



高エネルギー加速器セミナーOHO'23  
2023年9月5日～8日、KEKつくば&テレビ会議

# 中性子生成ターゲット

原田 正英

JAEA, J-PARCセンター、物質・生命科学ディビジョン、  
中性子源セクション

# 講義内容

---

- ▶ はじめに
- ▶ 中性子生成と中性子源施設
- ▶ J-PARC核破砕中性子源
- ▶ 粒子輸送シミュレーション
- ▶ 実測や実例
- ▶ 最適化
- ▶ まとめ



## はじめに

---

- ▶ 中性子をプローブにする物質科学研究や生命科学研究は、強度重視の科学とも言われ、中性子源には、高い中性子強度を求められる。
- ▶ 中性子を生成する方法は様々あるが、大強度でパルス状を目指すなら、加速した陽子ビームを利用し、核破砕反応を利用した核破砕中性子源を用いることが多い。陽子ビーム出力に大きく依存するが、安全上の設備が必要であるため、利得が低くなる傾向にある。一方で、中性子源構成の最適化と適切な工学設計により、中性子強度を大きく回復することができる。
- ▶ 本講義では、J-PARC核破砕中性子源を主として、陽子ビーム入射から中性子ビーム供給までの中性子生成過程を説明し、実際上のJ-PARCの核破砕中性子源を例にその説明を行う。



# 中性子とは

## ▶ 中性子

- ▶ 質量:  $1.67 \times 10^{-24} \text{g}$
- ▶ 電荷: 0
- ▶ スピン:  $1/2$

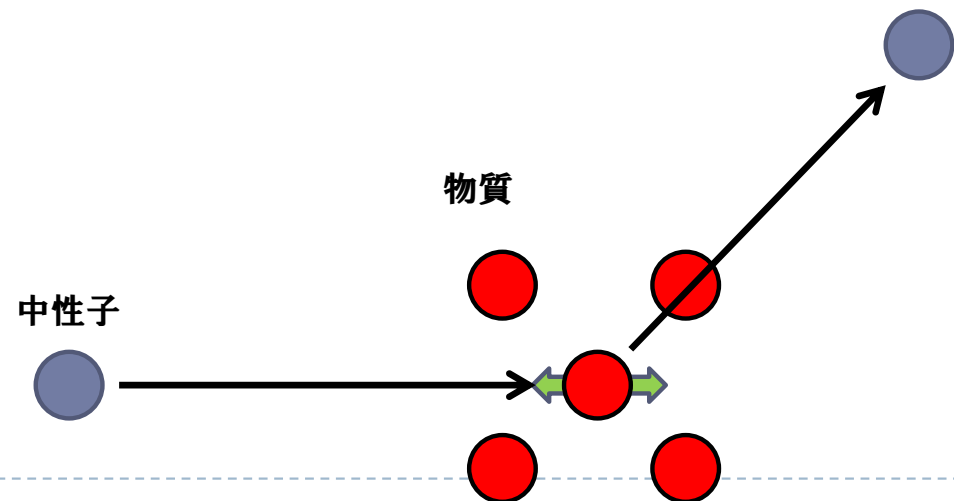
## ▶ 波長とエネルギー

- ▶ エネルギー ( $E_n$ ): eV  
 $1 \text{eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{J}$
- ▶ 波長 ( $\lambda$ ): Å ( $10^{-10} \text{m}$ )  
 $\lambda (\text{Å}) = 9.044 \cdot E_n^{-1/2}$

## ▶ エネルギーによる中性子の呼び方

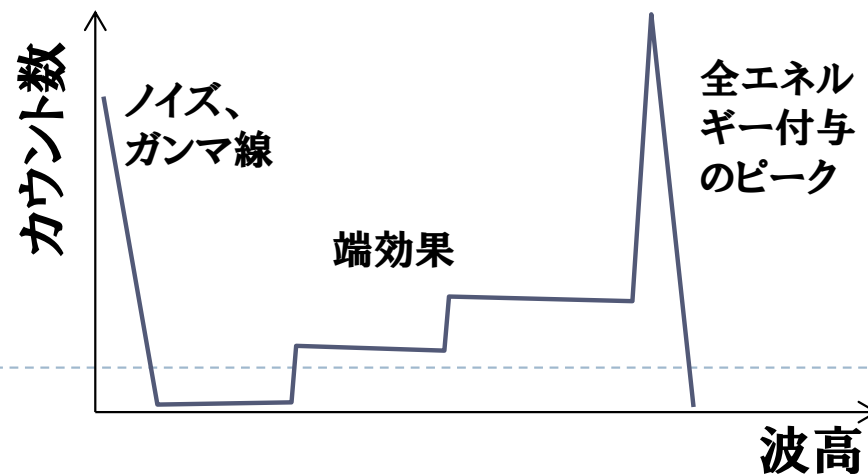
- ▶ 高速中性子 keV ~ MeV
- ▶ 熱外中性子  $> 0.3 \text{eV}$
- ▶ 熱中性子 5 ~ 30 meV
- ▶ 冷中性子 0.1 ~ 5 meV
- ▶ 極冷中性子 0.5 ~ 100  $\mu\text{eV}$
- ▶ 超冷中性子  $< 0.5 \mu\text{eV}$

- 中性子は、電荷を持っていないため、原子核と容易に相互作用を起こす。
- 中性子は、陽子と同程度の質量を持っているので、物質内での状態により、影響を受けやすい。
- 中性子を使えば、エネルギーと運動量の変化から、非破壊で、物質の内部の構造を観測できる。



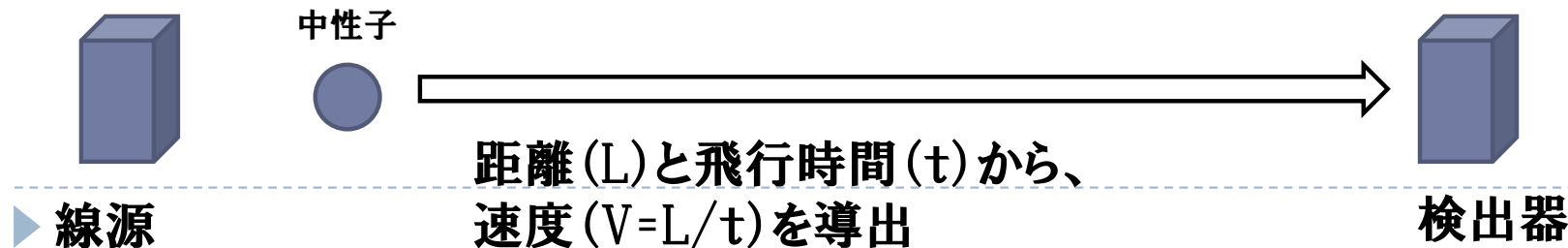
# 中性子の検出

- ▶ 中性子は非荷電粒子なので、検出が困難。
- ▶ 中性子との反応する確率(反応断面積)が大きく、荷電粒子を発生する反応を利用する。
  - ▶  $\text{He-3} (n,p) \text{H-3}$   $Q=0.765\text{MeV}$
  - ▶  $\text{Li-6} (n,\text{H-3}) \text{He-4}$   $Q=4.78\text{MeV}$
  - ▶  $\text{B-10} (n, \alpha) \text{Li-7}$   $Q=2.792 (6\%), 2.310\text{MeV} (94\%)$



# 運動エネルギーを測定するために ～飛行時間法～

- ▶ 中性子は、電荷をもたないため、エネルギーの測定が困難
- ▶ 運動エネルギーは、速度の二乗に比例する。  
$$E = 1/2 m V^2$$
- ▶ 既知の距離で、中性子が発生して中性子が観測されるまでの時間を測定することで、速度を測定し、運動エネルギーに換算する。



# 高性能な中性子源とは？

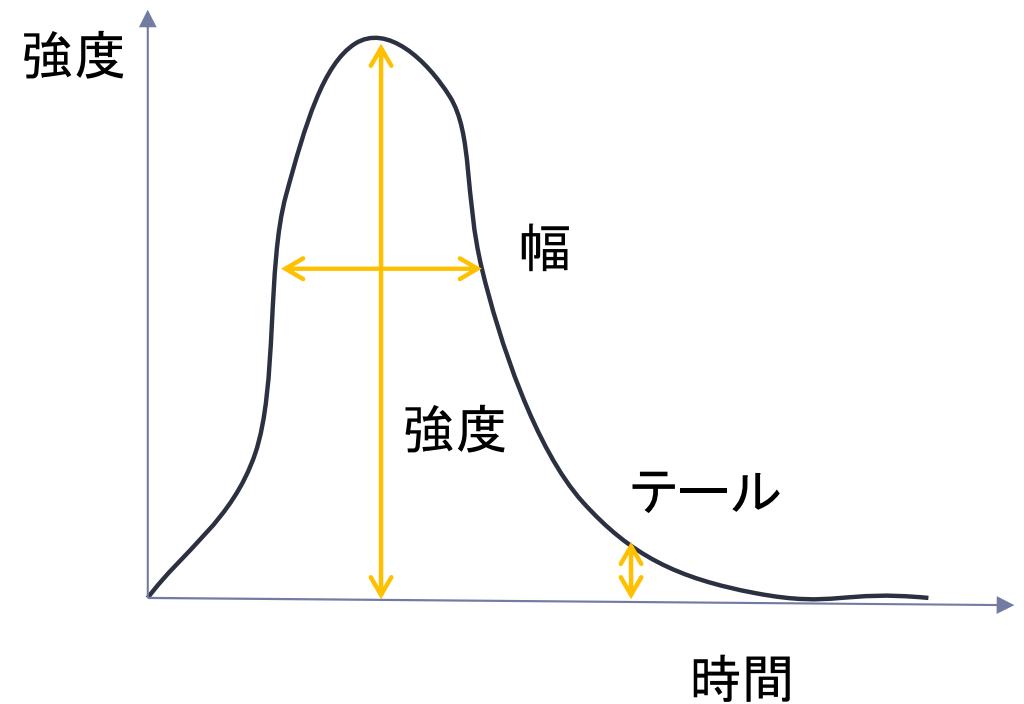
---

## ○良好なパルス特性

- ▶ 強度が強い
- ▶ 幅が短い
- ▶ テールが小さい

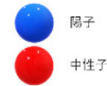
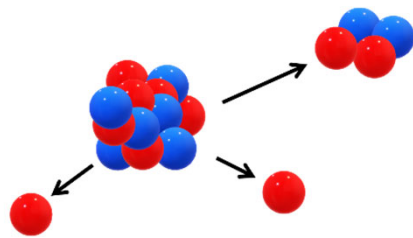
## ○重要な要素

- ▶ パルス化
- ▶ バックグラウンドが少ない

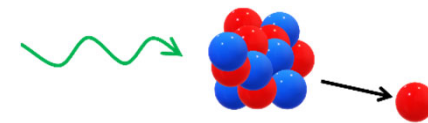


# 中性子を放出する核反応

核分裂

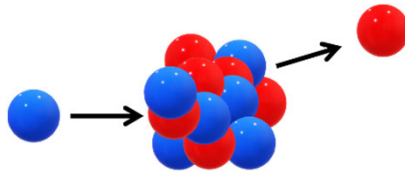


光核反応

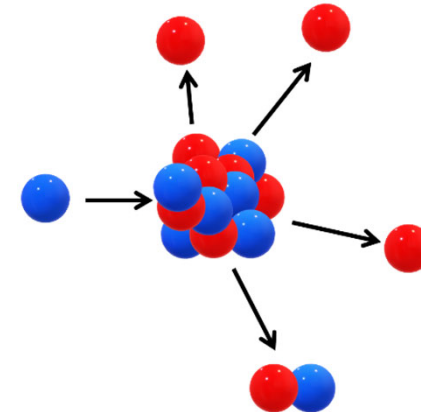


連鎖的に反応が進んでいく  
(正の反応度?)

核反応



核破砕



連鎖的に反応が進んでいく  
(負の反応度)

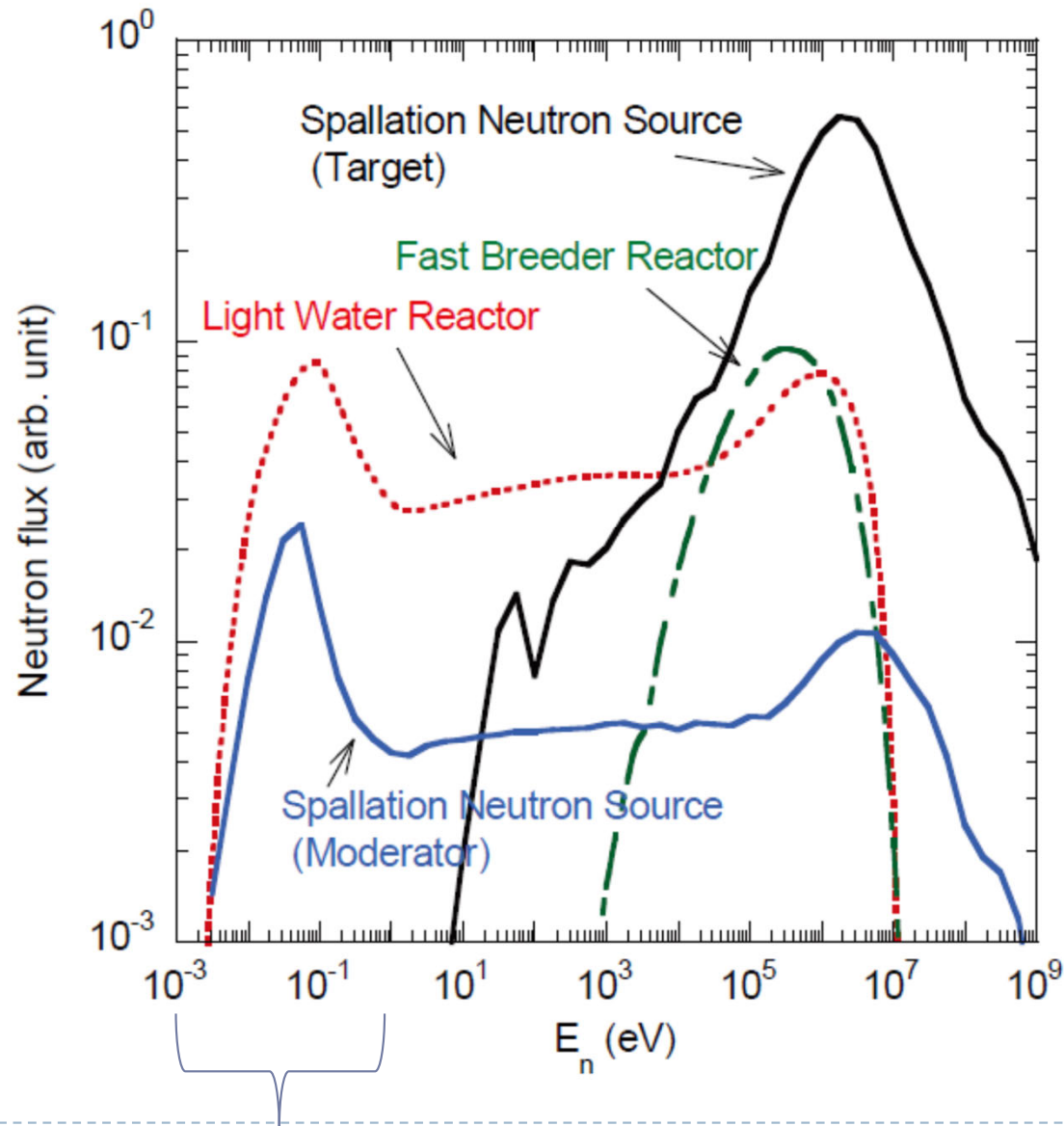


# 典型的な中性子反応とエネルギーコスト

Table 2-1、典型的な中性子反応と中性子収量、エネルギーコスト

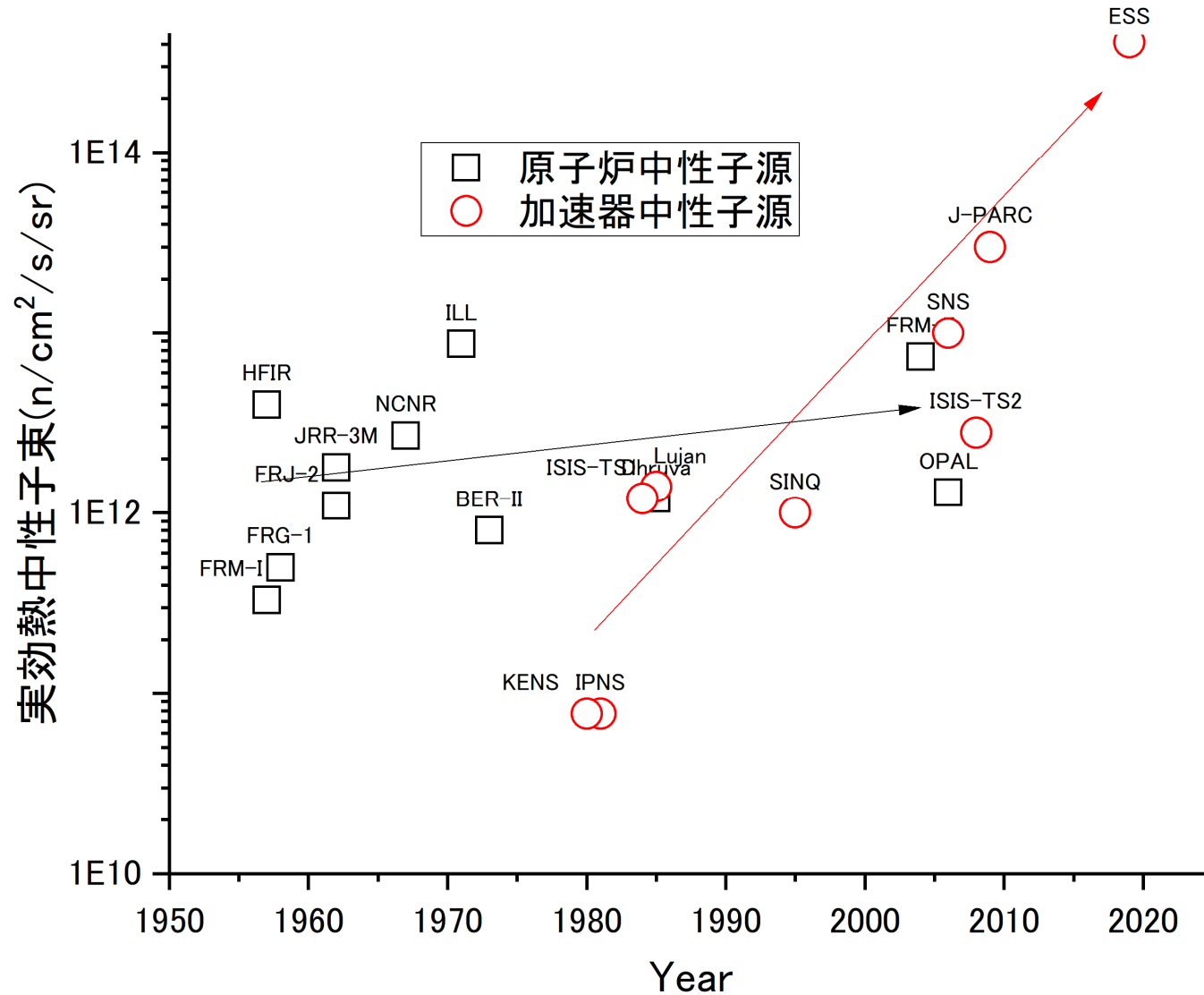
名称	反応	中性子収量	中性子生成に必要なエネルギー
Cf-252 線源	放射性同位体	$3.8 \times 10^9/\text{GBq}$	-
Ab-Be 線源	放射性同位体	$6 \times 10^4/\text{GBq}$	-
電子線加速器中性子源 (タングステン)	光核反応	$1.7 \times 10^{-2}/e^{-}$	2 GeV
DT 中性子源	核融合反応	$3 \times 10^{-5}/d$	10 GeV
Be (p, n)	核反応 (交換反応)	$1.6 \times 10^{-3}/p$	4 GeV
U-235 核分裂炉	核分裂反応	2.3/fis.	180 MeV
陽子ビーム入射 (水銀)	核破砕反応	80/p	38 MeV

# 典型的な中性子スペクトル



▶ 使いたいエネルギー範囲は1eV以下

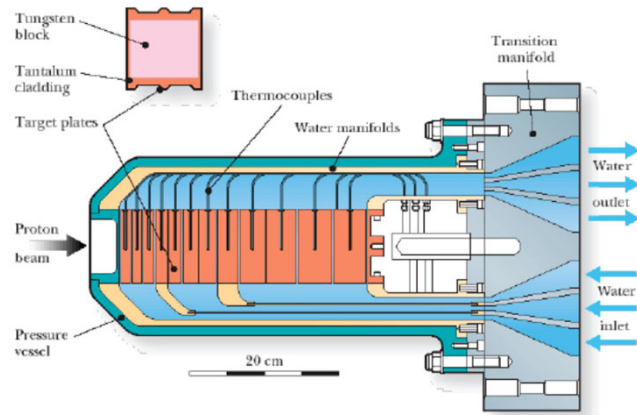
# 世界の中性子源と実効熱中性子束



原子炉中性子源から加速器中性子源へ

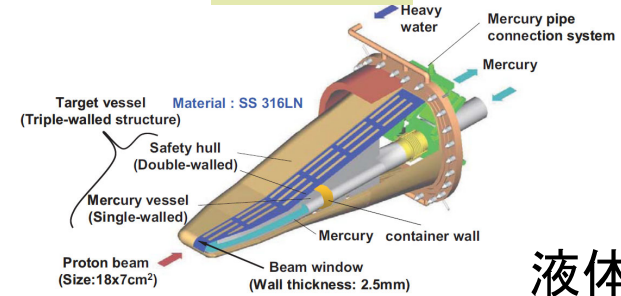
# 世界中の中性子生成ターゲット

## ISIS (英国)



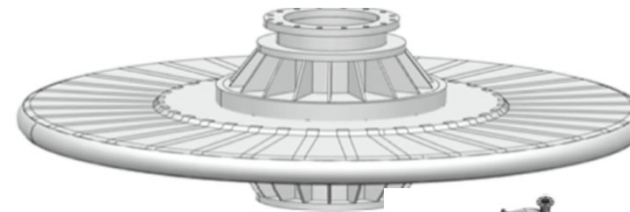
固体固定  
(タングステン)

## J-PARC

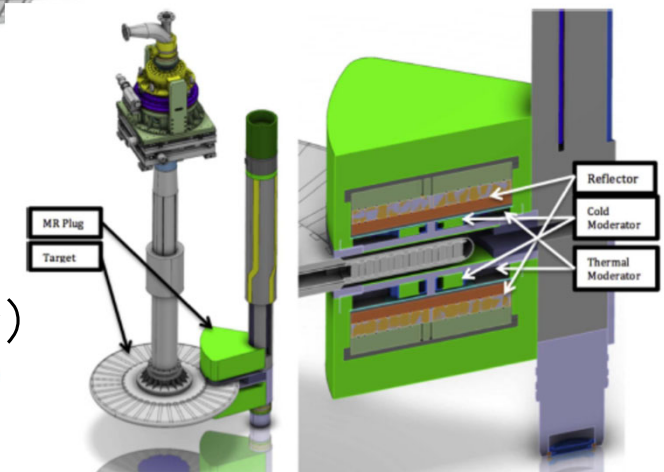


液体金属  
(水銀)

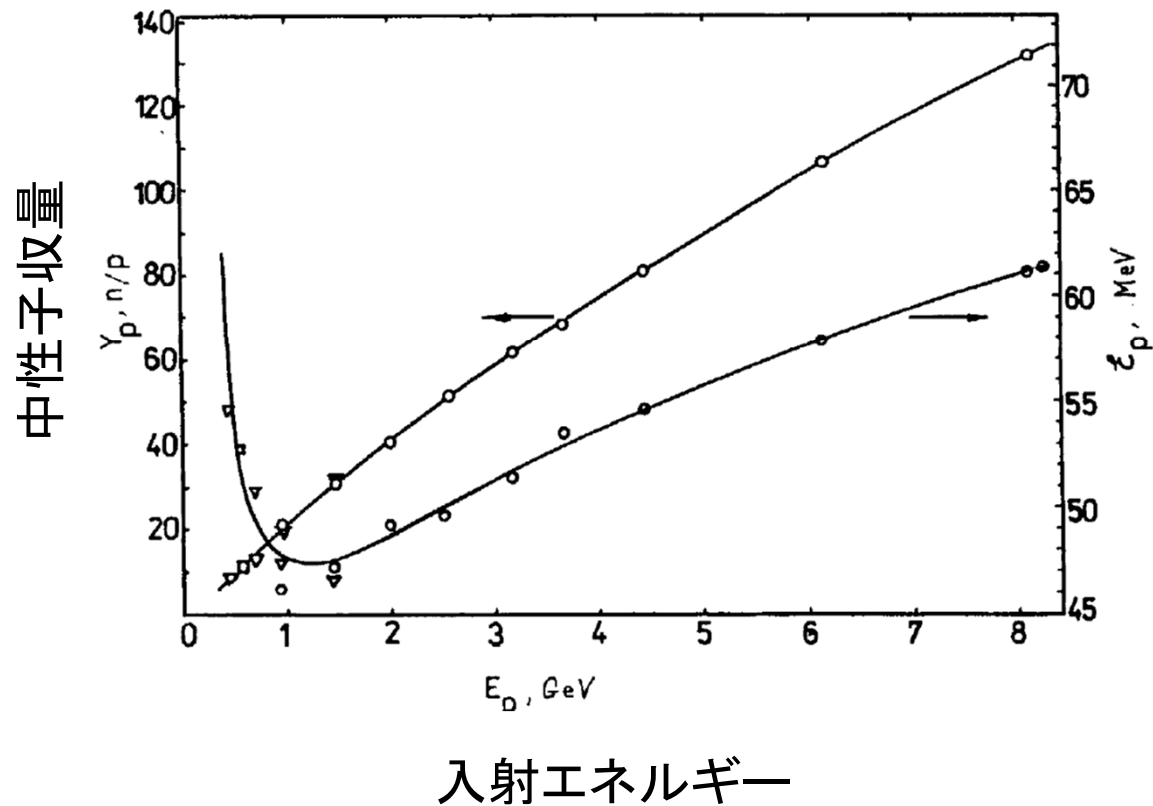
## ESS (スウェーデン)



固体回転  
(タングステン)



# 陽子ビームエネルギーと生成効率



生成エネルギー

1.3GeVあたりが最も効率が良いと言われている

# 中性子の減速

- ▶ 弾性衝突が主。質量数が小さい方が中性子の減速が早い。

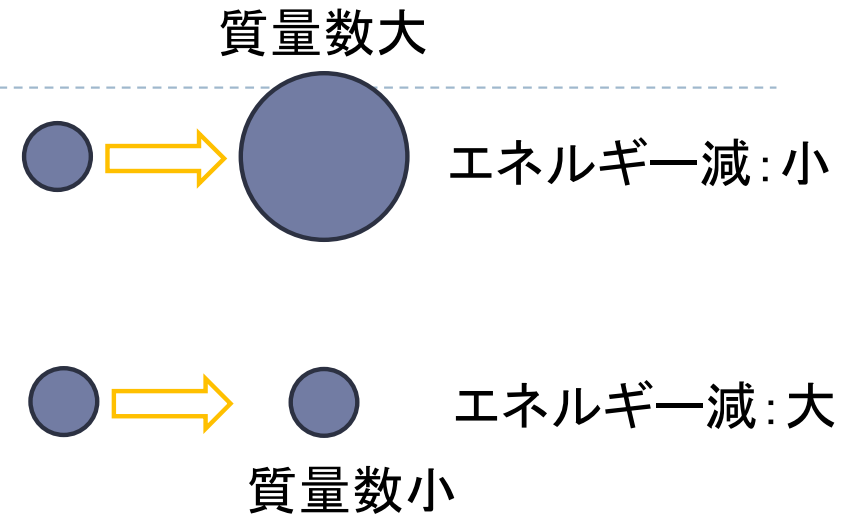
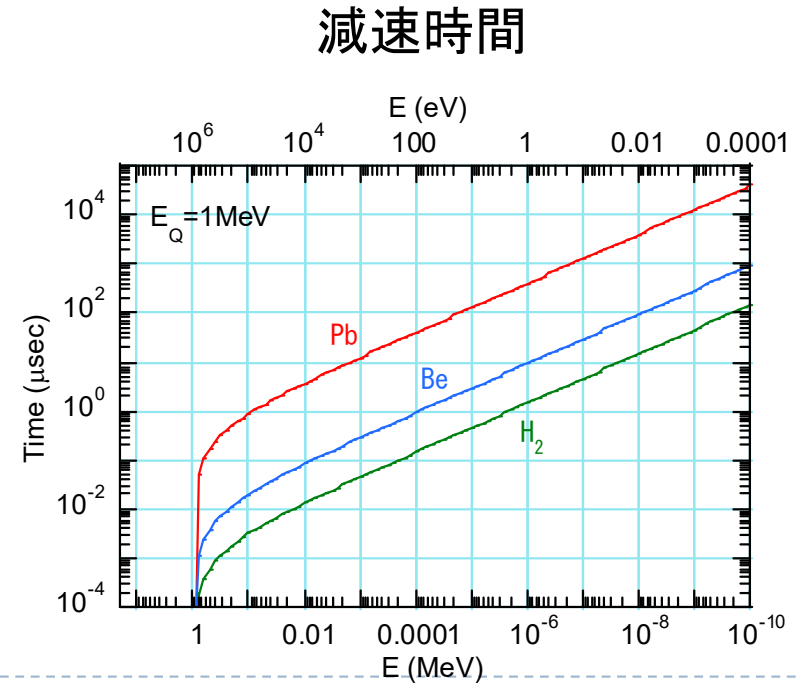


Table 2-2、2MeV から 0.025eV までの衝突回数[7]

名称	衝突回数
H	18.2
H <sub>2</sub> O	19.8
D	25.1
D <sub>2</sub> O	35.8
Be	87.1
C	115
O	152
Fe	510
U	2172



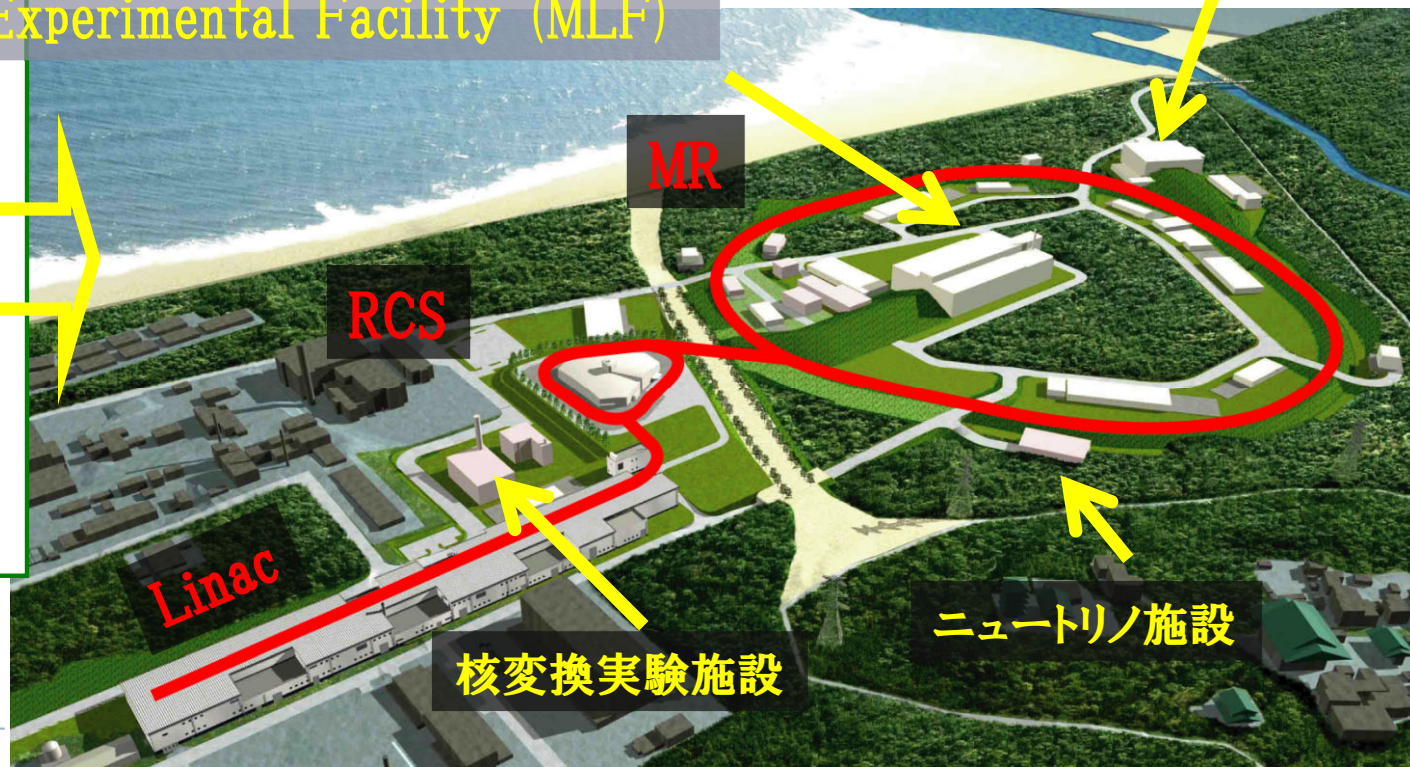
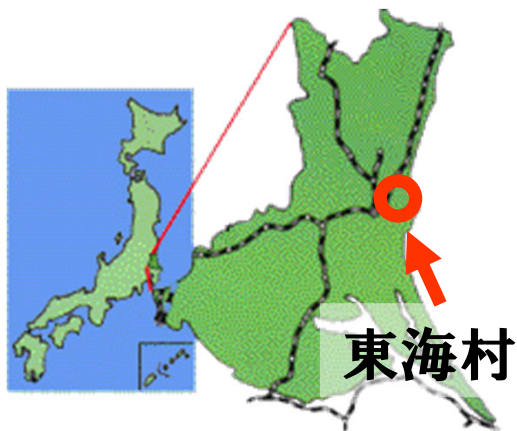
# Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC)

3GeV, 1MW & 25Hz

物質生命科学実験施設  
Materials & Life Science  
Experimental Facility (MLF)

ハドロン実験施設

茨城県



# 中性子源の構成

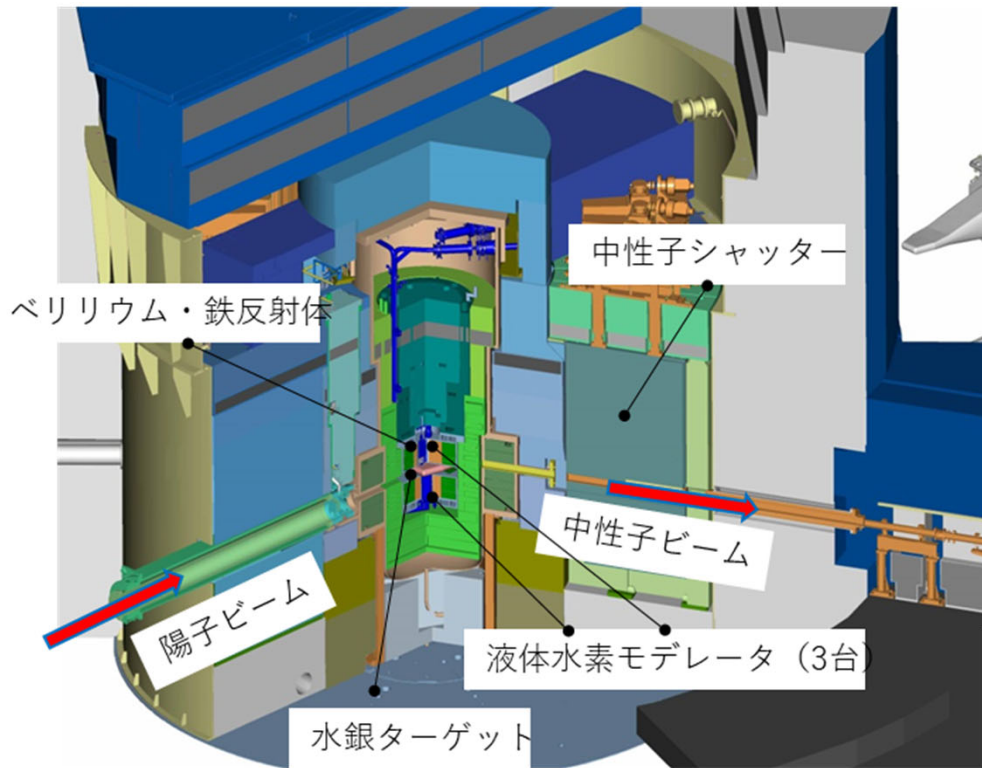
---

- ▶ **水銀ターゲット**
  - ▶ 中性子を発生させる
- ▶ **ベリリウム&鉄反射体**
  - ▶ 中性子をかき集める
  - ▶ 中性子を減速させる
- ▶ **液体水素モデレータ**
  - ▶ 中性子を減速させる
  - ▶ 中性子を放出する
- ▶ **デカップラー材**
  - ▶ (遅い)中性子を吸収する
  - ▶ モデレータとそれ以外を仕切るように設置する。
- ▶ **ポイズン材**
  - ▶ (遅い)中性子を吸収する
  - ▶ モデレータの中に入れて実効的にモデレータの幅を短くする。
- ▶ **遮蔽体**
  - ▶ 中性子など放射線を漏らさない
- ▶ **シャッター**
  - ▶ 中性子の供給・遮断する。

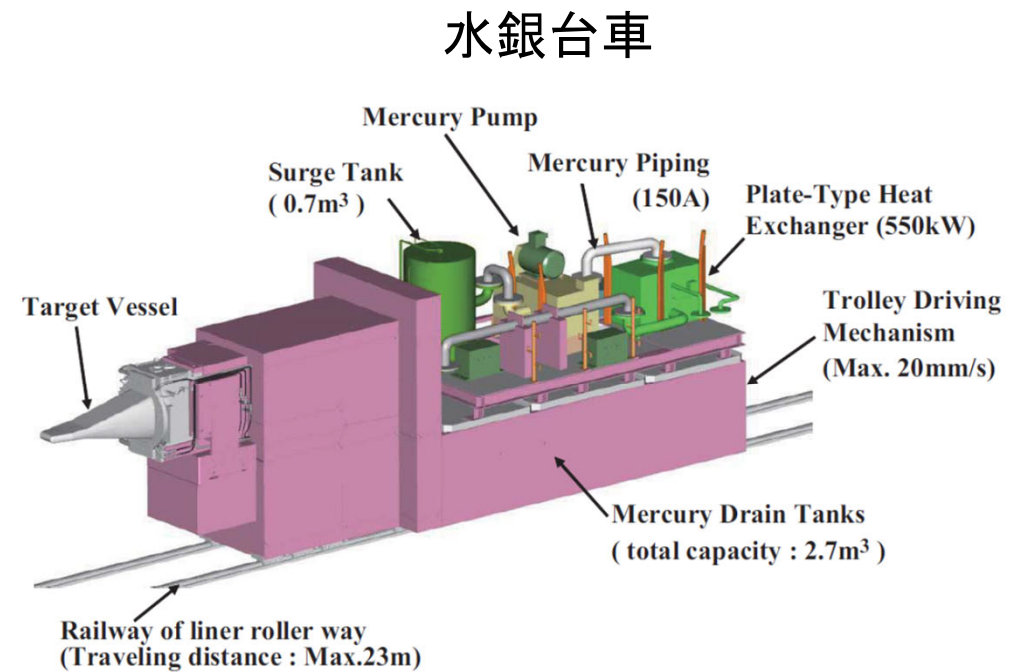




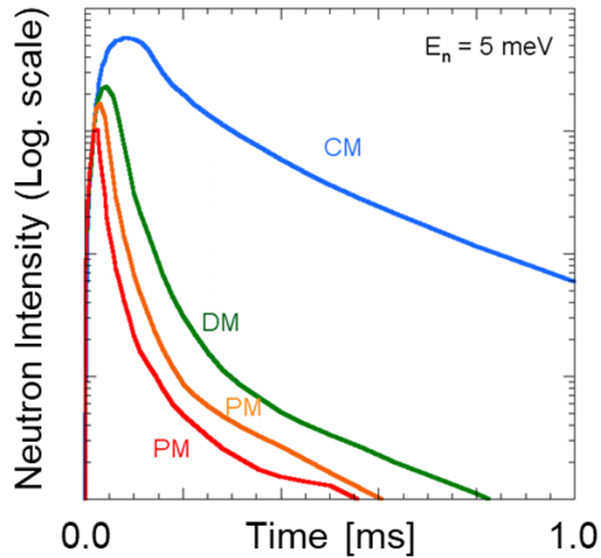
# 中性子源構成 (J-PARC核破碎中性子源)



中性子源中心

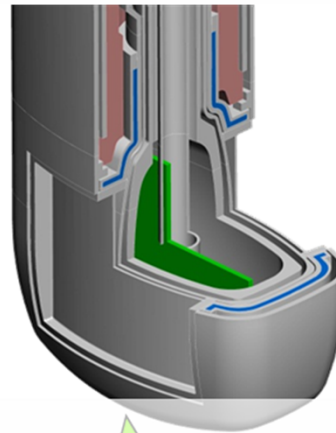


# 液体水素減速材



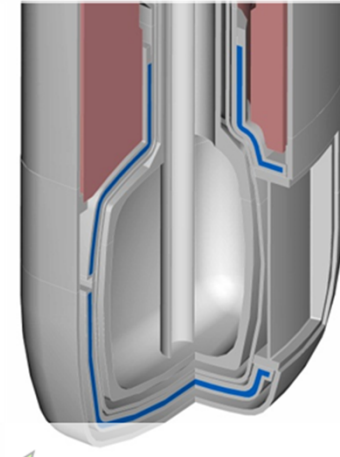
Poisoned Decoupled moderator (PM)

高分解能



Decoupled moderator (DM)

バランス



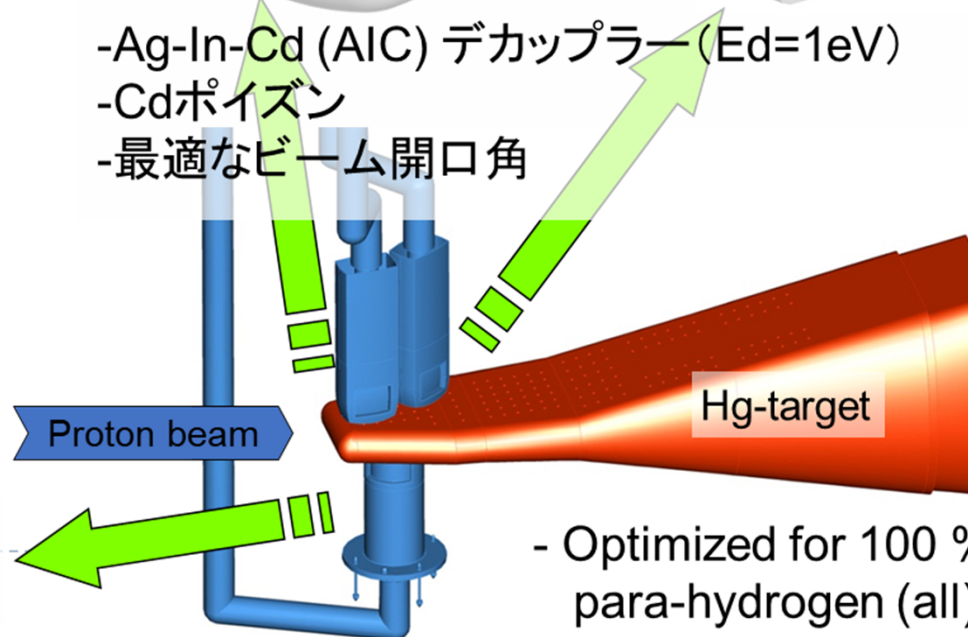
Coupled moderator (CM)

高強度



- 大容量 & 円筒型
- 広ビーム開口角

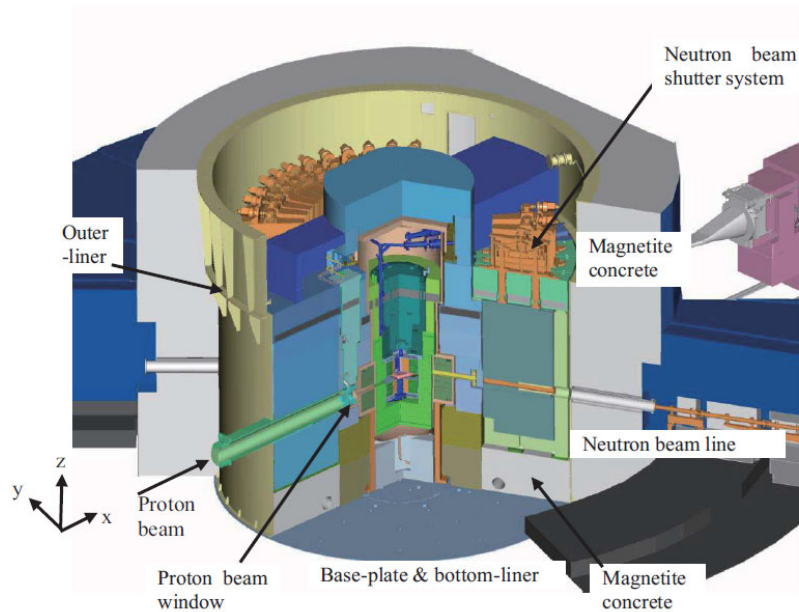
- Ag-In-Cd (AIC) デカッラー ( $E_d = 1 \text{ eV}$ )
- Cd ポイズン
- 最適なビーム開口角



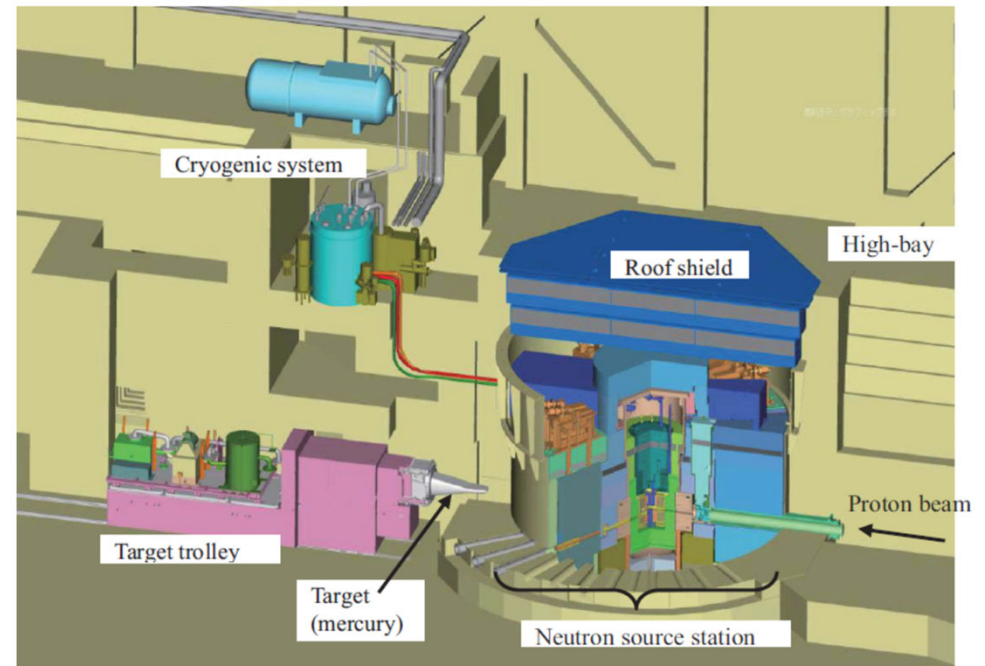
- Optimized for 100 % para-hydrogen (all)

# 中性子源施設全体

## 中性子ステーション



## 低温設備



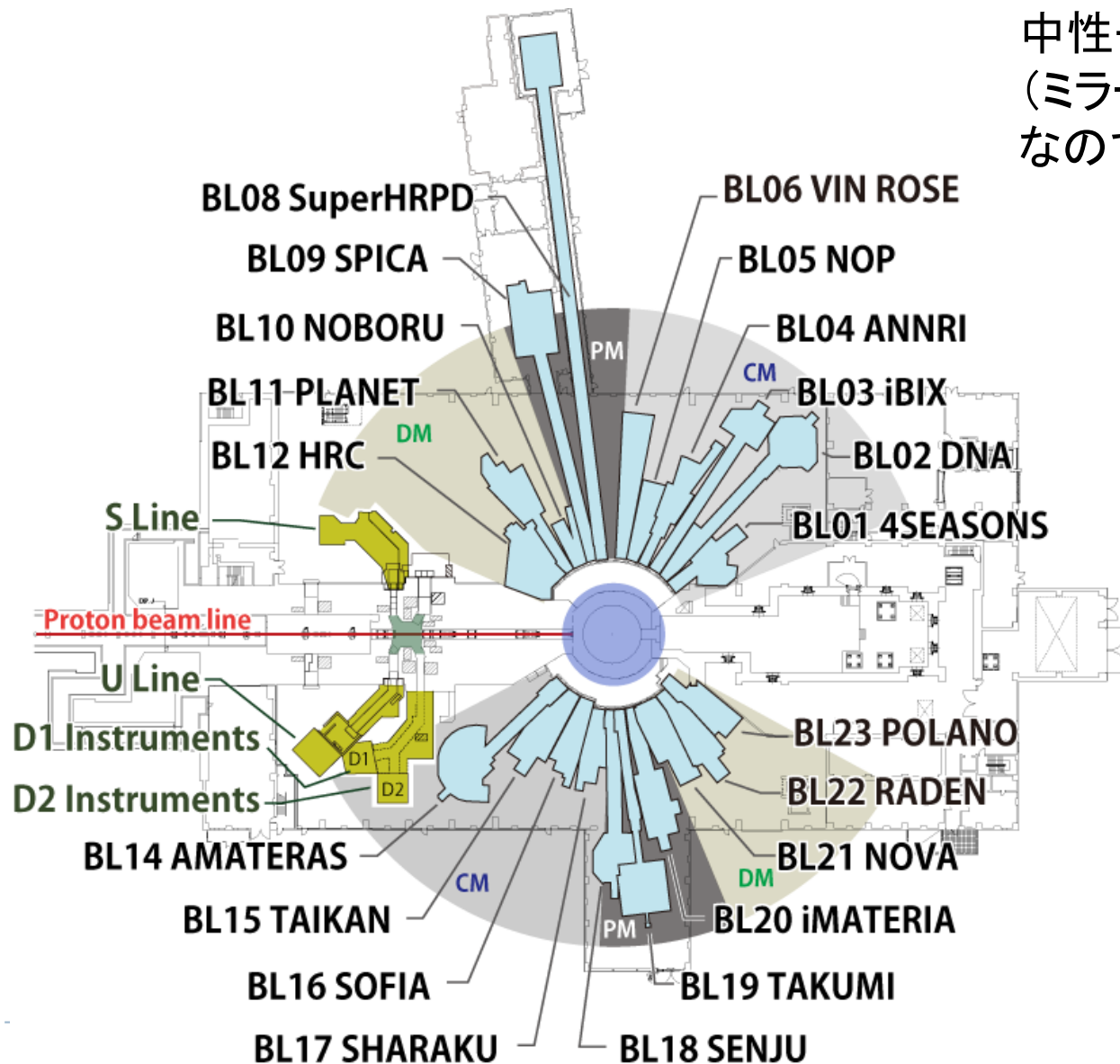
## 中性子実験装置



BL10

# 中性子実験装置の配置

中性子は基本曲がらない  
(ミラーや重力では曲がるが)  
なので、放射状に装置を配置する



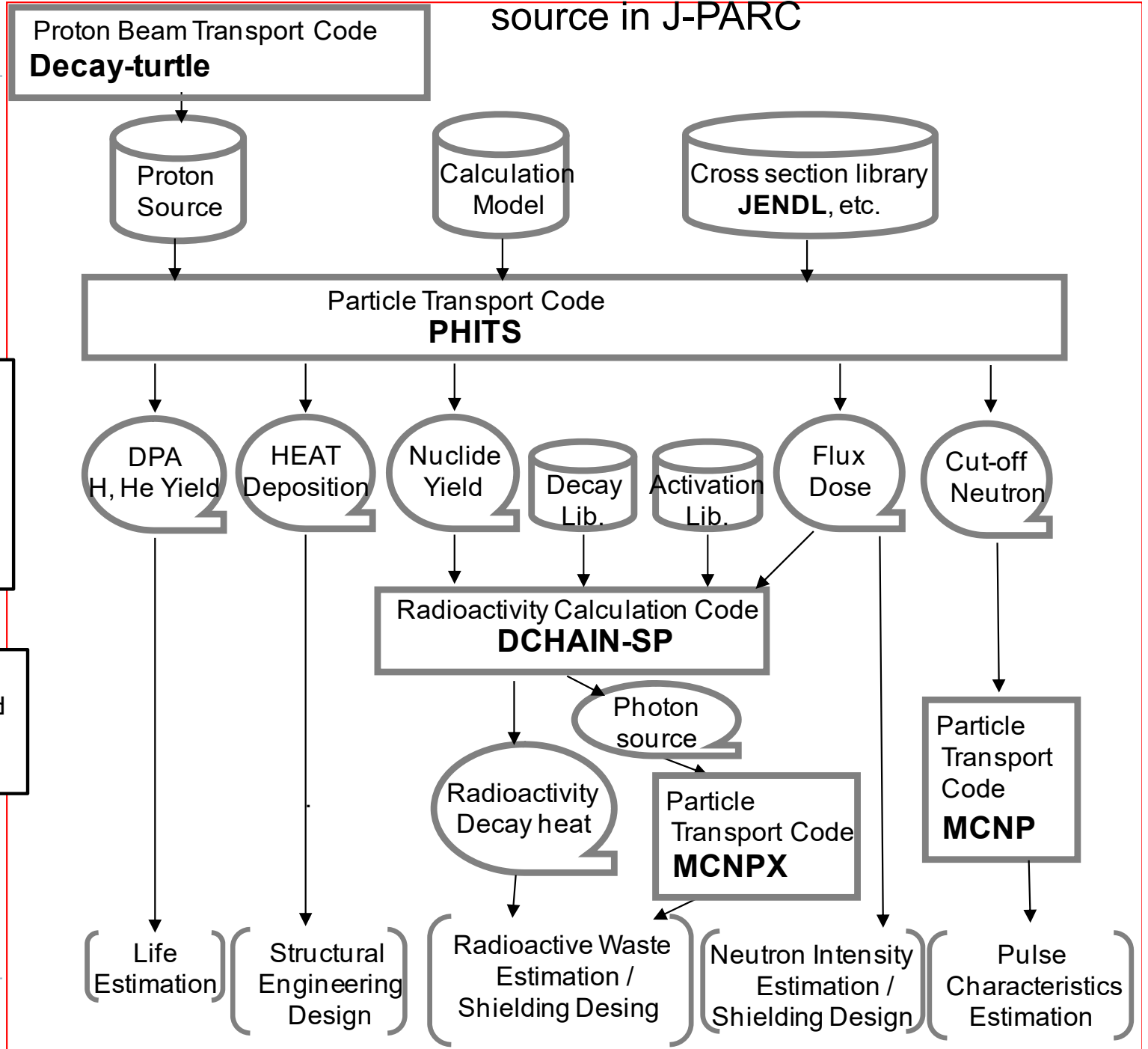
# 粒子輸送コードシステム

For the spallation neutron source in J-PARC

**PHITS:**  
Particle and Heavy Ion Transport Code

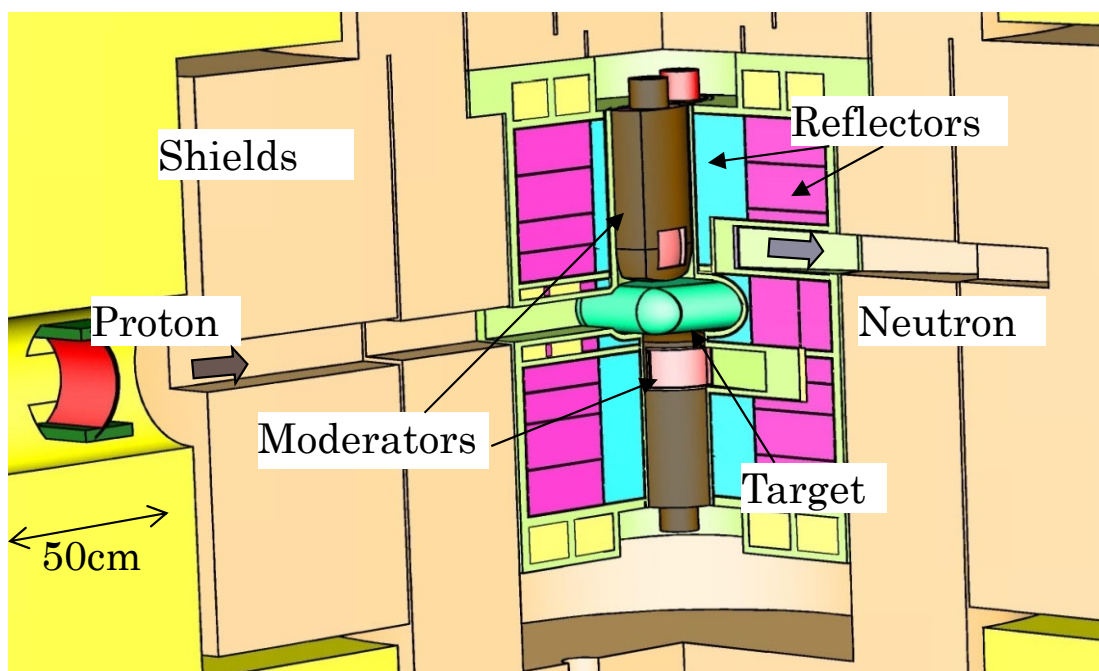
Large model size (>15m),  
Large model number (>2000)  
Large attenuation of neutron flux (>10 decades)  
Large cases (~2000)

Around 2008,  
MPI parallel computing system was used  
Pentium IV 2.8GHz (2 core) X 36  
Xeon 3.0 GHz (4 core) X 1



# 計算モデルと計算パラメータ

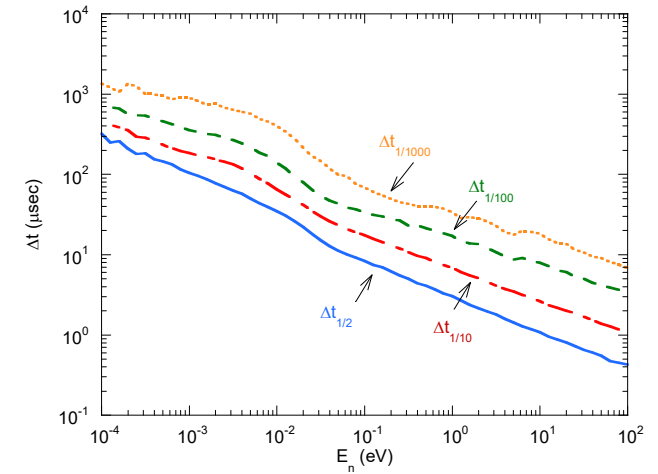
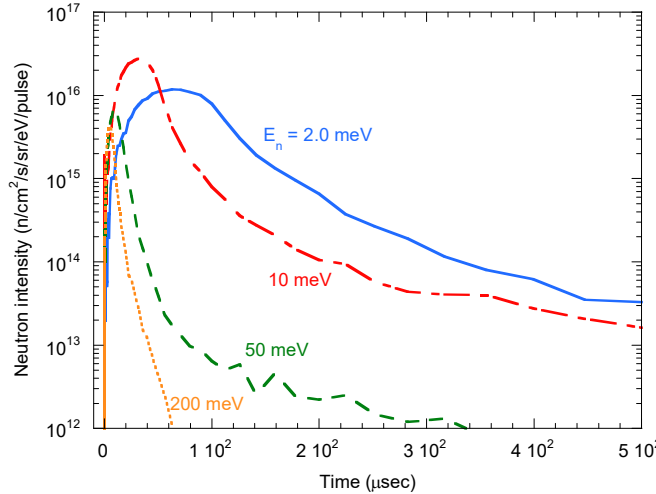
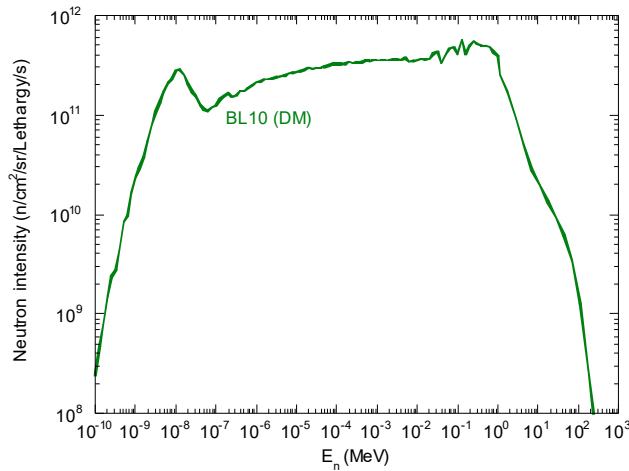
## 3 D view of JSNS design



Item	Calculation condition
<b>Proton Beam</b>	
Power	1MW at the proton beam window
Operation time	5000 hours / year
Profile	Emittance : $81 \pi$ mm mrad Gaussian + Uniform
Repetition rate	25Hz
<b>Proton Beam window</b>	
Material & thickness	Al-alloy (A5083), 2.5mm <sup>t</sup> x 2 plates
Coolant	H <sub>2</sub> O
<b>Target</b>	
Material, density	Mercury, 13.6 g/cm <sup>3</sup>
Vessel material	316L stainless steel
Coolant	D <sub>2</sub> O
<b>Moderator</b>	
Type & number	Coupled (CM) 1 Decoupled (DM) 1 Decoupled Poisoned (PM) 1
Material property	Super-critical hydrogen, 20K, 1.5MPa, 0.07g/cm <sup>3</sup>
Vessel material	Al-alloy (A6061, A5083)
Coolant	H <sub>2</sub> O
<b>Reflector</b>	
Material & size (Inner)	Beryllium, 50 cm (Dia.) x 100 cm (Hei.)
Material & size (Outer)	Iron, 100 cm (Dia.) x 100 cm (Hei.)
Coolant material, fraction	D <sub>2</sub> O, about 10% (channel width: 5mm)
Vessel material	Al-alloy (A5083)
<b>Water-cooled shield</b>	
Material	304 stainless steel
Coolant material, fraction	H <sub>2</sub> O, about 10%
<b>Air-cooled shield</b>	
Material	Steel
Coolant material	Air
<b>Neutron beam line</b>	
Number	23

# 中性子パルスデータの計算結果

## Neutron flux and pulse shape for providing at the neutron beam port



## Nuclear heat generation

Precise treatment were considered

- 1, Photon energy deposition via electron energy deposition
- 2, Energy-balanced neutron kerma factor
- 3, Decay heat

Energy conservation was consistent.

Component		Nuclear Heating (kW)
Target	Mercury & Vessel	493.0
Reflector	Reflector & Vessel	193.9
Shielding block	Water-cooled shielding block	133.8
Proton beam window	Window assembly	1.4
Poisoned moderator	H <sub>2</sub> & H <sub>2</sub> Vessel	1.1
	Water-cooled outer Vessel	4.4
Decoupled moderator	H <sub>2</sub> & H <sub>2</sub> Vessel	1.0
	Water-cooled outer Vessel	4.9
Coupled moderator	H <sub>2</sub> & H <sub>2</sub> Vessel	1.4
	Water-cooled outer Vessel	5.2
Total		874.7

Dose rate  
DPA  
Radioactive materials  
and so on.

# 中性子の測定例

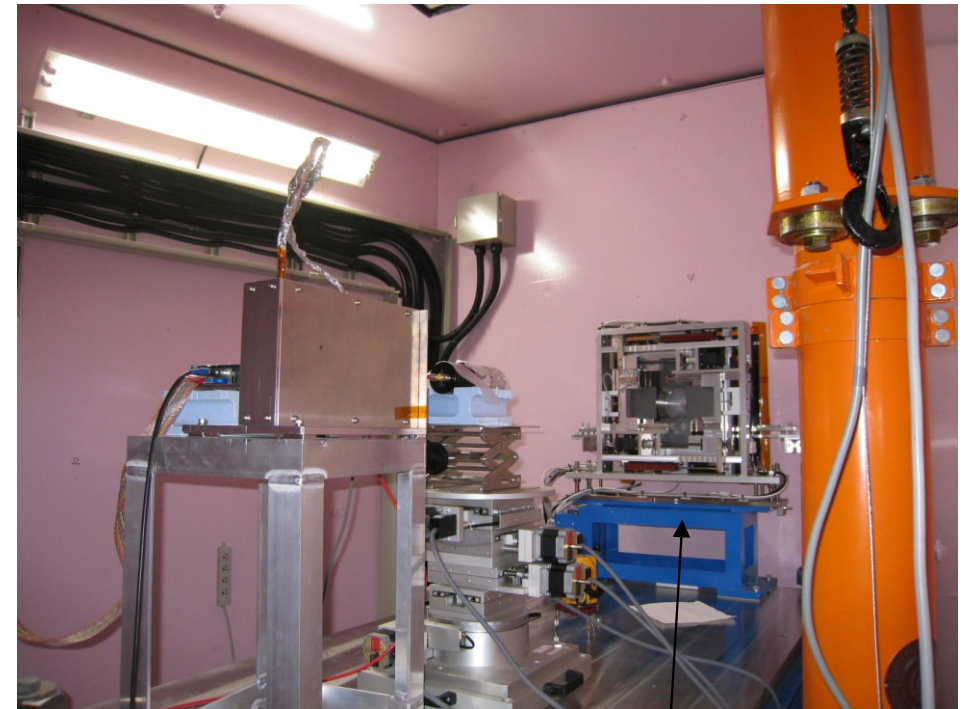
Li-glass scintillator

$^3\text{He}$  detector

Counting detectors

1/2 inch He-3 detector (Eff~1)

He-3 monitor (Eff:  $10^{-1}$ ,  $10^{-2}$ ,  $10^{-3}$ ,  $10^{-4}$ ,  $10^{-5}$ )



Beam stop

Neutron beam entrance

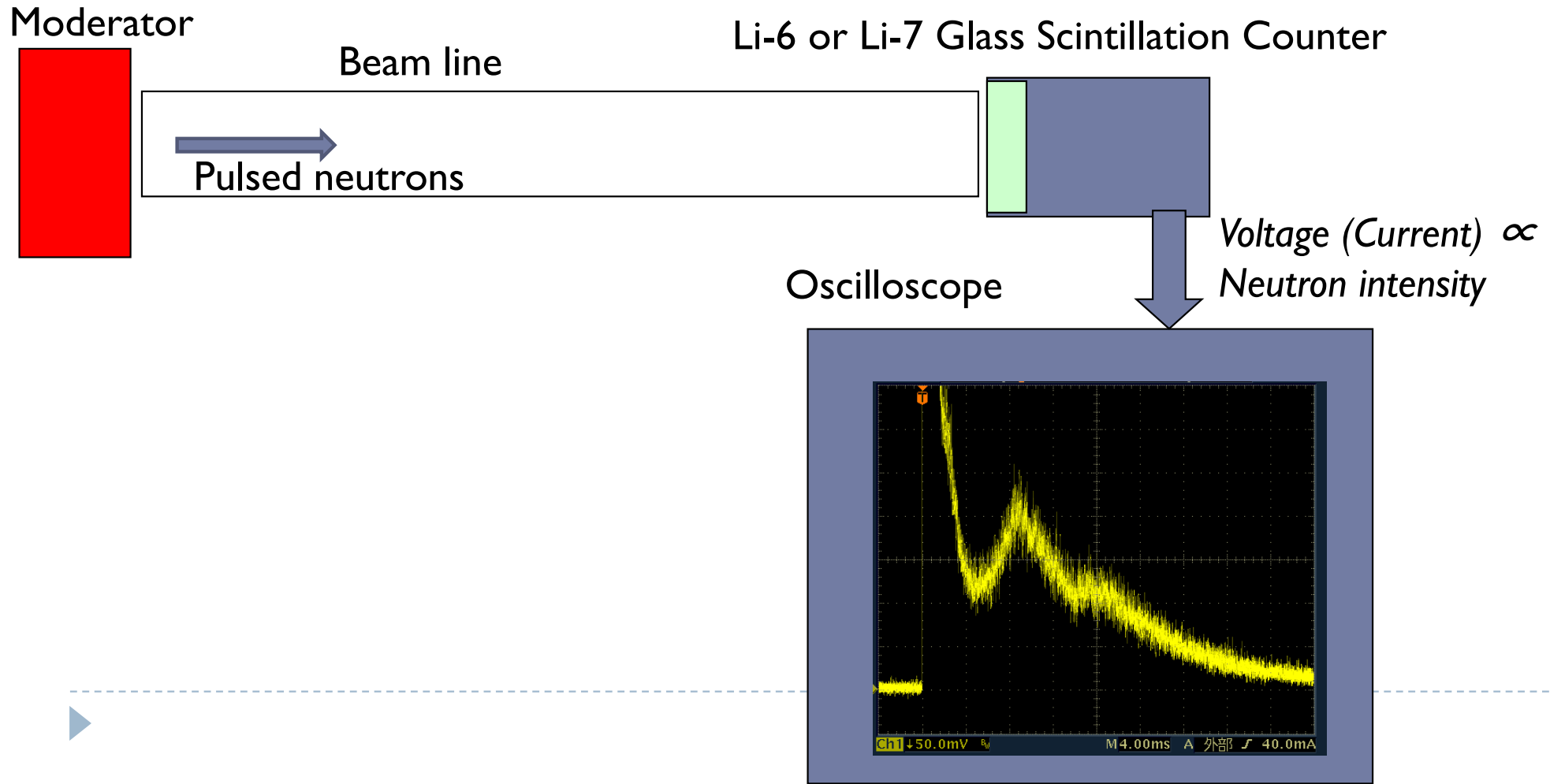




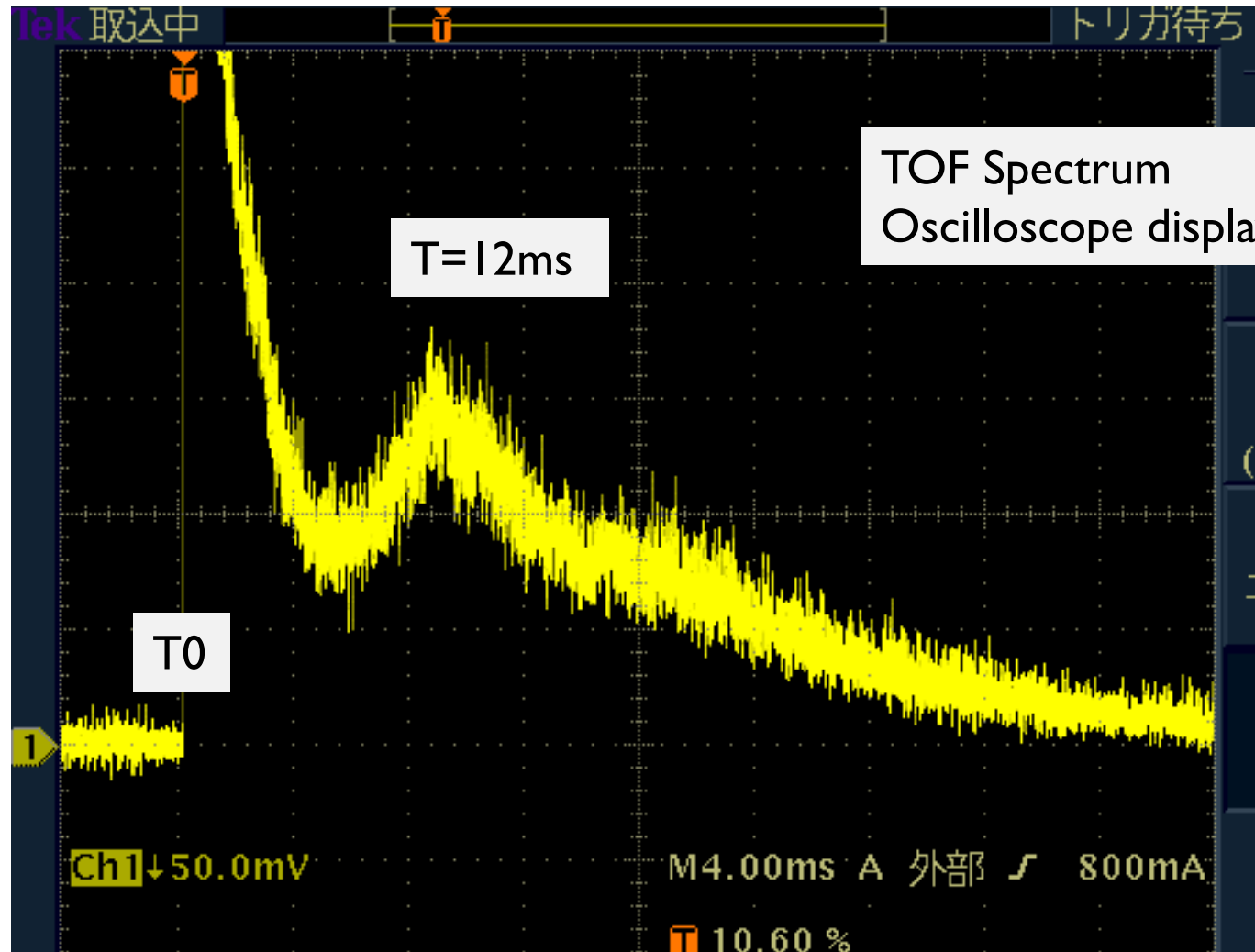
# 最初の中性子ビームの観測のために

First direct beam was measured by CTOF method at the sample position at BL10.

CTOF: *Current Time of Flight*

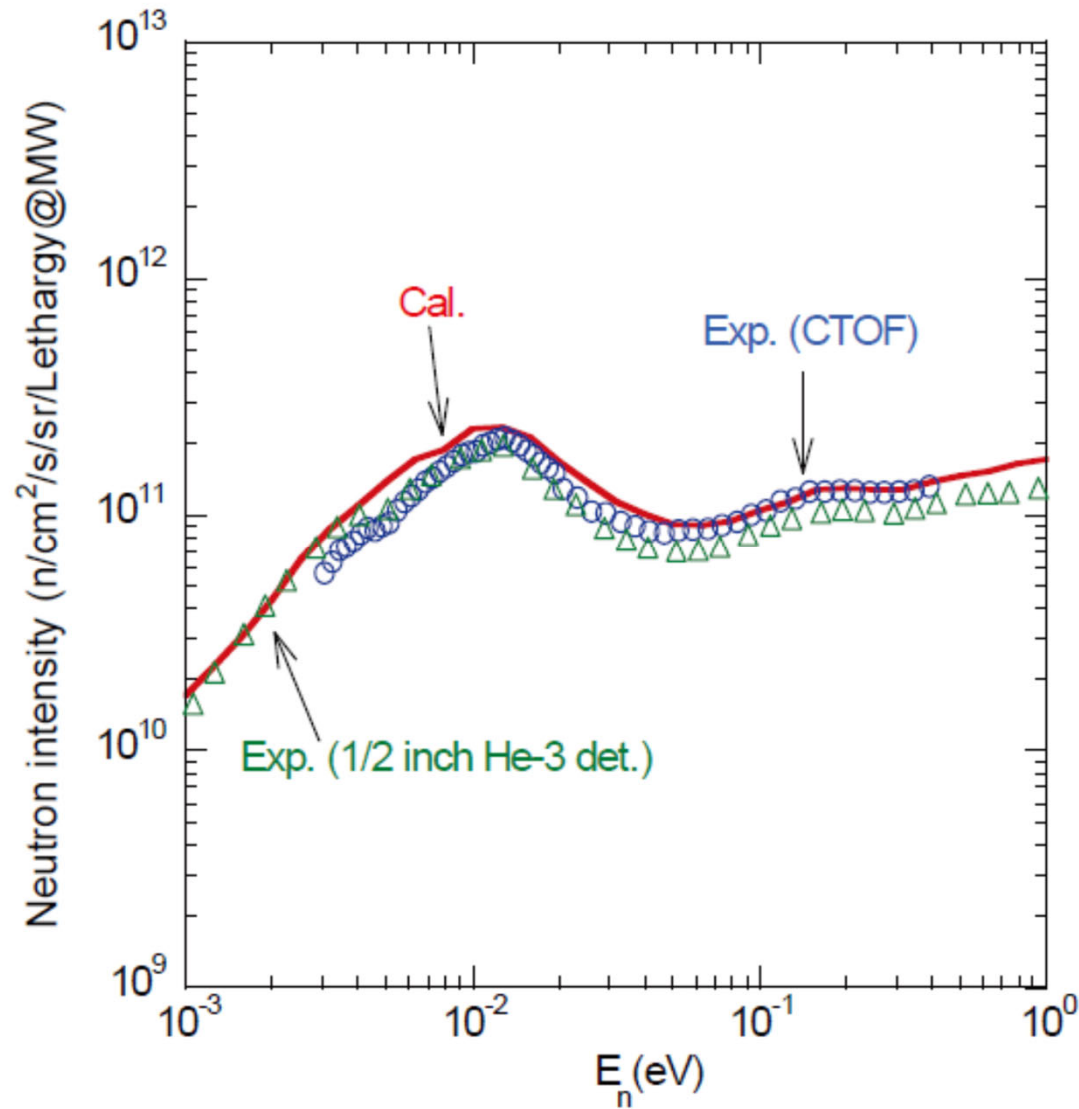


# 最初の中性子ビーム



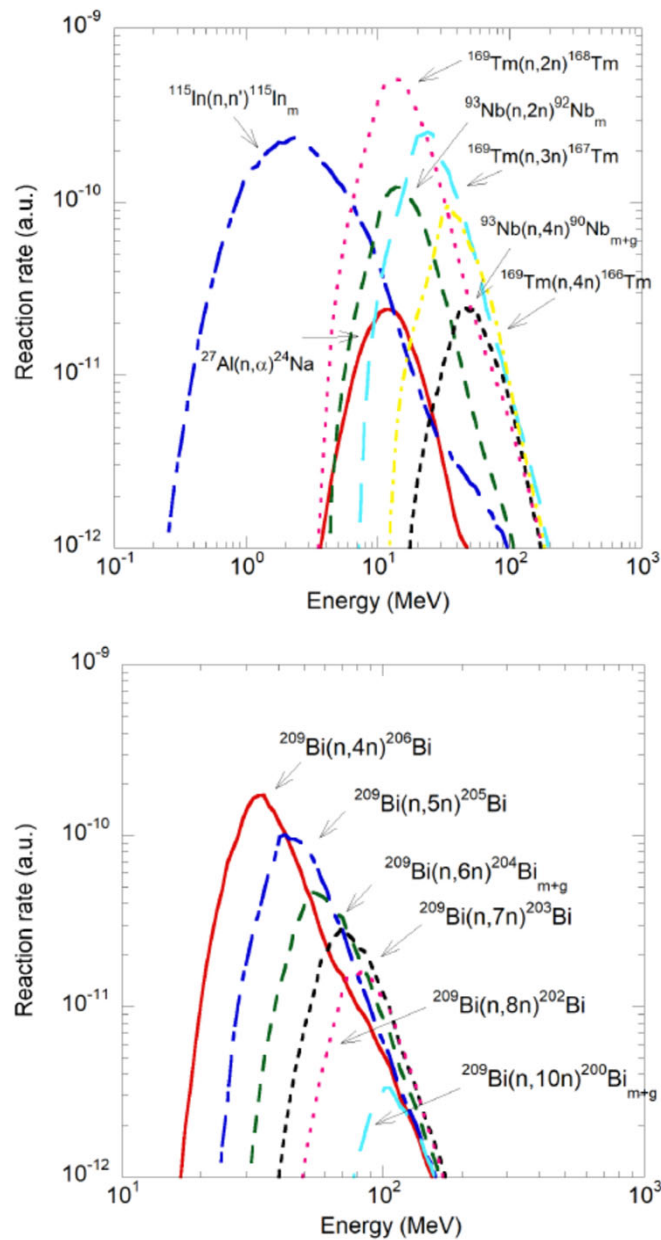
Only 1 shot !

# 中性子束のシミュレーションと実測



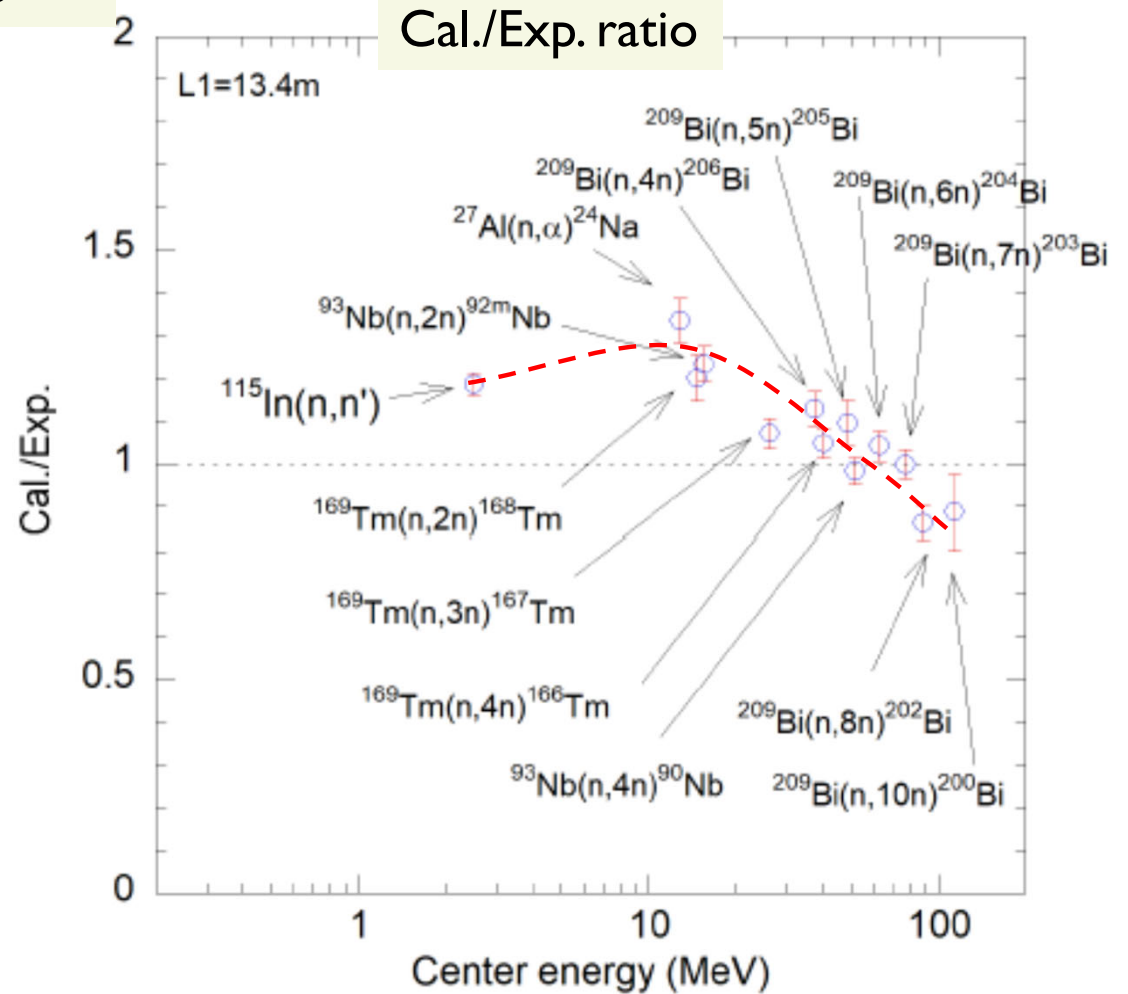
20%の精度で  
よい一致を示す。

# 高エネルギー中性子



Reaction rate

The foil activation method with the threshold energy reactions was used.



C/E: 0.8~1.2

Figure 11: Neutron energy dependence of each reaction rate.

# 中性子のパルス形状

- ▶ Sample: mica and diamond
- ▶ The detector was located at  $170^\circ$

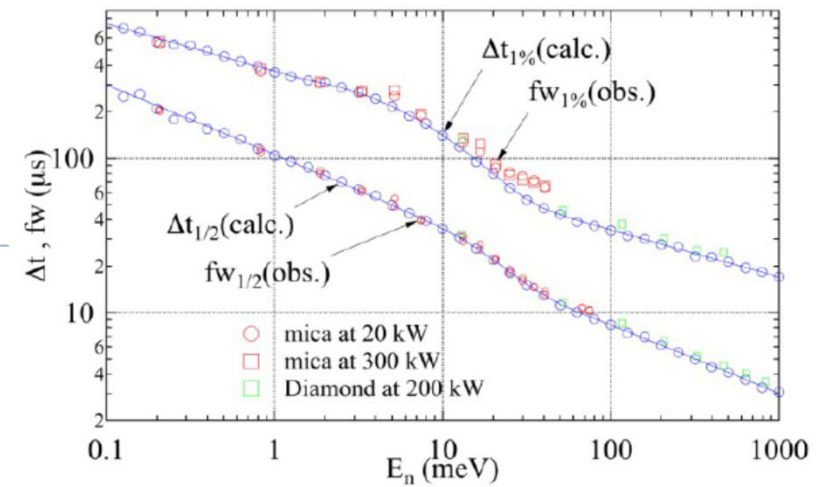


Fig. 3. Pulse width at half and 1 % maximum of observed pulses of DM of JSNS.

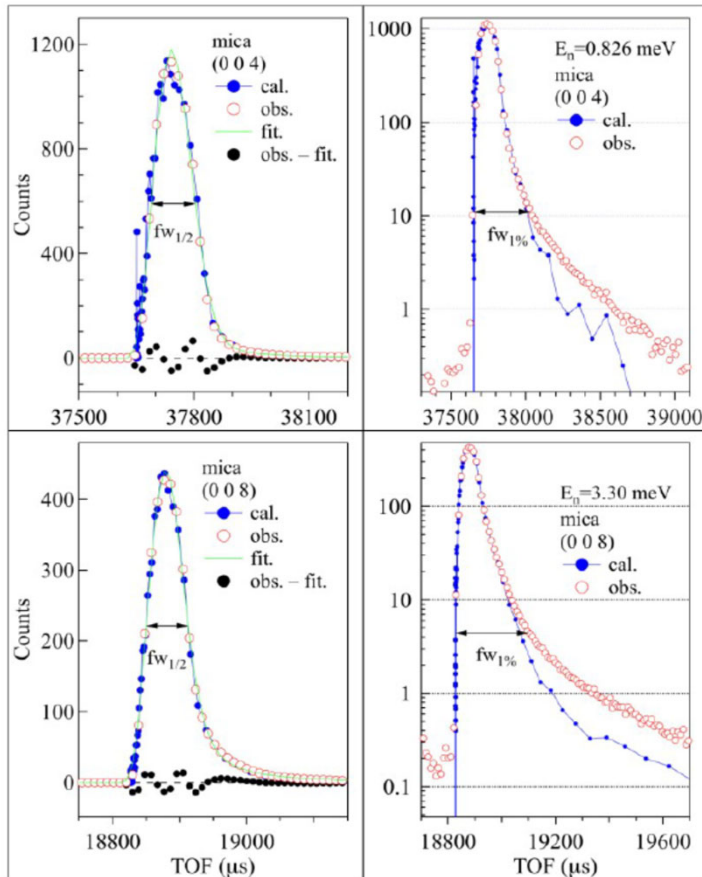


Fig. 1. Example of pulse shapes of the cold neutrons. Bragg peaks of (004) and (008) of mica are represented.

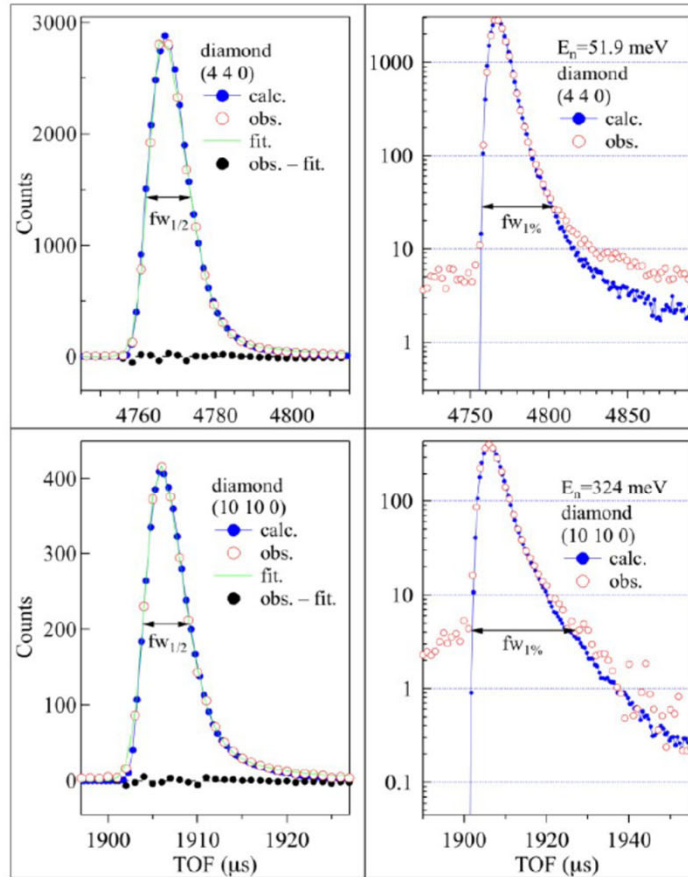
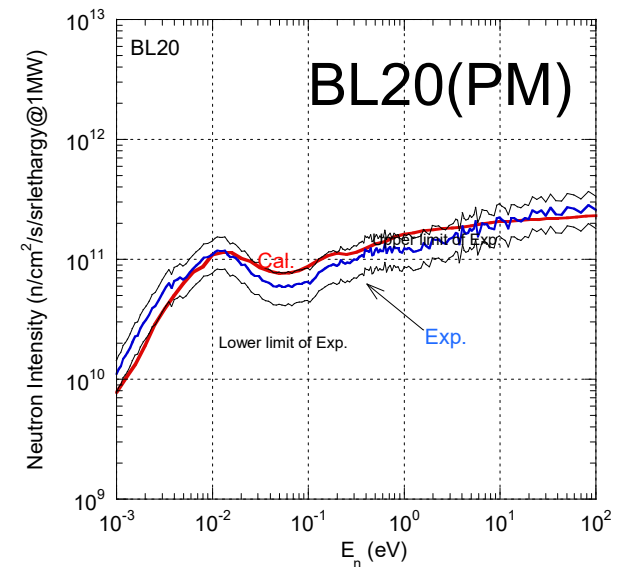
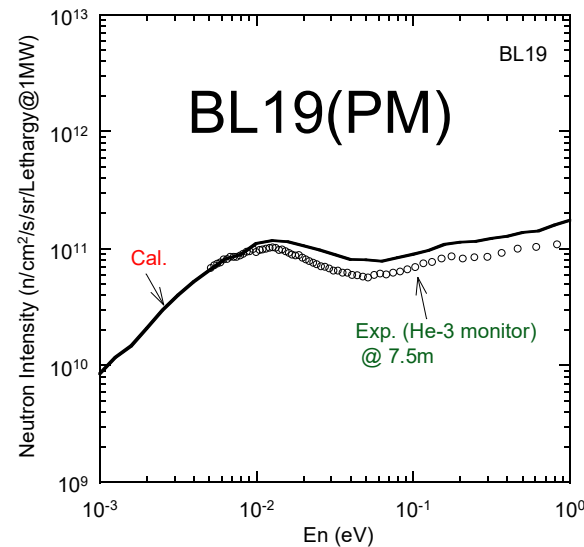
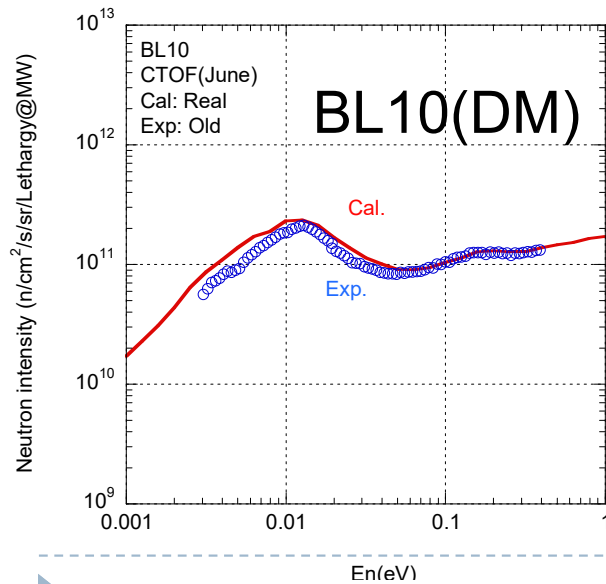
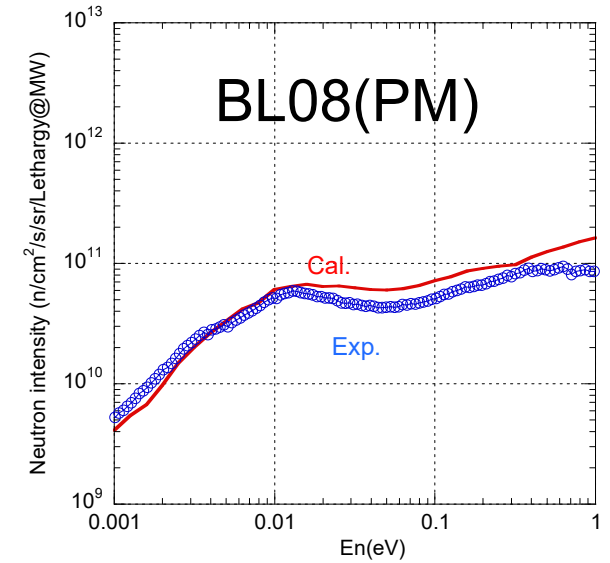
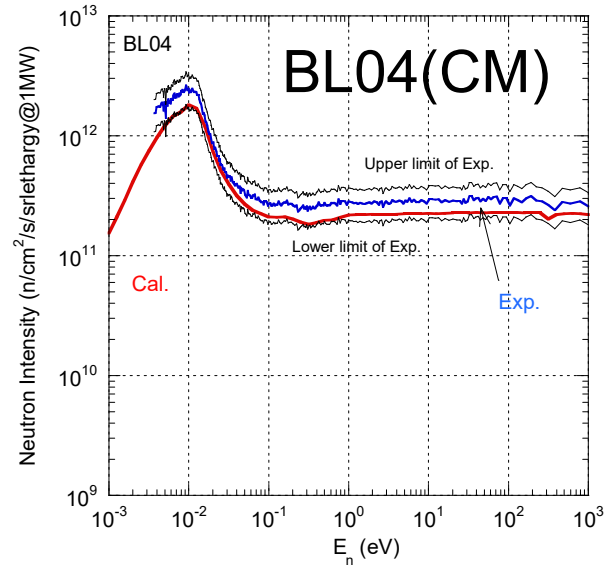
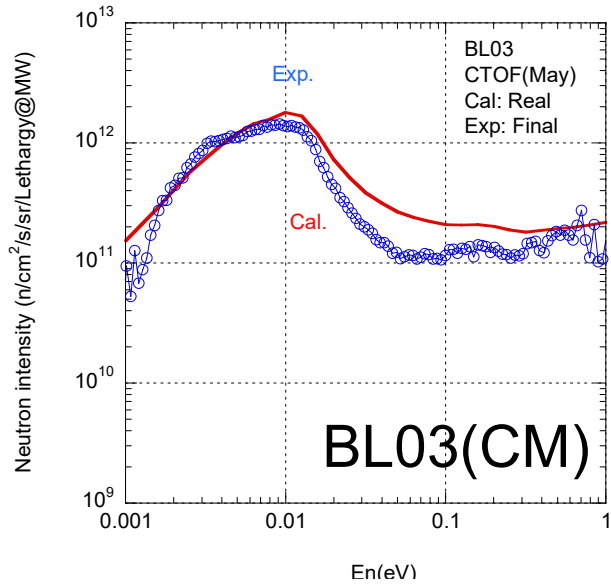


Fig. 2. Example of pulse shapes of the thermal and epithermal neutrons. Bragg peaks of (440) and (10 10 0) of diamond are extracted.

Good agreement

# 中性子スペクトル



Good agreement within 20%

# 輝度分布

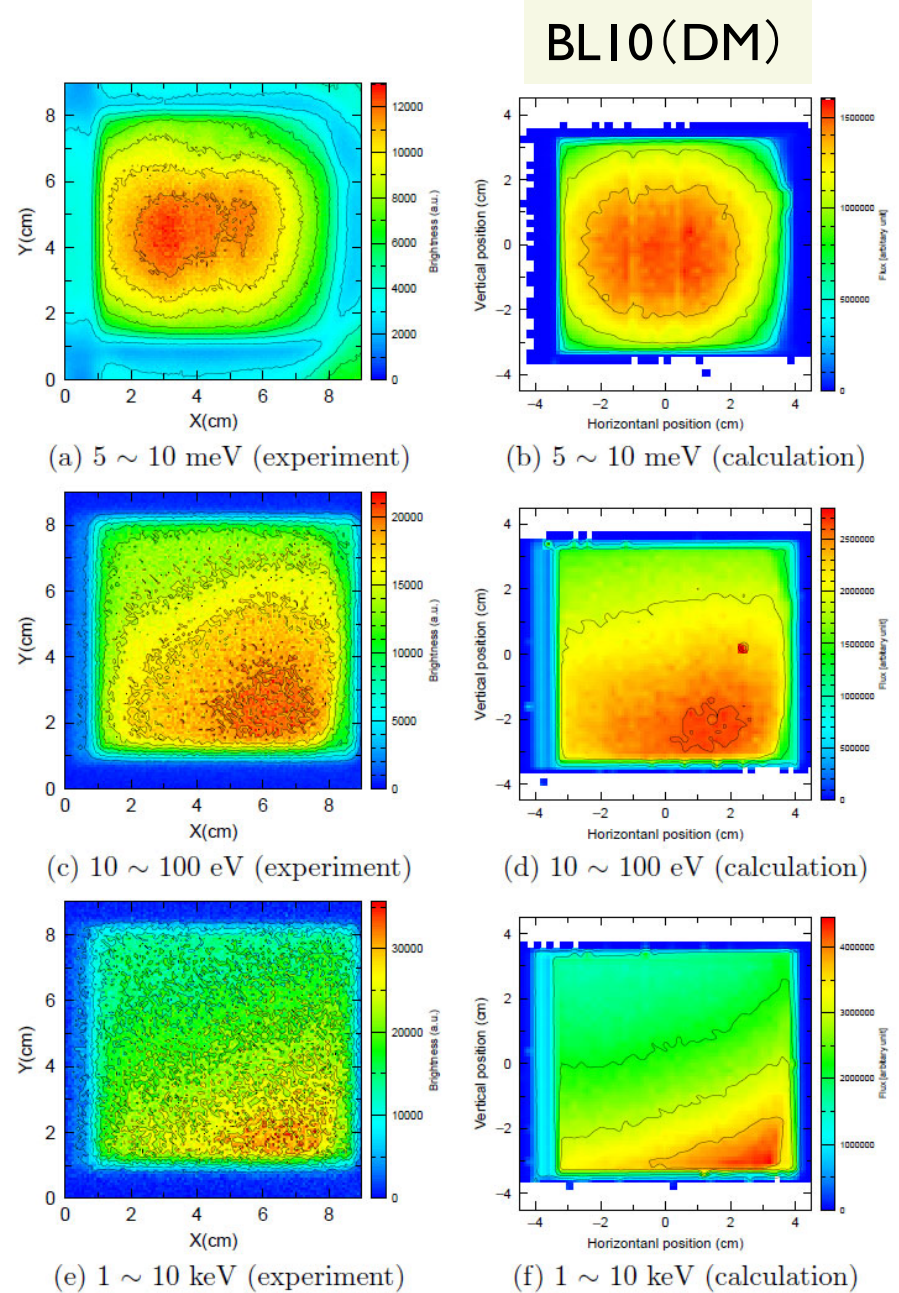
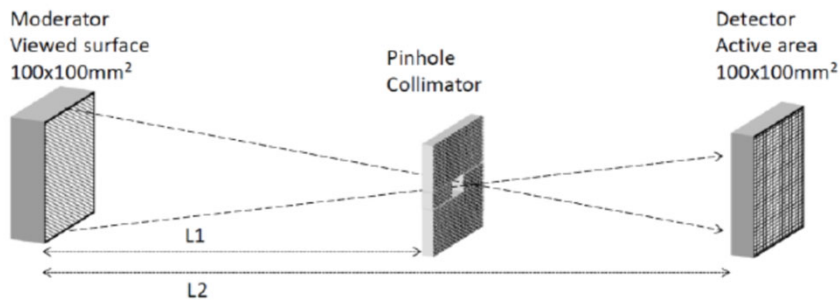
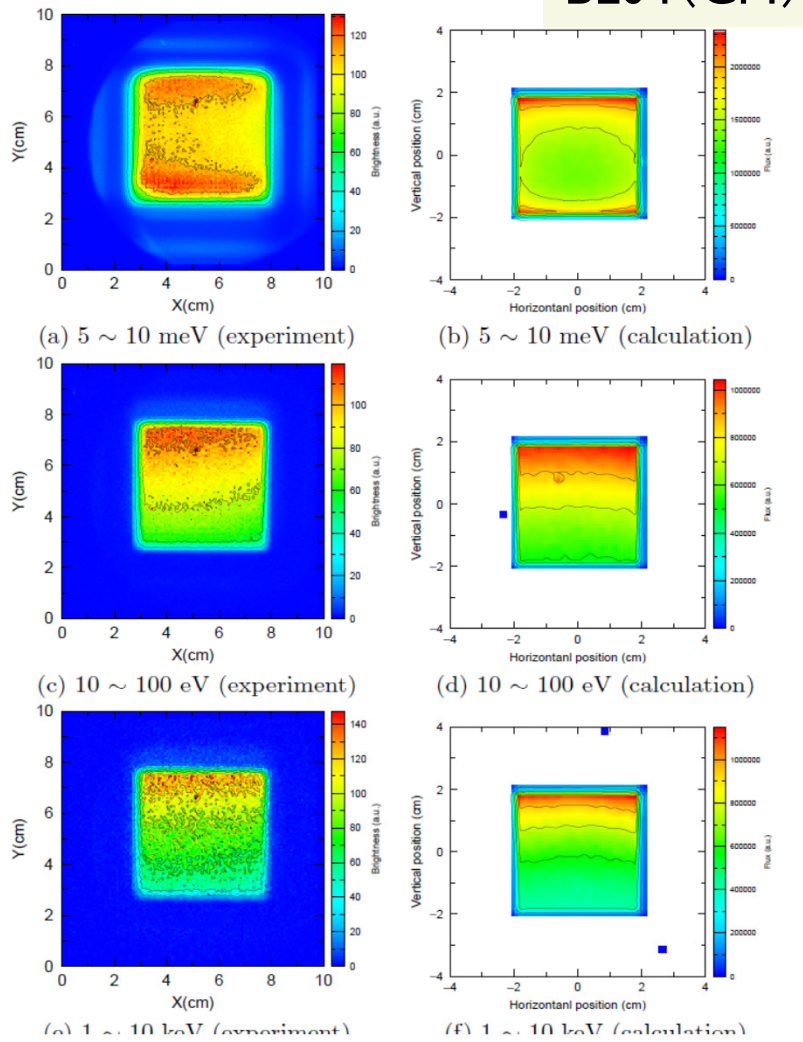
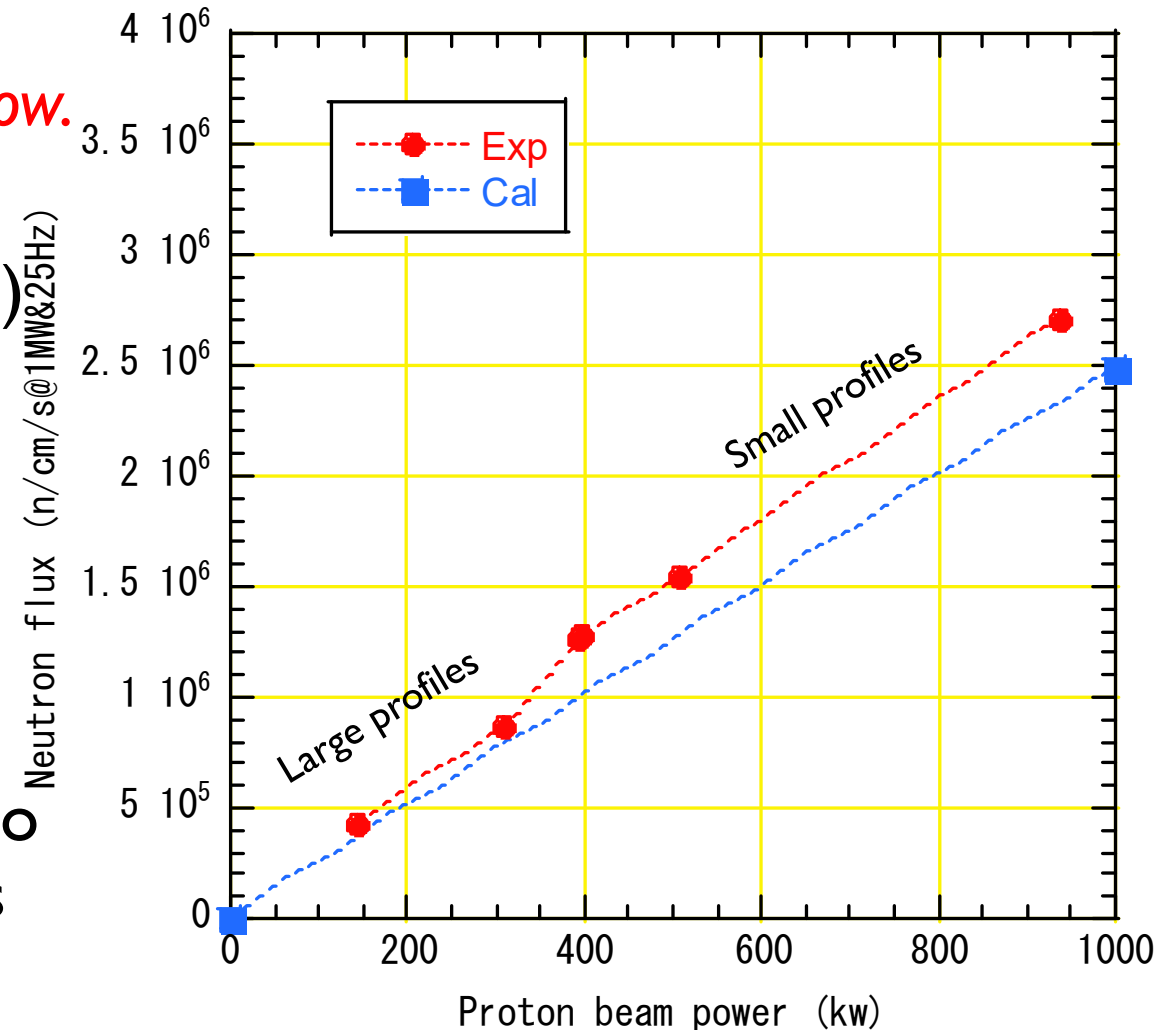


Figure 9: Measured and calculated brightness at BL10.

We could observe the spatial distribution.

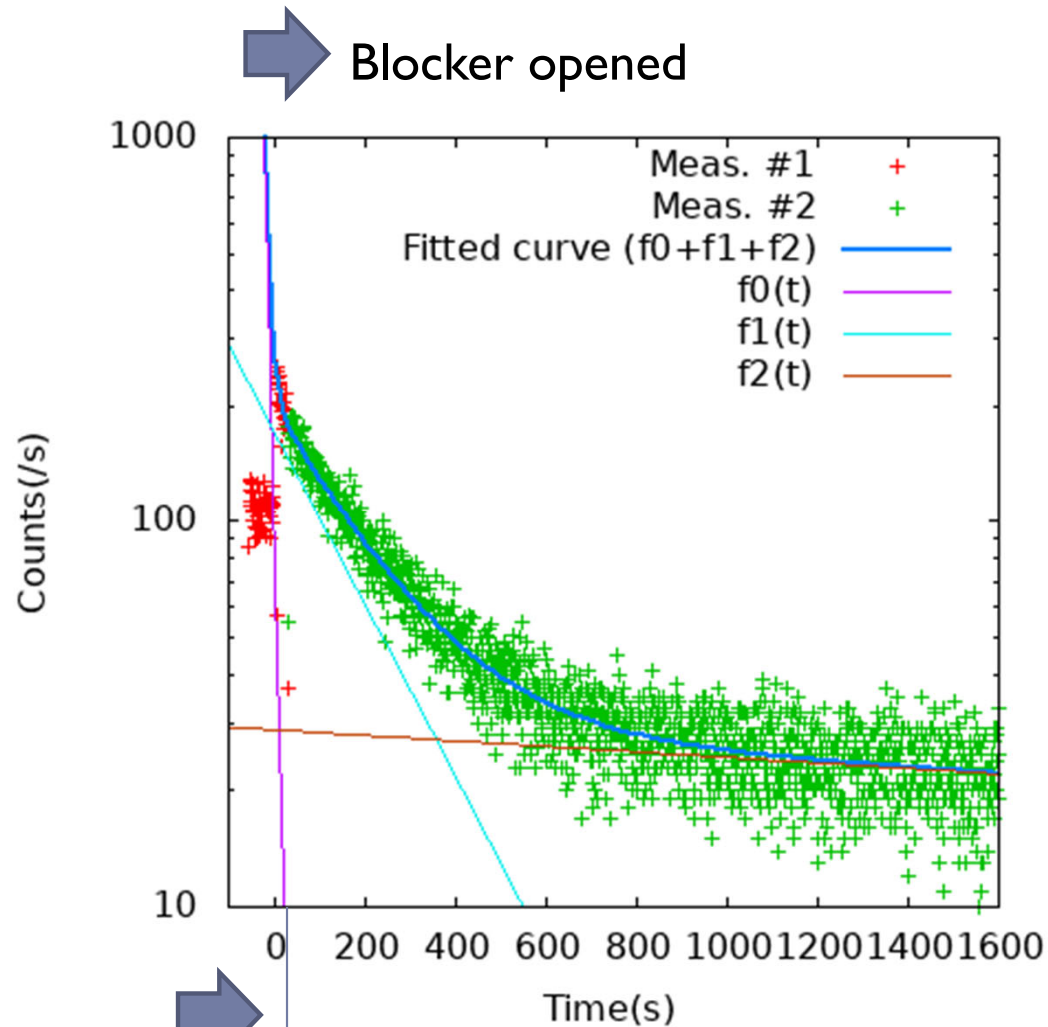
# 金箔による中性子絶対強度測定 (陽子ビーム強度依存性)

- ▶ *1MW operation for 10 hours on July 3 was successful.*
- ▶ *500kW operation is stable now.*
- ▶ At sample position (13.4m) BL10 (Noboru) with collimators
- ▶ W/WO Cd cover
- ▶ Good agreement
- ▶ At 1MW operation with no collimator,  $4.7 \times 10^7$  n/cm<sup>2</sup>/s will be archived.





# 遅発中性子

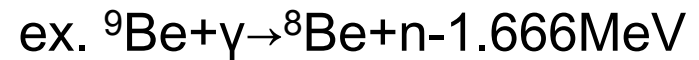


These events were confirmed as neutron detections from the pulse height data

These events ?

1, Delayed neutrons

2, The  $(\gamma, n)$  reaction



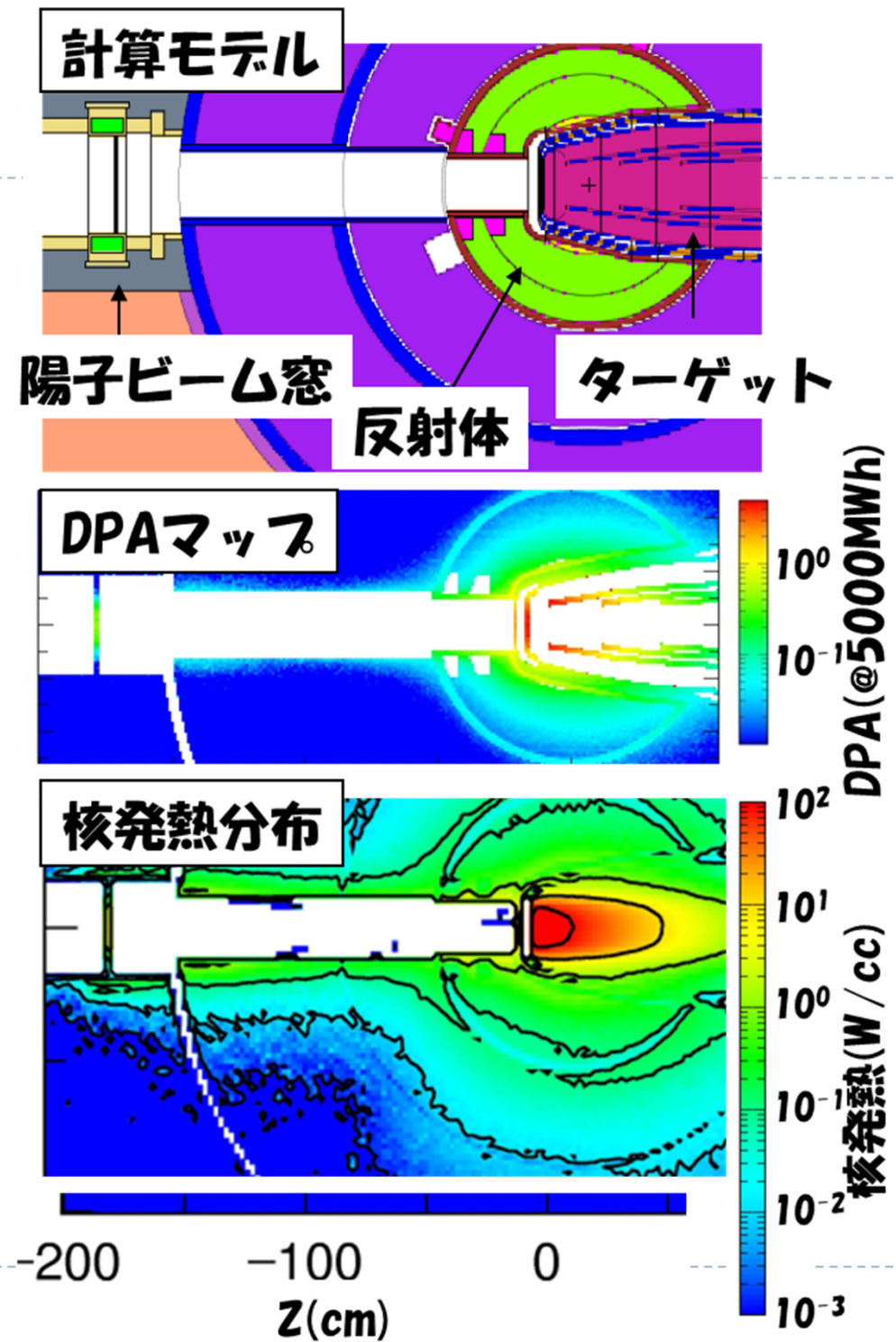
In operation → Operation stop

$$f_0(t) = 95.749 \cdot (1/2)^{(t/6.5381)}$$

$$f_1(t) = 172.06 \cdot (1/2)^{(t/134.41)}$$

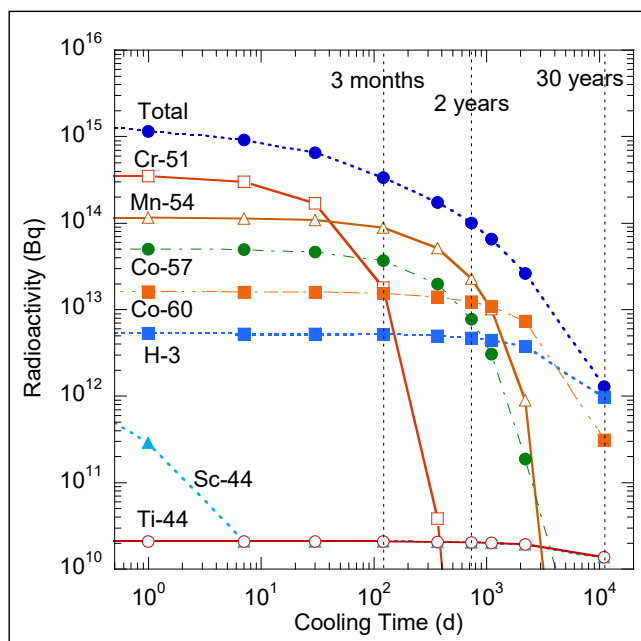
$$f_2(t) = 28.811 \cdot (1/2)^{(t/4217.2)}$$

# 核発熱計算と放射線損傷計算

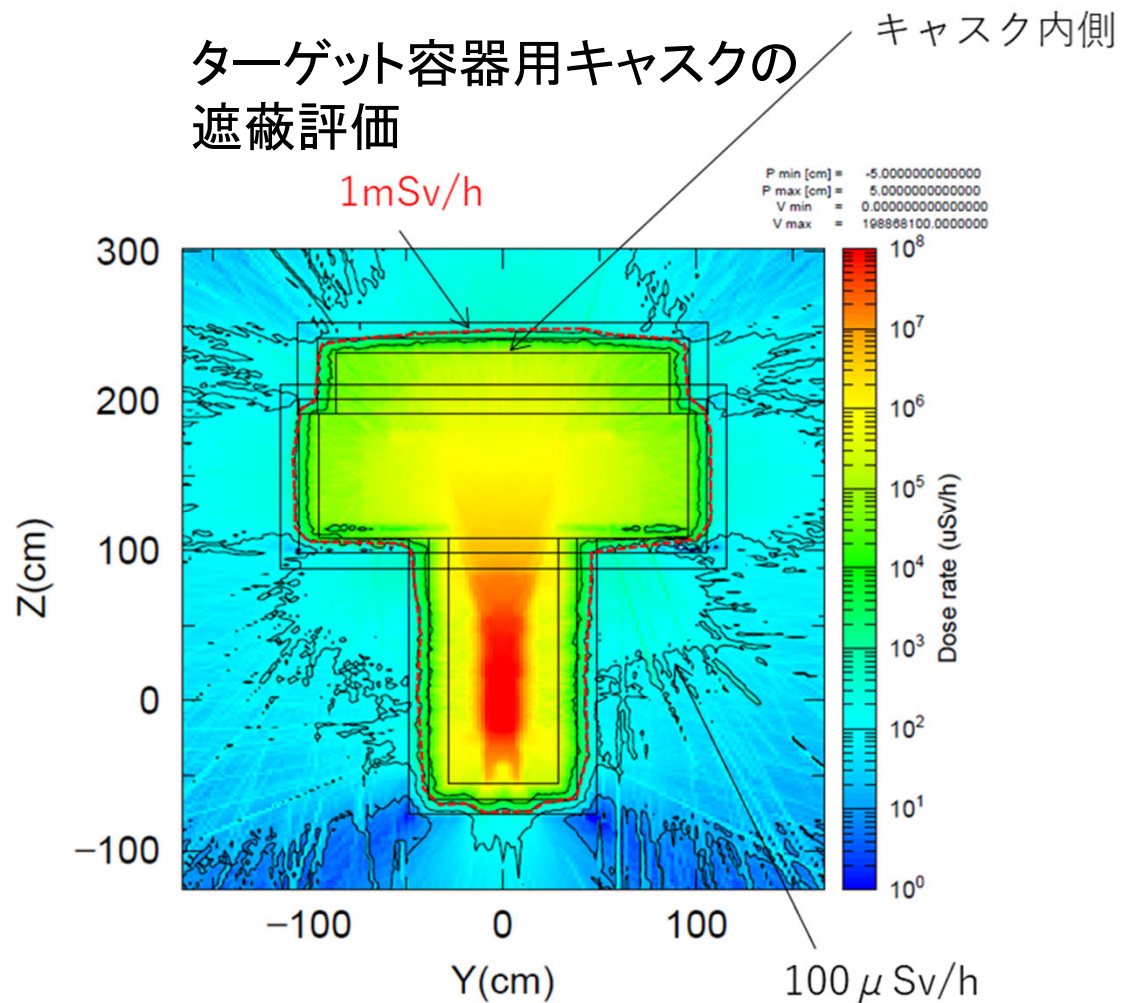


# 放射化計算（残留放射能及び線量分布計算）

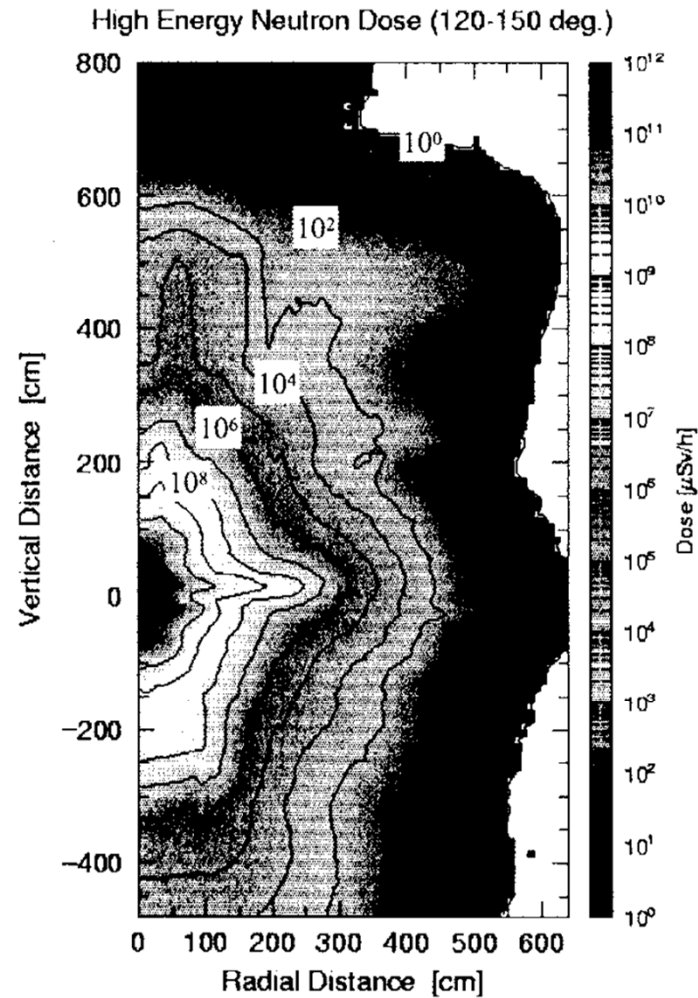
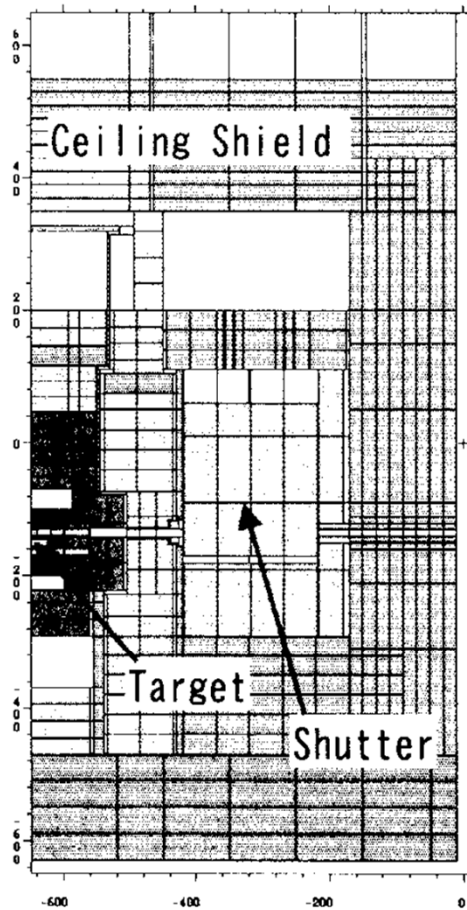
## ターゲット容器の残留放射能



## ターゲット容器用キャスクの遮蔽評価

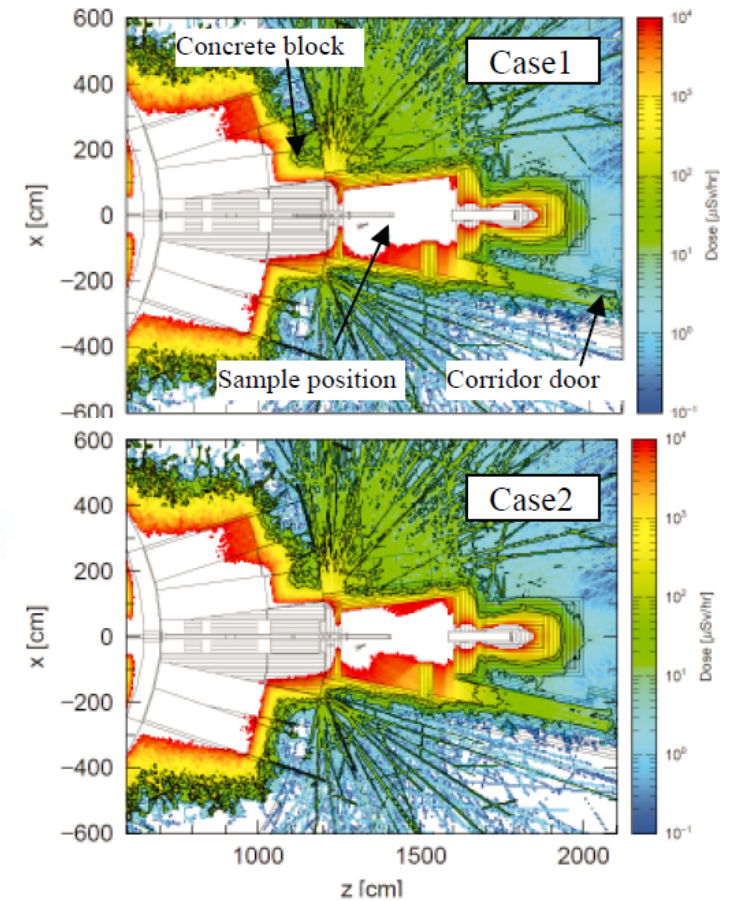
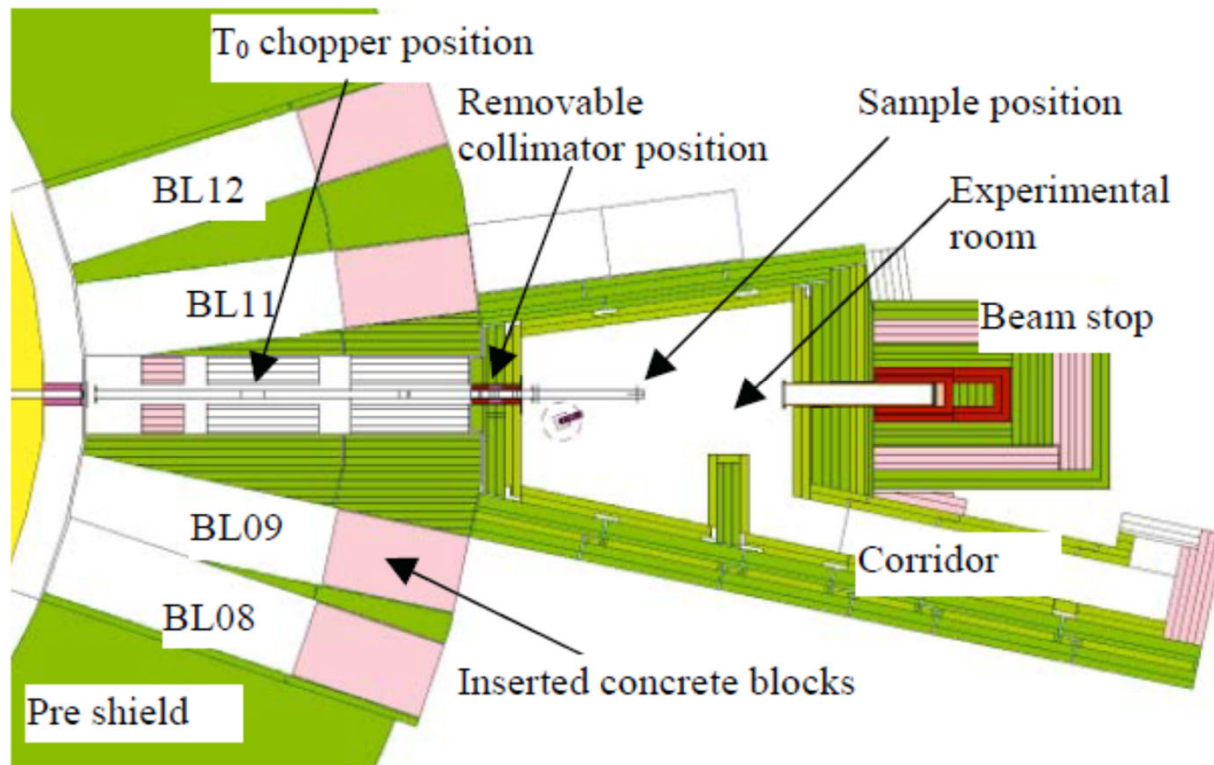


# 遮蔽計算 (バルク遮蔽)



中性子ステーション外側の遮蔽体(生体遮蔽体)の遮蔽評価

# 遮蔽計算 (ビームライン)



# キャビテーション損傷

急激に発熱することで、圧力波が発生し、そこから負圧(キャビテーション)が発生して、水銀のマイクロジェットが容器壁面に損傷を与える。

## SNSの事例

### Target 8

- Original design
- No gas injection
- $P_{avg} = 851 \text{ kW}$
- $E_{total} = 3750 \text{ MWh}$



Disk 13

Disk 17

### Target 13

- Original design
- No gas injection
- $P_{avg} = 1075 \text{ kW}$
- $E_{total} = 2588 \text{ MWh}$



Target 13  
leak location

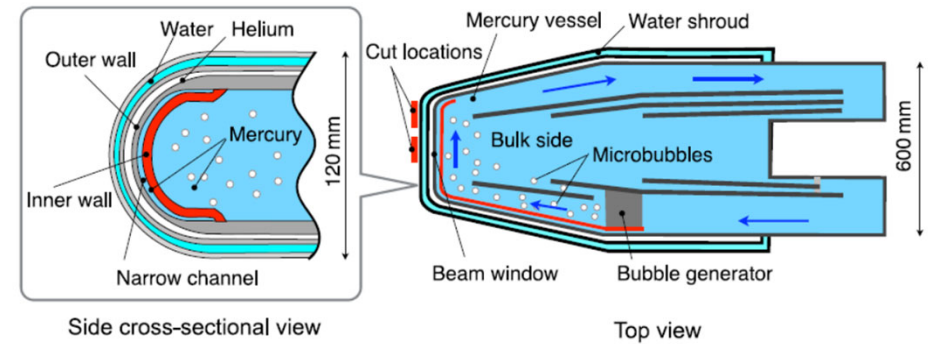
### Target 14

- Original design
- No gas injection
- $P_{avg} = 968 \text{ kW}$
- $E_{total} = 2762 \text{ MWh}$

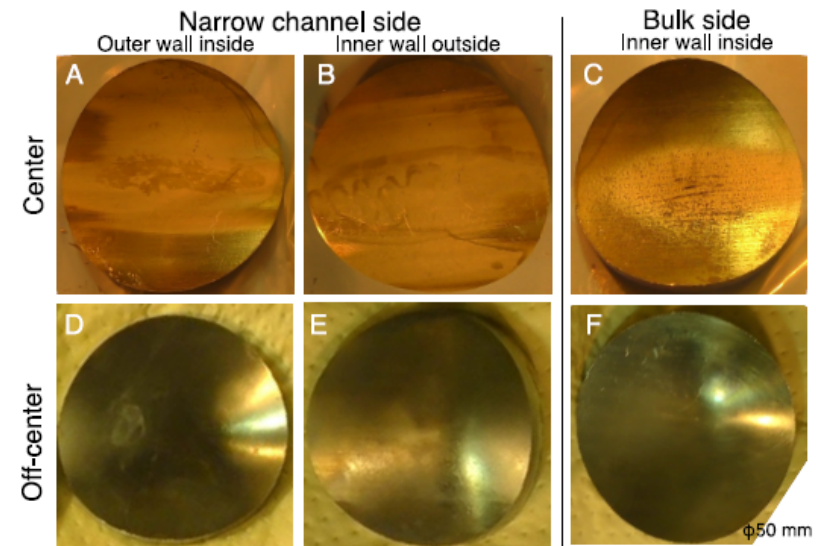


10 mm

## J-PARCでの対策



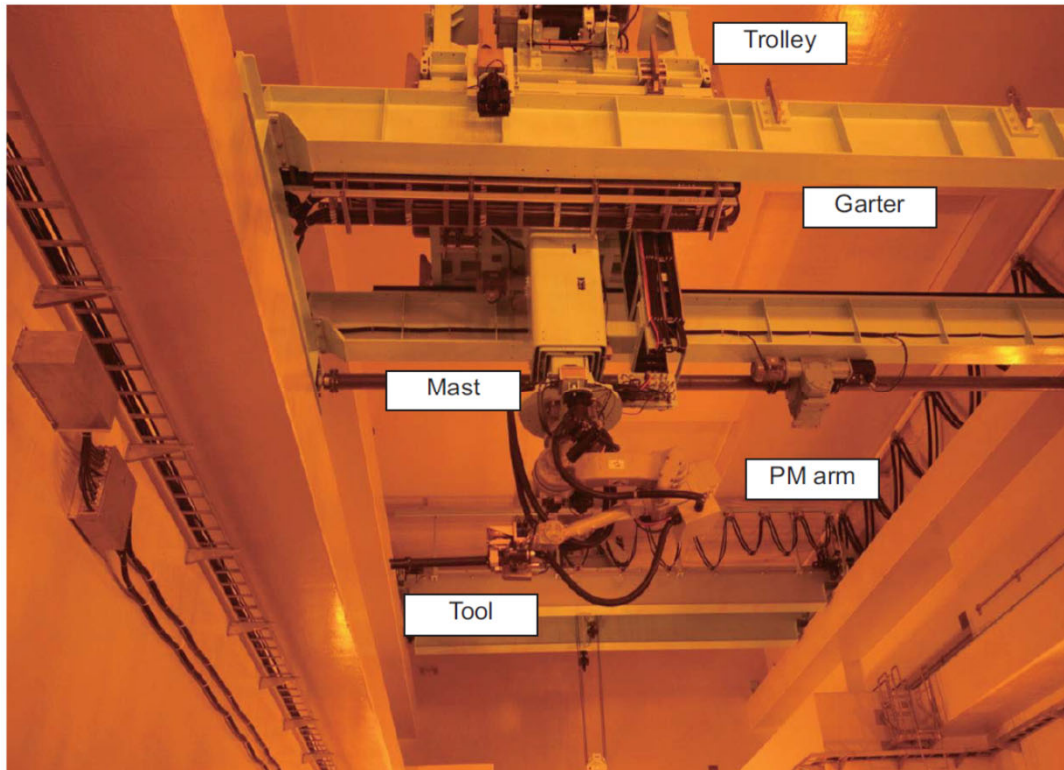
## J-PARCでの事例



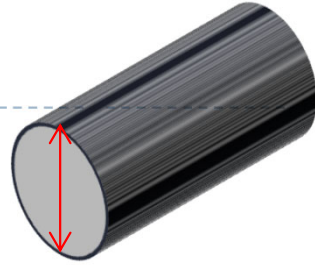
# 遠隔操作機器

## ▶ パワーマニピュレーター

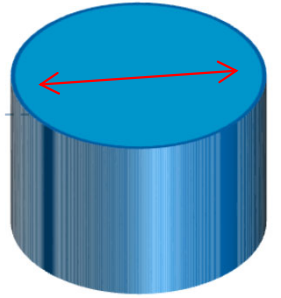
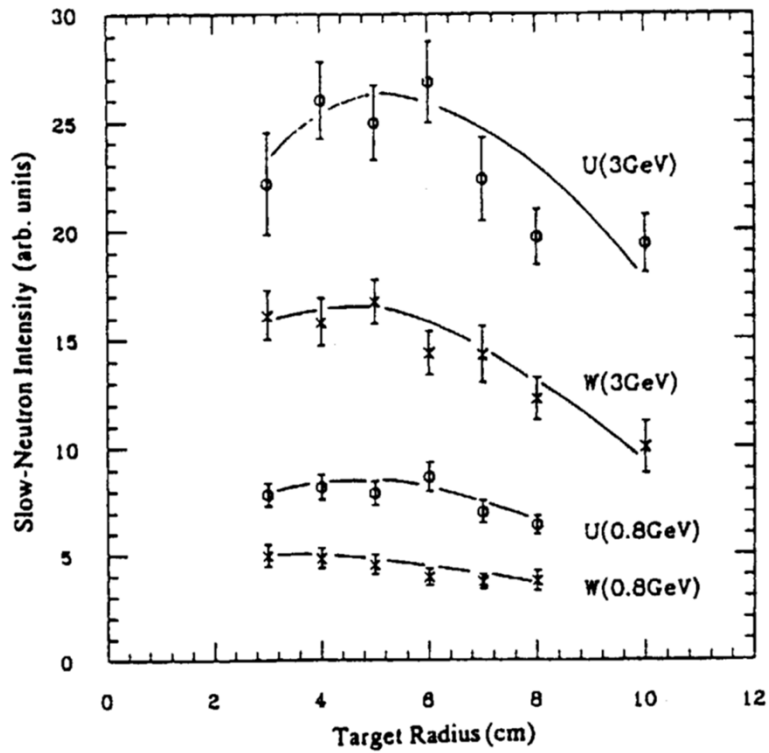
容器先端部分で1000Sv/h以上の線量があるので、交換は遠隔操作が主。



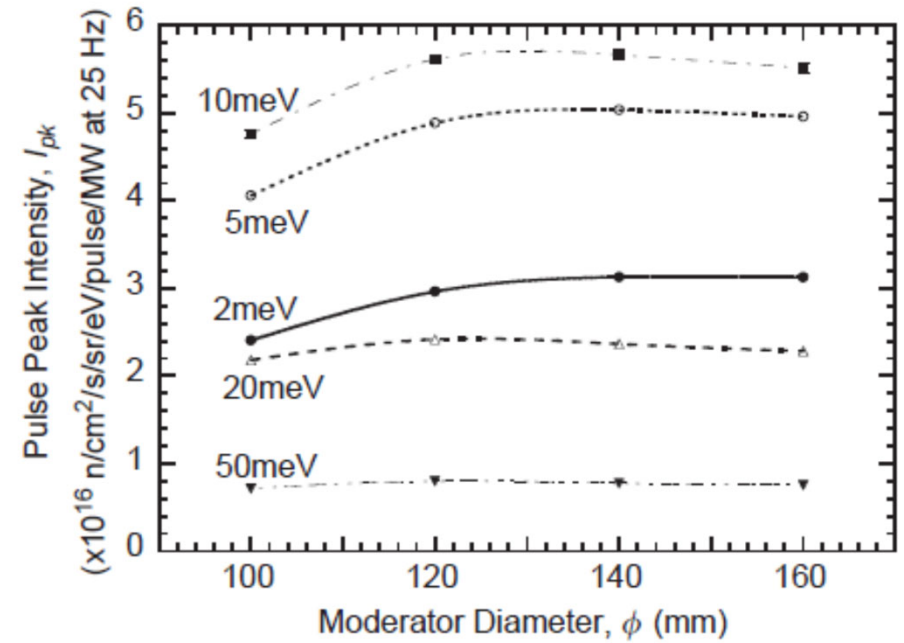
# 最適化(1)



中性子強度の  
ターゲットの大きさと材質依存性



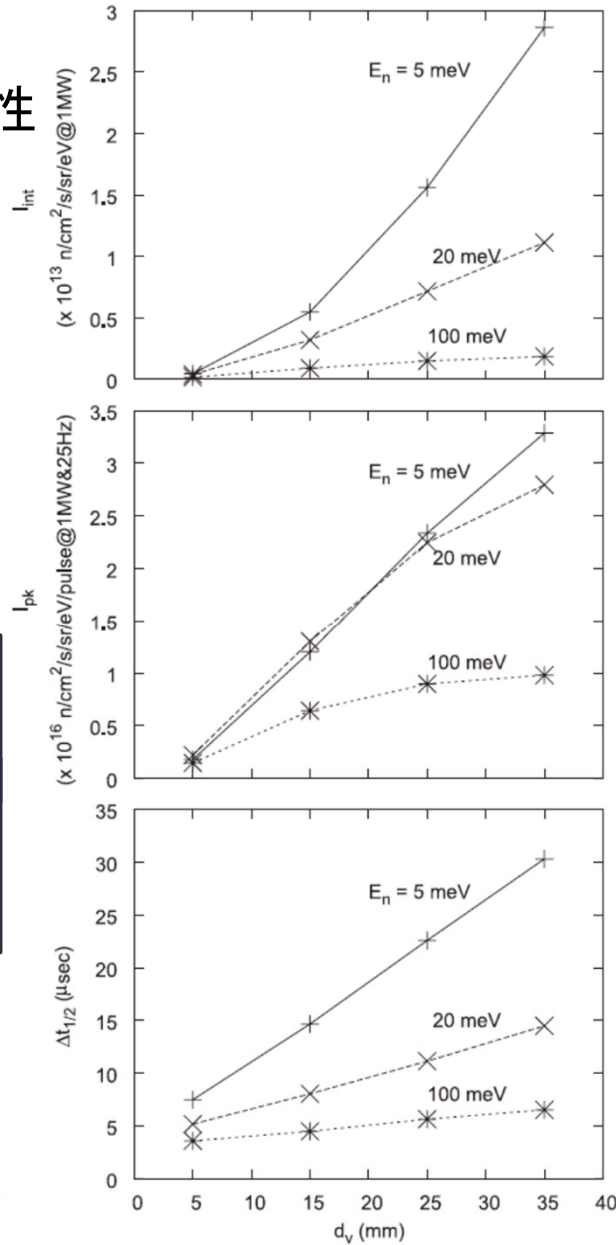
中性子強度の  
減速材サイズ依存性



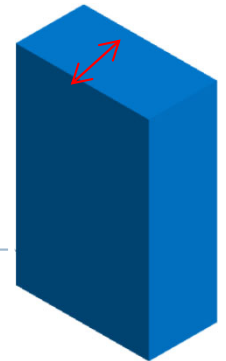
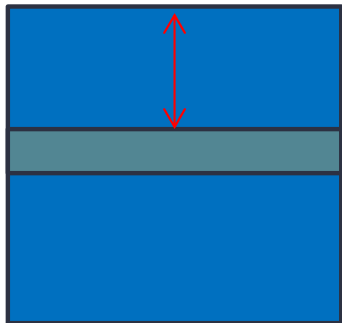
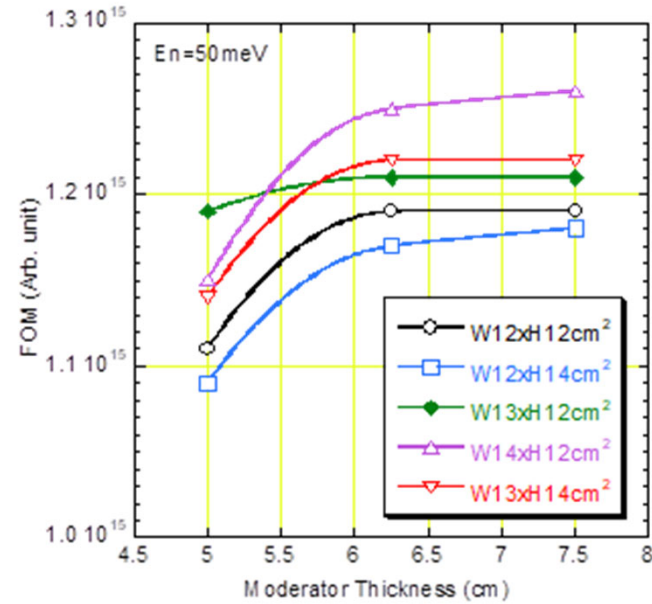


# 最適化(2)

ポイズン位置の  
中性子特性依存性

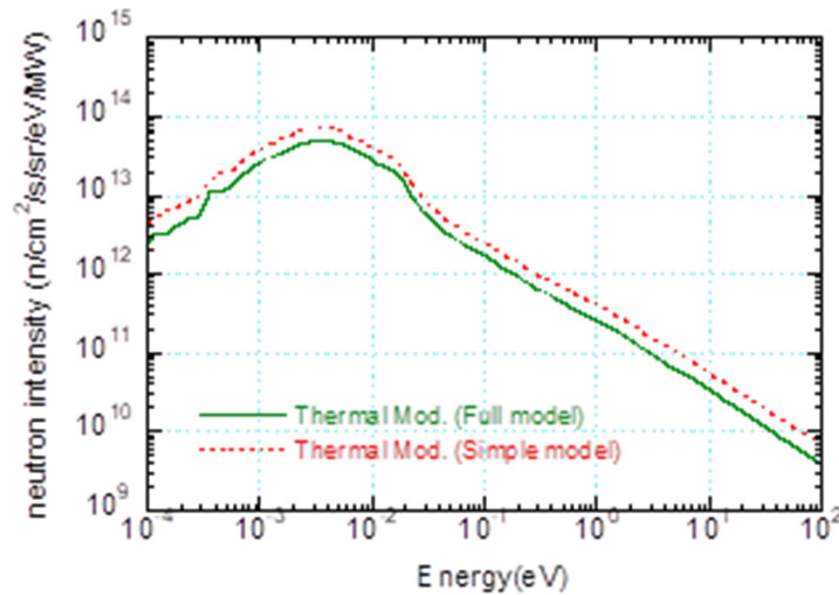


中性子強度の  
モデレータ厚さ依存性

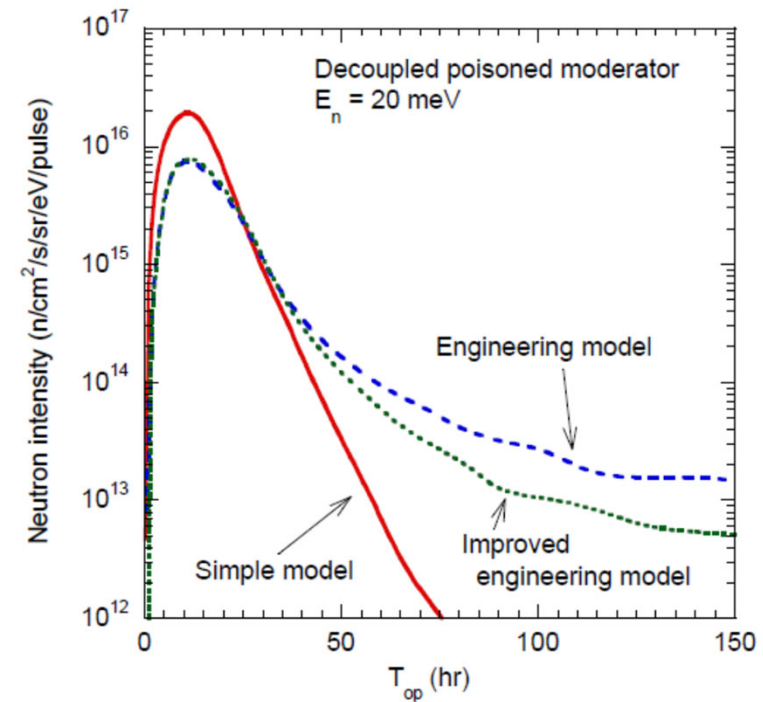


# 最適化（簡素化モデルと詳細モデルの違い）

## エネルギースペクトル



## パルス形状



# まとめ

---

- ▶ 物質科学研究や生命科学研究で有効なプローブである中性子を使用する中性子施設は、小型化されているX線装置や大強度・高輝度化が期待できる放射光施設と比べ、追いつけない部分がある。それでも、強力なツールとなるように中性子生成に関する技術開発が進められている。国内外の施設では、新規の核破砕中性子源の計画や建設が進められている。また、国内で新たな研究炉の設置計画が立ち上がっている。これらが中性子科学の未来を作っていくものである。
- 
- 