

大強度ニュートリノ実験に向けた ダイヤモンド検出器の開発研究

山本 和弘(大阪市立大学)

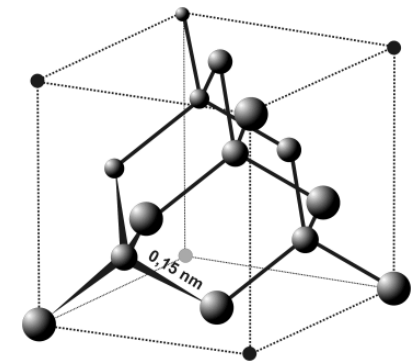
特定領域「フレーバー物理の新展開」研究会2010

Feb. 22-24, 2010

ダイヤモンドの物性

- Si, Ge と同じ共有結合をもつ第14(IVB)族単体元素

	C (ダイヤモンド)	Si (シリコン)	Ge (ゲルマニウム)
原子番号	6	14	32
原子量	12.0107	28.0855	72.64
密度(g/cm ³)	3.515	2.330	5.323
比抵抗($\Omega \cdot m$)	$\sim 10^{14}$	3.970×10^3	6.897×10^{-1}
熱伝導率(W/m·K)	900 – 2300	148	59.9
バンドギャップ(eV)	5.47	1.12	0.7



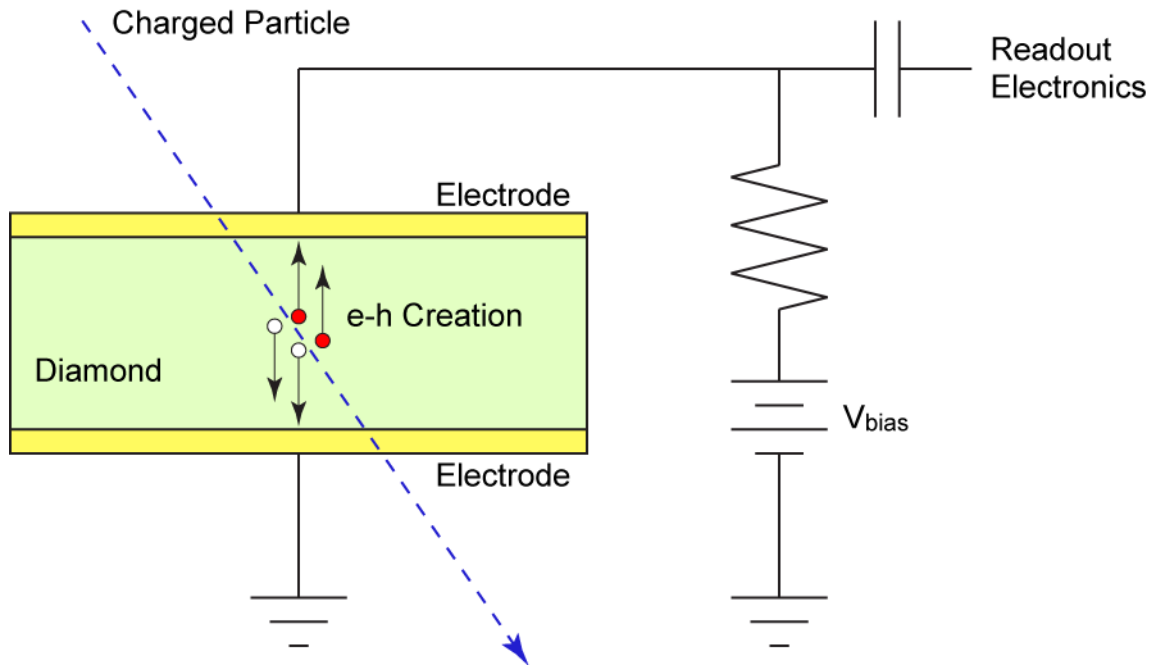
放射線検出デバイスとしてのダイヤモンド

	ダイヤモンド	シリコン
バンドギャップ (eV)	5.47	1.12
絶縁破壊電圧 (V/cm)	10^7	3×10^5
電子移動度 ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)	1800	1350
ホール移動度 ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)	1200	480
電離エネルギー (eV)	13	3.6
1 MIPあたりの平均電子ホール対生成数 (pairs/100 μm)	3600	9000
結合解離エネルギー (eV/atom)	43	13-20

- ダイヤモンドはシリコンに比べて
 - 応答が速い
 - 放射線耐性が高い ($\sim 10^{15}$ particles/ cm^2 以上)

ダイヤモンド検出器の動作原理

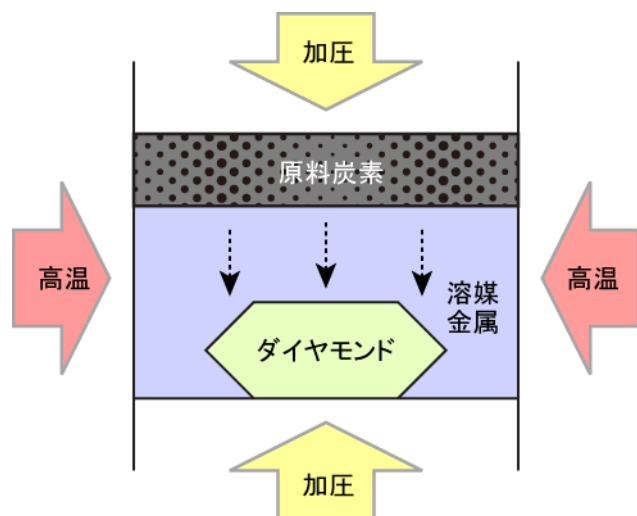
- 基本的に半導体検出器と同じ
 - 電子・ホール対生成



人工ダイヤモンドの合成法

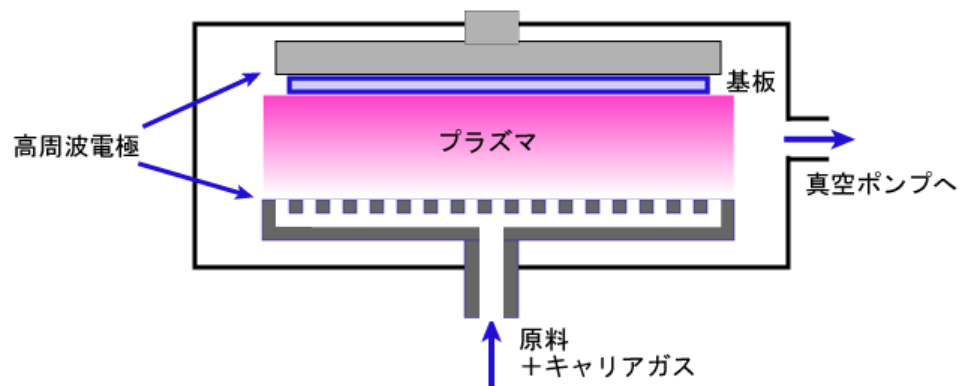
■ 高温高压合成法(HPHT)

- 50,000 atm, 1300 °C 以上
- 溶媒金属(Fe, Ni, Mn, Co等)に溶かした炭素を種結晶上に成長させる。
- 結晶性に優れる。



■ 化学気相合成法(CVD)

- 大気圧近傍
- メタンなどの有機ガスをプラズマ化したガスから、結晶を基板上で成長させる。
- 不純物が少ない。
- 大面積化が可能。



単結晶CVDダイヤモンド

- プラズマ条件を広範囲で均一
- 結晶成長条件を長時間、厳密にコントロール

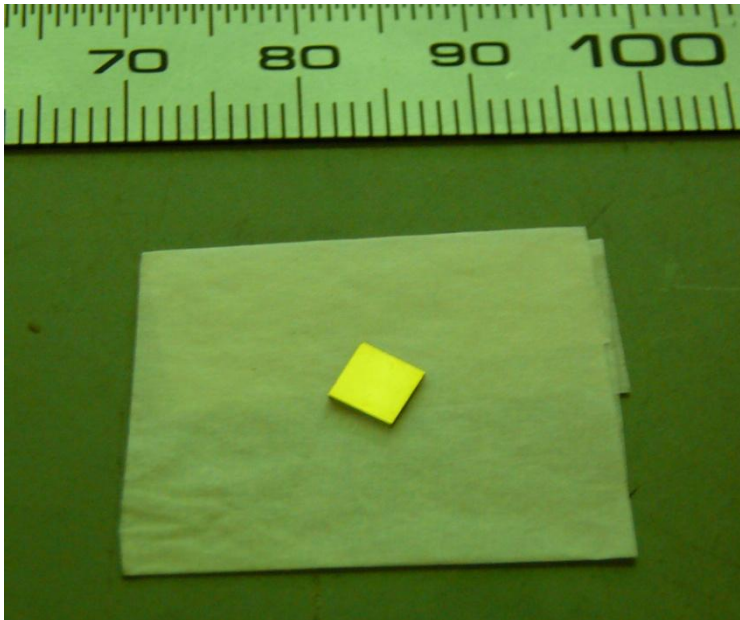


CVDダイヤモンドの単結晶化

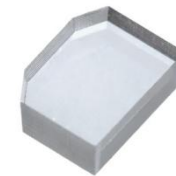
- 単結晶は多結晶と違い、結晶境界での電荷の吸収が無い。
 - 電荷収集間隔が大きくなる
 - 信号が大きくなる
- } ことが考えられる。

本研究のサンプル

- エlementシックス社製 単結晶CVDダイヤモンド
 - 4mm × 4mm × 500μm
 - 両面を研磨した後、Auでメタライズ



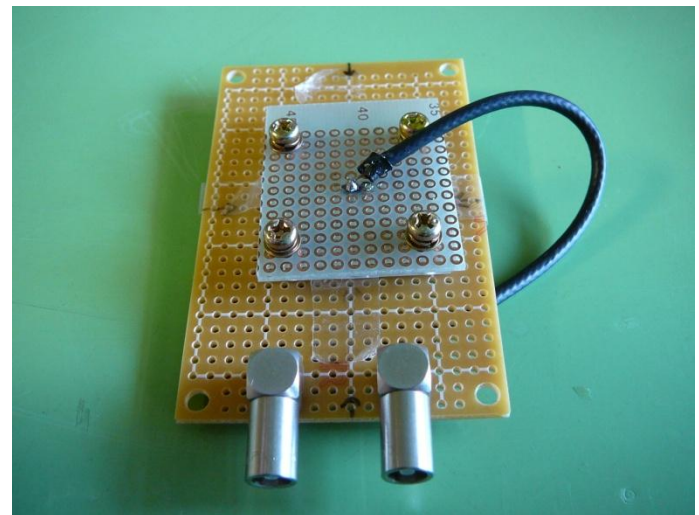
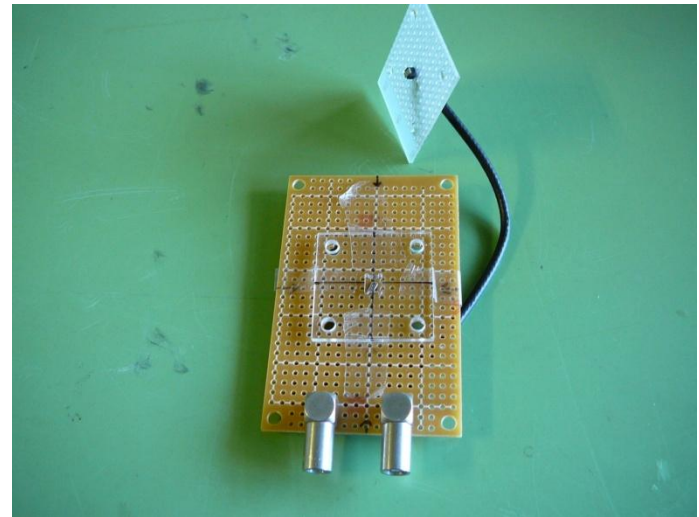
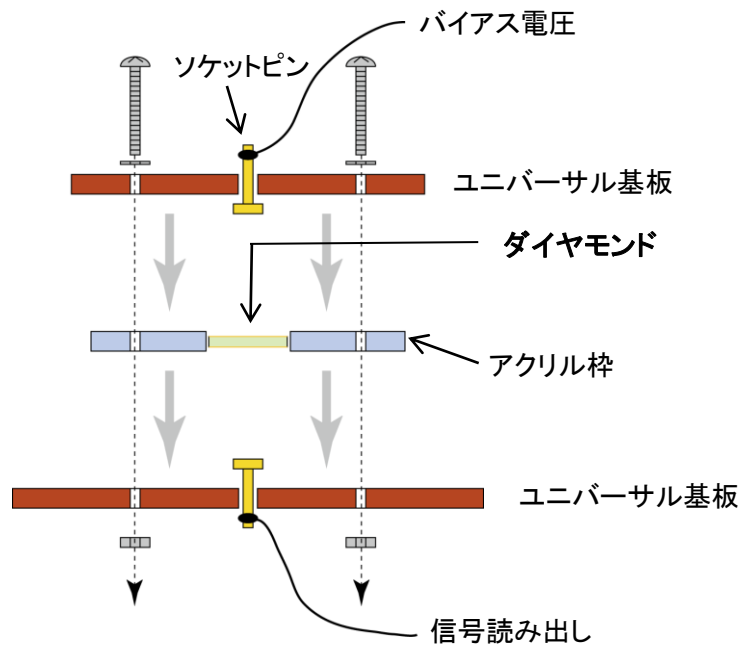
メタライズ処理のため、サンプルの色が見えないが、単結晶CVDダイヤモンドは無色透明



Elementシックスのカタログより

検出器モジュールの製作

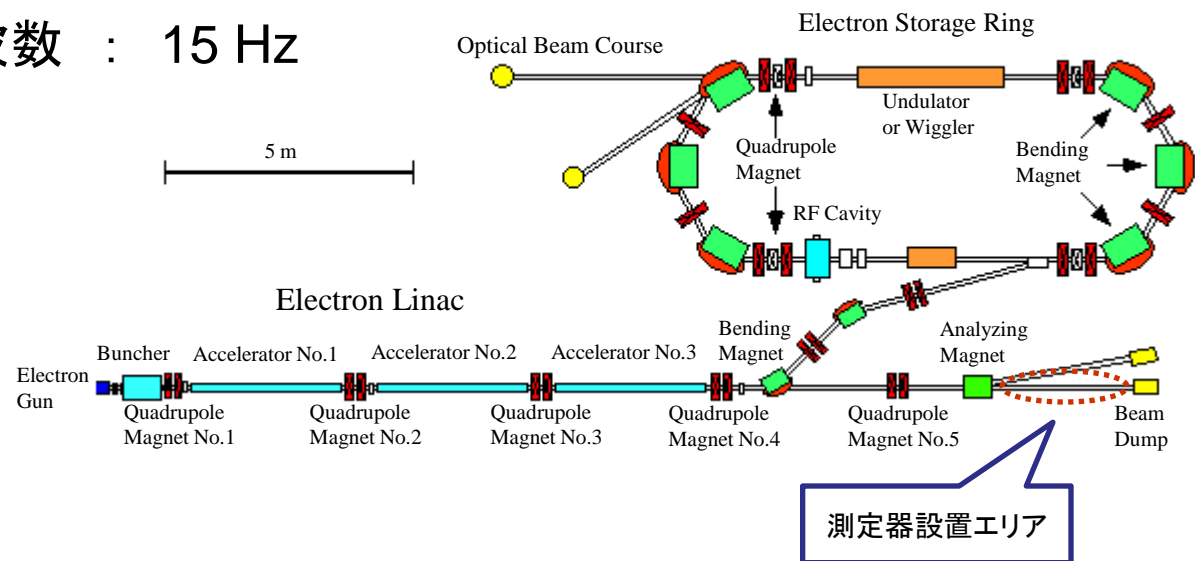
- 両面から金属端子で押さえつける方法を採用。



ビームテスト

■ 京都大学化学研究所 先端ビームナノ科学センター の電子線形加速器を用いてテストを行った。

- 電子エネルギー : 100 MeV
- パルス幅 : ~60 ns
- ビーム強度 : $10^8 \sim 10^9$ e/pulse
- ビーム径 : ~6 mm
- 繰り返し周波数 : 15 Hz



実験に協力支援を頂いた方々

奥沢徹, 清矢良浩, 田代一晃, 尾崎称, 松村知恵(大阪市大)

中家剛, 横山将志*, 市川温子, 松岡広大, 久保一, 村上明,
鈴木研人 (京大理)

想田光, 野田章(京大化研)

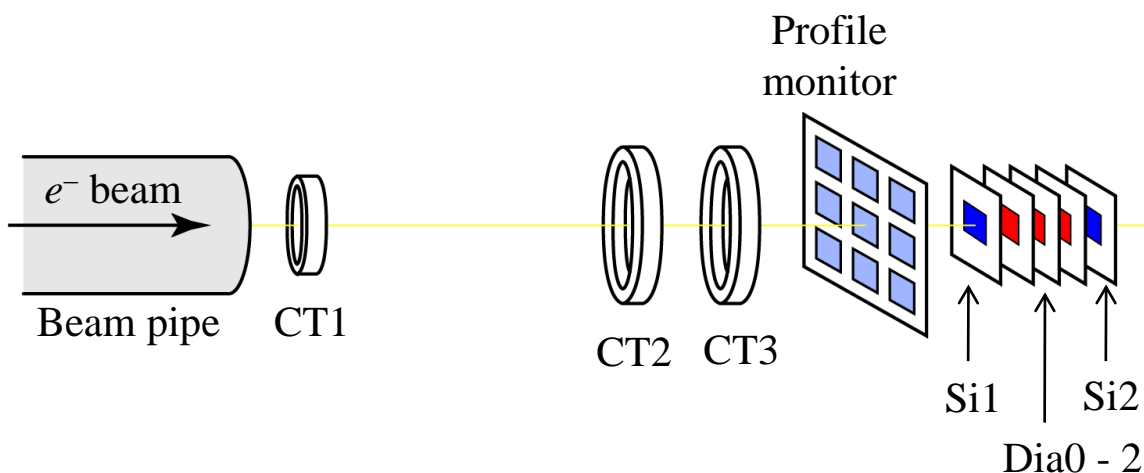
白井敏之(法医研物工)

鈴木聡, 丸山和純(KEK)

ご協力どうもありがとうございました。

実験セットアップ

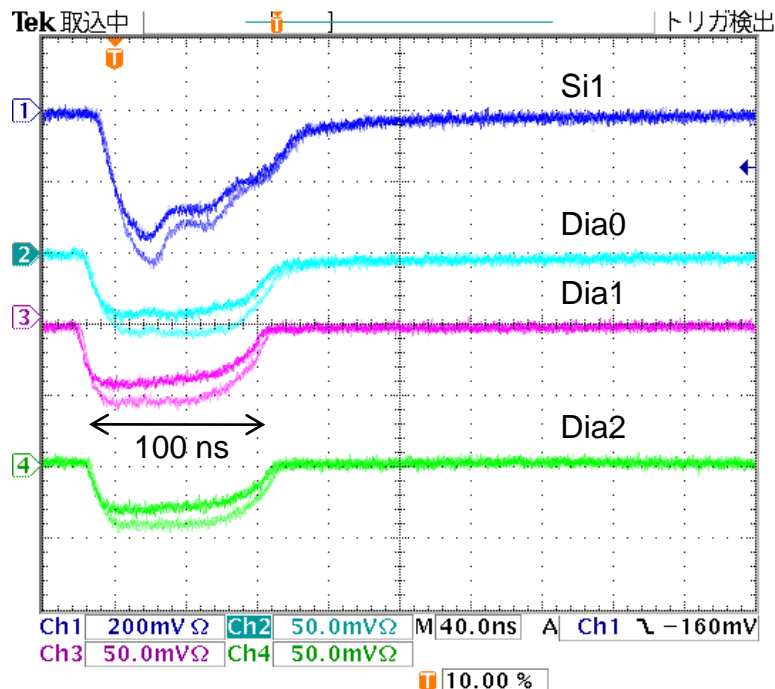
- 単結晶ダイヤモンド検出器(Dia0, Dia1, Dia2)
- シリコンPINフォトダイオード(Si1, Si2)
- ビーム強度測定用変流器(CT1-3)
- ビームプロファイルモニター (シリコンPINフォトダイオード × 9)
- データ収集 : COPPER/65MHz FADC, MIDAS



測定項目

- ビーム強度に対する応答の線形性
- 信号強度の時間安定性
- ビームオン・オフ時における信号の立ち上がり・立ち下り特性

ダイヤモンド検出器の信号波形

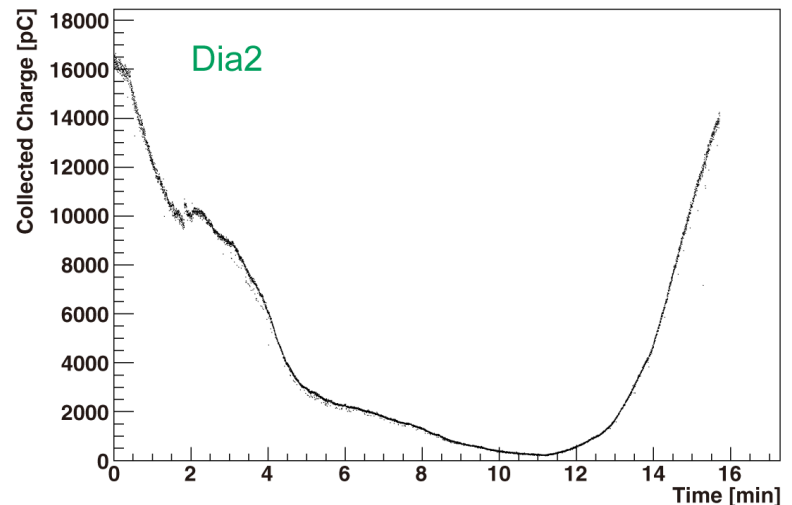
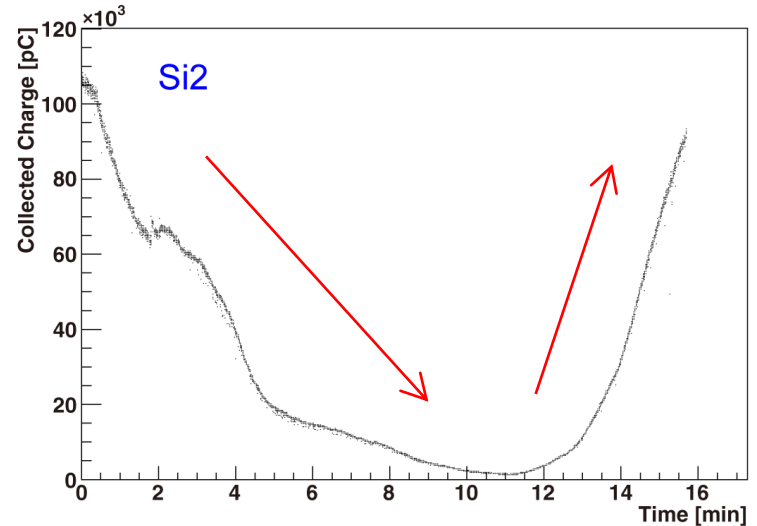


- シリコンに比べて立ち下りが非常に速い。
 - パルス幅 : ~ 100 ns
 - ビームのパルス幅と同程度
 - T2Kのビームバンチ間隔(580 ns)よりも十分小さい。
- 信号に帯が2つ見えるのは、ビーム強度が交互に強弱を繰り返したため。

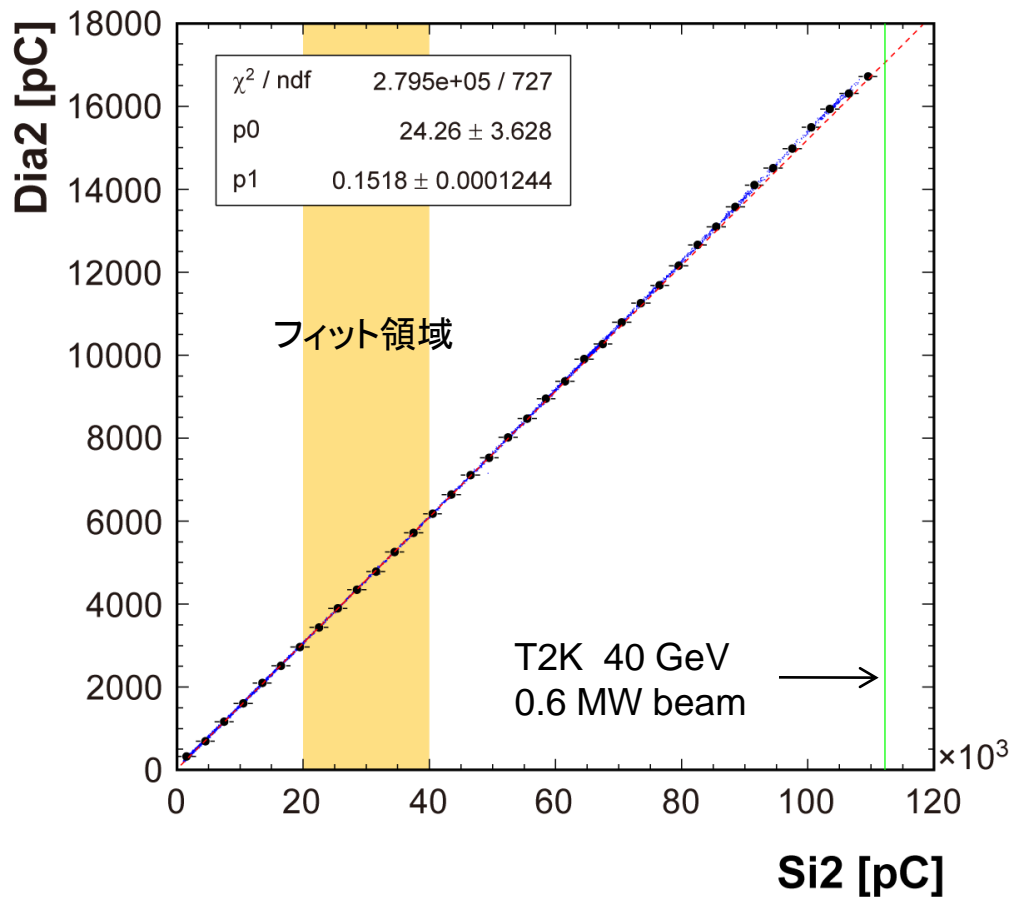
信号強度の線形性

■ ビーム強度を変化させて、ダイヤモンドとシリコンの出力を比べた。

- $V_{\text{bias}}^{\text{Dia}} = 500 \text{ V}$
- T2K における J-PARC MR 40 GeV, 0.6 MW ビーム相当の強度までスキャン。



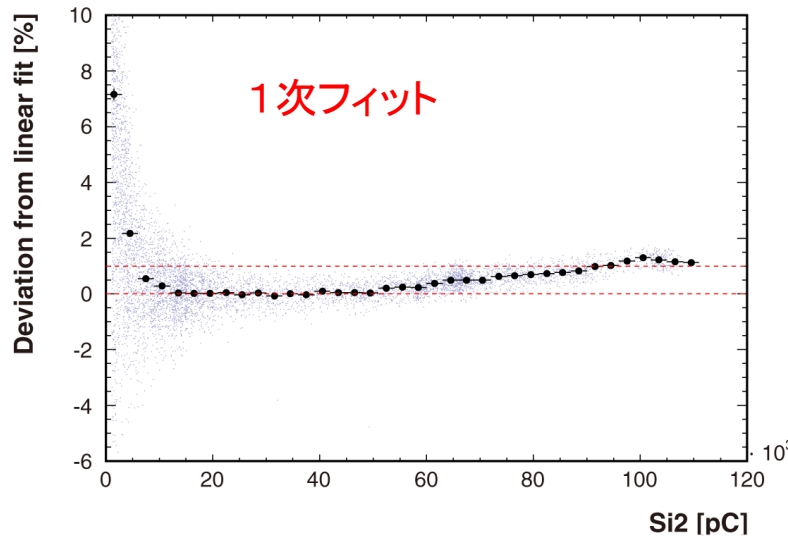
信号強度の線形性 (2)



- ダイヤモンドの出力はシリコンに比べて、ほぼリニアになっている。
- 直線フィットを行うと、やや下に凸な分布になっている。

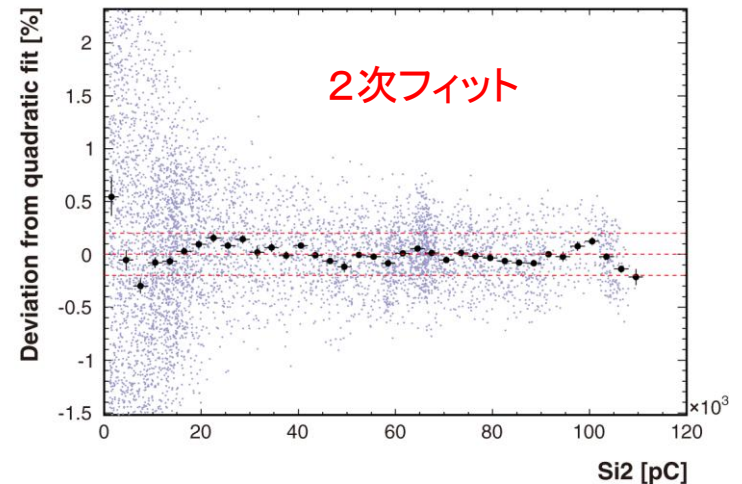
信号強度の線形性 (3)

■ フィット直線からのずれ



- 信号の小さい部分を除けば、1~2%以内に納まっている。

■ 2次関数で全領域をフィットした結果

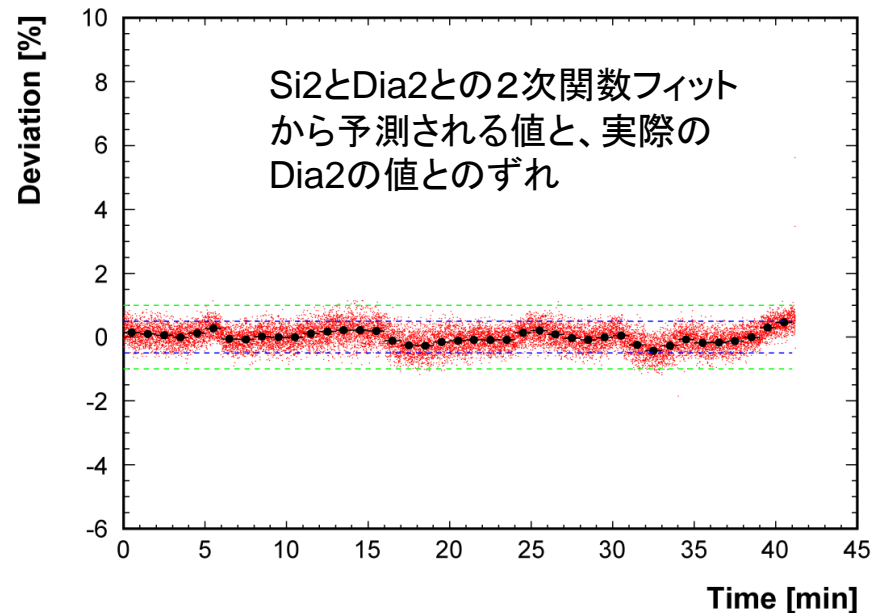
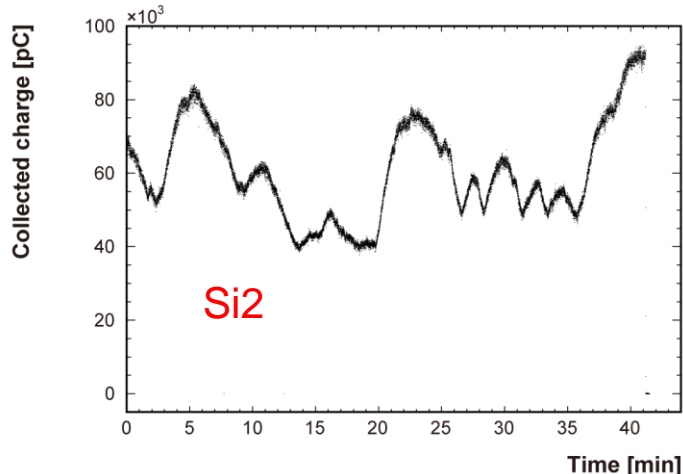


- ±0.2%に納まっている。

信号の(長)時間安定性

- T2K 40 GeV, 0.6 MW 相当のビームを40分間にわたり連続照射し、信号の変化を見た。

- $V_{\text{bias}}^{\text{Dia}} = 500 \text{ V}$
- ビーム出力を調節しながら測定を行ったが、それでもビーム強度は多少上下してしまっている。



- ビームの時間変化による構造が補正しきれていないが、信号強度は一定を保っているように見える。

まとめ

- 単結晶ダイヤモンドを用いて検出器を製作し、100MeVの電子ビームに照射して信号を測定した。
 - 出力信号を確認。
- シリコンPINフォトダイオードの信号と比較した結果、
 - ビーム強度に対して、1~2%の範囲で線形性が確認された。
 - 信号強度の時間安定性の測定では、T2K 40GeV, 0.6MW相当のビームに対して、40分間の連続照射では大きな変動は見られなかった。
- 大強度ビームに対するモニターとして実戦配備するには、検出器特性をさらに詳細に押さえる必要がある。