

# An Innovative Positron Spectrometer to Search for the Lepton Flavour Violating Muon Decay with a Sensitivity of $10^{-13}$

高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所

西口 創

hajime.nishiguchi@kek.jp

2009年2月6日

## 1 はじめに

スイス連邦の首都チューリッヒから列車とバスに揺られること1時間弱、ドイツとの国境付近にあるスイス国立ポールシェラー研究所 (Paul Scherrer Institut, PSI) は、590 MeV・2 mA というメガワット級大強度陽子サイクロトロンを擁し、米国ロスアラモス研究所・カナダ TRIUMF 研究所・英国ラザフォード研究所と並び、中間子工場として素粒子原子核研究の長い歴史を有するミュオン物理のメッカの一つである。ここで、日本の高エネルギー物理学者を中心とした国際共同実験 MEG[1] が、2008年、物理データ取得を開始した。 $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  崩壊探索という、難しくも長い伝統を持つ稀崩壊探索実験を成功裏に進めるため、幾多の野心的試みがなされた MEG 実験では、「液体キセノン $\gamma$ 線検出器」と、勾配磁場によって数十 MHz 規模の入射頻度に耐える「COBRA 陽電子スペクトロメータ」という画期的な二つの検出器をそなえている。

本稿では、この COBRA 陽電子スペクトロメータについて、その開発研究の初期から、建設、コンディショニングについて述べ、2007年に行われた較正運転、そこで得られたデータを用いた性能評価について紹介する。

## 2 $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊探索実験

近年相次いで報告されたニュートリノ振動実験の結果より、ニュートリノにおけるフレーバ保存の破れはほぼ確実視されている。B ファクトリー実験などの結果により、クォークにおけるフレーバ保存の破れもまた、実験的に確かめられている。一方、荷電レプトン ( $e^\pm, \mu^\pm, \tau^\pm$ ) におけるフレーバ非保存事象は、幾多の野心的実験の努力にもかかわらず未だ一例の報告もなされていない。果たして、荷電レプトンにおいてはフレーバ保存が厳密に守られてい

るのか、はたまたわずかな綻びが存在するのか、新しい実験結果に期待が高まっている。

ニュートリノにおけるフレーバ非保存はほぼ確実となっているが、標準理論の枠組みに「ニュートリノは質量を持つ」という仮定を導入した場合に導かれる荷電レプトンにおけるフレーバ混合は、極めて小さい。代表的な荷電レプトンフレーバ非保存事象として長年探索対象とされてきた  $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  崩壊を例にすると、実に  $B(\mu^+ \rightarrow e^+\gamma) \approx 10^{-50}$  という極めて小さな崩壊分岐比となる。これに対して、 $B(\mu^+ \rightarrow e^+\gamma) < 1.2 \times 10^{-11}$  (90% 信頼度) という実験上限値が、米国ロスアラモス研究所中間子実験施設にて行われた MEGA 実験によって1999年に報告されている [2]。従って、先に予測されていた崩壊分岐比は、到底実験で観測出来るような分岐比ではないことが分かる。その一方で、標準理論を超える新しい物理の枠組みとして試みられている理論モデルの多くは、極めて大きな崩壊分岐比を予測している [3, 4, 5]。それらのうち、特に有力視されている超対称性大統一理論やシーソー機構のような理論に基づいたモデルでは、 $B(\mu^+ \rightarrow e^+\gamma) = 10^{-15} \sim 10^{-11}$  という大きな値を予測している。すなわち、前述の実験上限値をあと数桁上回る実験感度でもって探索することで、標準理論を超える新しい物理の端緒を掴む可能性が非常に高い。ここで特筆すべきことは、クォークやニュートリノにおけるフレーバ混合と異なり、標準理論を超える新しい物理の存在を仮定しないと、荷電レプトンにおいては(実験で到達可能な感度での) フレーバ混合は起こり得ない、ということである。つまり、荷電レプトンにおけるフレーバ混合事象が観測された場合、これは即座に標準理論を超える物理が存在する非常に有力な証拠といえる。他の素粒子に比べて圧倒的に多くの粒子を容易に生成可能であり、かつ弱相互作用のみが関与するレプトンのみの崩壊過程を持つミュオンは、荷電レプトンフレーバ混合探索実験

のプローブとして最適であり、前述のように実験上限値が理論予言領域にまさに差し掛かっていることと相まって、ミューオンによるレプトンフレーバ非保存事象発見に期待が高まっている [6]。

$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$  崩壊探索実験における信号事象はとてもシンプルである。純粋な二体崩壊事象となるため、静止させた正電荷ミューオン<sup>1</sup>から、「同時」に「正反対」に「同じエネルギー (= 52.8 MeV, ミューオンの静止質量の半分)」で放出される陽電子と  $\gamma$  線が信号事象となる (図1(a))。主

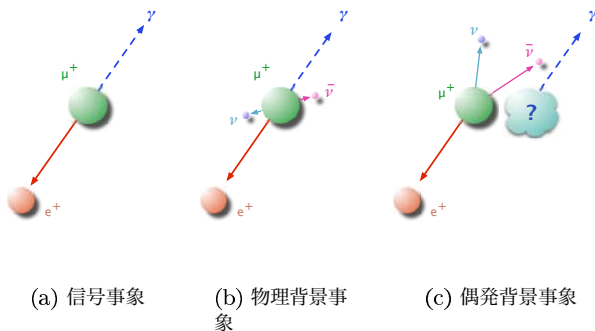


図 1:  $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$  探索実験における信号および背景事象

な背景事象は二種類存在する。一方は、物理背景事象と呼ばれるミューオンの輻射崩壊モード ( $\mu^+ \rightarrow e^+ \bar{\nu}_\mu \nu_e \gamma$ , 図1(b)), 他方は、検出器に入る高エネルギー  $\gamma$  線が通常の Michel 崩壊から来る陽電子と偶発的に重なり合う偶発背景事象 (図1(c)) である。Michel 崩壊は、およそ 1% の割合で  $\gamma$  線を随伴する輻射崩壊をすることが知られているが、もし二つのニュートリノがほとんど運動量を持たずに放出された場合 (図1(b)), 検出される陽電子と  $\gamma$  線は  $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$  信号に非常に似通ったものになる。従って、エネルギー分解能と角度分解能に優れた検出器を用意することで、この背景事象は後者の偶発背景事象に比べて容易に除去することが可能となる。最終的に実験感度を決めるのは、偶発背景事象である。そのため、偶発的な事象の重なり合いを極力避けるため、ミューオンは DC ビームで供給されることが望ましい。パルスビームで供給されているのは、偶発的な事象の重なりへの寄与は致命的となる。また、優れたエネルギー・角度分解能に加えて、特に時間分解能に優れた検出器も重要となる。

### 3 MEG 実験

前節でまとめたように、偶発的な背景事象を如何にして抑制することが出来るか、が  $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$  探索実験の成否

<sup>1</sup>ミューオンが標的原子核の束縛によるミュオニック原子になるのを防ぐため、 $\mu \rightarrow e \gamma$  崩壊探索は正電荷ミューオンを用いておこなわれる。

の鍵を握る。そこで、2008年現在、世界最高強度の DC ミューオン源である PSI ビームラインと、 $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$  探索に特化した高分解能検出器を組み合わせることで、現在の実験上限値よりも 2桁以上よい感度で探索しようという実験が「MEG」である。

PSI の二次ビームラインのひとつ、 $\pi E5$  チャネルから供給される毎秒  $3 \times 10^7$  個にもものぼる大量のミューオンは、検出器中央に置かれた静止ターゲットで止められ、そこから放出される  $\gamma$  線は液体キセノン  $\gamma$  線検出器によって検出される。一方、反対側に放出される陽電子は後述する陽電子スペクトロメータによって検出される。 $\gamma$  線検出を担う液体キセノン  $\gamma$  線検出器は、MEG 実験用に新たに開発された、極めて野心的なカロリメータ型検出器で、これひとつで入射  $\gamma$  線のエネルギー・入射位置・時間を同時に検出する [7]。

実験は、東京大学素粒子物理国際研究センターの森俊則を中心としてそのアイデアが提唱され、1999年に PSI の研究計画検討委員会に実験プロポーザルを提出し承認された [1]。以降、徐々に共同研究者グループは規模を増し、現在、日本・スイス・イタリア・ロシア・米国の 5 カ国共同実験グループとなった。新しい二種類の検出器の開発研究には予想以上の時間を要したが、2007年、費やした歳月と苦勞を補って余りあるアイデア満載の検出器はその建設を完了し、エンジニアリング運転を行った。エンジニアリング運転中、ミューオンビームの最終コミッションングも併せて行われ、すべての検出器は読み出し系エレクトロニクスと共に、予定のビーム強度で試験運転され、検出器較正用データが収集された。このエンジニアリング運転は 2007年のクリスマスシャットダウンまで続けられ、そこで得られた知見を基に、各検出器は 2008年春のメンテナンス期間中に最終調整を行い、2008年夏、ついに MEG 実験は最初の物理データ取得を開始した。

### 4 陽電子スペクトロメータ

MEG 実験の概要で説明を省いた陽電子スペクトロメータについて、ここで詳述する。概観図を図 2 に示す。陽電子スペクトロメータは、超伝導電磁石、16 個のドリフトチェンバーからなる飛跡検出器、その下流に控えるタイミングカウンタから構成されている。陽電子スペクトロメータは以下のような要請を満たす必要がある。

- 高い入射頻度に耐え得る
- 極限まで低物質量化
- 優れた運動量・角度・時間分解能

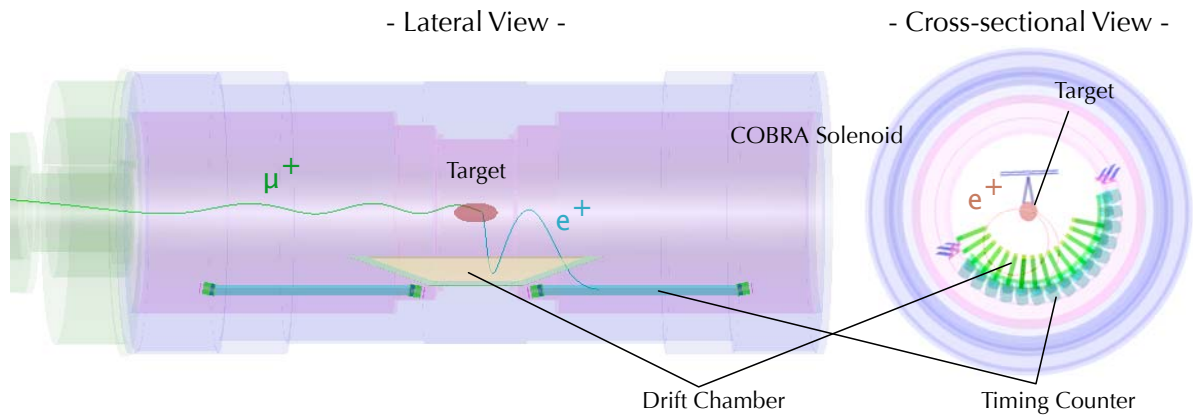


図 2: MEG 陽電子スペクトロメータ概観図

稀崩壊探索実験であるため、当然大量のミュオンを崩壊させる必要がある。MEG 実験開始当初の予定強度は実に毎秒  $3 \times 10^7$  個のミュオン入射頻度で運転する。これは、同時に毎秒  $3 \times 10^7$  個の崩壊陽電子がスペクトロメータ内部で生成することを意味する。この過酷な環境下で安定動作するスペクトロメータを、後述する高い磁場勾配を持った「COBRA 磁場」によって実現した。

二つ目の要請として、スペクトロメータ内部、特に飛跡検出器の配置される領域は、極限までの低物質量化を図る必要がある。飛跡検出精度は、入射荷電粒子と検出器内部の物質との相互作用による(主にクーロン多重散乱)影響によって制限されるため、三つ目の要請に挙げられている優れた分解能を実現するため必須である。それと同時に、MEG 実験固有の要請として、二次粒子生成を可能な限り抑制しなければならないからでもある。入射荷電粒子が検出器内部の物質との相互作用で生み出した  $\gamma$  線は、そのままスペクトロメータ外に到達し、その一部は液体キセノン  $\gamma$  線検出器に入射する。これらは当然、偶発的背景事象のおもな原因となる。従って、飛跡検出器の低物質量化は優れた分解能を達成するためのみならず、背景事象抑制のため、MEG 実験において必要不可欠な要請といえる。

最後の要請は、その難しさが伝わりにくい。どのような実験にせよ当然の要請と映りかねない。が、上記二つの要請を満たしつつ実現する、となると、これはなかなかどうして、実現に大きな困難を伴う要請である。運動量・角度分解能については、ドリフトチェンバーの紹介で述べるとして、時間分解能については、現在持ち得る最高のプラスチックシンチレータ・ファインメッシュ型光電子増倍管とを組み合わせた、50 psec レベルの優れた時間分解能を持ったタイミングカウンタを採用している。

#### 4.1 COBRA 電磁石

高い入射頻度に耐えるスペクトロメータをどのように実現するか。簡単に考えれば、高頻度検出に特化した飛跡検出器を開発することが王道のように思える。しかし、前節で挙げた二つ目の要請「低物質検出器」を考慮しなければならないため、固体検出器などもつてのほかで、当然ガス検出器、ドリフトチェンバーで実現するほかない。しかし、そんな高照射環境下で動作するドリフトチェンバーなど存在しないであろう。

そこで考案された手法は、信号陽電子のみに感度をもった飛跡検出器、である。 $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$  事象以外の膨大な数の Michel 陽電子はすべて雑音である。つまり、52.8 MeV という信号陽電子に近い、高い運動量を持った Michel 陽電子にのみ感度を持たせ、それ以外の大部分の陽電子に対して不感な検出器を実現出来れば、当初の要請を満たすことが可能になる。どのようにしてそのようなアイデアを実現するのか、図 3 を参照されたい。図 3(a) は、通常の一様磁場を陽電子スペクトロメータに適用した場合の放出陽電子 (52.8 MeV) の軌跡を示している。この例では、ビーム軸に対して 90 度近い角度で放出されているため、スペクトロメータ内部で何回も回転していることが分かる。当

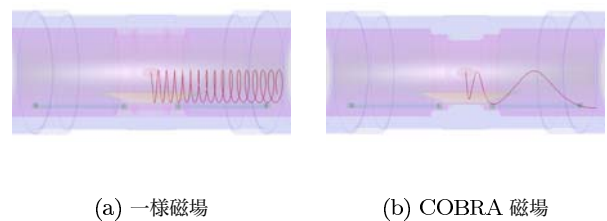


図 3: COBRA 磁場 (1)

然このような場合、飛跡検出器には動作不良が生じ、解析時における飛跡検出にも困難が生じることは、容易に想像がつく。一方、図3(b)は、コイルの中央付近での巻き径を小さくして、中心磁場を外縁部磁場に比べて高めることによって磁場に高い勾配を持たせた例である。描かれた同じ運動量の放出陽電子の軌跡が示している通り、このような場合、放出陽電子は磁場勾配に沿って、速やかにスペクトロメータ外部へと掃引され、飛跡検出器への入射頻度は大幅に低減される。

実は、この勾配磁場にはもう一つ大きな利点がある。勾配をうまく調整することによって、荷電粒子の回転半径をその放出角度によらず、運動量のみで比例するような磁場を実現することが可能となる。図4(a)は、52.8 MeV の運

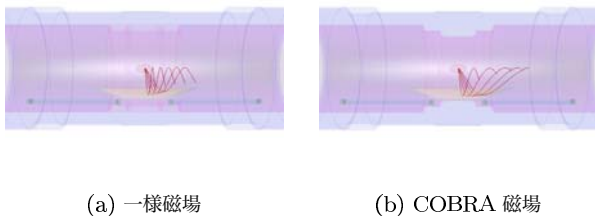


図 4: COBRA 磁場 (2)

動量を持ちながら様々な角度で放出された陽電子の一樣磁場中での軌跡を示す。それに対して、図4(b)は、同様の放出陽電子の勾配磁場中での軌跡を示す。後者では、その放出角度によらず、一回転目の最外到達半径が同じであることが分かる。この二つ目の利点は、MEG 実験に対して極めて有利に作用する。Michel 崩壊によって生まれる陽電子は、52.8 MeV を運動学上限とする Michel スペクトルを持ち、 $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$  信号陽電子はその上端部分に現れることになる。従って、回転半径の一番大きな領域のみにドリフトチェンバーを配置することで、信号陽電子に近い運動量の陽電子のみを拾いだし、大部分の Michel 陽電子はチェンバーに到達すらしない、という MEG 実験に特化した環境が可能となる。図 5 は、生成される Michel 陽電子のスペクトロメータ内での単位面積あたりの通過頻度を、スペクトロメータ中心からの距離の関数として表している。一樣磁場の場合と比べ、勾配磁場の場合には外側へ達するに従って劇的に通過頻度が減少していることが分かる。図には併せて、ドリフトチェンバーを配置する領域が示されており、もっとも入射頻度の高い最内部で 10 kHz を切るレベルにまで低減されていることが分かる。このように、飛跡検出器そのものを高頻度対応にするのではなく、検出器に入射する粒子を事前に弁別してしまう、というアイデアでもっとも重要で難しい要求を達成することが出来た。

二番目の利点 (COnstant Bending RAdius) の頭文字

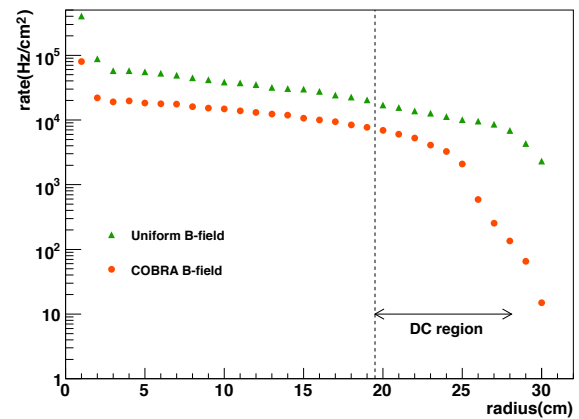


図 5: Michel 陽電子の入射頻度

を取り、われわれはこの電磁石を、**COBRA** 電磁石と呼んでいる。高い磁場勾配 (1.6 T から 0.5 T) を持ち、なおかつ磁石の外側に設置される  $\gamma$  線検出器のために可能な限り薄肉である必要があり、またリターンヨークが置けないなどの多くの制限があるため、非常に興味深い超伝導電磁石であるが、残念ながらここでは頁数の関係上詳しく触れる余裕がない。詳しくは、参考文献 [8] を参照されたい。

## 4.2 MEG ドリフトチェンバー

COBRA 磁場のおかげで、高い入射頻度に耐える、という要求は満たしたものの、低物質質量で、かつ分解能に優れたドリフトチェンバーを開発する、という課題がまだ残っている。そのため、MEG ドリフトチェンバーでは、かなり思い切った、常識とはかけ離れたデザインを採用している。まず、通常用いられている CDC 型の円筒形ドリフトチェンバーとは異なり、2 層毎にモジュール化して 10 度間隔に放射状に配置している (図 2 の断面図参照)。ドリフトチェンバーが配置される電磁石内部は、陽電子通過領域の物質質量を極力減らすため、ヘリウムガスで封じ切られている。モジュール化したことで、各チェンバー間もこのヘリウムガスで満たされ、全領域がチェンバーガス (これも低物質質量化のため、ヘリウム・エタン (1:1) を採用) で満たされる場合よりも低物質質量化がなされている。同時に、各モジュールがワイヤ層毎にカソードを持つことで、カソードのパッド読み出しにより  $\theta$  方向 (ビーム軸方向) の位置測定精度が向上し、運動量分解能、特に角度分解能の向上が見込まれる。

MEG ドリフトチェンバーでは、究極の低物質質量化のため、非常に思い切った構造上の挑戦をしている。それは、図 6(a) のようにフレームの一辺を取り払ってしまった、オープンフレーム構造を採用していることである。フレームが台形構造をしているのは、下流にあるタイミングカウン

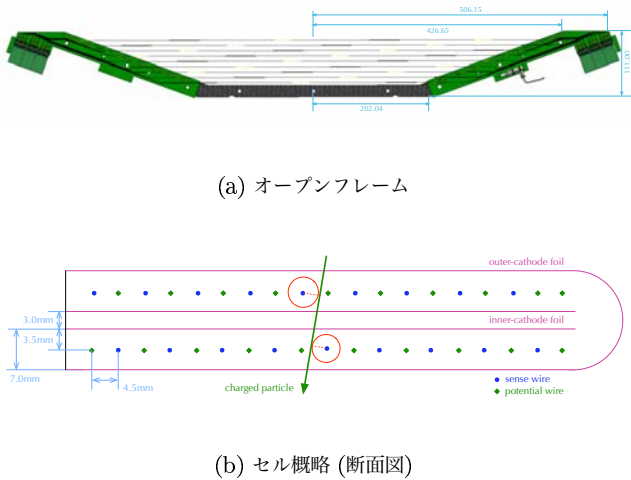


図 6: ドリフトチェンバー概要

ターがチェンバーの下側に入りこみ、アクセプタンスを保つためである。陽電子はほぼすべて、静止ターゲットから飛来するため、入射してくる方向にあるフレームに当たることになる。当然、このフレーム(強度と物質量の関係からカーボンファイバーを採用)との相互作用で散乱された陽電子はその運動量分解能は悪化し、偶発背景事象の元になる $\gamma$ 線の発生も避けられない。もし、入射してくる側のフレームをなくしてしまふことが出来れば、運動量分解能向上・背景 $\gamma$ 線生成抑制の双方の観点から、恩恵は計り知れない。

オープンフレームを採用するためには、チェンバースを封じるため、カソードフォイルでフレーム外側を覆う必要がある。ドリフトチェンバーモジュールは、ドリフトセル内部で入射位置の左右判定をするため半セルずらした2層構造を取るため、図6(b)に示した通り、各層が内外にカソード面を持ち、外側のカソードはモジュールを包み込むようにして内部にチェンバースを封じる役目も担う。

カソードにはパッド読み出し用のパターンが施されるが、ここでは「ヴァーニアパッド法」(vernier-pad method)を採用している。図7に概略を示す。通常、カソードのパッド読み出しは、アノードワイヤに対して垂直にパッドパターンを形成し、パッド上に誘起される電荷を収集し、パッド毎の電荷分布からワイヤ方向の位置を導きだす。これに対

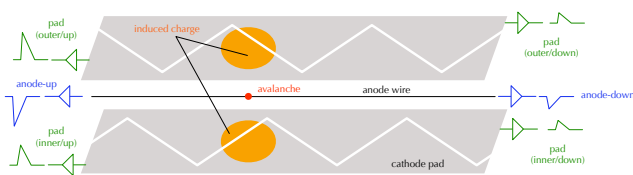


図 7: ヴァーニアパッド法

して、ヴァーニアパッド法は、図7に示されている通り、ワイヤ方向にジグザグに二つのパターンを形成する。ワイヤを挟む両面、都合4パッドに誘起される電荷を収集する訳だが、ふたつのジグザグの周期は互いに半周期ずらしてあり、4パッドの電荷の比をとることで、ワイヤ方向の位置が求まる。たとえば、各パッドに誘起された電荷量を $Q_{1,2,3,4}$ とすると、ジグザグ周期の位相 $\alpha$ は

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{(Q_1 - Q_2)/(Q_1 + Q_2)}{(Q_3 - Q_4)/(Q_3 + Q_4)} \quad (1)$$

で定義され、この位相の一周期はジグザグの繰り返し長に一致する(MEGドリフトチェンバーの場合5cm)。従って、ヴァーニアパッド法ではジグザグ周期の内部において一意にワイヤ方向位置を求めることが出来るが、事前に荷電粒子がどのジグザグ周期に入射したのかを知っておく必要がある。そのため、アノードワイヤの両端電荷比でもって、前もって粗く位置を割り出しておく。

元来ヴァーニアパッド法は、大型加速器実験におけるワイヤチェンバー型検出器で、膨大な数にのぼる読み出しチャンネル数を低減するために編み出された手法であり[9]、精度は二の次であった。たとえば、通常のカソードパッドはワイヤ長が長くなればなるだけ、区切られるパッドの個数は増え、それにつれて読み出しチャンネル数は膨大になる。ヴァーニアパッド法を採用すれば、ワイヤの長さによらずパッド数は増えない。この場合パッドの周期長は、事前に知っておくべきアノードワイヤによる粗い位置出し精度に応じて最適化が図られる。従って、巨大検出器の場合、ワイヤ長は長くなり、それに伴ってパッドの周期も長くしなければならない。これは、ワイヤ方向位置再構成の位置分解能が悪化することに繋がり、検出器デザインの際に十分考慮しなければならない。MEGドリフトチェンバーの場合、ワイヤ長は最長部分で1mとそれほど長くなく、ワイヤによる粗い位置出しの精度は1cm程度となる。従って、パッドの周期長は余裕をもってデザインしても5cm周期が可能となり、S/N比などから決まる電荷収集精度を考慮すると1mmを切る精度でワイヤ方向位置を求めることが出来る。ヴァーニアパッド法をMEGドリフトチェンバーに採用するメリットは、読み出しチャンネル数を増やすことなく優れた位置分解能を達成する、ということに尽きる。通常のカソードパッド法を採用した場合、その読み出しチャンネル数は膨大になりフロントエンドエレクトロニクスもそれに伴って大きな領域を占めることになる。これらはスペクトロメータ内部の物質増加に繋がってしまい、MEG陽電子スペクトロメータへの要請を満たすことが出来ない。

ヴァーニアパッド法による位置測定精度を保証するためには、精密なパッドパターンを電氣的に強固なカソードパッドとして実装する必要がある。しかし、先にチェン

バーの構造紹介の際に述べた通り、モジュール化された各チェンバーはカソードで覆ってチェンバーガスを封入してあるため、入射粒子は否応なくチェンバー毎に4枚のカソード面を通過する(図6(b)参照)ことになる。低物質量化という要請から、MEGドリフトチェンバーでは極めて薄いポリイミドフィルムにアルミニウムを蒸着し、これにエッチングでパターンを形成する、という方法を採用した。

このヴァーニアフォイル製作は実に困難を極めた。市場に出回っているポリイミドフィルムで最も薄いものは $8\mu\text{m}$ 厚だが、これでは薄過ぎてエッチング出来ず、そもそもガスを封じ切れない。その次に薄い $12.5\mu\text{m}$ 厚のポリイミドフィルム<sup>2</sup>を用いて、アルミ蒸着とエッチングの試験を繰り返すことになったが、実はこれは、まさに文字通り「言うは易し、行は難し」という開発であった。これだけの薄いフィルムに、長手方向1mを超える領域にわたって数100nm厚のアルミ蒸着をし、しかも $100\mu\text{m}$ レベルの精度でのエッチングを行う、というのは至難の業。蒸着はアルミで、しかも薄く、という要請がある上に、パターン形成した後に保護膜を除去すると、アルミ蒸着面は容易に劣化し面抵抗値の不定性はロット毎に変わる始末。スイスの国立研究所予算のサポートの下での開発研究であるため、開発当初は「スイス国内の業者を選定のこと。不可能であった場合の次善策はユーロ圏内で」という条件があったのだが、ヨーロッパ中のめぼしい業者を軒並み当たったにもかかわらず、何れも「それは無理」という返事であった。最終的には、数ある日本の中小企業群の素晴らしい技術力がこのフォイル製作を可能にした。PCや携帯電話などの内部基盤部品に代表されるポリイミド部品の精密加工を陰で支える数々の超一流技術を持つ専門業者(スパッタリング専門、プリント専門、エッチング専門等々)に依頼して、ようやくこの困難を極めた開発研究はゴールにたどり着いた。もちろん、彼らの技術力をもってしても、このフォイルは簡単に実現されるものではなく、それこそ数え切れない程の最適化作業の繰り返しの末に可能となった<sup>3</sup>。最終的には、250nm蒸着膜厚で $100\mu\text{m}$ 精度のヴァーニアフォイルの製作が可能となった。

フォイルが完成した後は、アセンブルの困難が待ち受ける。というのも、通常四方(円筒形チェンバーの場合両端)を強固なフレームで構成しワイヤ張力に耐え得るような構造をとるべきところを、台形のオープンフレームという極めて力学的に不安定な構造をしているため、アノードフレームへのワイヤ張り・カソードフレームへのフォイル張り、内外カソードとアノードフレームの最終アセンブル等々、各部品のアセンブルは実に難しいものとなった。

そのため、段階的にプログラムされたプリテンション(事前張力)をガイドワイヤとともに構成し、アセンブルの各段階毎にこのプリテンションの構成を変更し、最終アセンブルが終わった際に、プリテンション用ガイドワイヤはすべて取り除かれ、すべてのワイヤ・カソードフォイル・フレームが平衡状態となるように計算し、アセンブルした。

苦労話ばかりを綴っていても切りがなく、紙面も無駄に費やしてしまうので、ドリフトチェンバー製作に関する話題はこの程度で止めておくことにする。多くの困難(特にフォイルとオープンフレームアセンブル)を伴った開発ではあったが、4年余の歳月を費やし実機16台は2007年夏に完成した。図8(a)に最終アセンブル前の三つのパーツ(アノード・内カソード・外ソード)、図8(b)に16枚揃ってインストールされた電磁石内部の様子、そして図8(c)に完成したドリフトチェンバーモジュールの内部が見えるように一部切断して外側のカソードフォイルを取り除いた写真を示す。ターゲットから放出された陽電子は、平均7~8枚のチェンバーを通過し、タイミングカウンターへと導かれるが、陽電子が通過する物質量は積算(ターゲットからチェンバー通過まで)で、**0.002**放射長単位、という驚異的に軽いチェンバーを実現した。



(a) 最終アセンブル直前



(b) インストール後の電磁石内部



(c) 完成したモジュールの切断写真

図 8: 完成したドリフトチェンバー

## 5 較正運転・性能評価

完成したドリフトチェンバーは速やかに COBRA 電磁石内部にインストールされ、2007年のエンジニアリング運転が始まった。開発に多大な困難を伴ったこのチェンバー

<sup>2</sup>引張強度の観点から、宇部興産製の UPILEX®を採用。

<sup>3</sup>スイスから日本の業者に細かな連絡を取るのなかなか難しく、これらの専門業者の仲介・交渉、ならびに工程管理・最終チェック・梱包など、全般的な業務は林業精器国際事業部の全面的な協力による。

は、厄介なことに運転時にも細心の注意が必要となる。最も大きな難点として、オープンフレームを  $12.5\ \mu\text{m}$  厚のポリイミドフィルムで包んでチェンバースペースを封じている構造であるため、ほんのわずかな圧力変化でセル間隔が変形してしまう、という特徴がある。1 Pa の外圧変化が、実に  $100\ \mu\text{m}$  のセル変形を引き起こす。r 方向  $100\ \mu\text{m}$  オーダーの位置分解能を目指しているため、この大きさの変位は致命的となる。従って、このチェンバースペースの圧力コントロールシステムでは、超精密圧力トランスデューサと大量のガス流量でもって、この要請を満たし得る精密コントロールを実現した。つまり、ほんのわずかな圧力変化を精密トランスデューサで検出し、大量のガス流量を調整することでそのフィードバックを加速する。チェンバースペースはもとより、実に  $2000\ \text{cc}/\text{min}$ . という大量のガス流量で COBRA 電磁石内部のヘリウムを置換し、速やかな圧力調整フィードバックを可能とした。図 9 は、圧力変動の 1 週間にわたる安定性を示す。この 1 週間は、丁度低気圧通過に伴う外気圧変動が顕著な週であった (図から分かる通り、 $120\ \text{Pa}$  に達する大きな圧力降下があった) が、チェンバースペースの内外圧の圧力差は実に  $0.005\ \text{Pa}$  の精度でコントロールされている。このおかげで、圧力変動に伴うチェンバースペースの位置分解能に対する系統誤差は、数百 nm のレベルに抑えられている。

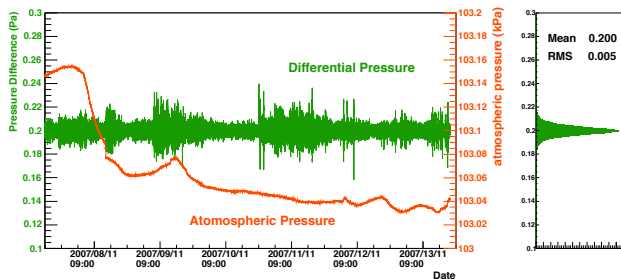
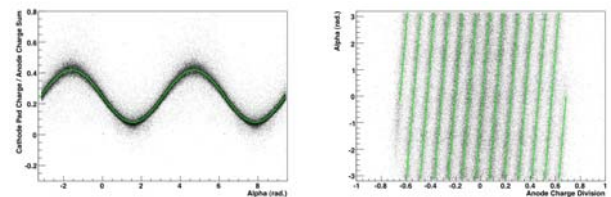


図 9: チェンバースペース圧力変動 (内外圧力差)

電磁石内部をヘリウムで満たすため、高電圧印加もまた細心の注意を要するが、ここでは頁数の制限のため詳細は割愛する。このようなチェンバースペース制御上の難点もクリアし、2007 年のエンジニアリング運転は始まった。最初に磁場なしの状態、宇宙線を使ったワイヤ位置校正データ取得を済ませ、いよいよ COBRA 電磁石を励磁し、ミューオンビームをスペクトロメータ内部へと導いた。徐々にビーム強度を増やし、COBRA 磁場の恩恵でチェンバースペースのヒットレートが許容範囲内に収まることを確認しつつ、最終強度へと到達した。チェンバースペースが最終ビーム強度で問題なく動作することを確認した後、校正用データ取得を開始した。様々な種類の校正データが取得されたが、ここでは特に、z (ビーム軸方向) 位置校正用データについて簡単に触れたい。MEG 陽電子スペクトロメータでは、既述の通

りドリフトチェンバースペースが唯一の位置検出器であり、カソードの z 位置再構成の際に利用可能な校正データが必要となる。しかし、ステレオワイヤなどの処方がなされていないように、ドリフトチェンバースペースの他に位置検出器がないため、カソードの z 位置校正は、チェンバースペース自身でおこなう必要がある。ここで、ヴァーニアパターンの  $5\ \text{cm}$  の周期が有用になる。このパターンは、 $100\ \mu\text{m}$  の精度で形成されていることは確認済みであり、アノードワイヤの両端電荷比で得た z 位置情報と、カソードで得られたヴァーニア周期の情報を照らし合わせることで、詳細な z 位置校正が可能となる。図 10(a) は、カソードで収集された電荷の比を取ることで求めた位相  $\alpha$  (式 (1)) と、カソードとアノードの電荷比との相関を示す。 $\alpha$  の一周期内部で、電荷比も  $\sin$  カーブ様の周期を描くことが分かる。一方、図 10(b) はその  $\alpha$  と、アノードの両端電荷比から得た z 位置との相関を示す。ヴァーニア位相が、アノードから得た z 座標で  $5\ \text{cm}$  の周期で繰り返される様子が分かる。この周期の精度は保証されており、この二つの相関の相互参照を繰り返すことで、z 位置の校正がおこなわれる。



(a) ヴァーニア位相相関 (カソード)

(b) ヴァーニア位相相関 (アノード)

図 10: カソードデータを用いた自己 z 位置校正

これらの校正データに加えて、X-T 校正のために Michel 陽電子データを大量に取得した。当然のことながら X-T 相関は磁場に依存し、勾配磁場を採用している関係上、各ワイヤを各磁場強度毎に X-T 校正をする必要がある。MEG ドリフトチェンバースペースでは、各ワイヤを z 方向  $1\ \text{cm}$  刻みで領域分けし、各領域で X-T 校正に十分な統計がたまるまで校正データを取り続けた。これは、全体で 500 万イベントに達する。X-T 校正そのものは一般的なドリフトチェンバースペースの校正とほぼ同様なのでここではその説明を割愛するが、取得した大量の校正データを用いてドリフトチェンバースペースの固有位置分解能などの性能評価もおこなった。r 方向については、再構成された飛跡から求まる位置と実際にドリフトチェンバースペースで得られたドリフトタイムから再構成した位置との残差として見積もり、 $170\sim 350\ \mu\text{m}$  の分解能が得られ、z 方向についても同様に評価すると、 $500\sim 830\ \mu\text{m}$  の分解能が得られた。

最後に必要な校正は、絶対運動量校正である。運動量校正

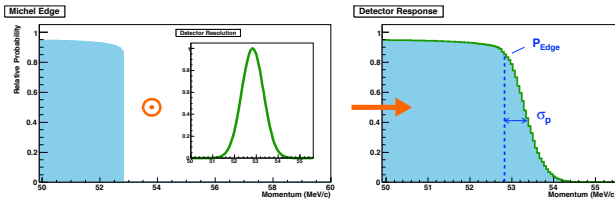


図 11: 絶対運動量較正と運動量分解能の評価

は, Michel スペクトルの運動学上限, すなわち  $52.8 \text{ MeV}/c$  のエッジを使う。再構成された運動量を, 運動学上定まったこのリファレンス点と比較することで, 絶対運動量較正を行う。ここで注意しなければならないことは, 得られたスペクトルの上限エッジはスペクトロメータ固有の運動量分解能による不定性を持っているということである。図 11 に示した通り, エッジ  $P_{\text{edge}}$  を, 運動量分解能  $\sigma_p$  を分散に持つガウス分布と重畳したレスポンス関数でフィッティングすることで, 運動量分解能の評価と絶対運動量較正を同時に行うことになる。図 12 は, 再構成された Michel 陽電子の運動量スペクトルとそのフィッティング結果を示す。COBRA 磁場の項で紹介したように, ドリフトチェンバーは運動量の高い陽電子のみが到達する領域に配置されている。そのため, 図 12 のように, スペクトルは低運動量側がえぐり取られたような形になる。フィッティングの結果,  $52.8 \text{ MeV}$  のエッジで  $488 \text{ keV}/c$  の運動量分解能であることが分かった。運動量分解能に加え, 陽電子放出角の角度分解能・検出効率なども測定され, 角度分解能は FWHM で  $17 \text{ mrad}$ , 検出効率は  $39\%$ , という値が得られた。エンジニアリング運転時のドリフトチェンバーは多くの問題を抱えていたため, 得られた性能は想定していたそれよりも悪い値ではあるが, その原因は明らかである。次章でその原因の概要を述べ, 同時にそれらの問題が解決された場合に到達し得る実験感度について簡単に議論して, 本稿をまとめる。

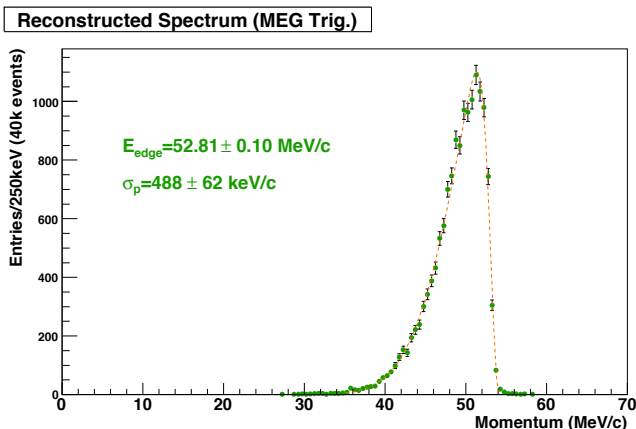


図 12: Michel 陽電子運動量スペクトルと分解能

## 6 実験感度評価

2007 年のエンジニアリング運転の最中, ドリフトチェンバーは多くの問題にさいなまれた。第一に, スペクトロメータ内部の高電圧回路における放電問題がある。既述の通り, 電磁石内部はヘリウムガスで満たされているが, これはスペクトロメータ内部に設置されているチェンバーの高電圧回路のいたるところの放電可能性を高める。チェンバーモジュールの外部にある高電圧回路導入部には, ヘリウム雰囲気での放電を回避するために数種類の樹脂による保護措置を施してあるのだが, モジュールによってこの保護措置が不完全な箇所があったために, ヘリウム置換を開始して数週間後, 徐々にヘリウムが高電圧導入部に拡散し, 最終的に放電が始まってしまった。アノード層毎に高電圧印加回路は分配されているが, 全 32 層のうち 4 層で十分な高電圧印加がなされなかった。第二に, (お恥ずかしい話ながら) 信号ケーブルの脱落がある。スペクトロメータ内部をヘリウムで封じ切るため, 電磁石は信号導入端子を備えたエンドキャップで閉じているが, エンドキャップ内部における信号ケーブルコネクタは, ケーブル密度などの事情から, ラッチ機構のないコネクタを用いており, 検出器インストール後, 相当数のチャンネルがケーブルの自重で脱落してしまっ<sup>4</sup>。信号ケーブル以外にも, フロントエンドエレクトロニクスの電源ケーブルでも一カ所の脱落が起き, 実に 288 ワイヤ中 42 本で不具合が生じてしまった。第三に, 読み出しエレクトロニクスに起きた問題が挙げられる。ここでは頁数の都合上詳細は省略するが, このエレクトロニクスの問題によりカソード読み出しの  $z$  位置分解能は制限される結果となった。前二者の影響で, 多くのデッドチャンネルを抱えたままの運転となり, 当然, 運動量・角度分解能は大きく制限される結果となった。ただし, これらの諸問題を可能な限り現実的に実装したモンテカルロシミュレーションによって, 性能の悪化具合は詳細に再現されており, どこをどう直せばどれだけの改善が見込めるのか, 具体的な検討がおこなわれた。これらの検討結果をもとに, 2007 年冬の運転休止後, 2008 年夏の物理データ取得開始までの間, 検出器メンテナンス期間中に改良が施され, ケーブル脱落対策・より強化された放電保護措置が施された。

エンジニアリング運転で得られたこれらのデータを用いて, (いささか乱暴かもしれないが) 2008 年度の最初の物理データを用いて到達可能な実験感度を予想してみる。

まず, 得られた検出効率と予定されているビーム強度・

<sup>4</sup>電磁石エンドキャップをインストール完了後もう一度開けて閉め直すにはかなりの時間がかかるため, 残されたビームタイムなどを勘案した結果, 「2007 年度は何はともあれエンジニアリング運転を完了する」という目標を優先して, ケーブル脱落は直さずに続行, という結論に至った。



運転時間などから、実験感度 (Single Event Sensitivity,  $B_{SES}$ ) を見積もる。 $B_{SES}$  は、

$$B_{SES} = \frac{1}{R_{\mu} \cdot T \cdot (\Omega/4\pi)} \times \frac{1}{\epsilon_e \cdot \epsilon_{\gamma} \cdot \epsilon_{sel}}$$

で与えられる ( $R_{\mu}$ : ミューオンビーム強度,  $T$ : 運転時間,  $\Omega/4\pi$ : 検出器立体角,  $\epsilon_e$ : 陽電子検出効率,  $\epsilon_{\gamma}$ :  $\gamma$ 線検出効率,  $\epsilon_{sel}$ : オフライン解析効率)。2007年に明らかになった検出器の不具合の改良が済んだ場合の各効率と、予定しているビーム強度 ( $3 \times 10^7/\text{sec}$ ) と運転時間 (24週) を仮定すると、2008年に見込まれる  $B_{SES}$  は、 $2.2 \times 10^{-13}$  となる。

最後に、検出器の分解能から予測される背景事象数を考慮し、得られた  $B_{SES}$  を基に到達可能な実験上限値を見積もる。 $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  実験における、背景事象数と検出器分解能との相関は、参考文献 [10] に詳しく議論されているので本稿では触れないが、得られた検出器分解能を基に 2008年度に見込まれる性能を考慮すると、物理背景事象の発生頻度は十分に小さい ( $1.4 \times 10^{-14}$ ) ことが分かる。他方、偶発事象の発生頻度は  $1.3 \times 10^{-13}$  と見積もられ、これは物理背景事象の発生頻度に比べ桁大きく、かつ  $B_{SES}$  にも近い。従って、2008年に予定しているビーム強度と運転時間を考慮して、実際に発現するであろう偶発背景事象数を見積もると、0.59個となる。2008年に取得したデータに信号事象候補がなかったと仮定すると、0.59個の背景事象で支持される実験上限値は、90%信頼度で  $6.5 \times 10^{-13}$  となる。より保守的な見積もりとして、仮に 2007年のエンジニアリング運転時の諸々の問題点が解決されなかったとした場合に、同様の見積もりをすると 90%信頼度で  $9.8 \times 10^{-13}$  となる。

## 7 おわりに

MEG 陽電子スペクトロメータは、2007年にその建設を終え、その後行われたエンジニアリング運転において、毎秒  $3 \times 10^7$  ミューオン強度で運転出来ることを実証した。その間、幾多の不具合に見舞われ、想定した運動量分解能を達成することはかなわなかったが、詳細なデータ検証とモンテカルロシミュレーションの結果、適当な補修によって  $10^{-13}$  のオーダーの感度を達成することが可能であることを実証した。なお、モンテカルロシミュレーションや飛跡再構成アルゴリズムに関しても多くの工夫が凝らされており、これらについても触れたかったのだが、頁数の制限で断念した。また何かの機会に紹介したい。

多くの困難が伴った陽電子スペクトロメータの開発は、ドリフトチェンバーの基本設計実証実験をおこなった 2000年から数えると、実に足掛け 8年の年月が費やされたが、

なんとかその建設完了にこぎつけることが出来た。最終的なビーム強度で運転出来たときには、苦楽を共にしてきたスイス人上司と思わず抱き合ってしまったほどであった。しかし喜んでばかりもいられない。エンジニアリング運転中に明らかになった不具合の解消は急務である。今後は、一日も早い安定動作の実現、検出器分解能のさらなる向上に向け、まだまだより一層の努力を続けねばならない。

## 8 謝辞

本研究は、MEG 実験国際共同研究グループの協力により遂行されました。特に、東京大学素粒子物理国際研究センターの大谷航・岩本敏幸の両氏、KEK の三原智・山田秀衛の両氏には、多大かつ貴重な助言をいただき、スイス滞在中の研究生活全般にわたって全面的にサポートしていただきました。また、MEG 実験国際共同研究グループ代表者であり、私の指導教官であった東京大学素粒子物理国際研究センターの森俊則先生には、長年にわたり遅々としてしか進まない開発研究の各段階において、辛抱強く指導していただき、適切な助言をいただきました。この場を借りて、心からの謝意を表したいと思います。その他、MEG 実験グループの大学院生である久松康子、内山雄祐、名取寛頭、西村康宏、白雪、金子大輔の各氏に心から感謝します。私と時を同じくしてスイスに渡り、共に苦勞を分かち合った澤田龍氏の協力なくして、この研究を成し得なかったことは、特に記しておかねばなりません。また、私の先輩院生であった KEK の小曾根健嗣氏には、大学院進学時以来、多くのことを学ばせていただきました。ここに改めて、感謝の言葉を述べたいと思います。

本文中で触れたヴァーニアフォイル製作には、足掛け 3年の歳月が費やされましたが、最後まで粘り強くこちらの要望につきあってくださり、各業者をまとめあげ、何度も何度もテストロット作業を繰り返してくださった、林栄精器国際事業部の近野和夫氏、また株式会社プリント電子研究所の皆様にはたいへんお世話になりました。氏のおかげで、MEG ドリフトチェンバーのもっとも重要なパーツのひとつであるヴァーニアフォイルが完成したといっても過言ではありません。この場を借りて、心から感謝の言葉を述べたいと思います。

## Bibliography

- [1] T.Mori *et al.* (MEG Collaboration), Research Proposal to Paul Scherrer Institut **R-99-05** (1999); <http://meg.psi.ch>

- [2] M.L.Brooks *et al.* (MEGA Collaboration), Phys. Rev. Lett. **83** (1999) 1521
- [3] L.J.Hall, Nucl. Phys. **B267** (1986) 415
- [4] R.Barbieri and L.J.Hall, Phys. Lett. **B228** (1994) 212
- [5] J.Hisano *et al.*, Phys. Lett. **B391** (1997) 341
- [6] たとえばミューオンによるフレーバ物理のレビューとして, Y.Kuno and Y.Okada, Rev. Mod. Phys. **73** (2001) 151; または, 佐藤朗, 高エネルギーニューズ Vol.26 No.1 (2007) p16
- [7] 三原智, 高エネルギーニューズ Vol.26 No.1 (2007) p9
- [8] W.Ootani, IEEE Trans. Appl. Superconductivity **14** (2005) 568
- [9] D.Anderson *et al.*, Nucl. Instr. Meth. **224** (1984) 315
- [10] Y.Kuno and Y.Okada, Phys. Rev. Lett. **77** (1996) 434

なお、ヘリウム雰囲気中での放電問題などに明るい方、おられましたら是非ご一報下さい。美味しいスイスチョコレートを手土産に携えて、お話を伺いに何処にでも参上致します。

## 補遺

本稿執筆中(2009年2月), MEG 実験は最初の物理データ取得の1年を終え, 検出器は各々の担当グループによるメンテナンス作業を進めている。実は, 本稿のメインピックのひとつであるドリフトチェンバーは, 高電圧印加部の放電という極めて深刻な問題に見舞われ, 2008年の実験中その当初の性能を發揮することはかなわなかった。当然, 本稿で紹介した2007年のエンジニアリングランの結果から見込まれる性能も達成することは出来なかった。ヘリウムガスで電磁石コイル内部を封じ切った中に設置したドリフトチェンバーは, 2007年に苦しめられたヘリウム中での放電を抑制するため, 高電圧印加部には徹底的に保護措置が取られたのだが, 「どこにでも入り込むヘリウム」を甘く見ていたわれわれは, 徐々にしみ込んだヘリウムによって, 2008年夏以降, ドリフトチェンバーを長期的に安定に運転することが極めて難しい状況に陥ってしまった。現在, より完璧な放電対策を施すべく実験室で鋭意作業を進めている。願わくば, 2009年に予定しているMEG 実験二年目のデータ取得中は, 安定に連続運転可能なドリフトチェンバーを実現し, 緊急エキスパートコールに怯える夜とはおさらばしたいものである。