

# パルス中性子源を用いた 高密度超冷中性子発生法

東京大学 ICEPP  
特任助教  
三島賢二

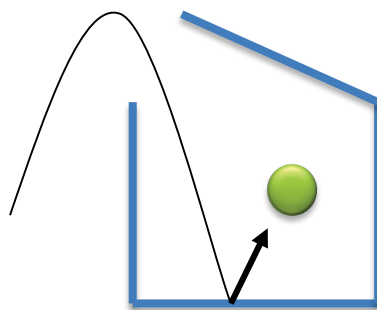
# 超冷中性子(Ultra Cold Neutron)とは

速度  $v \leq 6.9\text{m/s}$ 以下(252neV)の中性子

## UCNの特徴

- ニッケル等の表面で全反射
- 5T程度の磁場で100%スピン偏極
- 重力に対し敏感:位置エネルギー1cm $\sim$ 1neV

$v < 6.9\text{m}$ (252neV)



さまざまな基礎物理実験に利用されているが、  
より高密度のUCN源が必要とされている。

# Contents

- 中性子冷却 概論
  - UCN源について
- Pulse Linacを利用したUCN源
  - Rebuncher
- さらに高密度なUCNを生成する方法
  - UCN Juggling法

# UCNの生成：中性子冷却一般論

# 中性子(UCN源)の本質的な強度とは**位相空間体積密度**のこと。

- 位相空間とは空間座標 $x, y, z$ と運動量座標 $p_x, p_y, p_z$ で定義される6次元空間のこと。  
非相対論的なら $p_x$ は $v_x$ でも意味は一緒。
- この位相空間内の密度は**保存力**場では変化しないのでUCN(中性子ビーム)の本質的な強度となる。

# UCN密度を増やすには

リウビルの定理 (Liouville's theorem) の制限

- 保存力:  $V(\mathbf{r})$ ポテンシャルでは位相空間密度は増えたり減ったりしない。位相空間密度を変えるには  $V(\mathbf{v})$  のような相互作用が必要。
- UCNは速度が  $v_c$  以下という条件があるので  
位相空間密度一定 = 空間密度一定
- 中性子フラックスはモデレーター表面を超えない。

# リウビルの定理 (Liouville's theorem) とは

ハミルトン力学におけるリウヴィルの定理 (Liouville's theorem) とは、確率分布がどのように時間発展するかを予言する定理であり、フランスのジョゼフ・リウヴィルによって発見された。典型的に、 $\tau$ が位置と運動量の座標を表すとして、 $\rho$ は系が相空間の微小体積 $d\tau$ 中に見つかる確率である。 $\tau$ はN個の粒子の系において、変数の組を表すのに便利な簡潔的表現である。リウヴィルの定理によると、ハミルトニアン  $H$  と分布関数  $\rho$  を持つ系で

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho = -\{ \rho, H \}$$

が成り立つ。ここで中括弧はポアソン括弧を表す。

この定理の結果で興味深いのは、時間発展に対して相空間中の体積が保存するということである。もし系が相空間で、ある体積を持って始まると分かっているとき、時間が経った後でも系は同じ体積を持つ部分空間にある。

リウヴィルの定理は、統計力学の基礎としても重要である。粒子の衝突など、正準方程式に従わない場合はリウヴィルの定理はそのままでは成り立たず、これを記述するのがボルツマン方程式である。

# 位相空間密度：変える vs 変えない

すべての粒子に同様に作用する保存場か否か。

## 変える

- 原子核との散乱
  - 減速材
- レーザー冷却
- 電子冷却
- Bragg peakでの減速  
(荷電粒子)

## 変えない

- 反射
  - ミラー
- レンズ
- 重力
- Doppler Shifter
- Bragg反射  
(ただし厳密に言うと厚さの分だけ変化してる。)

他との物質の位相空間を変えない限り  
位相空間密度は変化しない。



孤立系での  
エントロピーは一定



# Physics target is Neutron EDM

We need more and more density in EDM cell.

- For statistic
- Smaller cell size and slower UCN velocity can reduce the systematic error.

とにかく高(位相空間)密度のUCNが欲しい！！

J-PARC Pulse beamを使ったUCN生成方法について説明する。

# UCN密度を増やすには

保存場(ポテンシャル)では位相空間密度は増えないので、モデレーター以前で増やす必要がある。

1. 中性子の数を増やす。
2. 温度を下げる。(UCN converter)

温度が十分に低い場合、平衡状態に達するまでに時間がかかる。

その場合のUCN密度は

$$\rho \text{ [UCN/cm}^3\text{]} = P \text{ [UCN/cm}^3\text{/sec]} \times \tau \text{ [sec]}$$

となる。

$\rho$  : UCN density [UCN/cm<sup>3</sup>]

P: Production rate [UCN/cm<sup>3</sup>/sec]

$\tau$  : Storage time [sec]

# 十分な冷却を達成するには

- 長時間の冷却

## 吸収断面積の小さい物質を選択する

	熱中性子 捕獲断面積	単体中での 寿命
• He	0 barn	886 sec
• D	0.52 mbarn	150 msec
• O	0.19 mbarn	440 msec
• C	3.5 mbarn	11 msec
• F	9.6 mbarn	8.8 msec

## 中性子漏洩を減らす

反射材を用いる

特に低エネルギーで有効なものを

- 高効率の減速

反応断面積が大きい

低エネルギー領域に大きな非弾性散乱がある

# Superthermal Converters

Converter Material	Superfluid $^4\text{He}$	Solid ortho- $\text{D}_2$	$\alpha\text{-}^{16}\text{O}_2$
Interaction	Phonon	Phonon	Phonon, Magnon
Temperature of material	0.7 K	5 K	2 K
Optimal neutron temperature	9 K	29 K	12 K
Production rate with 30 K neutrons	$9.3 \times 10^{-10} \Phi_0 / \text{cm}^3 / \text{s}$ <sup>1)</sup>	$1.0 \times 10^{-8} \Phi_0 / \text{cm}^3 / \text{s}$ <sup>2)</sup>	$2.4 \times 10^{-9} \Phi_0 / \text{cm}^3 / \text{s}$ <sup>3)</sup>
Ideal storage time	<b>886 sec</b>	146 msec <sup>4)</sup>	489 msec
UCN density with 30 K neutrons	$8.2 \times 10^{-7} \Phi_0 / \text{cm}^3$	$2.4 \times 10^{-9} \Phi_0 / \text{cm}^3$	$1.2 \times 10^{-9} \Phi_0 / \text{cm}^3$

UCN is defined as  $E_{\text{UCN}} < 252 \text{ neV}$  in moderator.

1) R.Golub, D.J.Richardson, and S.K.Lamoreaux, "Ultra cold neutron", Adam Hilger, Bristol (1991)

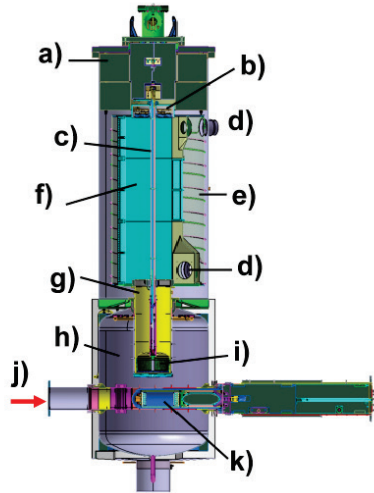
2) Z. Ch. Yu, et al., Z. Phys. B 62 (1985) 137

3) Gutmiedl et al., <http://arxiv.org/abs/0911.4398v2>

4) C.-Y.Liu, A.R.Young, and S.K.Lamoreaux, Phys.Rev.B62, 3581 (2000)

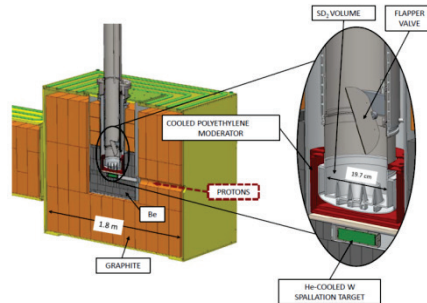
# UCN sources in the world

PSI solid D<sub>2</sub>



- 1.2 MW Proton Cyclotron
- 590 MeV – 2mA
- 6 sec beam pulse / 800 sec for storage
- 30 liter of solid D<sub>2</sub>
- D<sub>2</sub>O moderator
- Pb target

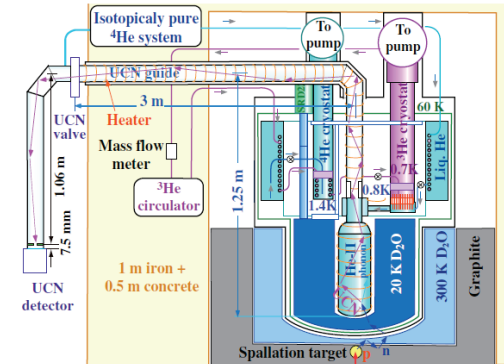
LANL solid D<sub>2</sub>



- 100 kW Proton Linac (20Hz)
- 800 MeV – 10mA × 625μs
- 5 shots in 5 sec for storage
- 2 liter of solid D<sub>2</sub>
- 150K-CH<sub>2</sub> moderator
- W target

UCN density was measured as  $85 \pm 10$  UCN/cm<sup>3</sup>/μC, and agree with calculated value of  $107 \pm 20$  UCN/cm<sup>3</sup>/μC

RCNP He-II

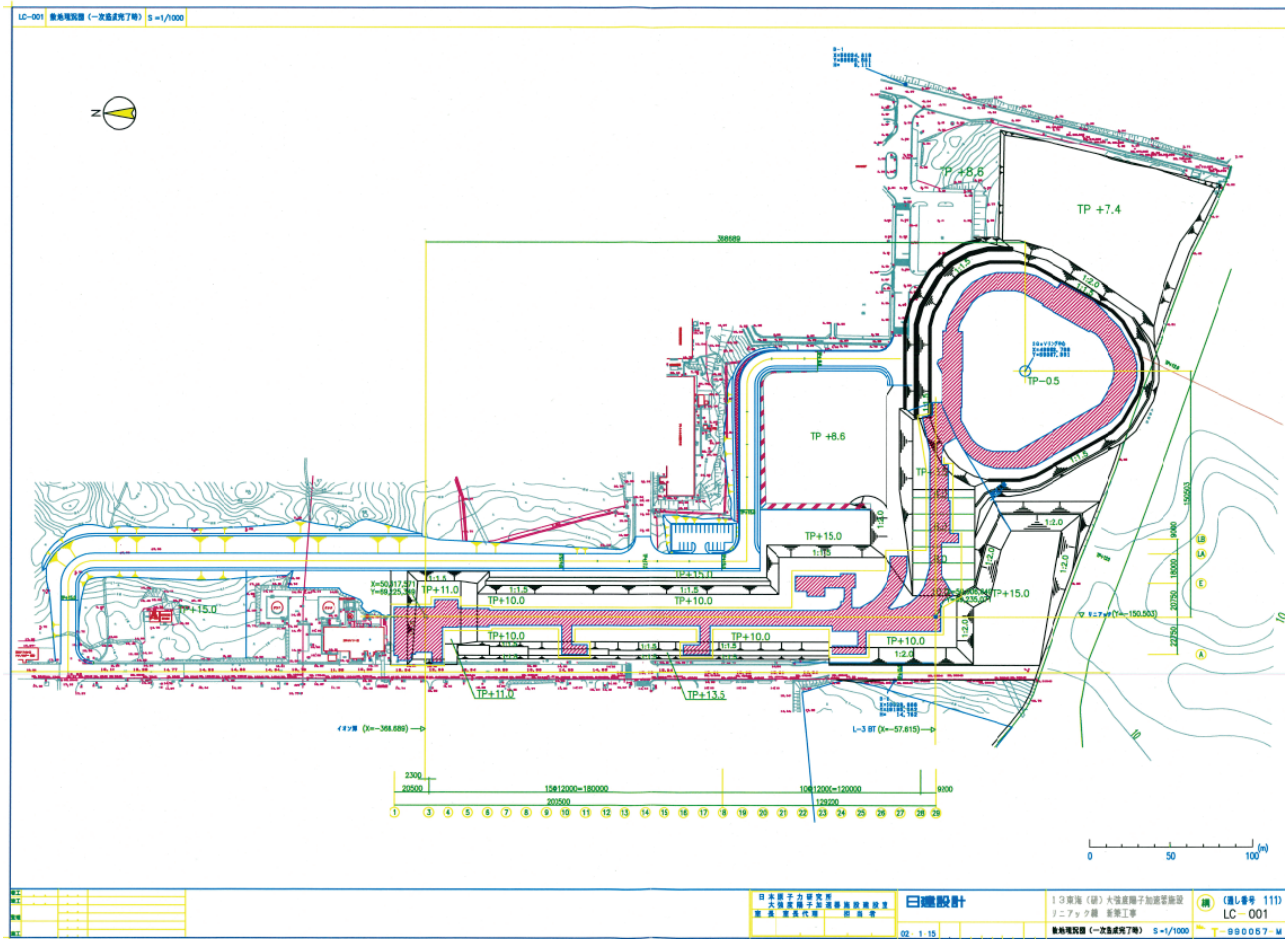


- 400 W Proton Cyclotron
- 400 MeV – 1μA
- 10 liter of He-II
- 20K-D<sub>2</sub>O moderator
- Pb target

UCN density was measured as  $15$  UCN/cm<sup>3</sup>

# PULSE LINACを利用したUCN源

# J-PARC Linac for spallation source



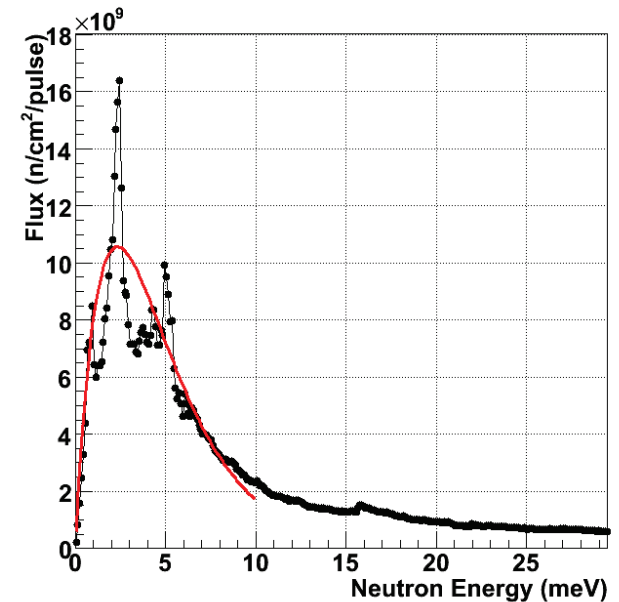
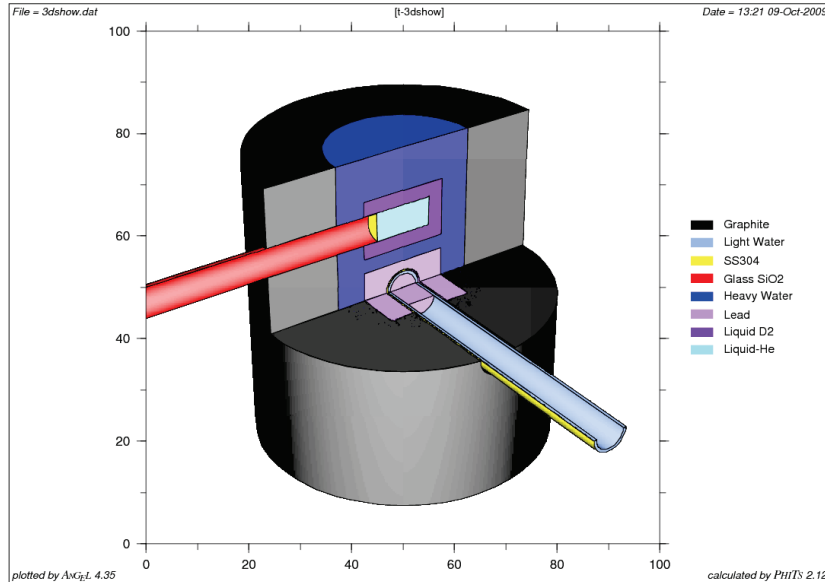
# Specification of J-PARC Linac

Proton Energy	400MeV(at 2013?)
Pulse width	0.5 ms
Repitition	25 Hz
Peak Proton Current	50 mA
Average Current	0.625 mA
Peak Power	20 MW ← 注目！！
Average Power	250 kW

パルス性能をうまく使えないか？



# UCN生成の計算



$$\Phi_{\text{boltzmann}} = 6.2 \times 10^{11} \text{ n/cm}^2/\text{pulse} \text{ (10kJ)}$$

Production Rateを  $1.0 \times 10^{-8} \Phi_{\text{boltzmann}}$  とすると

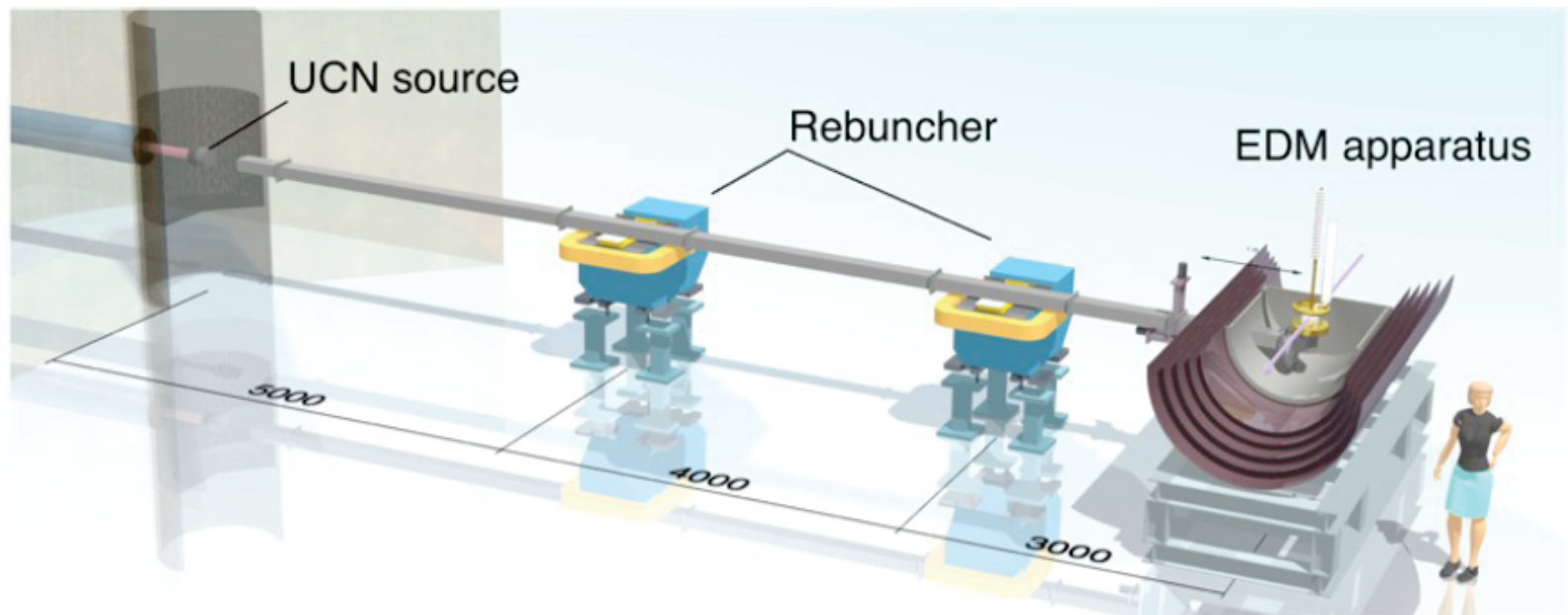
$$\rho_{\text{UCN}} = 6200 \text{ UCN/cm}^3/\text{pulse}$$

# nEDM at J-PARC

J-PARC 線形加速器の陽子ビームを  
専用ターゲットに直接入射、  
超冷中性子に変換し  
光学系を駆使して  
蓄積容器に高密度で  
超冷中性子を輸送する

## J-PARC UCN

J-PARC PAC に  
プロポーザルを提出(P33)



# nEDM at J-PARC

## Neutron Rebuncher

パルス状に発生するが、輸送の間に広がってしまう



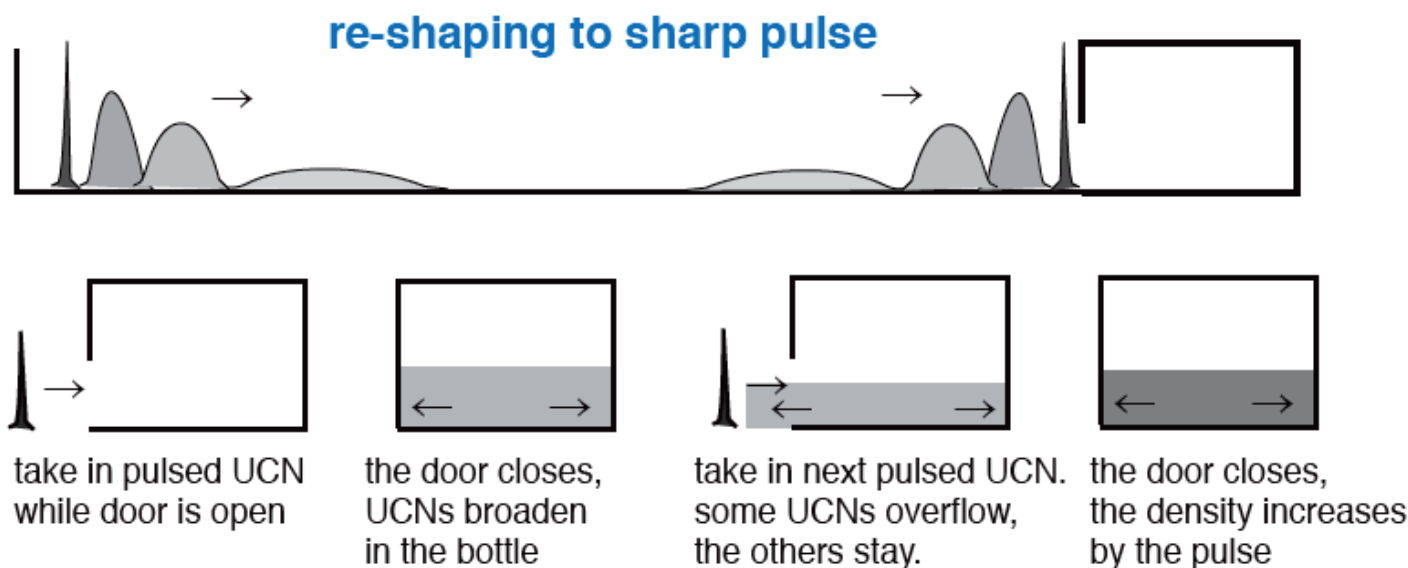
Peak proton power = **20MW**

Average proton power = **250kW**

# nEDM at J-PARC

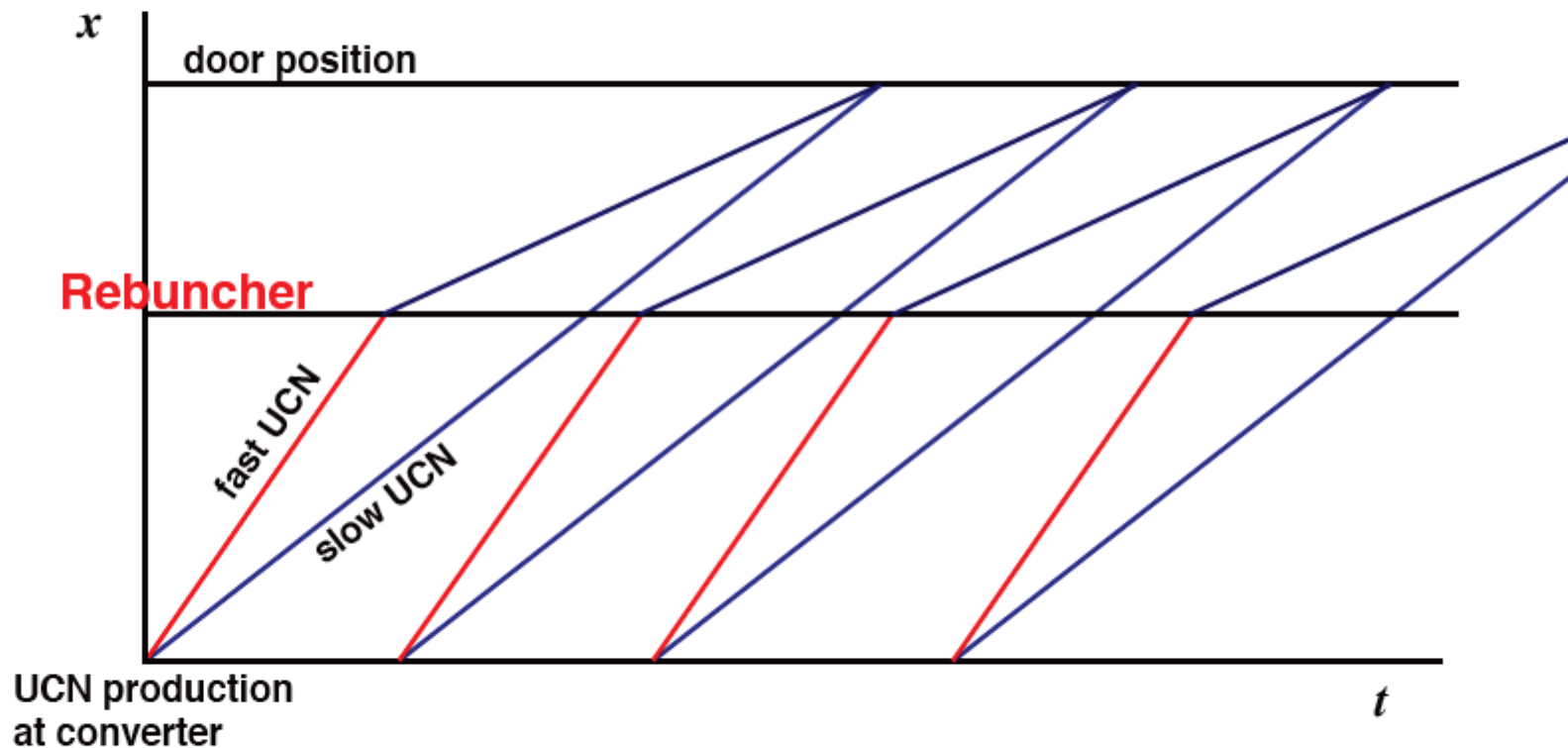
## Neutron Rebuncher

パルス状に発生するが、輸送の間に広がってしまう  
蓄積容器入り口で集束させる



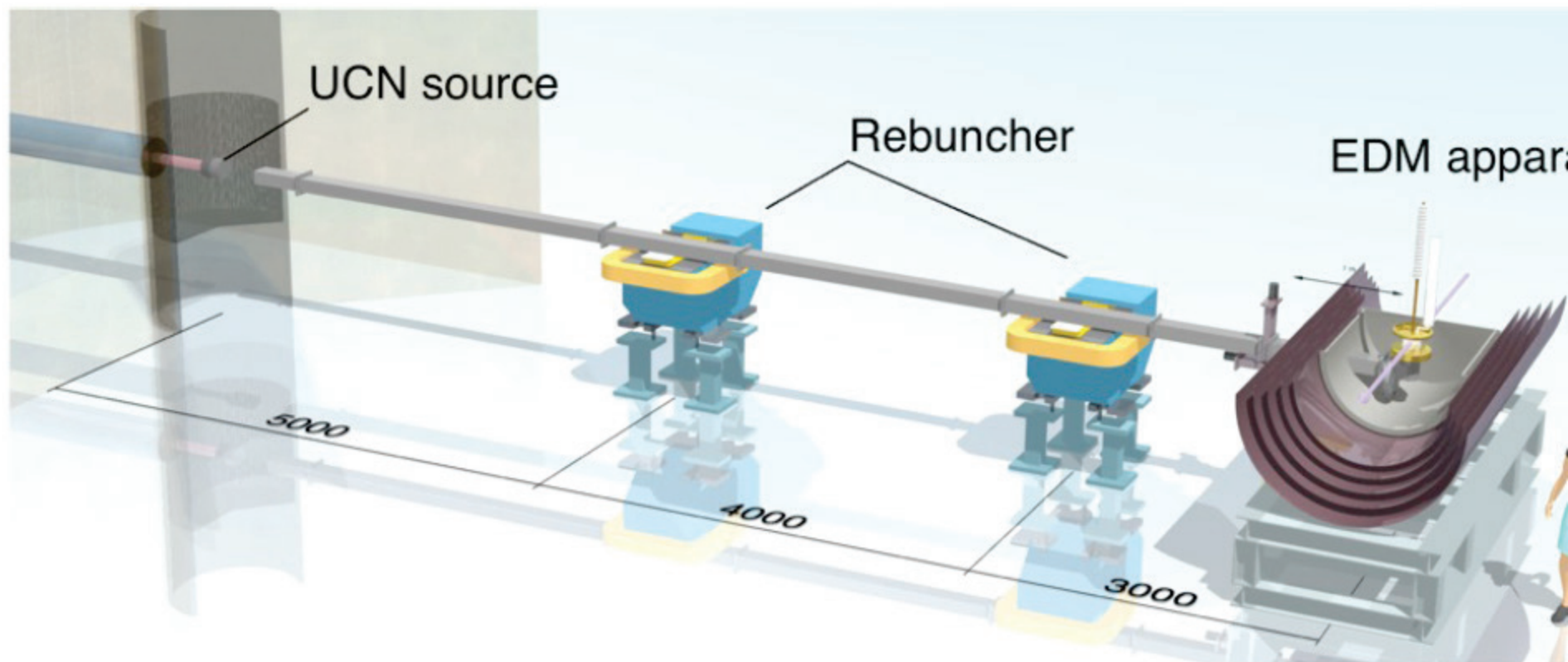
# nEDM at J-PARC

## Neutron Rebuncher



# nEDM at J-PARC

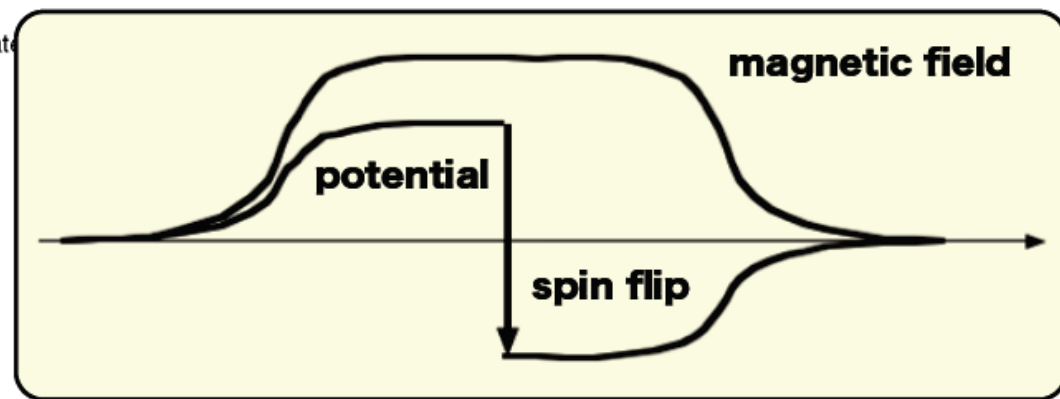
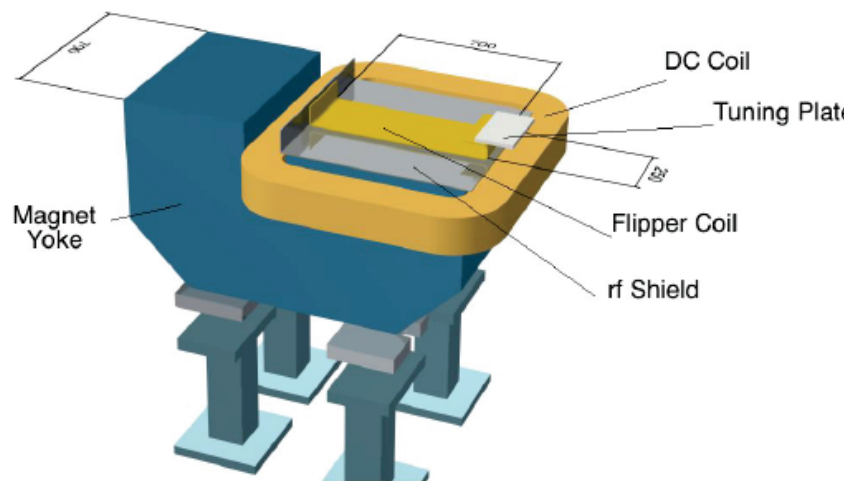
## Neutron Rebuncher



# nEDM at J-PARC

## Neutron Rebuncher

RF磁場を使ったスピントリップで  
中性子を加速減速する

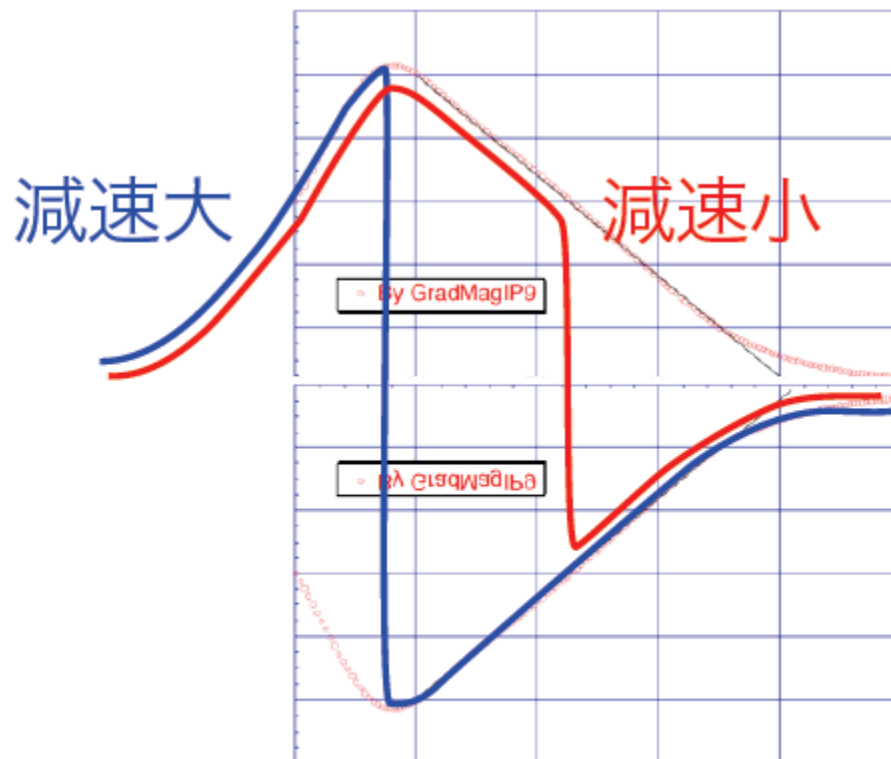


AFP flipper による減速

# nEDM at J-PARC

## Neutron Rebuncher

RF磁場を使ったスピントリップで  
中性子を加減速する



速い中性子は先にrebuncherに到達

減速量大 = 高周波

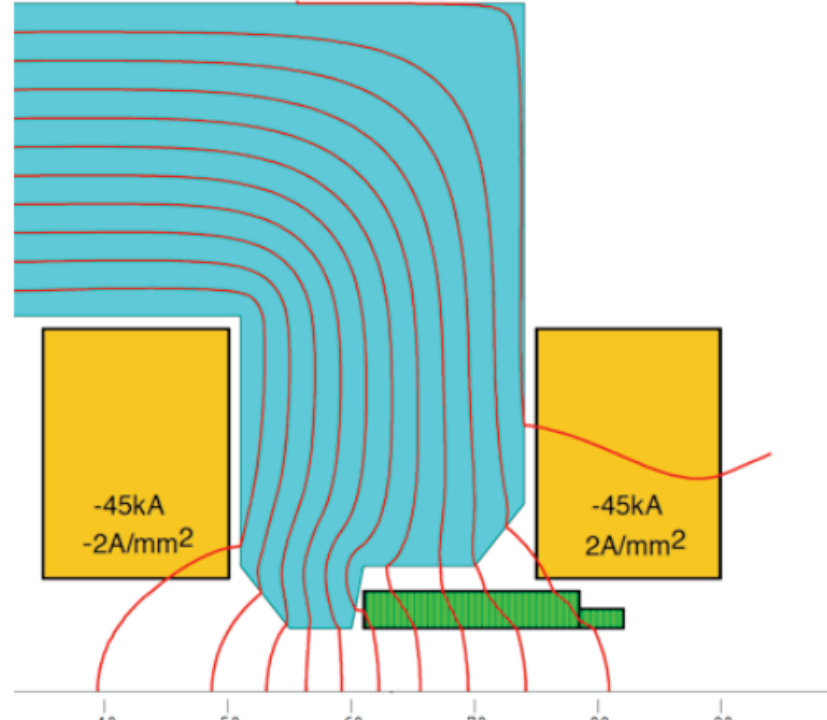
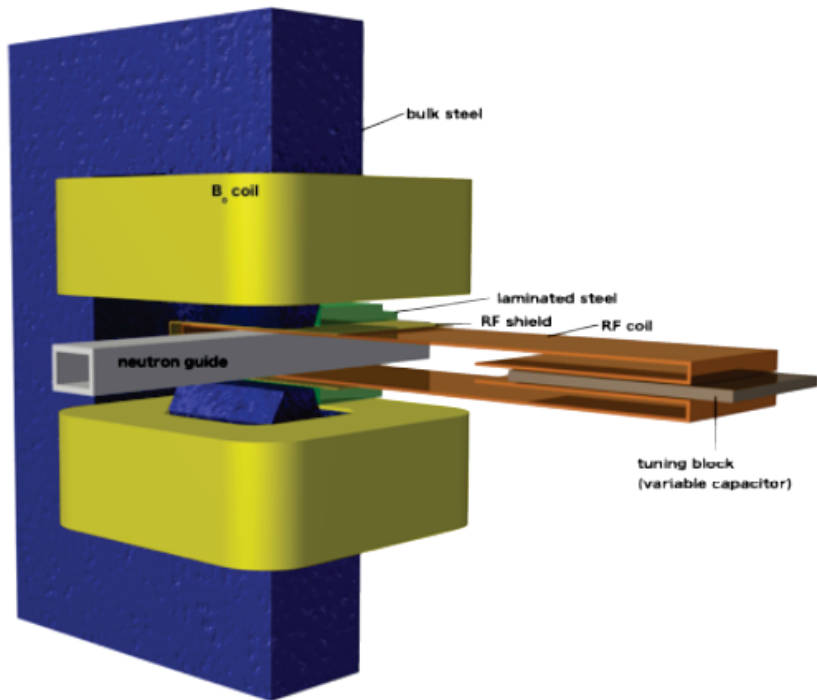
遅い中性子は遅れてrebuncherに到達

減速量小 = 低周波

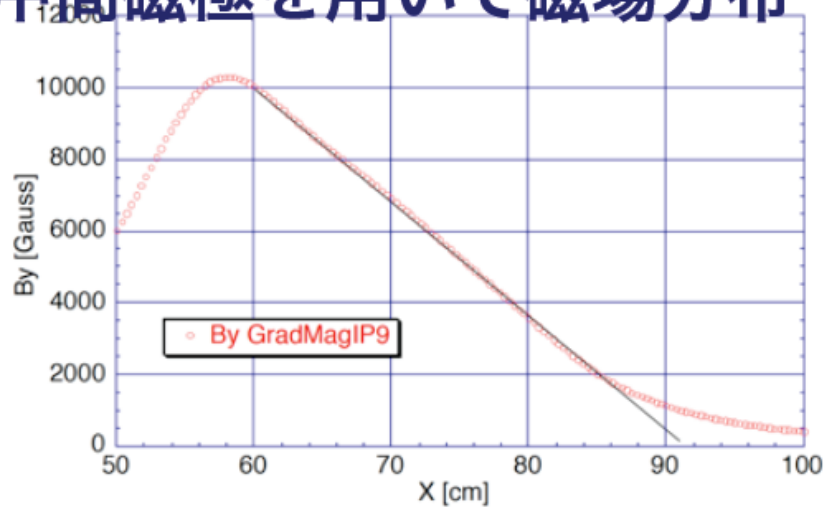
時間に応じて  
周波数を変化させる



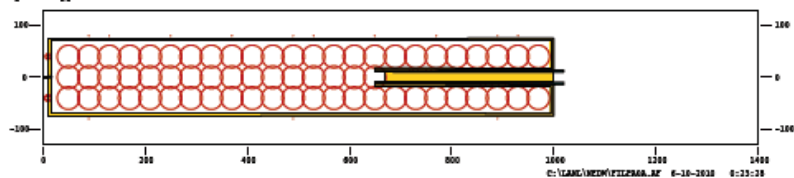
# 幅広い周波数に対応したRF



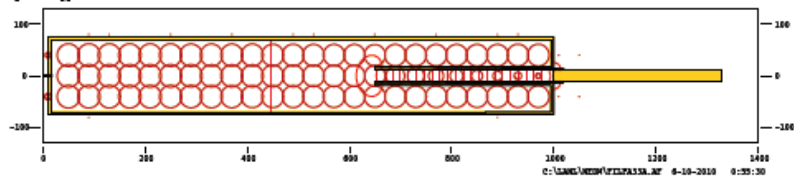
## 中間磁極を用いて磁場分布



Spin Flipper for nEDM F = 6.0787436 MHz



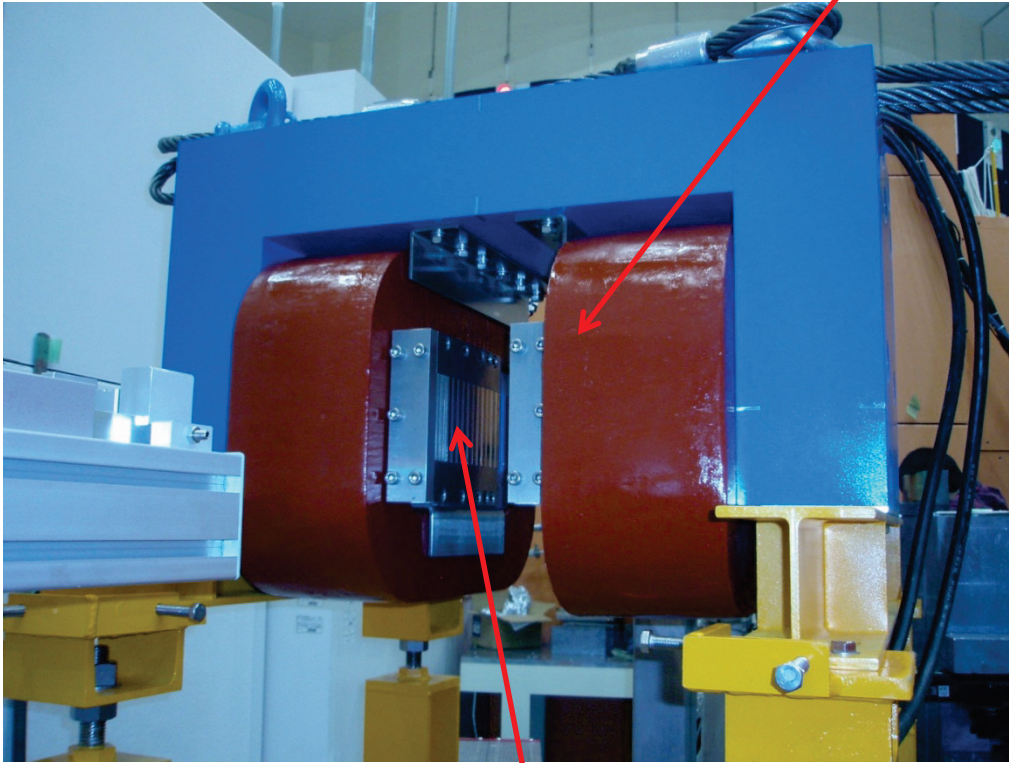
Spin Flipper for nEDM F = 28.222264 MHz



# Rebuncher Devices

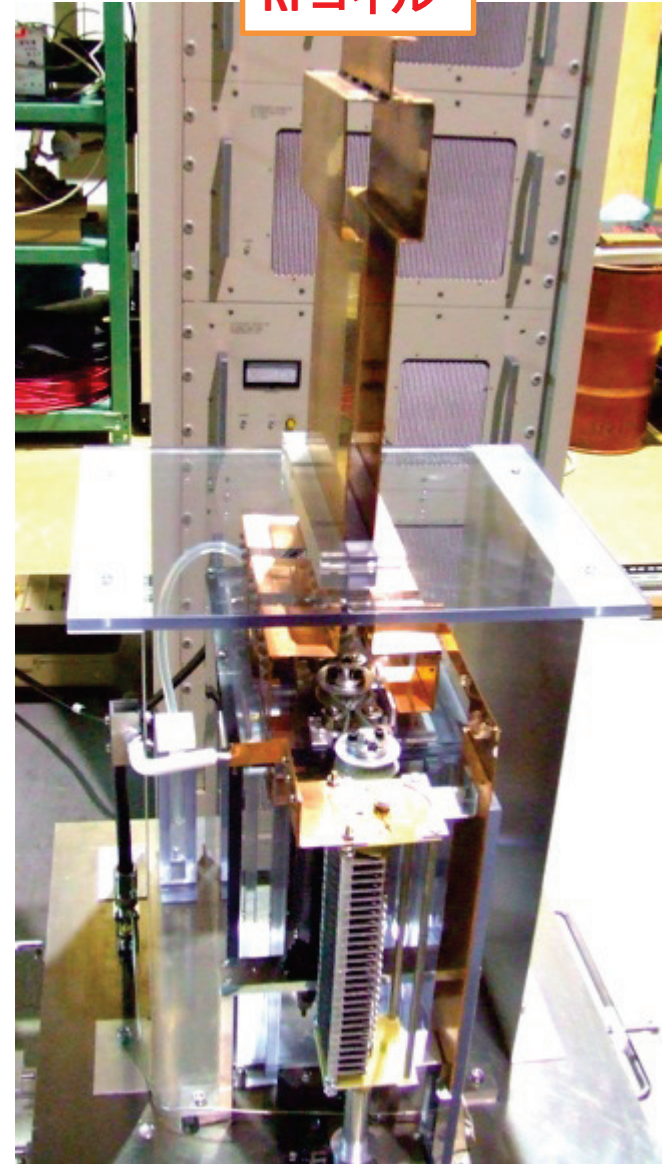
勾配磁場

電磁石 (1 Tesla)



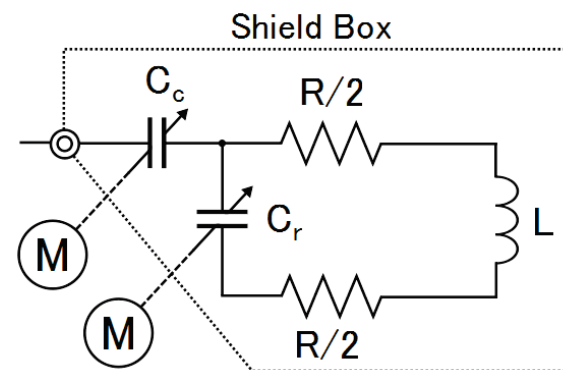
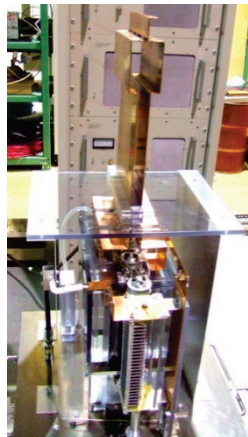
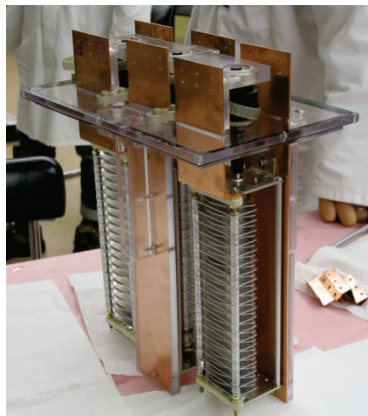
中間磁極

RFコイル

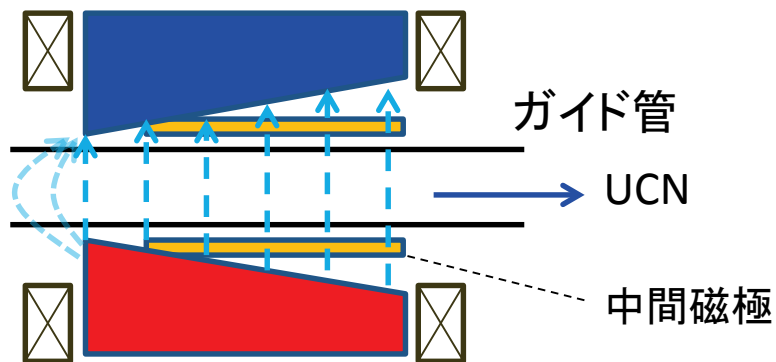


# スピン反転用 RF 磁場発生器, 異方性中間磁極

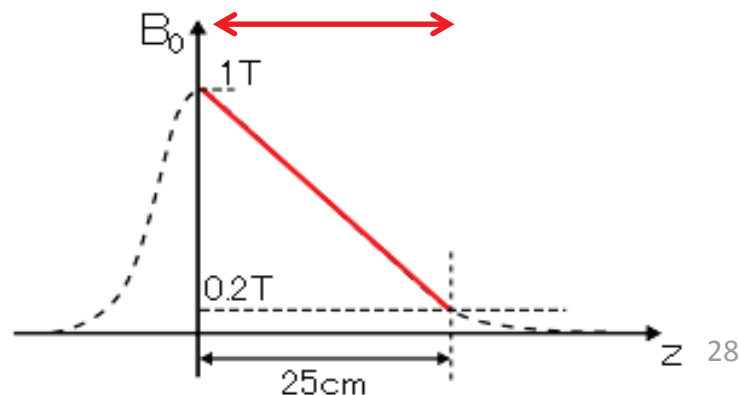
投入パワーの損失を最小にするため、スピン反転用 RF 磁場発生器には LC 共振回路を使用した。可変コンデンサをパルスモーターで制御し、投入パワーの周波数と共振周波数を一致させる。



中性子加速を有効に行うために、外場の作成にはビームの進行方向の磁場勾配がなだらかな直線を描くような電磁石 (異方性中間磁極) を使用した。



この区間で加減速を行う。

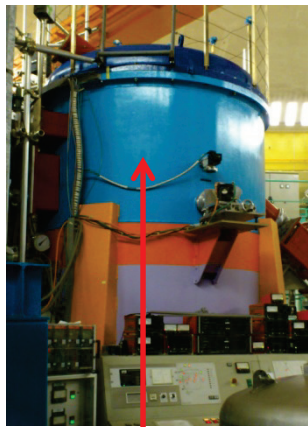




# ILL実験・セットアップ

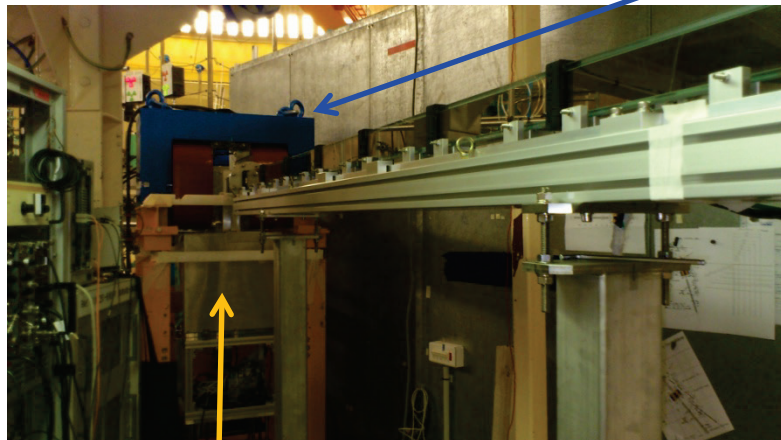
2011年 9月～11月にかけてフランスの ILL でリバンチャーの原理実証実験を行った。

UCNタービン



UCN を連続的に生成する。

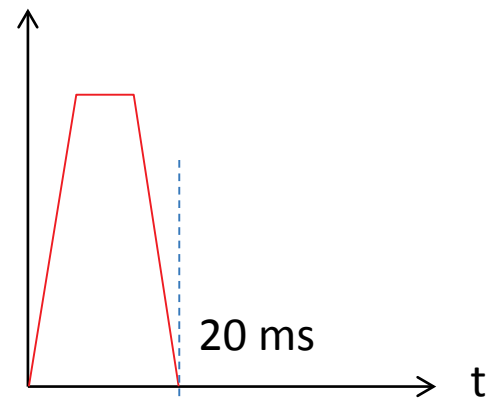
セットアップの写真



電磁石 (1 Tesla)

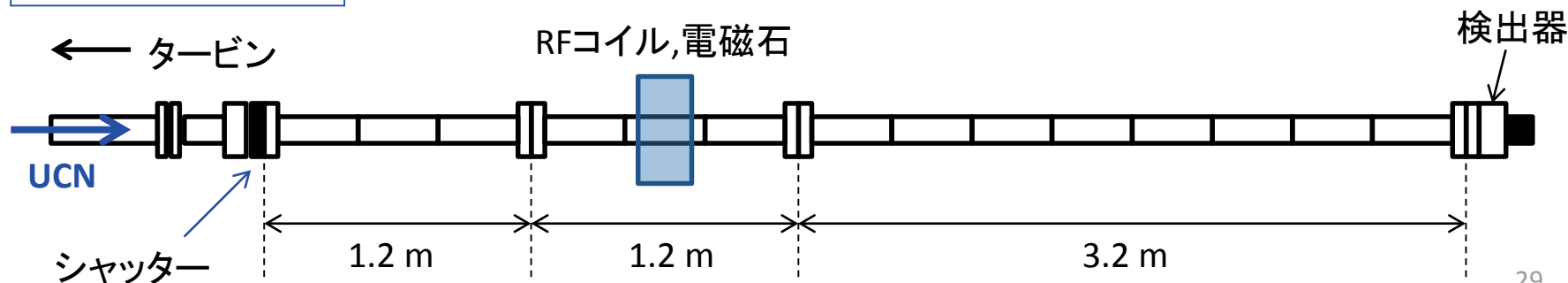
スピン反転用 RF 磁場発生器(10 Gauss)

シャッター挙動



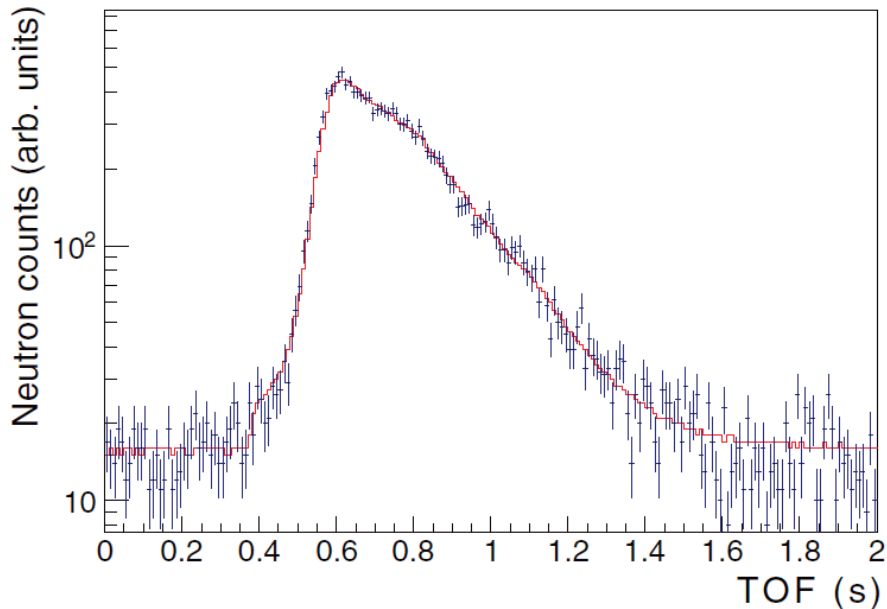
UCN をパルス化する。

セットアップ概略図

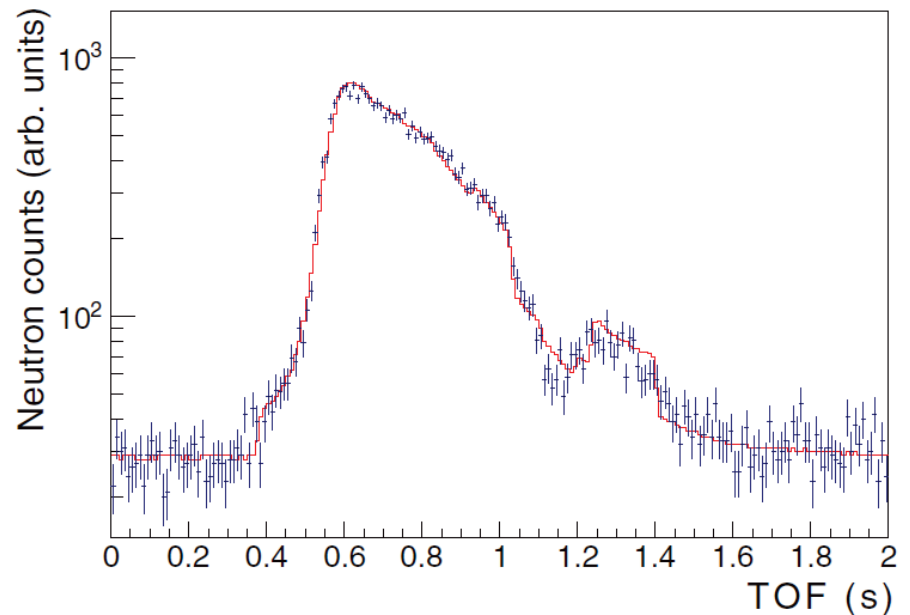


# 実験結果

測定結果とシミュレーションとの比較。赤線がシミュレーション。



RF ON



RF OFF

測定結果はスピン反転率を  $0.5$  とおいた場合のシミュレーション結果とよく一致している。設計では期待されるスピン反転率はほぼ  $1$  であり、設計の半分程度の性能となった。

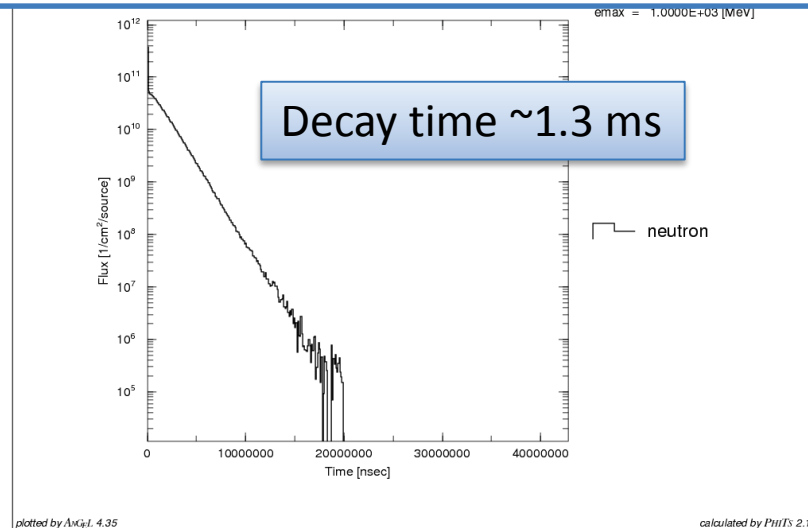
Phys. Rev. A 86, 023843 (2012).

# さらに高密度なUCNを生成する方法 UCN JUGGLING法

# Production of UCN by a Pulse

J-PARC Linacの1パルスを受けた場合、Converterで  
 $\rho_{\text{UCN}} = 6200 \text{ UCN/cm}^3/\text{pulse}$  の密度となる。

Time structure of Cold neutron flux in D<sub>2</sub> converter



Cold Neutronの発生時間はたった**1.3ms**しかない。

$$\text{Maximum UCN density} = P \times \tau$$

蓄積時間 $\tau$ の最大は**140 ms** (4K-D<sub>2</sub>) なので

原理的にはあと100倍増やすことが可能。

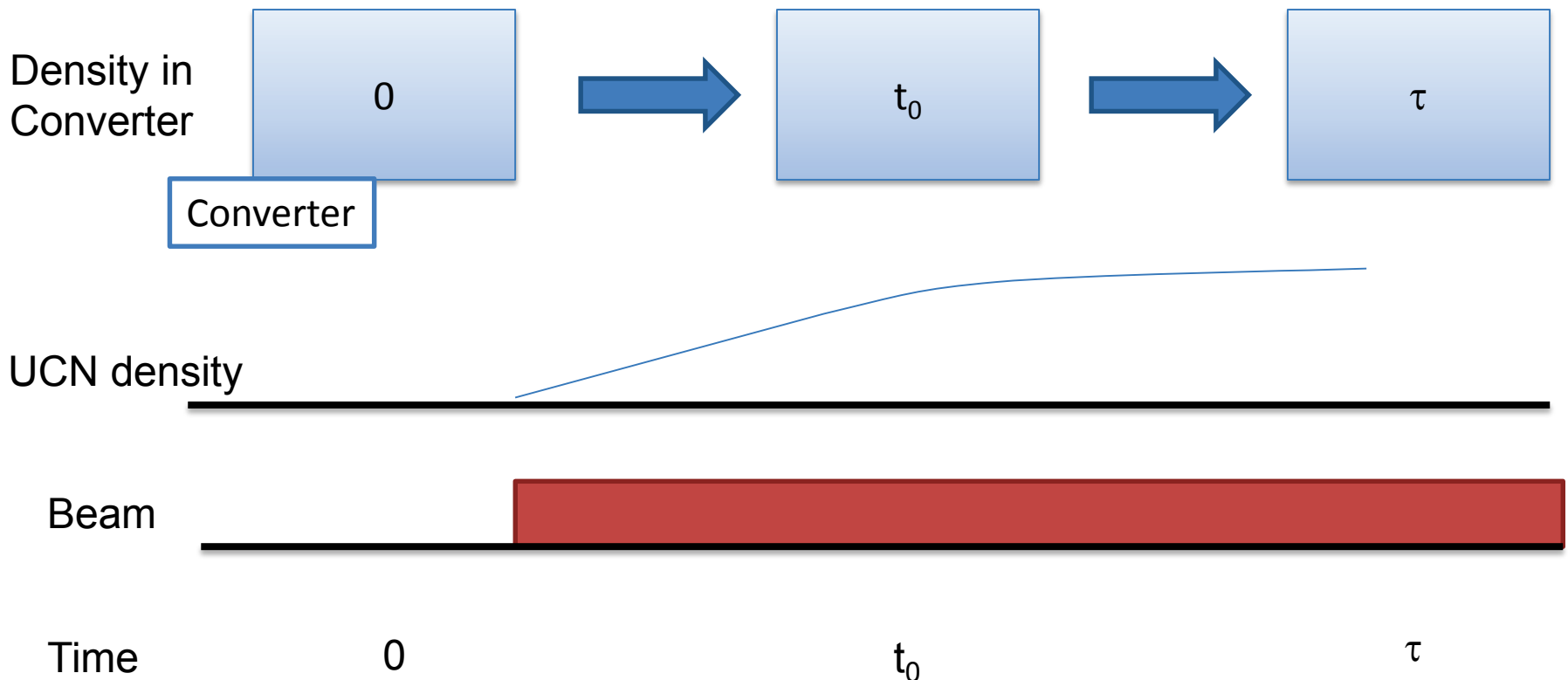
それを実現するUCN Jugglerについて説明する。

# UCN production and storage

## DC beam: Converterのみ

UCN密度の模式図を示す。  
UCN密度 $\rho = P \times t$ である。  
Production Rate  $P$ は簡単のため  
1とする。

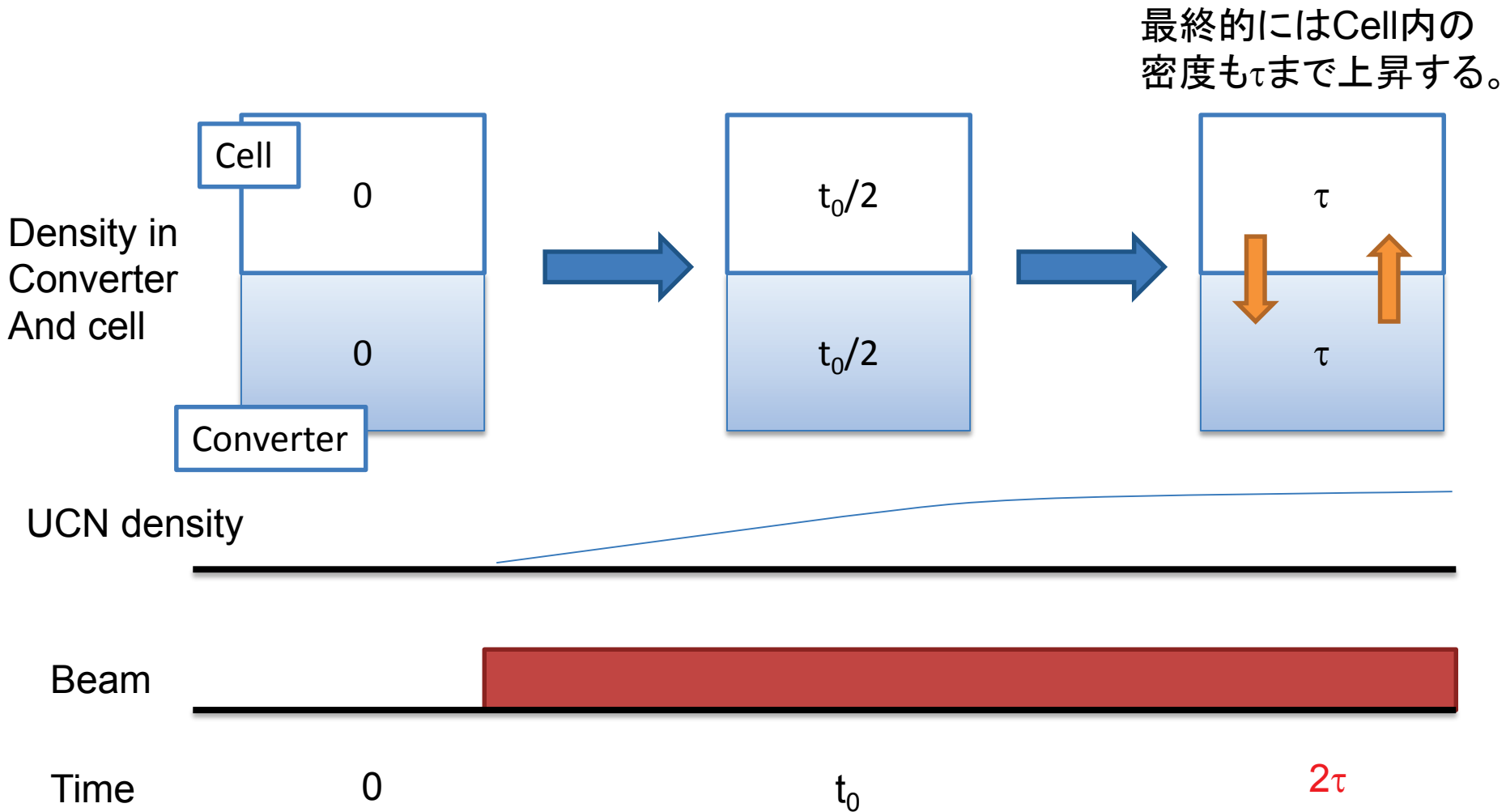
最終的にConverter内の  
寿命 $P\tau$ に到達する。





# UCN production and storage

## DC beam: Converterとcell



Achievable UCN density is independent for cell volume.

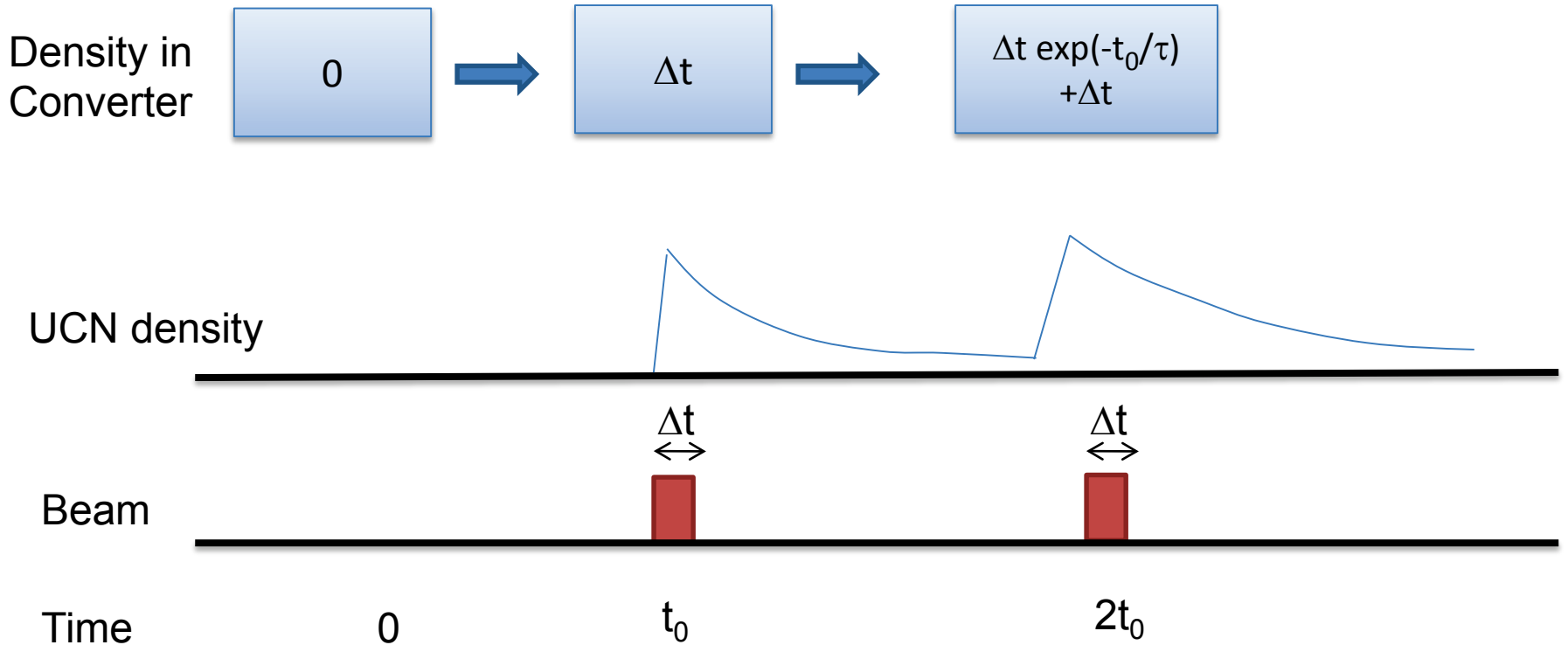
# UCN production and storage

For  $D_2$  converter Pulse beam: Converterのみ

$\tau \sim 146$  ms

$t_0 \sim 40$  ms to 500ms

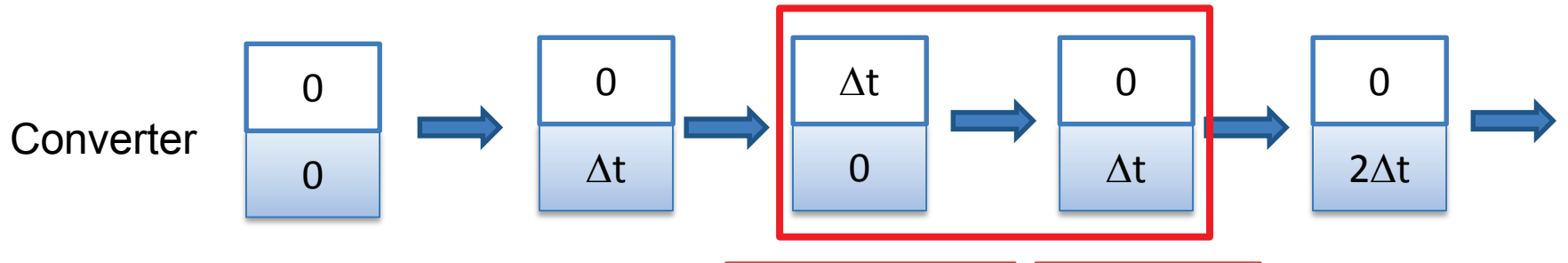
$\Delta t \sim 0.5$  ms



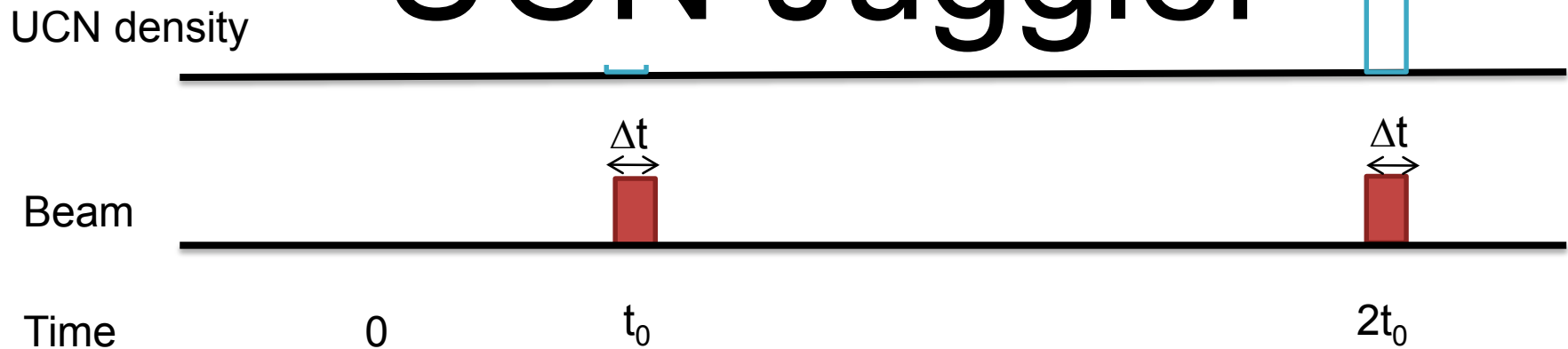
UCN density never achieve to  $\tau$

# How to Achieve to $\tau$ limit

Loss in the converter is critical.  
UCN have to out of the converter until next pulse.

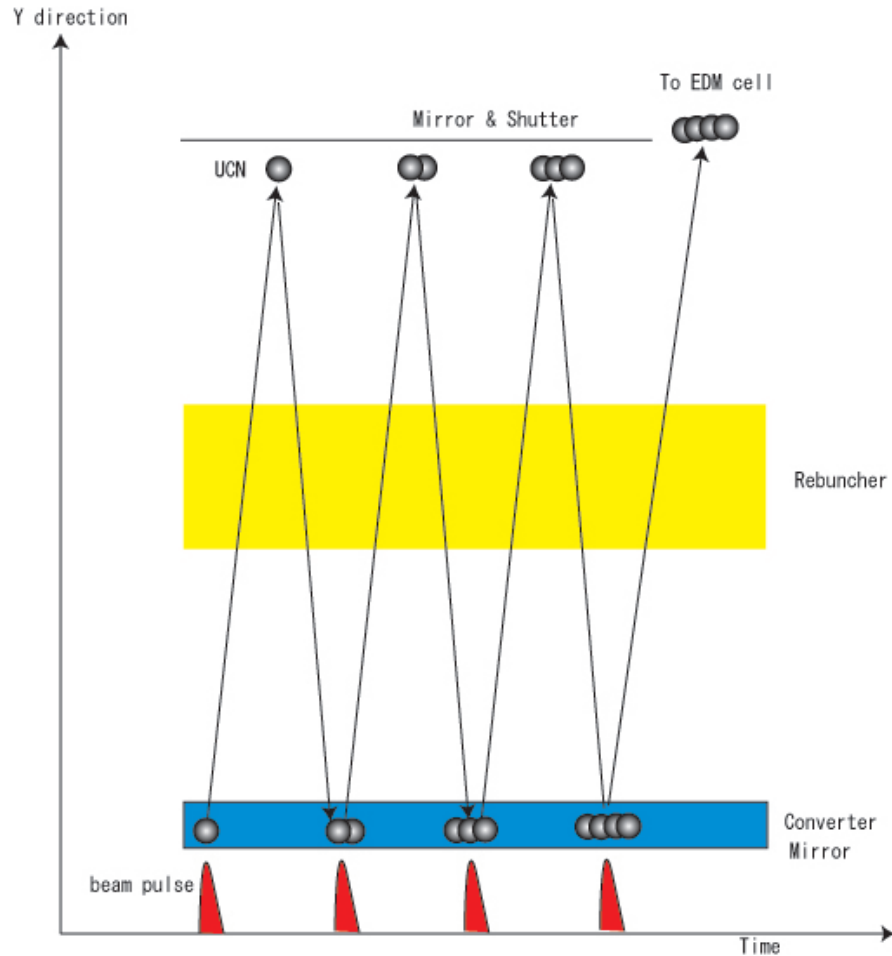


## UCN Juggler



Finally UCN density achieve to  $P \times \tau$  !!

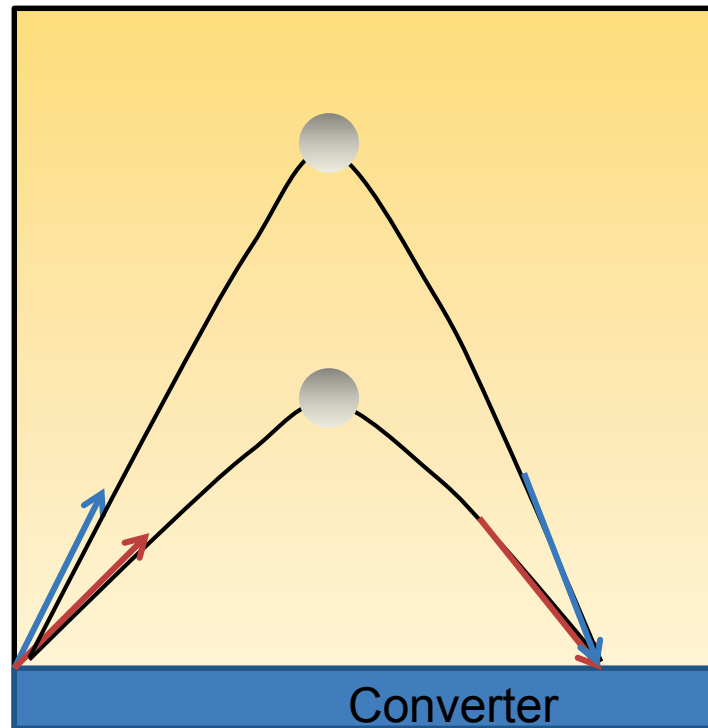
# Possible scheme of UCN Juggler



- 1) Rebuncher をミラーにフォーカスする。
- 2) ミラーで反射したUCNを、再び Rebuncherでターゲットに戻す。
- 3) 戻るタイミングに合わせて陽子ビームを照射。その時発生するUCNと戻ってきたUCNの位相空間は**同じ位相空間に入る。**
- 1)~3) 繰り返し
- 4) ミラーを開けてUCNを取り出す。

# Another Solution

Sextupole like magnetic field returns neutron on a same time.



$$\frac{\partial B}{\partial x} \propto x$$

1T for 60neV

Neutron is focused onto  
Initial position independently  
divergence velocity.

# Ideal Maximum of UCN density (for sD<sub>2</sub>)

- By 400MeV-50mA-0.5ms (10kW) pulse,  
 $\rho_{\text{UCN}} = 6200 \text{ UCN/cm}^3/\text{pulse}$ .
- Moderation time of cold neutron is 1.3 ms (FWHM).
- If UCN Juggler is ideally working, UCN density can achieve  
$$\rho_{\text{UCN}} = 6200 \text{ UCN/cm}^3 \times (146\text{ms}/1.3\text{ms}) \times 1/2$$
$$= 3.5 \times 10^5 \text{ UCN/cm}^3$$
- Note: Temperature increase is 0.15K for a pulse.

# Problem of UCN juggler

- Spin exchange is **critical** for magnetic juggler.  
ex. Incoherent scattering of  $D_2$ , depolarization etc.  
(Spinless nuclei,  $^4\text{He}$ ,  $^{16}\text{O}$ , or  $^{208}\text{Pb}$  can be the candidate)
- Loss of rebuncher must be less than 1%.
- Off-specular reflection of UCN mirrors are **critical** (99.3% for DLC coated float glass).
- Juggler can produce high density, but same UCN number (only smaller volume produced).

F.Atchison et al, Eur.Phys.J.A44(2010) 23

# Summary

- 中性子EDM実験のためのUCN源を検討中。
- 1pulse (50mA, 0.5ms)でConverter内densityで  $6200/\text{cm}^3$ に到達する計算。
- Rebuncherは原理実証済み。
- J-PARC LINAC (Peak Power **20MW**)を有効に使う方法として”UCN Juggler”を提案。
- 今後システムとしての蓋然性を検証していく予定。



# 参考文献

- [1] R.Golub, D.J.Richardson, and S.K.Lamoreaux, “Ultra cold neutron”, Adam Hilger, Bristol (1991)
- [2] Dissertation of Chen-Yu Liu, “A Superthermal Ultra-Cold Neutron Source”, Princeton University, (2002)
- [3] K. Tesch, Radiat.Protec.Dosim. 11 (1985)165
- [4] K.Mishima et al., Proceeding of ICANS 15th Meeting of the International Collaboration on Advanced (2000)
- [5] R.Golub et al., Z.Phys.B 51(1983) 187
- [6] Y.Masuda, 提案書(2007)
- [7] A.Serebrov et al., PNPI Preprint 2359(2000)
- [8] P.G.Harris et.al., Phys.Rev.Lett. 82, 904 (1999)
- [9] S.Arzumanov et.al., Phys.Lett. B483, 15 (2000)
- [10] V.V.Nesvizhevsky et.al., Nature 415, 297 (2002)
- 「11」 Dissertation of Kenji Mishima, “Irradiation effect of Ortho deuterium for UCN source”, Osaka University, (2004)