10 <sup>5</sup>	5.7*10 <sup>5</sup>
Hydrogen embrittlement limit [mol/m <sup>3</sup> ]	3.5 x 10 <sup>4</sup>	7.4 x 10 <sup>3</sup>	Unknown			

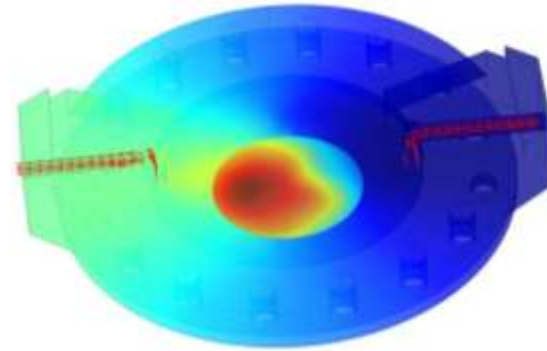


It is expected that hydrogen embrittlement on the target system may not occur since vanadium and niobium plate can diffuse H ions successfully to the coolant surface.

# Actual Target Design



Cooling cavity, backing plate and beryllium target  
(decomposed in 3D CAD)



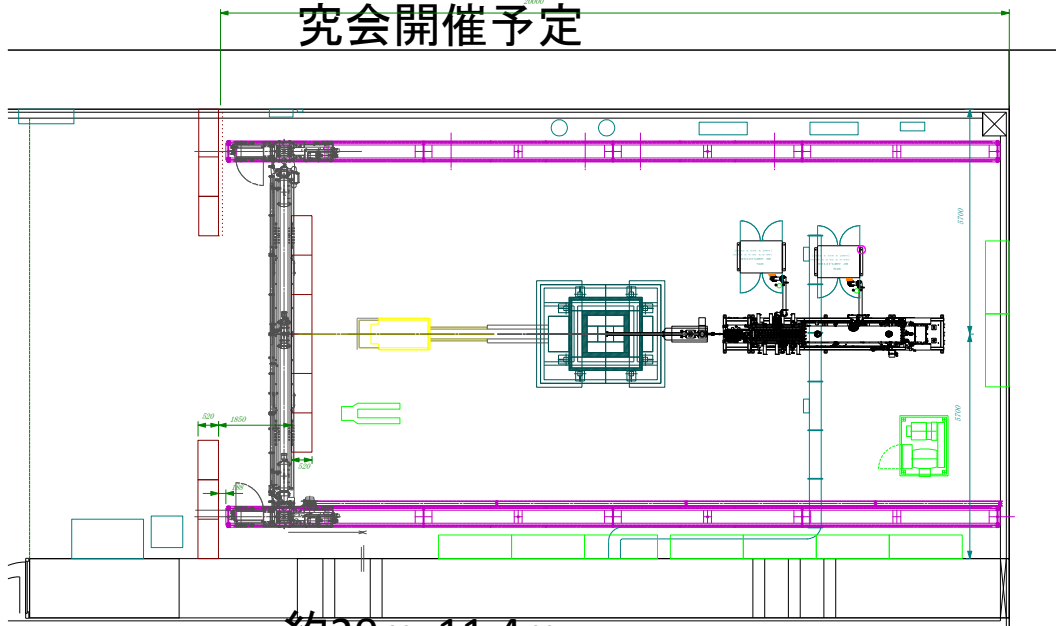
3D hydro-thermal analysis of cooling



Prototype of target plate  
(blazed)

# 建設の現状

- スケジュール概要
  - 2012年3月 陽子線ライナック納品
  - 2012年5~6月 ホウ素コンクリート壁、リフター装置設置
  - 2012年9月 陽子線ライナック組み立て・立ち上げ
  - 2012年11月 ターゲットステーション遮蔽体構築完了
  - 2012年12月 陽子線ビームライン完成 現在陽子ビームテスト
  - 2012年12月 中性子コミッショニング開始、施設検査受検
  - 2013年1月 施設検査合格、中性子ビームライン完成、お披露目見学会+研究会開催予定



約20mx11.4m

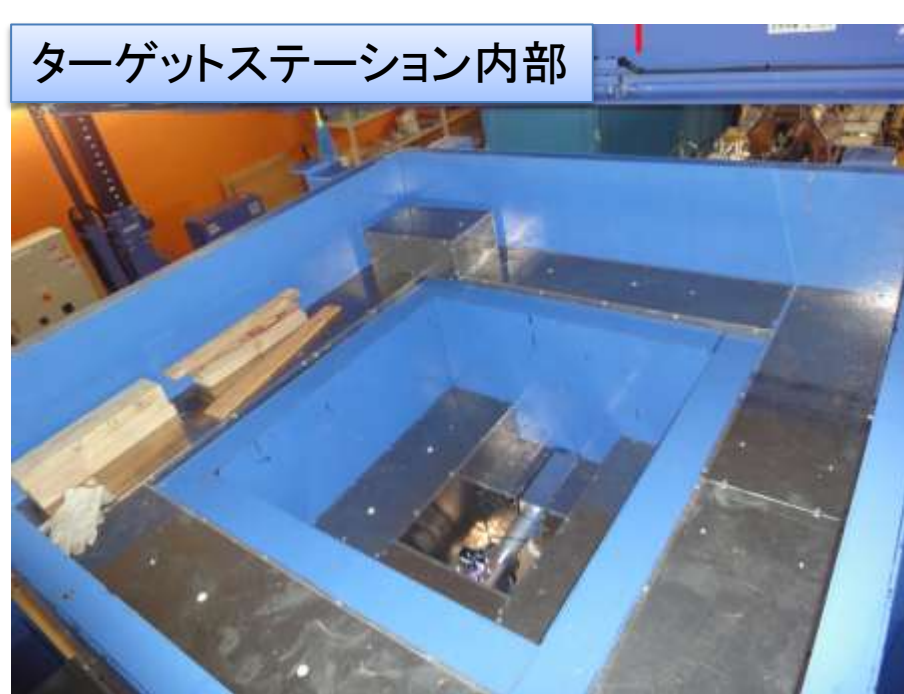
理研和光RIBF棟地下1階



ターゲットステーション



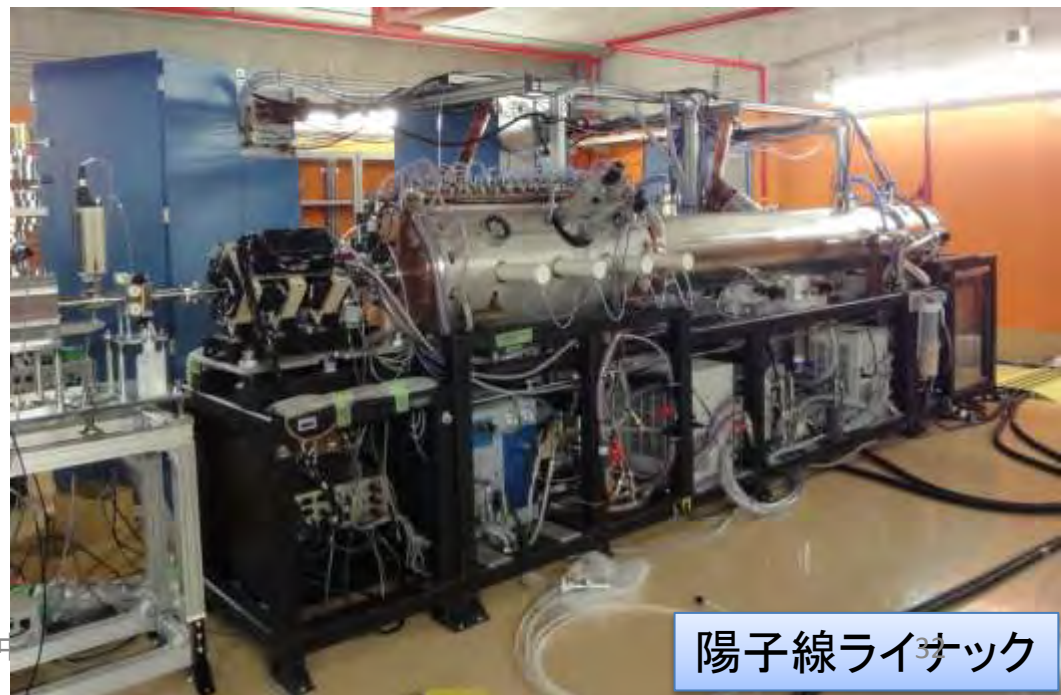
ターゲットステーション内部



陽子ビームライン



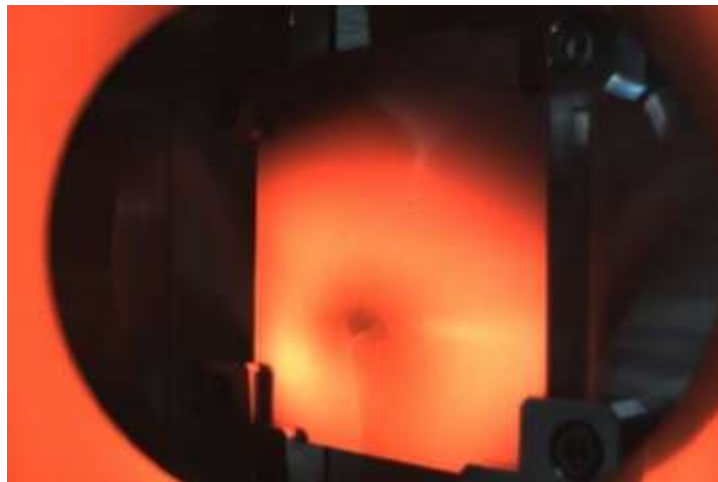
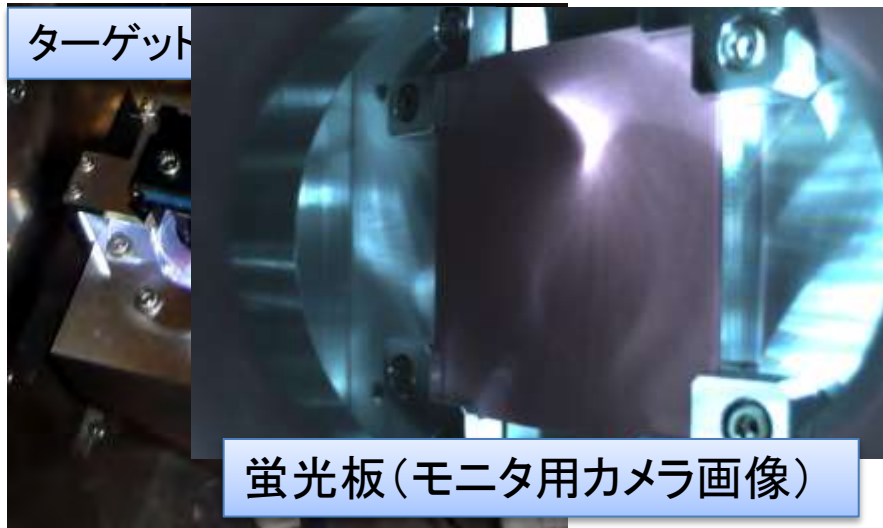
陽子線ライナック





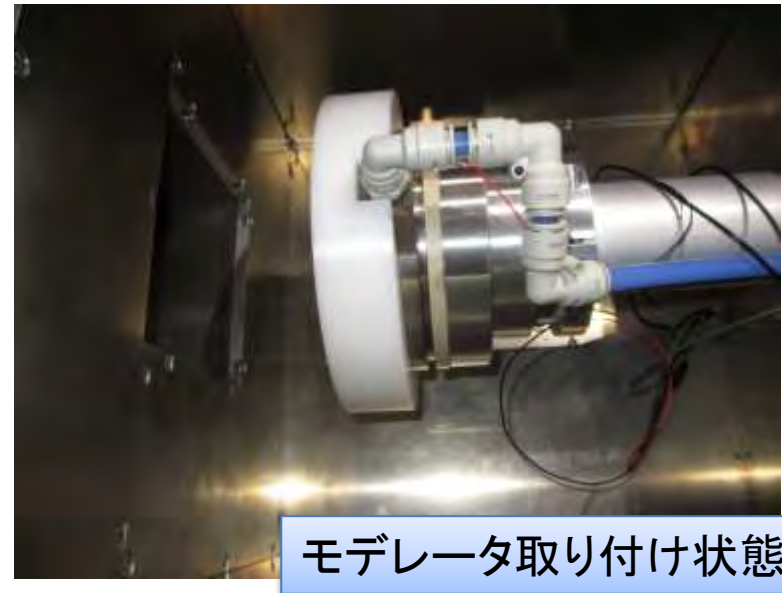
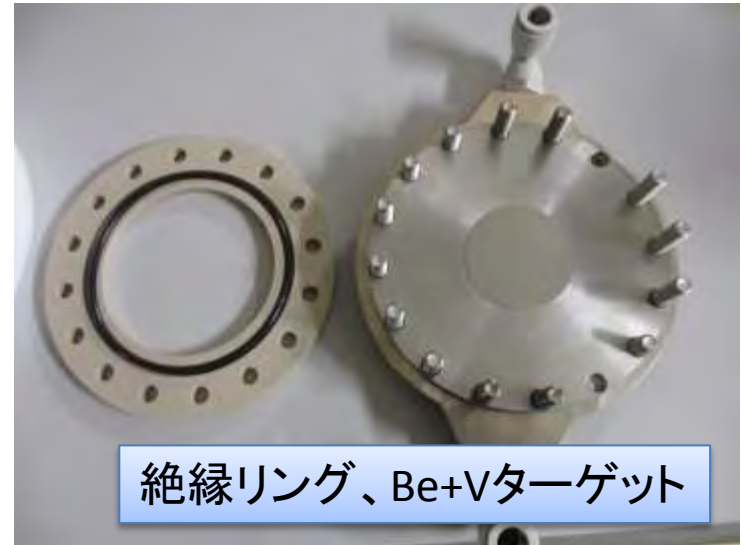
# ビーム調整

・蛍光板に陽子ビームを照射し、ビーム位置、フォーカスの調整を行った。

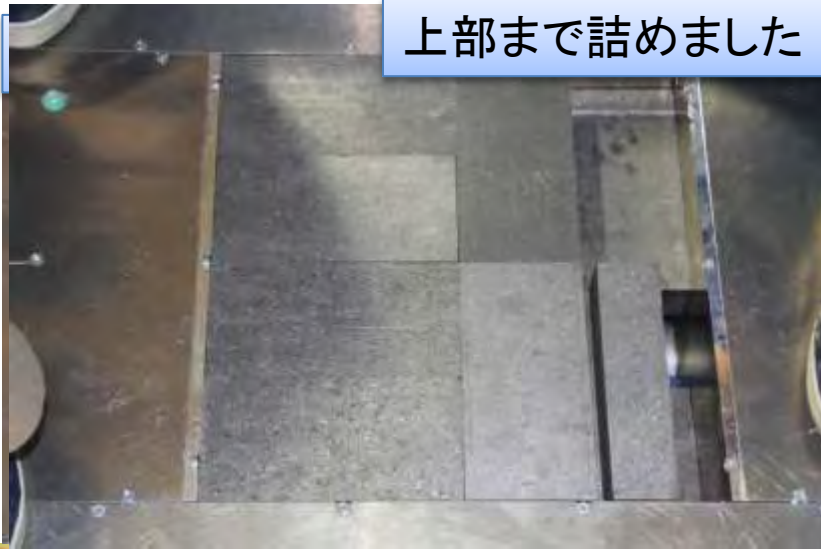


ビームモニターによる位置調整。

# Beターゲット取り付け

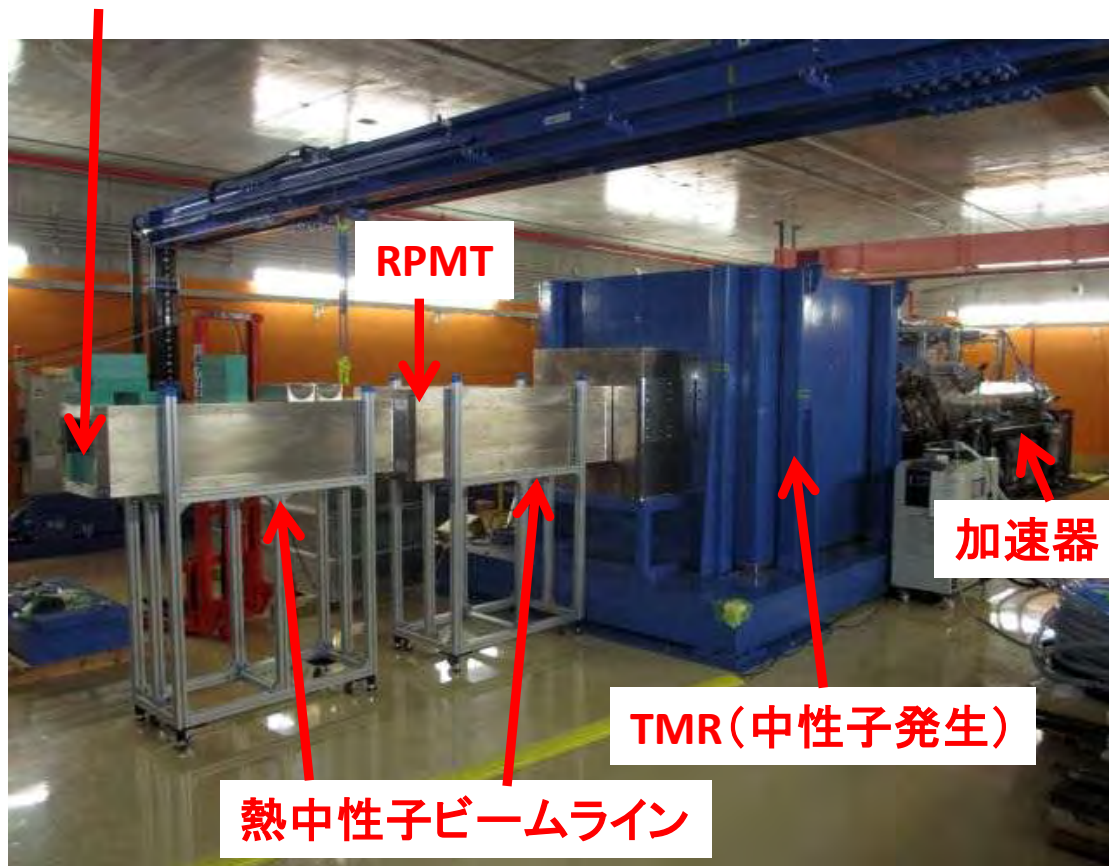


# Reflector, neutron beamline



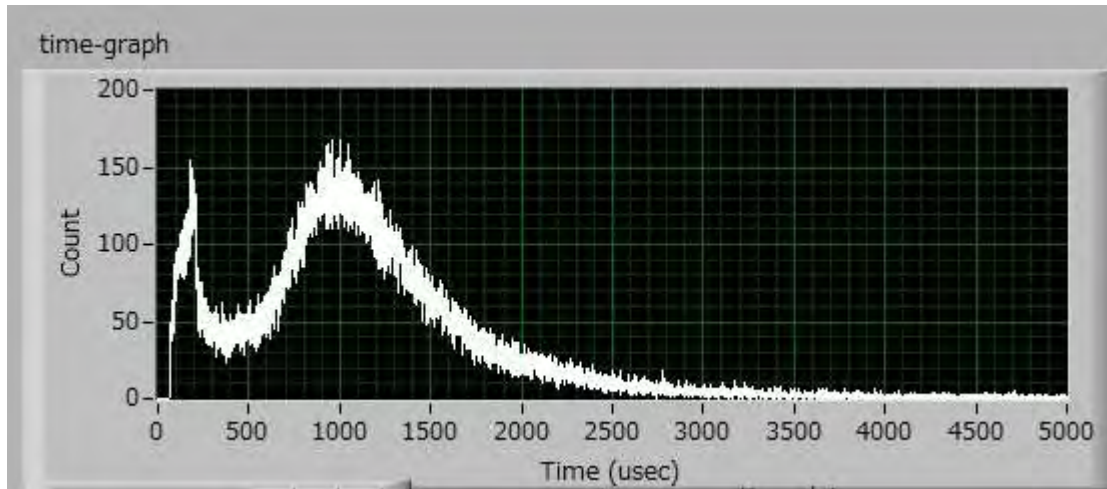
# RANSでの測定開始

カメラボックスが間に合っていないので  
BPEブロックで蓋(遮蔽)して測定



- ・12月末に施設検査が終了した
- ・ビームラインは完成していないが、  
少しずつ中性子を出しながら  
加速器パラメーターの調整や  
放射線レベルの測定を行っている
- ・12月は真空ポンプの不調で苦戦、  
1月になってポンプは安定した。

# 熱中性子ビームライン上で測定したTOFスペクトル



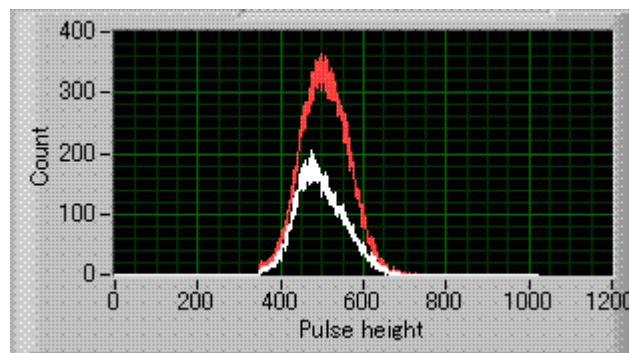
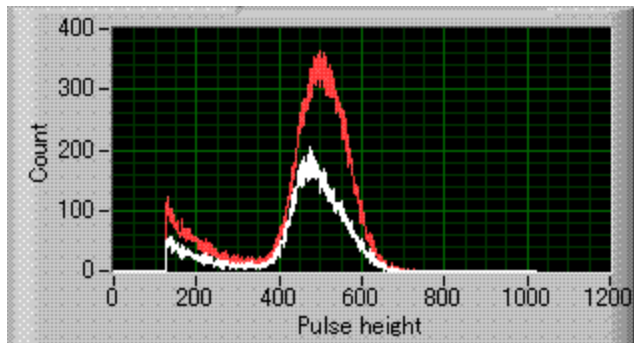
RPMT検出器を用いたTOF測定

Beターゲットから約2.5mの位置にあり、熱中性子は約1msecで到達する。TOFスペクトルで1msec(1000usec)のところにピークがあり、熱中性子が飛んできている事を確認

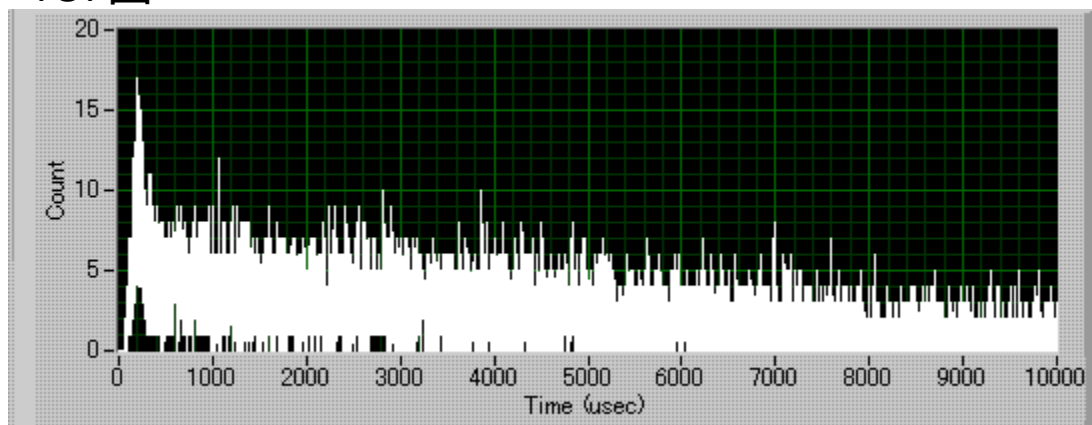
制御卓付近の中性子を評価するために  
ホウ素コンクリ遮蔽体の上に検出器を置いて測定する

検出器: 5インチRPMT+0.3ミリ厚Liガラスシンチ

PHA図を見るとガンマ線と中性子が分離可能 → 中性子だけ選択



TOF図



中性子発生ターゲットから遮蔽壁まで  
5m程度あるので熱中性子が飛来する場合、  
2-3msec程度の時間が必要  
それより早く飛んできているものは  
高速中性子による成分と考えられる。  
ただしこの検出器は高速成分に関する  
感度は無いので、コンクリートなどで熱化して  
検出器に飛び込んで来ていると考えられる

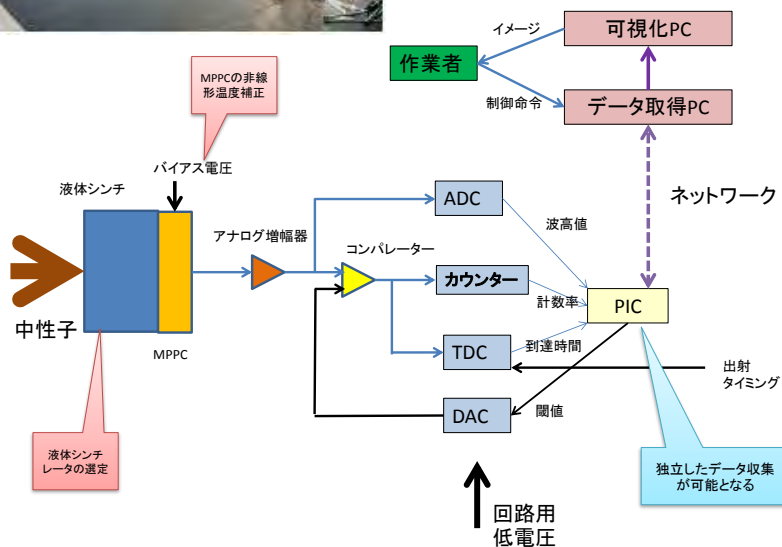
→高速中性子に対する遮蔽が足りない可能性

# 高速中性子を用いた大型構造物の非破壊検査

- 全国に、15m以上の橋梁は15万橋あり、そのうち多くは、20年以内に設計寿命と言われている60年を経過する。



高速中性子線とTOFを組み合わせたイメージングによりコンクリート内部の鉄筋の非破壊検査を目指す。



Prestressed Concrete beam (thickness: 50cm)

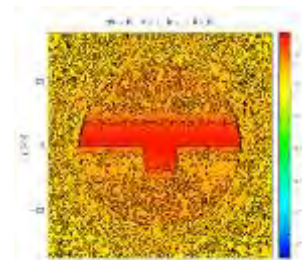


Image by using TOF

理研理事長ファンドにて検出器の開発が進行中  
小型中性子源の高速中性子成分を利用して実験を予定。

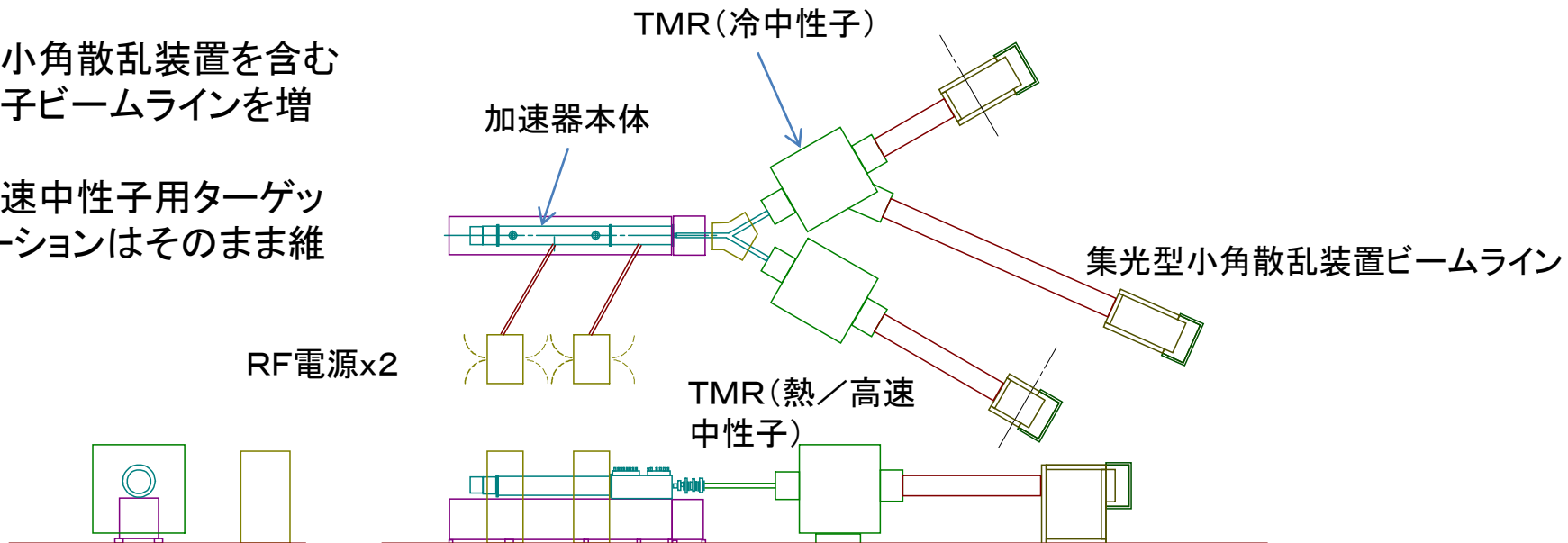


将来は可搬型にも？

# 理研和光小型中性子源Phase-II

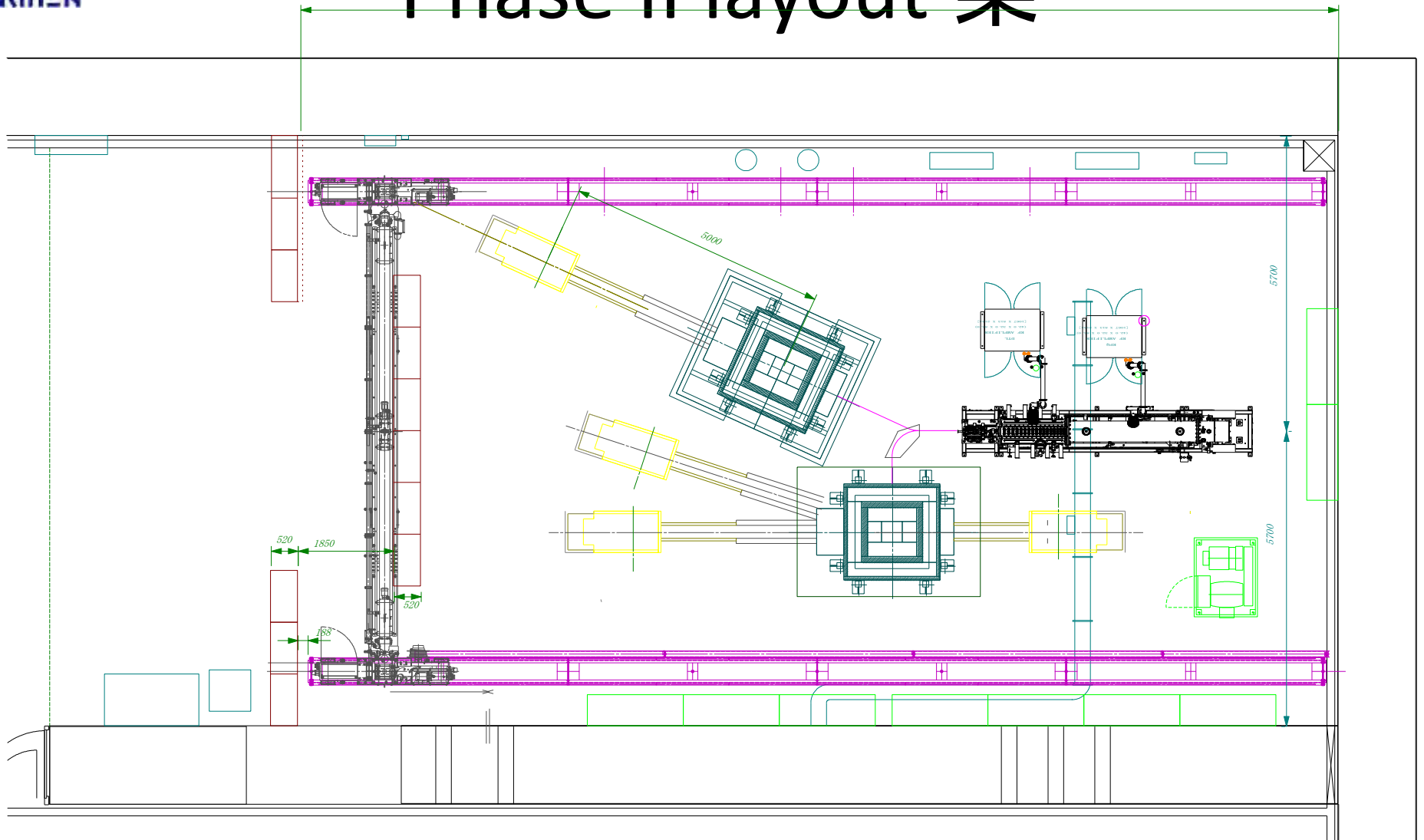
- 加速器:7MeV, 100uA, 出力0.7kW Q-magnet 付き
- 必要用カ: 電力 40kVA, 冷却水:75L/min
- RF電源:425MHz 350kW(peak) duty 8%
- 中性子発生量:  $10^{12}$ (n/sec)
- ビームライン: 熱中性子x1(ラジオグラフィー)、冷中性子x2(小角散乱、パルス分光)
- 設置寸法:18mx11mx2.7m
- 遮蔽線量:1uSv/h(目標)
- 達成目標:2013年度末

集光型小角散乱装置を含む  
冷中性子ビームラインを増設  
熱／高速中性子用ターゲット  
ステーションはそのまま維持





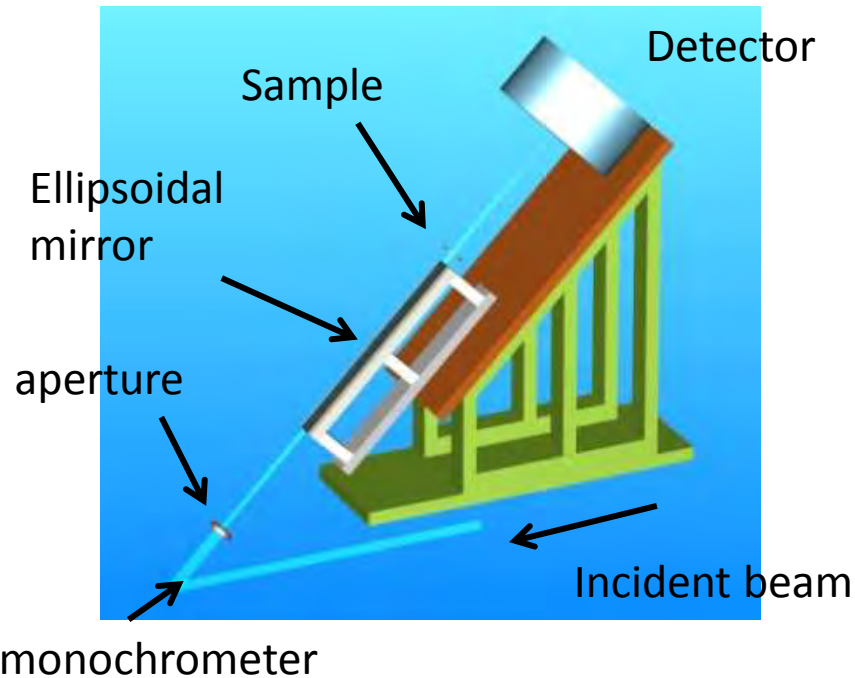
# Phase II layout 案



# Phase-II における計測システム

## 集光型小角散乱装置

mf-SANS at JRR-3



Ellipsoidal mirror (0.9m) for mf-SANS



集光ミラーは、金属ベースのミラーを開発中

集光ミラーを用い、小型中性子源にて小角散乱を行う。

鉄鋼材料、高分子、生体高分子などの産業分野での利用を期待

他にも冷中性子を利用した、

- ・パルス分光イメージング
- ・粉末回折
- ・干渉イメージング
- ・検出器開発

などの実験を計画中

# まとめ

- 理研和光において小型陽子線ライナックを用いた中性子源の建設が進行中。
- 小型中性子源のデザインに当たっては、KUR E-2ポートのデータが大いに参考になった。
- 産業界との連携を重点に置き、協力してアプリケーション開発を推進中。
- 本年度中に熱中性子線によるラジオグラフィーが実現する見込み。
- 来年度以降に、冷中性子ビームラインを整備し、小角散乱実験等の実現を計画中。
- 教育目的での活用も期待。

# 謝 辞

理研小型中性子源の構築にご協力いただいた全ての方々に謝意を表します。(敬称略)

- 理研小型中性子源の開発は、JCANSの協力の下、推進されています。
- ターゲット・モデレータシミュレーション：北大 鬼柳善明、加美山隆、木野幸一、平賀富士夫、東大 三島賢二、名古屋大 清水裕彦
- 小角散乱装置、ミラー開発：北大 古坂道弘、NIMS 大沼正人 京大炉 杉山正明
- 京都大学物理学教室 小型中性子源 京大 永江知文、京大工 田崎誠司
- 京都大学原子炉実験所 中性子ラジオグラフィー：京大炉 川端祐司、斉藤泰司、伊藤大介、北口雅暁、日野正裕（共同利用研究 24P-7ほか）
- JRR-3 イメージング実験 JAEA供用利用 2009A-A35
- VCADシステム研究プログラム：理研 牧野内昭武、横田秀夫、世良俊博、須長秀行、見原俊介
- 大型構造物の非破壊検査：土木研究所 木村嘉富