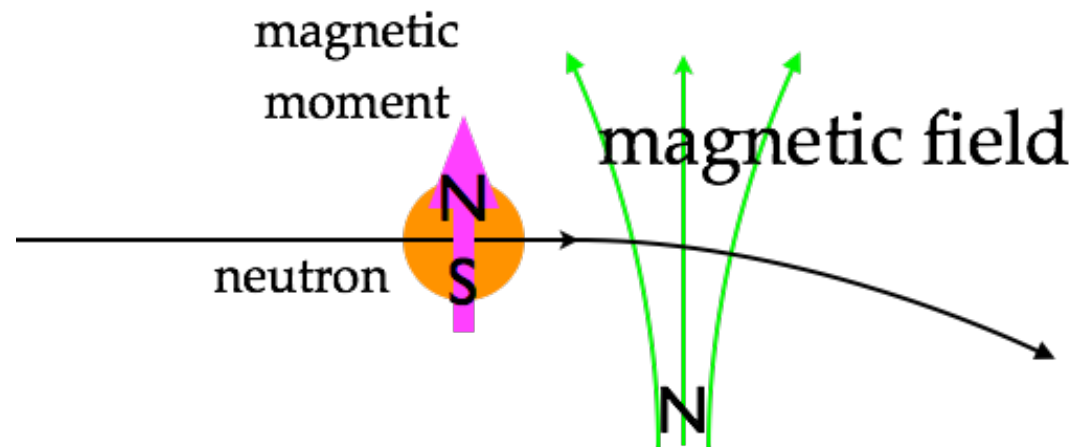


# 強度変調型永久六極磁石を用いた中性子 磁気レンズの開発及びその応用研究

*Development and application of a magnetic neutron lens  
with modulating permanent magnet sextupole*



山田雅子

京都大学化学研究所 粒子ビーム科学領域 (現 Paul Scherrer Institute)

# 研究概要

- ❖ 加速器の磁石技術を応用して、制御対象を中性子ビームにまで広げる。
- ❖ パルス中性子ビームの利用効率向上を目的として、広い波長域をもつワイドバンドパルスビーム集束用の強度変調型永久6極磁石レンズを開発し、これまでに達成されたことのない2倍の波長域 ( $\lambda_{\max}/\lambda_{\min} = 2$ ) の集束に成功。
- ❖ 単位面積あたりのビーム面密度が波長域積分で 43 倍向上。
- ❖ 製作及び実験での取扱が容易で普及可能なシステムを構築。
- ❖ 拡大中性子イメージング及び集光型中性子小角散乱のデモンストレーション実験も実施し、中性子実験装置への応用性の高さを実証。

# 中性子科学における要請

## 中性子プローブ

- ◇ 特有の性質で物質研究に貢献
  - ・ 高い透過力
  - ・ 軽元素に対する感度
  - ・ 磁性
- ◇ ビームフラックスが弱い
- ◇ 実験施設が少ない

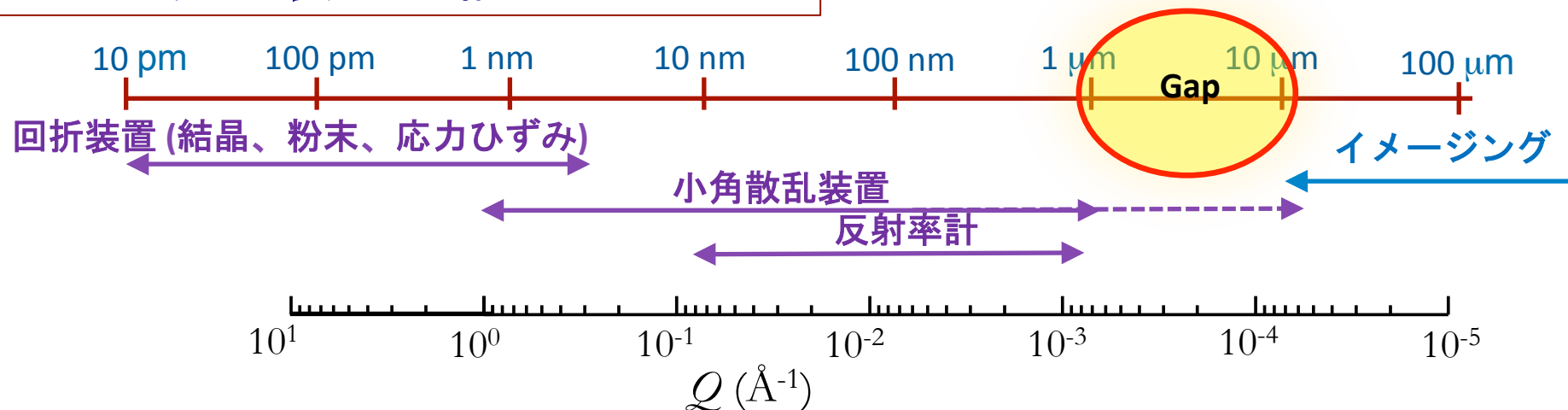


## 解決策

1. 中性子源
  - ・ 核破砕中性子源 (ビーム強度)
  - ・ 小型中性子源 (利用機会)
2. ビーム利用効率の向上
  - ・ パルスビーム & 飛行時間法 (TOF法)
  - ・ 中性子光学素子 (集光レンズ, 中性子ガイド管, ミラー)

- 中性子レンズ (屈折、反射、磁気屈折)
- ・ ビーム強度の増強
  - ・ 中性子実験装置性能の向上

## 中性子実験装置：構造スケール



# 中性子科学における要請

## 中性子プローブ

- ◇ 特有の性質で物質研究に貢献
  - 高い透過力
  - 軽元素に対する感度
  - 磁性
- ◇ ビームフラックスが弱い
- ◇ 実験施設が少ない



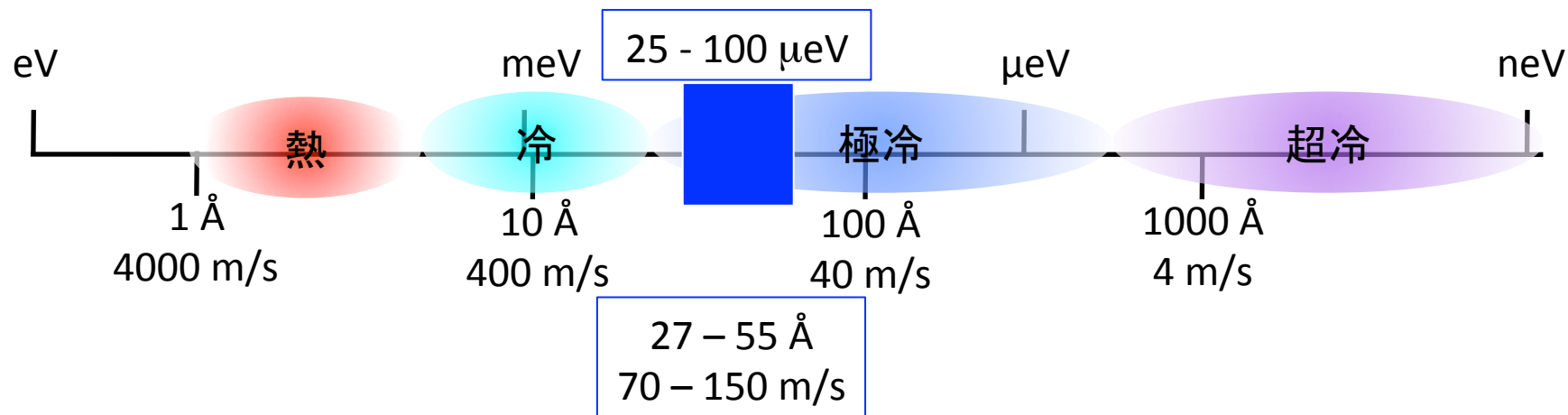
## 解決策

1. 中性子源
  - 核破砕中性子源 (ビーム強度)
  - 小型中性子源 (利用機会)
2. ビーム利用効率の向上
  - パルスビーム & 飛行時間法 (TOF法)
  - 中性子光学素子 (集光レンズ, 中性子ガイド管, ミラー)

### 中性子レンズ (屈折、反射、磁気屈折)

- ビーム強度の増強
- 中性子実験装置性能の向上

## 中性子エネルギー、波長、速度



# 永久磁石を用いたTOFレンズ

## 磁気屈折光学系



- 容易なビームアライメント
- 低バックグラウンド
- 等方的な集光
- 拡大/縮小, 平行ビーム  
→ イメージング
- 低エネルギー中性子ビームの集光に適している ( $\leq$  CN, VCN)  
→ 大きな構造と小さなエネルギーダイナミクス  
→ 中性子小角散乱 (SANS)
- 偏極ビーム  
→ スピンスペクトロスコーピー

## TOFタイプ実験のための中性子レンズ

### TOF-レンズ:

中性子の TOF(飛行時間)情報に同期して集束強度を変調し、パルス白色ビームを集光するレンズ

### 永久磁石 + 強度変調

## → ワイドバンドパルスビーム集束

### 永久磁石

- 小さい体積で超伝導磁石に匹敵する磁場強度
- 大型の付随装置無し

## 強度変調型永久六極磁石ToFレンズ

### Modulating-Permanent Magnet Sextupole

### mod-PMSx

- 広い波長域  $\lambda_{\min} \leq \lambda \leq \lambda_{\max}$ ,  $\lambda_{\max} = 2\lambda_{\min}$
- 容易な製作 & 取り扱い
- シンプル & コンパクトなシステム

# 6極磁場による中性子ビーム集束

磁場中の運動方程式：

$$\frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = \mp \left| \frac{\mu_n}{m_n} \right| \nabla |\mathbf{B}|$$

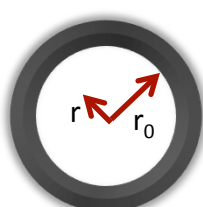
$\mu_n$ : 中性子の磁気モーメント  
 $m_n$ : 中性子の質量  
 $-$ : 平行スピン  
 $+$ : 反平行スピン

中性子は磁場勾配に比例した力を受ける

2n 極磁場  $|\mathbf{B}| = B_0 \left( \frac{r}{r_0} \right)^{n-1}$

復元力  $\Rightarrow F \propto r$

“単振動”



$n = 3$

6極磁場：

$$\mathbf{B}_6 = \frac{1}{2} G_6 (x^2 + y^2) = \frac{1}{2} G_6 r^2$$

$G_6$ : 6極磁場強度

$r$ : ビーム軸からの距離

6極磁場は磁場に平行なスピンを持つ  
 中性子をビーム軸へ集束する

◆ 6極磁場強度  $G_6$ , 磁石長  $L_m$

集束距離は  
 波長  $\lambda$  に依存した量



色収差

TOF 集光条件：

$$G_6 \propto \lambda^{-2} \propto t^{-2}$$

TOF (飛行時間) 法  $\lambda = \frac{h}{m_n} \frac{t}{L^*}$

$$K_{G_6} \equiv G_{6 \max} / G_{6 \min} = K_\lambda^2$$

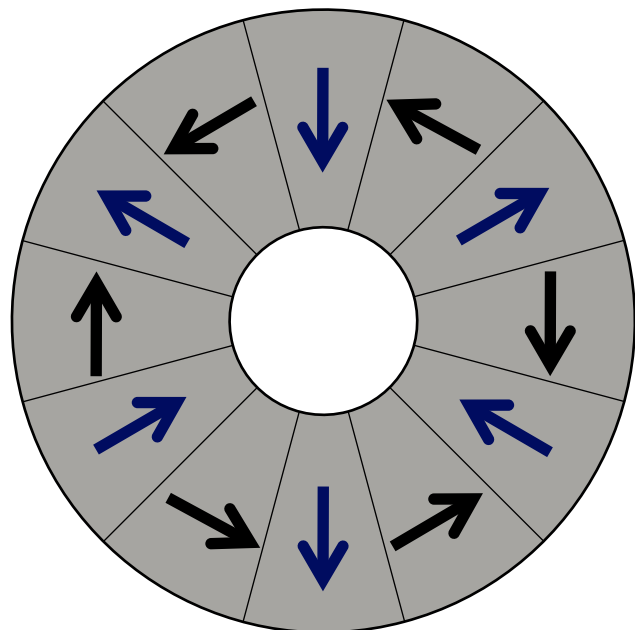
# 永久磁石による磁場を変調する新たな方法

**Halbach磁石配置**...希土類永久磁石を用いて円筒内部（または外部）に永久磁石の残留磁束密度を超える多極磁場を発生可能。

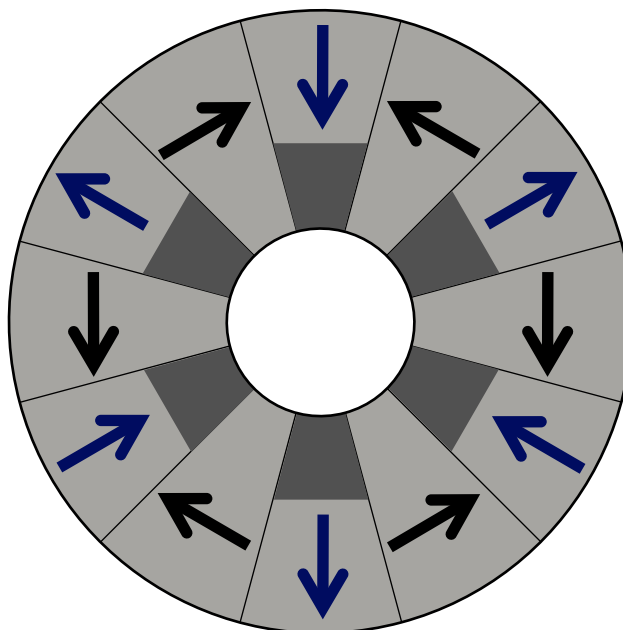
+ **Extended**...磁極の一部を高い飽和磁束密度を持つ軟磁性材料で置換。

+ **磁場強度変調**...★**Key idea**★ 多極磁石を同軸二重リング状に分割し、相対的な角度を変えることで磁場強度に余弦関数的な変調を導入。

Halbach

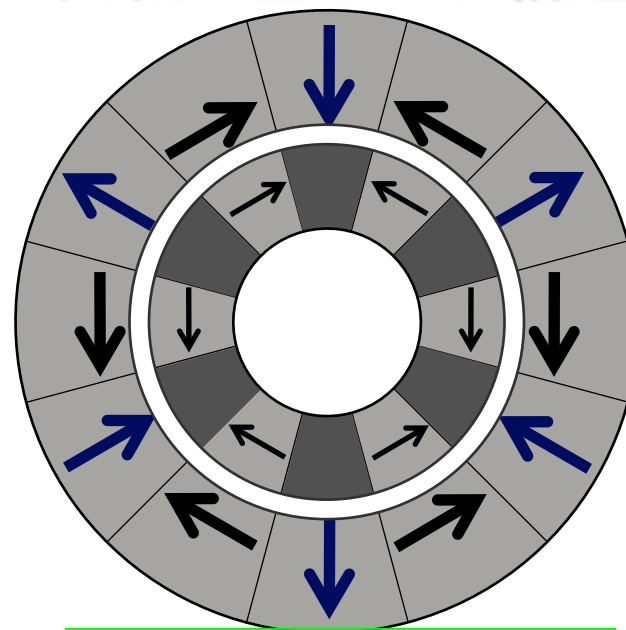


Extended Halbach



より強い磁場強度

回転二重リング構造



相対角度を変えると強度可変に

# 永久磁石による磁場を変調する新たな方法

**Halbach磁石配置**...希土類永久磁石を用いて円筒内部（または外部）に永久磁石の残留磁束密度を超える多極磁場を発生可能。

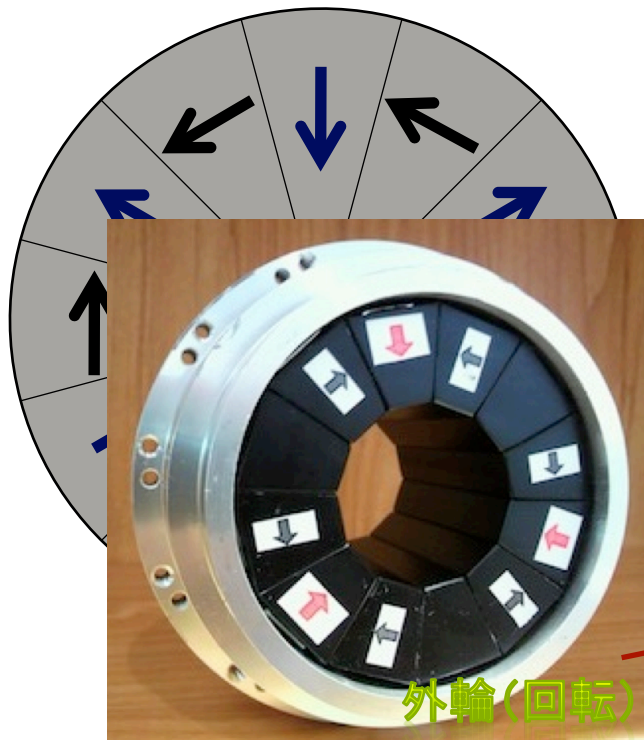
+ **Extended**...磁極の一部を高い飽和磁束密度を持つ軟磁性材

+ **磁場強度変調**...★**Key idea**★ 多極磁石を同軸二重リング構造に変えることで磁場強度に余弦関数的な変調を導入。

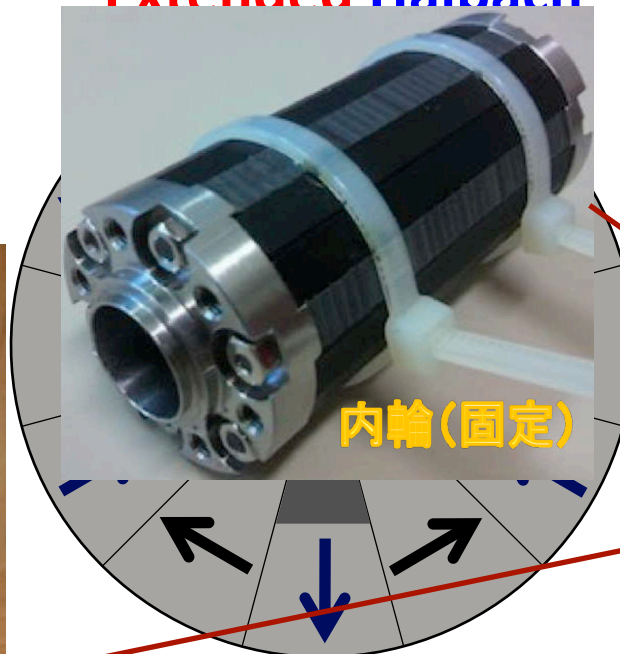
**Mod-PMSxの  
磁場強度変調**

**回転二重リング構造**

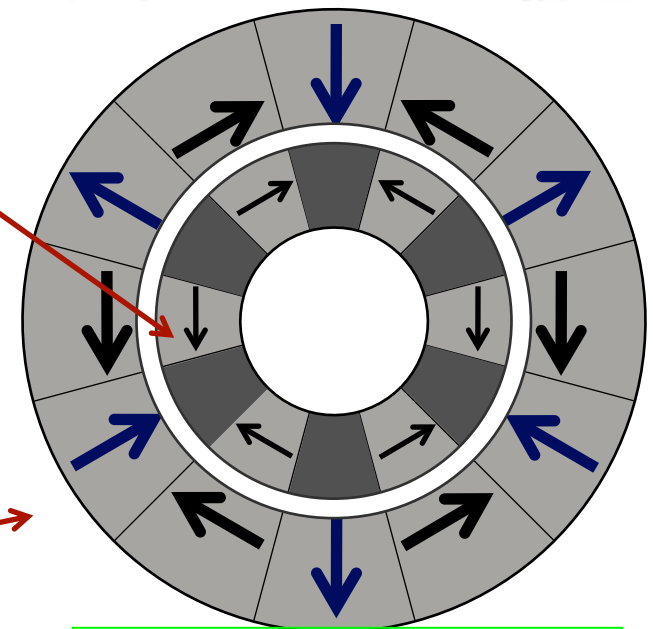
**Halbach**



**Extended Halbach**



より強い磁場強度



相対角度を変えると  
強度可変に



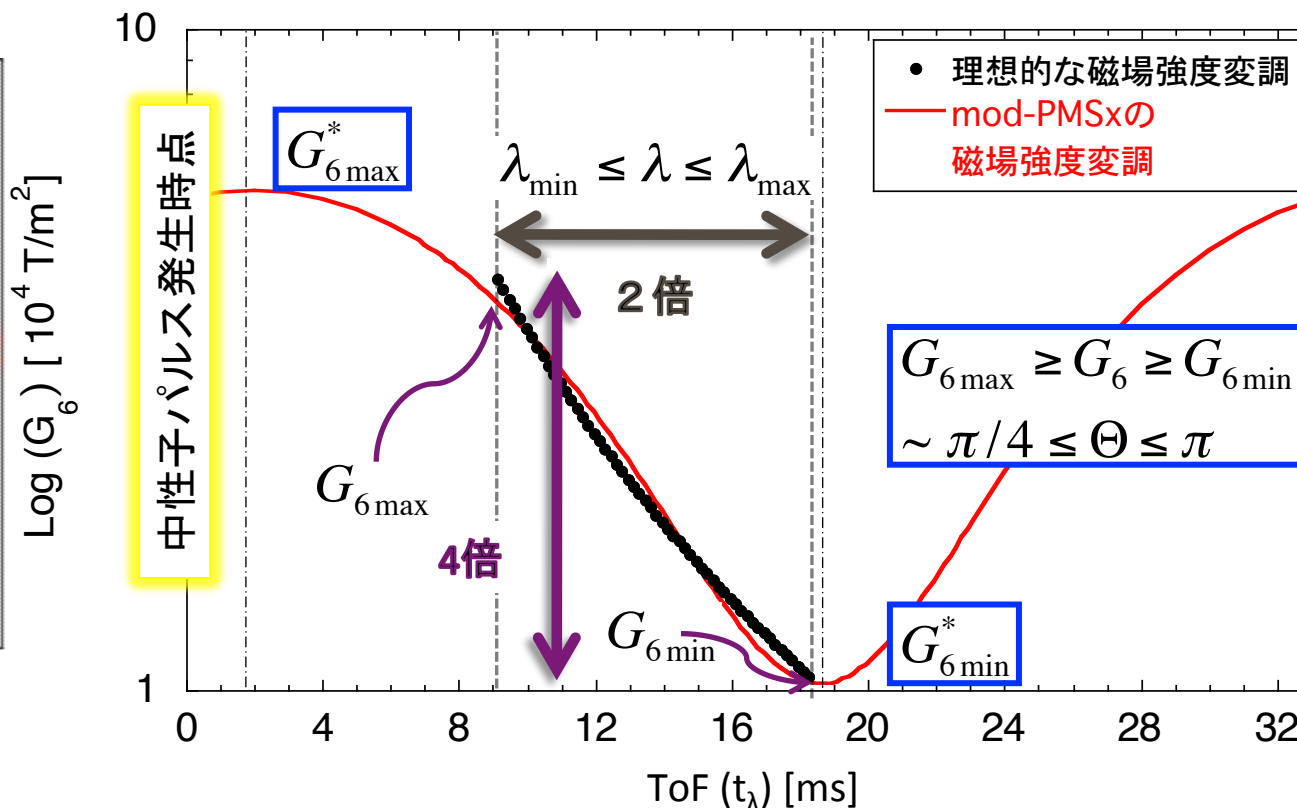
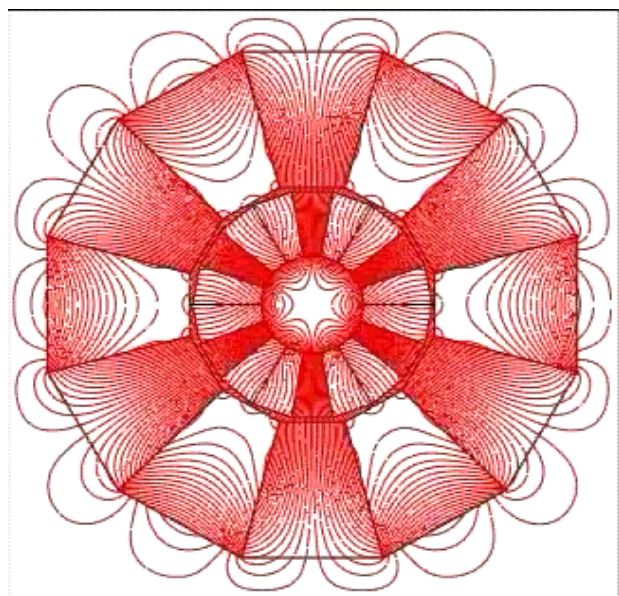
# 磁場強度変調の位相を中性子ビームパルスに同期

➤ ToFレンズの理想的な磁場強度変調 :

$$G_6 \propto v_z^2 \propto \lambda^{-2} \propto t^{-2}$$

➤ Mod-PMSxの磁場強度変調 :

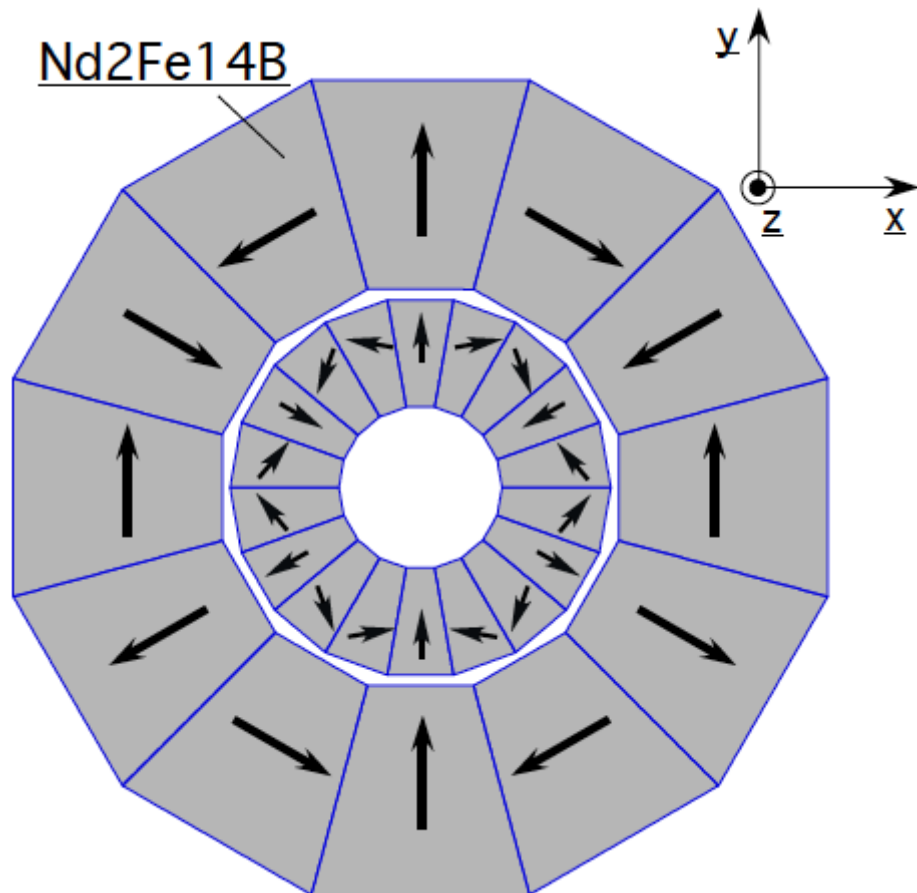
$$G_6(t) = G_6^{cnt} + G_6^{amp} \cos(2\pi f_b t - \delta)$$



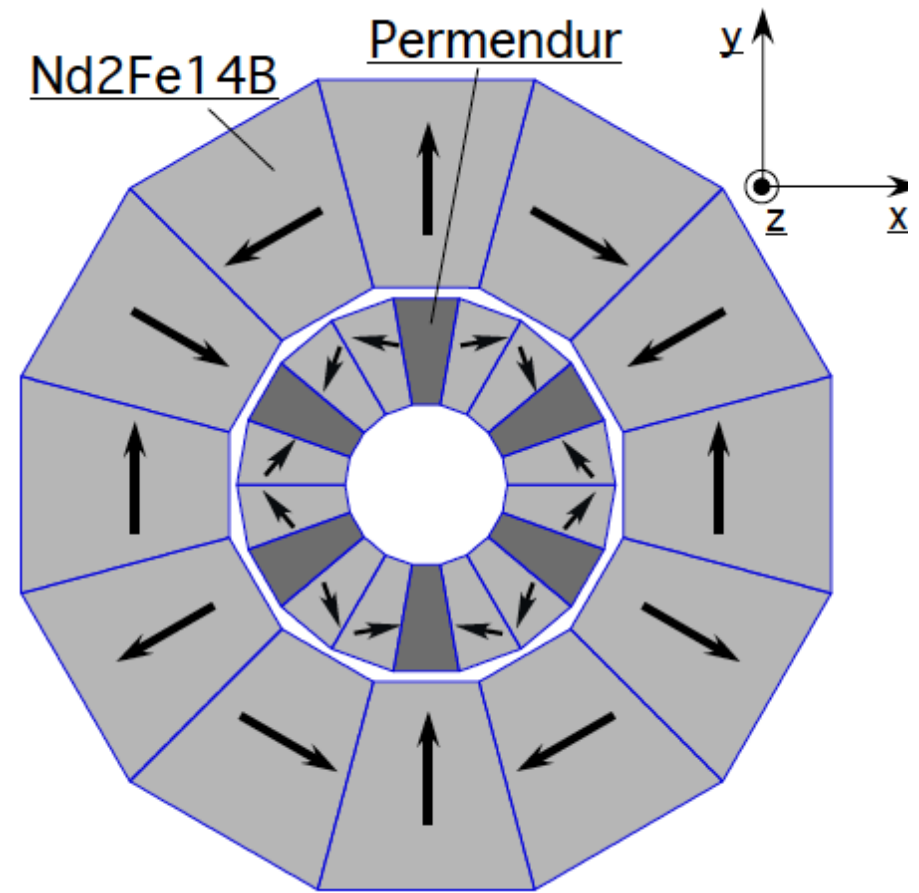
# 広い集光波長域の集束

Extended-Halbach が変調域拡張に有効

Permendur (Fe-Co-V, 49-49-2(%)), 飽和磁束密度 2.4T



Normal Halbach型

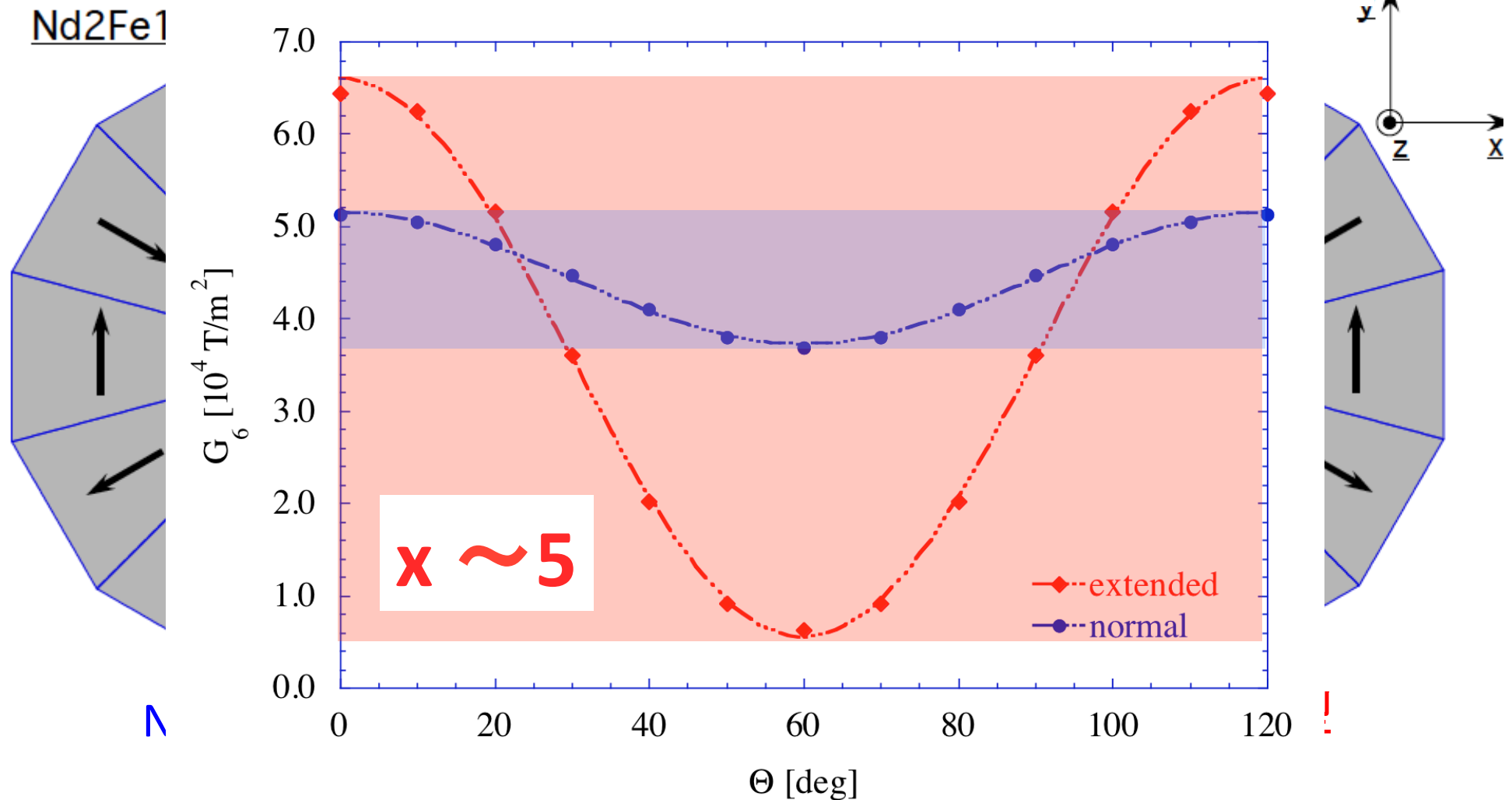


Extended-Halbach型

# 広い集光波長域の集束

## Extended-Halbach が変調域拡張に有効

6極磁場強度の比較 (PANDIRA (LANL) によるシミュレーション) 強度 2.4T



# 安定したワイドバンドパルスビーム集束のための改良

## ❖ 30Hzでの長期安定運転



- 機械強度
- 磁極の発熱抑制

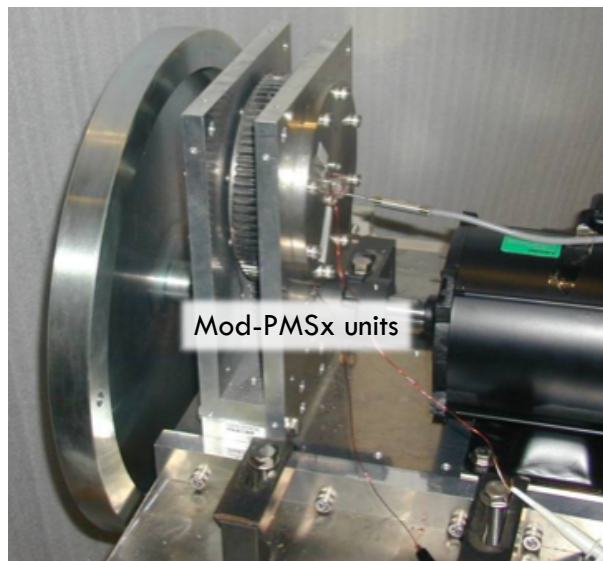
➤ 駆動部の改良（回転トルクが極性を変えるため）  
歯車 → タイミングベルト

➤ トルクの平滑化（大きな回転トルク）  
フライホイール → 磁気トルクキャンセラー

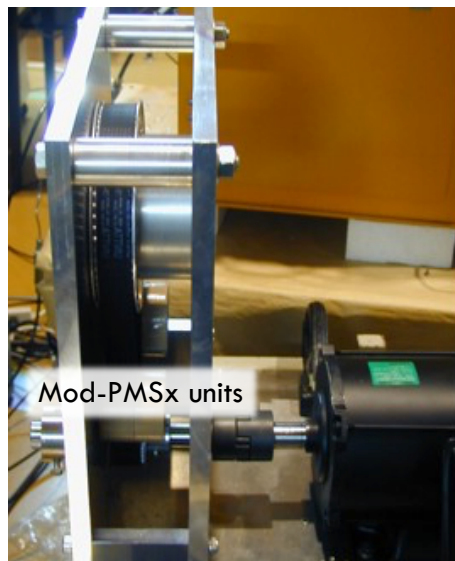
➤ 磁極の発熱対策  
- バルク → 積層構造  
- → 磁気焼鈍

## 有効な中性子実験のための改良

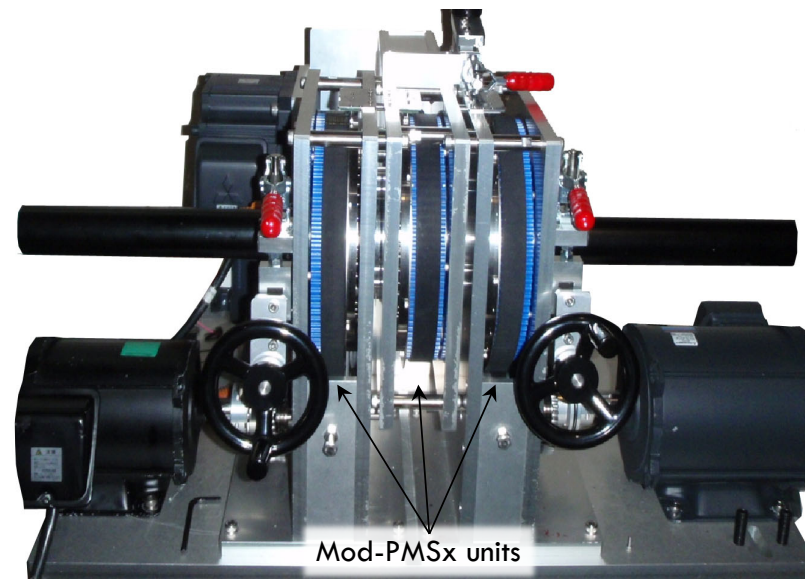
- ユニット構造の導入
- スピンガイド磁場の改良
- ビームボアのフライトパス化



初号機



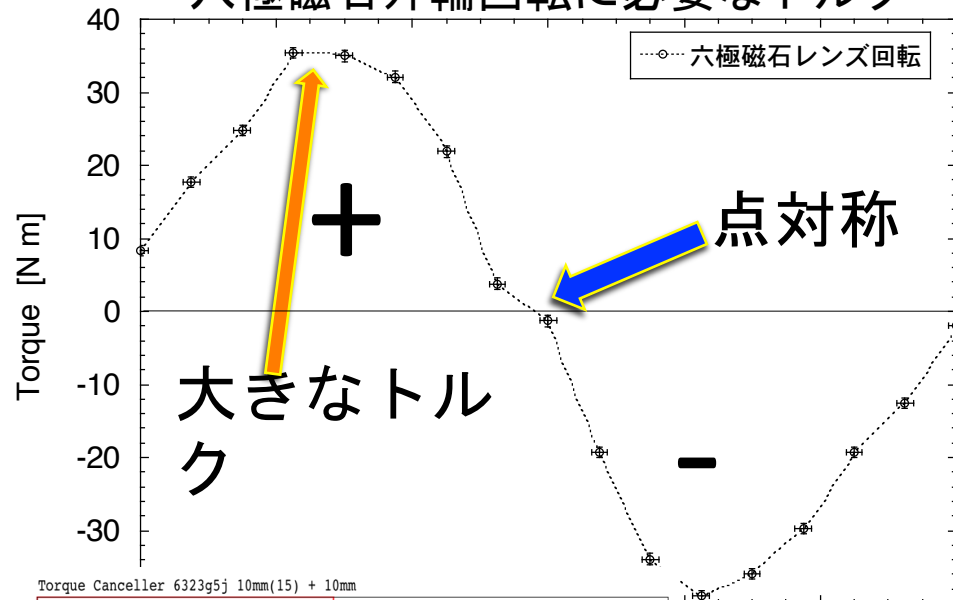
2号機



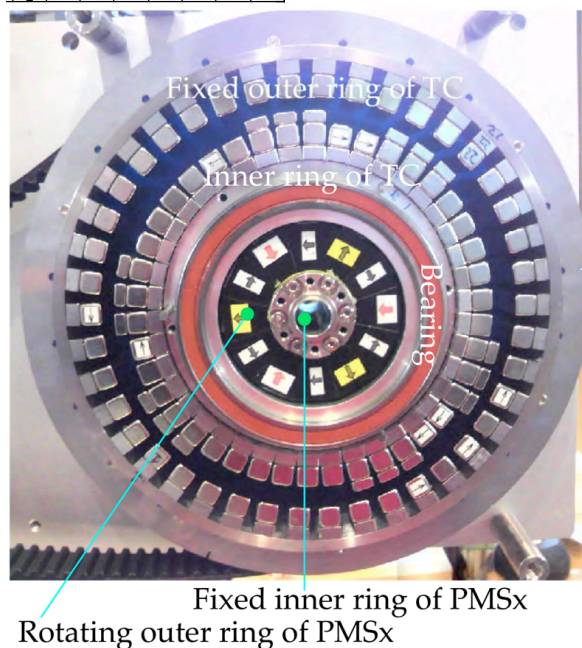
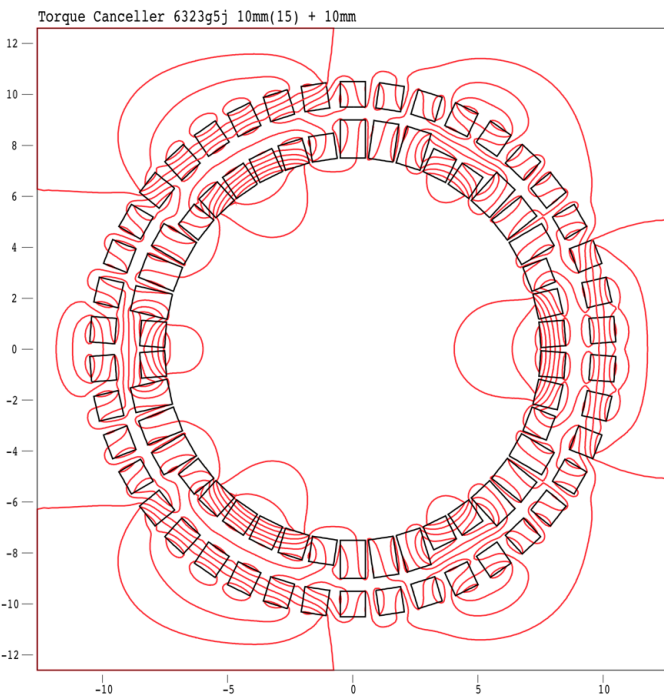
3号機

# 磁気トルクキャンセラーによりコンパクトなシステムを実現

六極磁石外輪回転に必要なトルク



- 最大30Nm以上の大きなトルク
- トルクの変化は点対称（高調波成分）
- 積分は0（コギングトルクと同様）



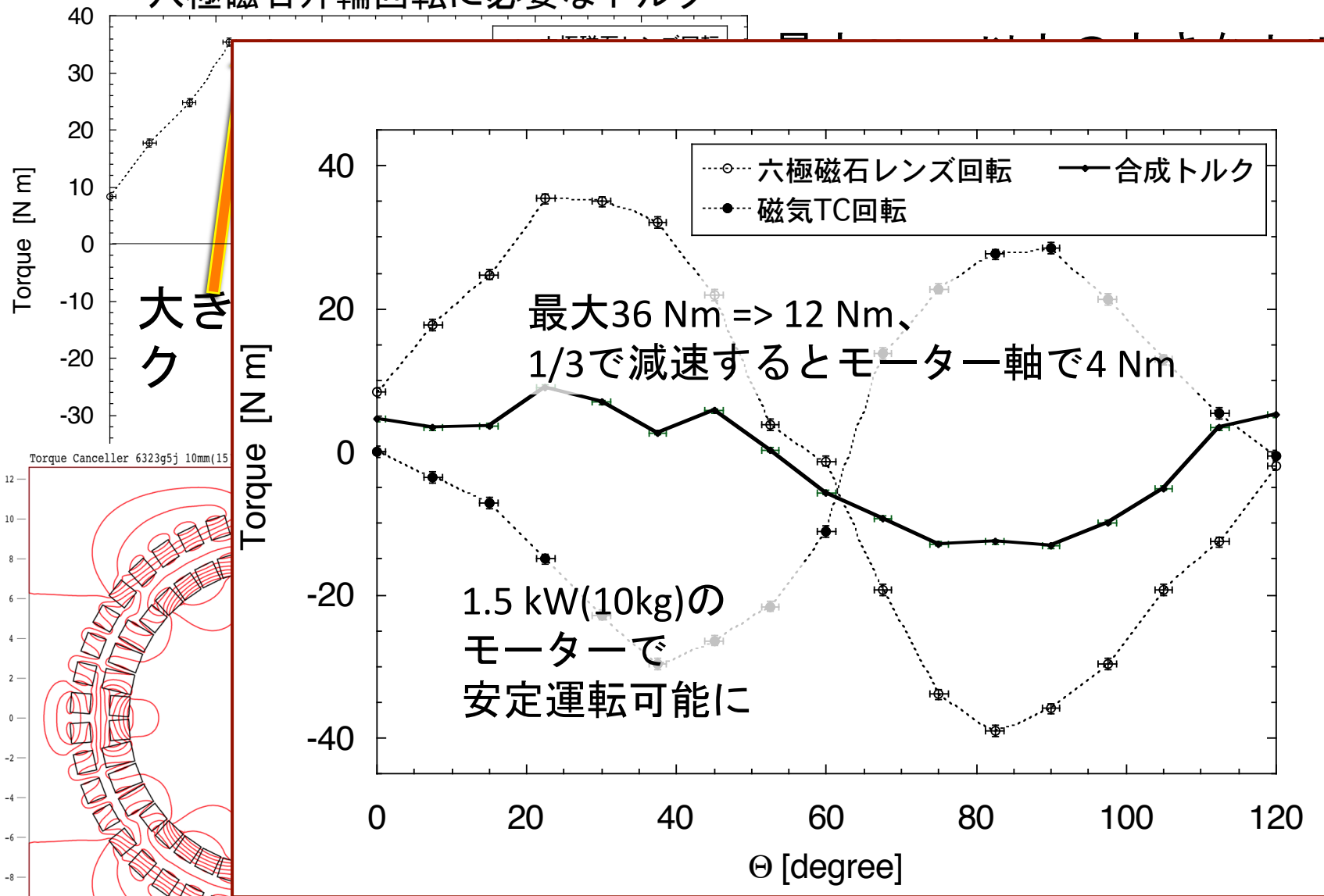
## トルクを平滑化

⇒ 小さな動力で安定運転可能に  
(大きさが同じで極性が反対)

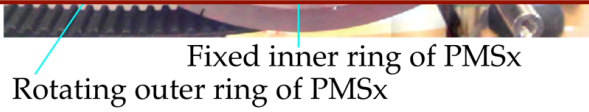
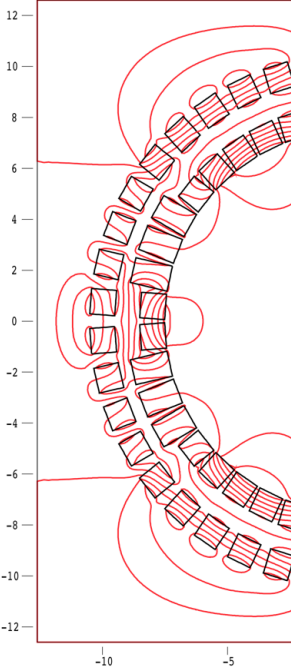
最もコンパクトな  
磁気トルクキャンセラー

# 磁気トルクキャンセラーによりコンパクトなシステムを実現

六極磁石外輪回転に必要なトルク



Torque Canceller 6323g5j 10mm(15)

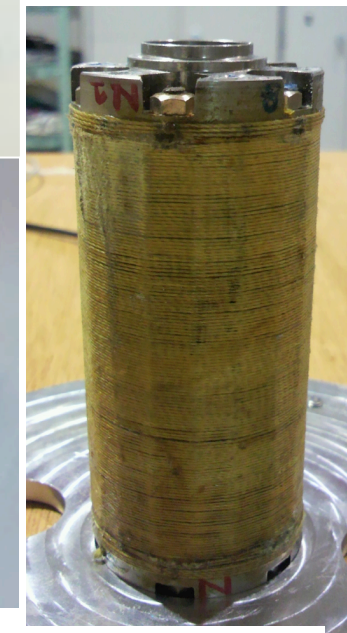
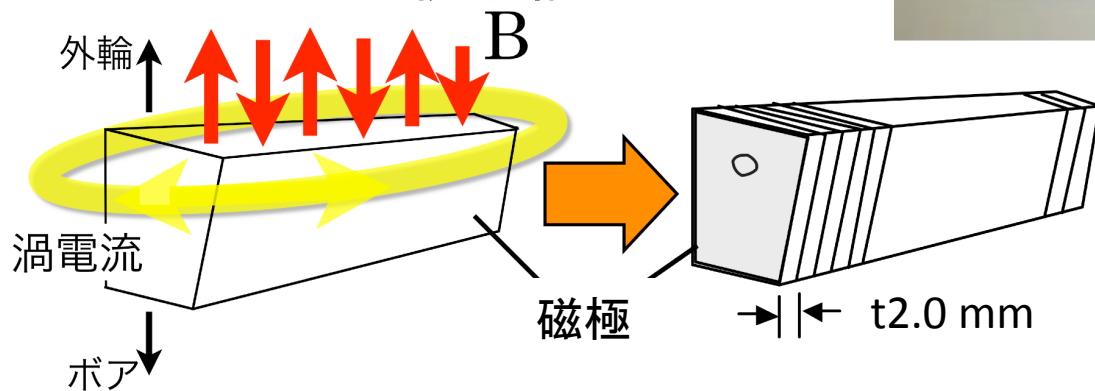


ク  
(高周波成分)  
(同様)  
  
化  
定運転  
(力が反対)  
セラ

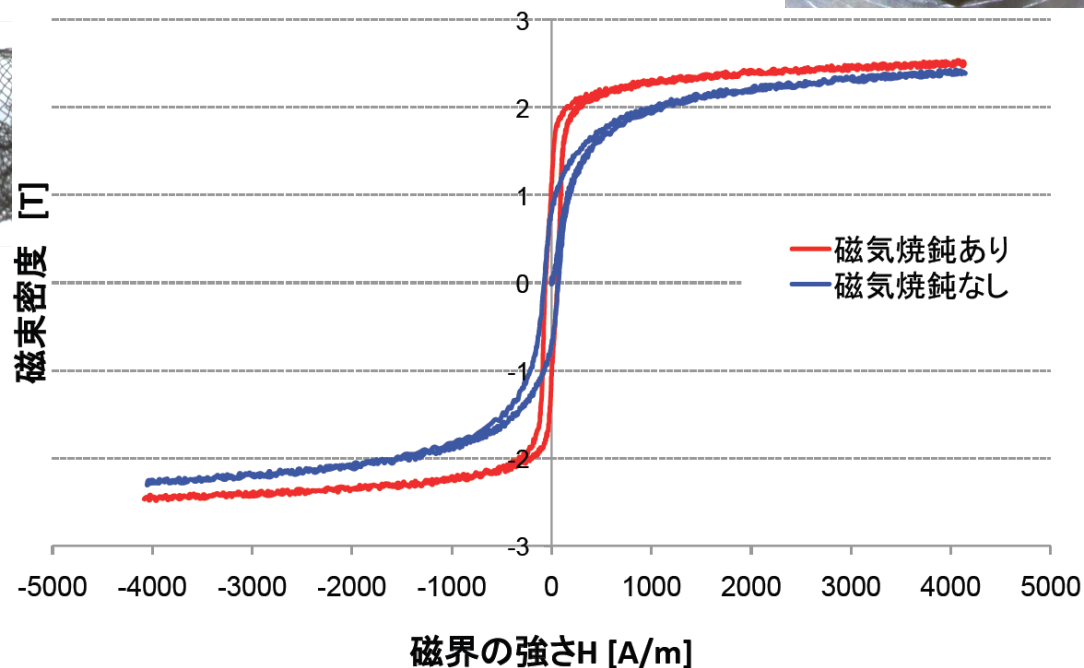
# 永久磁石の減磁を避けるための発熱対策

## 発熱の主な原因

- 渦電流 ➡ 積層構造



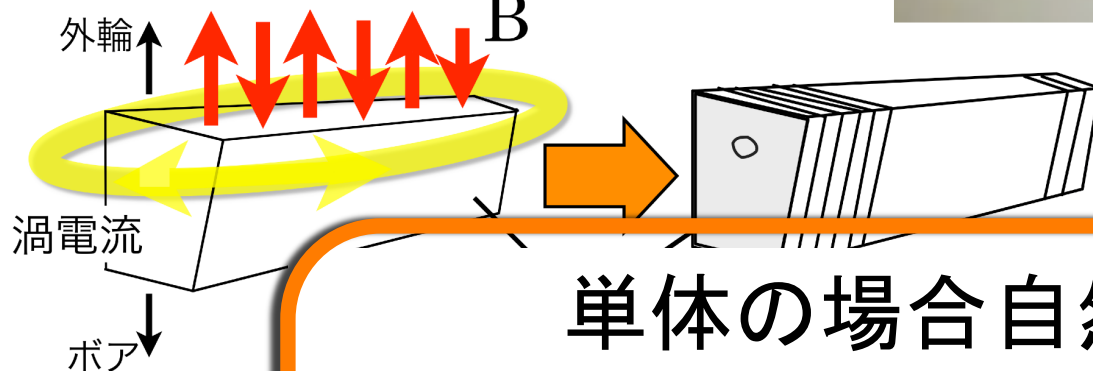
- ヒステリシス損 ➡ 磁気焼鈍



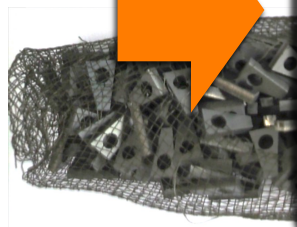
# 永久磁石の減磁を避けるための発熱対策

## 発熱の主な原因

➤ 渦電流 → 積層構造

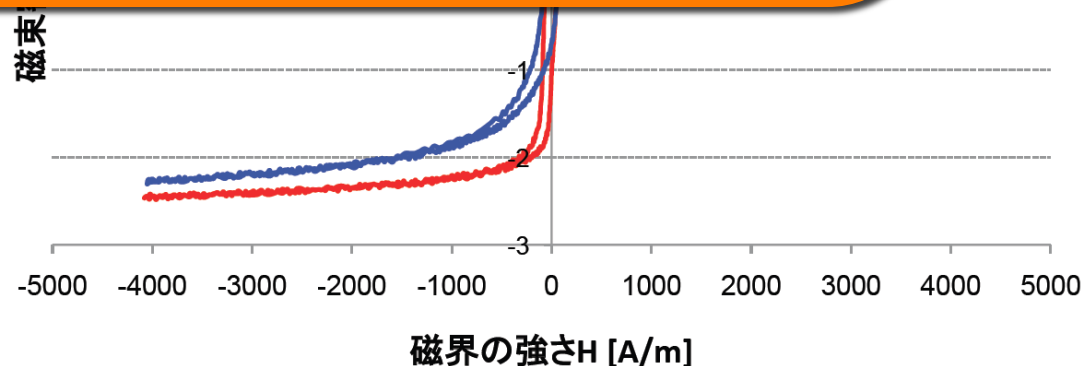


➤ ヒステ



単体の場合自然空冷で  
温度上昇は+25°C

ユニット連結型では強制空冷で  
+25°C未満を達成





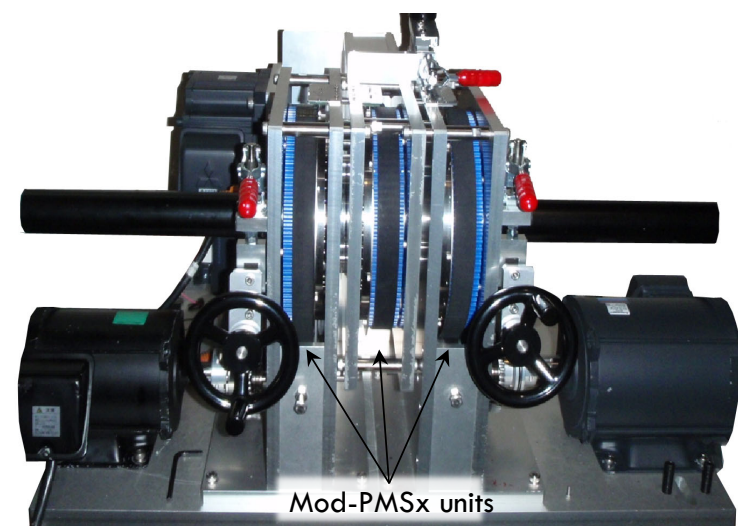
# 実験

- 集光性能テスト
- 拡大イメージング
- 集光型小角散乱  
(**focusing-SANS**)

## 対象ビーム

- 波長範囲  $27\text{\AA} < \lambda < 55\text{\AA}$  ( $\kappa = 2$ )
- 繰り返し周期 30 Hz

Institute Laue Langevin (Grenoble in France), PF2-VCN

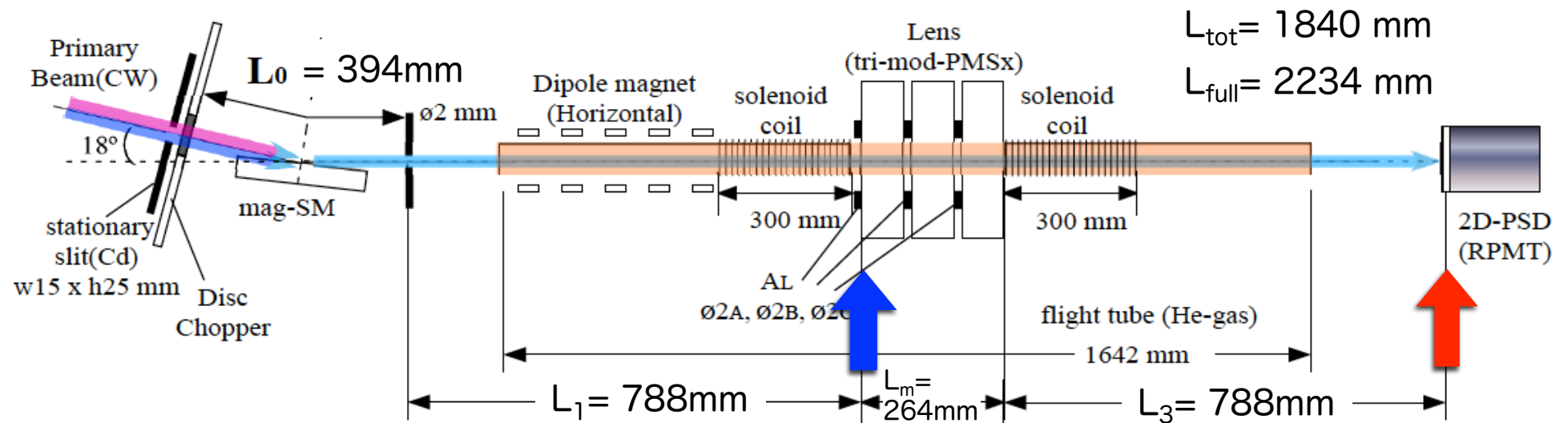


# 集光性能テスト実験セットアップ

## ❖ 集光対象ビーム 極冷中性子ビーム： $27\text{\AA} < \lambda < 55\text{\AA}$ ( $\kappa=2$ ), 30Hz

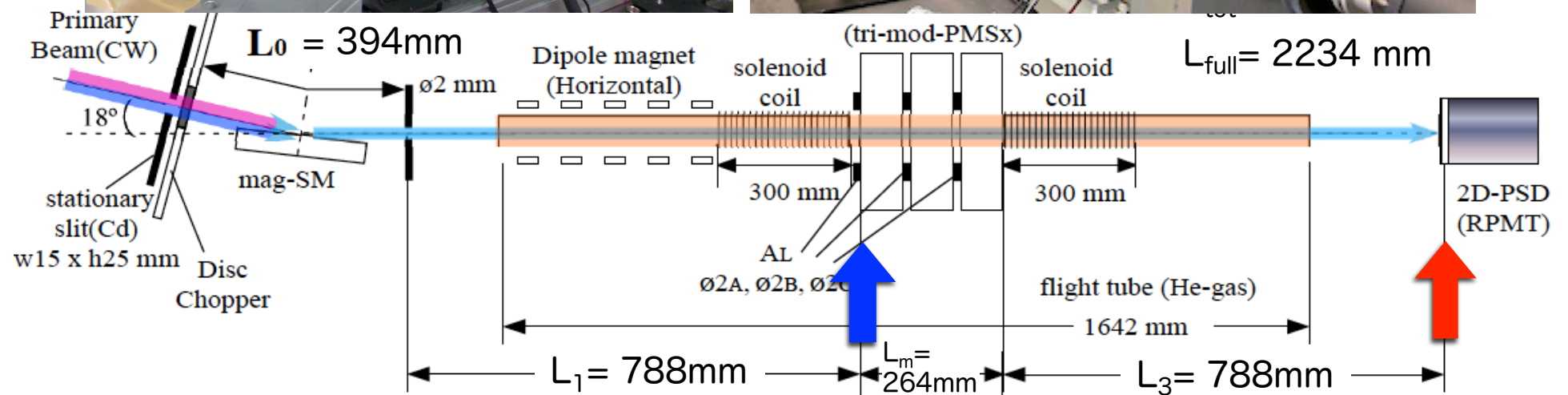
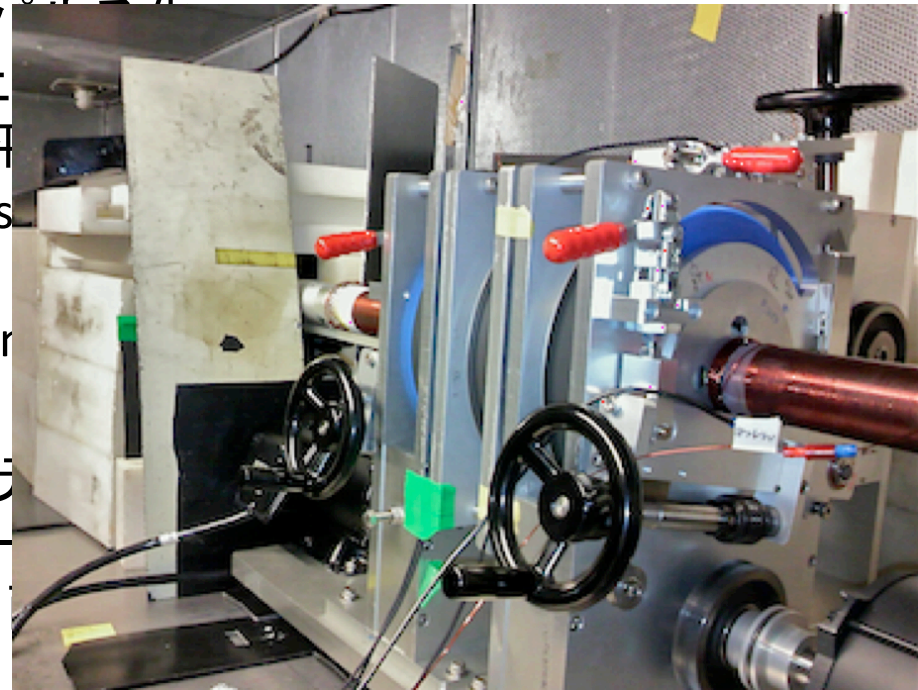
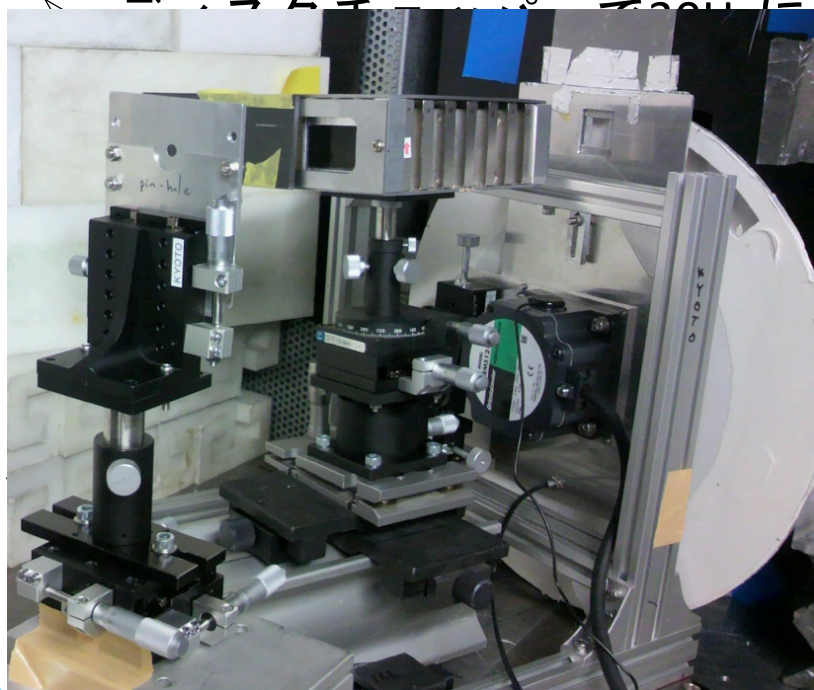
- ディスクチョッパーで30Hzにパルス化
- 磁気スーパーミラーで $27\text{\AA}$ 以上を選択
- 磁気スーパーミラーで磁場に平行なスピン成分のみを選択
- スピンガイド磁場： $> 15$  Gauss
- 光源ピンホール： $\phi 2$  mm
- レンズダイアフラム： $\phi 13.5$  mm

## ❖ 検出器：時間分解能をもつ二次元高分解能検出器(RPMT) (中性子シンチレーションスクリーン(LiF/ZnS)+光電子増倍管) 空間分解能 $\sim 1$ mm、検出面積 $\sim \phi 100$ mm



# 集光性能テスト実験セットアップ

❖ 集光対象ビーム **極冷中性子ビーム** :  $27\text{\AA} < \lambda < 55\text{\AA}$  ( $\kappa=2$ ), 30Hz



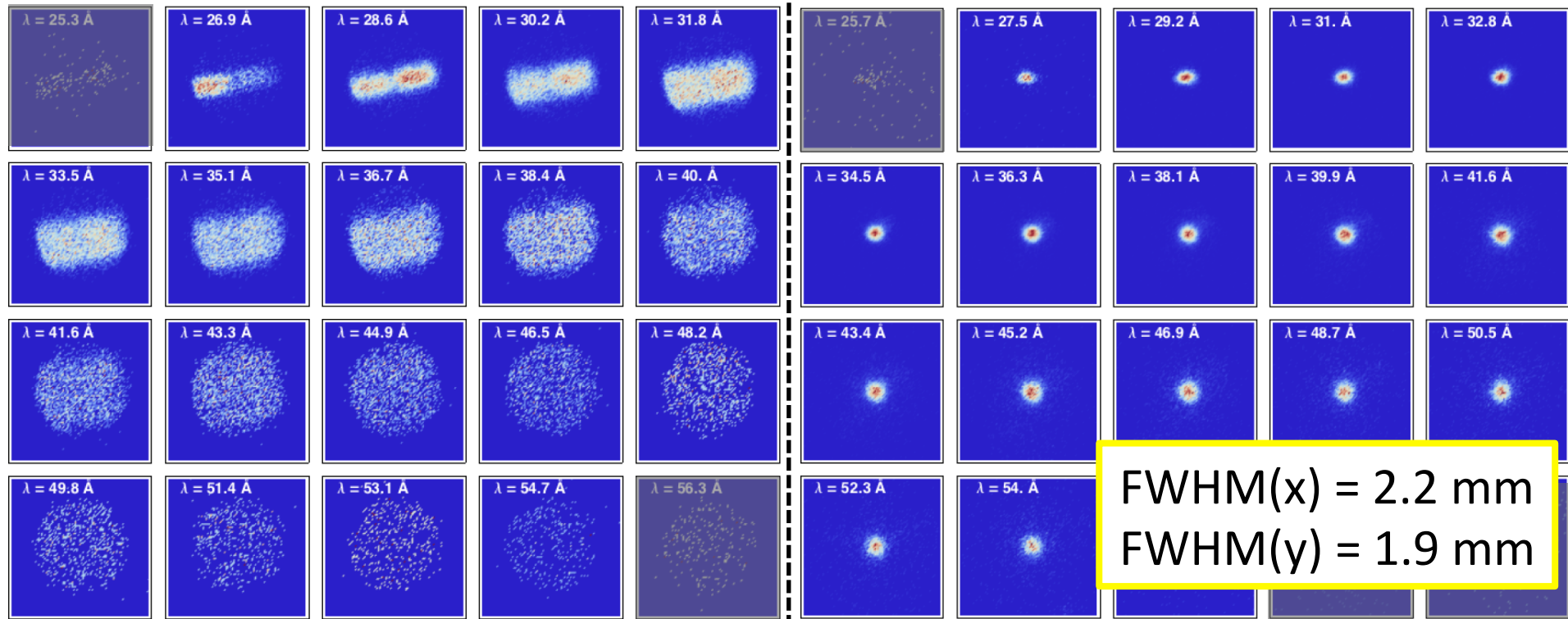
# 実験結果 : ビームスポットサイズ

非集光ビーム Time : 6006 sec

$$L_{full} = L_0 + L_1 = 0.394 + 0.818 = 1.212m$$

集光ビーム Time : 7200 sec

$$L_{full} = L_0 + L_1 + L_m + L_3 = 2.234m$$



集光対象波長全域( $\lambda_{min} < \lambda < 2\lambda_{min}$ )でビーム  
スポットサイズが一定( $\sim$ 光源サイズ $=\phi 2$  mm)に!

# 実験結果：ビームフラックスの増強

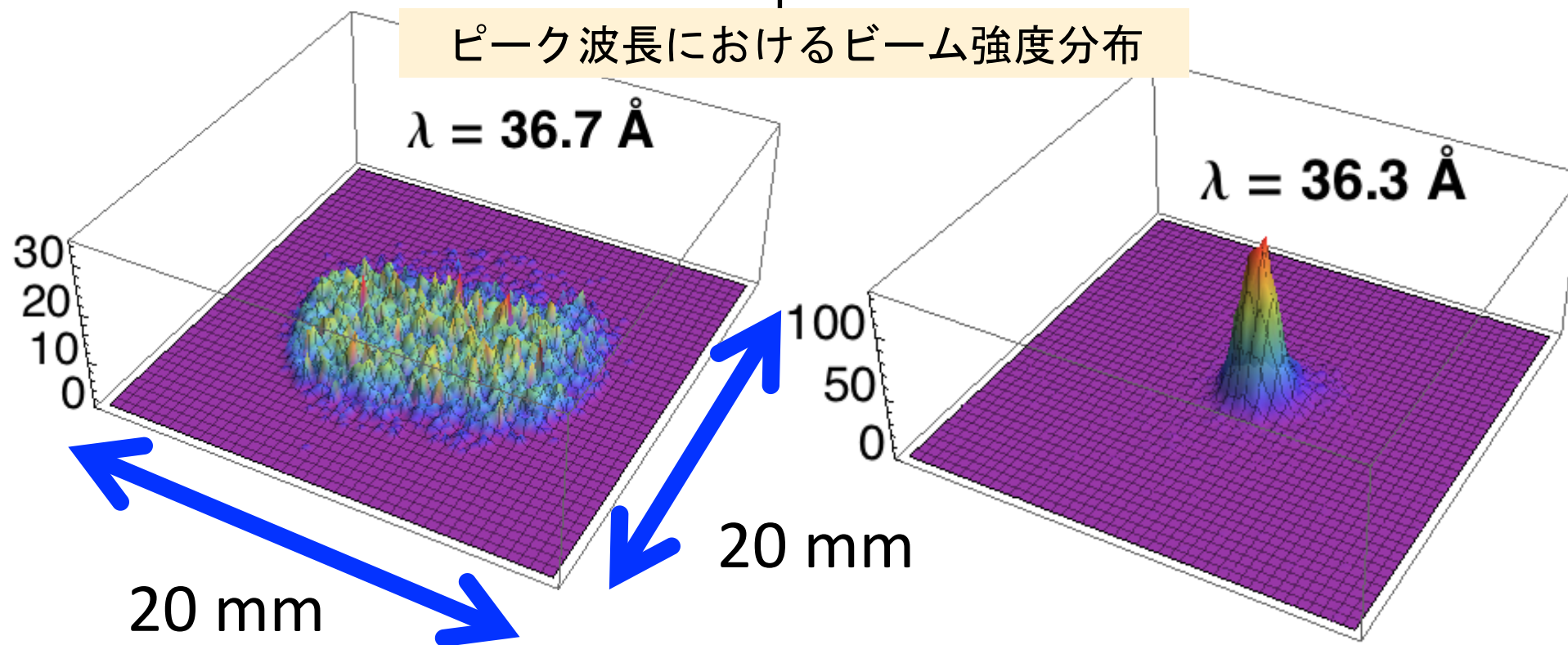
非集光ビーム Time : 6006 sec

$$L_{full} = L_0 + L_1 = 0.394 + 0.818 = 1.212m$$

集光ビーム Time : 7200 sec

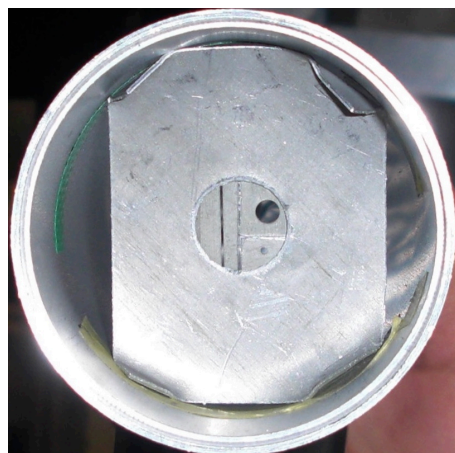
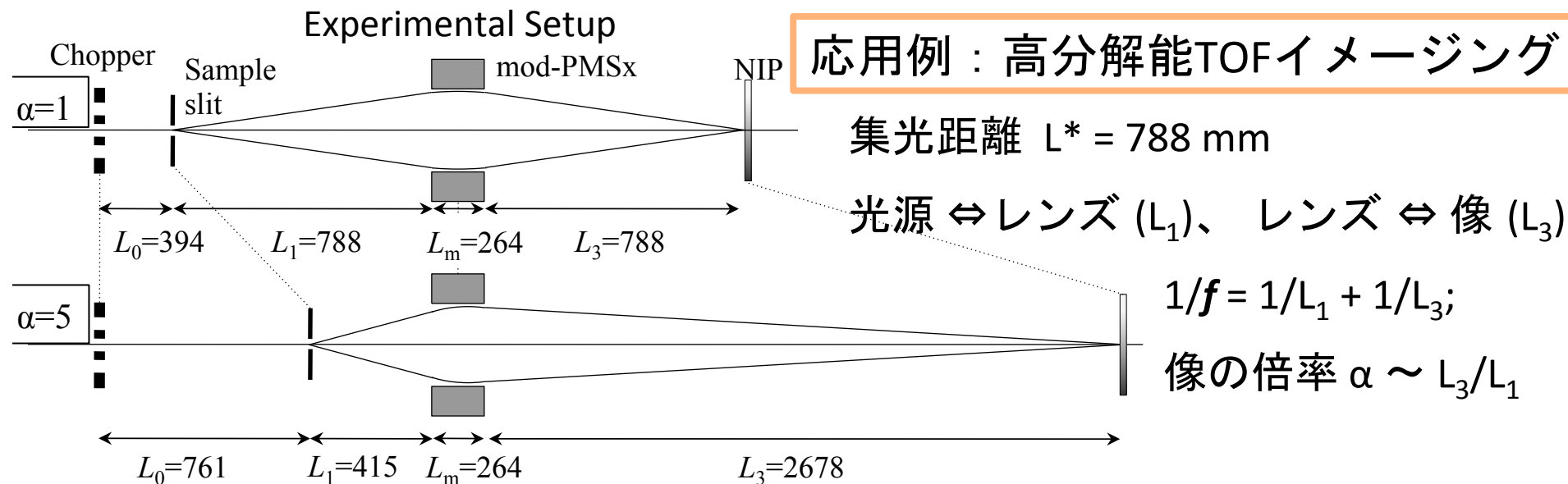
$$L_{full} = L_0 + L_1 + L_m + L_3 = 2.234m$$

ピーク波長におけるビーム強度分布



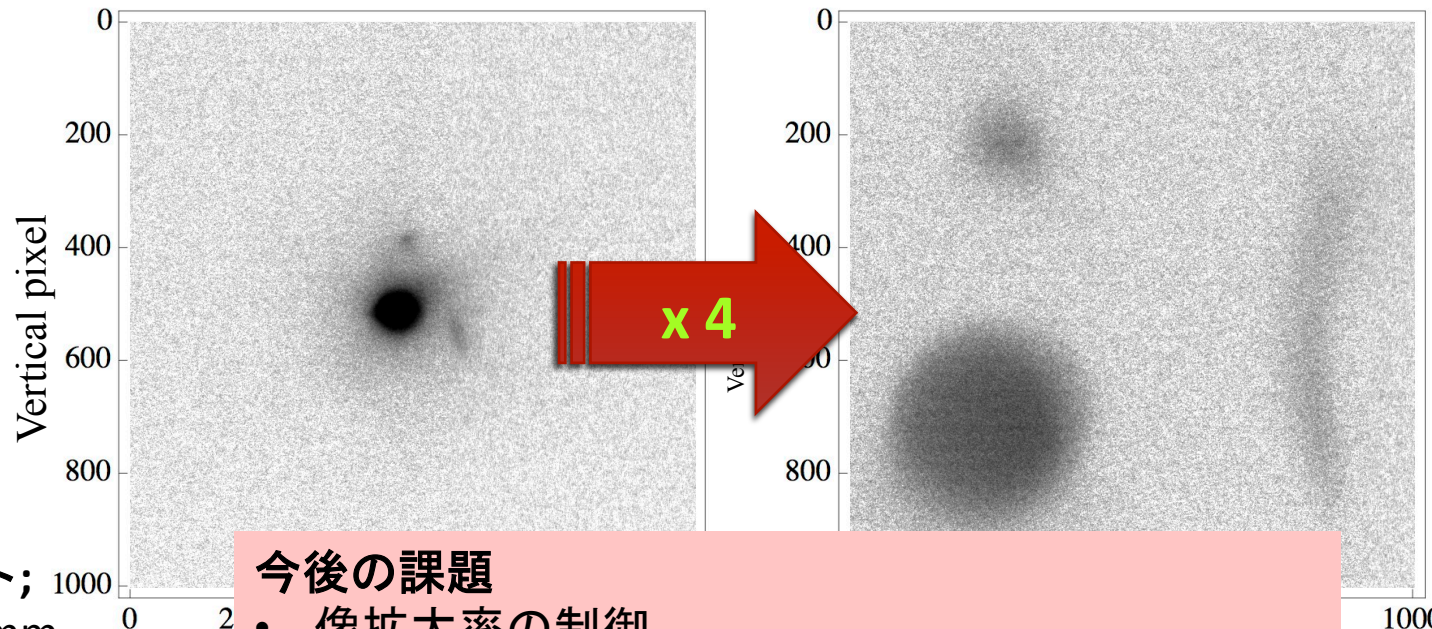
集光対象波長全域で  
ビームフラックス(n/s/cm<sup>2</sup>)が **43 倍**に！

# デモンストレーション ; 拡大イメージング



Cd製サンプルスリット;

- ピンホール;  $\phi 1, 3.5 \text{ mm}$
- スリット;  $w = 0.5 \text{ mm}$



## 今後の課題

- 像拡大率の制御
- ボア表面付近の磁場の高調波成分による収差

# まとめと今後の課題

- ❖ **加速器の磁石技術**を中性子ビーム制御に応用した。
- ❖ パルス中性子ビームの利用効率向上を目的として、広い波長域をもつ **ワイドバンドパルスビーム集束用の強度変調型永久6極磁石レンズ**を開発し、これまでに達成されたことのない **2倍の波長域** ( $\lambda_{\max}/\lambda_{\min}=2$ ) の集束に成功。
- ❖ 単位面積あたりのビーム面密度が波長域積分で **43倍**向上。
- ❖ **拡大中性子イメージング**及び**集光型中性子小角散乱**のデモンストレーション実験も実施し中性子実験装置への応用性の高さを実証。
- ❖ **集束像の高精度制御**のためには、磁場の高調波成分などによる**収差の検証と抑制**は今後の課題。
- ❖ 拡大TOFイメージング、集光型SANS、スキャンニング即発ガンマ線分析などの**高度な中性子実験**で複数サンプルに関して実績を積み重ね、**実用化**を目指す。

# 謝辞

京大化研 岩下芳久氏  
名古屋大学 清水裕彦氏  
京大化研 野田章氏  
京大化研粒子ビーム科学研究所の皆様  
京大化研 阪部周二氏  
J-PARC 山田悟史氏  
KEK 三島賢二氏  
名古屋大学 広田克也氏  
名古屋大学 北口雅暁氏  
名古屋大学 鬼柳善明氏  
北海道大学 古坂道弘氏  
KUR 日野正裕氏  
NOP collaborationの皆様  
CROSS 鈴木淳一氏  
J-PARC 篠原武尚氏  
KUR 杉山正明氏  
RIKEN 牧野内昭武氏  
RIKEN 神田敦子氏  
RIKEN 延與秀人氏  
RIKEN 放射線研究室の皆様

RIKEN 山形豊氏  
RIKEN 大竹淑恵氏  
J-PARC 金谷利治氏  
KUR 井上倫太郎氏  
東大 関義親氏  
ILL Dr. Peter Geltenbort  
ILL Dr. Bruno Guerard  
ESS Dr. Ken Andersen  
PSI Dr. Uwe Filges  
ANSTO Dr. Hal Lee  
ESS Dr. Shane Kennedy  
ANL Dr. Jack Carpenter  
ANL Dr. Jyotsana Lal  
DTU Dr. Markus Briel

ここに書ききれない皆様  
+ 家族  
+ 友人