

Belle II 実験の2021年運転期間における 電磁カロリメーターでの ビームバックグラウンド測定

奈良女子大学 人間文化総合科学研究科 数物科学専攻

高エネルギー物理学研究室

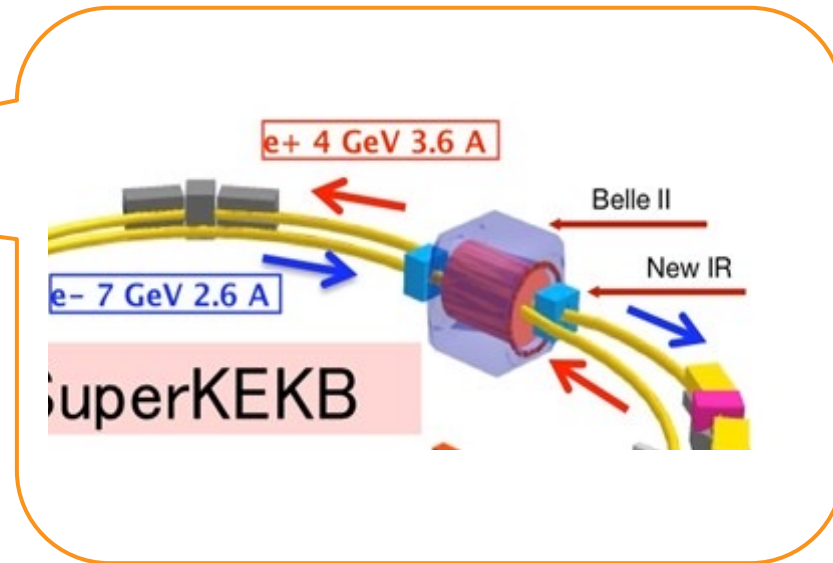
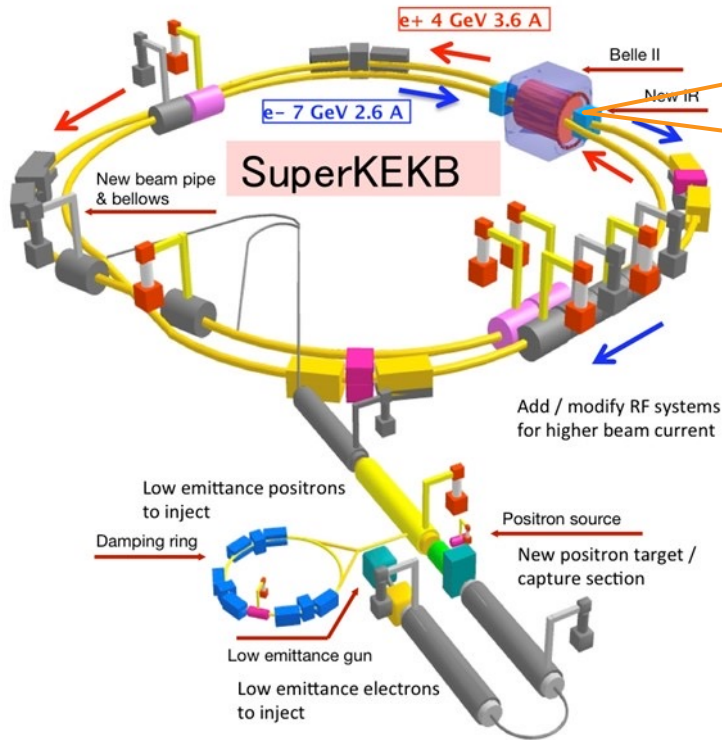
修士2年 今野つかさ

目次

- Belle II 実験
- 研究動機
- Belle II 実験における電磁カロリメーターの原理と検出器
- ビームバックグラウンドにおける放射線被ばく量測定
 - 暗電流値のとり方の改善
 - CsI (TI) 結晶が受けたビームバックグラウンドにおける放射線被ばく量
- 2018年と2021年の運転の比較
- まとめ

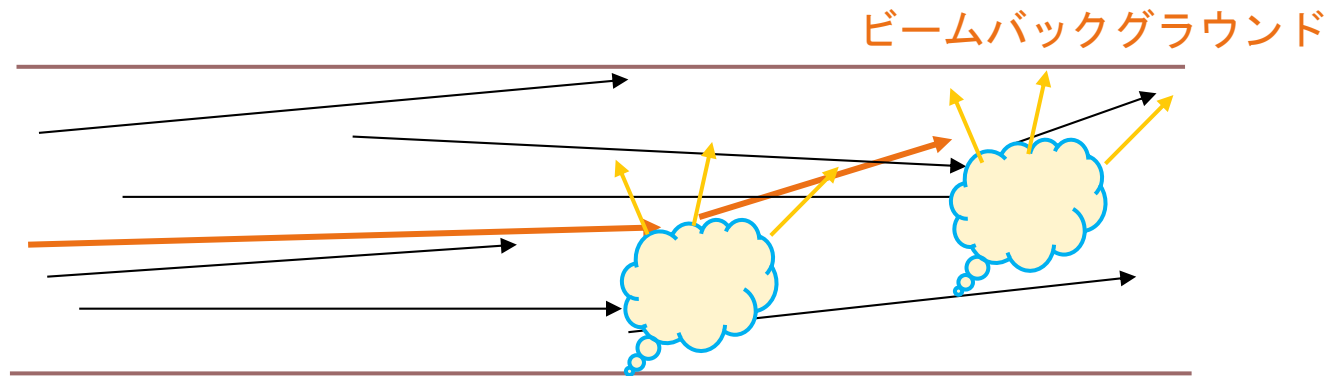
Belle II 実験

- Belle II 実験とは、SuperKEKB 加速器で加速された 7 GeV の電子と 4 GeV の陽電子を衝突させて、衝突で生じる B 中間子、D 中間子、タウレプトンの崩壊過程を詳細に調べることを目的としている。



研究動機

- 軌道をそれた粒子はビームパイプに衝突して電磁シャワーを形成 → ビームバックグラウンド
- 衝突型加速器の衝突の頻度を表す指標 → ルミノシティ



ビームガス散乱

ビームパイプ内に残ったガスとビーム粒子が散乱すること。

- ルミノシティは高くビームバックグラウンドは低くが理想
- 2018年と比べ2021年の積分ルミノシティは約280倍に増加
- ビームバックグラウンドは
 - 粒子の検出効率を悪化させる
 - 検出器が放射線損傷によって性能劣化につながる
- 本研究では電磁カロリメーターに飛来するビームバックグラウンドについて調べた

ビームバックグラウンド測定が必要。

Belle II 検出器

- 電磁カロリメーター (ECL)

電子と γ 線のエネルギー測定

- 崩壊点検出器 (VXD)

B中間子の崩壊点測定

- 中央飛跡検出器 (CDC)

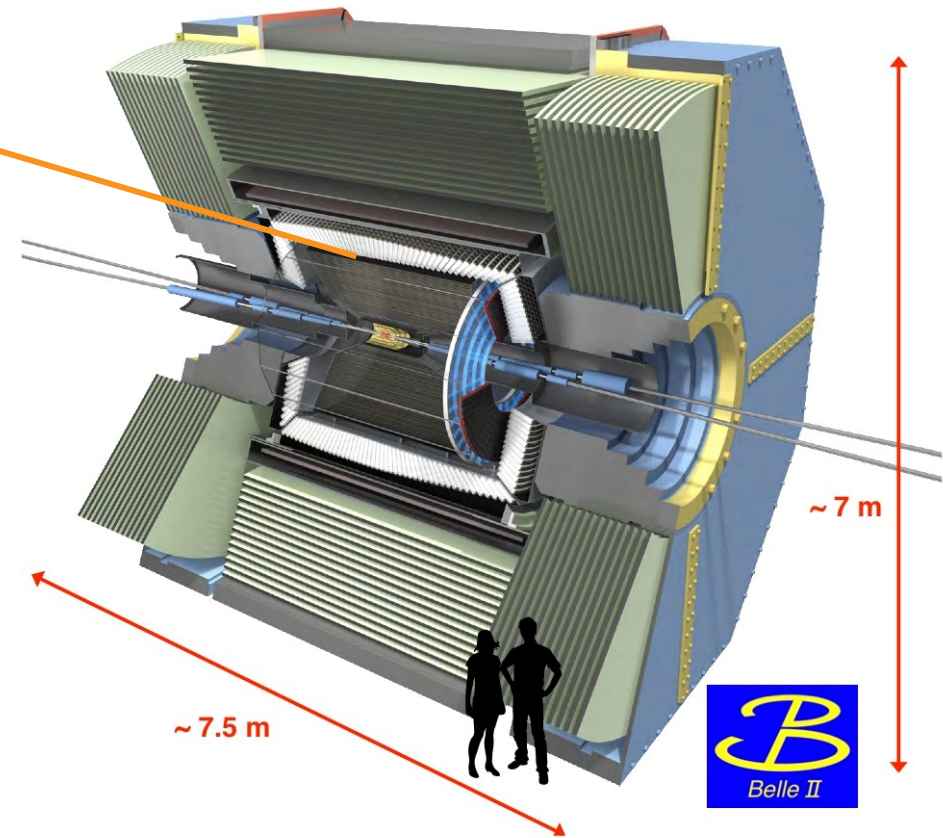
荷電粒子の飛跡・運動量測定

- 粒子識別 (TOP・ARICH)

K中間子と π 中間子の識別

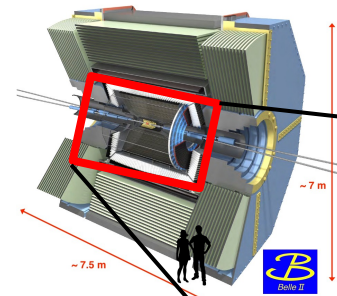
- K_L^0 および μ 粒子検出器 (KLM)

K_L^0 および μ 粒子の測定

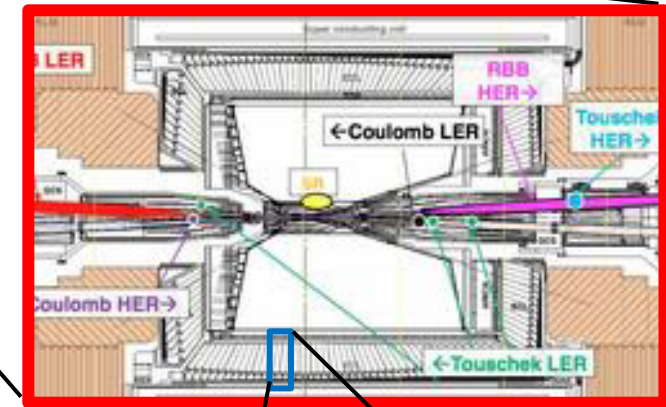


電磁カロリメーター (ECL)

- γ 線や電子のエネルギー測定を行う
- CsI(Tl)結晶シンチレータと光検出器としてPIN-PDを組み合わせたカウンターを8736本用いている。
- カロリメーターまでに飛んでくるビームバックグラウンドの多くは絶え間なくやってくる低エネルギーの γ 線。



- 超伝導ソレノイド内側に設置

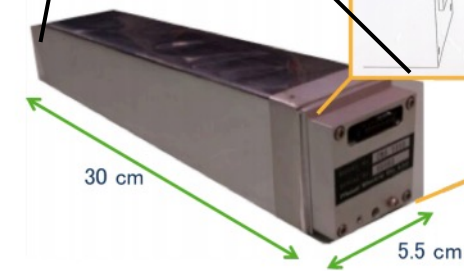
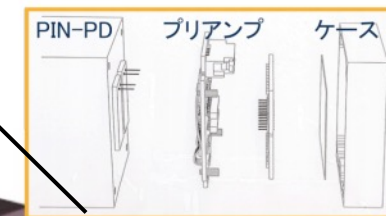


- CsI (TI) 結晶：発光量が豊富
- PIN-PD：低電圧で応答が速い。

1 MeVあたり
5000の電子を
放つ。

暗電流

- 逆方向にバイアス電圧を印加した状態でもわずかに電流が流れる。これを暗電流という。
- 空乏層中で熱励起により発生した電子・正孔対の移動によって発生。



カウンター

PIN-PD電流値モニターシステム

- CsI (TI) 結晶のシンチレーション光を読み出すPIN-PD電流値を測定・記録するもので、5秒ごとに測定を行う。
- 48のセグメントの結晶の本数は異なるため、結晶一本当たりの電流値 (nA/crystal) に換算する必要がある。
- 測定・記録された値 (I_{meas}) は、CsI (TI) 結晶からのシンチレーション光 (I_{rad}) と暗電流値 (I_{dark}) が含まれるため、CsI (TI) 結晶の放射線被ばく量を求めるには、増加分を求める必要がある。

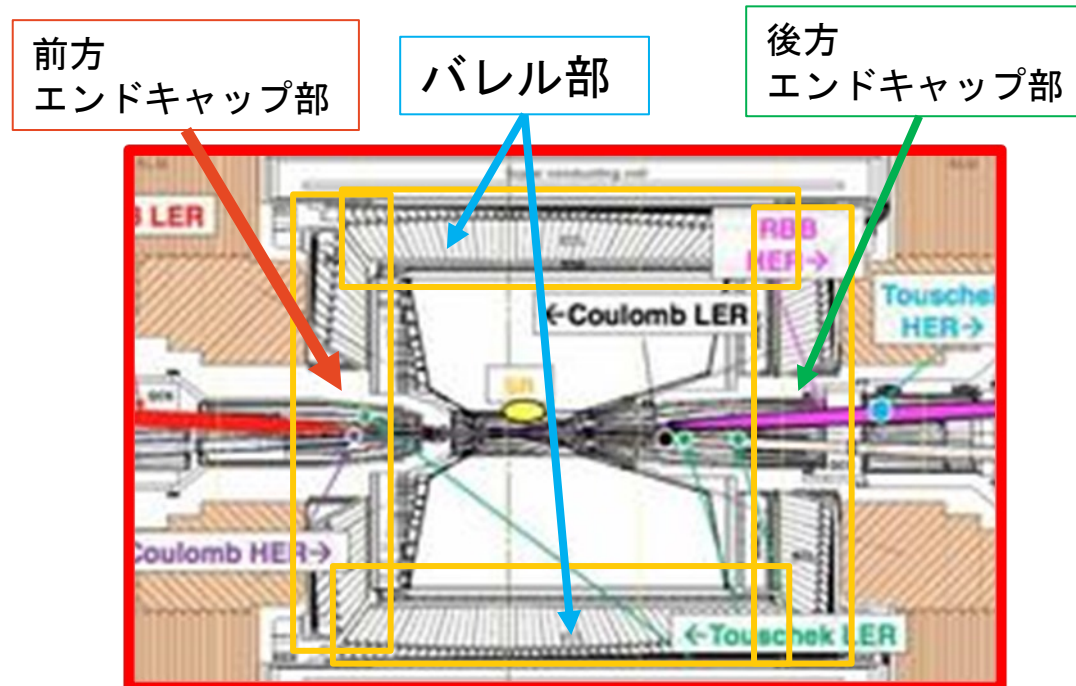
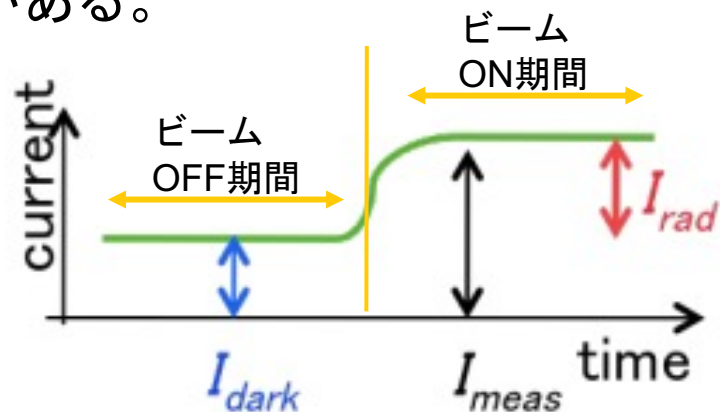


表 2.2: 測定点あたりの結晶の本数

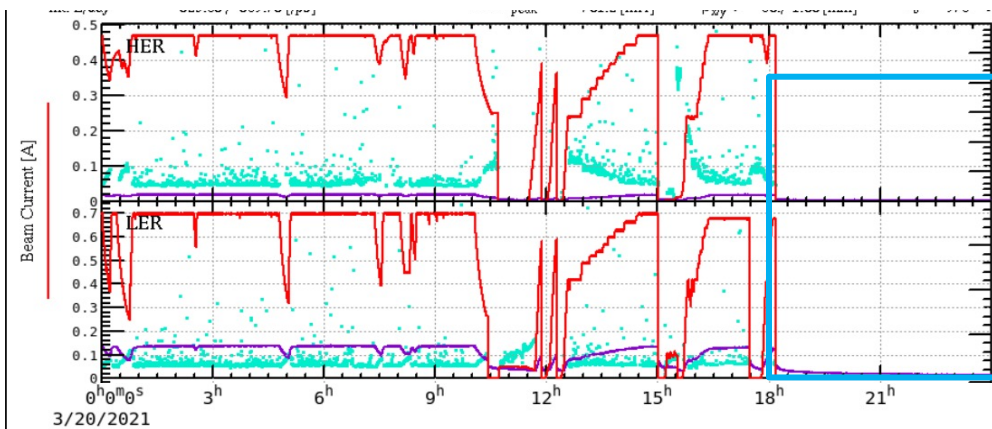
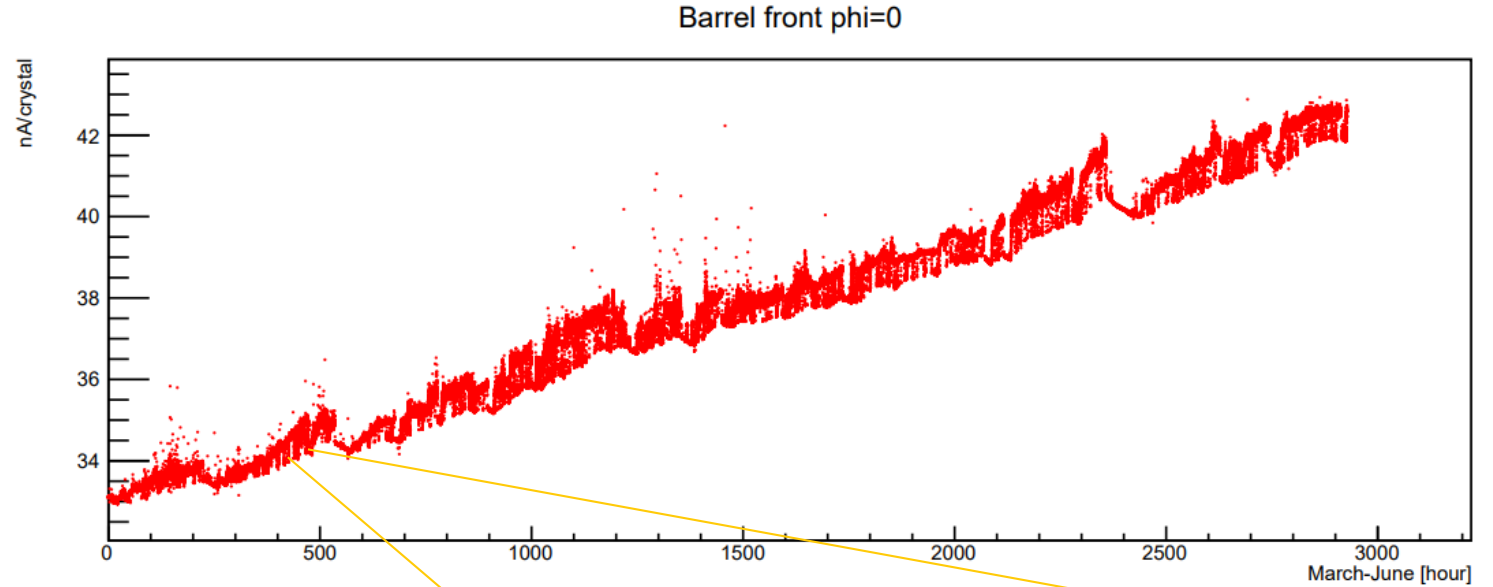
| | | |
|-----------|----|-------------|
| 前方エンドキャップ | 内側 | 28本 |
| | 外側 | 116本 |
| バレル | 前方 | 384本または480本 |
| | 後方 | 352本または440本 |
| 後方エンドキャップ | 内側 | 60本 |
| | 外側 | 60本 |

モニターした電流値の推移

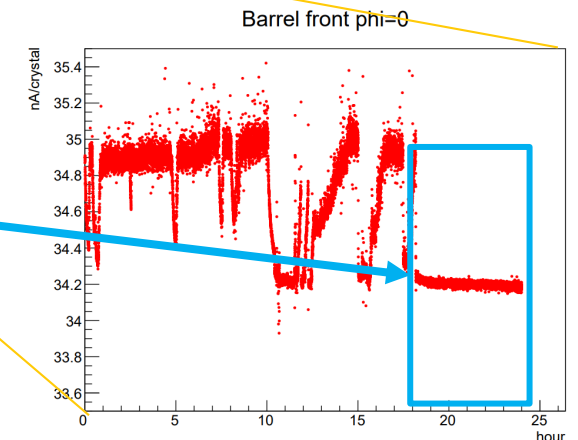
PIN-PDで測定された電流値を時間経過で表した。期間は2021年3月～6月

暗電流値の求め方

1. SuperKEKB の加速器運転状況のモニター画面から、HER、LERともにビームがOFFになっているところを探す。
2. その間で測定された電流値の平均値を求め、それを暗電流値とした。
3. 2月24日～7月5日で同様のビームOFF期間を探し、暗電流値とした。



3月20日を拡大したグラフ
ビームOFFのときは電流値は低くなっている

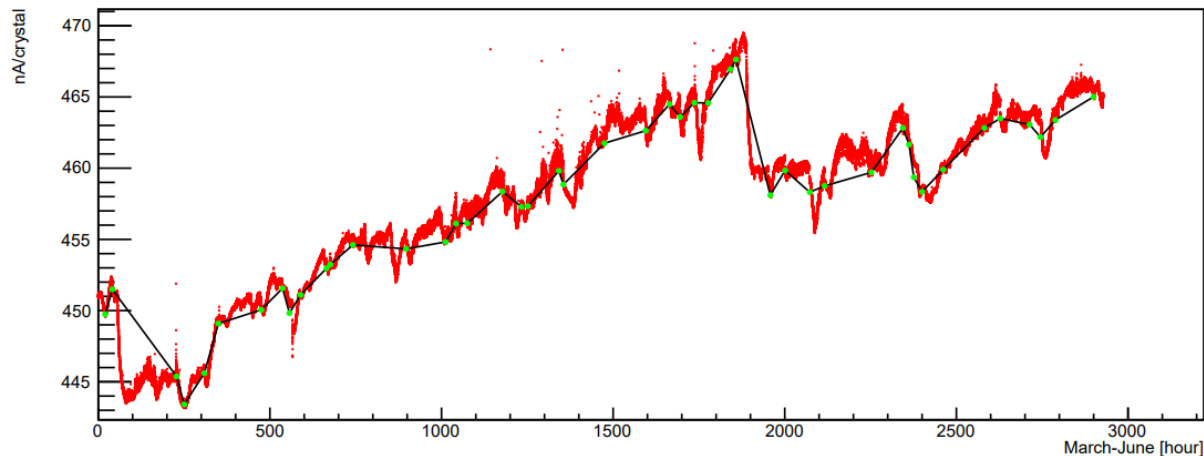


2021年3月20日の加速器の運転状況。上段は HER(e^-)、下段は LER(e^+) の状況を表し、ビーム電流が赤い実線で示されている。横軸は時間 (hour)

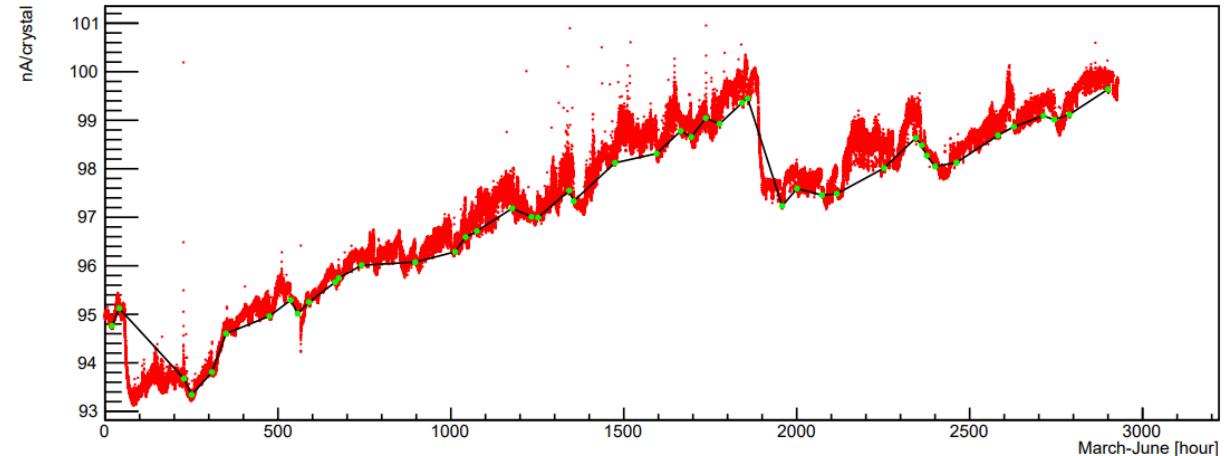
前方エンドキャップ

- 電流値の変化が不規則で前ページで説明した手法では対応しきれないことがわかった。
- 今回は被ばく量算出の対象から外した。

前方エンドキャップ 内側

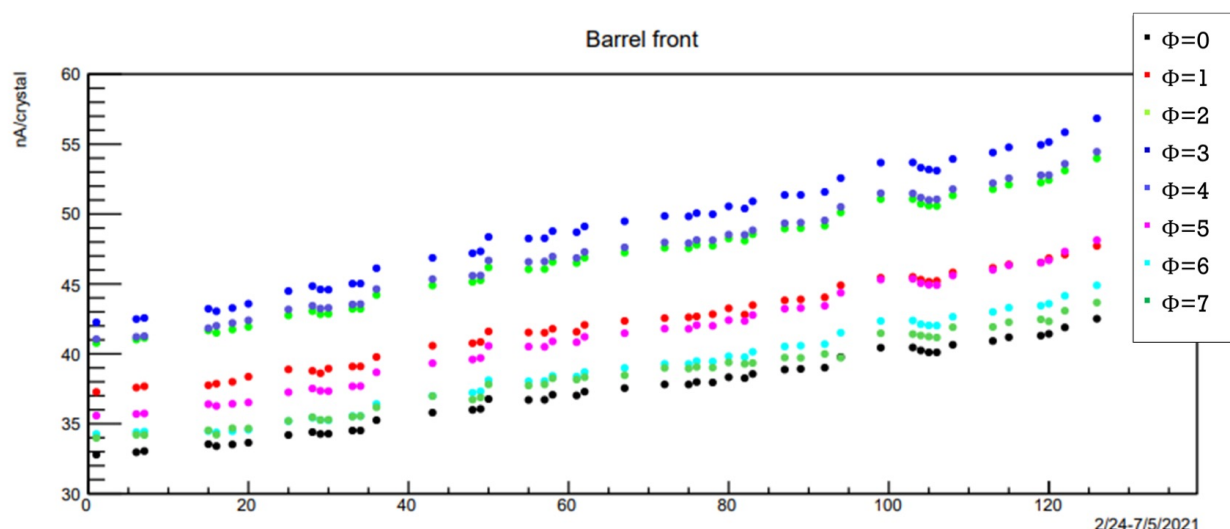


前方エンドキャップ 外側



暗電流値の時間推移

- 2021年2月24日～7月5日までの期間中、ビームOFF時の電流値を暗電流値とした。
- 暗電流値は時間とともに増加していることがわかった。
- バレル前方・後方、後方エンドキャップ外側において約10 nA/cry、後方エンドキャップ内側で約20 nA/cryであった。



8分割した一つを ϕ （ビーム軸周りの方位角の違い）として、グラフではそれを色でわけている。

表 3.2: ビームバックグラウンド測定に使用した暗電流値の増加量

| [nA/crystal] | Barrel front | Barrel back | Bwd EC out | Bwd EC inner |
|--------------|--------------|-------------|------------|--------------|
| $\phi = 0$ | 8.9 | 8.0 | 8.5 | 25.2 |
| $\phi = 1$ | 9.5 | 8.2 | 9.1 | 25.8 |
| $\phi = 2$ | 12.1 | 9.9 | 8.1 | 20.5 |
| $\phi = 3$ | 13.4 | 10.0 | 6.9 | 17.6 |
| $\phi = 4$ | 12.4 | 8.6 | 5.8 | 14.8 |
| $\phi = 5$ | 11.6 | 8.5 | 5.7 | 15.1 |
| $\phi = 6$ | 9.7 | 7.8 | 6.4 | 18.2 |
| $\phi = 7$ | 8.9 | 7.8 | 7.5 | 22.3 |

CsI (TI) 結晶が受けた放射線被ばく量の算出方法

- PIN-PD電流値と暗電流値の差を I_{rad} として、これを時間で積分し、ビームバックグラウンドによるCsI (TI) 結晶で受けた放射線被ばく量を求める。

$$D = \int \left(\frac{dD}{dt} \right) dt = \sum 4.0 \times 10^{-8} I_{\text{rad}} \Delta t$$

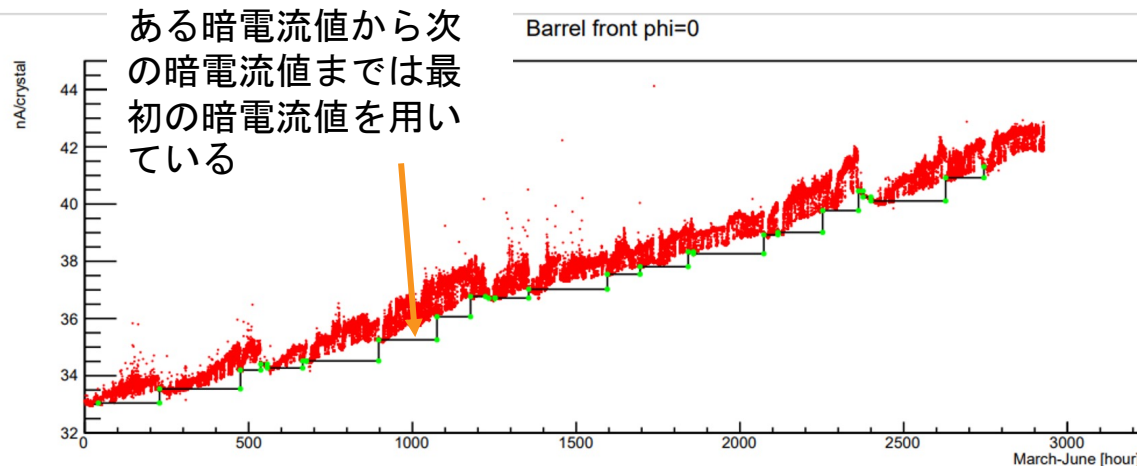
表 3.4: 放射線算出に使用する物理パラメータ

| | |
|-------------------------|--------------------------|
| 1 J | 6.24×10^{18} eV |
| 結晶一本あたりの重さ | 5 kg |
| エネルギー 1 MeV あたりの電子正孔対の数 | 5000 |
| 電気素量 | 1.6×10^{-19} C |

暗電流値の取り扱い

暗電流値の取り扱い（今まで）

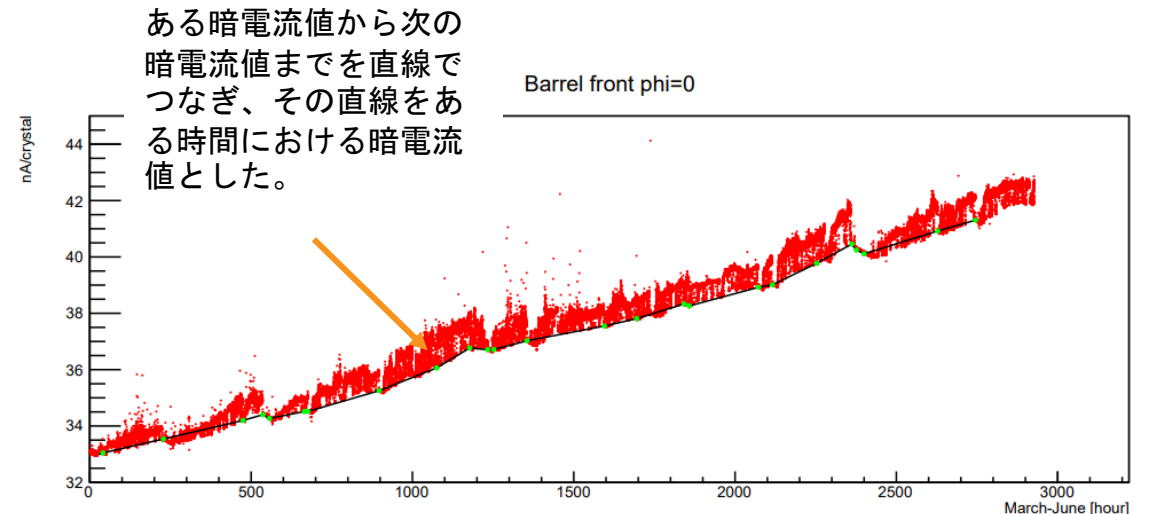
- 運転時間に対して最新の暗電流値を設定する定数として扱っていた。
- 暗電流値は時間とともに増加しているためビームバックグラウンドによる放射線被ばく量を過大評価していることになる。



2022/4/11

暗電流値の取り扱い（本研究）

- 暗電流値は時間経過で増加している。
- 算出した暗電流値を時間的に近接したデータの間を直線で補完した。



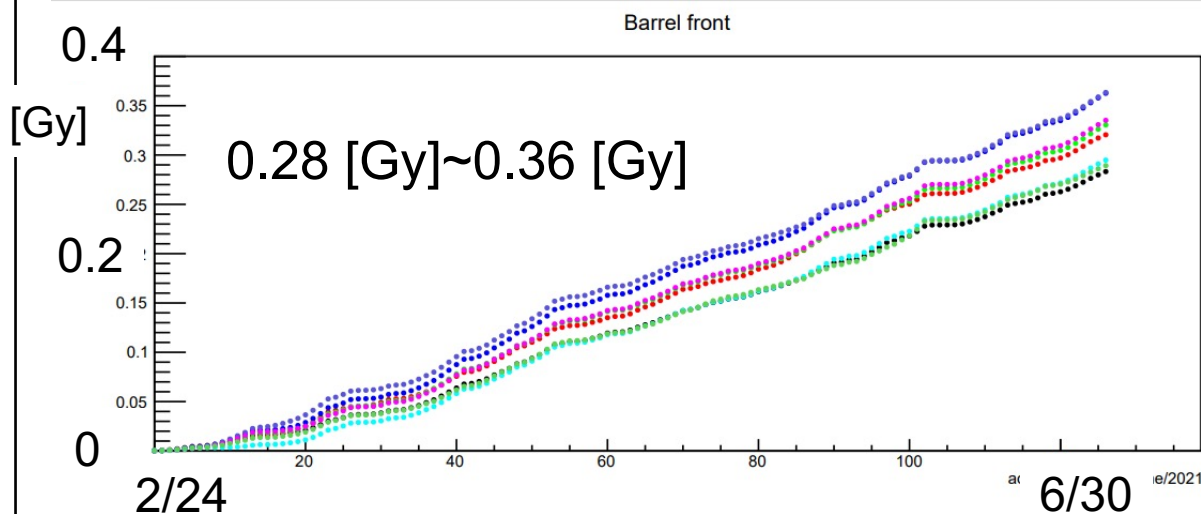
修士論文発表会

12

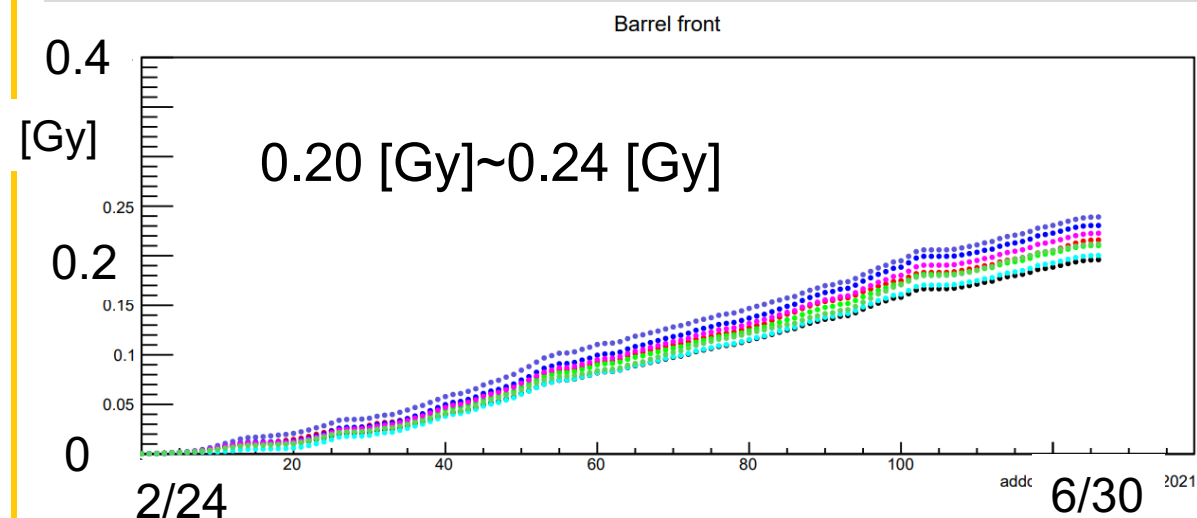
暗電流値の取り扱いの違い

- 2つの結果を比較したところ、以前の方法はバレル前方・後方、後方エンドキャップ内側・外側のいずれも約20%被ばく量を過大に見積もっていたことがわかった。

暗電流値を階段状に結んだ今までの方法

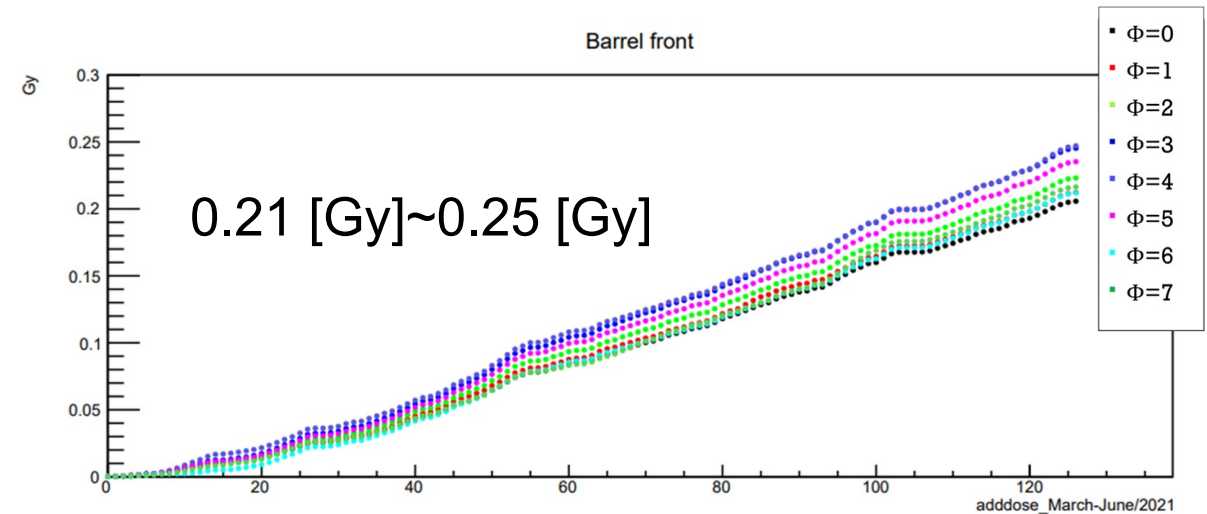
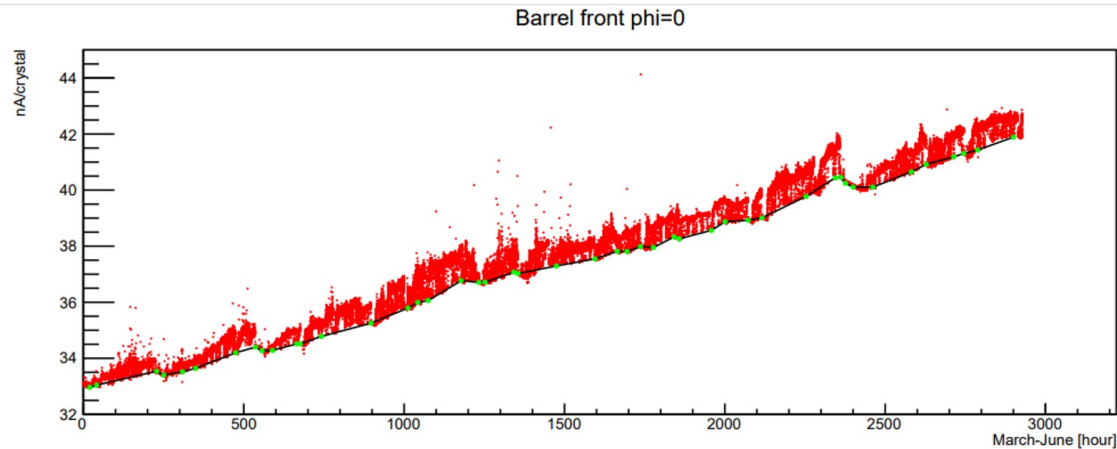


暗電流値を直線で補完した本研究の方法



さらに細かく暗電流を測定

- ビームOFF期間をさらに細かく探し、暗電流値の測定点を27点から48点に増やした。
- これらについて時間的に近接したデータの間を直線で補完した。



- 暗電流値のデータ点を27点から48点に増やしても放射線被ばく量の結果に影響はなかった。

2018年と2021年の運転の比較

- 2018年4月～7月運転期間における放射線被ばく量はバレル部前方で約 0.2 Gy、後方で 約 0.3 Gy であった。
- 本研究の2021年3月～6月とおおむね同じ。
- 積分ルミノシティは 0.5 fb^{-1} (2018年4月～7月) → 140 fb^{-1} (2021年3月～6月) と約280倍に増加
- ルミノシティの増加に対してビームバックグラウンドは抑えられていることがわかった。

SuperKEKB 加速器へのアップグレードのため、LER の真空チェンバーが全て新製されたことと関連

- 新製した真空チェンバーの内壁は多数のガス分子が付着。運転開始直後はビームが発する放射光により、真空劣化をもたらし、ビームガス散乱が多くなる。
- このガス分子はビーム通路を高真空に保つポンプにより取り除かれる。
- これを長期にわたって続けるうちにガス分子放出が減少し、ビームガス散乱が減る。

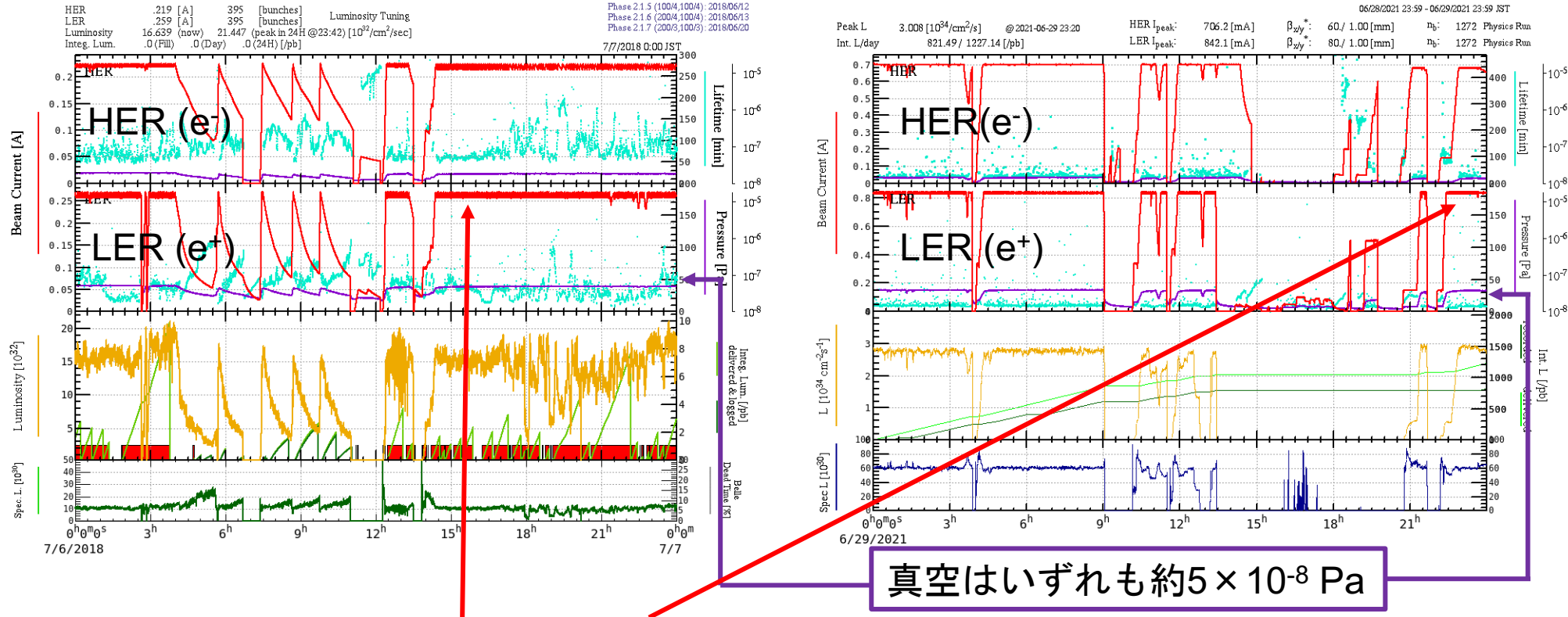
ビームガス散乱

ビームパイプ内に残ったガスとビーム粒子が散乱し、ビームバックグラウンドとなる。

LER(e⁺)真空の改善によるビーム電流増加

2018年7月6日

2021年6月29日



LER(e⁺)ビーム電流は約260 mA → 約840 mAに増加
 対応してHER(e⁻)ビーム電流も約220 mA → 約700 mAに増加
 ルミノシティ $2 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1} \rightarrow 3 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ に向上

2022/4/11

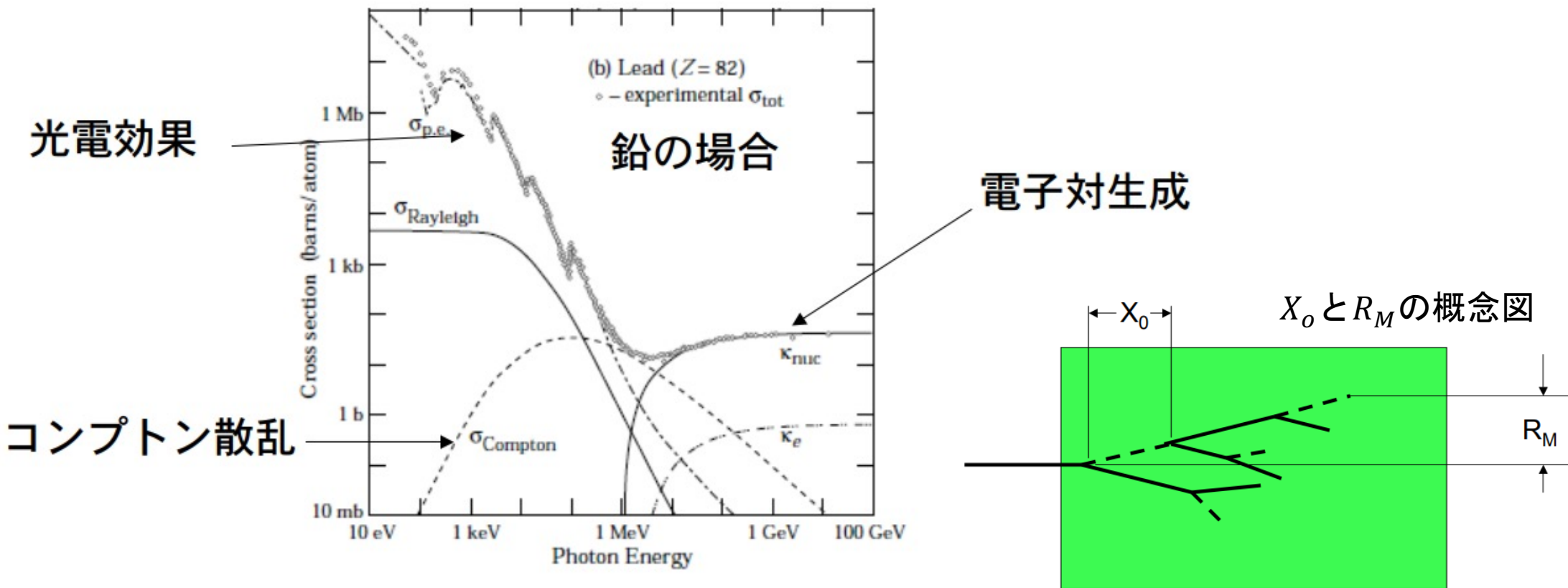
修士論文発表会

まとめ

- SuperKEKB 加速器の2021年3月～6月運転の期間中に電磁カロリメーターのPIN-PD電流値をモニターしたデータを解析した。
- PIN-PDの暗電流値が時間とともに増加していることを確かめた。
- 時間的に近接した暗電流値データの間を直線で補完したPIN-PD電流値との差を求め、時間で積分し CsI(Tl) 結晶の放射線被ばく量を求めた。
- これまでの暗電流値を階段状に見積もる方法ではおよそ20%被ばく量を多く過大評価していたことがわかった。
- 暗電流値のデータ点を増やした結果、放射線被ばく量の結果は変わらなかった。
- バレル部の前方で 0.20 Gy～0.25 Gy、後方で 0.33 Gy～0.39 Gy、後方エンドキャップ部の外側で 0.40 Gy～0.55 Gy、内側で 0.73 Gy～1.02 Gy を得た。また、前方エンドキャップに関しては、今回の手法では対応できなかった。
- 2018年と2021年の運転期間における放射線被ばく量を比較した結果、ルミノシティは増加しているにも関わらず、おおむね同じ結果であったことがわかった。これは、SuperKEKB 加速器へのアップグレード時に LER の真空チェンバーが新製されて実験を開始してから運転を続けるにつれ、内面からのガス放出が減少しているためと考えられる。

Back up

1, Belle II 電磁カロリメータ (ECL) • CsI (TI) 結晶シンチレーターは長さは16 [X_0], 幅は1.5 [R_M] に対応



放射長 [X_0]

- エネルギーが1/e に減少するまでに通過する平均距離

モリエール半径 [R_M]

- シャワーの横方向に広がり、電子・光子のエネルギーの90%が入るシャワーの半径

用語解説

- シングルエンド
 - ある電圧を基準にそれよりも高いか低いかで1または0を表現する方法。一本の信号線で利用可
- ボルテージフォロアー
 - 高いインピーダンスを低いインピーダンスに変換すること。オペアンプの反転入力端子と出力をショートして使う。非反転増幅回路の一種で増幅度は1。
- データロガー
 - 信号記録をデジタル処理して記憶する装置。オシロスコープに比べて遅い事象の信号観測に適している。
- マルチプレクサススイッチモジュール
 - 複数の入力を1つの出力に接続し、自動テストシステム配線を簡素化する。
- プロトコル
 - コンピューター同士が通信を行うためのルール
- オペアンプ
 - 非反転入力端子 (+) と反転入力端子 (-) と、一つの出力端子を備えた増幅器の電子回路モジュール。
- バイアス電圧
 - 中央が0Vの偏りのない信号を偏った信号にするために加える電圧のこと。波形を維持したまま偏らせることができる。直流で動作する電子回路で交流信号を処理するときはバイアス電圧を加えて直流信号にしてから処理をする。

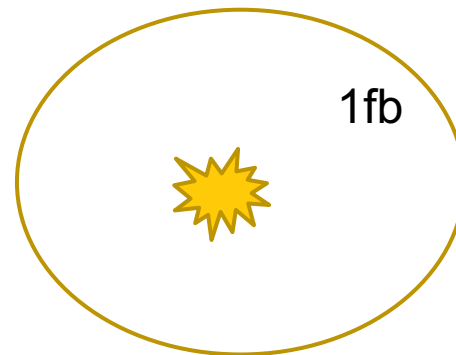
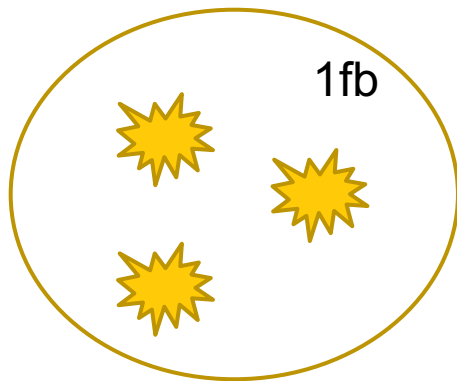
無機シンチレーターの原理

- 電子のとりうるエネルギー状態は構成原子に強く束縛された価電子帯と自由に動き回る伝導帯に分かれている。
- 「線がシンチレーターに入射すると価電子帯にある電子と光電吸収やコンプトン散乱を起こす
- 電子が励起されてエネルギーの高い伝導体にあげられる
- 励起された電子は結晶中を動き回り、クーロン散乱によりほかの電子を励起させる。
- これらの電子が再び価電子帯に落ち込んだときにエネルギーが光子の形で放出⇒発光

ルミノシティ

- 衝突型加速器の衝突の頻度を表す指標
- 単位は $[\text{fb}^{-1}] \text{ b}$ (バーン) は面積の単位で 10^{-28} m^2
- つまり1fbでどれくらい衝突が起きているかを示すため、値が大きい方が多く衝突をしているということになる

イメージ図



CsI (TI) 結晶シンチレーター

- シンチレーターとは、粒子が入射してエネルギー損失を起こしたときに光を発する物質のこと

無機シンチレータを採用

- 限られた体積の中でシャワーを形成する
- γ 線に対する発光効率が低い

CsI (TI) 結晶

- 縦5.5 cm、横5.5 cm、長さ30 cm、約5kg
- 全体で8736本を使用
- 先端に、PIN-PDがある

特徴

- 発光量が豊富 (約5万光子/MeV)

弱点

- 発光の減衰時間が $1.3 \mu\text{s}$ と長いことからくるパイルアップ。

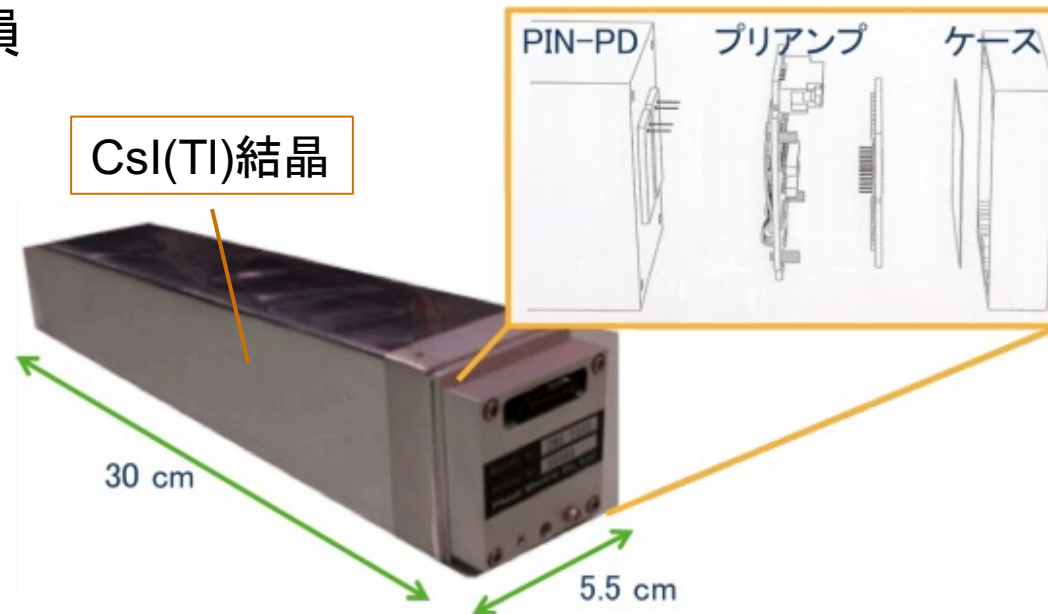
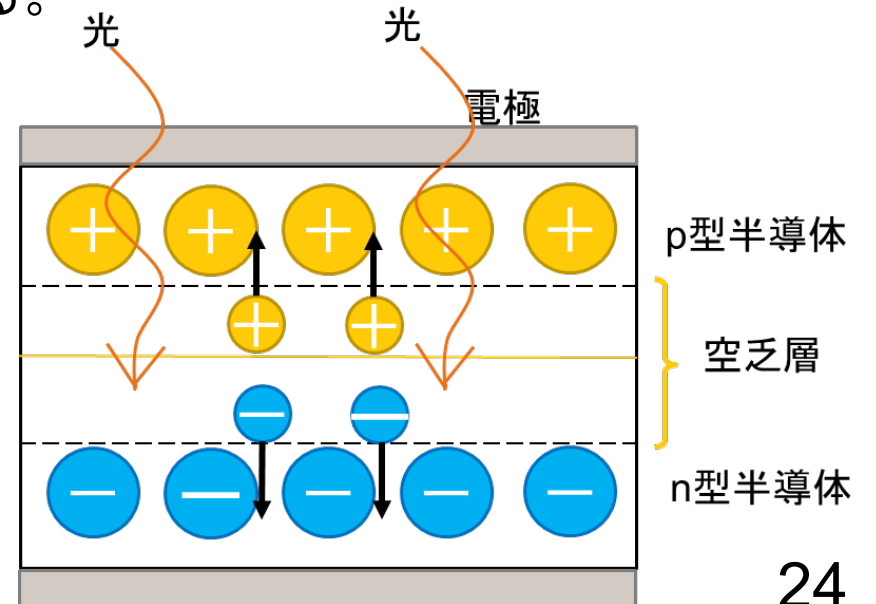
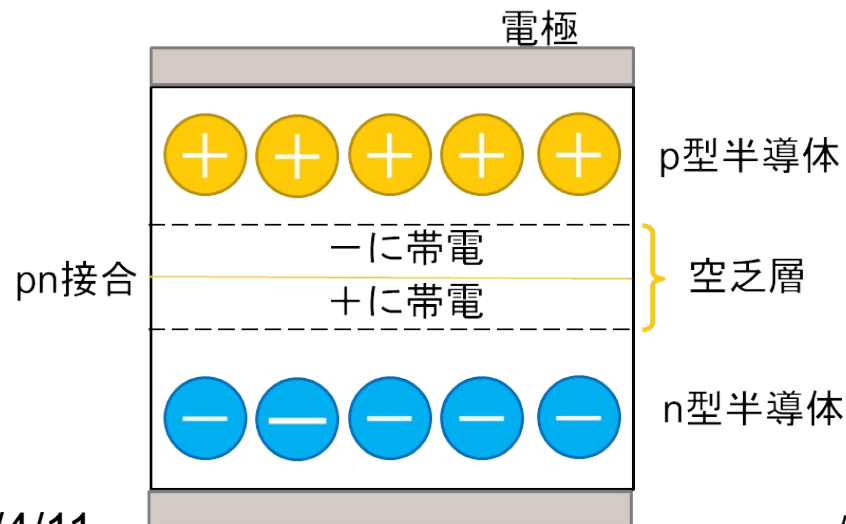


表 2.1: 無機シンチレーターの性能比較。f は fast component、s は slow component を表す。

| | BGO | 純 CsI | CsI(Tl) | |
|-------------------------|------|------------|---------|--|
| 密度 [g/cm ³] | 7.13 | 4.51 | 4.51 | |
| 放射長 [cm] | 1.12 | 1.86 | 1.86 | |
| モリエール半径 [cm] | 2.23 | 3.57 | 3.57 | |
| 発光量 [photon/MeV] | 6400 | 330f 1100s | 50000 | |
| 蛍光減衰時間 [ns] | 300 | 6f 35s | 1300 | |
| 発光波長 [nm] | 480 | 310f 420s | 560 | |

PIN-PD光検出器

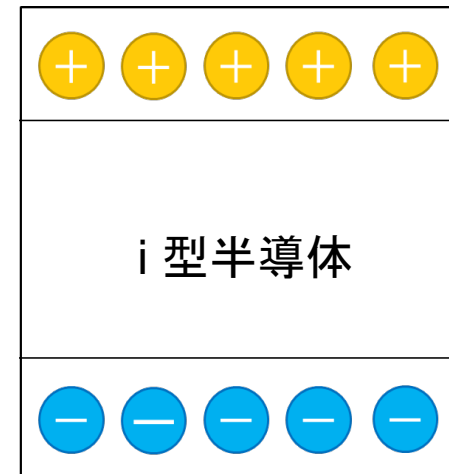
- PD（フォトダイオード）とは、p型半導体とn型半導体を接合した半導体素子であり、pn接合部付近では電子と正孔が打ち消しあいキャリアが存在しない空乏層と呼ばれる領域が形成される。
- 光検出器として使用する場合、逆方向にバイアスをかける。
- n型半導体内部の電子、p型半導体の正孔は電極側に引き付けられ、空乏層が大きくなる。
- 空乏層に光を照射すると、電子と正孔が発生し、電子はn型半導体、正孔はp型半導体の電極へ移動し電気信号パルスが生じる。
- PDにシンチレーターを組み合わせることでシンチレーターに素粒子が入射したときに発生するシンチレーション光を電気信号として検出することができる。



PIN-PD光検出器

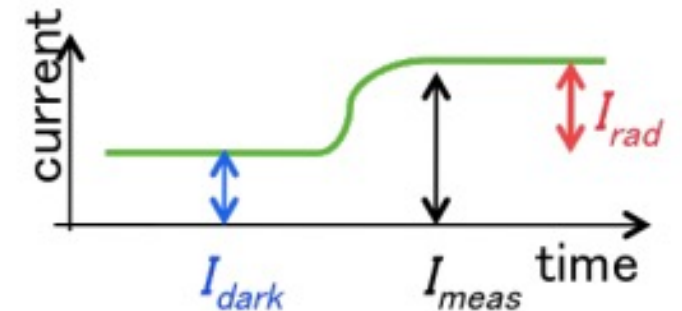
PIN-PD検出器

- p型半導体とn型半導体の間にi型半導体（真性半導体）を挟む。
- 空乏層を拡大させてキャリア（電子・正孔）を多く発生させ、PDに比べ低電圧で応答が速い。



暗電流

- 逆方向にバイアス電圧を印加した状態でもわずかに電流が流れる。これを暗電流という。
- 空乏層中で熱励起により発生した電子・正孔対の移動によって発生。



測定・記録された値 (I_{meas}) は、CsI (TI) 結晶からのシンチレーション光 (I_{rad}) とこの暗電流値 (I_{dark}) が含まれるため、CsI (TI) 結晶の放射線被ばく量を求めるには、増加分を求める必要がある。

PIN-PD電流値モニターシステム

PIN-PD電流値モニターシステム

- CsI (TI) 結晶のシンチレーション光を読み出すPIN-PD電流値を測定・記録するもので、5秒ごとに測定を行う。

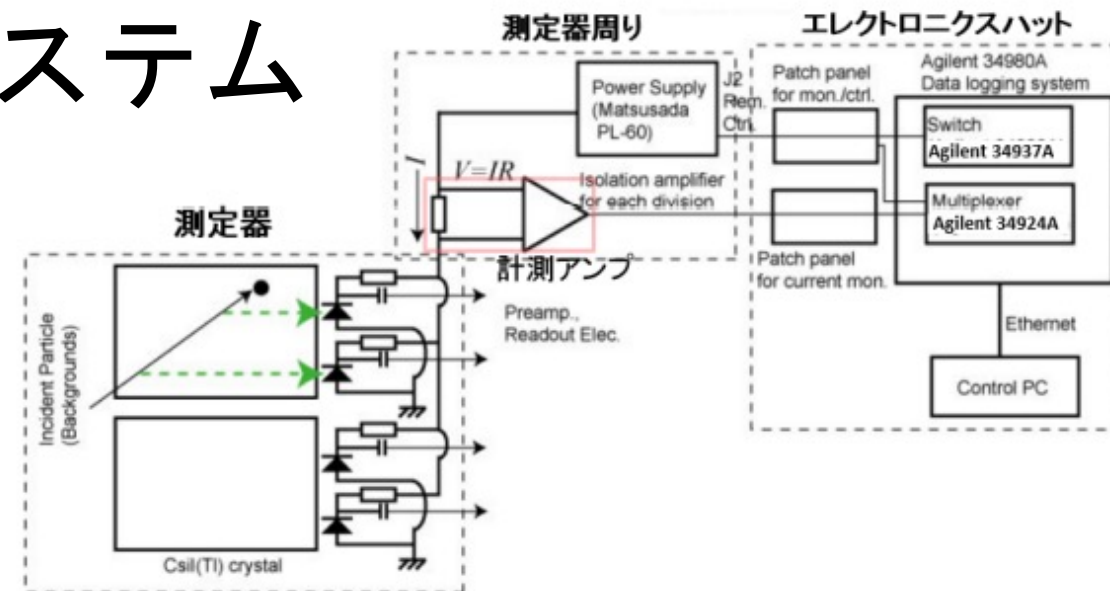


図 4.4 PIN-PD 電流モニターシステムのブロックダイアグラム

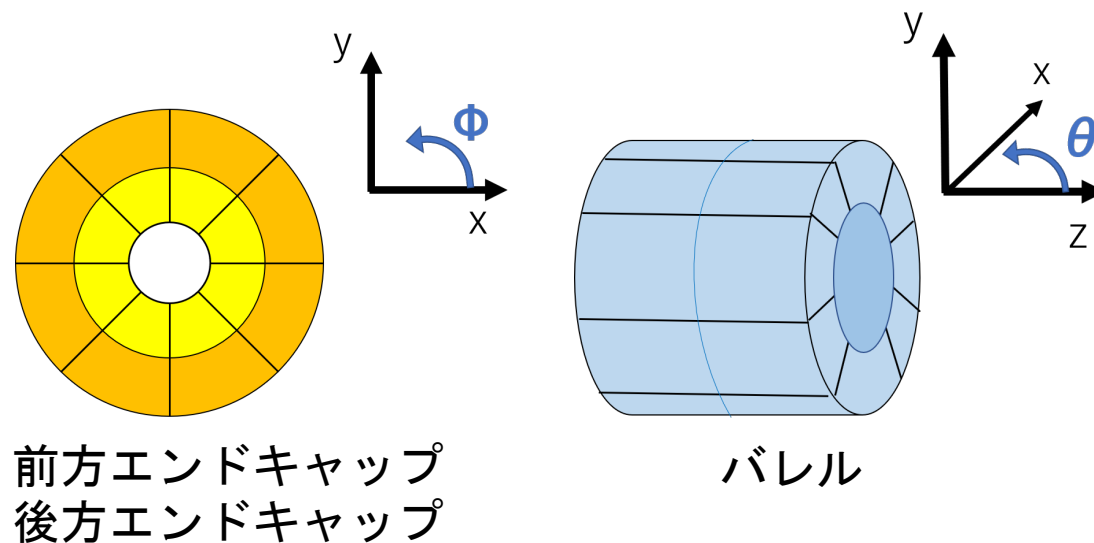
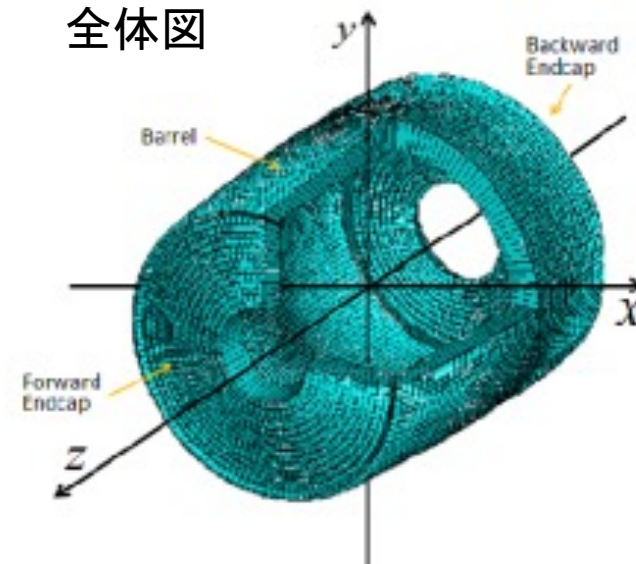
1. 計測アンプを用いて電気信号に変換する。
 - セグメントごとにバイアス電源の陽極との間に抵抗10kΩを挿入している。
2. 電圧降下の増幅率を10倍にしている。
3. ボルテージフォロアーで変換された電気信号をエレクトロニクスハット内のデータロガーへ送る。
4. データロガーで数値化する。

PIN-PD電流値モニターシステム

- PIN-PD電流値モニターは8736本あるカウンターをセグメントごとにまとめて読み出しを行う。
- ビーム軸に垂直な xy 平面における方位角 ϕ 方向に 8 分割
 - 前方エンドキャップ、後方エンドキャップのそれぞれを内側・外側に分ける
- z 軸から極角 θ 方向に 6 分割
 - バレルは前方と後方に分ける
- 総計48セグメントに分割

方位角に依存してビームバックグラウンド量が異なると考えられているため、分割をしている

全体図



PIN-PD電流値モニターシステム

- 48のセグメントの結晶の本数は異なるため、結晶一本当たりの電流値 (nA/crystal) に換算する必要がある。
- 電流値モニターの生データは、セグメント毎に配置した10 kΩ の電圧降下を計測アンプで 10 倍 に線形増幅したものを記録

表 2.2: 測定点あたりの結晶の本数

| | | |
|-----------|----|----------------|
| 前方エンドキャップ | 内側 | 28 本 |
| | 外側 | 116 本 |
| バレル | 前方 | 384 本または 480 本 |
| | 後方 | 352 本または 440 本 |
| 後方エンドキャップ | 内側 | 60 本 |
| | 外側 | 60 本 |

$$I = \frac{V}{10000 \cdot N_{\text{cry}}}$$

測定は5秒ごとに行う

0:0:0

451.049622 431.888916 387.963898 328.134644 324.448212 313.098572 341.206421 394.309631 94.955688
 91.343529 87.995087 77.021637 74.565346 69.812065 74.834740 82.319397 33.089169 37.695831 41.261356
 42.647625 41.367420 35.791748 34.508831 34.223312 29.600142 32.597046 41.239346 37.498684 31.322897
 31.155478 29.653067 28.718523 53.630833 65.466667 65.155334 57.771500 48.889000 45.562832 44.773003
 47.309002 196.098328 209.625504 203.224655 183.197662 165.495331 162.211166 163.043503 177.560822

0:0:5

451.046783 431.965729 387.966797 328.068237 324.470734 313.041046 341.322144 394.300720 94.979141
 91.347160 87.975952 77.007156 74.597847 69.704391 74.861557 82.316986 33.087448 37.665939 41.204662
 42.707230 41.387604 35.826958 34.516769 34.247021 29.631504 32.778999 41.250824 37.547955 31.342585
 31.170296 29.666420 28.679750 53.645664 65.528000 65.215332 57.894333 49.019501 45.699501 44.898331
 47.362835 196.234329 209.753342 203.342834 183.375000 165.684998 162.398331 163.154999 177.614487

生データ

最初の8個のデータは前方エンドキャップ内側の結晶一本当たりの電流値を示している。

前方エンドキャップ内側 : 1~8番目
 前方エンドキャップ外側 : 9~16番目
 バレル前方 : 17番目~24番目
 バレル後方 : 25番目~32番目
 後方エンドキャップ外側 : 33番目~40番目
 後方エンドキャップ内側 : 41番目~48番目

ビームバックグラウンド

- 安定に周回できなくなったビーム粒子はビームパイプに衝突して、二次粒子を生成する。これが検出器に達するとビームバックグラウンドとなり、検出器の検出効率を悪化させる。

1. タウシェック散乱

加速器ビームはバンチという電子または陽電子の集まりでできている。同一バンチ内でのビーム粒子同士の散乱のことである。

2. ビームガス散乱

ビームパイプ内に残ったガスとビーム粒子が散乱すること。

ビーム周回によって発生

3. シンクロトロン放射

ビームが磁場により曲げられる際に発生する放射光がビームパイプの検出器内部を通過する区間にあたると、バックグラウンドとなる。

4. ビーム入射直後のビームロス

継続的にビームを入射してビーム電流を一定に保ちながら運転するため、ビーム操作を行う。この時にビームバックグラウンドが増加する

5. Radiative Bhabha 散乱

電子または陽電子の内、Bhabha 散乱で光子を放出してエネルギーを失ったものが、磁場により本来よりも大きく曲がり、ビームパイプ内壁にあたる。これにより生じる電磁シャワーがバックグラウンドとなる。

6. 二光子過程

電子と陽電子の両方から同時に放出された仮想光子同士の衝突により、粒子生成が起きるため衝突点で生じる、ルミノシティに比例するバックグラウンド源である。

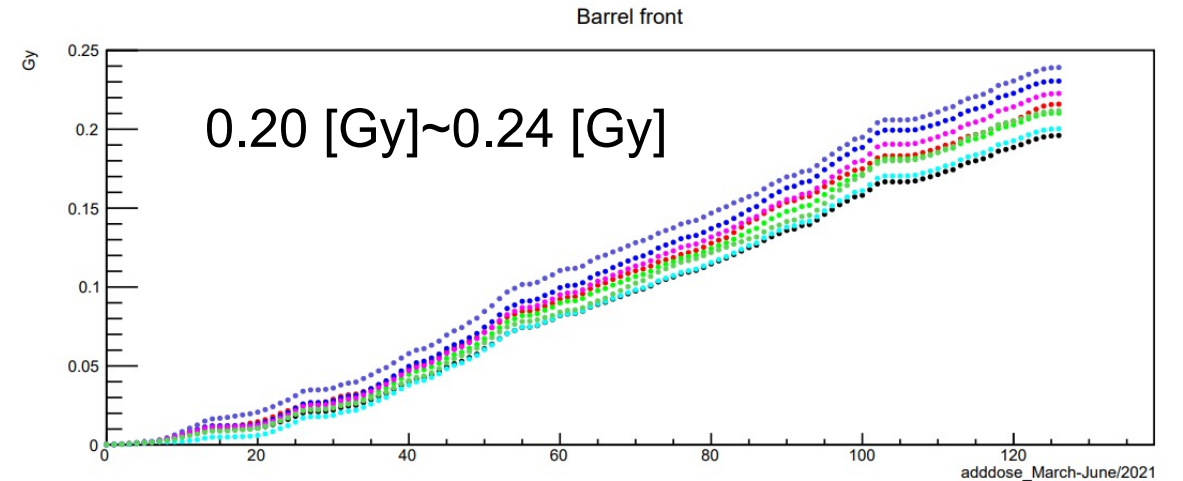
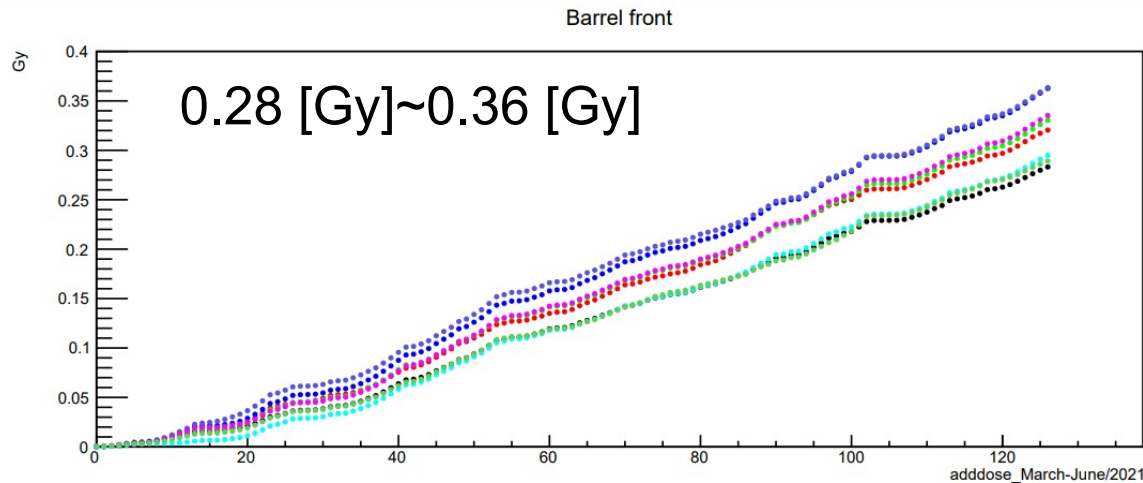
ビーム衝突によって発生

ビームバックグラウンド測定

| [Gy] | Barrel front | Barrel back | Bwd out | Bwd inner |
|----------|--------------|-------------|---------|-----------|
| $\Phi=0$ | 0.28 | 0.43 | 0.52 | 1.14 |
| $\Phi=1$ | 0.32 | 0.42 | 0.54 | 1.18 |
| $\Phi=2$ | 0.33 | 0.46 | 0.63 | 1.22 |
| $\Phi=3$ | 0.36 | 0.49 | 0.64 | 1.27 |
| $\Phi=4$ | 0.36 | 0.48 | 0.63 | 1.17 |
| $\Phi=5$ | 0.34 | 0.47 | 0.61 | 1.20 |
| $\Phi=6$ | 0.29 | 0.44 | 0.59 | 1.13 |
| $\Phi=7$ | 0.29 | 0.41 | 0.50 | 1.03 |

Barrel front のグラフ
他にも形式をそろえバックアップしておく。

| [Gy] | Barrel front | Barrel back | Bwd out | Bwd inner |
|----------|--------------|-------------|---------|-----------|
| $\Phi=0$ | 0.20 | 0.35 | 0.43 | 0.88 |
| $\Phi=1$ | 0.22 | 0.33 | 0.45 | 0.90 |
| $\Phi=2$ | 0.21 | 0.36 | 0.54 | 0.97 |
| $\Phi=3$ | 0.23 | 0.38 | 0.56 | 1.06 |
| $\Phi=4$ | 0.24 | 0.39 | 0.56 | 0.98 |
| $\Phi=5$ | 0.22 | 0.38 | 0.55 | 1.01 |
| $\Phi=6$ | 0.20 | 0.36 | 0.52 | 0.93 |
| $\Phi=7$ | 0.21 | 0.33 | 0.42 | 0.79 |



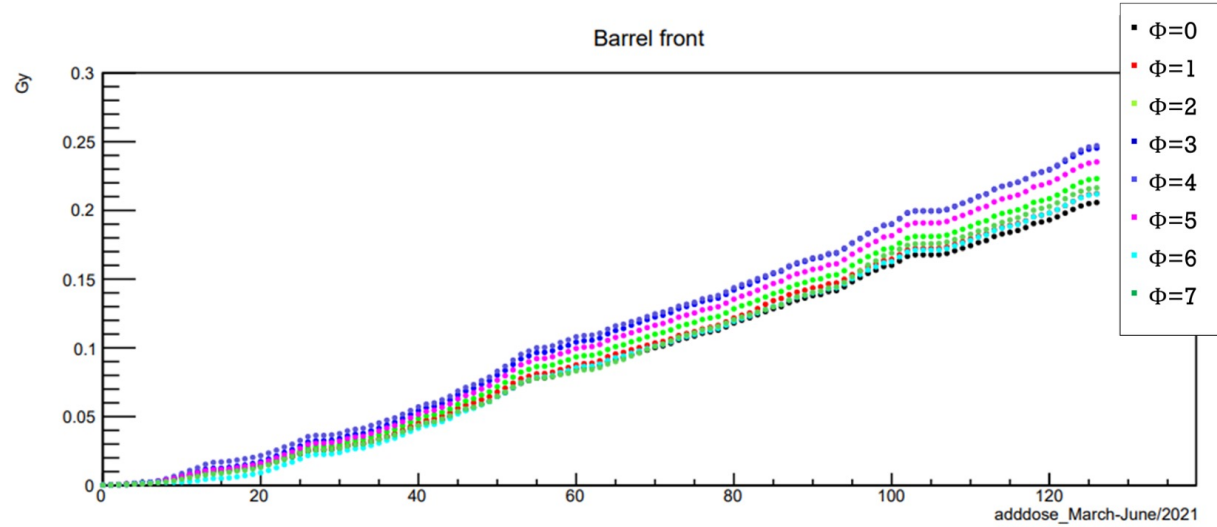
グラフは、バレル前方部を8分割したうちの一つを示している。
【横軸】 2月24日~6月30日までを日付で表している。
【縦軸】 ビームバックグラウンドによる放射線被ばく量の積算値

ビームバックグラウンド測定

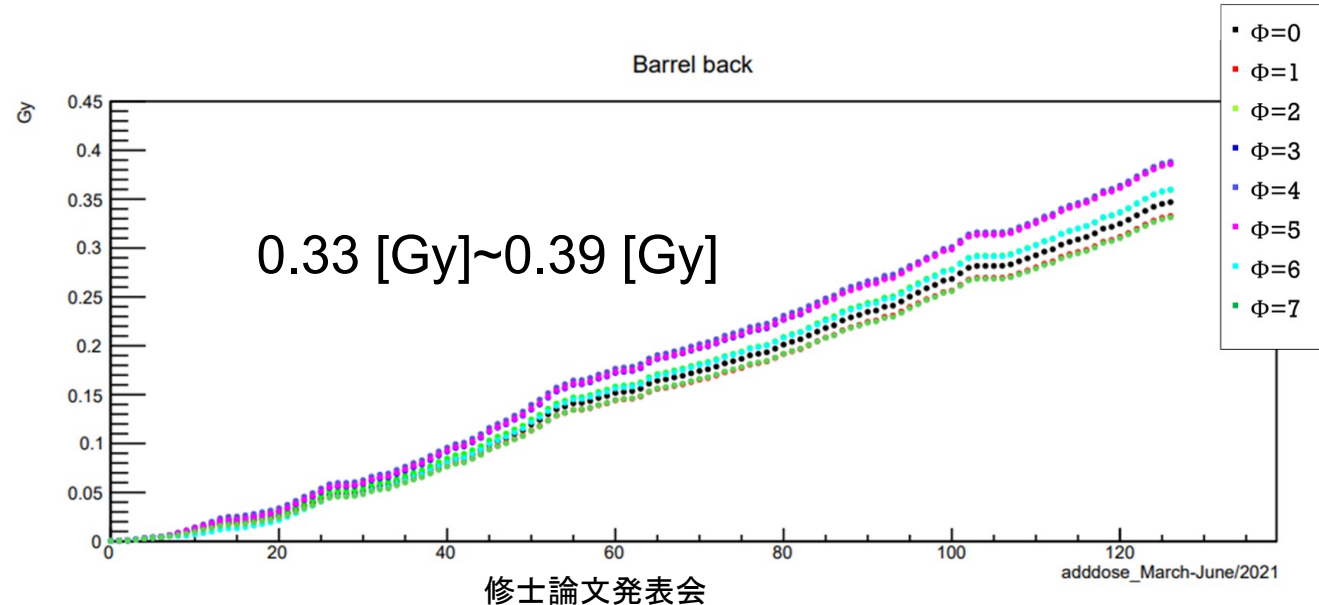
- ・ 横軸は2月24日～6月30日までを日数で示す。
- ・ 縦軸は放射線被ばく量の積算値 [Gy]

・ バレル前方

| [Gy] | Barrel front | Barrel back | Bwd out | Bwd inner |
|----------|--------------|-------------|---------|-----------|
| $\Phi=0$ | 0.21 | 0.35 | 0.41 | 0.82 |
| $\Phi=1$ | 0.21 | 0.33 | 0.42 | 0.83 |
| $\Phi=2$ | 0.22 | 0.36 | 0.51 | 0.92 |
| $\Phi=3$ | 0.25 | 0.39 | 0.54 | 1.02 |
| $\Phi=4$ | 0.25 | 0.39 | 0.55 | 0.96 |
| $\Phi=5$ | 0.24 | 0.39 | 0.54 | 0.99 |
| $\Phi=6$ | 0.21 | 0.36 | 0.50 | 0.88 |
| $\Phi=7$ | 0.22 | 0.33 | 0.39 | 0.73 |



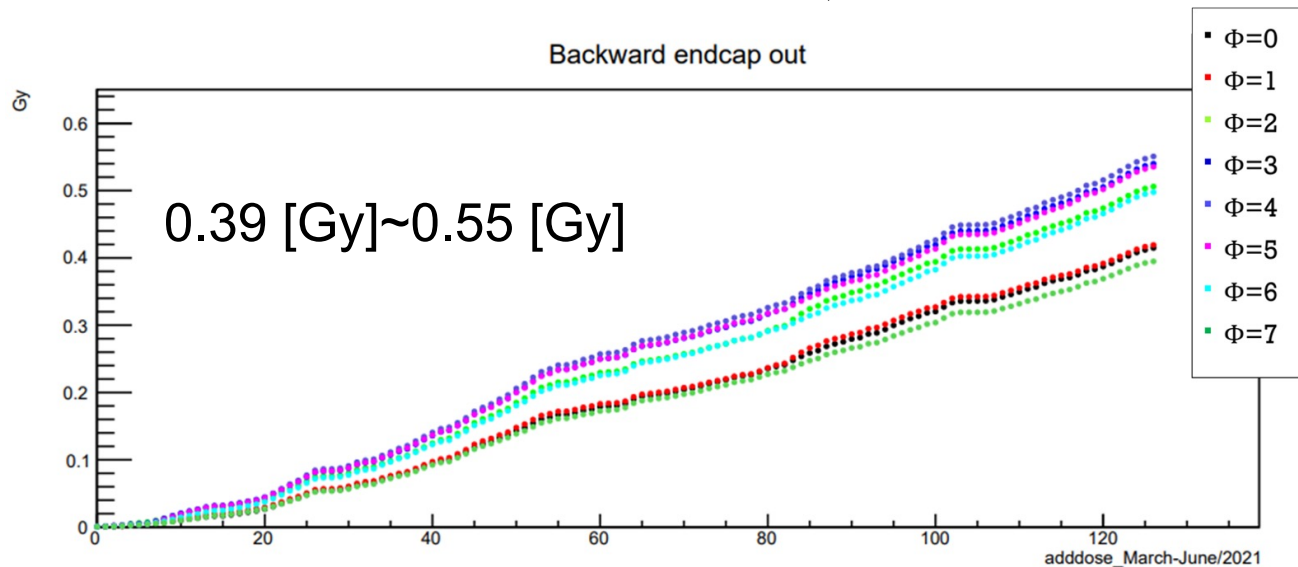
・ バレル後方



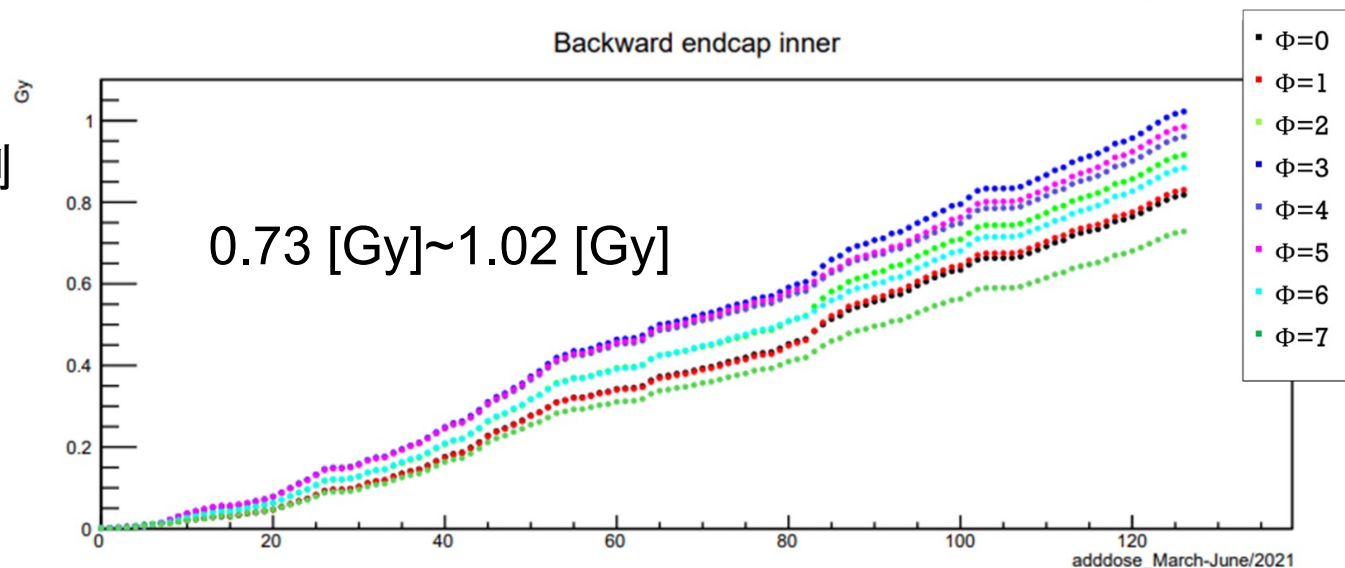
ビームバックグラウンド測定

・ 横軸は2月24日
～6月30日までを
日数で示す。
・ 縦軸は放射線
被ばく量の積算
値 [Gy]

・ 後方エンドキャップ外側

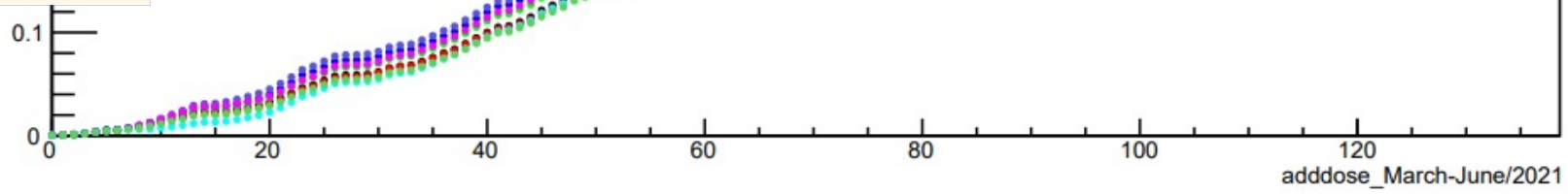


・ 後方エンドキャップ内側



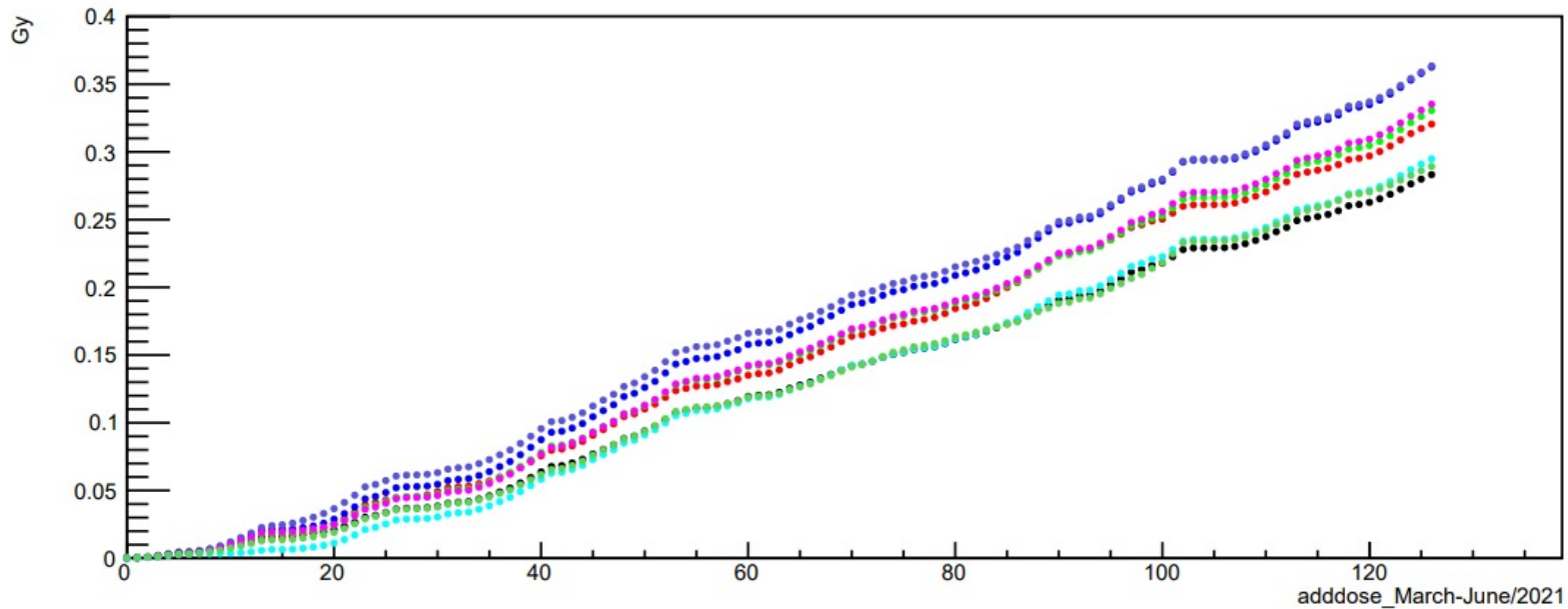
Barrel back

| [Gy] | Barrel front | Barrel back | Bwd out | Bwd inner |
|----------|--------------|-------------|---------|-----------|
| $\Phi=0$ | 0.28 | 0.43 | 0.52 | 1.14 |
| $\Phi=1$ | 0.32 | 0.42 | 0.54 | 1.18 |
| $\Phi=2$ | 0.33 | 0.46 | 0.63 | 1.22 |
| $\Phi=3$ | 0.36 | 0.49 | 0.64 | 1.27 |
| $\Phi=4$ | 0.36 | 0.48 | 0.63 | 1.17 |
| $\Phi=5$ | 0.34 | 0.47 | 0.61 | 1.20 |
| $\Phi=6$ | 0.29 | 0.44 | 0.59 | 1.13 |
| $\Phi=7$ | 0.29 | 0.41 | 0.50 | 1.03 |

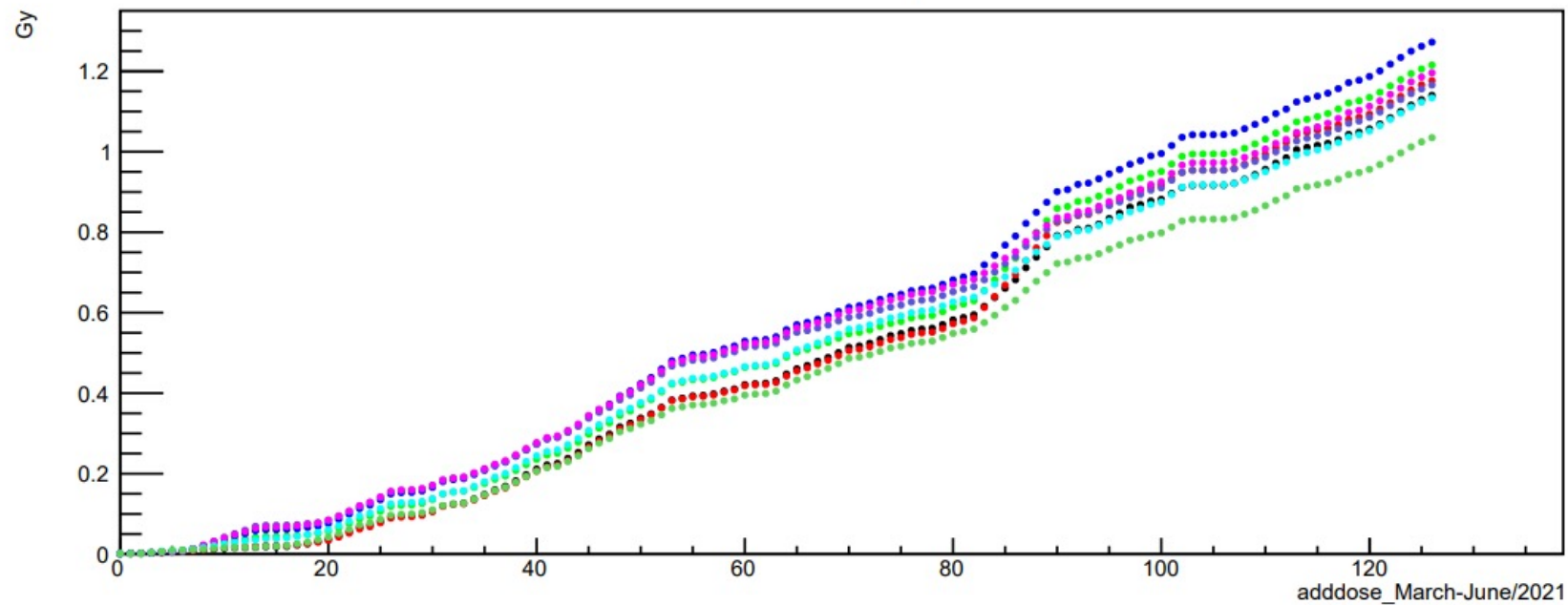


Old radiation result

Barrel front

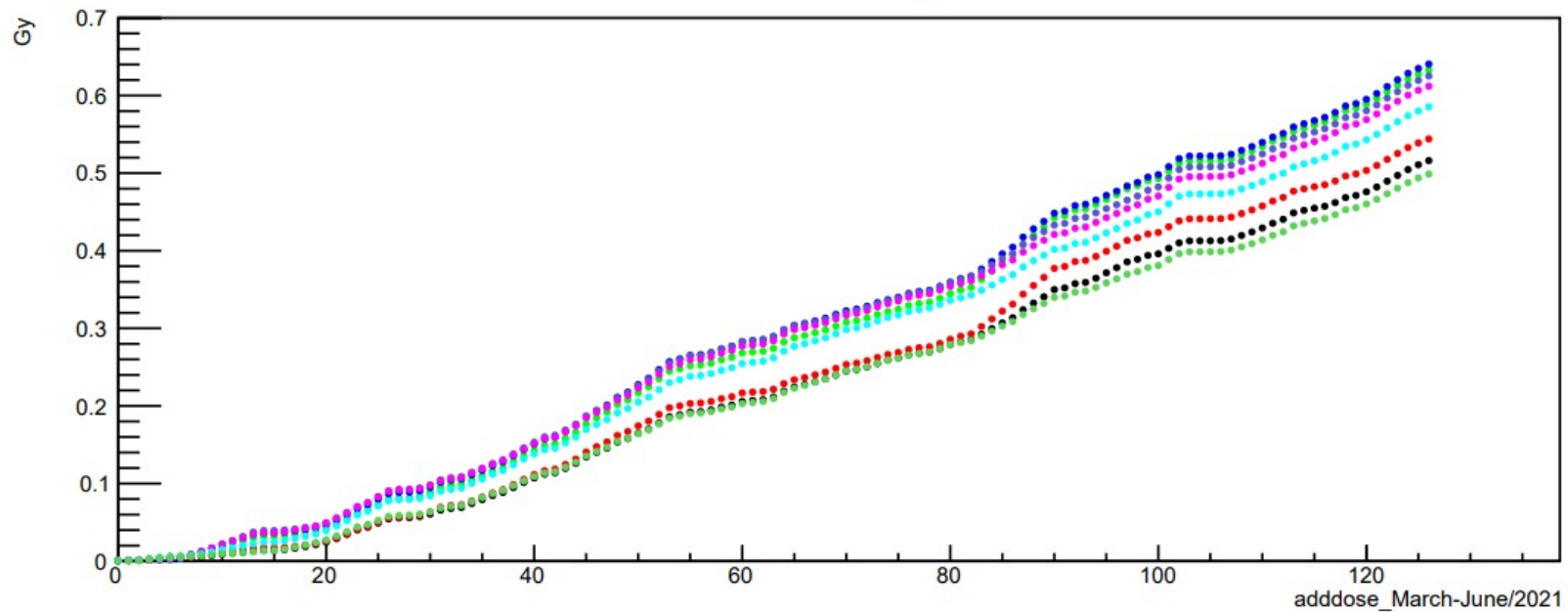


Backward endcap inner



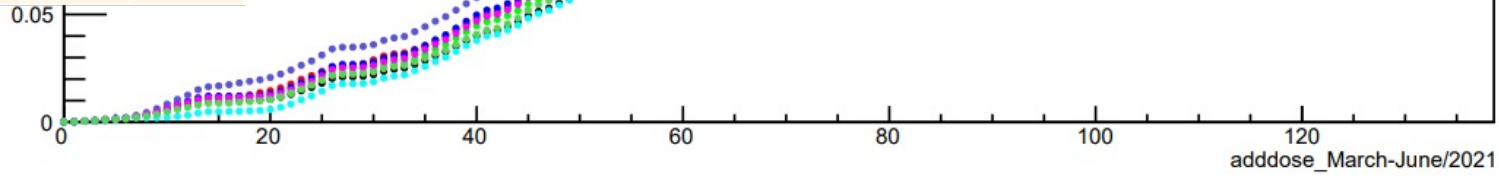
Old radiation
result

Backward endcap out

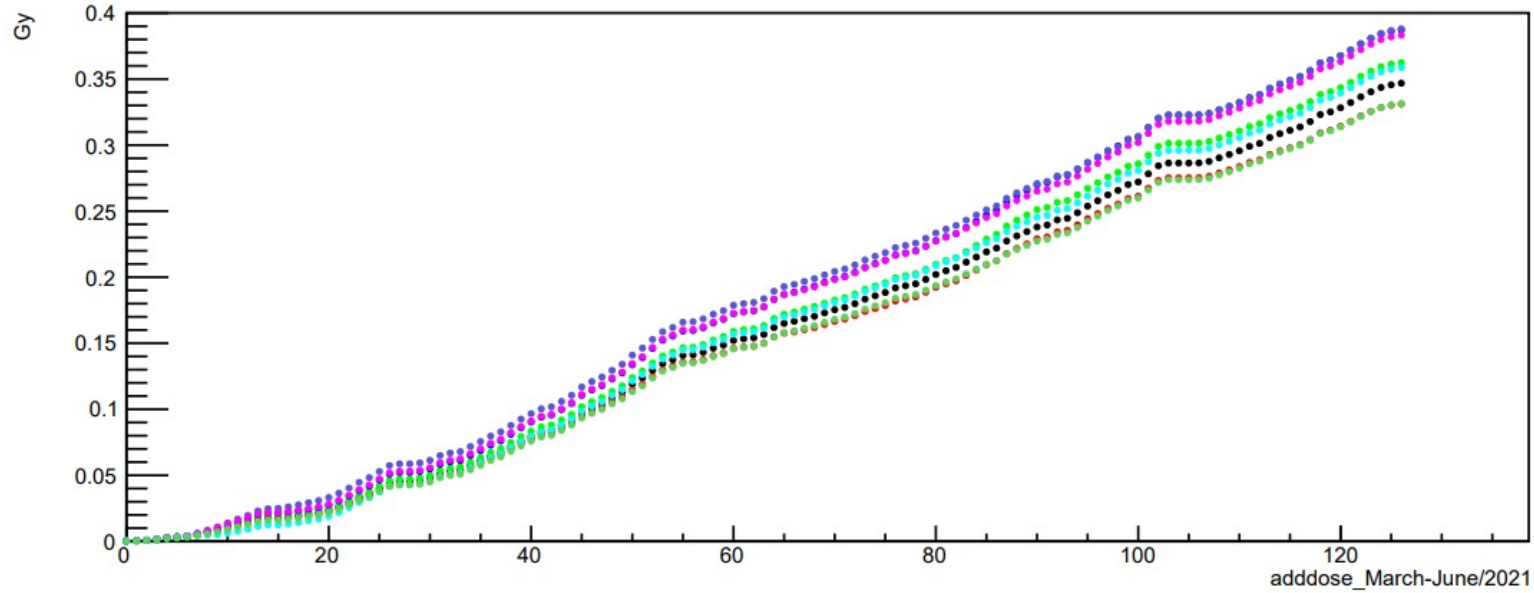


Barrel front

| [Gy] | Barrel front | Barrel back | Bwd out | Bwd inner |
|----------|--------------|-------------|---------|-----------|
| $\Phi=0$ | 0.20 | 0.35 | 0.43 | 0.88 |
| $\Phi=1$ | 0.22 | 0.33 | 0.45 | 0.90 |
| $\Phi=2$ | 0.21 | 0.36 | 0.54 | 0.97 |
| $\Phi=3$ | 0.23 | 0.38 | 0.56 | 1.06 |
| $\Phi=4$ | 0.24 | 0.39 | 0.56 | 0.98 |
| $\Phi=5$ | 0.22 | 0.38 | 0.55 | 1.01 |
| $\Phi=6$ | 0.20 | 0.36 | 0.52 | 0.93 |
| $\Phi=7$ | 0.21 | 0.33 | 0.42 | 0.79 |

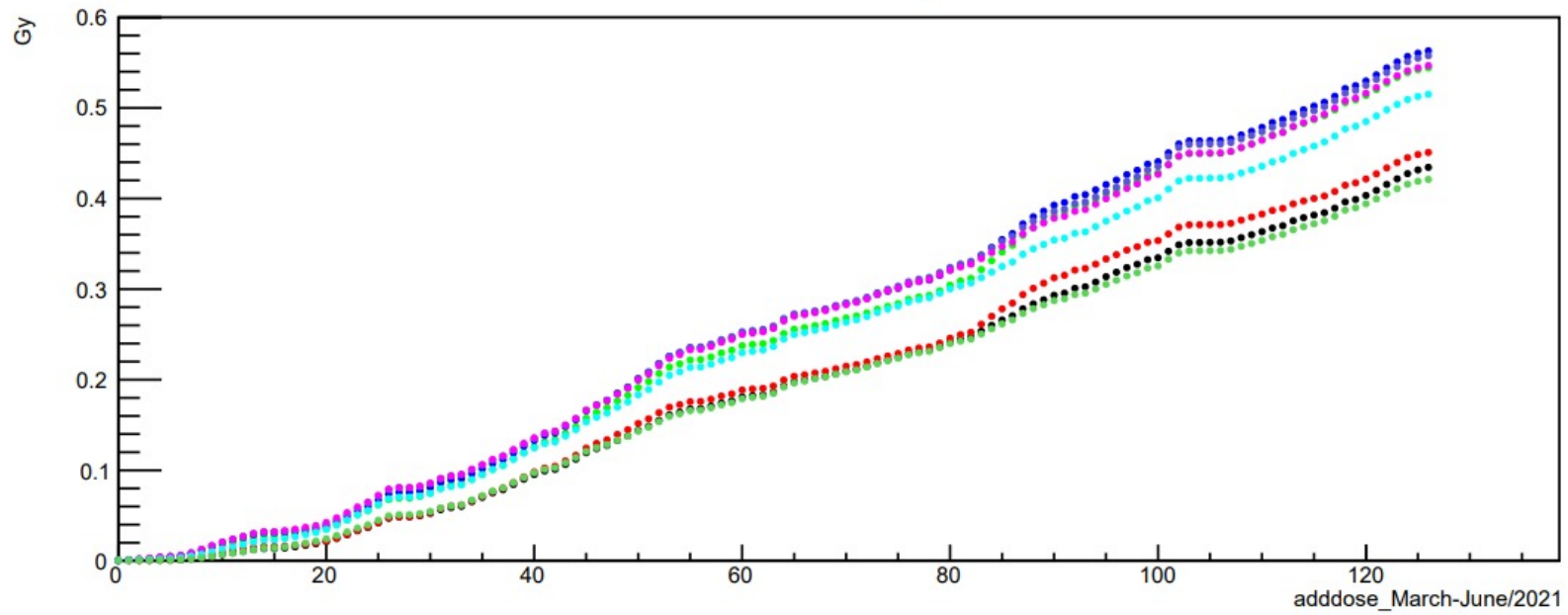


Barrel back



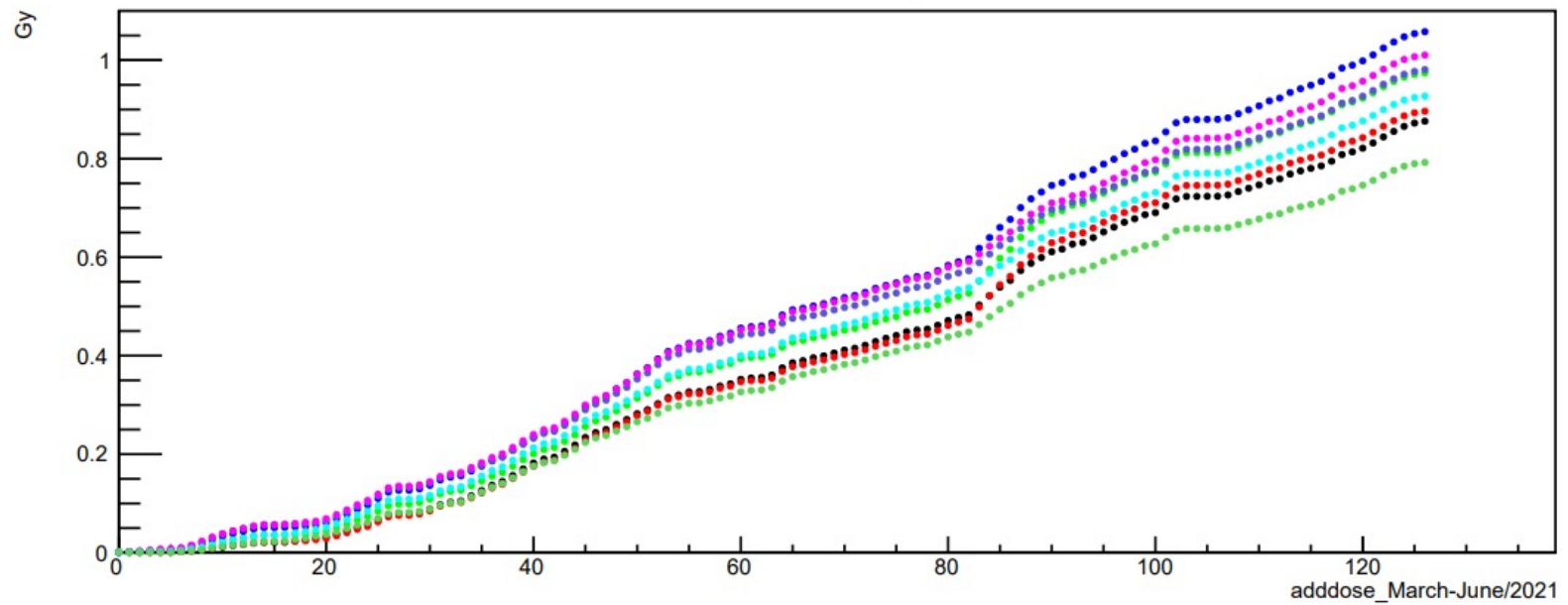
Middle radiation result

Backward endcap out



Middle radiation
result

Backward endcap inner



用語メモ

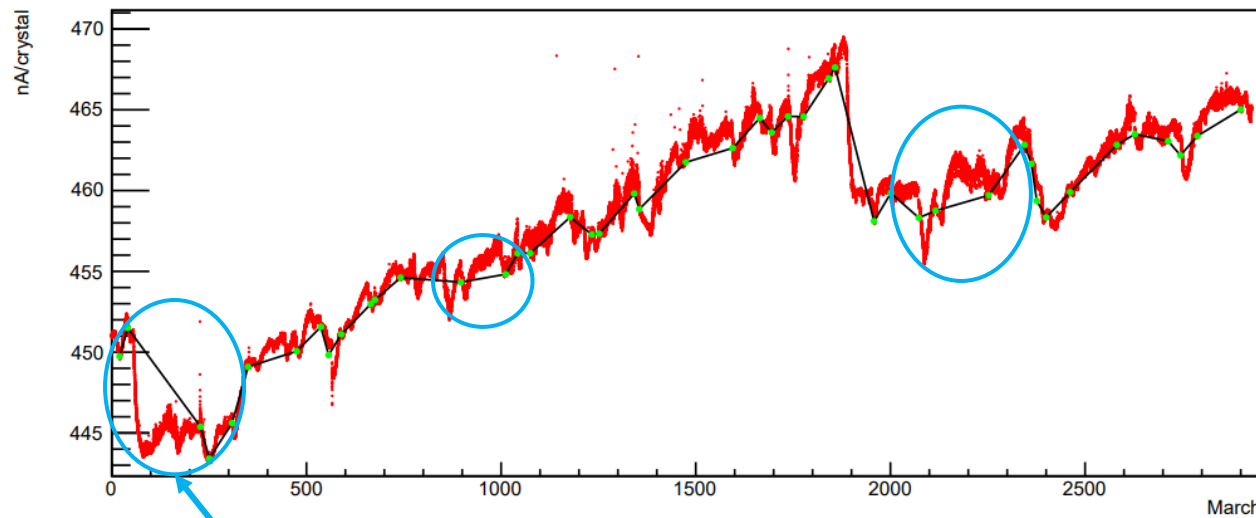
- フラックス：特定の表面を通過するフィールドの量
- Fwdエンドキャップ：暗電流は熱励起により発生した電子・正孔対の移動によって起こるため、温度が下がると伝導帯に熱励起される電子が減ってキャリア密度が下がるため暗電流が減少し、温度が上昇した時はその逆になる
- 中性子の発生は、電子加速器からの数十～数百 MeV の電子ビームによる高エネルギーガンマ線の生成、そのガンマ線と原子核との光核反応による蒸発中性子の生成という2段階を経てなされる

$$D = I_{\text{rad}} \cdot \Delta t \cdot \frac{10^{-9}}{1.6 \times 10^{-19}} [\text{/nA} \cdot \text{s}] \cdot \frac{10^6}{5000} [\text{eV}] \cdot \frac{1}{6.24 \times 10^{18}} [\text{J/eV}] \cdot \frac{1}{5} [\text{/kg}]$$
$$= 4.0 \times 10^{-8} I_{\text{rad}} \cdot \Delta t$$

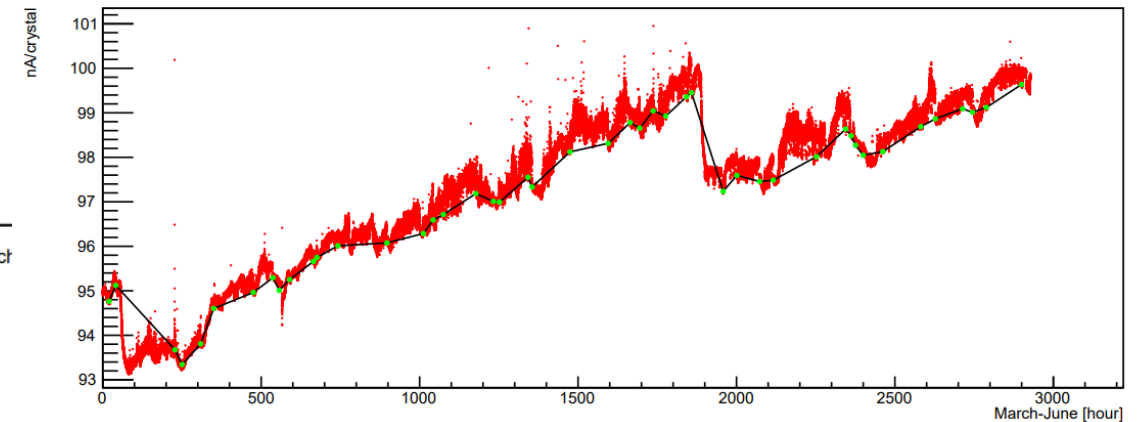
前方エンドキャップの取り扱い

- 暗電流値がPIN-PDで測定した電流値を大きく上回るまたは下回る箇所が多く見られたため、直線で補完した方法以外にも対処が必要とし、この手法だけでは前方エンドキャップ部での被ばく量を見積もることができないことがわかり、今回は研究対象外とした。

Forward endcap inner phi=0



Forward endcap out phi=0

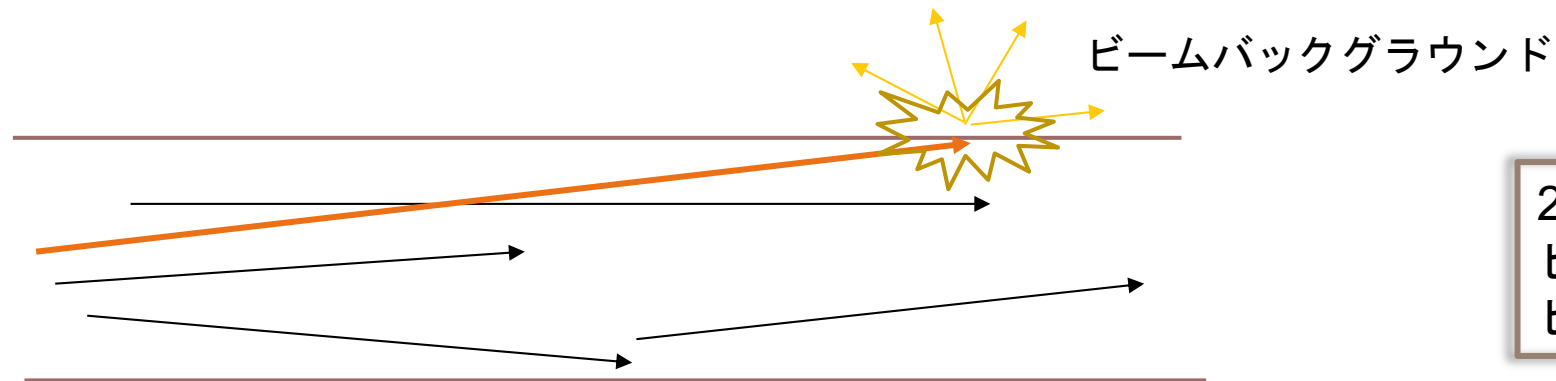


直線で補完した暗電流値が
PIN-PD電流値を上回る例

ボツスライド

研究動機

- 軌道をそれた粒子はビームパイプに衝突して電磁シャワーを形成 → ビームバックグラウンド
- 衝突型加速器の衝突の頻度を表す指標 → ルミノシティ



2. ビームガス散乱

ビームパイプ内に残ったガスとビーム粒子が散乱すること。

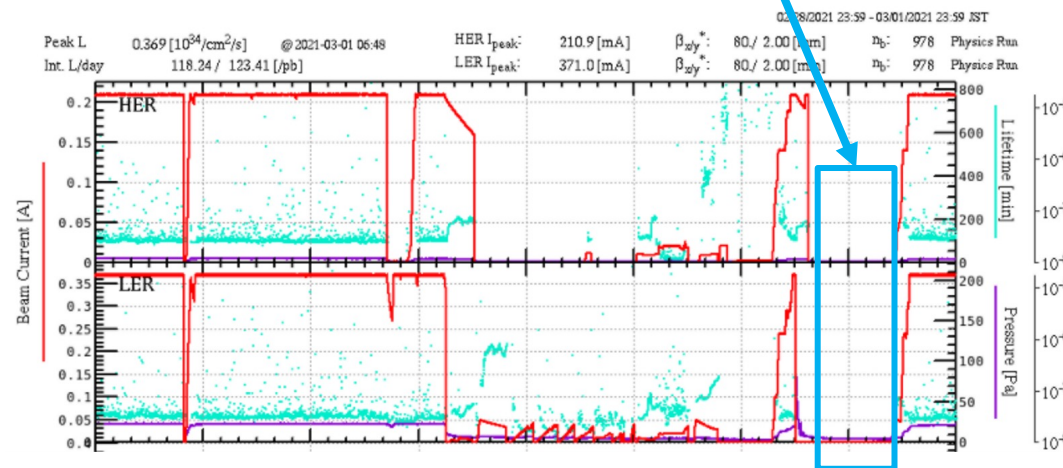
- ルミノシティの増加 ⇒ ビームバックグラウンドの増加
- 2018年から2021年で積分ルミノシティは約280倍に増加
- 粒子の検出効率を悪化させる
- 検出器が放射線損傷によって性能劣化につながる

ビームバックグラウンドを測定する検出器が必要。

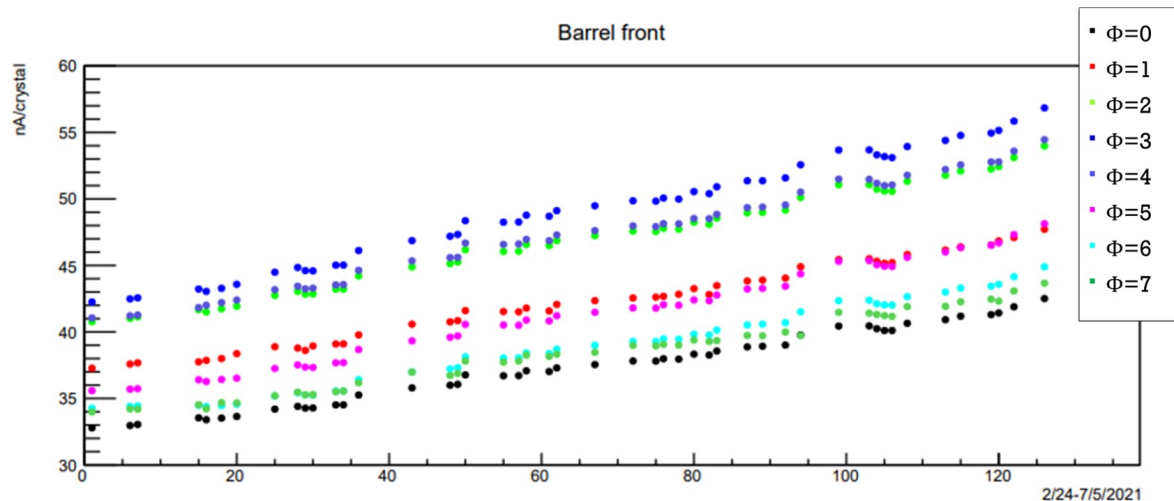
ビームバックグラウンド測定

17時～20時はHER、LERともに
ビームがOFF

1. SuperKEKB の加速器運転状況のモニター画面から、HER、LERともにビームがOFFになっているところを探す。
2. その間で測定された電流値の平均値を求め、それを暗電流値とした。
3. 2月24日～7月5日で同様のビームOFF期間を探し、暗電流値とした。



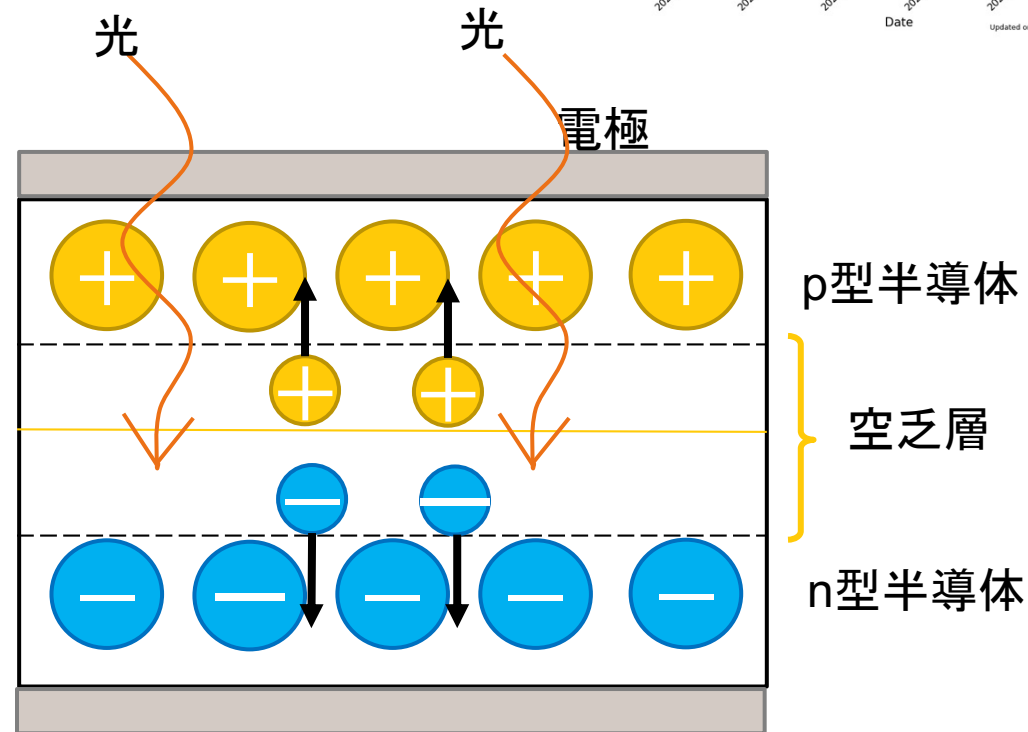
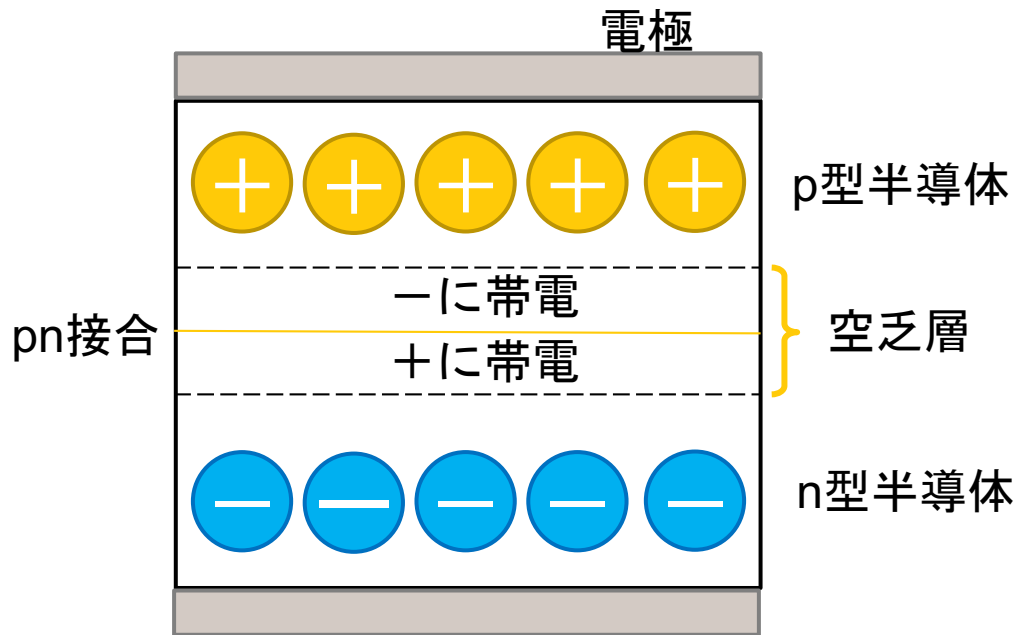
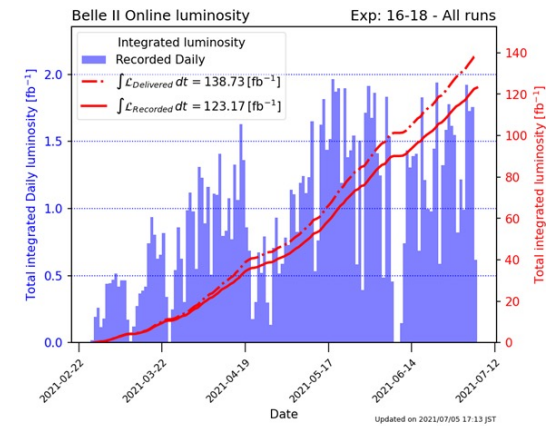
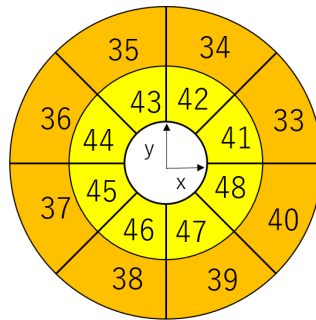
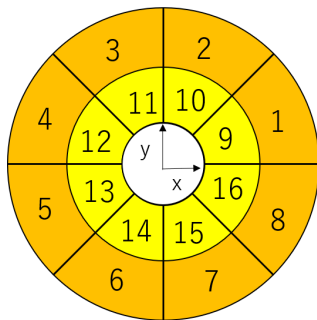
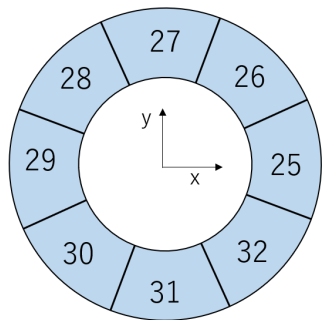
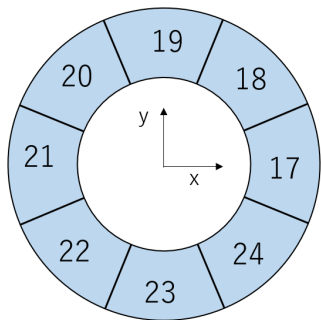
2021年3月2日の加速器の運転状況。上段はHER(e^-)、下段はLER(e^+)の状況を表し、ビーム電流が赤い実線で示されている。

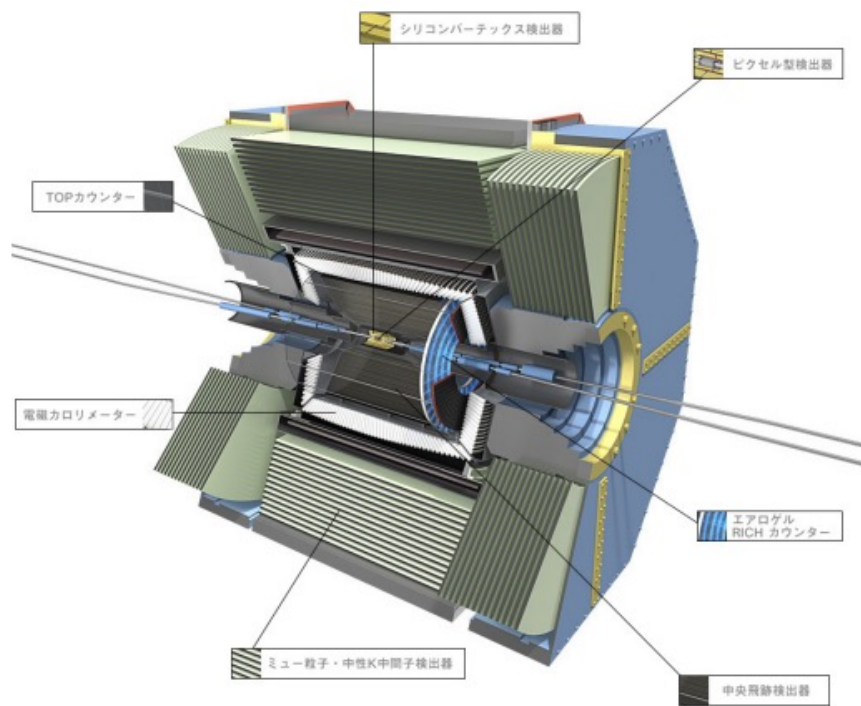


本研究で定めた暗電流値

表 3.2: ビームバックグラウンド測定に使用した暗電流値の増加量

| [nA/crystal] | Barrel front | Barrel back | Bwd EC out | Bwd EC inner |
|--------------|--------------|-------------|------------|--------------|
| $\phi = 0$ | 8.9 | 8.0 | 8.5 | 25.2 |
| $\phi = 1$ | 9.5 | 8.2 | 9.1 | 25.8 |
| $\phi = 2$ | 12.1 | 9.9 | 8.1 | 20.5 |
| $\phi = 3$ | 13.4 | 10.0 | 6.9 | 17.6 |
| $\phi = 4$ | 12.4 | 8.6 | 5.8 | 14.8 |
| $\phi = 5$ | 11.6 | 8.5 | 5.7 | 15.1 |
| $\phi = 6$ | 9.7 | 7.8 | 6.4 | 18.2 |
| $\phi = 7$ | 8.9 | 7.8 | 7.5 | 22.3 |





| [Gy] | Barrel front | Barrel back | Bwd out | Bwd inner |
|----------|--------------|-------------|---------|-----------|
| $\Phi=0$ | 0.28 | 0.43 | 0.52 | 1.14 |
| $\Phi=1$ | 0.32 | 0.42 | 0.54 | 1.18 |
| $\Phi=2$ | 0.33 | 0.46 | 0.63 | 1.22 |
| $\Phi=3$ | 0.36 | 0.49 | 0.64 | 1.27 |
| $\Phi=4$ | 0.36 | 0.48 | 0.63 | 1.17 |
| $\Phi=5$ | 0.34 | 0.47 | 0.61 | 1.20 |
| $\Phi=6$ | 0.29 | 0.44 | 0.59 | 1.13 |
| $\Phi=7$ | 0.29 | 0.41 | 0.50 | 1.03 |

