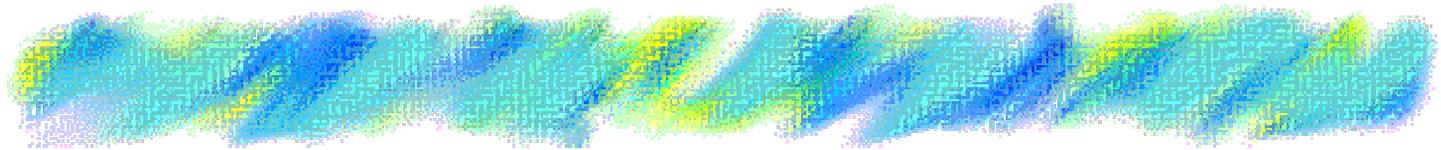


# タングステン単結晶を用いた 陽電子源の開発Ⅱ



— KEK 8-GeV Linacにおける基礎実験 —

発表者： 笹原和俊

東京都立大学大学院 理学研究科

## 研究組織



東京都立大学  
理学研究科



KEK 加速器研究施設(A)

KEK 素粒子原子核研究所(B)



広島大学

放射光科学研究センター(C)



トムスク工科大学  
原子核研究所(D)

笹原和俊, 浜津良輔

穴見昌三, 榎本收志, 古川和朗, 柿原和久, 紙谷琢哉,

小川雄二郎, 大沢哲, 大越隆夫, 諏訪田剛...(A)

奥野英城...(B)

梅森健成, 藤田貴弘, 吉田勝英(C)

V.Ababiy, A.P.Potylitsyn, I.E.Vnukov...(D)

# 加速器と高強度陽電子

## ➡ 素粒子標準模型を超える物理を目指して...

21世紀の高エネルギー実験には、現在よりもさらに  
**高エネルギー、高強度**の加速器が必要

## ➡ 電子・陽電子衝突型加速器

精密実験の役割を担う**電子・陽電子衝突型加速器**  
にとって、信号の統計精度を上げるために、**ルミノシティ**  
**の増強**は最重要課題の1つ

⇒ 強いては、**陽電子の高強度化**！

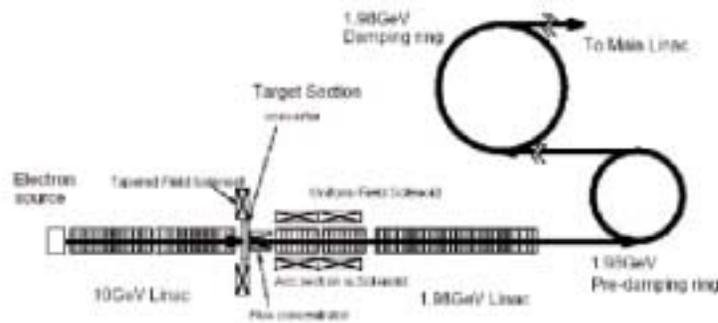
Cf.

➤ KEK Bファクトリー：  $5.5 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (2001年12月現在)

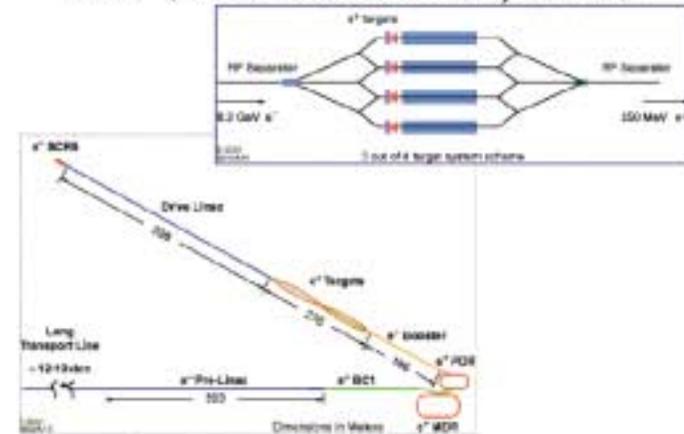
➤ 次世代リニアコライダー：  $> 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

# 次世代リニアコライダー計画

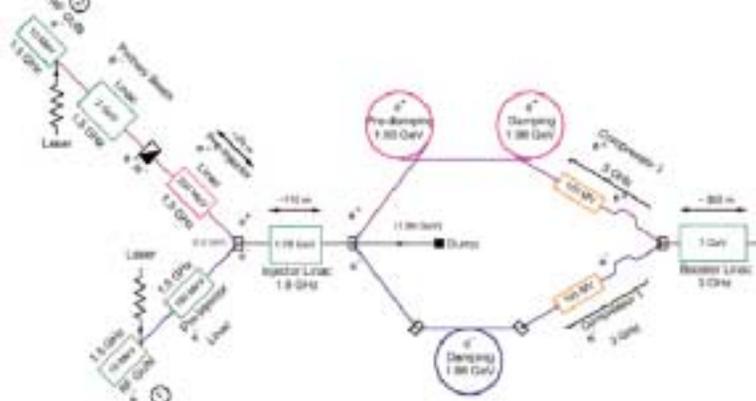
JLC (Japan Liner Collider; KEK)



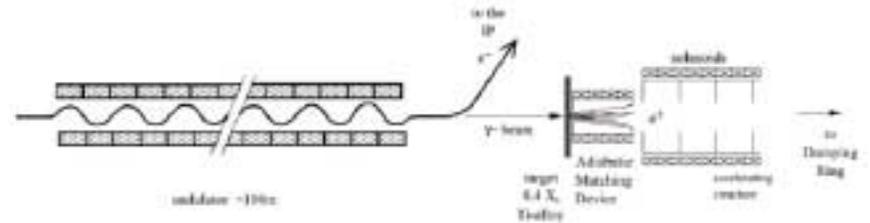
NLC (Next Liner Collider; SLAC)



CLIC (Compact Liner Collider; CERN)



TESLA (TeV Surper Conducting Liner Accelerator; DESY)



# 次世代リニアコライダーの陽電子源

(Snowmass 2001)

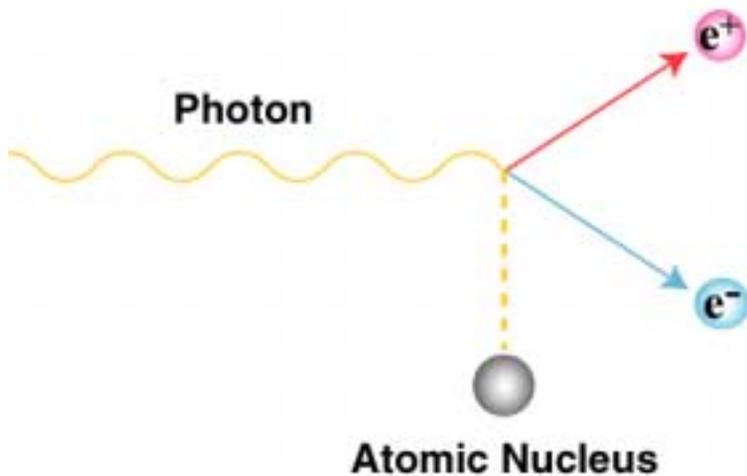
Facilities	Target	Thickness	Flux	Peak Energy Deposition	Average Power Absorption	Normalized Acceptance	Drive Beam
		( $X_0$ )	$e^+/s$	(J/g)	(kW)	(mrad)	
SLC	$W_{75}Re_{25}$	6	$4.8 \times 10^{12}$	30	5	0.01	$e^-$
JLC	$W_{75}Re_{25}$	6	$2 \times 10^{14}$	140	49	0.027	$e^-$
JLC, pol	$W_{75}Re_{25}$	0.5	$1 \times 10^{14}$	13	0.5	0.06	Compton Photons
CLIC	$W_{75}Re_{25}$	4.5	$1 \times 10^{14}$	65	22	0.027	$e^-$
NLC	$W_{75}Re_{25}$	4	$1.8 \times 10^{14}$	40*	16*	0.045	$e^-$
TESLA	Ti Alloy	0.4	$2.8 \times 10^{14}$	222	5	0.048	Undulator Photons

\* Energy deposition and absorbed power in each of 3 targets

⇒ **熱に強く、かつ高効率の標的を！**

## 陽電子生成(素過程)

光子が原子核のクーロンポテンシャルを通過するとき起こる  
電子・陽電子対生成



全断面積:

$$\sigma_{pair} = (\text{Bethe - Heitler formula})$$

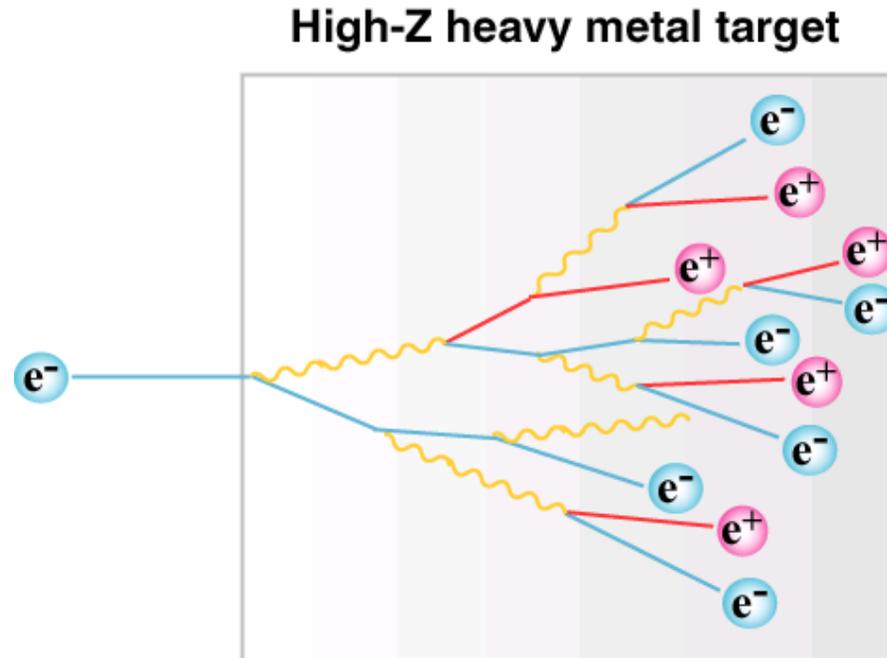
$$\propto \frac{Z^2}{m^2}$$

$Z$ : 標的原子の電荷

$m$ : 電子(陽電子)の質量

## 加速器の陽電子源

重金属標的に電子ビームを照射してできる**電磁カスケードシャワー**  
(制動放射  $\Rightarrow$  対生成) 中の陽電子を後段の**収束系**で捕獲



Cf. KEK Linac の標的は14mm厚 ( $=4X_0$ ) のタングステン (W)

## 単結晶標的

タングステン単結晶を陽電子生成用標的として使用  
⇒ 陽電子生成効率を上げる！

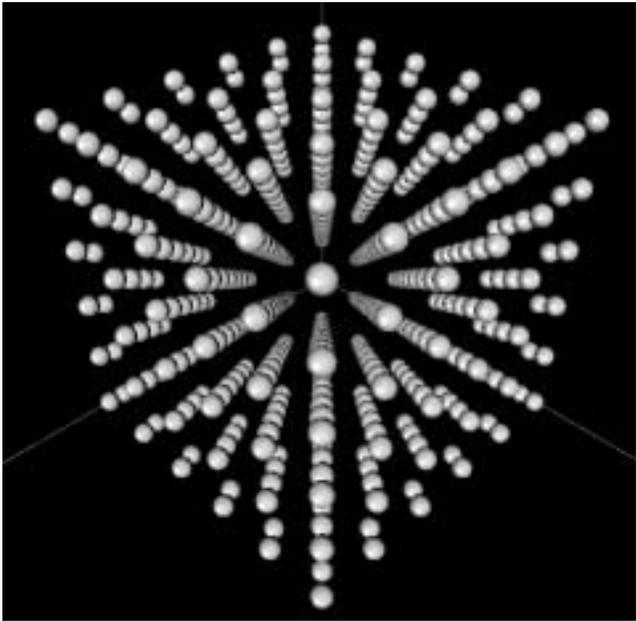
### 原理提唱：

1989年, R.Chehab et al. (Orsay Report LAL-RT 89-01,(1989))  
タングステン単結晶からのチャネリング放射を利用する陽電子  
生成用標的を提案

### 原理検証実験：

1996年, K.Yoshida et al. (Phys.Rev.Lett.,80,1437,(1998))  
KEK-田無分室の1.2-GeVの電子シンクロトロンで実験  
⇒ 陽電子収量の増大を確認

# タングステン単結晶



(by R.Hamatsu)

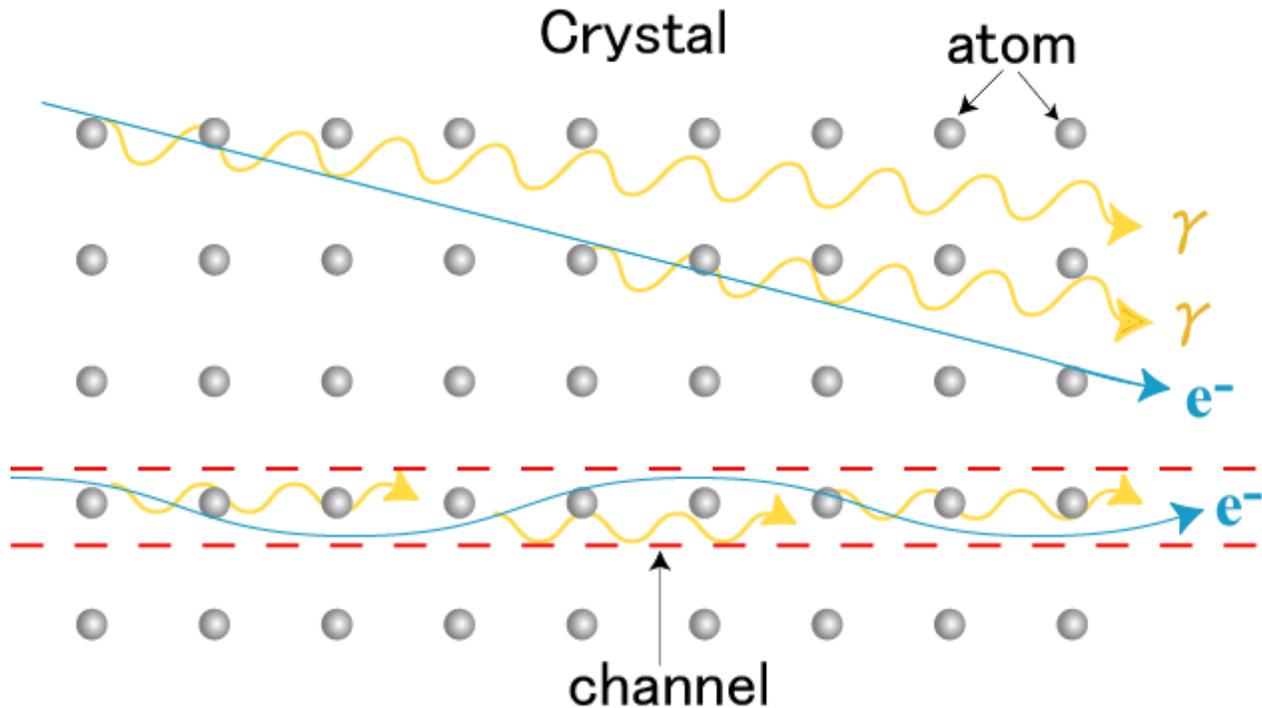
- ▶ 体心立方格子
- ▶ 原子番号:  $Z = 74$
- ▶  $\langle 111 \rangle$ 軸  $\Rightarrow$  電子ビーム入射方向  
( $\because$  結晶の軸ポテンシャルが強い)
- ▶ 結晶軸内の原子間距離:  $2.74 \text{ \AA}$
- ▶ 放射長(非結晶の場合):  $3.5X_0 \text{ (mm)}$

## 実験で使用したW単結晶のMosaicity

Crystal Thickness(mm)	FWHM, Mosaicity(mrad)
2.2	< 1.5
5.3	< 0.4
9.0	< 0.5

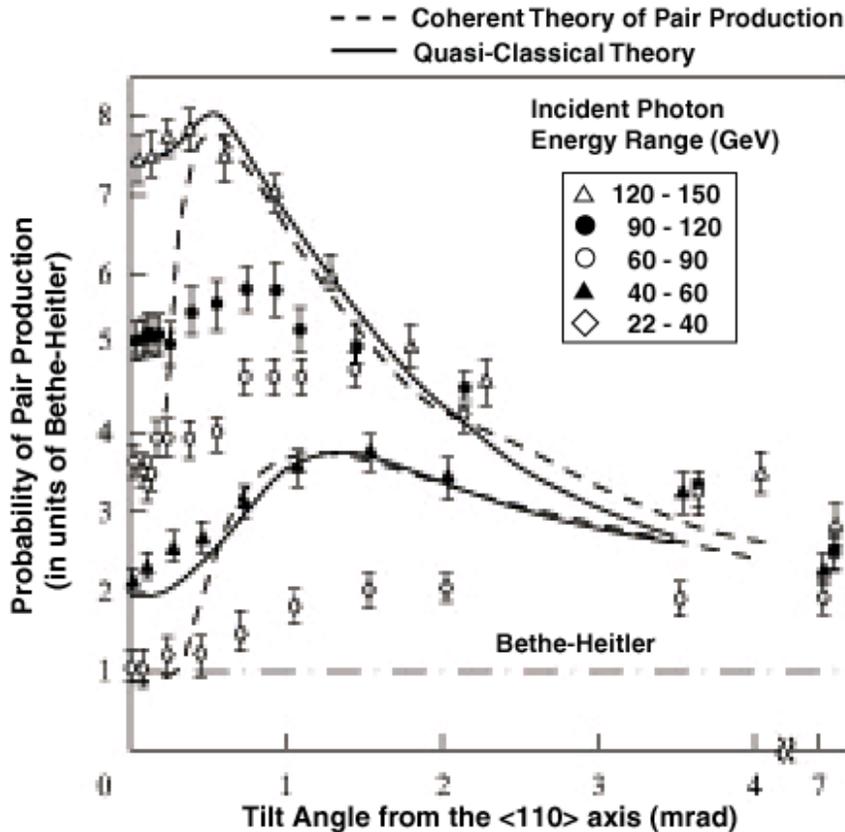
# 理論的背景 I ~ 相対論的電子と結晶電場の相互作用

チャネリング放射 と コヒーレント制動放射



# 理論的背景 II ~ 高エネルギー光子と結晶電場の相互作用

## コヒーレント電子・陽電子対生成



$\gamma$  線を結晶軸と平行に入射



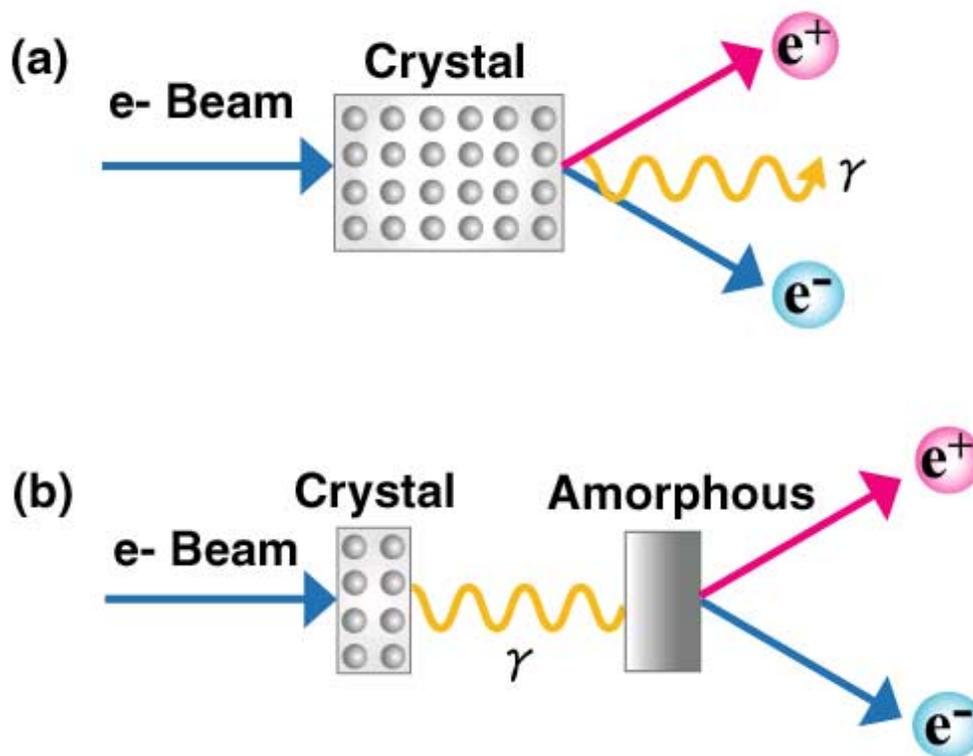
電子・陽電子対生成の確率増大

Belkacem A et al,

Phys.Rev.Lett. 58 1196,(1987)

## 具体的方法

- (a) 1つの結晶内で放射と対生成
- (b) 結晶で放射を起こし、後方の非結晶で対生成



# 本研究の目的

Bファクトリーや次世代リニアコライダーの陽電子源を目指して...

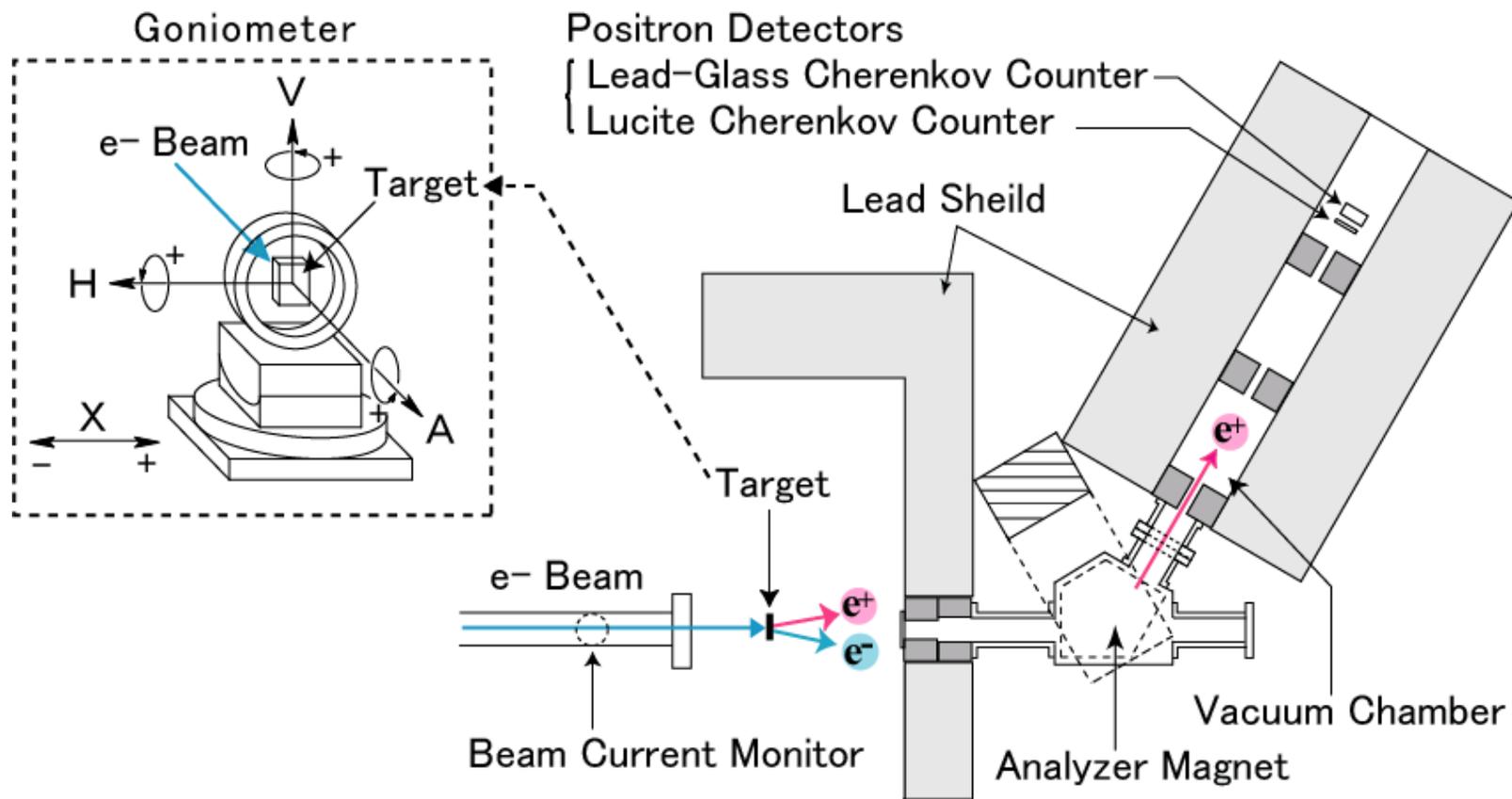
タングステン単結晶を使用する高強度陽電子源の可能性  
を実験的に検証

- ➡ 系統的な測定
  - ▶ 陽電子生成率
  - ▶ 陽電子収量の各種依存性
    - 入射電子エネルギー依存、運動量依存、標的厚依存
  - ▶ 非結晶標的との比較 etc.
- ➡ シミュレーションコードの開発

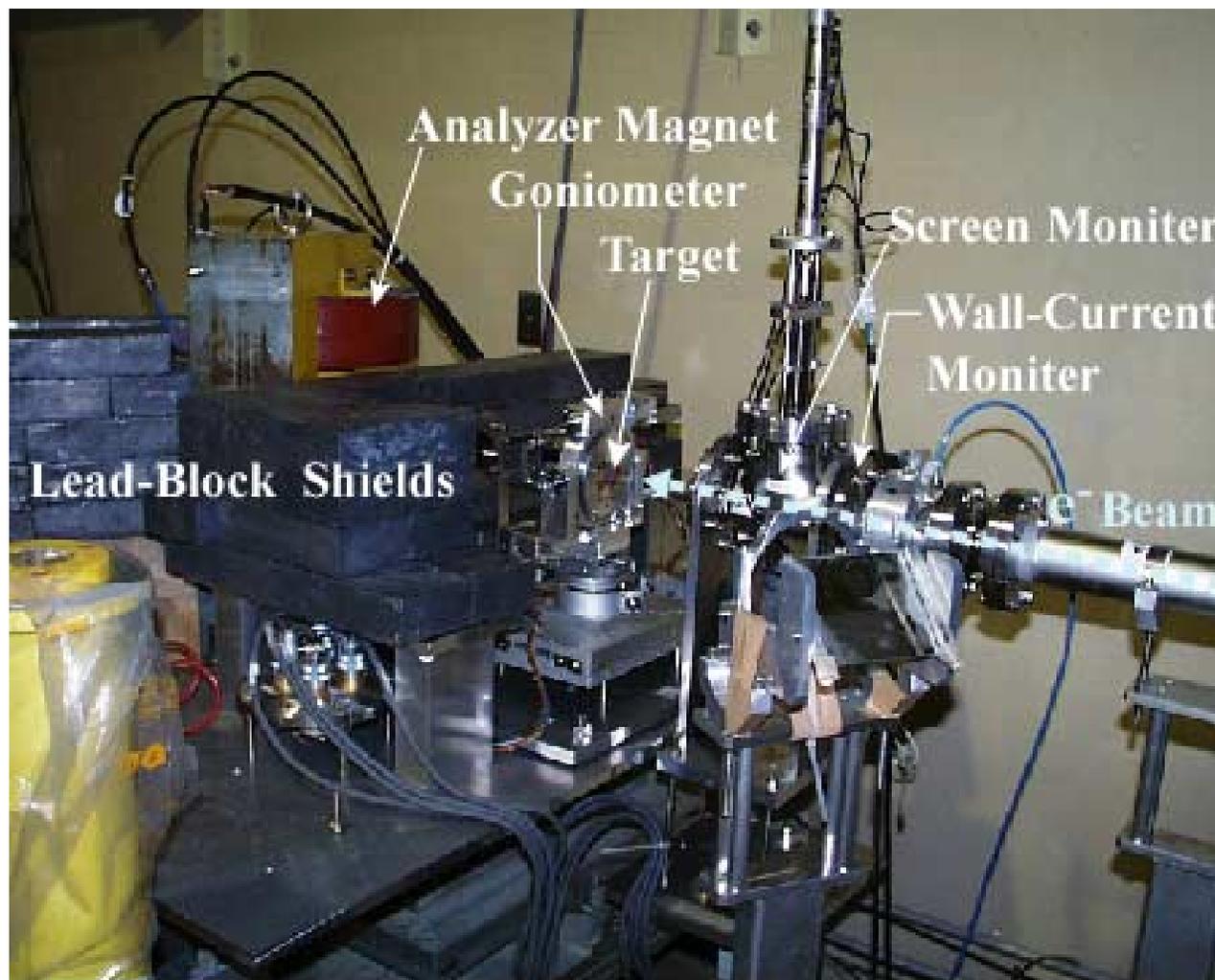
# KEK 8-GeV Linacでの実験

実施年月	内容
2000,9月	KEK 8-GeV Linacでの実験スタート W単結晶(2.2mm)とW単結晶(2.2mm)+W非結晶(5, 10mm)の測定
	⇒ 陽電子収量の増大を確認
2001,4月	W単結晶(9mm)、真空チェンバー、Xステージを導入 W単結晶(2.2mm)、W単結晶(9.0mm)の測定
	⇒ 真空での測定が可能に
	⇒ 定量的測定の知見を深める
2001,9月	W単結晶(5.3mm)を導入、標的ホルダーの改良 W単結晶(2.2、5.3、9.0mm)の測定
	⇒ 系統的なデータ取得
	⇒ 単結晶標的と非結晶標的との比較

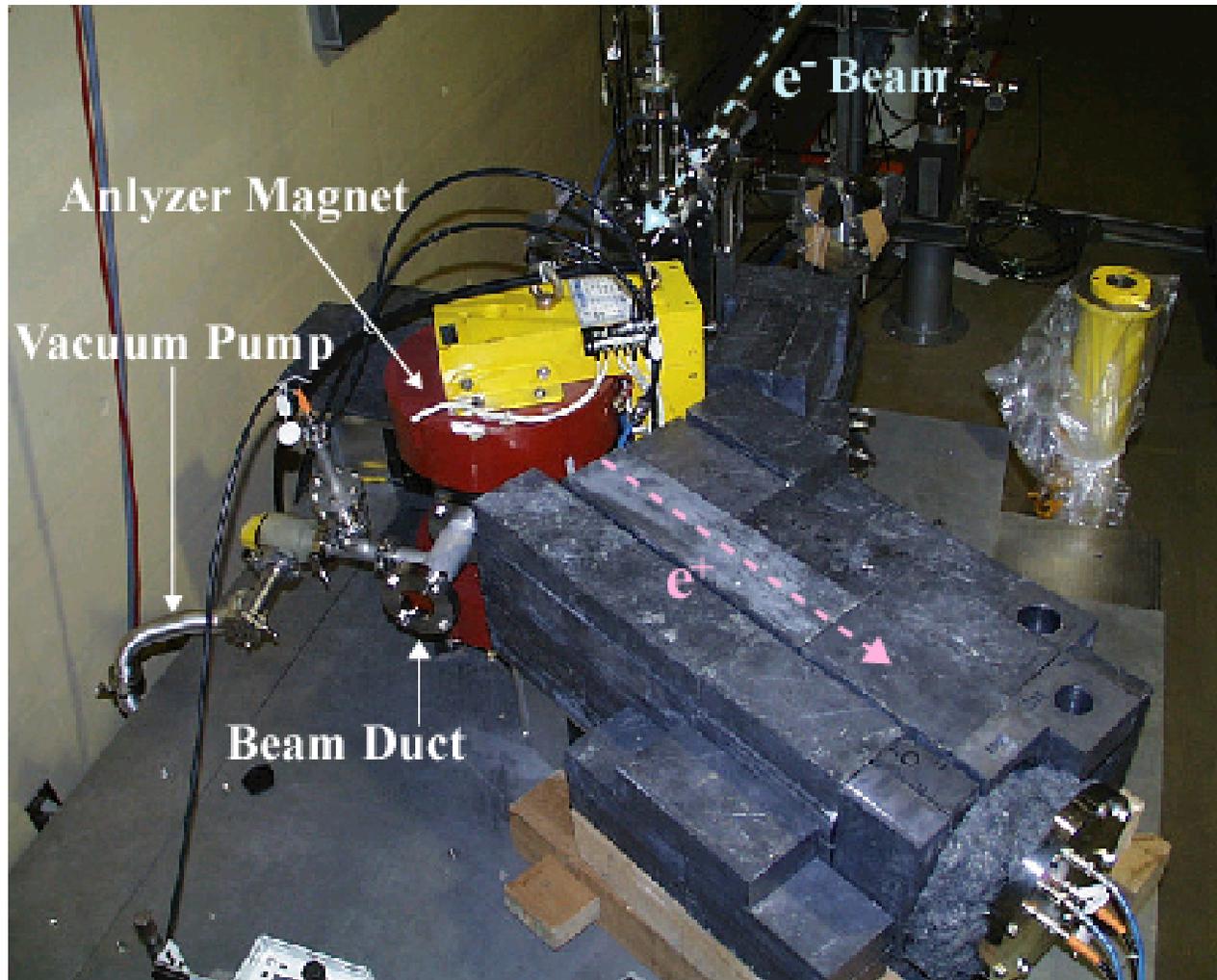
# 実験の全体図



# セットアップの写真 (前方)

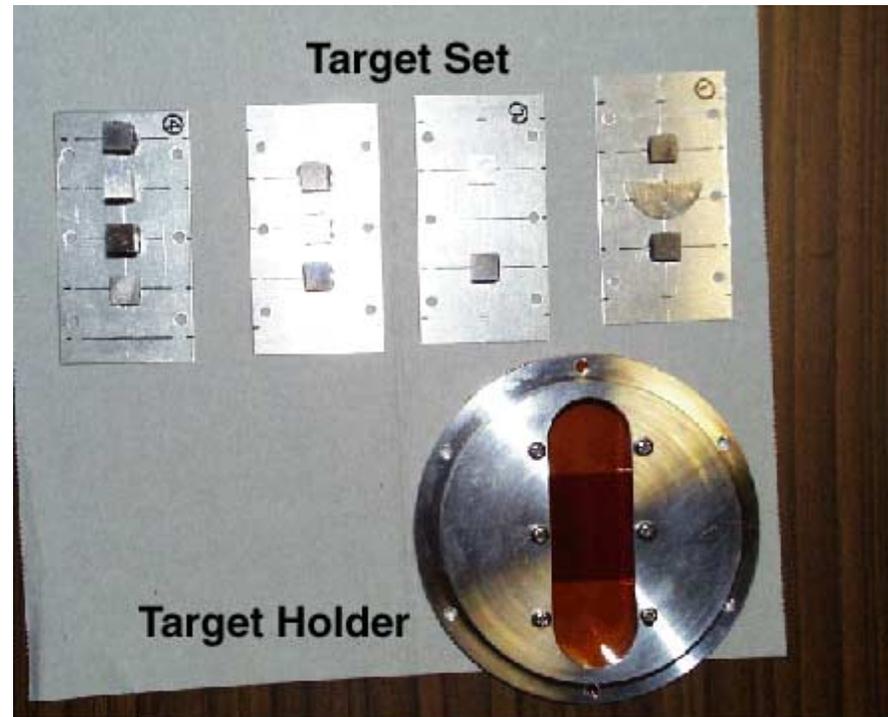


# セットアップの写真 (後方)

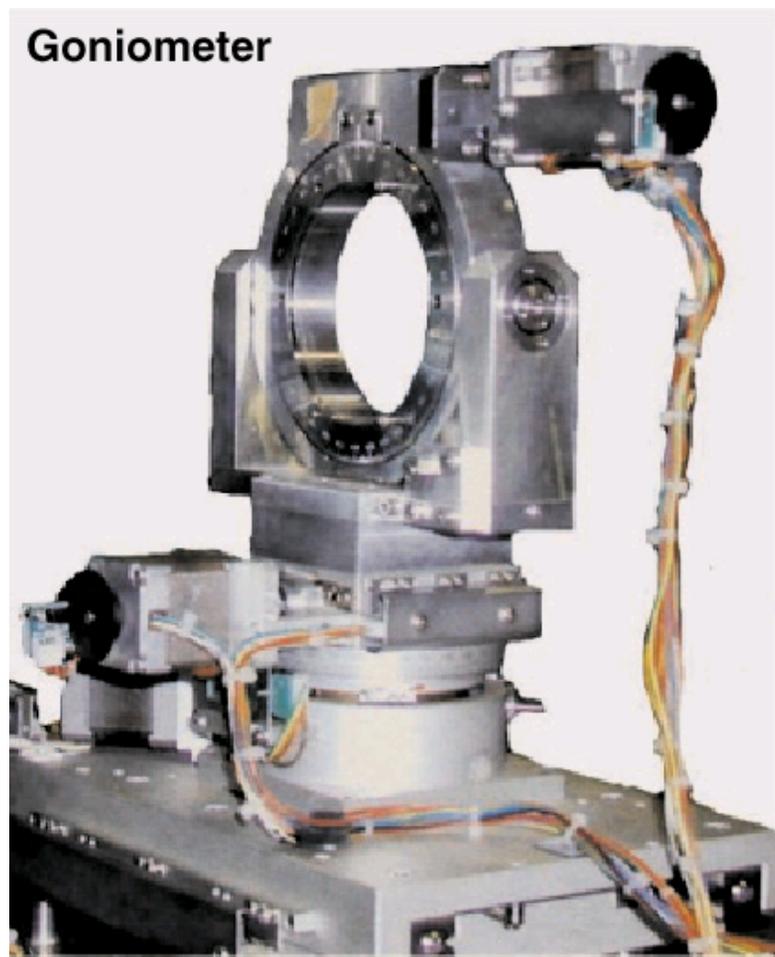


## 標的とホルダー

- タングステン単結晶 (Wc): 2.2, 5.3, 9.0 mm
- タングステン非結晶 (Wa): 3.0 ~ 25.3 mm
- 標的ホルダーには100  $\mu$ mの蛍光性フィルム(デマルケスト)を添付  $\Rightarrow$  入射ビームの位置や形状をモニターで監視

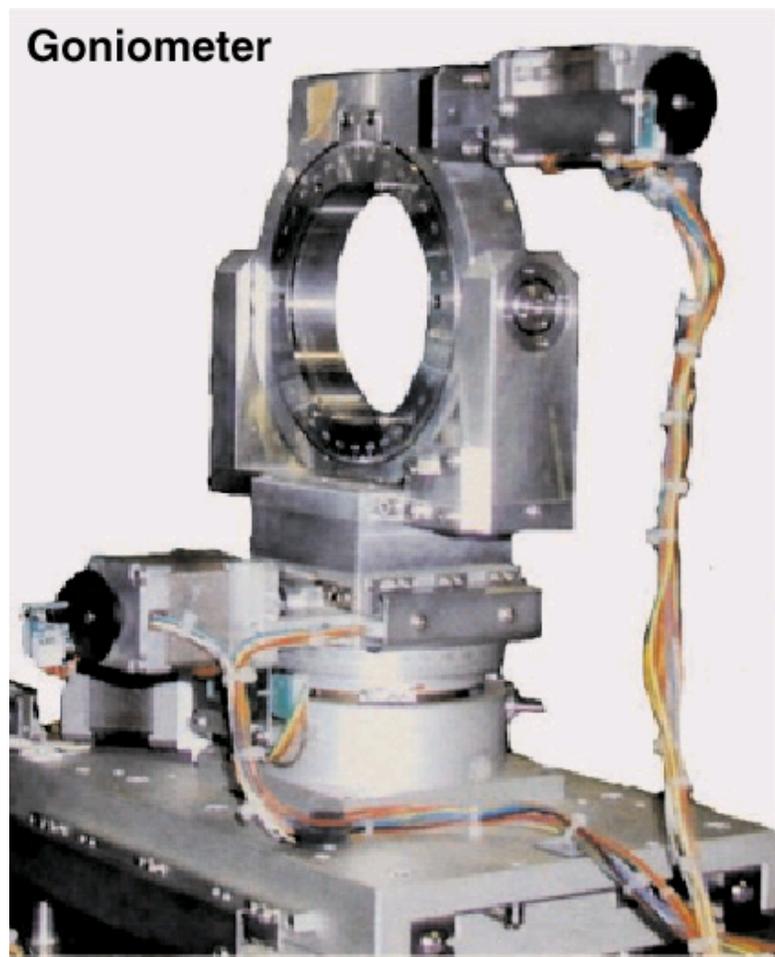


## ゴニオメーター



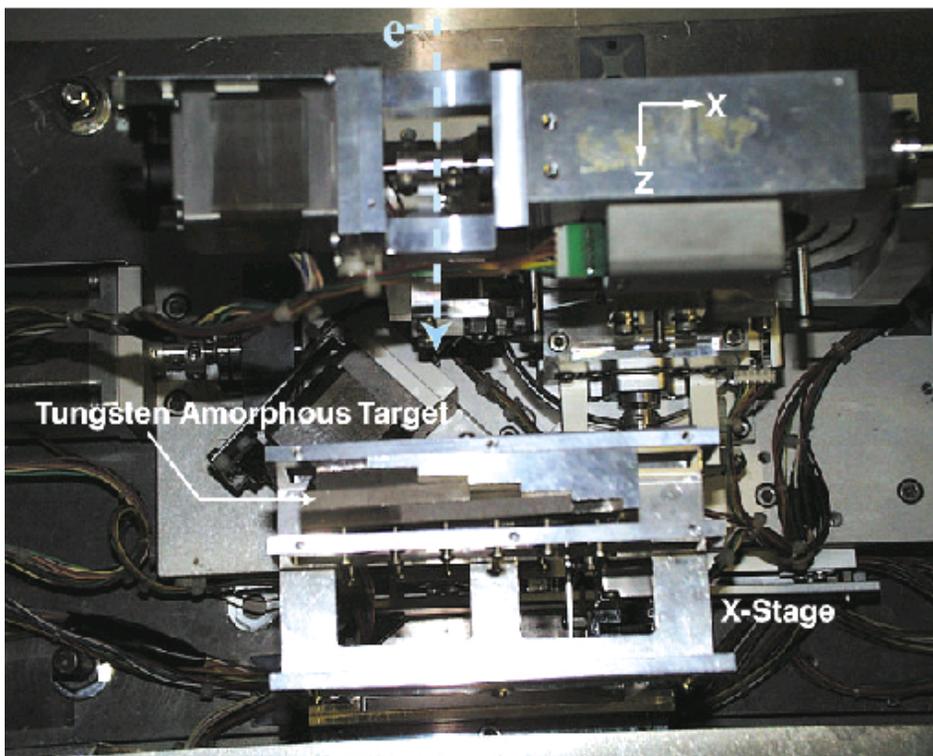
- パルスモーターによる  
A, H, V, X の4軸の精密  
回転、移動
- 手動及びRS-232Cインターフェイス  
によるPC制御が可
- DAQシステムと連動

## ゴニオメーター



- パルスモーターによる  
A, H, V, X の4軸の精密  
回転、移動
- 手動及びRS-232Cインターフェイス  
によるPC制御が可
- DAQシステムと連動

## Xステージと階段状標的

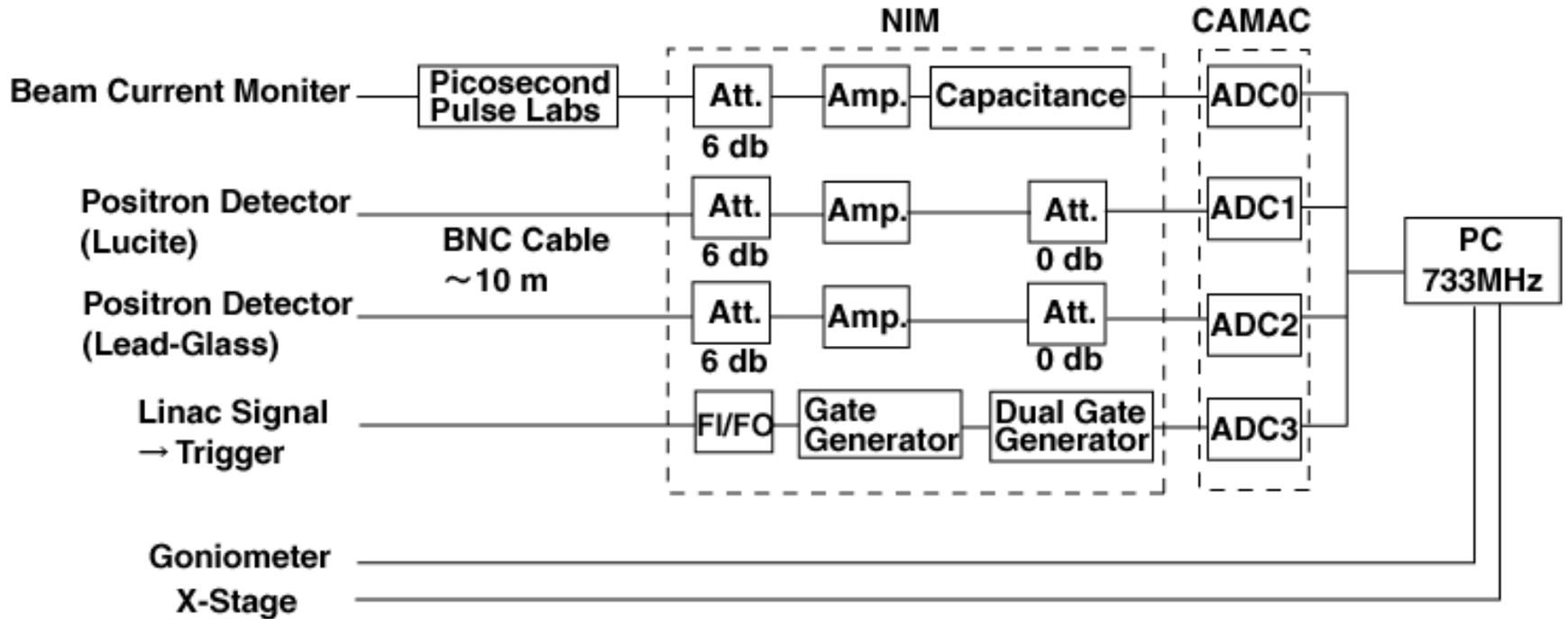


- 階段状に厚さを変えた非結晶標的をXステージに搭載



- X軸方向に動かして、短時間に標的厚依存のデータを取得可

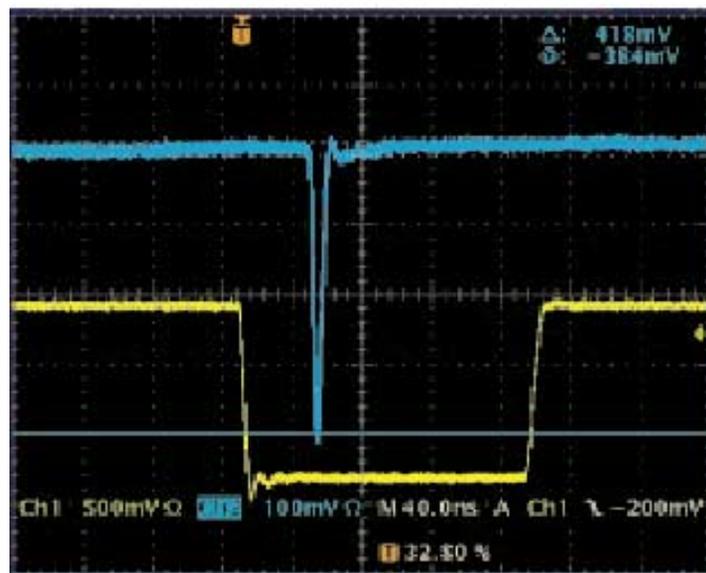
# 回路図



➡ CAMAC、ゴニオメーター、XステージはPCで制御

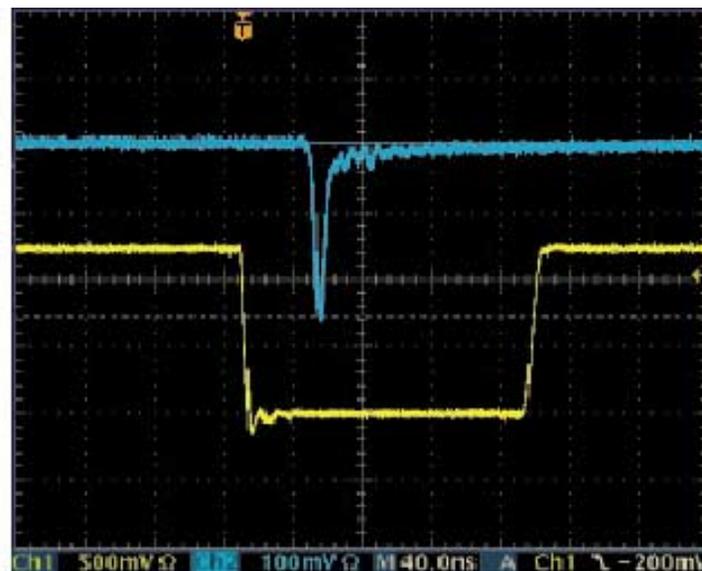
## チェレンコフカウンターのシグナル

(陽電子の数)  $\propto$  (チェレンコフカウンターのパルス波高の積分値)



ルーサイトチェレンコフカウンター

パルス幅: 7 ns (FWHM)



鉛ガラスチェレンコフカウンター

8 ns (FWHM)

# 実験の条件

## ➡ 入射電子ビーム

エネルギー:	8 GeV
強度:	0.2 nC/bunch ( $\sim 10^9 e^-$ )
繰り返し:	2 Hz
バンチ幅:	10 ps

## ➡ 陽電子生成用標的

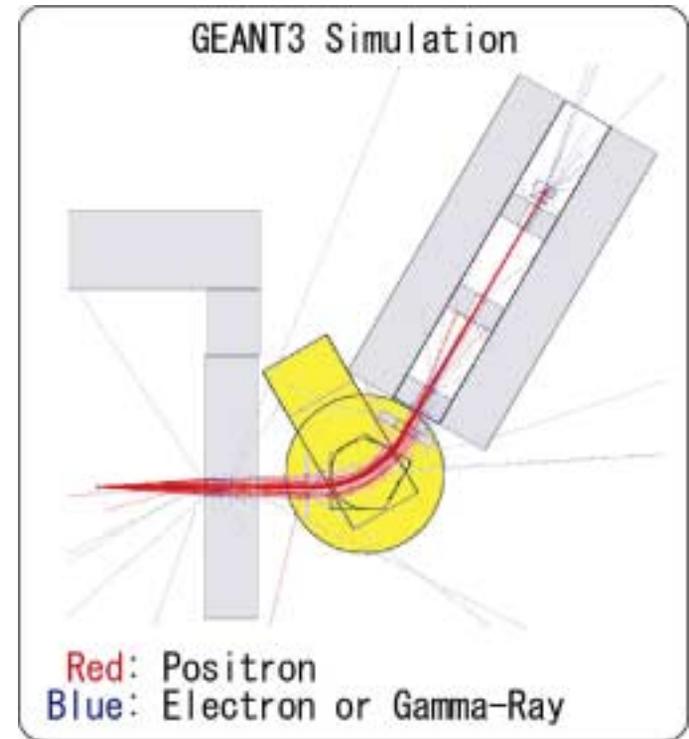
<b>W単結晶 (Wc):</b>	$\langle 111 \rangle$ 軸 2.2 mm, 5.3mm, 9.0 mm
<b>W非結晶 (Wa):</b>	3.0 ~ 25.3 mm ( $0.9X_0 \sim 7.2X_0$ )

## 検出系のアクセプタンス

検出系（スペクトロメーター，検出器）が検出可能な陽電子の放出角度と運動量広がり的大小さ：

$$\delta P \delta \Omega = \Delta P \Delta \Omega \frac{N_1}{N_0}$$

Positron Momentum $P_{e^+}$ (MeV/c)	Acceptance $\times 10^{-4}$ (MeV/c · Sterad.)
10	$2.47 \pm 0.07$
15	$3.80 \pm 0.10$
20	$4.81 \pm 0.12$



$$\begin{cases} 0 \leq \theta \leq 0.08, & 0 \leq \phi \leq 2\pi, \\ 0.8 P_0 \leq P_{e^+} \leq 1.2 P_0 \end{cases}$$

の一様分布で陽電子を発生、検出

# 解析方法

❏ 実験データの各点は測定の平均値:  $\bar{x} \pm \delta\bar{x}$

$n$  は測定回数で、

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_n \frac{(Raw\ Data) - (Background) - (Pedestal)}{(Bunched\ Beam\ Current)}$$

$$\delta\bar{x} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

❏ バックグラウンドとペDESTALの補正

❏ **ビーム電流値で規格化**

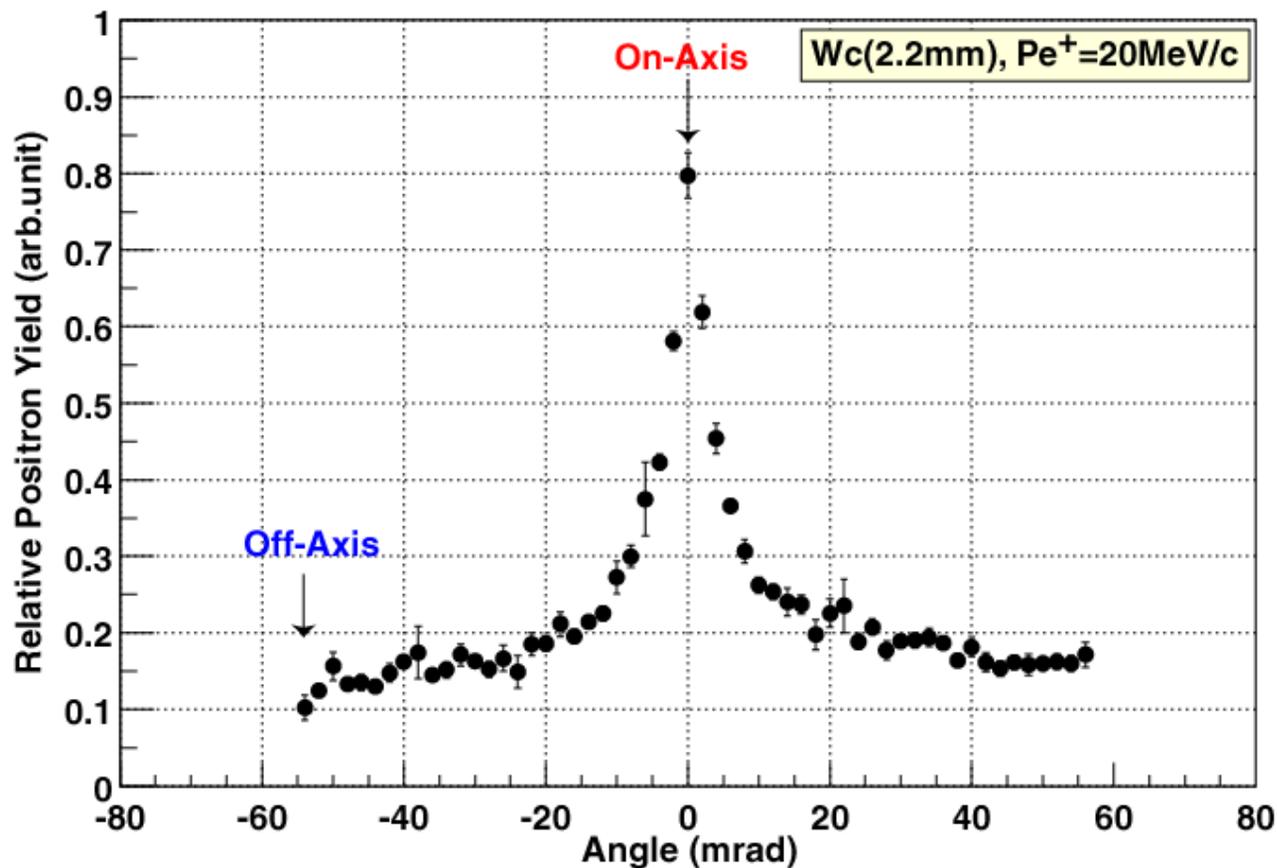
⇒ バンチあたりの電流変動をなくす

# 単結晶標的のデータ

## - 内容 -

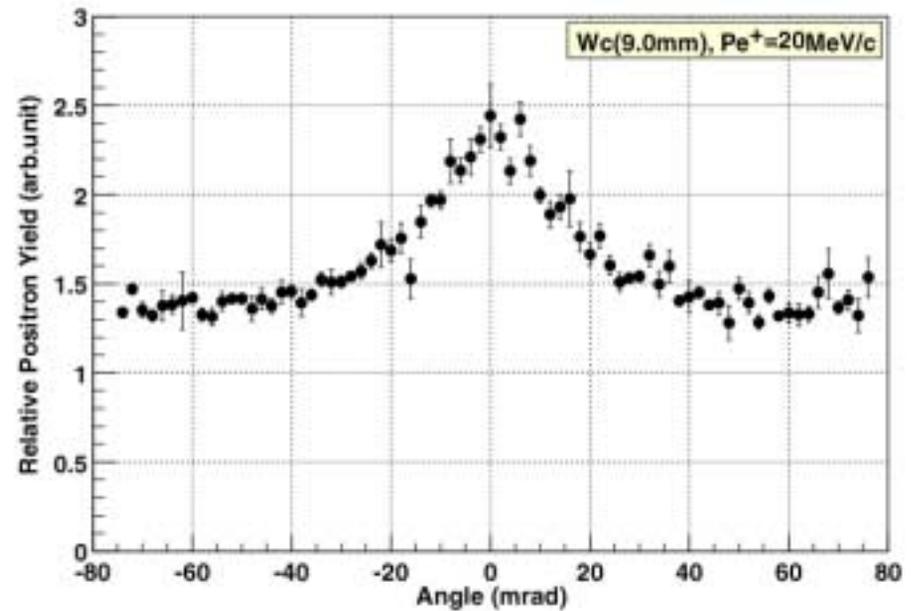
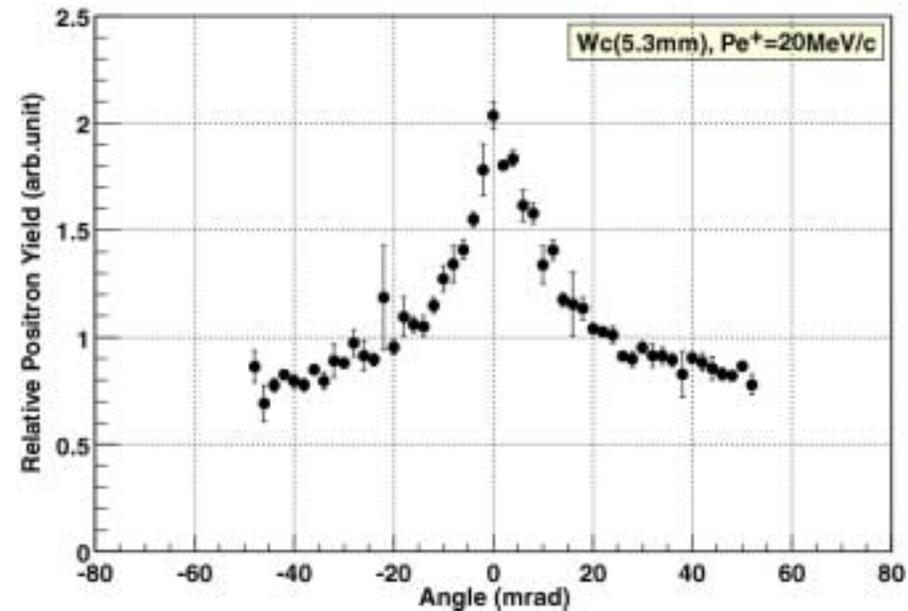
- ▶ ロッキングカーブ:  $W_c(2.2)$ ,  $W_c(5.3\text{mm})$ ,  $W_c(9.0\text{mm})$
- ▶ ロッキングカーブのピーク幅
- ▶ エンハンスメント
- ▶ 陽電子収量の運動量依存
- ▶ 単結晶のOff-Axisと非結晶標的の比較

## ロッキングカーブ(単結晶標的)

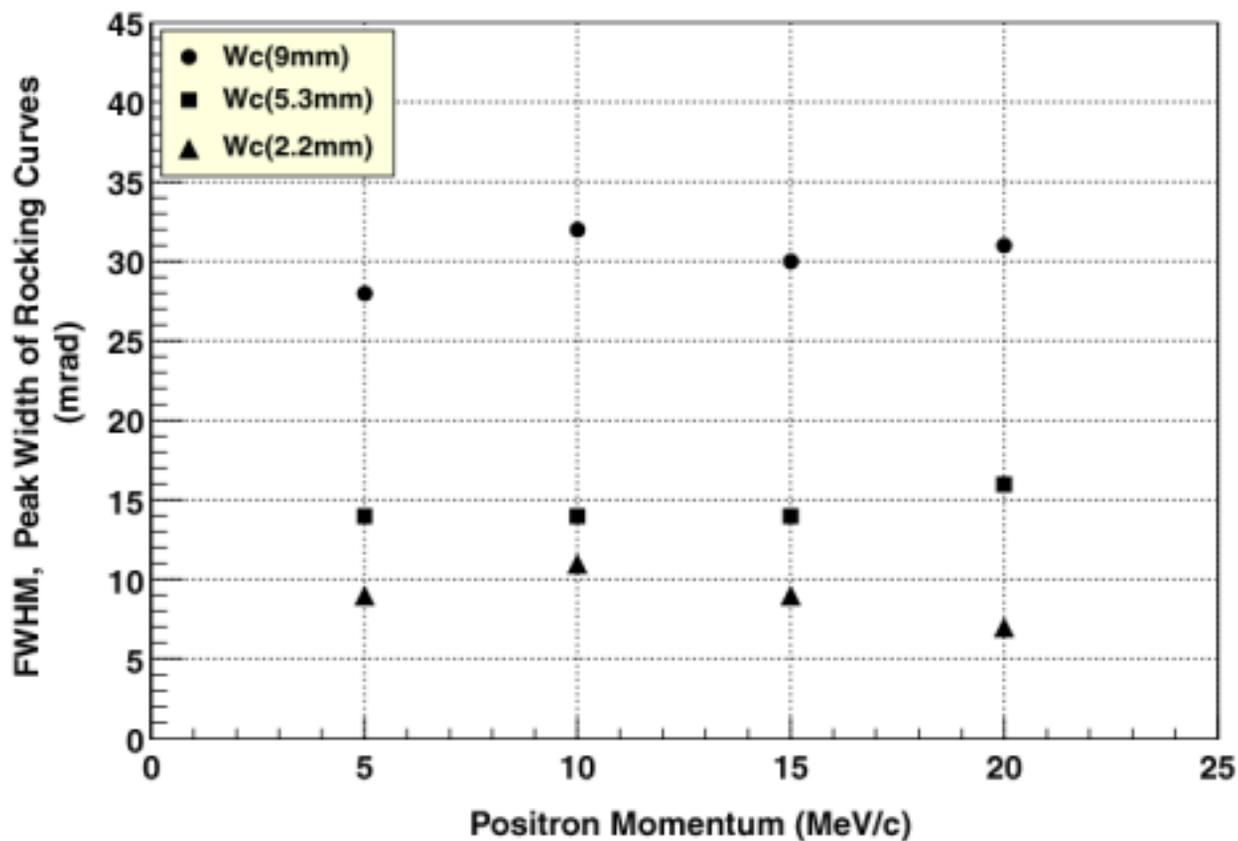
 $Wc(2.2\text{mm}); Pe^+ = 20\text{MeV}/c$ 

# ロッキングカーブ(単結晶標的)

Wc(5.3mm), Wc(9.0mm);  $Pe^+ = 20\text{MeV}/c$



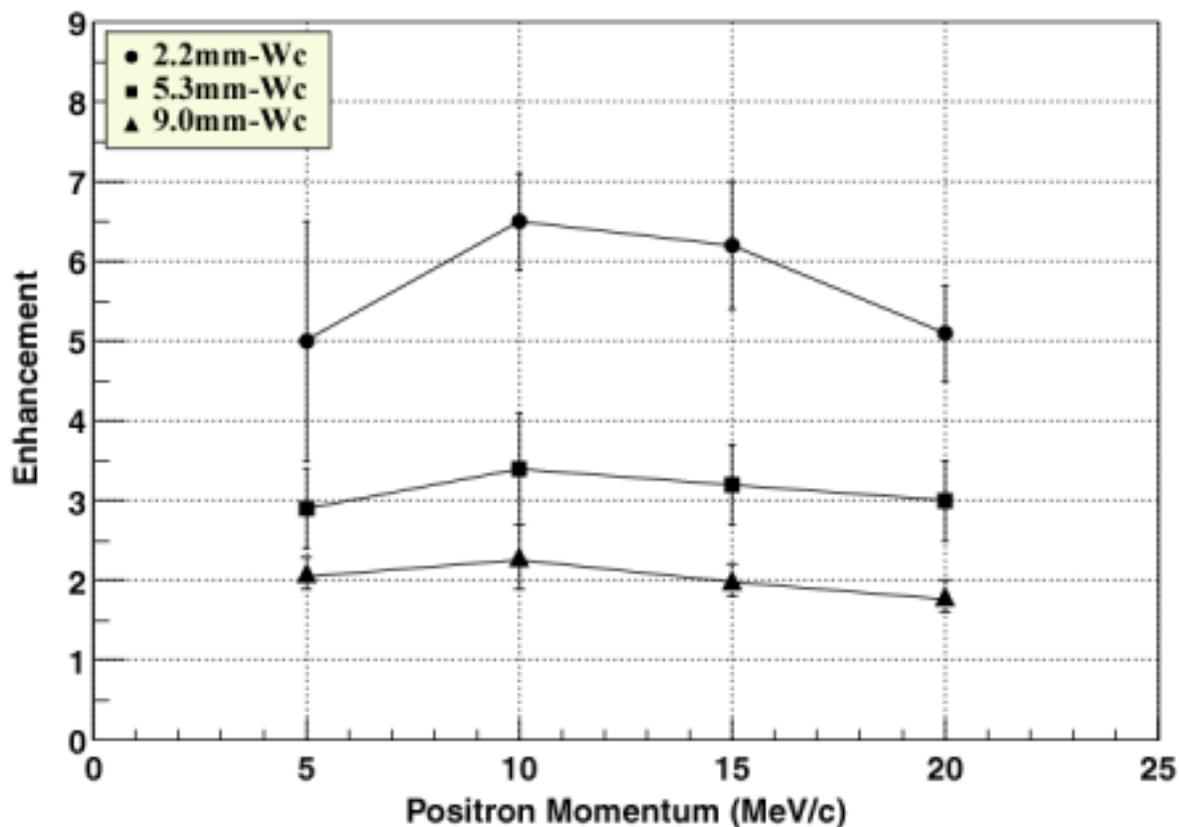
## ロッキングカーブのピーク幅



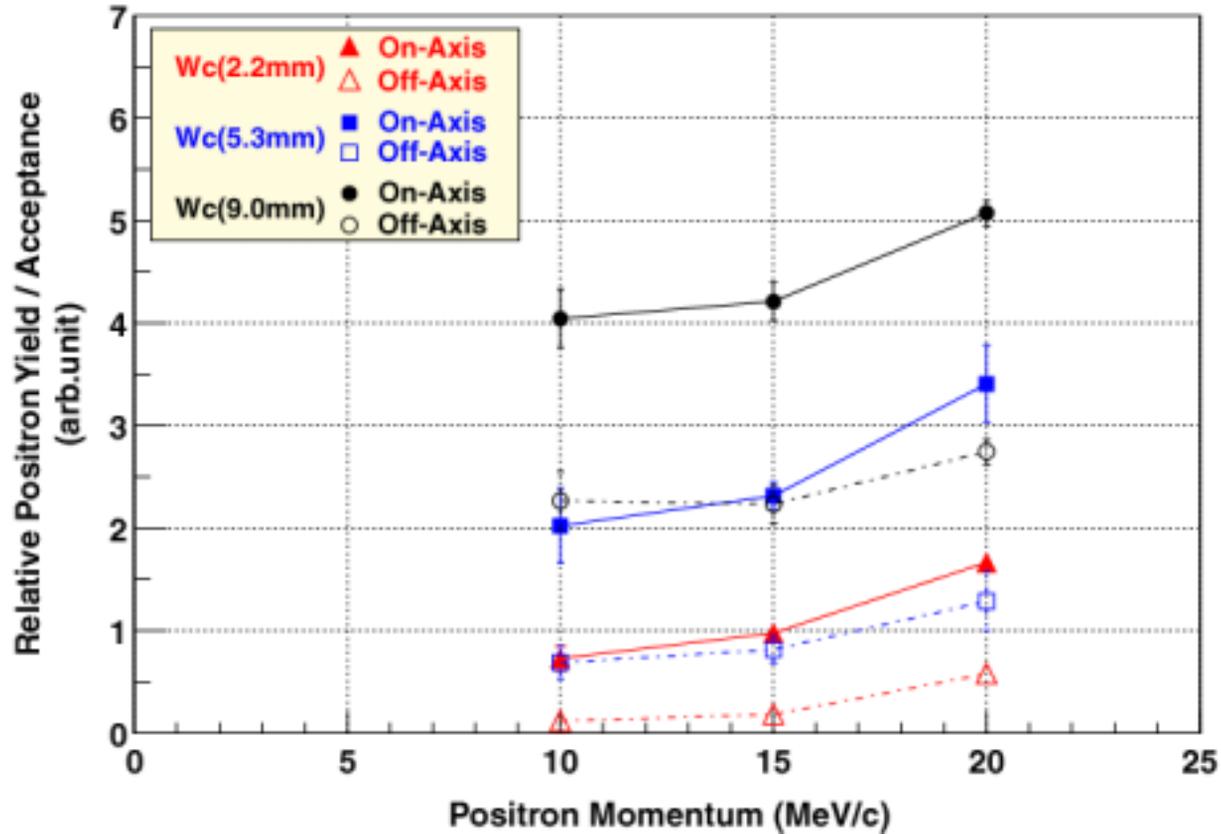
Cf. Lindhard角(@8-GeV):  $\psi_c \sim 0.43$  mrad

# エンハンスメント

定義： タングステン単結晶<111>軸がビーム軸と一致  
(On-Axis)する場合と軸から十分外れた(Off-Axis)  
場合の陽電子生成率の比



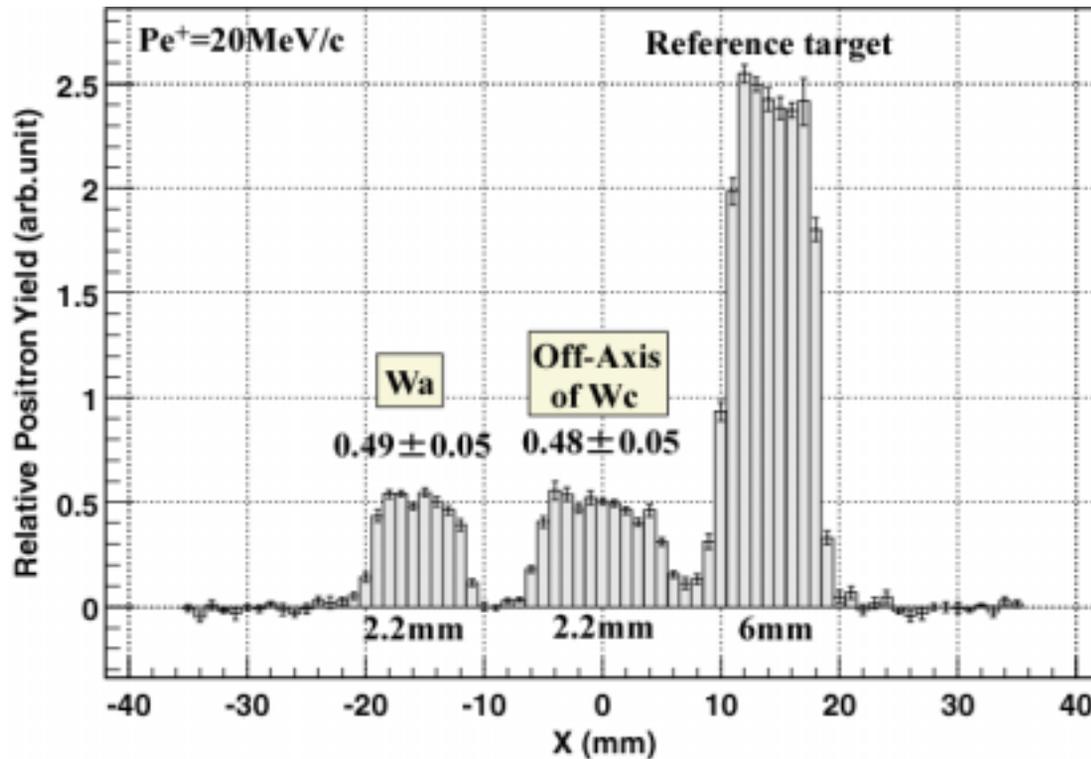
## 陽電子収量の運動量、標的依存



(異なる運動量どうしを比較するためにアクセプタンスで補正)

# 単結晶のOff-Axisと非結晶

Q. 本当に、単結晶のOff-Axisと非結晶は同じ陽電子収量を与えるか？



A. 誤差の範囲内で陽電子収量は一致。

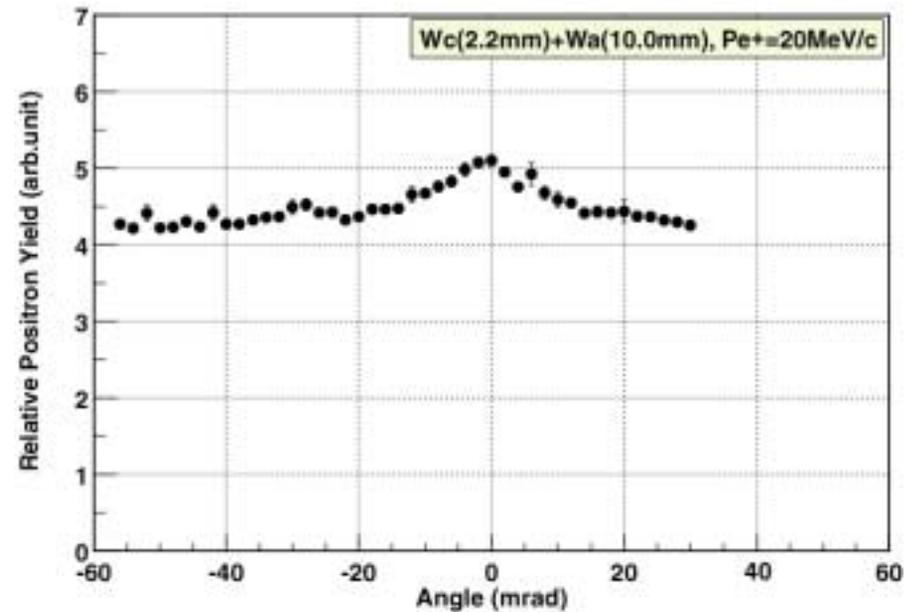
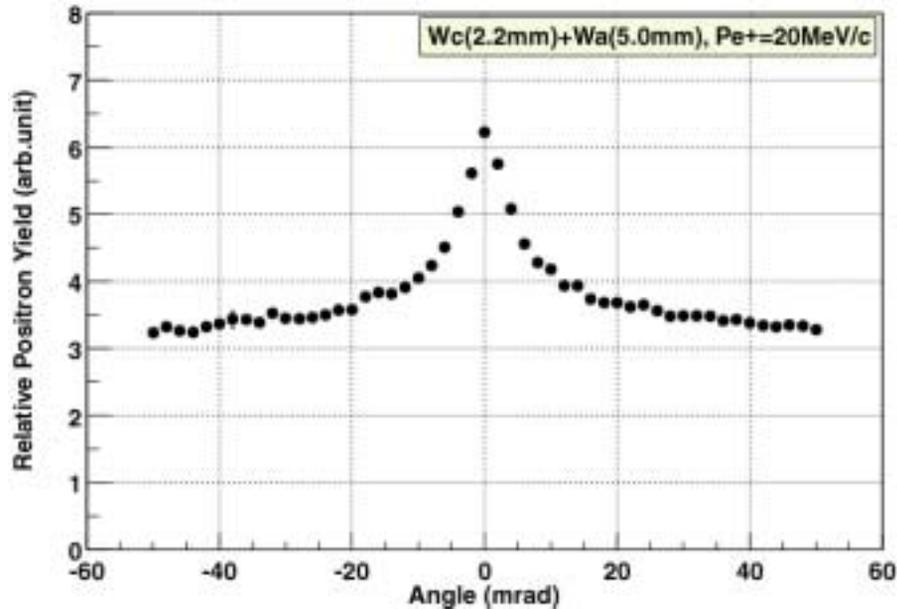
# 組み合わせ型標的のデータ

## － 内 容 －

- ▶ ロッキングカーブ:  $W_c(2.2\text{mm})+W_a(5, 10\text{mm})$   
 $W_c(9.0\text{mm})+W_a(2, 4\text{mm})$
- ▶ エンハンスメント

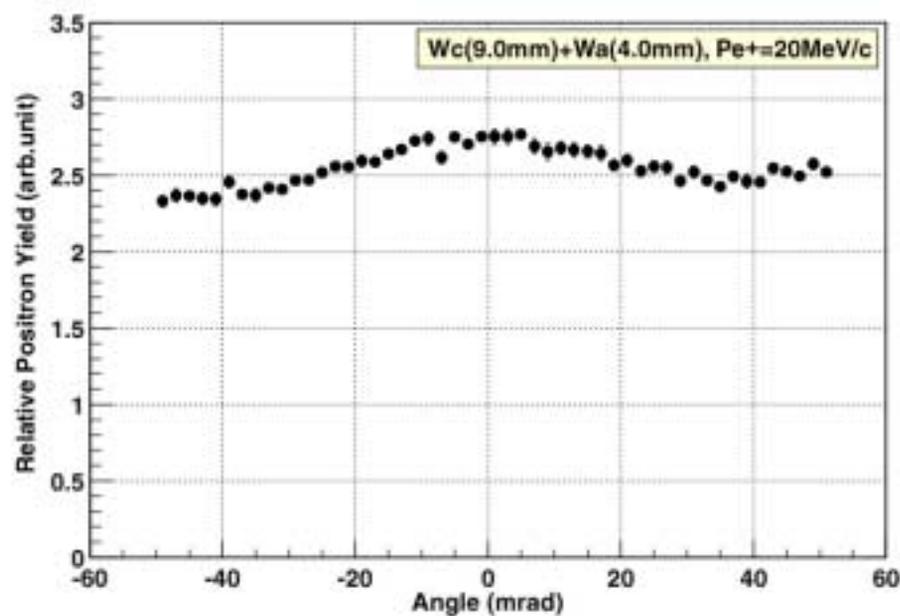
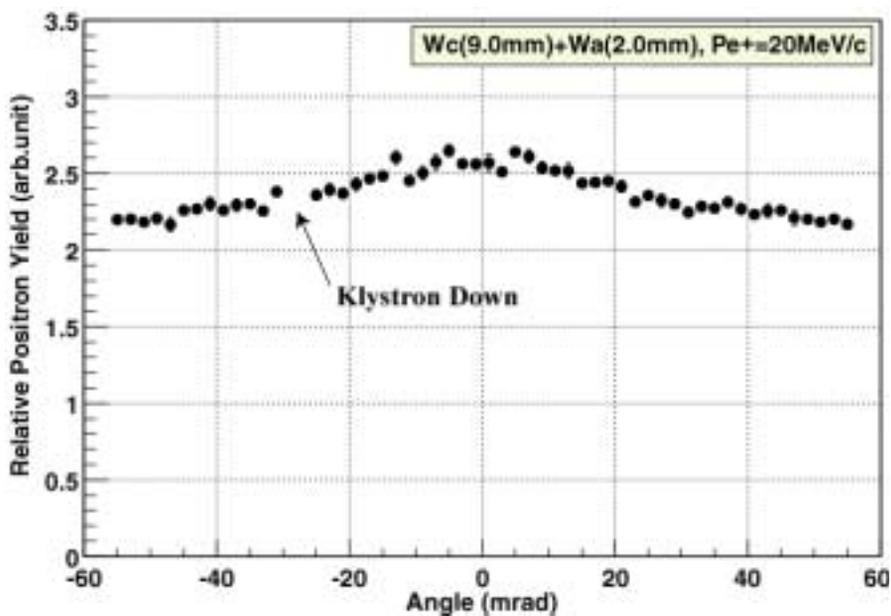
# ロッキングカーブ(組み合わせ型標的)

Wc(2.2mm)+Wa(5, 10mm);  $Pe^+ = 20\text{MeV}/c$



(HVの違いのため縦軸の比較はできない)

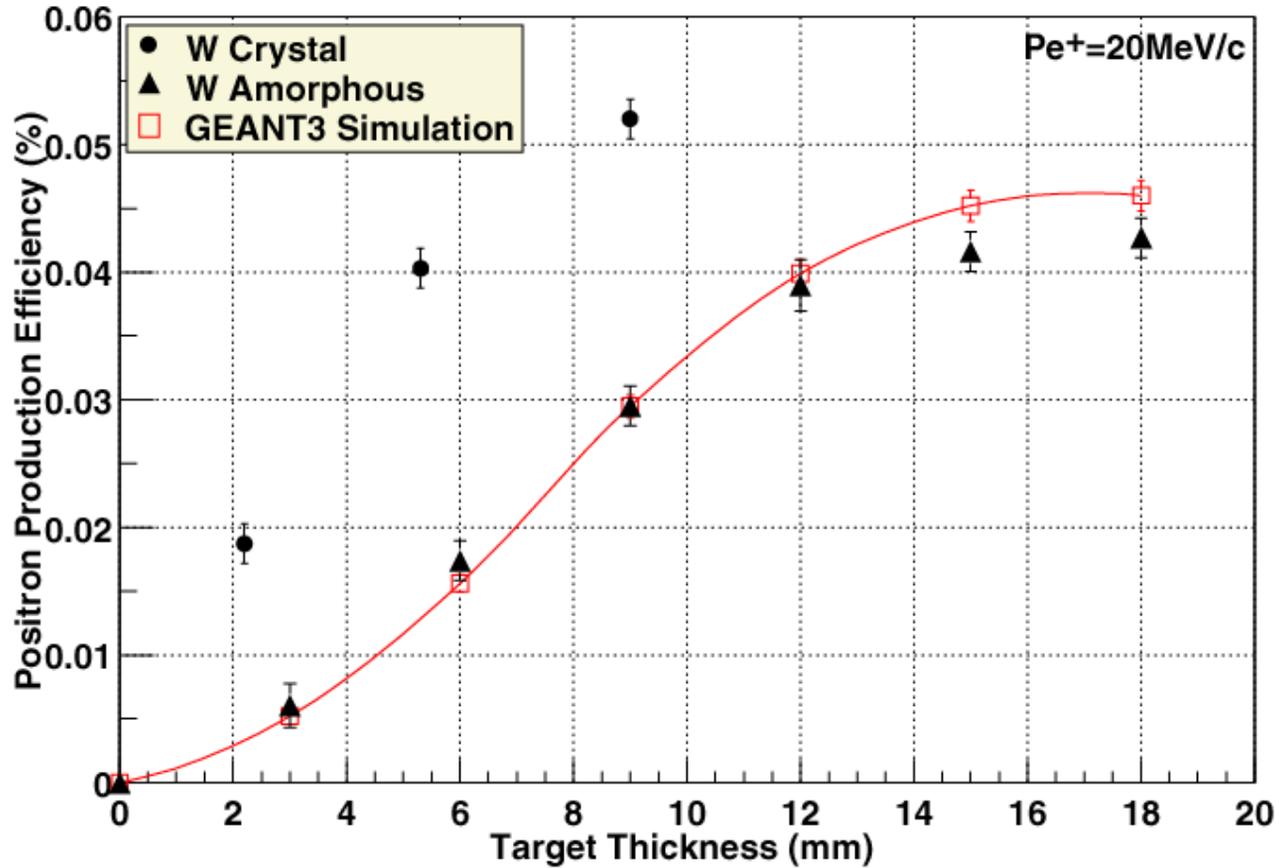
## ロッキングカーブ(組み合わせ型標的)

 $Wc(9.0\text{mm}) + Wa(2, 4\text{mm}); Pe^+ = 20\text{MeV}/c$ 

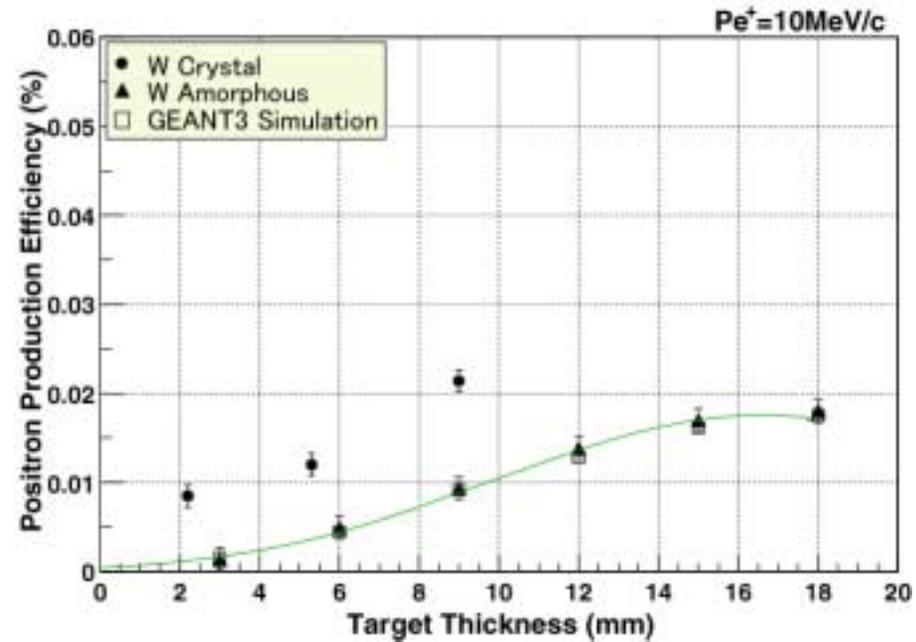
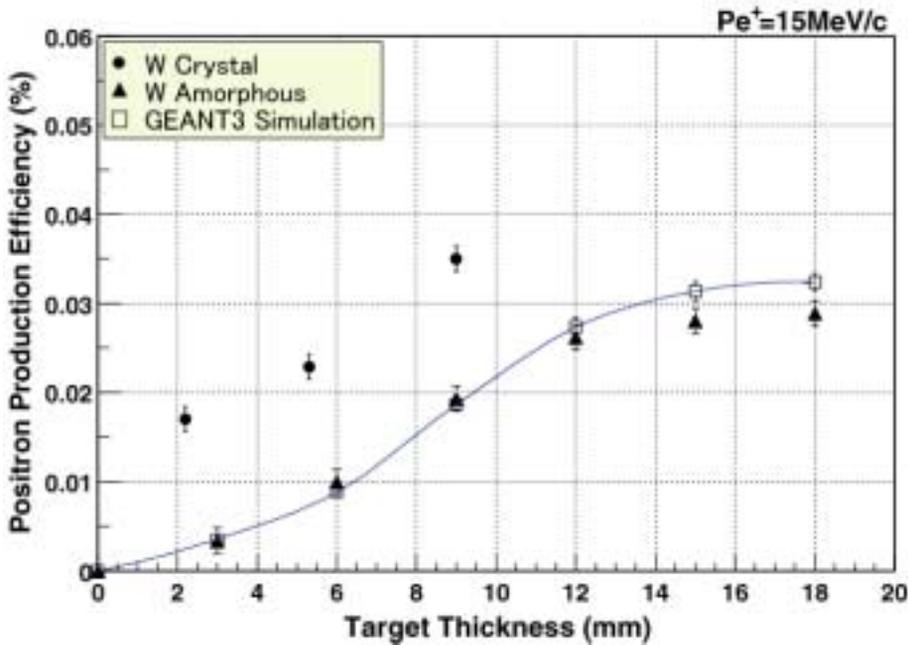
# エンハンスメント

組み合わせ型標的 ( $W_c + W_a$ ) のエンハンスメントは  
単結晶標的ほど大きくなかった

Target (mm)				Enhancement
$W_c$	+	$W_a$	Total	
2.2	+	5.0	7.2	$1.9 \pm 0.1$
2.2	+	10.0	12.2	$1.2 \pm 0.1$
9.0	+	2.0	11.0	$1.3 \pm 0.1$
9.0	+	4.0	13.0	$1.2 \pm 0.1$

陽電子生成率:  $Pe^+ = 20\text{MeV}/c$ 

# 陽電子生成率: $Pe^+ = 10, 15\text{MeV/c}$



Cf. KEK Linacで使用している標的: 14mm厚のWa

## 8-GeV Linacでの実験の結果

### 単結晶標的

- エンハンスメント:  $2.2\text{-}W_c > 5.3\text{-}W_c > 9.0\text{-}W_c$
- 陽電子収量:  $2.2\text{-}W_c < 5.3\text{-}W_c < 9.0\text{-}W_c$
- ピーク幅、陽電子収量: 明確な運動量依存性はみられなかった
- 非結晶標的との比較: **1.2~1.3倍** (cf. 9mmWc, 14mmWa)

### 組み合わせ型標的

- 単結晶標的ほどのエンハンスメントはなかった
- HVの異なるデータ間で比較ができる測定はできていない

## 再考 ～ 原理と実験の両側面から

W単結晶を陽電子生成用標的に使うことのメリットは？

■ 加速器の収集系で捕獲可能な陽電子を増やす！

→ 低運動量の陽電子数増大

- ▶ 8-GeV電子ビームでは、**1.2～1.3倍** (cf. 9mmWc, 14mmWa)
- ▶ 入射ビームが高エネルギーになるほど結晶の効果(大)  
⇒ チャネリング、コヒーレント制動放射、コヒーレント対生成

→ 角度広がりを押さえる

- ▶ 生成された陽電子の**多重散乱小**(結晶中は阻止能小)
- ▶ 非結晶標的より薄くできれば

## つづき...

## ■ 簡便である！

- 基本的には、標的を単結晶に置き換えるだけ
  - ⇒ 装置の大幅な変更を必要しない
- 厚い単結晶標的ではロックンクカーブのピーク幅が広い
  - ⇒ ビーム軸を結晶軸にあわせるのが容易

## 残された課題

- 標的の最適厚(単結晶標的、組み合わせ型標的)
- 熱負荷、放射線損傷
- ロックンクカーブのピーク幅(→陽電子を増やすメカニズム?)
- さらに高い入射エネルギーでは? etc.

## 今後

- ④ まず... KEK Bファクトリーでの使用の可能性を見極める  
4-GeV Linacでの定量的なデータを獲得  
⇒ 2002年1月に実験予定
- ④ また、... リニアコライダーでの使用を念頭において  
さらに高エネルギーでの実験(検討中)
- ④ 諸課題(熱負荷etc.)の解明、克服
- ④ 信頼のおけるシミュレーションコードの開発