

# ILC-TPC のための高開口率 GEM 型ゲート装置の開発

総合研究大学院大学

The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI)

小川 智久<sup>0</sup>

ogawat@post.kek.jp

2017 年 (平成 29 年) 2 月 6 日

## 1 はじめに

国際リニアコライダー (International Linear Collider: ILC) 計画は、全長約 30 km の直線型加速器により電子、陽電子 (素粒子) を加速衝突させ、現在達成可能な最高エネルギーで宇宙創成 1 兆分の 1 秒後を作り出す実験計画である。時間と空間、物質と力の統一的理解のため、標準理論を超える新物理を明らかにし、どのように宇宙が生まれ、物質が生まれたのかという宇宙創生の謎に迫るものである。ILC の加速器に関する技術設計報告書 (Technical Design Report: TDR [1]) および測定器に関する詳細基本設計書 (Detailed Baseline Design: DBD [2]) がすでに 2012 年に発表されており、2016 年現在、更に詳細な検討が文部科学省において有識者会議により進んでいる。各国の研究者によって加速器および検出器の最終設計も行なわれており、ILC 実現へ向けた技術検討は最終段階に来ている。今回、私自身が関わっている ILC-TPC の研究開発について研究紹介の機会をいただけたので、ILC-TPC の最重要課題の 1 つである GEM 型ゲート装置の開発に関する研究に焦点を当てて紹介を行いたいと思う。(ILC の物理 [3], 他検出器 [4] に関しては過去に高エネルギーニュースに掲載された研究紹介を見てください。また ILC のための TPC として書かれた研究紹介に [5] があります。)

### 1.1 Time Projection Chamber: TPC

TPC は密閉容器内にアルゴン、ネオンなどの単原子分子ガスを主成分とした混合ガス封入し、荷電粒子の通過による電離過程を利用し 2 次元の平面情報と 1 次元の時間情報により 3 次元の飛跡を再構成可能とする測定器である (図 1)。1985 年に David R. Nygren がその原理 [6] を提案してから、特に TPC が持つ特徴のために、コライダー実験に用いられてきている。技術の発展とともに TPC 自体の改良も進み、現代の多くの素粒子

<sup>0</sup>LC-TPC 日本グループを代表して

実験でも利用されている。TPC は物理からの要求に対して十分な運動量分解能を持つ。また連続トラッキングを行なうので多数のハドロンジェットの事象においても高い飛跡認識能力を持つ。また崩壊点検出器を越えて飛ぶ長寿命中性粒子、検出器内層でカールする低運動量粒子の識別など、様々な事象に対して対応可能である。容器内はガスで満たされているので低物質質量である一方、わずかなエネルギー損失から粒子識別も可能とする。これらの特徴により、ILC 実験用の提案検出器の 1 つである ILD (アジア・ヨーロッパ間で共同設計中の測定器名称 International Large Detector) においても中央飛跡検出器として採用されている。

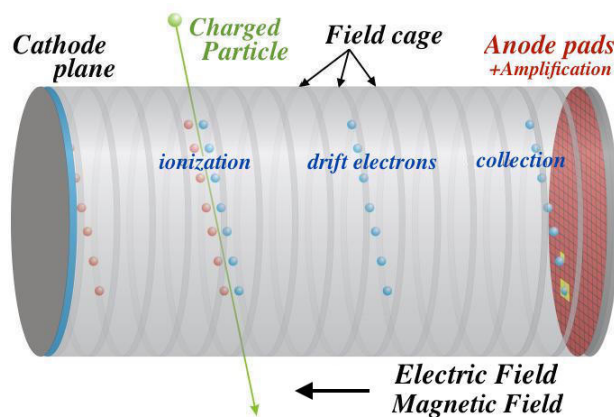


図 1: TPC の模式図。コライダー実験では衝突点を取り囲むように設置される。平行に配した電場、磁場により電離電子の横拡散を抑えながら端部へドリフトさせ増幅および読み出しを行う。

### 1.2 ILC のための TPC とその目標性能

ILC 実験では基本粒子レベルで生成事象の再構成を行う。ILC の目的の 1 つであるヒッグスセクターを含む電弱相互作用過程の精密測定には、W および Z 粒子の不変質量が分離可能なほどのジェットエネルギー分解能が

必要となる。これを実現するためにはジェット中の粒子を分離し、各々に対してエネルギー分解能の良い検出器の情報を用いる必要がある ( Particle Flow Analysis [3] )。よって ILC の中央飛跡検出器には、多数のジェットを含む事象においても荷電粒子を飛跡検出器後段に設置されるカロリメータ内の粒子クラスタと、重複なしで一対一対応を実現させるための高い飛跡分離能力、反跳質量法によるヒッグス粒子の質量の高精度測定のための高い運動量分解能が要求される。とりわけ運動量分解能に関して言えば、ILC が目指す物理からの要求として  $\sigma(1/p_t) = 2 \times 10^{-5} [\text{GeV}^{-1}]$  が具体的に示されており (これは内外層のシリコントラッカーの情報も用いた場合である。TPC 単独では  $1 \times 10^{-4} [\text{GeV}^{-1}]$ )、これは過去の電子陽電子衝突実験 (LEP)、また現在行われている大型ハドロン衝突実験 (LHC) の運動量分解能よりもおよそ 1 桁良い精度となる。次式 [8] のように運動量分解能は荷電粒子が通った位置の測定精度に依存するので、精度良い運動量分解能を得るためには荷電粒子による電離が発生した位置を精度よく測定する必要がある。

$$\sigma_{p_t}/p_t^2 = \frac{\sigma_{r\phi}}{0.3BL^2} \sqrt{\frac{720}{N+4}} \quad (1)$$

上式において  $p_t$ ,  $\sigma_{p_t}$ ,  $\sigma_{r\phi}$  はそれぞれ荷電粒子横方向運動量、測定器の横方向運動量分解能と位置分解能を示す、 $N$  は測定点の数、 $B[\text{T}]$  および  $L[\text{m}]$  は磁場の強さと測定器の飛跡検出長である (ここでは多重散乱の寄与は無視している)。ILC-TPC に要求される運動量分解能、また現在考えられている検出器サイズ、加えられる磁場などを考えた場合、ILC-TPC に要求される位置分解能  $\sigma_{r\phi}$  は 2.2 m の最大ドリフト距離に渡って  $100 \mu\text{m}$  以下にする必要がある。

### 1.3 T2K ガス

TPC の位置分解能は充填するガスによって大きく左右される。ドリフト距離の長い大型 TPC では、荷電粒子の通過による電子の電離からアノード面での読み出しまで、信号電子がドリフトしている間はガス中の分子と衝突を繰り返すので、縦および横方向に拡散の影響を受ける。特に横方向の拡散は結果として初期電離の発生位置をぼやかし、位置分解能を悪化させてしまう。しかしながら、横方向の拡散に関しては次式のように磁場の効果が入ることが知られており、信号電子の横拡散の影響を抑制することができる。横方向拡散定数  $C_d$  は、

$$C_d(B, E) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} C_d(0, E) \quad (2)$$

$\omega$  はサイクロトロン振動数 ( $\omega = eB/m$ ,  $e$ ,  $B$ ,  $m$  は素電荷、磁場、電子質量),  $\tau$  は電子が原子と衝突して次の分子と衝突するまでの平均自由時間 ( $\tau = m\bar{v}/eE$ ,  $\bar{v}$ ,  $E$  は

電子のドリフト速度、電場) を表す。電場と磁場が平行にかけられる TPC では、磁場によるローレンツ力が信号電子に働き、進行方向に対して磁場に巻きつく形で横拡散が抑えられながら移動する。高い位置分解能が求められる ILC-TPC では高磁場で横拡散が小さくなるガスが必要とされ、磁場中で横拡散が小さいことが知られる  $\text{CF}_4$ 、ペニング効果<sup>1</sup>によりガス増幅率を増やせると期待できる  $\text{iC}_4\text{H}_{10}$  が混合された Ar ベースガス (T2K ガス<sup>2</sup>,  $\omega\tau \sim 10(3.5 \text{ T})$ ) が現在のところ候補となっている。T2K ガスの特徴を図 2 に示す。3.5 T の磁場下において、ドリフト速度が最大付近で横拡散は  $30 \mu\text{m}/\sqrt{\text{cm}}$  程度となる。

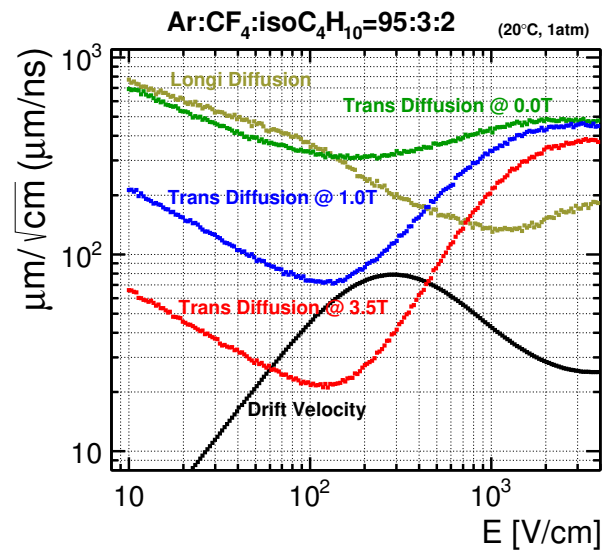


図 2: Magbolts [7] で計算された T2K ガス中での電子のドリフト速度と拡散定数の電場依存について。

### 1.4 陽イオンの影響とゲート装置の必要性

TPC にはその開発当初から、荷電粒子による電離および電子増幅で生じる陽イオン群がドリフト領域の電場を乱し、測定される 3 次元飛跡を歪ませる古典的な問題がある。よって TPC を実験に使う場合はその実験環境に関して考慮する必要がある。ILC 実験の場合には電子、陽電子ビームの時間構造に注意しなければならない。例えばビームの制動放射による大量の電子陽電子対バックグラウンドが考えられ、これら荷電粒子がガス中を通過すると電離によりドリフト領域中に電子

<sup>1</sup>混合ガス中で一方の分子 A が励起状態であり、A の準安定準位よりも電離ポテンシャルの低い分子 B に衝突し B が電離をおこす効果。  $A^X + B \rightarrow A + B^+ + e^-$ 。Ar の準安定励起状態はおおよそ 11.6eV に対し、 $\text{iC}_4\text{H}_{10}$  の電離ポテンシャルは 10.8eV

<sup>2</sup>T2K ガスの成分比は Ar :  $\text{CF}_4$  :  $\text{iC}_4\text{H}_{10}$  = 95 : 3 : 2 である。横拡散を抑えるためには上記の  $\omega\tau$  が大きいガスであれば良い。 $\omega$  は B の大きさに決まるので、 $\tau$  が大きいガスが望まれる。 $\tau \propto l$  (平均自由行程) であり、この値は分子との断面積に反比例する。電子の  $\text{CF}_4$  分子との最大断面積は Ar 分子との断面積が大きくなる前にあるので、電子を Ar 分子との断面積最小付近に留まらせることができる。よって  $\tau$  を一般的なガスよりも大きくすることができる [13]。

陽イオン対が生成される（1次陽イオン）。アノード面に到達してくる信号電子は端部検出器においてガス増幅され、この過程でも大量の陽イオンが生成され（2次陽イオン）、電場に沿ってドリフト領域に逆流していく（Ion Back Flow: IBF）。陽イオンのドリフト速度は電子の  $O(10^{-4}) \sim O(10^{-3})$  程度と非常に遅く、Ar イオンの場合、300 K でその易動度は  $1.6 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{sec})$  程度であり、ドリフト電場 230 V/cm の設定ではドリフト速度  $\sim 370 \text{ cm/sec}$  程度となる（T2K ガス中には Ar イオンと  $\text{iC}_4\text{H}_{10}$  によるイオン交換のため  $\text{iC}_4\text{H}_{10}$  イオンが存在していると考えられる。その易動度もおよそ  $1.6 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{sec})$  程度である [9]）。設計上 ILC のビーム繰り返し周波数は 5 Hz と設定されており、200 msec 毎に 1 次陽イオン群が生成されると想定できる。この 1 次陽イオン群は、TPC のドリフト領域中に円筒状に重なり合っ、概ね 3 個存在することが予想される（4 つ目が生成される頃には 1 つ目は中央カソードに吸収される）。生成される 2 次陽イオンは 1 個の信号電子に増幅部でのガス増幅率を掛けたものになる。設計上 ILC の 1 バンチトレイン（0.73 msec）中には 1312 バンチがあるので、厚さ 0.5 cm 程度の非常に高密度な円板状の陽イオン群が、1 次陽イオン群同様、継続的に 3 個存在すると考えられる。その概略図を図 3 で表す。これまでに

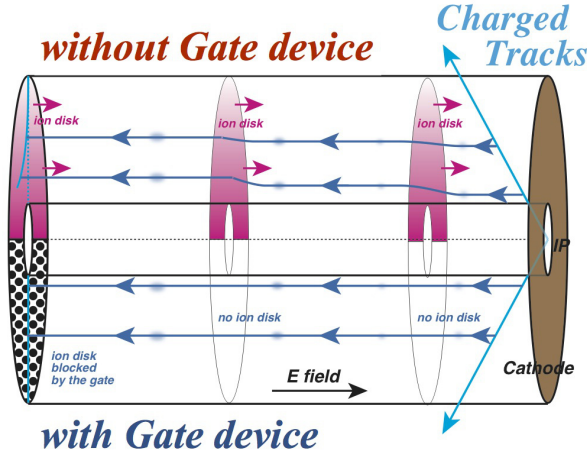
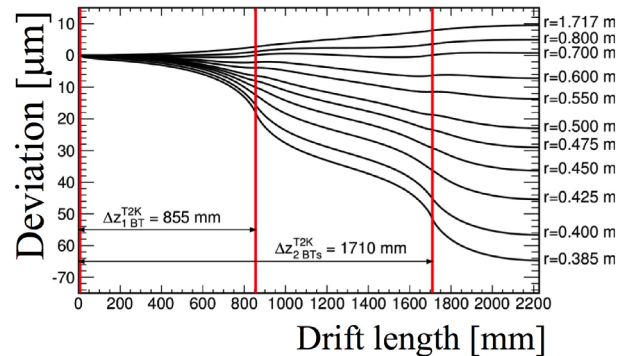


図 3: TPC ドリフト領域中における 2 次陽イオン群の分布と信号電子のドリフトに与える影響。

LC-TPC 日本グループは、ILC 環境下で生成されるこれら円筒状 1 次陽イオン群、および円板状 2 次陽イオン群の位置分解能への影響についてシミュレーション計算を行ってきた。その結果 1 次陽イオン群は位置分解能の悪化は無視できるほど小さいが、2 次陽イオン群による位置分解能の悪化は TPC の最内層ではおよそ  $60 \mu\text{m}$  に達し、求められる性能に対して無視できない影響を及ぼすことが示された（IBF=3 と仮定<sup>3</sup>）。と同時に、陽イ

<sup>3</sup>Ion Back Flow (IBF)=3 とは電子が 1 個入った場合に 3 個陽イオンが戻ってくるという定義。これは例えばガスゲイン 3000、陽イ

オン遮蔽効率の良いゲート装置を使用すれば、十分に 2 次陽イオン群の効果を打ち消すことが可能であることも示されている（図 4）。



	ゲート装置なし	ゲート装置あり
1 次陽イオン	8.5 $\mu\text{m}$	8.5 $\mu\text{m}$
2 次陽イオン	60.0 $\mu\text{m}$	0.01 $\mu\text{m}$
合計	70 $\mu\text{m}$	8.5 $\mu\text{m}$

図 4: 円板状の 2 次陽イオン群による飛跡歪みの影響予想図と、生成陽イオン群による位置分解能への影響。Ion Back Flow=3 と仮定しての評価。

## 1.5 GEM 型ゲート装置

LEP および LHC 実験などの検出器において、ワイヤーチェンバ（Multi Wire Proportional Chamber: MWPC）が用いられた大型の TPC では、ドリフト電場を形成するフィールドワイヤに、あるいは隣接するワイヤ間に電位差を与えて陽イオンの吸収を行っていた（一種の陽イオンゲート）。ILD-TPC では増幅機構にマイクロパターンガス検出器（Micro Pattern Gaseous Detector: MPGD）を用いる設計のため、多数のワイヤを検出器端部に張る構造は、ワイヤを張るための十分な張力が必要となり、現在の MPGD を用いた検出器の構造に合わず、その工学的設計を見直す必要が出てくる。また  $E \times B$  の影響による位置分解能悪化も懸念される。そんな中、2006 年にガス電子増幅器（Gas Electron Multiplier: GEM）の発明者でもある F. Sauli によって GEM を用いたゲート機構が提案された。GEM はこれまでガス増幅装置としてのみ認識されていたが、数 V 程度の低電圧で使用することにより、陽イオン阻止膜として使える可能性を示した [10]。陽イオンは電子に比べて十分に重いいため拡散が少なく電気力線に沿って運動する。

オン阻止率  $10^{-3}$  と想定することと等しい。しかしながら  $10^{-3}$  という値は 3 段 GEM や Micromegas を用いて、ドリフト電場を十分に弱くした場合に達成可能な値であり、2 段 GEM の場合では数%から 10% のレベルである。この場合上記の歪みは 100 倍近くになる可能性がある。この点も陽イオンゲートが必要となる大きな理由である。

GEMに数V程度の逆電圧を印加するだけで、ほぼ陽イオンをGEM表面に吸収することができる。前述の通りILC-TPC環境下では強磁場が加わり電子の拡散を抑える必要がある。一方で通常のGEMの開口率はせいぜい30%程度である。問題となるのは磁場に巻きつく形で横拡散が抑えられている信号電子が、ドリフト領域に設置されるGEM型ゲートを透過し、要求される位置分解を達成し得る程の信号を確保できるかどうかである。

## 2 これまでの研究開発

リニアコライダーのためのTPCの開発研究はLC-TPCグループと呼ばれる国際コラボレーションの下で進められている。LC-TPCグループ内で、日本グループは陽イオンゲート装置の開発を任されている。ILC実験において、IBFの問題を防ぐための陽イオンゲート装置が要求される性能を満たすことは、ILC実験の主飛跡検出器としてTPCが成立するかどうかを左右する最重要課題の1つとなっている。ここでは日本グループが行ってきた「これまで」の陽イオンゲート装置の研究開発について紹介する。

### 2.1 GEM型ゲートプロトタイプ

2007年頃から日本グループは、有限要素法による電場計算と電子の輸送シミュレーション<sup>4</sup>を行いながらGEM型ゲートのモデルの検討を始めた。GEM穴の直径を広げ開口率をあげた方が、電子がGEM穴に入りやすくなるので、大幅に電子透過率は上昇する。開口率を上げるだけでなく、GEMの厚さを薄くした場合には、GEM穴の側面に近い場所の電場が強くなり、電気力線はGEM穴内に向かう向きに作られるので、GEM穴の側面やGEMの表面に到達してしまう電子を減らすこともできる。例えば標準的なGEMのモデルで、絶縁部を50 $\mu\text{m}$ から25 $\mu\text{m}$ に薄くした場合、電子透過率をおおよそ50%回復させることができる。導体部も同様に薄くした場合においても、GEM導体部側面に帰着する電気力線を減らせるので、電子透過率を回復させることができる。以上のような結果を踏まえ、企業に協力してもらい、標準GEMモデルから開口率を上げ、格段に薄いGEMサンプルを作成した(図5左は穴径90 $\mu\text{m}$ 、絶縁部14 $\mu\text{m}$ 、導体部2 $\mu\text{m}$ 、ピッチ140 $\mu\text{m}$ の写真)。この初期サンプルの性能評価のため(実際のところ、最大の目的は測定値がシミュレーションを再現するかどうかの確認であった)、KEKの低温工学センターに設置されている超伝導ソレノイドマグネットを用い、T2Kガス、1Tの高

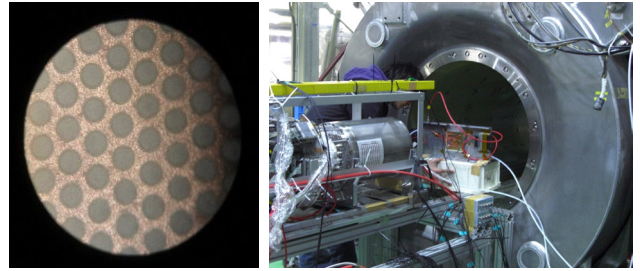


図5: 初期の薄いGEM型ゲートサンプルの拡大図とマグネットを用いた電子透過率測定。GEM絶縁部の厚さはほぼ製造限界の14 $\mu\text{m}$ である。

磁場中で電子透過率の測定を行った(図5右)。1Tの磁場下において、5Vを印可しゲートを開いた状態での電子透過率は60%程度となり、シミュレーションを再現するものとなった。他のサンプルも同様におおよそシミュレーションを再現するものとなった(図6)。しかしながら、電子透過率60%という値は、荷電粒子の通過によって生成された電離電子が60%に減少することであり、後述する位置分解能式より分解能が約30%劣化するという意味する。日本グループはこの問題を解決するために、さらに開口率を上げるなどのGEM型ゲートのモデルの再検討が必要になった。

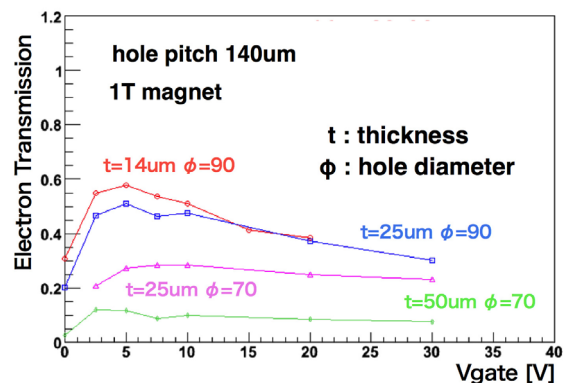


図6: GEM型ゲートプロトタイプを用いて行われた電子透過率測定の結果。数Vの電圧供給で最大透過率は開口率と同程度の60%前後となる。

### 2.2 要求される電子透過率

日本グループが用いているTPC端部検出器は100 $\mu\text{m}$ 厚の2層の増幅GEMで構成されている。GEM型ゲートのモデルの検討と同時並行で、日本グループは2層の増幅GEMからなる端部検出器だけでどれほどの位置分解能を得ることができるか、またILC-TPCとして要求される性能を満たすことができるのかどうかを調べるために、数回に亘りドイツ・DESY研究所で電子ビームを用いた試験を行ってきた。

<sup>4</sup>当時はMaxwell 3DとGarfield8を利用

ILC-TPC 用の測定器候補の性能を確かめるためには高磁場下で高エネルギー電子ビームが使える環境が必要であり、DESY 研究所にはこの TPC の性能試験のために必要とされる大型プロトタイプモジュール (LP) と超伝導ソレノイドマグネット (PCMAG), また共通の読み出しエレクトロニクスが設備されている。LC-TPC 内の各グループは共通の環境を使って、位置分解能等の基本性能の実証試験を行っている。

TPC の位置分解能の長距離ドリフトでの漸近的な表現式はよく知られており、簡易的な場合では以下のような 2 つの項で表現される<sup>5</sup>。

$$\sigma_{r\phi}(Z) = \sqrt{\sigma_0^2 + \frac{C_d^2}{N_{eff}} \cdot Z} \quad (3)$$

$\sigma_{r\phi}$  は方位角 ( $r\phi$ ) 方向における位置分解能, 第 1 項  $\sigma_0$  はドリフト距離に依らない定数項,  $C_d$  は拡散定数,  $N_{eff}$  は測定に寄与する有効電子数,  $Z$  はドリフト距離を表す。本来ならば実験環境である 3.5 T という高磁場での位置分解能を評価したいが, それに合う実験環境はまだ整備されていないので, 実際にはこれらのパラメータを 1 T 中での実験より評価し, 3.5 T に外挿して位置分解能を得ることになる。第 2 項はドリフト距離に比例するパラメータであるので, 入射電子ビーム位置を変更し, 電子をドリフトさせる距離を変えて距離依存の測定を行い決定するものである。図 7 で示すように, 2010 年に行われたビーム試験において, 2 層の増幅 GEM で構成される TPC 端部検出器の電子ビームを用いた実験結果から, GEM 型ゲートが搭載されない場合では, 2.2 m でおおよそ  $\sigma_{r\phi}(\sigma_x) = 85 \mu\text{m}$  程度であり, 100  $\mu\text{m}$  以下の位置分解能が達成されている。電子透過率の観点から見ると, 100  $\mu\text{m}$  以下を満たすには 80 % 程度の透過率が必要になってくることも示される。

### 2.3 高開口率 GEM 型ゲートの開発

増幅 GEM だけを搭載した TPC 端部検出器の位置分解能の結果より, 80 % 程度の電子透過率が要求されることが示された。また初期サンプルを用いた測定より, T2K ガスを用いた高磁場中では, 透過率は開口率と同程度となることも示されている。以上のことから, 佐賀大学を中心に企業 (フジクラ) と協力して新しい GEM 型ゲートのモデルの再検討を行った。目標開口率は 80 % 程度であるが, 隣り合う穴のピッチが短すぎると技術的に難しくなる。再度シミュレーションを用いて検討したところ [11], ピッチ 300  $\mu\text{m}$  程度であれば, 依然と

<sup>5</sup> 検出器近距離におけるホドスコープ効果や, 読み出しパッド構造の影響を考慮しているより完全な振る舞いを表現する式がこれまでに理解されており, 性能評価のための高磁場への外挿はそちらで行う必要がある [14]。

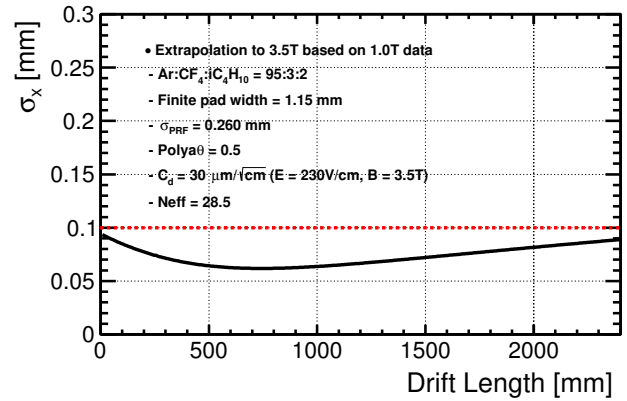


図 7: 電子ビーム試験データに基づいて外挿された 3.5 T での位置分解能 (ゲートなしの端部検出器)。

して -10 V 程度で  $\mathcal{O}(10^{-4})$  の陽イオン阻止率が得られることが示された。一方で図 8 に示すように, 従来の GEM のような丸穴ホールでは, リム幅を狭くしていても目標開口率には届かないことがわかったので, 目標開口率を満たすために六角形のハニカム構造を取るような形となった (図 8)。こうして作成された, 高開口率の

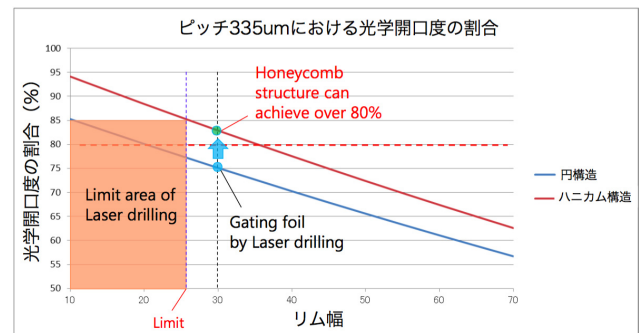


図 8: 円構造, ハニカム構造による到達可能な幾何学的開口率の違い。円構造では 75 % 程度が限界となる。

試作 GEM 型ゲートの拡大写真を図 9, リムの断面と実際の検出器サイズのモジュールを図 10 に示す (穴の内接円の直径 304  $\mu\text{m}$ , ピッチ 335  $\mu\text{m}$  光学開口率 82.3 %)。図 10 右において何も写っていないように見えるところが, 実際に GEM 穴が開けられている有感領域である。この GEM 型ゲートの性能を確かめるため, 10 $\times$ 10  $\text{cm}^2$  の試作品を作成し再度 KEK のマグネットを用いて高磁場下で測定した電子透過率の結果を図 11 に示す。青の点, 実線はそれぞれ電子透過率の実際の測定値, モデルを用いたシミュレーション<sup>6</sup>の結果を表す。0 T においてはシミュレーションは測定を再現している。橙色の点は 1 T の磁場中で測った電子透過率である。 $V_{gate} = 3$  V 前後で透過率 82 % 前後になる事が示されている。同様に橙色の実線は 1 T 下でのシミュレーションの結果を表している。現在のところ高磁場下でのシミュレーションは

<sup>6</sup> ここで用いているソフトウェアは, ANSYS と Garfield++ である。

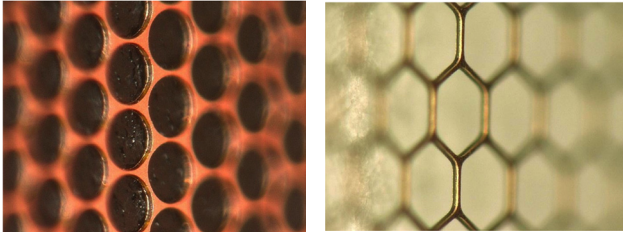


図 9: 円構造 (左) とハニカム構造 (右) をモデルに作成された試作 GEM 型ゲートの拡大図。

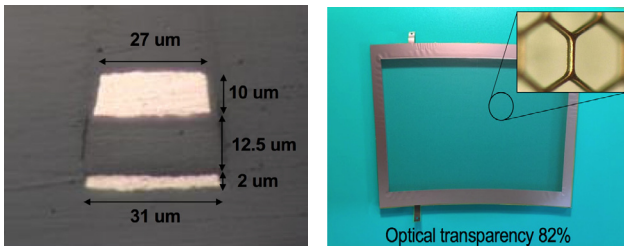


図 10: 高開口率 GEM 型ゲートの断面図と TPC 端部検出器用モジュール。

実測定を完全には再現していない。3.5 あるいは 4 T での電子透過率を推定するためには、さらなる改善が必要な状況である。

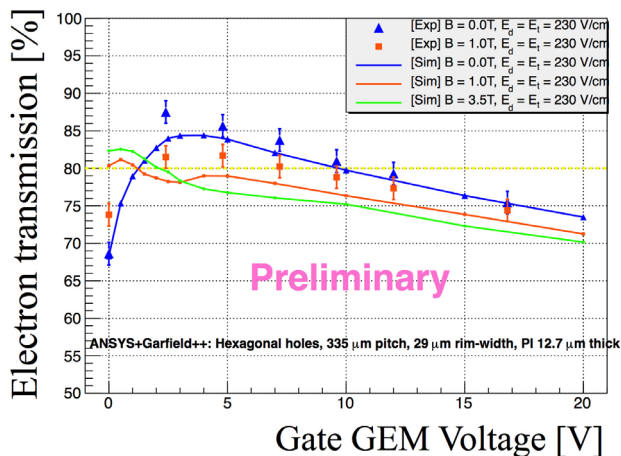


図 11: 高開口率 (82.3 %) の GEM 型ゲートを用いた電子透過率の測定 [12]。磁場なしではシミュレーションは測定を再現している。1 T での評価は改善が必要な状況である。

### 3 DESY での電子ビームテスト

LC-TPC グループに参加する日本の各大学、中国の IHEP 研究所の研究者を含めた日本/アジアグループは、2016 年 10 月末から 11 月中旬まで、DESY 研究所の TPC 性能試験設備を使い、開発してきた高開口率 GEM 型ゲートが搭載された TPC 端部検出器の性能試験を行っ

た。今回の実験の最大の目的は、GEM 型ゲートを搭載した検出器であったとしても電子ドリフト距離 2.2 m で、100  $\mu\text{m}$  以下の位置分解能が達成可能であるという証明データを収集することである。

#### 3.1 DESY-II 加速器

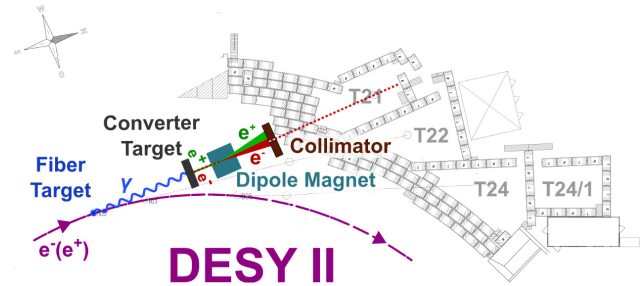


図 12: DESY-II 加速器を用いたテストビームエリアの概略図 [15]。

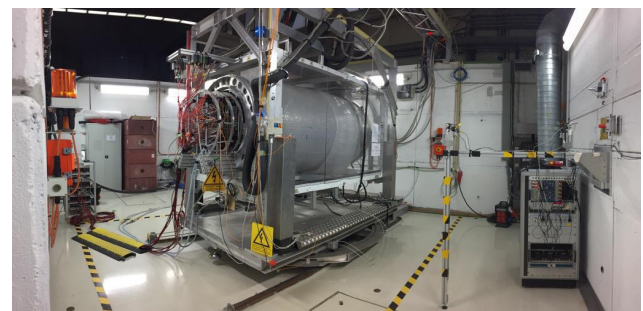


図 13: TPC 性能試験設備のために超電導ソレノイドマグネットが置かれた試験エリア。

検出器の性能試験には DESY-II 加速器からの電子ビームを用いる (図 12)。DESY-II 加速器内には細い炭素繊維が置かれ、電子あるいは陽電子が炭素繊維を打つことで制動放射により光子が生み出される。この光子を金属標的で電子陽電子のペアにコンバートし、ダイポール磁石でこれらの粒子を扇形に広げ、電子をエネルギーごとに分類する。その後コリメータでビームエリア (図 13) で使用するためのビームを選択する。DESY-II は 1 から 5 GeV 程度のエネルギーの電子を供給できるが、TPC 外壁のフィールドケージなどの物質中での電子の散乱の影響を減らすために、測定には 5 GeV の高エネルギー電子ビームを用いる。

#### 3.2 性能試験用検出器

性能測定には、ILD-TPC で予定されている実機サイズの装置を用いる (図 14)。端部検出器の PC ボードは扇型の構造をしている。PC ボード上部への 2 段階増幅 GEM、および GEM 型ゲートを固定するため、また H.V. 供給

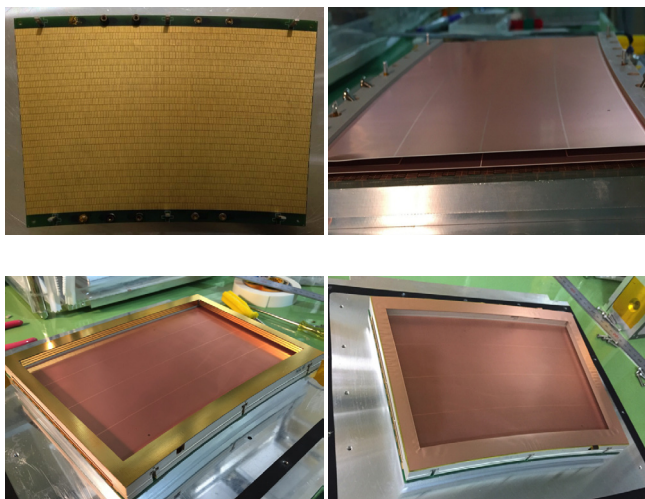


図 14: 左図上は TPC 端部検出器の読み出しパッド。右図上は日本グループが用いている 2 層増幅 GEM の側面写真である。この上部に以下のような追加モジュールが搭載される。左図下は電場整形器が搭載された検出器、前面および側面は電場を均一に形成するために電極が取り付けられ、適切な電位が与えられるようになっている。右図下は GEM 型ゲートが搭載された検出器。

ライン用のための一部のスペースを残してほぼ全面、読み出しパッドで覆われている。パッド 1 枚の大きさはおおよそ、幅 1.2 mm 縦 5.26 mm であり、円筒 (r) 方向に 28 列、方位角 ( $\phi$ ) 方向に内側 176 枚、外側 192 枚が配置されている。1 検出器あたり、 $5 \times 10^3$  チャンネル程度となる。2 段増幅 GEM の 9 mm 上部<sup>7</sup>には開発してきた開口率 80 %以上の GEM 型ゲート装置が搭載される。開口率 100 %のデータとの比較のため、GEM 型ゲート装置の代わりに電場整形器が搭載された検出器も用意した。増幅 GEM、GEM 型ゲートに電圧を供給するため、H.V. ラインは GEM のアクティブエリアの近くまで伸ばす必要があるが、これは増幅 GEM 上部のドリフト領域の電場を歪めるので電離電子の経路を歪めることになる。この状況を改善するために電場整形器を用いて滑らかな電場を再形成させる。実際のところ、GEM 型ゲートの側面にも電場整形器用の回路を形成する予定だったが、この部分は今回のビームテストには間に合わなかった。

### 3.3 読み出しエレクトロニクス

DESY に設置されている LP システムで用いる読み出しエレクトロニクスは、ALICE-TPC [16] で用いられているシステム「ALIRO [17]」を基本としており、電荷増幅、波形整形部 (PASA) を GEM 用に作り変えたもの

<sup>7</sup>9 mm 上部というのは、ILC ビームのトレイン長で決まる。増幅 GEM とゲート装置の間には吸収前の 2 次イオンが存在する、トレイン長は設計上 0.73 msec 程度なので、5 mm 程度上部で十分かもしれないが、この部分は議論の余地があると思われる。

である。上述した端部検出器の PC ボードの裏面からカプトンケーブルが Front End Card (FEC) に接続され、この FEC 上に PASA、ALIRO チップが搭載されている。ALIRO チップは 20(25) MHz、10 bit の ADC が使用されており、ペDESTAL補正、ゼロサプレッションなどの機能が使用可能である。読み出しエレクトロニクスを接続し終えた状況が写真 (図 15) のようになる。エレクトロニクスが突き出た格好のため支持構造が必要となっているが、諸々の問題を回避するため本来 PASA、ALIRO チップは PC ボードの裏面に直接搭載されるべきである。残念ながら改良チップの開発は遅れ気味である。

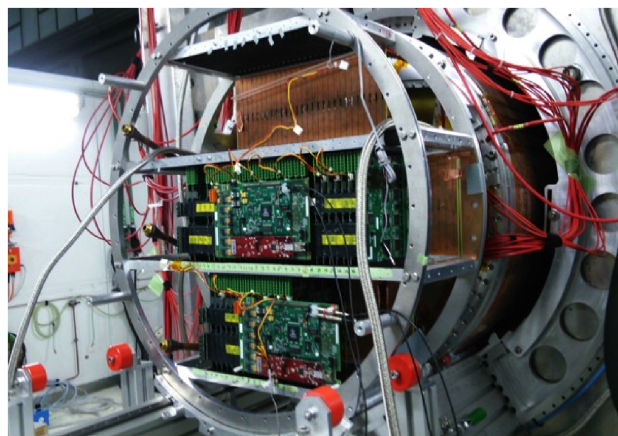


図 15: 検出器を TPC に組み込んだ後、読み出しエレクトロニクスを搭載した状態。この後さらにエレキ用に L.V. ケーブルなどが前面に搭載される。

### 3.4 実験準備とデータ収集

過去数回のビームテストの経験から事前準備が肝心であることを学んでいたため、KEK 実験棟で使用予定の増幅 GEM と GEM 型ゲートを用いて、どれだけの電圧を供給すればどれほどのガス増幅率を得られ、どこから微小放電が始まるか、またどの程度の電圧で最大透過率を得られるかなどの事前測定を入念に行ってから、DESY に向かった。データ収集は 10 月 31 日より 11 月 14 日まで、およそ 2 週間にわたって行った。最初の数日は LP システム含めた検出器の試運転として、ノイズ確認や検出器の応答測定など基礎的なデータの収集を行った。その後、高磁場中での位置分解能の評価用に、検出器からの電子ビームの距離を変え、電離電子のドリフト距離を変えながらデータ収集 (Z 方向スキャン) を行った。また GEM 型ゲート装置が期待するように動作しているかの確認のため、GEM 型ゲート間にかかる電圧を変えた測定も行った。欲しいデータセットは事前にある程度決めて行ったが、ビームタイムは限られているので、最終的には現場でデータを取りながら、簡易解析を行い、結果

を見ながら今後の方針を決めていったように思う。幸いなことに、ビームテスト期間中ほぼ大きなトラブルには襲われず、順調にデータ収集を行うことができ、予定よりも1日早く実験を終了させた。DESYで収集した1 T磁場中における事象例を図16に示す。

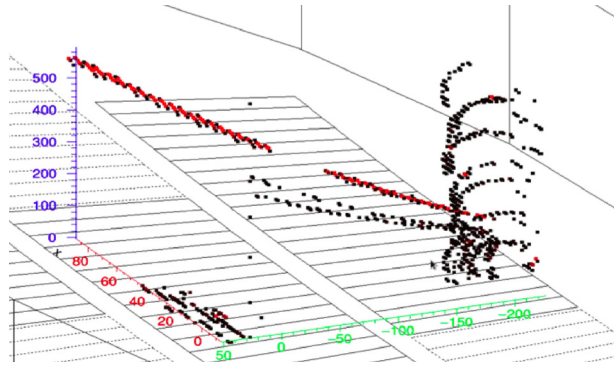


図16: 物理解析に用いられないが、電子が外壁でシャワーを起こした場合のイベント、磁場中であるので、低エネルギー荷電粒子がカールしている様子がわかる。

### 3.5 幾つかのデータ解析

このニュースの原稿を書いている12月現在、データ解析を始めたばかりであり、データの多くは未だ十分に理解している状況ではない。現在得られている結果はPreliminaryなものであるが、今回開発したGEM型ゲートを搭載した検出器が、我々の期待通りに動いている事を表すプロット、高磁場3.5 T中で到達し得ると期待できる位置分解能を表すプロットなどを示すことにする。

#### 3.5.1 荷電粒子に対するGEM型ゲートの動作

検出器インストール後の1つの心配事は、GEM型ゲートが期待しているように動作しているかという事である。図10で示したように、開口率82%のGEM型ゲートの厚さは25  $\mu\text{m}$ 程度であり、リム幅も30  $\mu\text{m}$ 程度であるので、文字どりのペラペラのスカスカ状態である。最大限注意して扱ってはいるが、検出器のインストール中、あるいは初めて高電圧を印加した時に、振動や微小なチリをきっかけにGEM型ゲートの一部が短絡してしまう可能性がある。しかし、GEM型ゲートは短絡した場合でも70%近い透過率のため（磁場なし最大透過85%程度と比較しても）、一見に正常動作しているのか判断しづらい。よって、GEM型ゲートが載っていない場合の電荷量と比較することや、電荷量が確実に変わるところまでゲートを閉じて比較する必要がある。電荷量の比較には信号電子を増幅した後の電荷量の分布のMPV (Most Provable Value) を用いる(図17)左。実験中GEM型ゲートに印加していた値は3.55 Vである。

この値は小型サンプルを用いた1 T中での電子透過率測定の最大透過付近に一致し、おおよそ82%が得られると期待できる。(図17)右はGEM型ゲートを搭載した検出器と電場整形器を搭載した検出器とのMPVの値の比較である（幾つかのレイヤーの平均値）。全ドリフト距離に対して期待する82%の減少が確認できる。位置

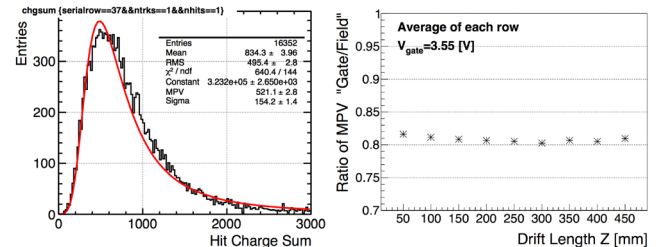


図17: 全ドリフト距離に関して2台の検出器で取られたMPV値の比。

分解能式の中のパラメータ  $N_{eff}$  を用いることによってGEM型ゲートの動作確認は行える。 $N_{eff}$  は生成された電離電子数  $N$  におおよそ比例するので、 $N_{eff}$  の比較から電子透過率を評価できる。GEM型ゲートに印加する電圧を変えてZ方向スキャンを行い、位置分解能式でフィットして  $N_{eff}$  のパラメータを見積もった結果を図18に示す。図では+3.55 Vのときの  $N$  および  $N_{eff}$  を1と規格化している。 $^{55}\text{Fe}$ 線源を用いたKEKにおける事前測定の結果から、+3.55 V  $\rightarrow$  +0.00 Vの変化で透過率25%程度の減少。+3.55 V  $\rightarrow$  -3.55 Vの変化で透過率65%程度の減少が期待されるが、荷電粒子を用いて得られる結果からも同様の変化が確認できる。

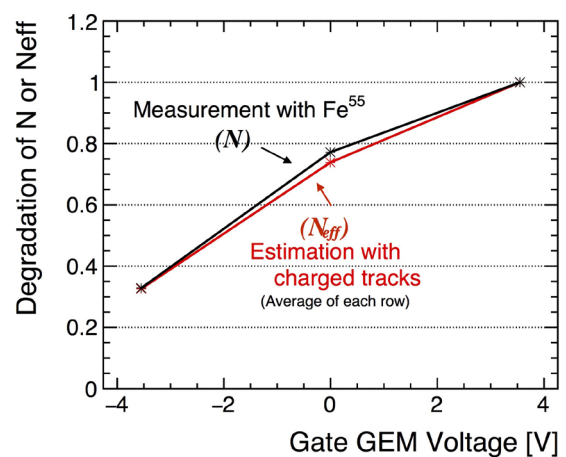


図18: GEM間電圧を変更した時の有効電子数  $N_{eff}$  (赤), あるいは電離電子数  $N$  (黒) の変化について。磁場なしでの測定結果。



### 3.5.2 期待される位置分解能

今回の電子ビームテストの最大の目的は前述の通り、「GEM 型ゲートを搭載した検出器を用いて、ドリフト距離 2.2 m でも位置分解能 100  $\mu\text{m}$  以下が達成可能（外挿）であることを証明するデータをとる。」ということであった。3.5 T に外挿するために必要なパラメータは、読み出しパッドの構造や増幅 GEM だけによる信号電荷の広がりから決まる  $\sigma_0$ 、ガスによる拡散の影響を表す  $C_d$  (3.5 T と 1.0 T)、そして測定に関与する有効電子数  $N_{eff}$  である。GEM 型ゲート装置のフレーム近辺は電場整形器が装着されておらず、形成される電場の状況が不透明である。今回の報告において、以下に示す位置分解能の解析には中央付近のある 1 レイヤーを用いたものである（もちろん検出器境界付近のトラックの歪みなどを見る場合には、フレーム近辺のデータも意味のあるものとなる。また検出器全体の性能を考慮する場合、各レイヤーの位置分解能の状況も見べきである）。

中央付近のあるレイヤーに対して、信号電荷の広がりか

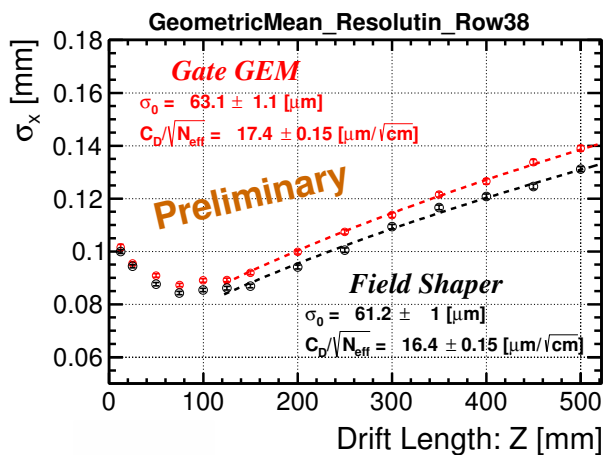


図 19: 1 T の磁場中で測定された GEM 型ゲート搭載検出器と電場整形器搭載検出器の位置分解能の違い。

ら見積もられた  $C_d$  はおよそ 87、Z 方向スキャンから得られたデータを用いて、図 19 のように位置分解能式でフィットを行い、Z 方向に沿って  $N_{eff}$  を得た。また、1 T における  $C_d=87$  をシミュレーションから 3.5 T に外挿すると  $C_d$  はおよそ 27 になる。このように求められた  $N_{eff}$  および  $C_d$  を用いて、1 T の条件下で測定された位置分解能を 3.5 T に外挿すると、図 20 のようになる。ただし、 $C_d$  はガスの状況、設定電圧により大きく変動するので、 $C_d$  の値の詳細な評価は重要になるが、今回は時間の都合上簡易的な評価だけを行っていることを補足しておく。(a)、(b) はそれぞれ 5 GeV 電子による結果を外挿したものである。2 つの違いは電極パッドに対する電荷の広がりを表す  $\sigma_{PRF}$  に構造と電圧設定で決まる値を使用したか、測定値を使用したかである。5 GeV 電子の電離損失は MIP (Minimum Ionizing Particle) よ

り大きく、いわゆる Fermi plateau に位置し、MIP に比べて多くの電離電子を発生させる。(c) は 5 GeV 電子の結果を MIP に焼き直すために  $N_{eff}$  に  $1/1.4^8$  を掛けたものである。簡易解析ではあるが、現在のところ位置分解能は 100  $\mu\text{m}$  を下回った結果が得られている。パラメータの評価に関してさらに解析を改善する必要があることがわかっているので、信頼できる最終結果を待ちたいと思う。電場整形器が搭載された検出器との  $N_{eff}$  の値との比較に関しては、図 19 より GEM 型ゲート検出器で  $N_{eff}=25.0$ 、電場整形器検出器で  $N_{eff}=29.1$ 、変化は 17 % 程度となり、およそ期待する変化率が示されている。

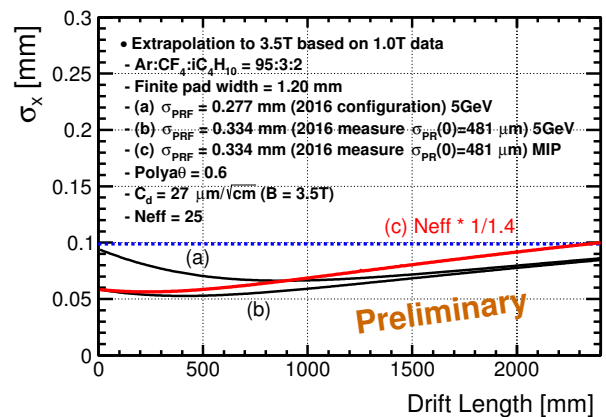


図 20: GEM 型ゲート搭載検出器で測定されたデータを元に、3.5 T に外挿した結果得られた 5 GeV 電子および MIP に対する位置分解能の予想値。

## 4 陽イオン阻止率の評価

残る LC-TPC グループの課題の一つとしては、開発された高開口率 GEM 型ゲート装置を用いて陽イオンに対する透過阻止率を実測し、その性能を証明する事である。これまではシミュレーションを用いて阻止率を予測してきており、-10 V 程度で  $\mathcal{O}(10^{-4})$  の阻止率が陽イオンに対して期待されている [11]。今回、KEK 実験棟で GEM 型ゲート装置を用いて陽イオンに対する阻止率の実測を行った。実際のところ陽イオン阻止率測定用の特別な機器は設置されていないので、電子の阻止率より陽イオンの阻止率の下限値を見積もることになる。前述の通り、陽イオンは電子に比べて十分に重いため拡散の影響が小さく、より電気力線に沿って動く事になるので、電子の阻止率が理解できれば、陽イオンの阻止率もその下限として得る事ができる。図 21 黒線は実際に鉄線源や UV レーザーを用いて信号の大きさの比から電子の透過阻止率を評価したものである。-15 V で  $\mathcal{O}(10^{-4})$  程度

<sup>8</sup>1.4 という値は Heed[18] による電離損失のシミュレーションを行って得たものである。

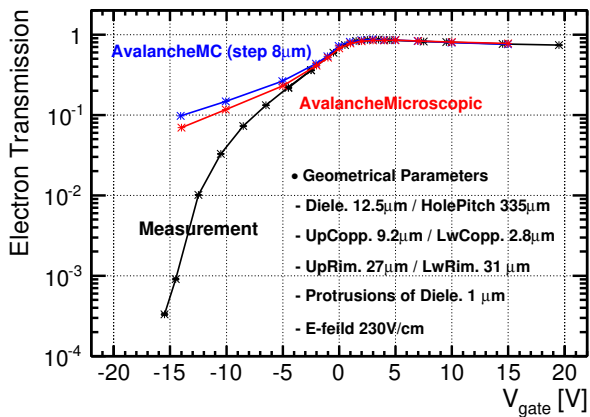


図 21: ゲート装置に逆電圧を印加していった場合の電子透過率 (> 陽イオン阻止率が期待できる)。パラメータはシミュレーションに用いたモデルの値。

の電子阻止率が得られている。これは例えば有効ガスゲイン<sup>9</sup>が3000程度と仮定した場合、1個のドリフト電子でドリフト領域中に逆流する陽イオンは1個となる。電子の阻止率に関するシミュレーションの結果を青、赤線で表しているが、今の所データの再現はできていない。来年度には実際に陽イオン阻止率測定を行い、数Vの印加で阻止率 $\mathcal{O}(10^{-4})$ の証明を行う予定である。実際は増幅GEM自体にも陽イオンの吸収作用があり $\mathcal{O}(10^{-2})$ が期待できるので、ほとんど陽イオンは逆流してこないと期待される。

## 5 これからの研究開発

ILC-TPCのための高開口率GEM型ゲートの開発としては、もちろん幾つかの追加測定や装置搭載のための工学設計などは残っているが、企業の多大な協力もあり、ひとまず要求性能を満たす(と思われる@12月現在)装置が完成した状況である。ILC-TPCの実現を左右する検出器開発を行い、LC-TPCコラボレーションにおいても重要な役割を果たしたと思う。現在LC-TPC内ではドイツ・フランスのグループがそれぞれのデザインに基づいたTPC端部検出器を開発しているが、今後どのグループも我々が開発した高開口率GEM型ゲートを搭載し、性能試験を行う予定である。またILC-TPCが実現した場合、各グループが統合され1つの検出器をデザインすることになるとと思われる。GEM型ゲートの開発の過程で我々が得た知見を各グループと共有し、より洗練された検出器の開発を行っていくことが日本グループの役割の1つであると思う。

<sup>9</sup>一般にアノードで測定できる分は有効ガスゲインと呼ばれ、GEM穴でガス増幅された全電子群を絶対ガスゲインと呼ぶ。

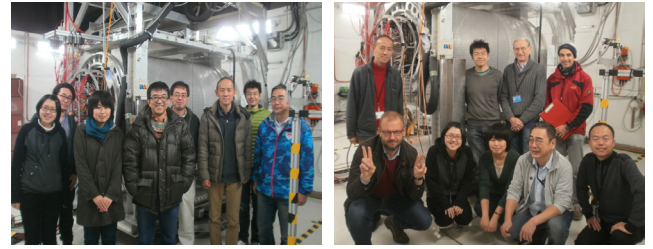


図 22: 2016年秋、ビームテスト参加者たち。



図 23: ビームテスト期間に行ったGEM型ゲートに関するワークショップの記念写真。

## 参考文献

- [1] <https://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>.
- [2] <http://www.linearcollider.org/ILC/physics-detectors/Detectors/Detailed-Baseline-Design>.
- [3] 田辺友彦, ILCの物理, 高エネルギーニュース **32** (2014) 247.
- [4] ILC日本グループ, ILCの検出器, 高エネルギーニュース **33** (2014) 32.
- [5] 杉山晃, 最近のTPC, 高エネルギーニュース **26** (2007) 225.
- [6] David R. Nygren, The Time-Projection Chamber, <http://lss.fnal.gov/conf/C740805/p58.pdf>
- [7] <http://magboltz.web.cern.ch/magboltz/>
- [8] RL Gluckstern, NIM A, **24**, p.381-389.
- [9] S.C. Curran and J.D. Craggs, "Counting tubes, theory and applications, London: Butterworths".
- [10] F. Sauli, L. Ropelewski and P. Everaerts, NIM A **560** (2006) 269.
- [11] P. Gros *et al.*, "Blocking positive ion backflow using a GEM gate: experiment and simulations", DOI:10.1088/1748-0221/8/11/C11023.
- [12] K. Ikematsu, DOI: 10.1109/NSSMIC.2014.7431237.
- [13] M. Kobayashi *et al.*, NIM A **641** (2011) 37.
- [14] R. Yonamine *et al.*, DOI: 10.1088/1748-0221/9/03/C03002.
- [15] <https://particle-physics.desy.de/e252106/e252106/e252211>.
- [16] [http://aliceinfo.cern.ch/Public/en/Chapter2/Chap2\\_TPC.html](http://aliceinfo.cern.ch/Public/en/Chapter2/Chap2_TPC.html).
- [17] [http://ep-ed-alice-tpc.web.cern.ch/ep-ed-alice-tpc/altro\\_chip.htm](http://ep-ed-alice-tpc.web.cern.ch/ep-ed-alice-tpc/altro_chip.htm).
- [18] <http://consult.cern.ch/writeup/heed/>