

# 8-GeV電子ビームによるタンゲステン 単結晶からの陽電子生成の研究

笹原和俊

東京都立大学大学院 理学研究科  
高エネルギー実験研究室

# 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)



トムスクエ科大学  
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)

# 素粒子物理学と加速器

## ➡ 21世紀、素粒子物理学の目標

素粒子標準模型の精密検証

Beyond the Standard Model

⇒ **高エネルギー**かつ**高強度**の加速器が必要

## ➡ 電子・陽電子衝突型加速器

信号の統計精度の向上 ⇒ **ルミノシティの増強**

⇒ **強いては、陽電子の高強度化！**

Cf.

➤ KEK Bファクトリー:  $5.5 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

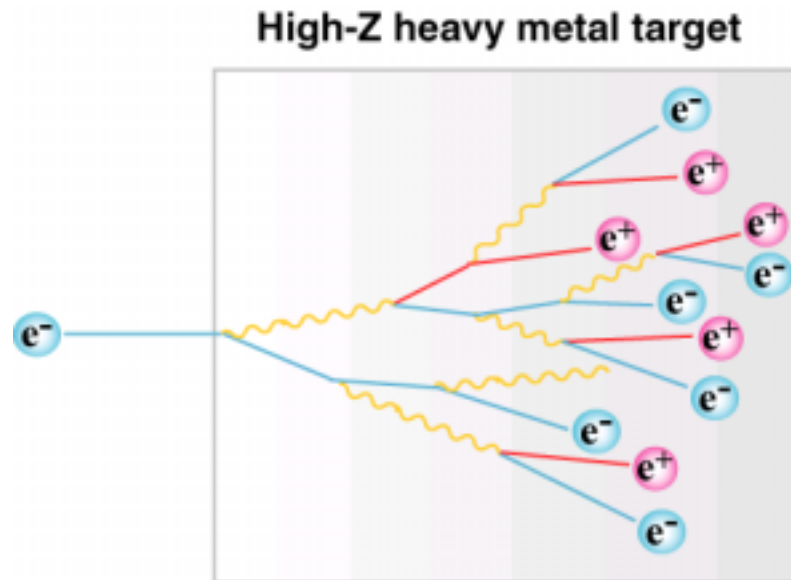
➤ 次世代リニアコライダー:  $> 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

➤ スーパーBファクトリー:  $> 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

# 加速器の陽電子源

重金属標的(非晶質)に電子ビームを照射

⇒ 電磁カスケードシャワー中の陽電子を後段収束系で捕獲



全断面積:

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

$$\propto Z^2$$

$Z$ : 標的原子の電荷

Cf. KEK Linac { 標的: 14mm (=4 $X_0$ ) のタングステン非晶質  
収束系アクセプタンス:  $8.2 \leq P_{e^+} \leq 11.6$  (MeV/c)

# 既存の方法の問題点

既存の方法で高強度の陽電子を得るためには...

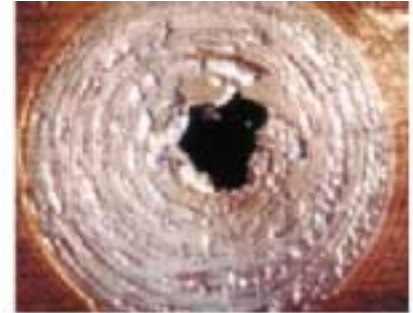
(方法) 入射ビームの**エネルギー**、**強度**を上げ、  
かつ収集系の効率を向上



- ▶ **パルスの熱負荷**による標的破壊
- ▶ **放射線損傷**
- ▶ 生成された陽電子の**多重散乱(大)**



既存の方法だけでは限界がある



熱負荷等により損傷したSLCのW標的  
(Snowmass2001)

# 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:

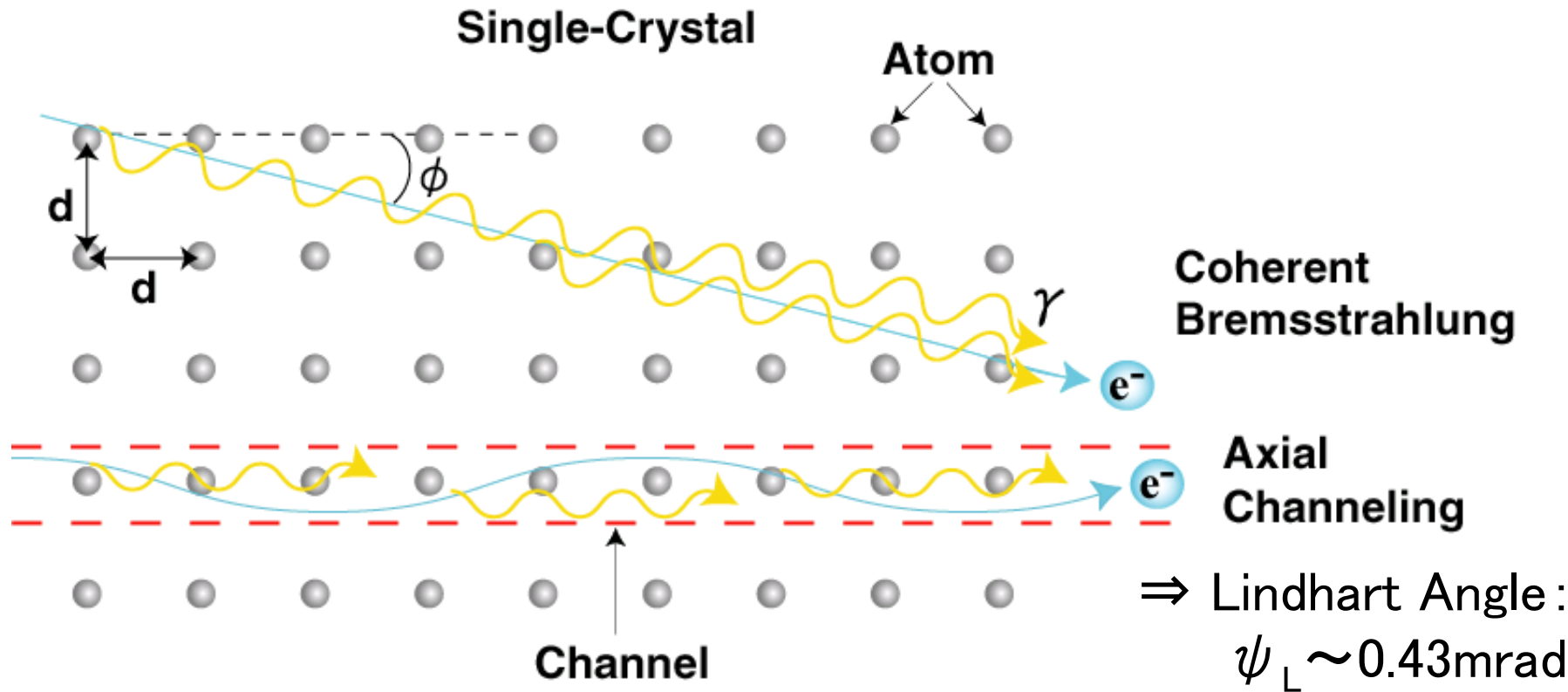
1996年, K.Yoshida et al. (Phys.Rev.Lett.,80,1437,(1998))

KEK-田無分室の1.2-GeVの電子シンクロトロン(ES)で実験

⇒ 陽電子収量の増大を確認

# 理論的背景 ~ 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



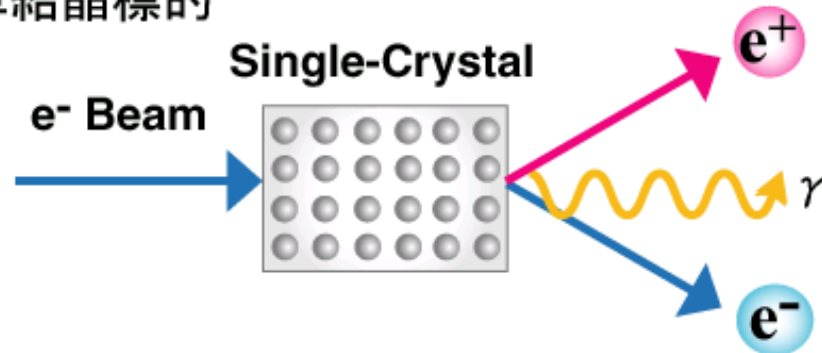
$\Rightarrow$  数十MeVの低エネルギー領域で大強度の放射

# 具体的方法

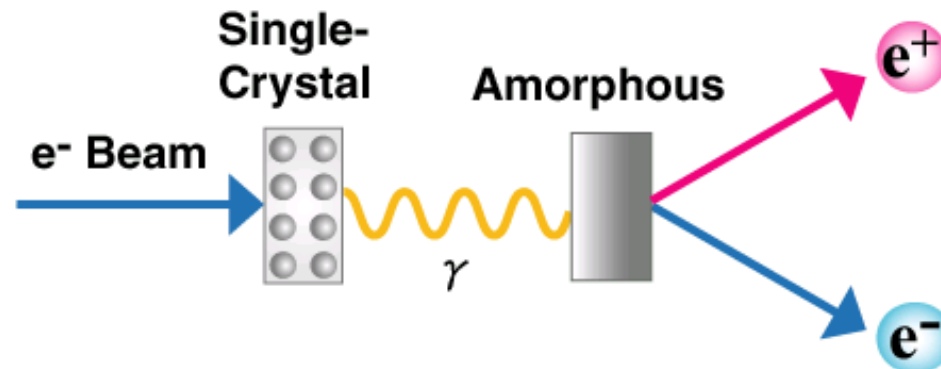
(a) 1つの結晶内で放射と対生成

(b) 結晶で放射を起こし、後方の非晶質で対生成

(a) 単結晶標的



(b) 組み合わせ型標的





# 本研究の目的

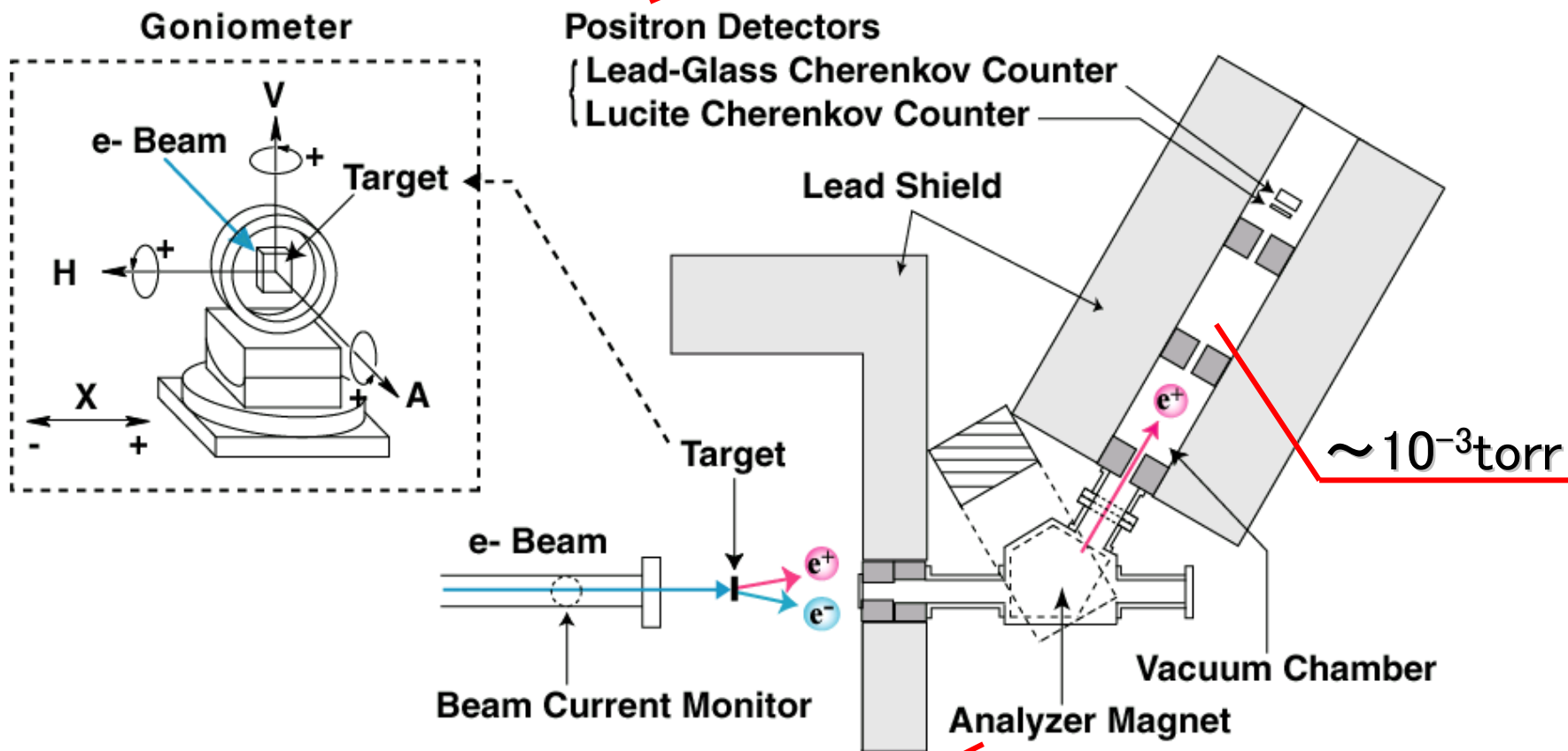
Bファクトリーや次世代リニアコライダーの陽電子源を目指して...

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
  - ▶ 陽電子生成量の各種依存性
    - 入射電子エネルギー依存、運動量依存、標的厚依存
  - ▶ 非晶質標的との比較 etc.
- ➔ シミュレーションコードの開発 ⇒ 標的設計

# KEK 8-GeV Linacにおける実験

陽電子数  $\propto$  パルス波高の積分値



$P_{e^+} = 5, 10, 15, 20$  MeV/c を選択

# 実験条件

## ➤ 電子ビーム

エネルギー:	8 GeV
強度:	0.2 nC/bunch ( $\sim 10^9 e^-$ )
繰返し:	2 Hz
バンチ幅(FWHM):	10 ps
ビームサイズ(FWHM):	$\sim 3$ mm (直径)

## ➤ 陽電子生成用標的

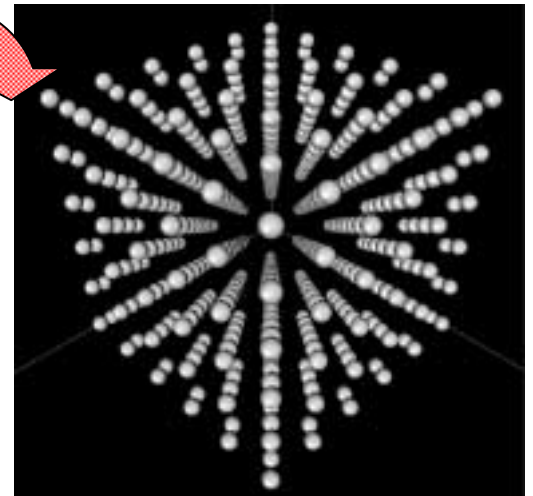
**タングステン単結晶 (≡Wc) :**  $\langle 111 \rangle$  軸

2.2mm (Mosaicity:  $< 1.5$  mrad.)

5.3mm, 9mm (Mosaicity:  $< 0.5$  mrad.)

**タングステン非晶質 (≡Wa) :**

0 $\sim$ 18 mm (3mm毎)



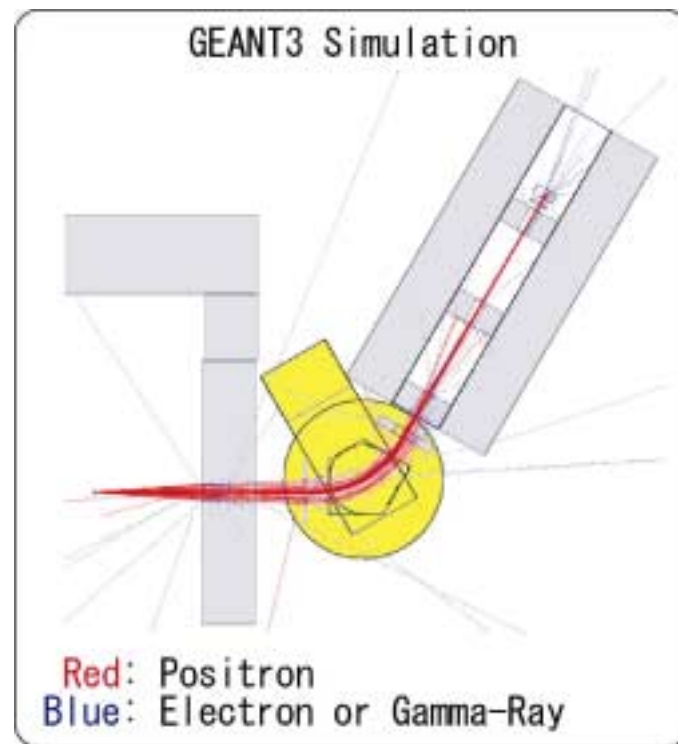
(by R. Hamatsu)

## ▶ スペクトロメーターのアクセプタンス

スペクトロメーターが検出可能な陽電子の放出角度と運動量広がり大きさ:

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

Positron Momentum Pe+ (MeV/c)	Acceptance × 10 <sup>-4</sup> (MeV/c · Sterad.)
5	1.08 ± 0.03
10	2.47 ± 0.07
15	3.80 ± 0.10
20	4.81 ± 0.12

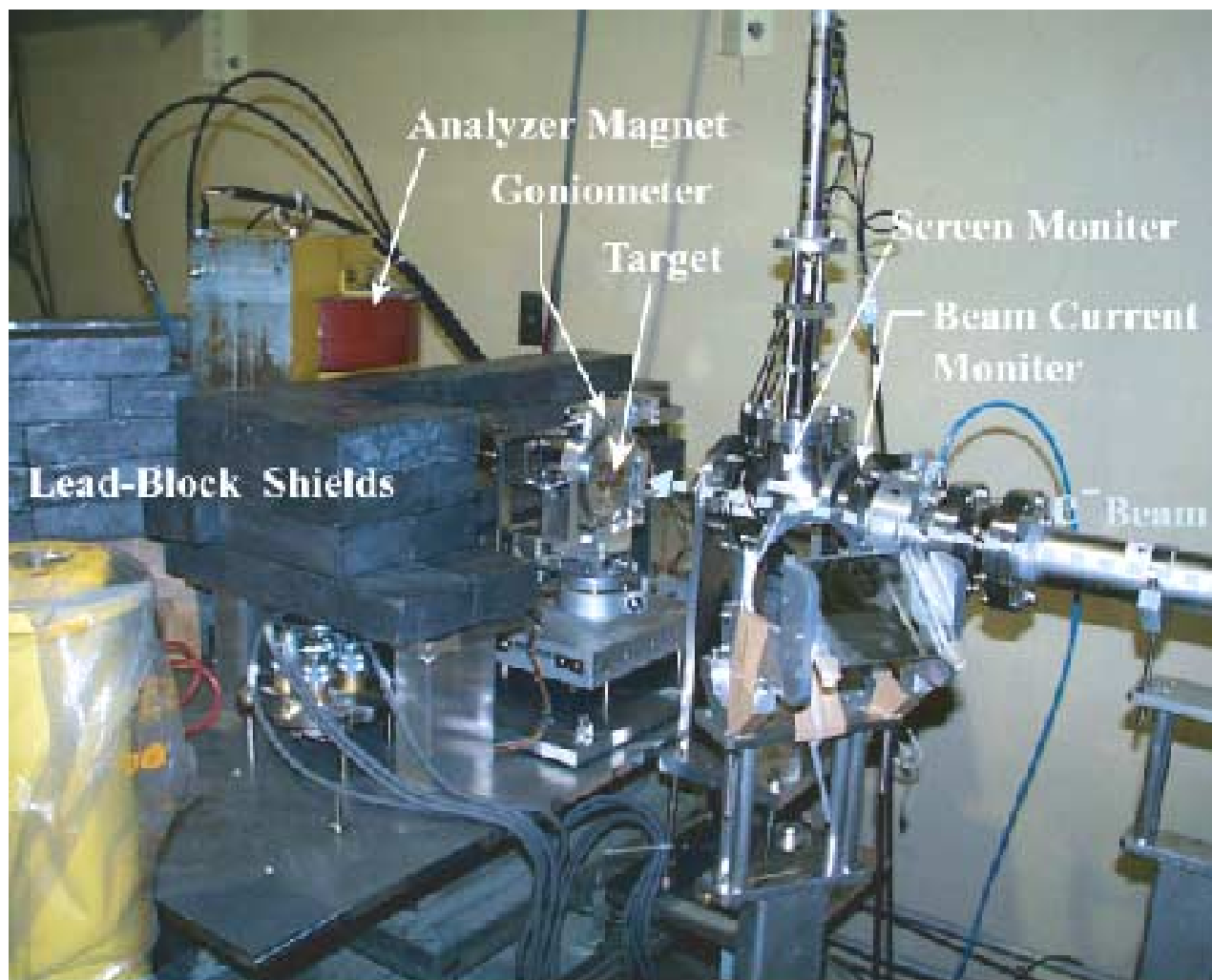


$$0 \leq \theta \leq 0.08, \quad 0 \leq \phi \leq 2\pi,$$

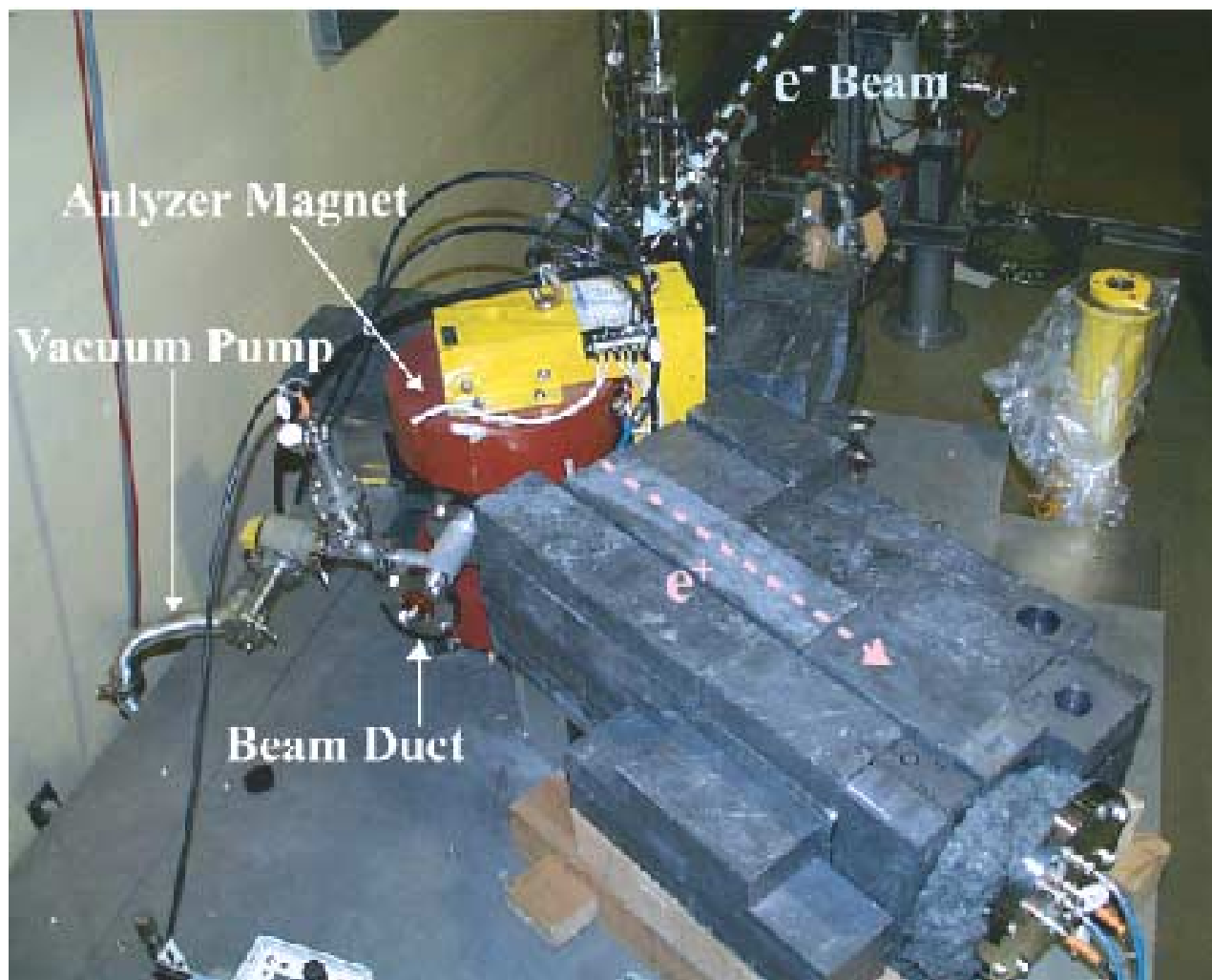
$$0.8 P_0 \leq P \leq 1.2 P_0$$

$N_0$ 個の陽電子を発生,  $N_1$ 個検出

## セットアップの写真(前方)



# セットアップの写真(後方)



# 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、

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

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

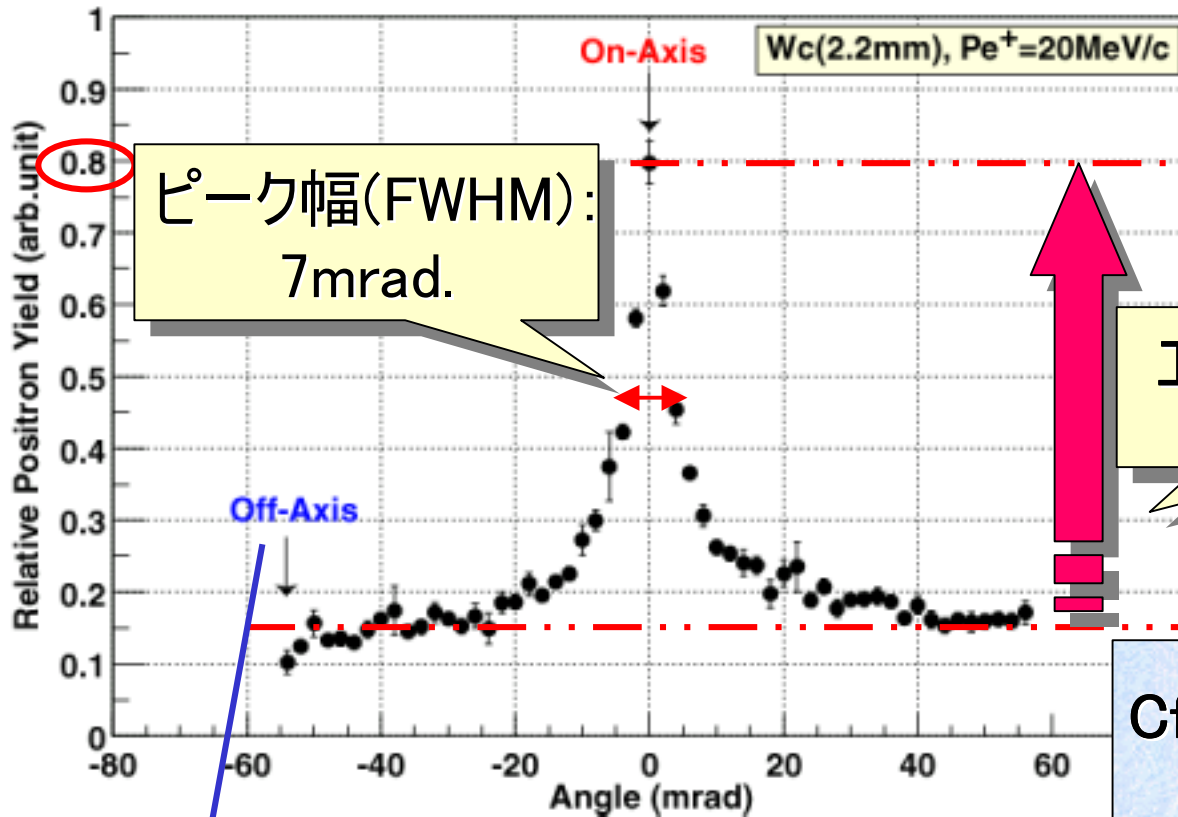
❏ バックグラウンドとペDESTALの補正

❏ **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

# ロッキングカーブ: $Wc(2.2\text{mm})$ , $Pe^+ = 20\text{MeV}/c$

Def. インハンスメント  $\equiv$  On-Axis / Off-Axis

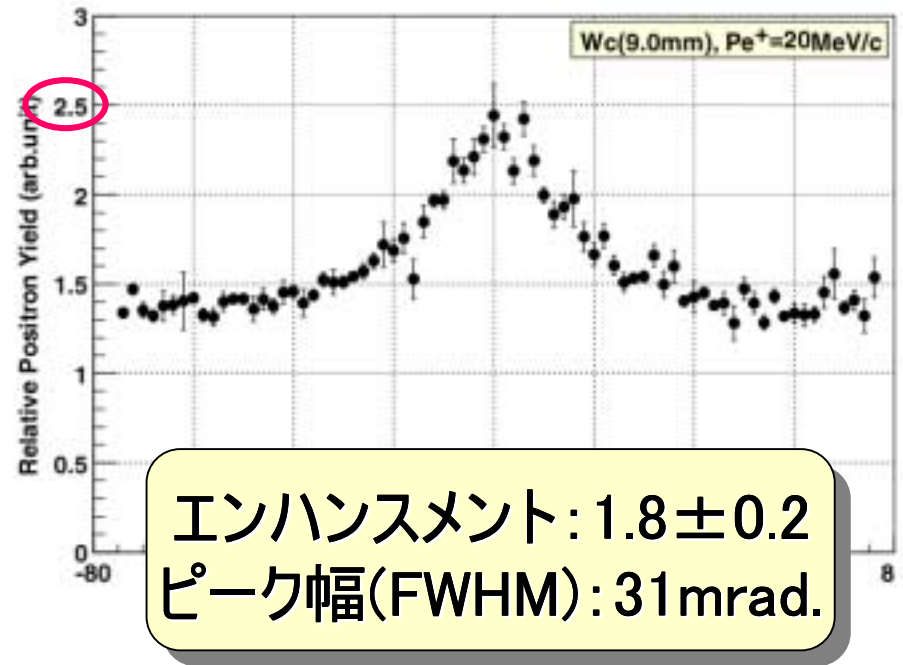
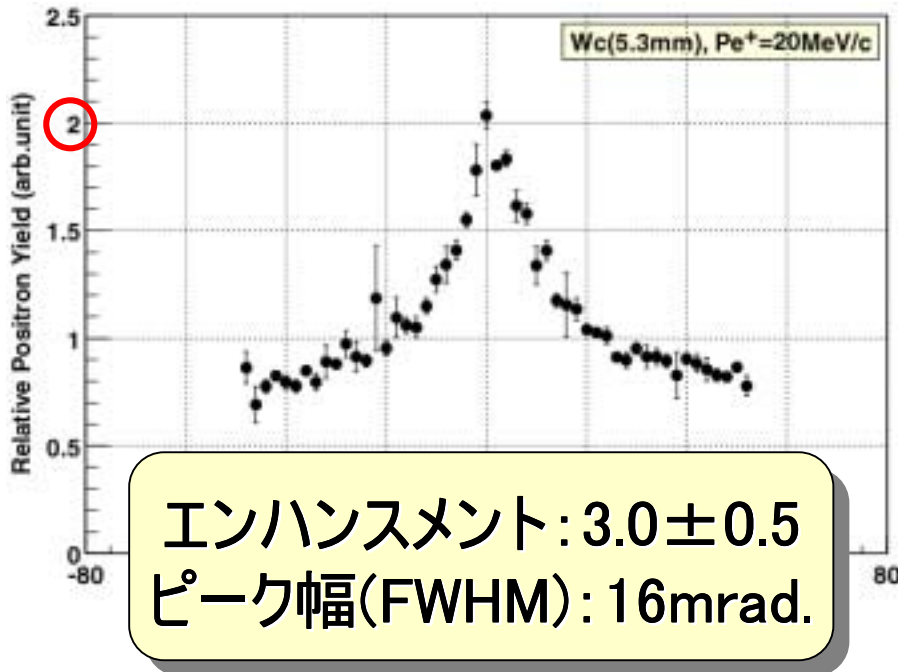


非晶質と同等

Cf. 田無1.2-GeV  
ES: 1.7倍



# ロッキングカーブ: $Wc(5.3, 9 \text{ mm}), Pe^+ = 20 \text{ MeV}/c$

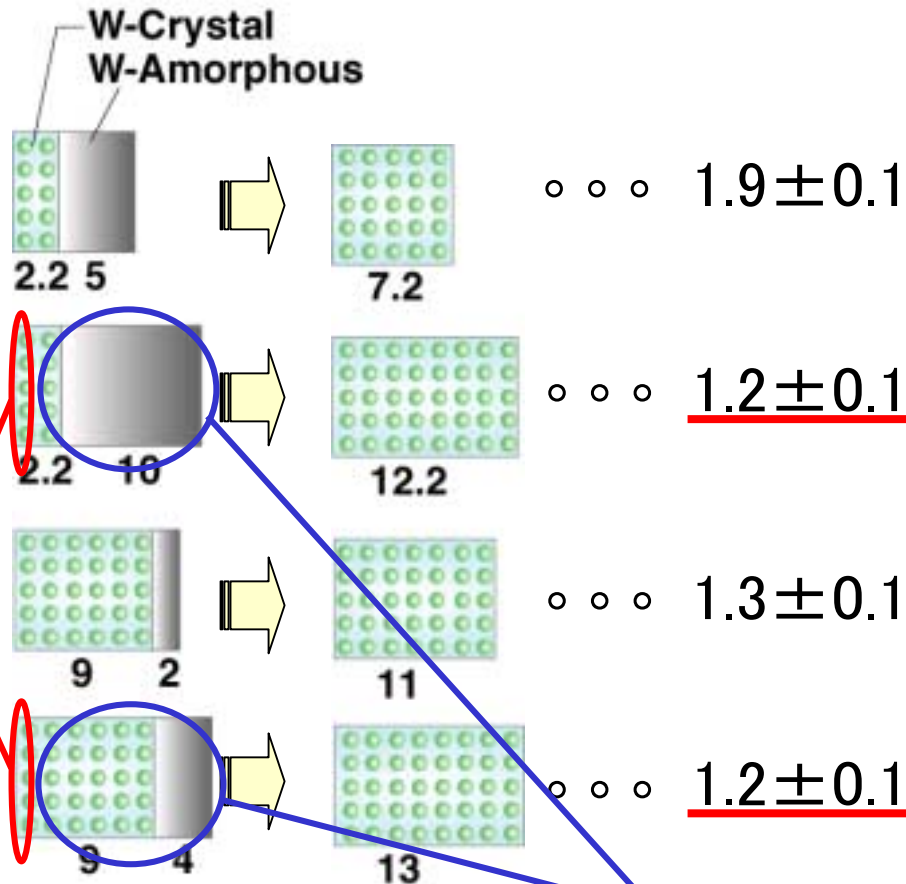


- 陽電子収量:  $2.2\text{mm-Wc} < 5.3\text{mm-Wc} < 9\text{mm-Wc}$
- エンハンスメント:  $2.2\text{mm-Wc} > 5.3\text{mm-Wc} > 9\text{mm-Wc}$
- ピーク幅:  $\psi_L (0.43\text{mrad.}) \ll 2.2\text{mm-Wc} < 5.3\text{mm-Wc} < 9\text{mm-Wc}$   
⇒ コヒーレント制動放射, 入射電子ビームの多重散乱

# 組み合わせ型標的のエンハンスメント: $Pe^+ = 20\text{MeV}/c$

組み合わせ型標的

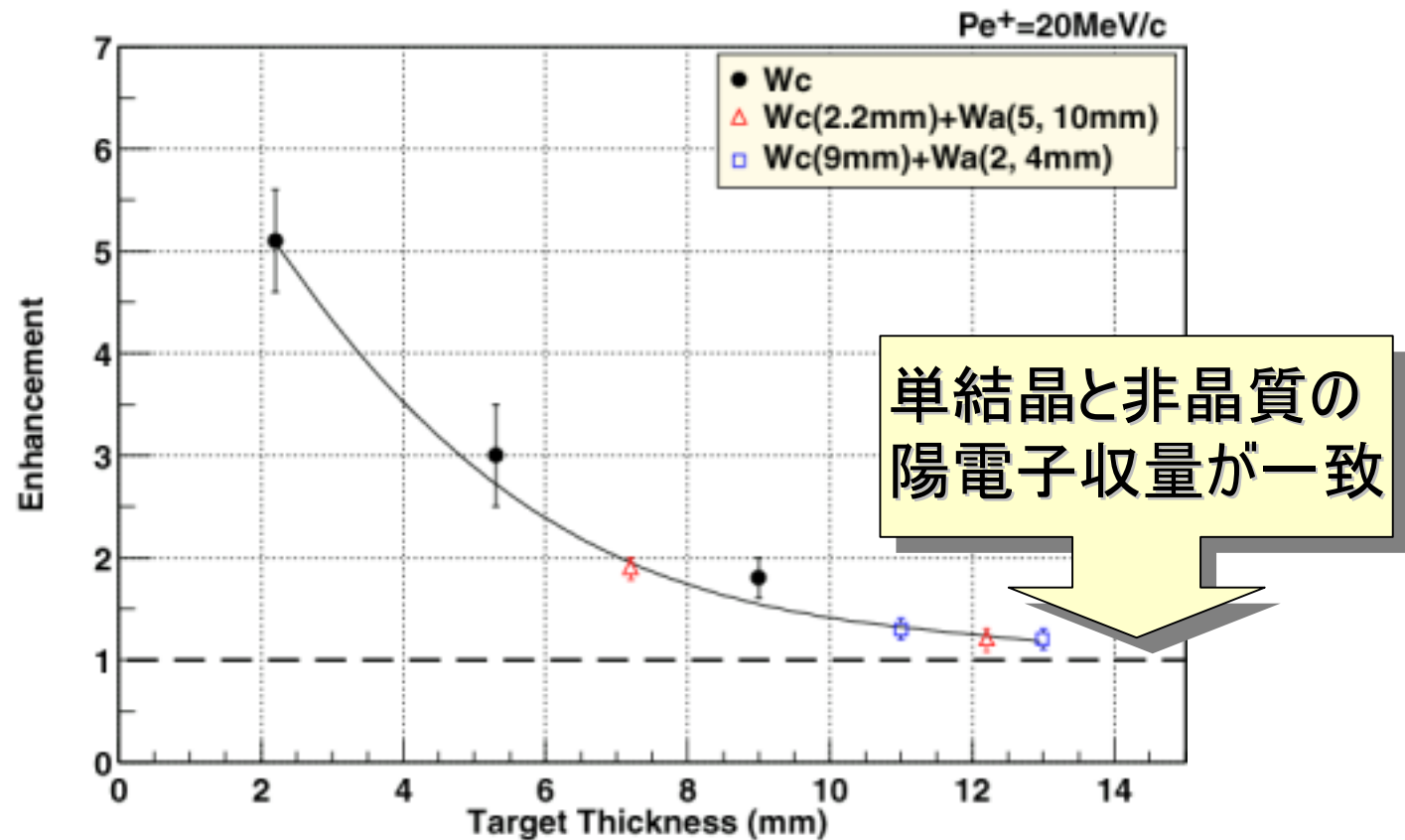
エンハンスメント



表面付近のみ  
結晶の効果

残りの部分は非晶質と同等

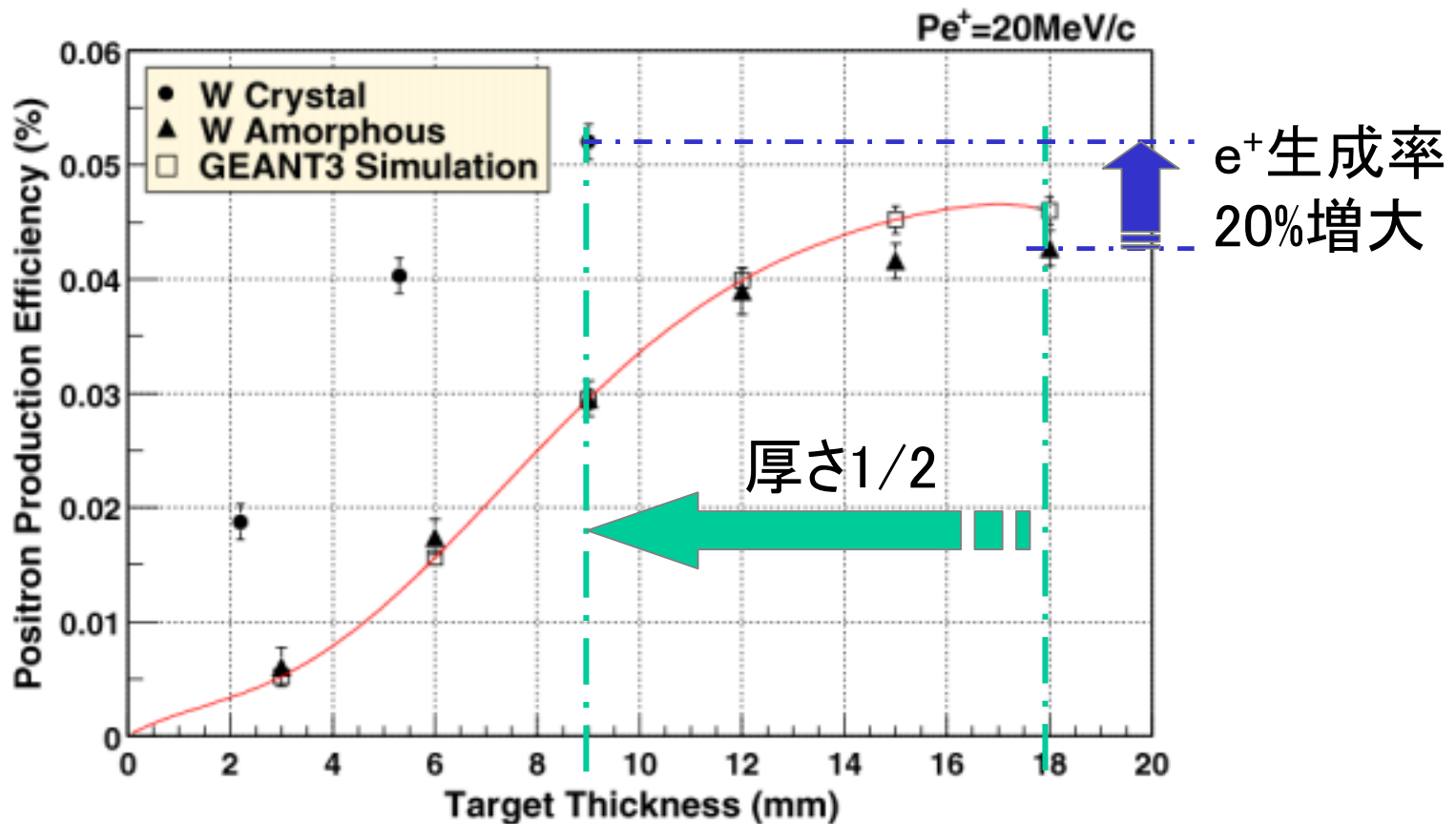
# エンハンスメントの標的厚依存: $Pe^+ = 20\text{MeV}/c$



単結晶の表面付近 ⇒ 結晶の効果  
残りの部分 ⇒ 非晶質と同等

# 陽電子生成率: $Pe^+ = 20\text{MeV}/c$

Def. 検出された陽電子数/入射電子1個



単結晶と非晶質の陽電子生成率の違い

⇒ 電磁カスケードシャワー過程(放射⇌対生成)の違いを反映

# KEK 8-GeV Linacでの実験結果

陽電子収量:

$2.2\text{mm-Wc} < 5.3\text{mm-Wc} < 9\text{mm-Wc}$

エンハンスメント:

$2.2\text{mm-Wc} > 5.3\text{mm-Wc} > 9\text{mm-Wc}$

入射電子エネルギーに依存

運動量依存性:

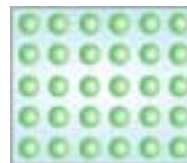
陽電子収量  $\Rightarrow$  運動量が大きいほど(大)

ピーク幅, エンハンスメント  $\Rightarrow$  明確な依存性なし

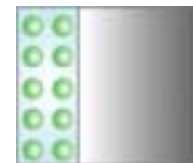
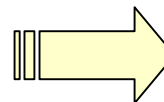
陽電子生成率:

約20~30%増大 (cf. 9mmWc, 18mmWa)

かつ、標的の厚さ半分



9



2

7

(単位:mm)

# 考察 ～ タングステン単結晶標的のメリットは？

## 1. 低運動量の陽電子増大

- 8-GeV電子ビームにおいて、**20～30%増大** (cf. 9mmWc, 18mmWa)
- 高エネルギー領域ではさらに結晶の効果(大)  
(∵エンハンスメントは入射エネルギーに依存)

## 2. 標的を薄くできる

- 生成された陽電子の**多重散乱(小)** ⇒ 低エミッタンス
- 熱負荷の軽減

## 3. 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

# 今後の課題

## 1. 入射電子ビームのエネルギーを変えて

- ④ 4-GeV Linacでの定量的なデータを獲得
  - ⇒ KEK Bファクトリーでの使用の可能性を見極める
- ④ 8-GeV以上の高エネルギーでの実験
  - ⇒ リニアコライダーでの使用を念頭において

## 2. 標的設計の観点から

- ④ 組み合わせ型標的 (ex. ダイヤモンド, シリコン単結晶)
- ④ さらなる基礎データの取得
  - ⇒ 信頼の置けるシミュレーションコードの開発
- ④ 熱負荷の問題を定量的に押さえる

⇒ キーワードは“**高効率**”と“**熱負荷**”

## 次世代リニアコライダーの陽電子源

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	$e^-$
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

(Snowmass 2001)