

千葉大学大学院自然科学研究科
修士論文
シリカエアロゲルを用いたリングイメージ
チェレンコフカウンターの開発

理化学専攻
基礎物理学講座

倉谷 厚志

平成 19 年 2 月 23 日

概要

高エネルギー加速器研究機構で行なわれている Belle 実験では、 e^+e^- 衝突型加速器 (KEKB) を用いて B 粒子を発生させ、その崩壊課程を詳しく観測することで、CP 対称性の非保存に伴う小林・益川理論の検証や新しい物理法則の発見を目的している。この実験では B 粒子の崩壊課程に発生した大量の粒子を正確に識別する必要があり、中でも崩壊課程で生ずる π/K 粒子を識別することは B 粒子観測の上でも重要である。

現在 Belle 検出器のアップグレードの為に研究している π/K 粒子識別検出器・近接型エアロゲル RICH (リングイメージングチェレンコフカウンター) は、荷電粒子がエアロゲル輻射体を通ることによって発生するチェレンコフ光を光検出器で直接観測し、そのリングイメージを解析することで、通過粒子の識別をしており、 $4.0\text{GeV}/c$ といった高い運動量の π/K 粒子に対して 4σ 以上の分解能力を有する事が期待されている。

この検出器の輻射体であるエアロゲルの条件として、屈折率 1.05 のサンプルの透明度向上について、2004 年以来エアロゲルの新しい作成方法を導入し、更に製作条件の最適化から、従来と比べ、二倍以上の光学的性質の向上に成功した。

また、この成功によって、輻射体エアロゲルの屈折率を調節し、それらを重ねて並べることで RICH 検出器の性能であるチェレンコフ角度分解能を悪化させることなく、得られるチェレンコフ光を増加させることが可能になった。新たに製作したエアロゲルを用いプロトタイプを製作し、2005 年 12 月のビームテストを実施し、我々の RICH 検出器が運動量 $4.0\text{GeV}/c$ で 5σ 以上の π -K 識別能力があることを示すと同時に、輻射体の詳細な最適化についての試験を実施した。

本論文では上記で述べたエアロゲル製作の開発と、得られたエアロゲルを用いたビームテストの詳細な結果を報告する。

更に、今後の RICH 検出器研究についての展望を述べる。

目次

第1章	Bell 実験	6
1.1	KEKB 加速器	6
1.2	Belle 検出器	7
1.3	B 中間子系での CP 対称性の破れの観測	10
1.4	Belle 実験における粒子識別	11
第2章	エアロゲルチェレンコフカウンターの開発	14
2.1	チェレンコフ光発生原理	14
2.2	チェレンコフ光による粒子識別	15
2.2.1	閾値型シリカエアロゲルチェレンコフカウンター	15
2.2.2	近接型エアロゲルリングイメージングチェレンコフカウンター (RICH)	17
2.3	RICH の性能	19
2.4	マルチラディエータ RICH	20
第3章	シリカエアロゲル	22
3.1	シリカエアロゲル構造	22
3.2	エアロゲル製作	22
3.3	エアロゲル性能評価	26
3.3.1	屈折率測定	26
3.3.2	透明度の測定	28
3.3.3	X 線構造解析	28
3.4	多層一体型エアロゲル	30
3.4.1	ケミカル方式	30
3.4.2	接着方式	32
3.4.3	一体型エアロゲルの技術的な問題	35
第4章	ビームテストによるエアロゲル性能評価	36
4.1	ビームテストの目的	36
4.2	ビームテストセットアップ	36
4.3	解析、評価方法	39
4.4	実験結果とその評価	39
4.4.1	検出光子数の評価	39
4.4.2	マルチラディエータの評価	40
4.4.3	2層一体型エアロゲルの評価	44
4.4.4	シャープカットフィルター	46

4.4.5	エアロゲルのウォータージェットカット境界面	49
4.5	ビームテストのシミュレーション用いた考察	49
4.5.1	シミュレーションの流れ	50
4.5.2	用いたデータ	50
4.5.3	シミュレーション結果	50
4.5.4	ウォータージェット境界面の評価	52
第5章	結論	55
5.1	エアロゲル	55
5.2	RICH	55
5.3	今後の課題	56

目 次

1.1	非対称エネルギー電子・陽電子衝突型円形加速器	7
1.2	Belle 検出器	8
1.3	B 粒子の崩壊過程	12
1.4	ユニタリートライアングル	12
1.5	Belle の粒子識別能力	13
2.1	チェレンコフ光発生原理	14
2.2	閾値型による π/K 識別領域	16
2.3	ACC	17
2.4	種々の RICH	18
2.5	EndCap でのデザイン	19
2.6	マルチラディエーター	21
3.1	シリカエアロゲル構造	23
3.2	DMF 導入による透過長の向上	24
3.3	疎水化課程	25
3.4	メニスカス	26
3.5	超臨界課程	26
3.6	CO ₂ オートクレーブ	27
3.7	フラウンホーファー法	28
3.8	分光光度計	29
3.9	蛍光 X 線分析装置	29
3.10	エアロゲルの屈折率と元素組成比	30
3.11	ケミカル方式製作法	31
3.12	2 層ゲルの成功と剥離	31
3.13	2 層目の調合時間と透過長 (mm)、屈折率	32
3.14	2 層ゲルの上層の目標屈折率と透過長 (mm)、実際の屈折率	33
3.15	2 層エアロゲル上層、下層を逆転した場合	33
3.16	接着 2 層ゲルの接着溶液の屈折率	34
3.17	接着方式製作法	35
3.18	接着方式による 4cm エアロゲル	35
4.1	RICH1 セットアップ	37
4.2	2005 年ビームテストのセットアップ	37
4.3	ビームテストで用いられた主な測定器	38

4.4	RICH ビームテスト解析方法	39
4.5	エアロゲルの透過長向上における検出光子数の増加	40
4.6	シングル、マルチラディエータの比較	41
4.7	各々の層の厚さでのマルチラディエータの比較	42
4.8	デュアルラディエータの屈折率の組み合わせによる角度分解能	45
4.9	2層一体型エアロゲルの検出光子数と分解能	45
4.10	シャープカットフィルターのセットアップ	46
4.11	各々のフィルターを用いた時のチェレンコフ角分布	47
4.12	シャープカットフィルターの透過率	47
4.13	実験値と計算値の波長依存性の比較	48
4.14	H8500 の量子効率	48
4.15	波長依存の透過率と屈折率	49
4.16	ウォータージェットカットされたエアロゲル	50
4.17	ウォータージェット境界面上での N_{pe} と角度分解能の変化	51
4.18	シミュレーションによるチェレンコフ角分布	52
4.19	ウォータージェットカット境界面にレーザを当てた写真	52
4.20	ウォータージェットカット境界面の比較	53
4.21	普通の境界面の比較	54

表 目 次

1.1	π K 識別が必要な崩壊モード	12
3.1	いろいろな物質の屈折率	23
3.2	いろいろな物質の臨界点	27
4.1	測定器の役割	37
4.2	H8500(浜松ホトニクス製)の性能	38
4.3	マルチラディエーターに使用したエアロゲルサンプル ID	41
4.4	5,20mm マルチラディエーターに使用したエアロゲルサンプル ID	43
4.5	屈折率の組み合わせに用いたエアロゲル ID	43
4.6	シャープカットフィルターを用いたときの各々の結果	46
4.7	シミュレーションとビームテストの比較	51
4.8	シミュレーションにおける仮定	53

第1章 Bell実験

高エネルギー加速器研究機構で行なわれている Belle 実験は非対称エネルギーの電子・陽子円形型加速器 (KEKB) を用いて、CP 対称性の破れの観測と、それに伴う小林-益川理論の実験的な検証を目標としている。この章では、1.1 節で Belle 実験に於いて B 中間子の大量生成を可能にしている KEBB 加速器の概要について説明を行う。1.2 節では B 中間子崩壊過程の詳細な測定を可能にしている Belle 検出器に対し、それを構成する各検出器の説明を行なう。1.3 節では B 中間子系における CP 対称性の破れを、小林-益川 (K-M) 理論を交えて説明を行なう。1.4 節では、Belle 実験における粒子識別の必要性について / K 中間子の粒子識別を中心に、各 Belle 検出器の識別能力を交えて説明する。

1.1 KEBB 加速器

Belle 実験で使用される非対称エネルギー電子・陽電子衝突型円形加速器 (KEKB) は、B 中間子を大量に生成することから、B-factory と呼ばれている。KEKB 加速器では、電子を $8.0\text{GeV}/c$ 陽電子を $3.5\text{GeV}/c$ に加速することで、重心系での衝突エネルギーが $10.58\text{GeV}/c$ となるように設計されている。KEKB 加速器では電子・陽電子を非対称エネルギーで衝突させることにより、衝突によって生成される $\Upsilon(4s)$ に実験室系で $4.5\text{GeV}/c$ の運動量を与え、 $\Upsilon(4s)$ の崩壊に伴い生成される B 中間子対に約 2.3GeV 程度の運動量をもたせる事が可能となり、Lorentz Boost の効果により生成 B 中間子対の見かけ上の崩壊寿命を延長させ、観測目的である B 中間子と \bar{B} 中間子の崩壊の時間差の測定を行なう。(図 1.1) に KEBB 加速器の全体像を示す。KEKB 加速器は非対称エネルギー衝突型の加速器であるため、電子と陽電子と異なったリング中に蓄積しなければならない。そこで、周長 3km のトンネルの中に、電子と陽電子を蓄積させるための電子蓄積リング (HER:High Energy Ring) と陽電子蓄積リング (Low Energy Ring) の 2 つのリングを設置している。入射効率を考え、電子・陽電子は線形加速器で加速された後、中間の加速器を経ることなく直接リングに入射される。入射後は RF(Radio Frequency) と呼ばれる加速器装置によりビーム粒子がシンクロトロン放射によって失ったエネルギーを補っている。リングは TSUKUBA、FUJI の 2 ヶ所で交差するが、FUJI ではラインを上下にすれ違わせるところで、衝突点を TSUKUBA1 ヶ所に行っている。衝突点のある TSUKUBA ではリングに蓄積された電子と陽電子を正面衝突させるのではなく、 22mrad の角度をつけて衝突させている。これにより、衝突後に各ビーム粒子を磁石などの装置を必要とせずパイプラインに分ける事を可能にし、衝突点付近での複雑な構造を避けることを可能としている。各リングには 5000 bunch の電子・陽電子を $\sim 60\text{cm}$ の間隔で並べることが可能となっており、KEKB はビームの強度を示すピーク・ルミノシティに於いて $L = 1.7 \times 10^{34}(\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1})$ という世界最高強度を誇り、一日の積分ルミノシティの値では、 1.2fb^{-1} を達成している。

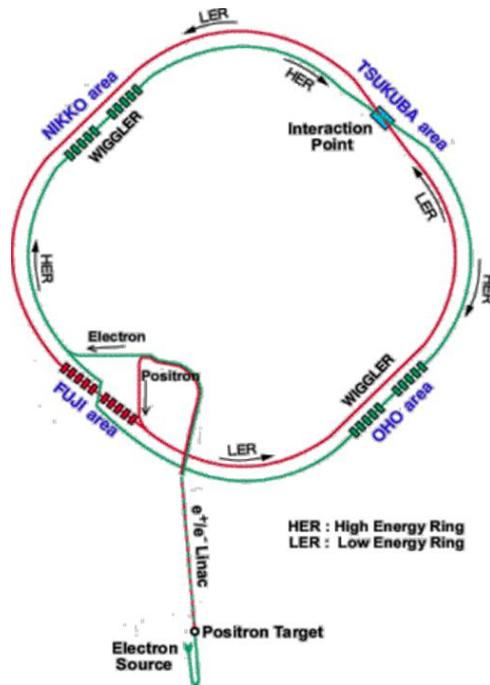


図 1.1: 非対称エネルギー電子・陽電子衝突型円形加速器

1.2 Belle 検出器

Belle 検出器 (図 1.2) は大きさがビーム軸方向に 7.24m、外形 7.70m、総重量 2000t の巨大な検出器からなり、B 中間子の崩壊過程を詳細に測定するために設置された、各種の検出器群から成り立っている。Belle 検出器では、CP 対称性の破れを観測するために高い検出効率で以下のような性能が要求されている。

- B 中間子の崩壊点を平均崩壊長の 2 分の 1 より良い精度 ($<70\mu\text{m}$) で測定する。
- π^\pm 、 K^\pm 、 p などの多岐に及ぶ終状態粒子を正しく判別できる。
- γ 線などの電荷を持たない粒子を伴う B 中間子の崩壊を測定するための高性能カロリメーター検出器を持っている。
- 効率良く事象を識別して取り込むためのトリガーと高速のデータ収集システムがある。

Belle 検出器の断面図を図 (1.2) に示す。検出器の座標系は、衝突点を原点にとり、電子ビームの進行方向を Z 軸、Z 軸と垂直に r 軸をとる。また r 軸に対する回転を θ 、Z 軸に対する回転を ϕ とする。Belle 検出器は検出対象となる物理事象ごとに分けられた 6 種類の検出器と超伝導ソレノイドの 7 つの部分に大別でき、これらは衝突点を覆うように円筒形に設置される。また電子ビームのエネルギーが高いため、生成粒子は主に上で述べた座標系に於いて +Z 方向に飛散すると考えられる。+Z 方向により大きな立体角をもつ非対称な構造をしている。Belle 検出器ではこの非対称の構造を踏まえて、Belle 検出器での設置位置により、円筒形の側面部分を Barrel 部、円筒形の底となる部分を EndCap 部と定義

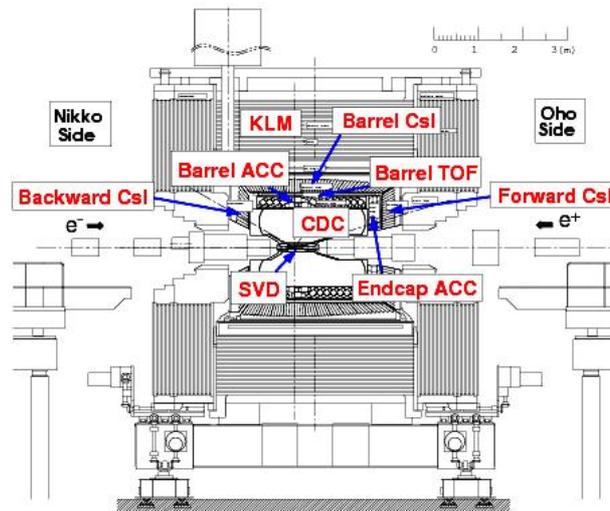


図 1.2: Belle 検出器

し区別している。また、粒子の運動量を出来るだけ正確に測定するために、各検出器は物質量を可能な限り抑えた内部構造をもつ。ビームパイプに近い順に Belle 検出器を構成する、各検出器についての説明をする。

シリコンバーテックス検出器 (SVD)

SVD は複数の両面読み出しの Si ストリップ検出器 (DSSD) から構成される。DSSD は高抵抗率の n 型シリコンウェハの両面に P 型半導体と n 型半導体のストリップ電極が貼り付けられた構造を持っている。荷電粒子が DSSD 内を通過するとシリコンウェハ内で電離が起こる。逆バイアスを印加していくと電離で生じた正孔は p ストリップ、電子は n ストリップに集められ、通過位置を検出することが可能となる。DSSD1 枚の位置測定精度は $10 \mu\text{m}$ 以下であり、この DSSD がビームパイプの周囲を 3 層構造 (8 枚、10 枚、14 枚) で覆い、ビーム衝突点 (バーテックス) を $80 \mu\text{m}$ 以下の精度で測定する (図 1.3)。2003 年に SVD2 と呼ばれる前 SVD システムのアップグレード検出器が新たに Belle 検出器に導入された。SVD2 検出器では衝突点を取り囲む DSSD を 3 層構造から 4 層構造とし、最内層の DSSD を従来の位置より崩壊点に近づけることにより、広範囲での測定、崩壊点に近い位置で粒子の軌跡を捕捉することを可能とし、B 中間子の崩壊点の測定精度は以前のものと比べて 20% 改善された。さらにデータ収集の高速化も行われ、以前のものの 5 倍のデータ収集能力となっている。耐放射耐性に関しても従来の SVD システムと比べて大幅な性能の向上に成功している。

セントラルドリフトチェンバー (CDC)

荷電粒子がガス中を通過するとその付近でのガス原子がイオン化される。ガス中に陽極線を張り、高電圧をかけて電場を形成しイオン化で生じた電子を陽極線に向かってドリフ

トさせる。ドリフトして来た電子は陽極線付近の高電圧により、さらにガス原子をイオン化しこの過程で増幅された信号を検出する。ドリフト時間を測定すると陽極線と荷電粒子の通過位置との距離がわかり、荷電粒子の飛跡を測定することが可能となる。Belle 実験では $B=1.5\text{Tesla}$ の磁場中での荷電粒子の飛跡情報を捉え通過粒子の曲率半径: $\rho(\text{m})$ を求める事により、粒子の運動量: $P[\text{GeV}/c]$ を $P=0.3\rho B$ という関係式より求めている。また、1本の飛跡に対する総荷電量はチェンバー内の荷電粒子のエネルギー損失に比例している。エネルギー損失は粒子の速さによって決まっているので運動量と速度から粒子を同定することが出来る。このエネルギー損失法 (dE/dx) により 0.8GeV 以下の運動量領域での π/K 識別も CDC 検出器では行っている。

シリカエアロゲルチェレンコフカウンター (ACC)

崩壊で生成される 中間子と K 中間子を $1.0 \sim 3.5\text{GeV}/c$ の高運動領域に於いて 90% 以上の効率で識別する。現在稼働中の ACC 検出器ではシリカエアロゲルを輻射体とし荷電粒子通過時に発光されるチェレンコフ光情報を、カウンターからの信号の on/off で見分ける閾値型チェレンコフカウンターを採用している。ACC 検出器は Belle 検出器中の設置位置により、円筒形の側面部: Barrel 部 ACC と円筒形の底面部: EndCap 部 ACC とに分類され観測対象となる粒子の運動量に応じて選択される輻射体シリカエアロゲルの屈折率に違いを持たせている。詳しい原理に関しては第 3 章で行なう事にする。

飛行時間測定カウンター (TOF)

衝突点で生成された粒子が時間分解能の良いプラスチックシンチレーションカウンターに到達するまでの時間を 100ps 以下の時間分解能力で測定する。TOF で測定した時間情報と CDC の飛跡情報から求めた荷電粒子の飛行時間を使って粒子の速度 β が求められる。粒子の速度 β と CDC 検出器で求められた運動量 P から粒子の質量を求め、 1.2GeV 以下の π/K 識別を行う (TOF)。また同検出器は Belle 検出器内での反応発生時刻を与えるタイミング信号を作り出す役割も果している (TSC)。TOF 検出器は Belle 検出器の EndCap 部にはその空間的制約より設置が困難である為 Barrel 部にのみ設置されている。

電磁カロリメーター (CsI)

B 中間子の崩壊によってできた粒子の 3 分の 1 は中性 π 中間子であり、これは 2 つの γ 線に崩壊する。そこで γ 線や電子が物質にあたって起こす電磁シャワーを検出することで、その粒子のエネルギーの測定を行なっている。CsI 検出器では発光体としてタリウム活性化ヨウ化セシウム (CsI) 結晶を用いて化粧中の電磁シャワー事象を検出し、V 中間子から生成される γ 線 ($20\text{MeV} \sim 3\text{GeV}$) に加え、ルミノシティー測定のために Bhabha 散乱の電子 ($\sim 8.0\text{GeV}$) のエネルギー測定をする。

K L, μ 検出器 (KLM)

運動量 600MeV/c 以上の KL 及び μ 粒子を検出する。KLM 検出器は吸収体の鉄と飛跡検出器 (レジスティブ・プレート・カウンター:RPC) を交互に重ねたサンドイッチ型構造をしている。RPC の原理は次のようになっている。平行に配置された高抵抗極間の間にガスを流し、高電圧をかけておく。荷電粒子がガス中を通過すると電子雪崩が発生し、極板の外側に設置された陰極基盤に誘導電荷があらわれ、これを信号として読み出している。KL 粒子は CsI 検出器、ソレノイドコイル、KLM 検出器中で反応し、ハドロンシャワーを起こす為それらの崩壊事象を観測し、KL 粒子の検出を行っている。また μ 粒子は検出器との相互作用を起こしにくいため KLM 検出器中を深部まで通過する、この崩壊事象と CDC 検出器で測定されたことによって検出する。

1.3 B 中間子系での CP 対称性の破れの観測

Belle 実験では CP 対称性の非保存を B 中間子崩壊過程で観測し、この CP 対称性の非保存を標準理論の枠内で証明した小林・益川理論 (K-M 理論) の検証、この理論で導入されている CKM (Cabbibo-小林-益川) 行列要素の詳細な決定をその観測目的としている。小林・益川氏は、標準モデルによって物理が完全に閉じているとすると、CP 対称性の非保存という物理事象は CKM 行列要素に含まれる無視することのできない程度に大きい複素位相によるものであることを証明した。クォークの 3 世代標準理論に於いて、各クォーク間の弱い相互作用に於ける結合度を行列: V (CKM 行列) を持って表現するとき

$$\begin{bmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ s \\ b \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

で書くことが出来る。このとき d', s', b' は各世代のクォーク d, s, b の混合状態となっている。この各行列要素を Wolfenstein が提案したパラメーター $A, \rho, \eta, \lambda = \sin \theta_C$ (θ_C : Cabbibo 角) を導入して展開してやることにより、

$$\begin{bmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{\lambda^2}{2} & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \frac{\lambda^2}{2} & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ s \\ b \end{bmatrix} + O(\lambda^4) \quad (1.2)$$

として書き表せる、この時 CKM 行列要素と式 (1.1) の各行列要素を比較すると V_{ub}, V_{td} の要素に複素位相が含まれていることが分かる。この CKM 行列要素に含まれる複素位相項により CP 対称性の破れを説明できるとしたのが K-M 理論である。この CKM 行列に対してユニタリー性を要求することで、各行列要素に対して次の関係式 (1.3) が与えられる。

$$\sum_i V_{ij} V_{ik}^* = \delta_{jk} \quad (1.3)$$

この関係式を満たす行列要素のうち複素数因子を持つ V_{ud}, V_{td} を含むものに注目すると、

$$(VV^*)_{13} = V_{ub}V_{ud}^* + V_{cb}V_{cd}^* + V_{tb}V_{td}^* = 0 \quad (1.4)$$

の関係式が得られ、この関係性を用いて複素平面上にユニタリー・トライアングルと呼ばれる図(??)のような三角形を作ることができる。この三角形を用いて CP 対称性の破れと小林・益川行列の複素位相の関係性を幾何学的に理解するとのが出来る。このユニタリー・トライアングルで表される三角形の内角は CKM 行列で表される各要素をもって

$$\phi_1 = \arg \left(-\frac{V_{cd}V_{cb}^*}{V_{td}V_{tb}^*} \right) \phi_2 = \arg \left(-\frac{V_{ud}V_{ub}^*}{V_{td}V_{tb}^*} \right) \phi_3 = \arg \left(-\frac{V_{cd}V_{cb}^*}{V_{ud}V_{ub}^*} \right) \quad (1.5)$$

と表される。CP 対称性の破れの大きさは、図 (1.4) で示した三角形に於いて、その 3 辺、式 (1.5) で示される 3 つの内角を求めることで正確に決定できるとされる。

1.4 Belle 実験における粒子識別

1.3 節で述べたように、CKM 行列要素に含まれる複素位相項より作られるユニタリー・トライアングルの辺、及び角の大きさを調べることで CP 対称性の非保存性及びその非対称度の大きさを観測することが可能となり、その際 B 中間子系の崩壊過程を詳細に調べることが有効である事が分る。その節では実際 Belle 実験で行われるユニタリー・トライアングルの内角の決定に対して要求される親 B 中間子の同定の為に行われるフレーバータギング、及び注目すべき B 中間子の崩壊モードについて示し、その際重要となる Belle 実験に於ける $B \rightarrow K$ 粒子識別の必要性を説明する。

フレーバータギング

B 中間子系の崩壊事象においてユニタリー・トライアングルの内角 ϕ_1 の観測するためには B_0, \bar{B}_0 から $J/\psi KS$ への崩壊モードを詳しく調べる必要がある。そのとき崩壊過程の終状態 $J/\psi KS$ を見るだけではそれが B_0, \bar{B}_0 のどちらの崩壊から生じたのか知ることは難しい。そこで、B 中間子系の崩壊過程において親粒子が B_0, \bar{B}_0 がどちらから崩壊した事象であるか決定する必要がある、それをフレーバータギングという。Belle 実験に於ける B_0, \bar{B}_0 の崩壊図の例を図 1.3 に示す。フレーバータギングでは B 中間子から $J/\psi KS$ への崩壊事象に対し、もう一方の B 中間子の崩壊事象について注目する。この崩壊事象に於いて b クォークがカスケード崩壊 ($b \rightarrow c \rightarrow s$) という崩壊を行うことにより、B 中間子として $B \rightarrow D \rightarrow K$ という崩壊事象として観測される。これを考慮すると親の粒子が B_0, \bar{B}_0 であるならば、それぞれ $B_0 \rightarrow \bar{D} \rightarrow K^+, \bar{B}_0 \rightarrow D \rightarrow K^-$ という崩壊モードが与えられる事となり、実験では崩壊事象中に K-が見つかったならば、その崩壊事象の親粒子は \bar{B}_0 であることが理解され、注目する崩壊事象 $J/\psi KS$ モードへの崩壊は B_0 から生じた崩壊事象である事が理解される。Belle 実験ではカスケード崩壊に伴う K^\pm を大量の π^\pm から効率良く識別することにより、フレーバータギングの正確な観測を行うことを可能にしている。

ユニタリー・トライアングルの角度測定

ユニタリー・トライアングルの内角 ϕ_2 の測定に於いては $B_0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ の崩壊事象に注目するのだが、実験では B_0 は同じ位の確率で $K^+\pi^-$ にも崩壊する。内角 ϕ_3 の測定では

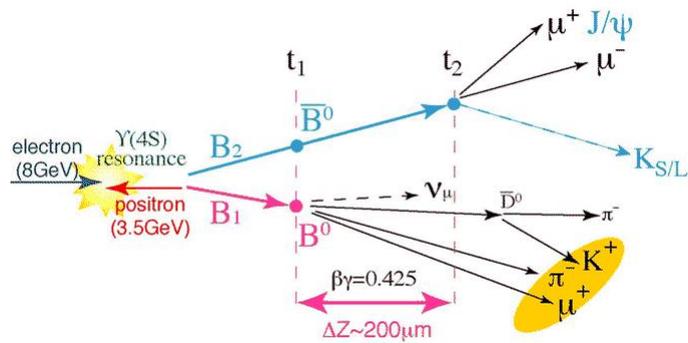


図 1.3: B 粒子の崩壊過程

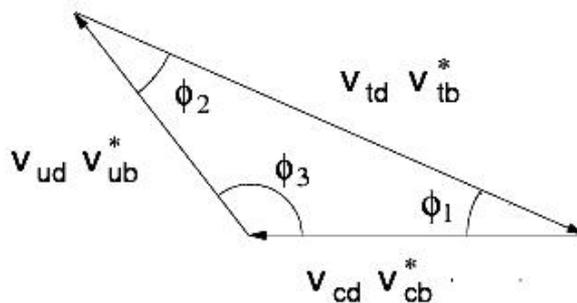


図 1.4: ユニタリートライアングル

注目する $B \rightarrow DK$ への崩壊に対して $B \rightarrow D$ への崩壊事象を区別しなければならないことが理解されている。そのため Belle 実験では CP 対称性の非保存性及びその非対称度の決定に関して B 中間子系の崩壊事象に生ずる π/K 中間子の識別が非常に重要となってくる。以下の表 1.1 に Belle 実験に於いてユニタリー・トライアングルの各内角の決定の為重要となる π/K 中間子識別が必要な崩壊モードと、その崩壊事象を伴う運動量領域、及び測定したい崩壊事象に対して rejection すべき崩壊事象を記述する。

物理事象	崩壊モード	運動量 GeV/c	Rejection mode
Tagging	$B \rightarrow c \bar{s}$	$0.2 < p < 1.5$	-
ϕ_1	$B \rightarrow J/\psi K_S$	-	-
ϕ_2	$B \rightarrow \pi K$	$1.8 < p < 3.8$	$B \rightarrow K$
ϕ_3	$B \rightarrow DK$	$1.5 < p < 3.3$	$B \rightarrow D$

表 1.1: π/K 識別が必要な崩壊モード

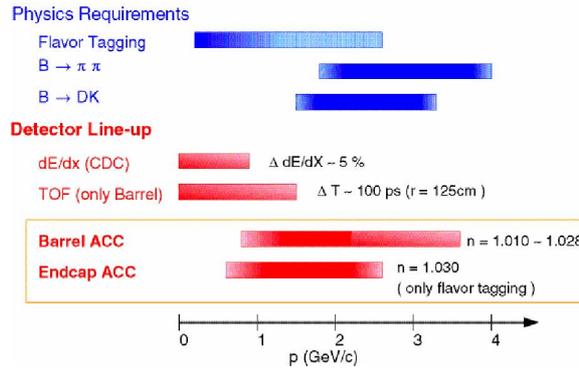


図 1.5: Belle の粒子識別能力

Belle 検出器 /K 識別能力

これまでの説明で述べたように Belle 実験の観測目的に於いて π/K 中間子を正確に識別する事は非常に重要な意味をもつ。このとき Belle 実験では $\pi \cdot K$ 中間子の識別を精度良く行うため、Belle 検出器中の CDC, ACC, TOF 検出器を用いて注目される運動量領域下での $\pi \cdot K$ 中間子の識別を行っている。これらの検出器はその検出法、検出器構造に従い通過粒子に対して十分に π/K 中間子識別が可能である運動量領域に違いをもっている。図 (1.5) に CDC, ACC, TOF 検出器が Belle 実験で担う通過粒子の運動量に対する $\pi \cdot K$ 中間子の識別能力のグラフを示す。このグラフを見て理解されるように、各検出器に対して 3σ 以上という十分な $\pi \cdot K$ 中間子の識別能力を要求するとき、CDC 検出器ではエネルギー損失法 (dE/dx) を用いて $p < 0.8 \text{ GeV}$ までの運動量領域、TOF 検出器では $p < 1.2 \text{ GeV}$ と比較的低い運動量領域に対して 3σ 以上の高い π/K 粒子識別を担っており、表 1.1 と照らし合わせると B 中間子の崩壊過程に於いてフレーバータギングで重要な運動量領域の識別を行っている。更にこれら 2 つの検出器では十分な識別が不可能となる 1.1 GeV から 3.5 GeV までのより高い運動量領域での π/K 粒子識別は ACC 検出器によって行われており、これら 3 つの検出器によって B 中間子系の崩壊事象に対し、 3.5 GeV 以下の通過粒子に対し $\pi \cdot K$ 中間子の十分な識別が可能なる。

ここで Belle 検出器に対してその設置位置である Barrel, Endcap 部別に π/K 粒子識別能を分けて考えて見る。実際の Belle 実験では EndCap 部での検出器の設置に関してその空間的に制約が厳しいため、ACC, TOF 検出器双方を設置し $\pi \cdot K$ 中間子に対する識別を要求することは出来ず、本来は Barrel 部同様 TOF 検出器等によって行なわれるべき低運動量領域に対する π/K 粒子識別を ACC 検出器で行うことにより $2 \text{ GeV}/c$ までの運動量領域での観測を行っている。B $\pi\pi$ 崩壊に伴い観測される π 中間子の e^+, e^- 衝突点からみた角度 θ は $17^\circ < \theta < 34^\circ$ であり、 $3.5 \text{ GeV}/c$ を越える π 中間子の検出が期待されるが、現在の $2 \text{ GeV}/c$ までの識別領域では十分にこの崩壊事象を捉える事は難しく、崩壊モードに関して予測される高い運動量領域での π/K 中間子の識別が十分行えてはいない。そのため Belle 検出器アップグレードに於いてこれらの崩壊事象に対する正確な観測を目的とし、Endcap 部に於いてこれまで識別が困難であった $4 \text{ GeV}/c$ に至るまでの高運動領域で十分な π/K 粒子識別を可能とする検出器の開発が期待される。

第2章 エアロゲルチェレンコフカウンターの開発

この章ではシリカエアロゲルによって発生させられるチェレンコフ光を用いた検出器について述べる。まずチェレンコフ光の発生原理を説明し、現在 Belle で稼働中のエアロゲルチェレンコフカウンター (ACC) を説明し、近接型エアロゲルリングイメージチェレンコフカウンター (Aerogel-RICH) と求められる性能とその開発における現在までの結果を述べる。

2.1 チェレンコフ光発生原理

一般に速度 $\beta(v/c)$ を持つ荷電粒子が屈折率: n の媒質中を通過する際、その速度が媒質中での光の速度: c/n (c は真空中での光の速度) を超える条件を満たした時、荷電粒子の行路上より円錐上に発生する電磁波をチェレンコフ光と呼ぶ (式 2.1)。これは荷電粒子が媒質中を移動する際、荷電粒子の通過行路周囲の媒質に電場を生じさせ、その電場によって媒質が分極する、このとき発生する電磁場が後に「置いてきぼり」となり、Huygens の原理により波面が重なって衝撃波が生じ、この衝撃波がチェレンコフ光となり観測されるのである。(図 2.1) 更に、チェレンコフ光の放出される角度は衝撃波の波面が荷電粒子の進行方向となす角を θ とすれば、その発生原理より (式 2.2) で表され通過荷電粒子の速度と輻射媒質の屈折率に依存した、非常に指向性が強い光として観測される。この時チェレンコフ発生する角度をチェレンコフ角: θ_{ch} と呼ぶ。

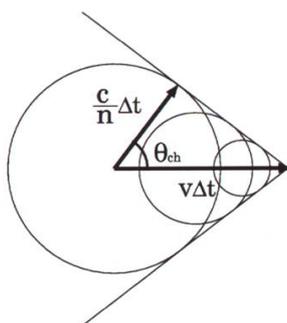


図 2.1: チェレンコフ光発生原理

$$\beta c > c/n \quad (2.1)$$

$$\cos \theta_{ch} = \frac{c/n}{\beta c} = \frac{1}{\beta n} \quad (2.2)$$

$$N = 2\pi\alpha L \int \frac{\sin^2 \theta_{ch}}{\lambda^2} d\lambda \quad (2.3)$$

輻射体通過時に発生するチェレンコフ光の光子数はフランク・タムによって証明され、輻射体中を粒子が通過した距離:L, 観測チェレンコフ光子の波長: λ , チェレンコフ放出角: θ_{ch} をもって (式 2.3) によって表現される。このときの α は微細構造定数である。この式より、一定領域の波長間での発生チェレンコフ光子の数は、粒子が輻射体媒質を通過する距離を長くする、またはチェレンコフ角を大きくする。この発光原理を検出法として利用しているシリカエアロゲルチェレンコフカウンターは、輻射体となる媒質にシリカ粒子 (SiO_2) を主成分とし、低密度且つ可視光領域に対して高い透明度をもつシリカエアロゲルという個体を利用し、その輻射媒質の低屈折率性を利用しより光速に近い状態で飛来する粒子に対して発生するチェレンコフ光を観測する。それによって通過粒子の情報を得て検出される。

2.2 チェレンコフ光による粒子識別

この節では、現在の Belle 検出器の ACC 検出器で採用されている、エアロゲルを輻射体としたチェレンコフ光を利用した閾値型シリカエアロゲルチェレンコフカウンターについて説明を行い、Belle アップグレードのための近接型 RICH の検出原理、簡単なセットアップについて述べる。

2.2.1 閾値型シリカエアロゲルチェレンコフカウンター

(式 2.1) で示されるように、チェレンコフ光は輻射体となる媒質を通る荷電粒子の速度 β とチェレンコフ輻射媒質の屈折率に依存した発生条件を持っている。そこでこの発生条件を粒子識別原理に応用したのが閾値型チェレンコフカウンターである。ある粒子が運動量: p を持って運動を行なっている際、その運動粒子が持つ運動量: p は粒子の速度 β と粒子の質量: m をもって (式 2.4) の形で書き表すことが出来る。

$$p = \frac{\beta m}{\sqrt{1 - \beta^2}} > \frac{\frac{1}{n} m}{\sqrt{1 - (\frac{1}{n})^2}} = \frac{m}{\sqrt{n^2 - 1}} \quad (2.4)$$

(式 2.4) の関係式を用いると、輻射体の屈折率: n が分かれば、粒子の固有の質量: m によりチェレンコフ光が発光される運動量領域に違いが生じる。この条件の違いを利用することで識別対象粒子片方のみがチェレンコフ光を発生する条件を設定してやる事が可能となり、これによりチェレンコフ光の検出の有無から通過粒子を同定する事が可能となる。この粒子同定方法を利用したエアロゲルチェレンコフカウンター (ACC) が行なう π/K 粒子識別は、2 粒子の質量から運動量領域を考慮し輻射体シリカエアロゲルの屈折率を選択す

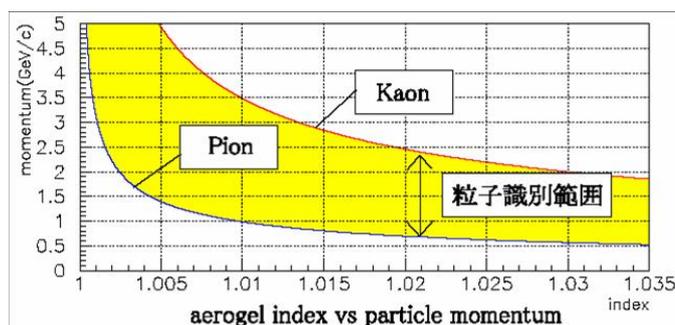


図 2.2: 閾値型による π/K 識別領域

ることで π 中間子のみがチェレンコフ光を発生するという条件を作り出し、2 粒子の識別が行われる。(図 2.2)。この時 π 中間子のみがチェレンコフ光が観測される運動量領域は π 中間子の閾値運動量以上かつ K 中間子の閾値運動量以下の領域となる。Belle 実験では、飛来荷電粒子の運動量は CDC 検出器により、超伝導ソレノイド磁場とその磁場によって曲げられる荷電粒子の飛跡情報 (P=03 B) を持って精度よく決定されているため、識別対象となる運動量領域をシリカエアロゲルの屈折率の選択する事により決定することができる (閾値型エアロゲルチェレンコフカウンター)。

ACC 検出器はシリカエアロゲル (屈折率 $n=1.01, 1.013, 1.015, 1.02, 1.028, 1.03$) とチェレンコフ光観測の為に光検出器として超伝導ソレノイドによる強磁場中でも使用可能な浜松ホトニクス製のファインメッシュ型 PMT を使用した検出器構造から成る。この時選択されているシリカエアロゲルの屈折率は電子・陽電子の非対称エネルギーのビーム衝突点から設置されるカウンターの位置関係を考慮し、第 1 章で示されたように検出対象となる高い運動量を持って飛来する π 中間子が 8GeV の電子方向に対する角度: θ 方向に依存した運動量を持つことから、より効率よく $\pi \cdot K$ 中間子の識別を行う為選択された屈折率となっている。

Belle 検出器中の側面にあたる Barrel 部 ACC では、屈折率: $n=1.010 \sim 1.028$ のエアロゲルを選択する事により (図 2.2) で示される運動量領域 $p(\text{GeV}/c) < 3.5$ までの高運動量領域での識別が可能となっている。一方 Endcap 部では衝突点からの設置位置を考えると閾値型カウンターとしては屈折率: $n=1.008$ 程度とした $p(\text{GeV}/c) < 4.0$ までの高い運動量での識別が要求されるが、屈折率: $n=1.030$ のシリカエアロゲルが使用されている。これは先にも述べた様に Belle 検出器 EndCap 部の空間的な制約から粒子識別装置の設置可能な領域が制限されるため、EndCap 部 ACC がフレーバータギングに重要な低運動量領域で $\pi \cdot k$ 中間子の識別を行っている為であり、識別運動量領域としては運動量領域間 $0.6 < P(\text{GeV}/c) < 2.0$ に設定されている。閾値型による粒子識別では、各カウンターが π 中間子の通過時にのみチェレンコフ光が観測される運動量での信号の有無より粒子の識別を行う。しかし、その中には K 中間子が通過する際エアロゲル中の電子を叩くことで電子よりチェレンコフ光が発生するイベント (Knock-on 電子) が観測されてしまう事があり、閾値型による粒子識別ではこれらのイベントを十分に見分ける事が困難な場合がある。Belle 検出器アップグレードに於いて開発が期待される粒子識別装置では、EndCap 部で現在の閾値型による粒子識別では困難な運動量領域: $p(\text{GeV}/c) < 4$ までの高運動量領域間での粒子識別を可能に

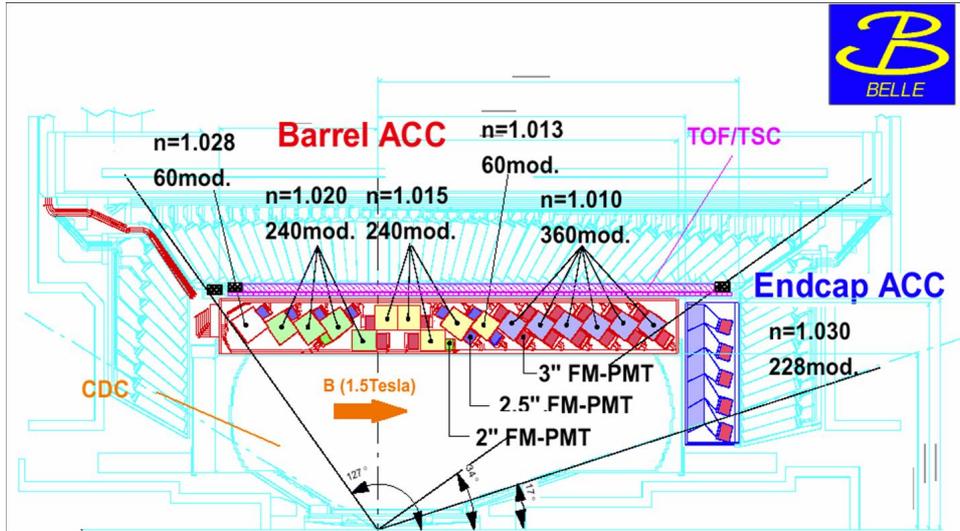


図 2.3: ACC

する、閾値型に変わる粒子識別装置の開発が検討される。

2.2.2 近接型エアロゲルリングイメージングチェレンコフカウンター (RICH)

Belle のアップグレードとしてシリカエアロゲルを用いた近接型 RICH が考案されている。ここでは RICH の検出原理と Belle アップグレードとしての特色、輻射体、回路系について述べる。

RICH 検出原理

荷電粒子が輻射体となる媒質中を通過する際発生するチェレンコフ光は、媒質中での進行方向に対し式 (2.2) でも示したような角度 (チェレンコフ角: θ_{ch}) を持って発生する、このチェレンコフ角は荷電粒子の速度: β と輻射媒質の屈折率: n に強く依存している。その為チェレンコフ角が精度よく測定できるのであれば、輻射体の屈折率と合わせて式 (2.5) より通過荷電粒子の速度 β が決定できる。

$$\beta = \frac{1}{n \cos \theta_{ch}} \quad (2.5)$$

この時チェレンコフ角の決定により得られる粒子速度: β と、荷電粒子の運動量: p が分かれば通過した粒子を同定する事が可能となる。シリカエアロゲルを輻射体としたリングイメージングチェレンコフカウンター (RICH) では、この通過粒子に対するチェレンコフ角: θ_{ch} を観測することで粒子識別を行う。RICH 検出器は粒子の通過するライン上に設置されたシリカエアロゲル輻射体と、そのエアロゲルと距離を置いて、高い位置分解能力を有する光検出器を持つ構造から成る。この時粒子識別は、エアロゲル中を粒子が通過する時円錐上に発生するチェレンコフ光を位置分解能の高い光検出器で観測することで、光検

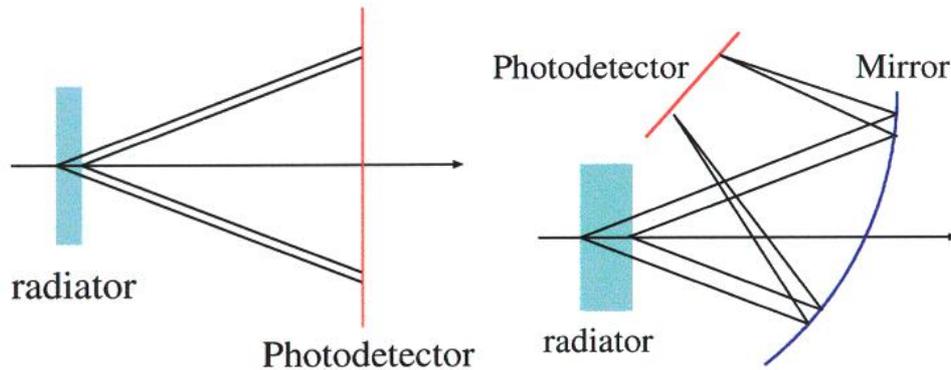


図 2.4: 種々の RICH

左：近接型 RICH 輻射体から発生したチェレンコフ光を直接に光検出器で観測する。
 右：ミラー型 RICH 発生したチェレンコフ光をミラーで集光、反射して光検出器で測定する。

出器上で観測されるチェレンコフ角に依存した形状を持つリング（チェレンコフリング）のイメージ情報を取得する。この時得られるリングの形状とエアロゲル中での粒子の通過情報よりチェレンコフ角 θ_{ch} の再構成が行われる。この再構成して得られるチェレンコフ角とシリカエアロゲルの屈折率から通過粒子の速度が式 (2.5) より求まり、粒子の速度 β と運動量の情報から粒子の同定が行われ通過粒子の識別が可能となる。エアロゲル RICH 検出器による粒子識別では、通過する粒子に対し直接チェレンコフ角を算出し、その同定を行うため Knock-on 電子等による fake イベントの除去や、識別可能領域が増えるなど利点がある。

Belle アップグレードのための AerogelRICH

現在エアロゲルを輻射体として使用する RICH 検出器では輻射体と検出器の間に集光ミラーを使用するのが主流である (図 2.4)。集光ミラーの効果によって光検出器上で観測されるチェレンコフリングがより鮮明になるためチェレンコフ角の決定精度が上がり、粒子間の識別能力を向上させている。我々が RICH 検出器による粒子識別を導入するとき、Belle の EndCap 部の空間的制約から集光ミラーを用いた構造での使用は難しい。実際 Belle 検出器 EndCap 部での粒子識別装置が設置可能な空間は円筒形上検出器群の側面と平行な方向（ビーム軸の方向と平行）に約 30cm 以内であり、この限られた空間中内でのリングイメージによる粒子識別を行う必要がある。そのため EndCap 部の円筒形上中の 30cm の空間内に平行に設置される輻射体と光検出器からなる RICH 検出器が考案された。この時通過粒子のチェレンコフ角は中間集光媒体（ミラー）を使用せず直接に光検出器でチェレンコフリングのイメージ情報を得る。このシリカエアロゲル輻射体によるリングのイメージ情報を用いた粒子識別装置を近接型エアロゲル RICH と呼ぶ。

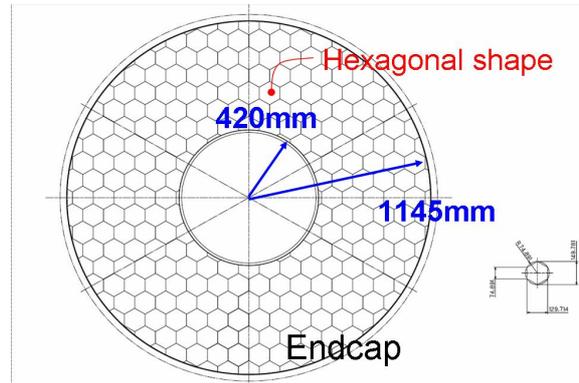


図 2.5: EndCap でのデザイン

AerogelRICH の輻射体デザイン

RICH のセットアップとして、EndCap(図 2.5) の面積約 $3.6m^2$ の部分にエアロゲルを敷き詰める予定である。そのエアロゲルの形は六角形を想定しており、辺が 75mm の六角形で全部で 220 個のエアロゲルが必要とされている。エアロゲルは $150mm \times 150mm$ を用いてウォータージェットカッターによって六角形に切り出すことが考えられている。これらの評価は 4.5.4 小節で述べる。

近接型 RICH の光検出器と読み出し

現在 EndCap 部に於ける近接型エアロゲル RICH 検出器を使用した粒子識別には、 $p(\text{GeV}/c)$ $< 4\text{GeV}$ までの高運動量領域での $\pi \cdot K$ 中間子の識別が要求される。その際現在の装置では十分な識別が困難な 4GeV での $\pi \cdot K$ 中間子に対し粒子識別能力 4σ 以上の識別能力を持つ検出器であることを開発目標としている。検出器の構成としては、エアロゲル輻射体、位置分解能力のある光検出器、光検出器全チャンネルからの信号処理が可能な回路系から成る。この中で光検出器の開発では、高い位置分解能力を持つこと、超伝導ソレノイドによる強磁場中で使用可能なこと、チェレンコフ光子を 1 光子レベルで検出可能であることより、その候補として現在浜松ホトニクスの方と共同で研究を行なっている HAPD(Hybrid Avalanche Photo Detector) を使用することを考えている。読み出し部では e^+, e^- の衝突時 1 イベントに対して光検出器からの約 12 万チャンネルにもなる信号を同時に高速処理を行なう必要性を考え、ASIC(Application specific integrated circuit) の開発が行われている。

2.3 RICH の性能

シリカエアロゲルの荷電粒子に対してチェレンコフ光発生点から、光検出器表面までの距離を L 、粒子の入射情報を用いて光検出器で観測される 1 チェレンコフ光子ごとに計算

されるチェレンコリングの半径:r を用いて

$$\theta_{ch} = \tan^{-1} \left(\frac{r}{L} \right) \quad (2.6)$$

式 (2.6) よりチェレンコフ角の再構成を行うことが出来る。この時近接型エアロゲル RICH 検出器の開発では Endcap 部での使用から光検出器の大きさ、読み出し回路等の設置に必要な空間を考慮して L:20.0cm と設定し研究を行なっている。

そのため角度再構成により得られるチェレンコフ角: θ_{ch} に対して距離:L を十分大きくするとこでの角度分解能の向上を図ることが難しい。近接型エアロゲル RICH の開発では、距離を一意にしたまま要求される π/K 識別能力を得ることが必要となる。式 (2.7) は RICH の 1photo 当たりの角度分解能を表している。

$$\sigma_{p.e.} = \sqrt{\sigma_{emit}^2 + \sigma_{pixel}^2 + \sigma_{rest}^2} \quad (2.7)$$

また σ_{emit} はチェレンコフ光発生点の不確定性、 σ_{pixel} は光検出器のピクセルサイズによるエラーを示しており、以下の式で導き出される。

$$\sigma_{emit} = \frac{d \sin \theta_{ch} \cos \theta_{ch}}{l \sqrt{12}} \quad (2.8)$$

$$\sigma_{pixel} = \frac{A \cos^2 \theta_{ch}}{l \sqrt{12}} \quad (2.9)$$

それぞれ、 d は輻射体の厚さ、 l はチェレンコフ光発生点から光検出器までの距離を表し、 A はピクセルサイズとする。

また、1 イベントで検出する光子の数を検出光子数 ($N_{p.e.}$) といい、1 イベントごとの角度分解能を近似的に

$$\sigma_{track} = \frac{\sigma_{p.e.}}{\sqrt{N_{p.e.}}} \quad (2.10)$$

で表される。

さらに、近接型エアロゲル RICH 検出器では、 $\pi \cdot K$ 中間子に対する識別能力の評価を行なう際、式 (2.6) より求められる各 $\pi \cdot K$ 両中間子のチェレンコフ角: θ_{π} 、 θ_K 、を持って式 (2.11) に表される式を用いる。ここで式 (2.11) 中に使われている σ_{π}, σ_K は、各粒子が輻射体を通過した際のチェレンコフ角を求める際の分解能力を示している。

$$\sigma_{separation} = \frac{\theta_{\pi} + \theta_K}{(\sigma_{\pi} + \sigma_K)/2} \quad (2.11)$$

近接型 RICH では式 (2.11) にて 4σ 以上の π/K 識別能力を目標としている。

2.4 マルチラディエータ RICH

近接型 RICH の性能向上のため、検出光子数を増やすことを考えるとラディエータの厚さを増せば検出光子数が増やすことが可能となる。しかし、ラディエータの厚さを増せばチェレンコフ光の発生点の不確定性 (式 2.8) より分解能の悪化が起きてしまう。それを改

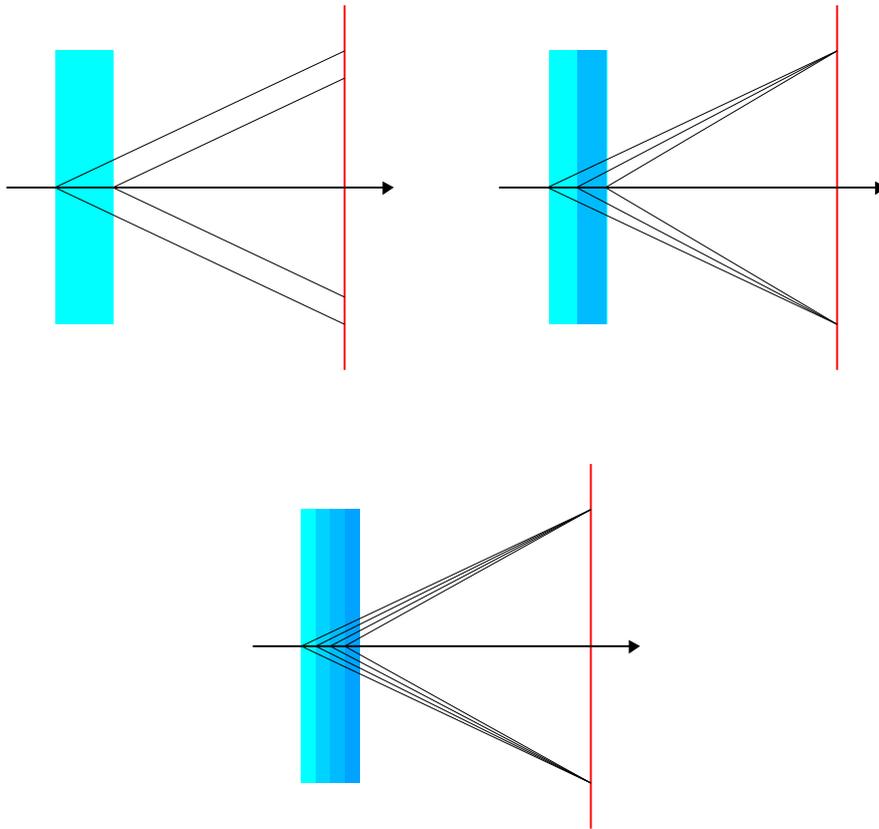


図 2.6: マルチラディエーター

左：同一屈折率でチェレンコフ光が発生。右：上流にあるエアロゲルの屈折率より下流の屈折率を高くしてチェレンコフリングを検出器上で重ねる。下：4層重ねて上流から下流に行くにつれて屈折率が高くなっている。

善するために異なる屈折率を並べて、発生するチェレンコフリングを光検出器上で重ねて検出するという方法をとる (図 2.6)。これは、上流側に低い屈折率を下流側に高い屈折率を用いることで、各々発生するチェレンコフ角の違いと発生点の違いを用いてチェレンコフリングを重ねることができる。それによって輻射体が厚いままで角度分解能の悪化を抑制することができ、検出光子数の増加を角度分解能の悪化させることなく可能にするアイデアである。さらに、数枚重ねることによってさらに検出光子数を増やし RICH の性能を上げることも考えられている。

第3章 シリカエアロゲル

この章ではシリカエアロゲルの構造、制作、光学的性能の測定、さらにフォーカシング型 RICH の輻射体として多層一体型エアロゲルの製作について述べる。

3.1 シリカエアロゲル構造

エアロゲルはゲル状の物質を乾燥することで作られる多孔性の固体であり、その体積の大部分が空気で占められている。そのうちシリカ (SiO_2) を主成分とするものはシリカエアロゲルと呼ばれ、固体としては極めて低屈折率、低密度である。現在 RICH で要求されている輻射体の屈折率を通常の固体や気体で用意することが困難である。そこでシリカエアロゲルはその特異構造によりガスなどの気体物質より安定な個体であり、チェレンコフ光を観測する際に光に対して良い透明度を示す物質であることなどが上げられる。

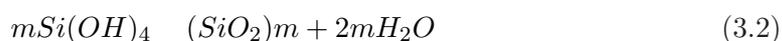
シリカエアロゲル中では主成分となる二酸化珪素 (SiO_2) が直系 1~2nm の無孔性粒子を形成し、この 1 次粒子がさらに集合し最大で直径が 50nm の大きさの 2 次粒子が形成されている。この二酸化珪素 (SiO_2) を基本構造とした 1 及び 2 次粒子の径の大きさがエアロゲルの光学的性能を特徴付ける重要な要因として考えられている。1,2 次粒子の中の SiO_2 の密度は、ガラスと同定密度 $2.4 \sim 2.6 \text{g/cm}^3$ 程度である。2 次粒子は互いに鎖上に結合し合い 3 次元ネットワークを形成し固体構造中の 90% 以上が空孔から成る高多孔質構造を持つことにより、固体であるにもかかわらず低密度・低屈折率を可能にしている (表 3.1)。それにより単純固体では難しい領域において、低屈折率、低密度を実現している。図 (3.1) にシリカエアロゲルの特異構造をモデル化した図を示す。

3.2 エアロゲル製作

シリカエアロゲルの主原料はテトラメトキシシラン ($Si(OCH_3)_4$) と蒸留水であり、アンモニアを触媒としてアルコール溶媒中で混合すると、加水分解して水酸化ケイ素 ($Si(OH)_4$) を得る (式 3.1)。



同時に (式 3.2) の縮重合反応が進行 (ゾル生成) し、次第に粘度が大きくなってゲル化する。



我々がエアロゲルの標準製法としている KEK 法 (KEK・松下電工 (株) 共同開発) の第一の特徴は、テトラメトキシシランが平均して 3 個縮合したメチルシリケート 51 (MS51)

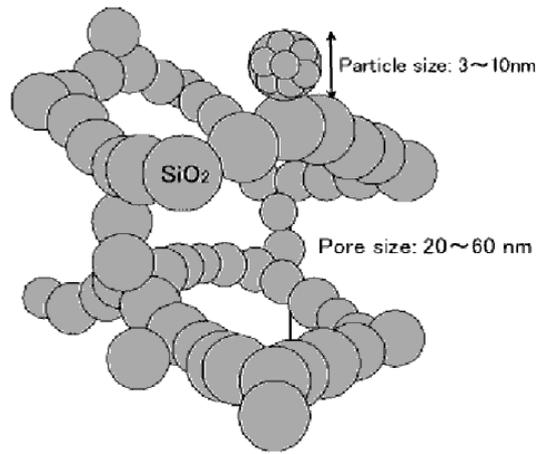


図 3.1: シリカエアロゲル構造

	物質	屈折率
固体	シリカエアロゲル	1.008~1.08
	ガラス	1.48
	ポリエチレン	1.58
液体	水	1.33
	水素	1.11
	液体ヘリウム	1.024
気体	二酸化炭素	1.00045
	水素	1.000138
	ヘリウム	1.000035
	空気	1.000292

表 3.1: いろいろな物質の屈折率

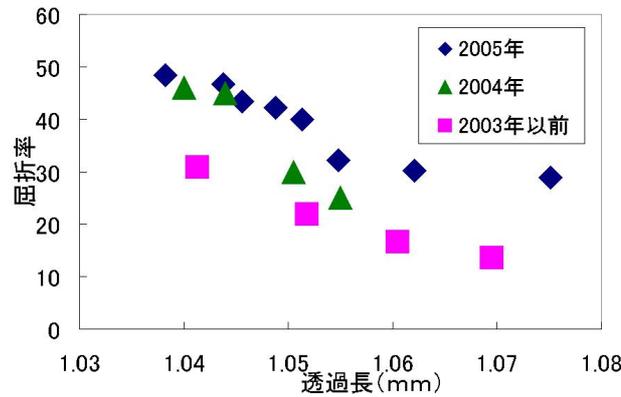


図 3.2: DMF 導入による透過長の向上

DMF を導入したことにより、2003 年以前の透過長より大幅に透明度が向上した。

と呼ばれる薬品を用いることである。MS51 はシリカ分 (SiO_2) として 51 重量 % 相当分を含有する無色透明の液体である。この MS51 を用いることにより、KEK 法以前の製法に比べて調合工程が簡素化されている。KEK 法の第 2 の特徴は疎水処理である。疎水化をしていないエアロゲルは OH 基をもち親水性で吸湿性に富むため、空気中の水分を容易に吸収する。その結果エアロゲルは変色し、透明度が低下してしまう。そこで疎水化剤としてヘキサメチルジシラザンを使用し、アルコゲルの OH 基中の H を疎水性の $Si(CH_3)_3$ 基 (トリメチルシリル基: TMS) に置換している (図 3.3)。更に本来は反応で容易に混ざることのないメチルシリケート 51 と H_2O 両者を溶す溶媒に対して、閾値型で要求される屈折率領域: 1.01 ~ 1.03 ではメタノール (CH_3OH) を使用することで高い透過長が得られている。しかし、RICH で要される屈折率 ~ 1.05 においてメタノールでは不十分である。そこで、2003 年にメタノール溶媒に変わる溶媒の候補として (N - ジメチルホルムアミド) (C_3H_7NO) 溶液を使用しシリカエアロゲルの開発を行なった。松下との研究開発によって現在では屈折率 1.05 において透過長 40mm、 <1.055 でも 30mm 以上のエアロゲルの製作に成功している。(図 3.2)

また、KEK 法の具体的な製作工程は以下のようなになる。全工程で約 25 日間かかる。

調合 予め決定した調合比に従って薬品を 2 つの容器に取り分ける。片方の容器には MS51、溶媒を量り取って A 液とし、もう片方の容器には蒸留水、アンモニア水を量り取って B 液とする。B 液を A 液に注ぎ込み、30 秒 ~ 1 分間攪拌する。混合液を製作したい形状の型 (ポリスチレン製) に流し込み、気泡をすばやく取り除く。型に蓋をしてゲル化が進行するのを待ち、表面が固まったら乾燥を防ぐために溶媒として使用した薬品を表面に静かに張る。各薬品の調合比はエアロゲルの屈折率を決定するばかりでなく、温度などとともにゲル化速度に寄与し、エアロゲルの透明度を左右する。ゲル化が速いほどゲル構造が細かく透明なエアロゲルになることが知られているが、型での成型操作を考慮して混合から数分で固化するように触媒であるアンモニア水の量を調節する。

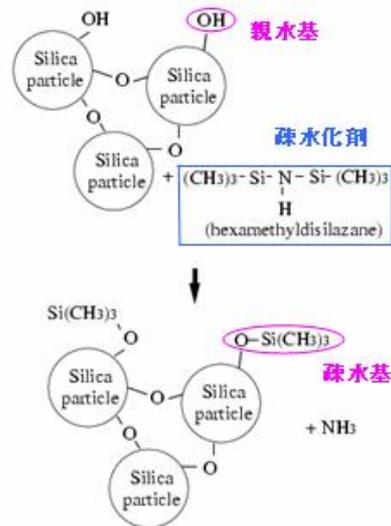


図 3.3: 疎水化課程

疎水化剤（ヘキサメチルジシラザン）を用いて、エアロゲルの親水基を疎水基に置換する。これで吸湿による透明度の悪化を予防できる。

熟成（1週間） ゲル構造を強固にするため、蓋をした型のまま熟成させる。この工程は乾燥を防ぐため、底にエタノールを張って蒸気で満たした保存缶（密閉缶）で行う。

洗浄1（3日間） 型の蓋を取り、保存缶をエタノールで満たしてアルコゲルを型のままエタノールに沈める。これはゲル化反応後の不要なアンモニアや水を取り除くためである。

疎水化（3日間） 保存缶のエタノール中でアルコゲルを型から外し、パンチングメタル皿（多数の穴を開けたステンレス容器）に載せる。エタノール9の体積に比して1の疎水化剤を保存缶に注いで混ぜる。

洗浄2（3日間×3回） 疎水化反応で生成されたアンモニアを除去するため、アルコゲルを新しいエタノールに沈める。疎水化後3日ごとに3回エタノールを交換する（洗浄2-1, 2, 3）。

超臨界乾燥（2～3日間） アルコゲルを自然乾燥すると、溶媒が蒸発するときアルコゲルの毛細管状の細孔中にメニスカスが生じ、その収縮方向に表面張力が働く（図 3.4）。さらに乾燥が進むとメニスカスがアルコゲル内部に入り込み、大きくなった表面張力でひび割れ（クラック）を起こしてしまう。アルコゲルの形状と構造を保ったまま溶媒を抽出するには、超臨界乾燥を行う。図 3.5 に示すように、物質の温度と圧力が臨界点を超え、

アルコゲルの形状と構造を保ったまま溶媒を抽出するには、超臨界乾燥を行う。（図 3.5）に示すように、物質の温度と圧力が臨界点を超え、液相と気相の境界がなくなった状態が超臨界流体である。表 3.2 にいくつかの物質の臨界点データを示す。超臨界流体は、液体のような密度でありながら気体のような粘度をもち、拡散係数は液体と気体の中間である。

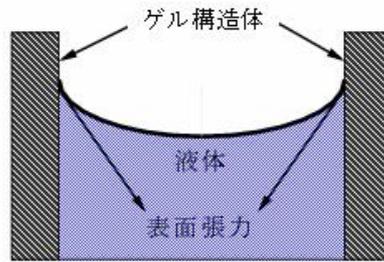


図 3.4: メニスカス

液面が描く曲線をメニスカスという。自然乾燥が進むとゲル構造が失われてしまう。

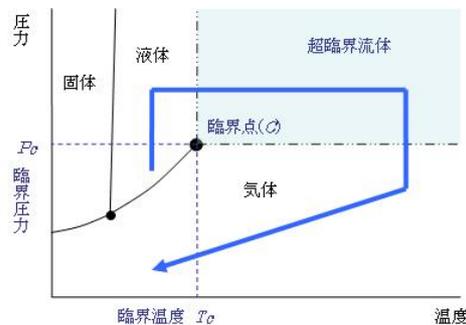


図 3.5: 超臨界課程

圧力を上げて液体にならず、メニスカスも生じない。この状態でアルコゲルから溶媒を抽出すれば不必要な表面張力が働かないため、形状と構造を保ってエアロゲルを得ることができる。

表 3.2 から分かるように可燃性のエタノールに高温・高圧を印加する必要がある。通常は、まず溶媒を臨界温度が比較的低い二酸化炭素に置換し、その後で二酸化炭素を超臨界状態にする二酸化炭素オートクレーブ (図 3.6) を使用する。こうしてアルコゲル中の溶媒を抽出後、常温・常圧に戻せば空气中で安定なエアロゲルが完成する。

3.3 エアロゲル性能評価

3.3.1 屈折率測定

屈折率の測定にはレーザー・フラウンホーファー法を用いる。波長 405nm の紫色半導体レーザーが回転台上のエアロゲルの角を通過すると、スクリーン上のスポットがずれる (図 3.7)。スポットの変位が最小になるように回転台を回し、そのときのスポットの変位をとる。エアロゲルとスクリーンとの距離をとすれば、屈折率は式 3.3 で表される。エアロゲルの角は直角であるとしている。

	臨界温度	臨界圧力 atm	臨界密度 g/cm ³
エタノール	243.1	63.1	0.275
メタノール	239.43	79.9	0.272
二酸化炭素	31.1	73.0	0.46
水	374.1	218.5	0.324
アンモニア	132.4	112.0	0.234
窒素	-147.1	33.5	0.311

表 3.2: いろいろな物質の臨界点



図 3.6: CO₂ オートクレーブ

オートクレーブ内でアルコゲル中のエタノールを液化炭酸に置換後、二酸化炭素を超臨界流体（臨界温度 31.1 、臨界圧力 7.30MPa）にし、アルコゲルから抽出する。内容積 7.6ℓ。

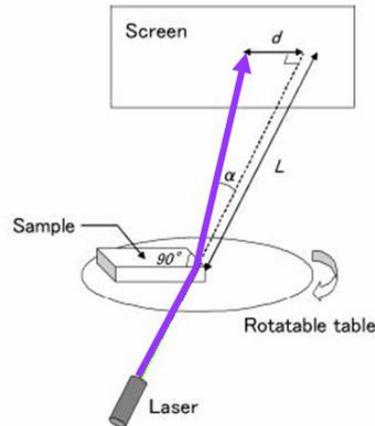


図 3.7: フラウンホーファー法

エアロゲルの角の状態が良好であれば、屈折率の測定誤差は ± 0.0003 程度である。

$$n = \frac{\sin(\frac{\alpha}{2} + \frac{\pi}{4})}{\sin \frac{\pi}{4}}, \quad \alpha = \tan^{-1} \left(\frac{d}{L} \right) \quad (3.3)$$

3.3.2 透明度の測定

エアロゲルの透明度の評価として、分光光度計（日立製 U-3210：図 3.8）で光（波長 185~800nm）の透過率を測定する。エアロゲルごとに厚さが異なるので、波長 400nm で透過長 Λ を求めて評価している。ここで透過長 Λ は式 3.4 で定義する。T はエアロゲルを通過した光の強度、 T_0 はエアロゲルを取り除いて測定した光の強度、d はエアロゲルの厚さである。

$$\frac{T}{T_0} = \exp \left(-\frac{d}{\Lambda} \right) \quad (3.4)$$

3.3.3 X 線構造解析

KEK の化学棟にある蛍光 X 線分析装置（rigaku 製：図 3.9）を使って試料（エアロゲル）の元素組成を調べた。試料に X 線を照射した時に出てくる光（蛍光）のスペクトルを測定して、試料に含まれている元素が何であるかを調べる装置であり、この装置では、B（ホウ素）から U（ウラン）までの元素を検出できる。

照射している X 線は Rn の $K\alpha$ 線であり、それを試料に当てることで試料から $K\alpha$ 線が発生しその強度を測っている。得られた X 線の各々の強度から質量比が算出され、そこから元素比を知ることができる。



Light Source : Iodine-Tungsten Lamp,
: Deuterium Lamp
Range of Wavelength : 180-800nm

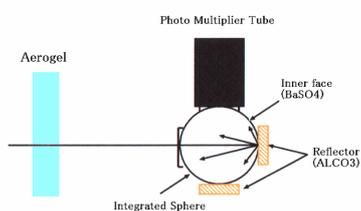


図 3.8: 分光光度計

左上：日立製の分光光度計 U-3210 の外観。

右上：暗箱内のエアロゲルの配置。エアロゲルを写真左側から右側に通過した光は積分球に入射し、光電子増倍管に導かれる。

下：分光光度計の暗箱内。積分球とエアロゲルの距離は 10cm としている。光源はヨウ素タンゲステンランプ、重水素ランプである。



図 3.9: 蛍光 X 線分析装置

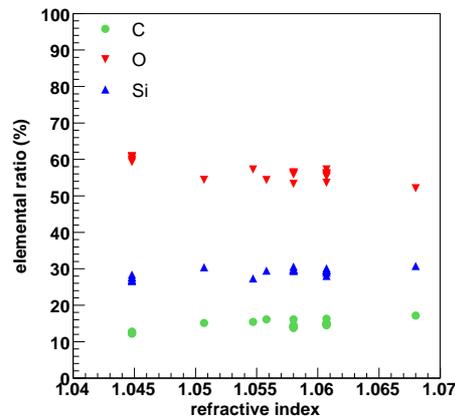


図 3.10: エアロゲルの屈折率と元素組成比
 緑 は炭素、赤 は酸素、青 はケイ素の各々の組成比を表す

屈折率 1.045 ~ 1.065 までのエアロゲルを用い、ゲルを構築している代表的な Si、C、O 組成を調べてみた (図 3.10)。それぞれの値の平均は Si:29.0±1.2%、O:56.7±2.4%、C:14.3±1.4% であり、Si と O の組成はほぼ 1:2 であることが分かる。

3.4 多層一体型エアロゲル

先に述べた RICH の原理として、放射されたチェレンコフ光を光検出器に集光させるため、異なる屈折率のエアロゲルブロックを複数重ねて使用する。それぞれ独立に製作したエアロゲルを並べてもよいが、取り扱い上の利便性と境界面が輻射体の光学的性能に与える影響を考慮し、製作の段階で複数のエアロゲルを化学的に結合させた一体型の多層構造エアロゲルが開発されているこの節ではそれらの制作方法と製作したゲルの評価を述べる。

3.4.1 ケミカル方式

まず、深めの型に屈折率が高い方の調合液をゲル化させる。表面が固化したら、その上に直接、屈折率が低い方の第 2 の調合液を注いでゲル化させる。(図 3.11) こうすることで 2 つの層を作成している、境界面は自然と化学的に結合し、その後の工程は 2 層を一体として扱える。同様に 3 層以上も可能である。この方法で注意すべきことは、隣接する層の屈折率が大きく離れていると、超臨界乾燥時の収縮率の差により境界面が剥離することである。例えば、屈折率 1.050 と 1.045 の一体化では問題ないが、屈折率差がそれより大きくなるにつれて剥離傾向が強くなることがわかっている。(図 3.12)

以下より、ケミカル方式を製作する上でテストしたときの方法や結果、それを踏まえての製作手法を述べる。

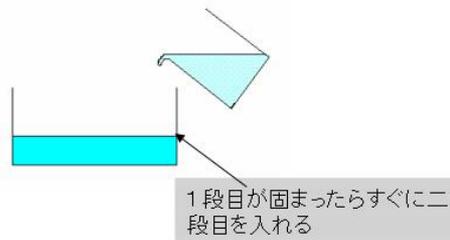


図 3.11: ケミカル方式製作法



図 3.12: 2層ゲルの成功と剥離

右：2層ゲルが上下層共に剥離せずにくっついている。
 左：2層ゲルが剥離した状態。

調合時間の試験

まず、製造するに当たって一層目を注いでから二層目を注ぐまでの時間を変化することで屈折率、透過長の変化を調べた(図 3.13)。1分後の上層と下層の屈折率がほぼ同じであるのは、まだ下層がアルコゲル化する前に注いだので、上層が下層をめり込ませて周りを下層で覆ってしまったために、フラウンフォーファー法で角を測った場合に下層と同じ値が出てしまったためである。また Reference と弱冠の屈折率の差が出来てしまったのは、2層ゲルでは上層と下層の各々収縮率の違うため、お互いに影響を及ぼしているためである。つまり reference は単層なので他の層の収縮率の影響がないため2層ゲルとの差を生み出したと考えられる。また、2層エアロゲル同士では時間による屈折率の大きな変化は見られなかった。透過長は1層目を注いでから時間を経ると透過長がよくなる傾向が見られた。しかし、前述のように調合ではアルコゲル化したならば即座に MtOH を貼らなければならない、よって、3分ほど時間を置いて即座に2層目を注ぐという方法でケミカル方式は製作されている。

屈折率差による問題

上下の屈折率差が大きいと上下がはがれる事がある。上下の屈折率差では現在 ± 0.002 以内であればはがれずに製作されている。図 (3.14) は2層ゲルを調合するとき下層を目標屈折率 1.06 を用い、上層を 0.005 ずつ変えて行ったときの透過長、屈折率を表している。透過長は上層の屈折率が高くなるにつれて低くなっている。また、下層の屈折率は同じ割合を用いたが上層の目標屈折率と併に弱冠低くなっている、それは上層の収縮に影響されていることが考えられる。しかし、測定誤算が ± 0.0006 に収まる範囲なので制作上の影

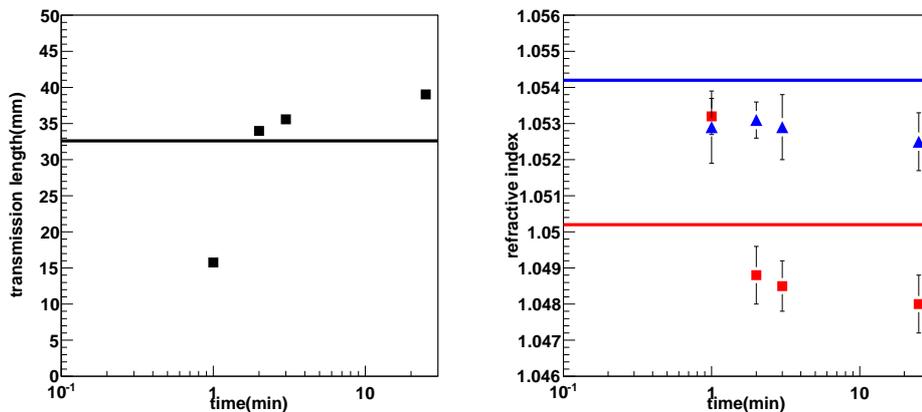


図 3.13: 2 層目の調合時間と透過長 (mm)、屈折率

左：1 層目を注いでから 2 層目を注ぐまでの時間と透過長の関係を表す。

右：青 は下層での各々の屈折率を表す。赤 は上層での屈折率を表す。それぞれの色の直線は 1 層で製作したとき (Reference) の屈折率を表している。

響は少ないと考えられる。また、このとき屈折率差が ± 0.002 以上でエアロゲルの上下層が剥離した。よって屈折率差が大きいエアロゲルのケミカル方式での製作は現在は ± 0.002 が限度となっている。

上下層の屈折率

また、2 層式では下層に屈折率の高いもの上層に屈折率の低いものを用いている。その理由としては屈折率が高い方が高密度であり、洗浄、超臨界等で収縮を受けにくいためである。図 (3.15) にて上下層を変えて製作したものを示す。この試験は屈折率の高い調合比を上層か下層かで透過長、屈折率差で違いがでるかを確かめた。透過長に関しては上層、下層にするかで大きな違いは出なかった。屈折率差においては下層に屈折率が高い調合比を用いたときの屈折率差が大きく開いた。また、屈折率差が ± 0.02 以上のものはどちらにおいても、2 層エアロゲルとして剥離せずに製作することは難しかった。現状においては、この方法については結論は出ていない。現在は下層に高い屈折率を用いることで統一して製作している。

3.4.2 接着方式

この方式は洗浄 1 を終えたエアロゲルを 2 つ用意する。各々の表面にアルコゲルになる前の調合液をつけて、調合液が固まる前に各々の表面を接着する (図 3.17)。この方法を用いることで、洗浄 1 を経て熟成を終えてアルコゲルとして完成した状態となってから接着するため、密度の違いによる収縮率の差を極力小さくシクラックの発生を抑制する。また、その収縮率の影響からくる reference との差を抑制することも期待されている。

アルコゲルの調合液を接着剤代わりにすることで、エアロゲルの基本的な構造を保った。

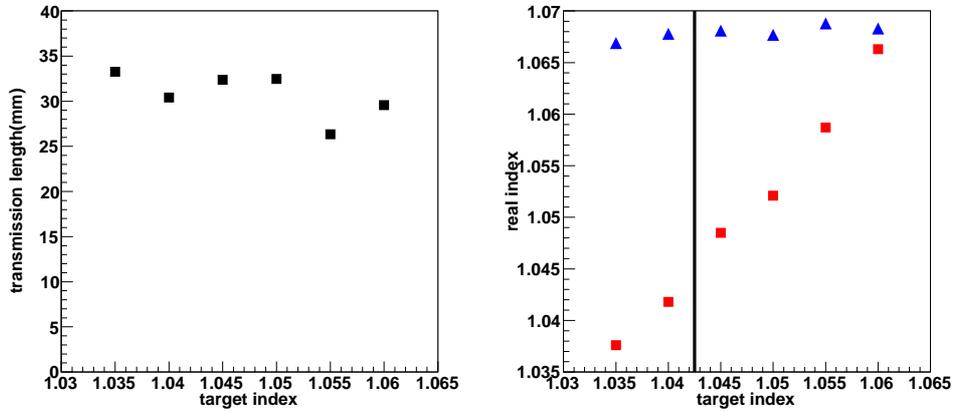


図 3.14: 2層ゲルの上層の目標屈折率と透過長 (mm)、実際の屈折率
 左: 上層の目標屈折率とその作成した2層ゲルの透過長を表す。下層は全て目標屈折率 1.06 の調合比を用いている
 右: 青 は下層での各々の屈折率を表す。赤 は上層での屈折率を表す。なお横軸は上層の目標屈折率を表している。また、直線を境界に左側が2層ゲルとして上層、下層が剥離した部分である。

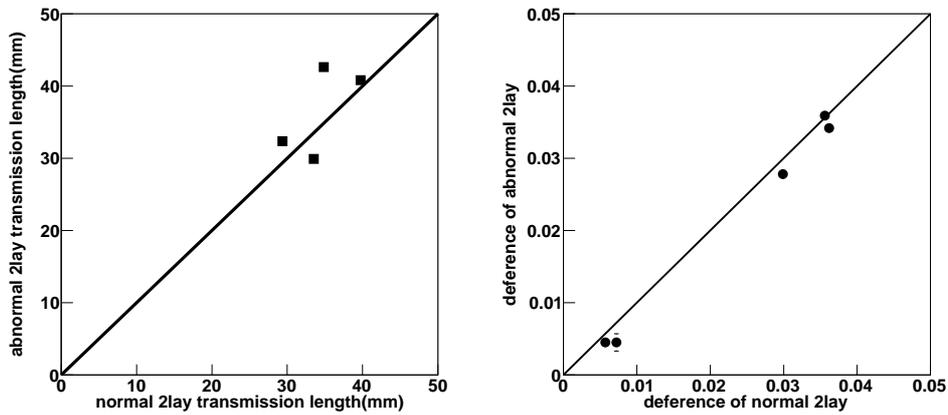


図 3.15: 2層エアロゲル上層、下層を逆転した場合
 左: 横軸が下層に屈折率の高い調合比を用いて2層エアロゲルを製作したときの測定した屈折率の差、縦軸が上層に高いときの差である。
 右: 横軸が下層に屈折率の高い調合比を用いて2層エアロゲルを製作したときの透過長 (mm)、縦軸が上層に高いときの透過長 (mm) である。

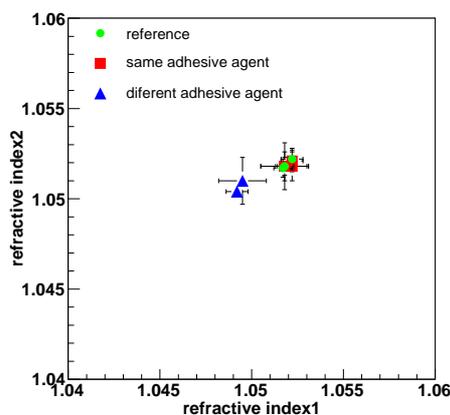


図 3.16: 接着 2 層ゲルの接着溶液の屈折率

同じ屈折率のエアロゲルを接着する。緑 は単層のときの屈折率を表すので横軸、縦軸とも同じ値である。赤 は接着する 2 つのゲルと同じ調合比を接着剤として用いたときの各々の屈折率である。青 は接着する 2 つのゲルとは異なる調合比を接着剤として用いた。

制作方法の確立

接着する時期として重要なのは疎水化より前に接着を行うことである。まだ親水基がある状態で式 3.2 のような反応を起こしエアロゲル同士の接着を試みるためである。疎水化の後で行うと、アルコゲル段階では一旦接着しているように見えるが、超臨界を経ると接着されないことが確認されている。

また、接着に使用される液体は高密度 (高屈折率 1.05 付近) の調合比を使用する。低密度 (低屈折率 1.03 以下) であると強固な接着は期待できないためである。低密度でも接着することは可能であるが、洗浄、疎水化課程を経る上で柔らかい接着では生産上製作が難しいためである。

接着に用いる調合比と屈折率

図 (3.16) はあらかじめ同一調合比で作ったアルコゲル 2 つ (屈折率 1.05) を用意し、接着に使う調合比を 2 つのゲルと同じ調合比 (屈折率 1.05) と異なる調合比 (1.055) を用いて、接着剤の調合比と屈折率の関係を試験した。アルコゲルと同じ調合比を用いたサンプルは Reference と同じ屈折率を示し、ほぼ影響なくゲル同士が接着していることが分かる。しかし、異なる調合比を用いたサンプルは Reference よりも弱冠低い屈折率となり、異なる調合比での影響が見られた。透過長は Reference は $20.4 \pm 1.6 \text{ mm}$ 、同調合比では 19.5 ± 1.5 、異なる調合比で 21.6 ± 1.2 という値になり、透過長に関しては接着部が影響を与えるほどではないことが分かっている。

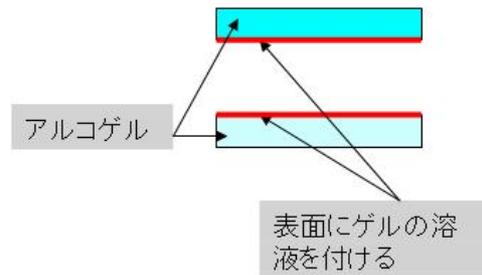


図 3.17: 接着方式製作法

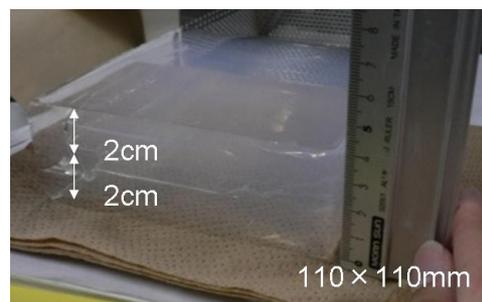


図 3.18: 接着方式による 4cm エアロゲル

4cm エアロゲル

これらのことを踏まえて、2cm のエアロゲルを二つ接着することで高屈折率のエアロゲルが初めて 4cm の製作に成功している (図 3.18)。3cm 以上の厚みのあるゲルを製作するにはクラックが入りやすいため、超臨界を経たらクラックによって破壊されることがほとんどである。しかし、この方法によって今回クラックはあったが破壊されることなく製作に成功した。この方法が確立すれば 4cm の多層ゲルの製作が可能となる。

3.4.3 一体型エアロゲルの技術的な問題

- 二つの異なるエアロゲルを用いるので、各々の密度の差より収縮率が異なり影響を相互に受けてしまい、単層で用いた調合比とことなる値がでるため、2層のための調合比を練り直す必要がある。
- ケミカル方式の 2 層目を注ぐとき、アルコゲル化した 1 層目から溶液が染み出ることによる影響がある。それらの要因から調合比の決定が難しい。
- また、接着方式を製作する方法として、アルコゲルに溶液を付けて接着するという方法を経る上で、技術的な要素も加わり歩留まりが悪い。
製作する上でこれらのことを考慮しつつ改善していくことが課題として挙げられる。

第4章 ビームテストによるエアロゲル性能評価

この章では、2005年12月にKEKのPS π 2ラインにおいて行われた、RICHのビームテストのセットアップから解析方法、性能評価、実験結果を述べる。

また、このビームテストでは3つの実験が行われており、研究名称 RICH1、RICH2、RICH3 という名称が与えられている。RICH1 はエアロゲル性能評価を含めた近接型 RICH の実験、RICH2 は Burle MCP-PMT を用いた RICH with TOF の実験、RICH3 は HAPD とその読み出しの実験を行った。この章では RICH1 について述べる。(図 4.1) にアルミ製の暗箱の RICH1 検出器の設置写真を示す。

4.1 ビームテストの目的

このテストは、新しく開発されたエアロゲルの RICH としての性能を確かめること、マルチラディエータにおいての π K 識別能力。最適なマルチラディエータを開発するために、各々のエアロゲルの厚さ、屈折率の組み合わせ等を議論する。さらに、今研究されている 2 層一体型エアロゲルと通常のゲルとの比較。また、フィルターを用いて RICH の波長依存による検出光子数の変化、ウォータージェットで境界面を切断した部分によってできる性能の変化、も合わせて述べる。

4.2 ビームテストセットアップ

実験は KEK の 12GeV/cPS π 2 ビームラインで行われた。(図 4.2) に実験のセットアップを示す。

ビームは上流からトリガーカウンター (T1)、ガスチェレンコフカウンター 1 (GC1)、(GC2)、トリガーカウンター (T2)、エアロゲルチェレンコフカウンター (AC)、ポジショニングカウンター (PS1)、多線式比例係数箱 1 (MWPC1) を通過して RICH1、RICH2 に入り、その後方の多線式比例整数箱 2 (MWPC2)、RICH3、ポジショニングカウンター (PS2)、トリガーカウンター (T3) を通過する。また、各々の役割を表 (4.1) に示す。

RICH1 では光検出器に Flat panel multi-anode PMT (Hamamatsu H8500) を用いた。表 (4.2) に H8500 の性能を表す。H8500 を 4 × 4 のアレイ状に配置してチェレンコフリングを検出する。また読み出しにアナログメモリーを用いた。これは 1 つのチップで 32ch の信号を処理でき、1 μ s に 32ch の前置増幅を行い、そのデータを 8 個分のメモリーに蓄えた。蓄えられたデータが FlashADC に送られそこで AD 変換が行われる。

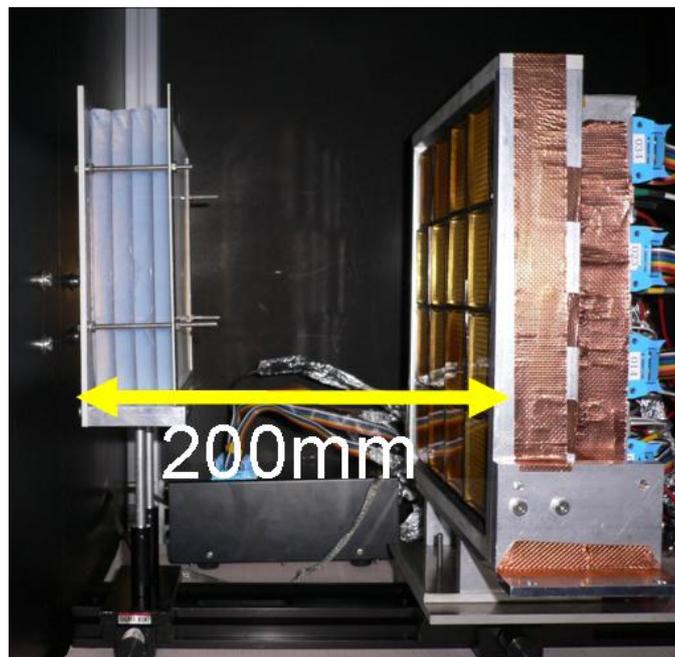


図 4.1: RICH1 セットアップ

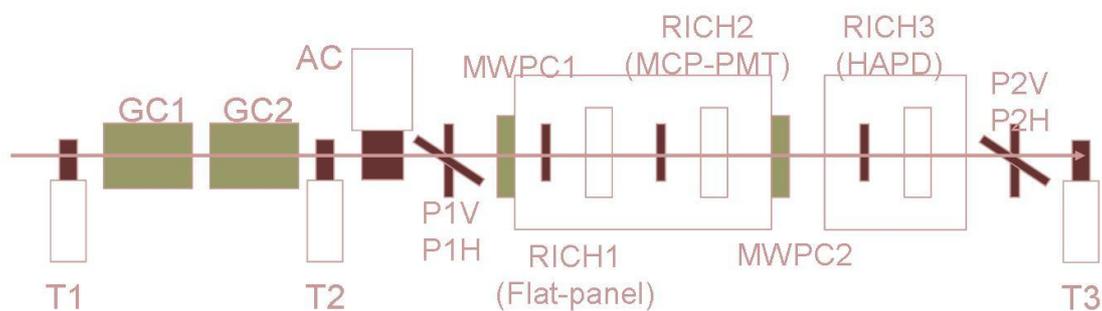


図 4.2: 2005 年ビームテストのセットアップ

測定器	役割
トリガーカウンター	ビームの入射タイミング、方向の決定
ガスチェレンコフカウンター	π^- 中に混入する電子の除去
エアロジェルチェレンコフカウンター	π^- 中に混入する μ^- と π^+ 中の proton の除去
多線式比例計数管	入射粒子の飛跡情報を得る
ポジショニングカウンター	主に MWPC のバックアップに使用する

表 4.1: 測定器の役割

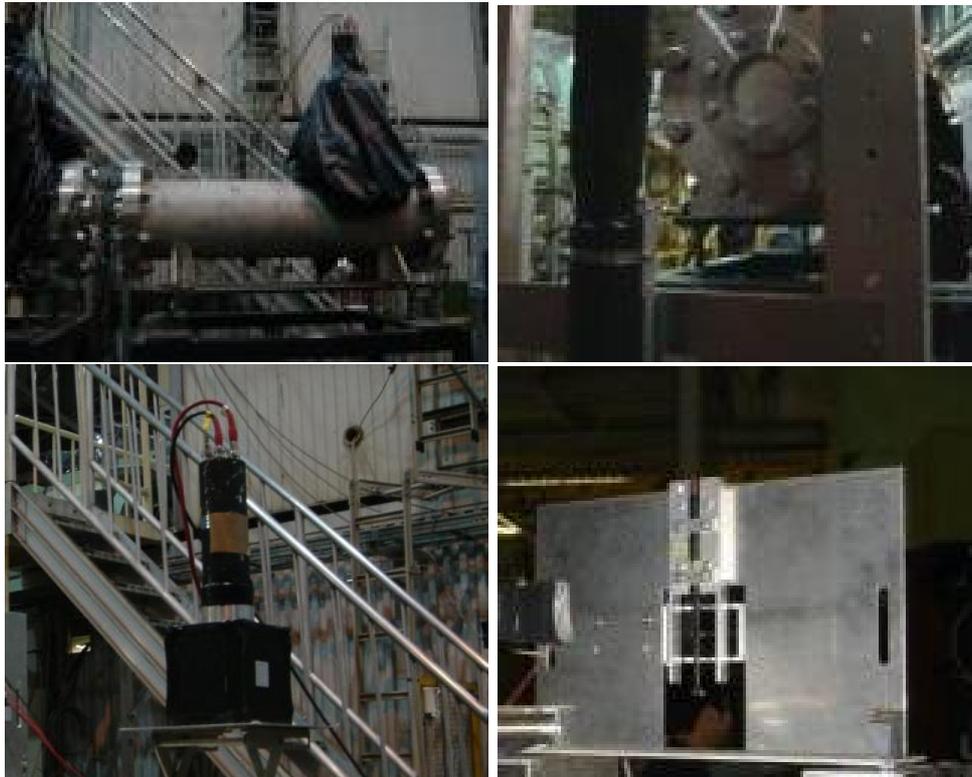


図 4.3: ビームテストで用いられた主な測定器
 左上: ガスチェレンコフカウンタ (GC) 右上: トリガーカウンタ (T) 左下: エアロゲルチェレンコフカウンタ (AC) 右下: ポジショニングカウンタ (PS)

有感波長領域	300 ~ 600	nm
最大感度波長	420	nm
光電面材質	Bialkali	
窓 材質	Brosilicate glass	
厚さ	2.0	mm
ダイノード 材質	Metal channel dynode	
段数	12	
読み出しアノード数	64ch(8 × 8ch)	
ピクセルサイズ/間隔	5.8 × 5.8/6.08	
有感面積	49 × 49	
大きさ	52 × 52 × 52	mm

表 4.2: H8500(浜松ホトニクス製) の性能

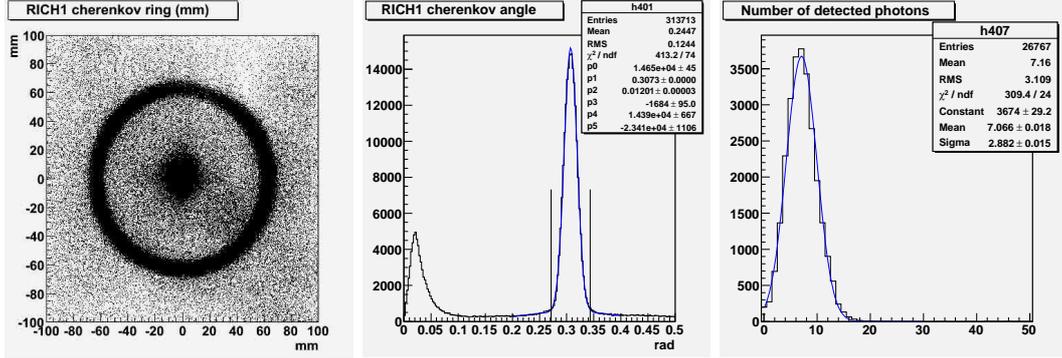


図 4.4: RICH ビームテスト解析方法

左: 観測されたチェレンコフリング (rad)。

中: 観測されたチェレンコフ角の分布。

右: チェレンコフ角分布の 3σ 内にヒットが合ったときの、1 イベントで検出される光子数の分布。

4.3 解析、評価方法

解析は MWPC の飛跡情報を元にチェレンコフリングの中心を計算し、チェレンコフリングを観測する (図 4.4)。観測されたリングからチェレンコフ角を見積もり、その分布のチェレンコフ角をガウシアンで、バックグラウンドを一次の関数でフィットする。一回のイベントでチェレンコフ角の中心から $\pm 3\sigma$ 以内で検出された光子数を分布し、それからバックグラウンドの比率を差し引いた値を検出光子数 ($N_{p.e.}$) として解析を行っている。

4.4 実験結果とその評価

4.4.1 検出光子数の評価

今回新しく開発されたエアロゲル、2003 年以前のエアロゲルを用いて RICH としての性能の向上を確かめた。テストは厚さ 10mm 程のサンプルを一枚づつ増やしていき、そのときの検出光子数の変化を調べた。用いたサンプルは 2005 年に作られたエアロゲルで屈折率 1.049、透過長は 37mm 程度、大きさは 150mm×150mm×10mm、2003 年以前に作られた MtOH 溶媒で作られたエアロゲル屈折率 1.051、透過長は 13mm、大きさは 100mm×100mm×10mm である。なお (図 4.5) のフィットに用いられる関数は (式 4.1) で表される。

$$\begin{aligned}
 N_{p.e.} &= C \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_0^d \epsilon(\lambda) \lambda^2 \sin^2 \theta_{ch} \exp\left(\frac{-x}{\Lambda(\lambda) \cos \theta_{ch}}\right) d\lambda dx \\
 &\approx C' \sin^2 \theta_{ch} \Lambda \cos \theta_{ch} \left(1 - \exp\left(\frac{-d}{\Lambda \cos \theta_{ch}}\right)\right)
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

(図 4.5) より、新しいサンプルはゲルの厚さと共に増加しており、厚さ 40mm 以上においても検出光子数の増加が見られる。また 2003 年以前のサンプルは 30mm あたりで検出

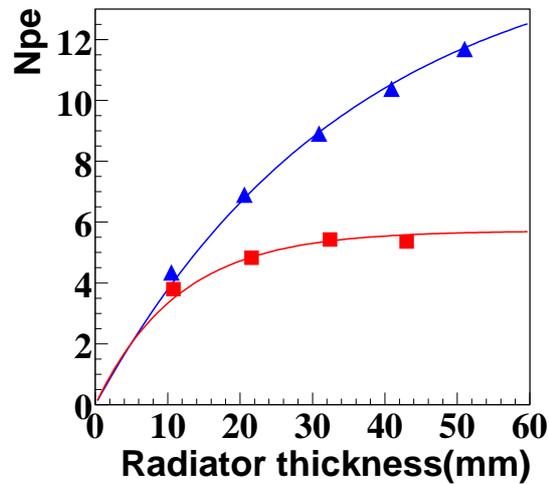


図 4.5: エアロゲルの透過長向上における検出光子数の増加

は 2005 年以後のエアロゲルサンプルで透過長が 37mm のものを使用した。 は 2003 年以前のサンプルで透過長は 13mm である。

光子数 (N_{pe}) が 4.5 程で飽和しており、厚さ 20mm 以上のエアロゲルを使用することに利点はなかった。

4.4.2 マルチラディエーターの評価

第三章で説明したマルチラディエーターの評価をここでは行う。

新しいエアロゲルサンプルを用いたマルチラディエーターの評価

(表 4.3) にマルチラディエーターで用いたエアロゲルの特性を示す。(図 4.6) よりマルチラディエーターの検出光子数 (N_{pe}) は同一屈折率の層を並べた場合と比べて、ほぼ等しく増加していることがわかる。さらに、1p.e. 当たりの角度分解能では層を重ねることで起きる悪化を良く抑えているといえる。RICH の性能を評価する上での 1トラック当たりの角度分解能では、同一屈折率を用いた場合に厚さ 20mm までしか分解能の向上が見られなかったが、検出光子数の増加を保ちつつ角度分解能の悪化を防ぐことにより 30mm 以上の使用が可能となり、今回 3 層、4 層で πK 識別能力が 5σ 以上を達成した。

層の厚さによるマルチラディエーターの評価

マルチラディエーターの各々の厚さを 5mm、10mm、20mm にして比較を行った。それぞれの特性を (表 4.4) にまとめて示した。 N_{pe} ではほぼ同じように厚さによる増加が見られ、1phot の角度分解能は 20mm ラディエーターはその厚さによる影響で悪化が目立つ。5mm においては 2 層目までは分解能の悪化は目立たなかったが、3 層目以降 10mm よりも弱冠

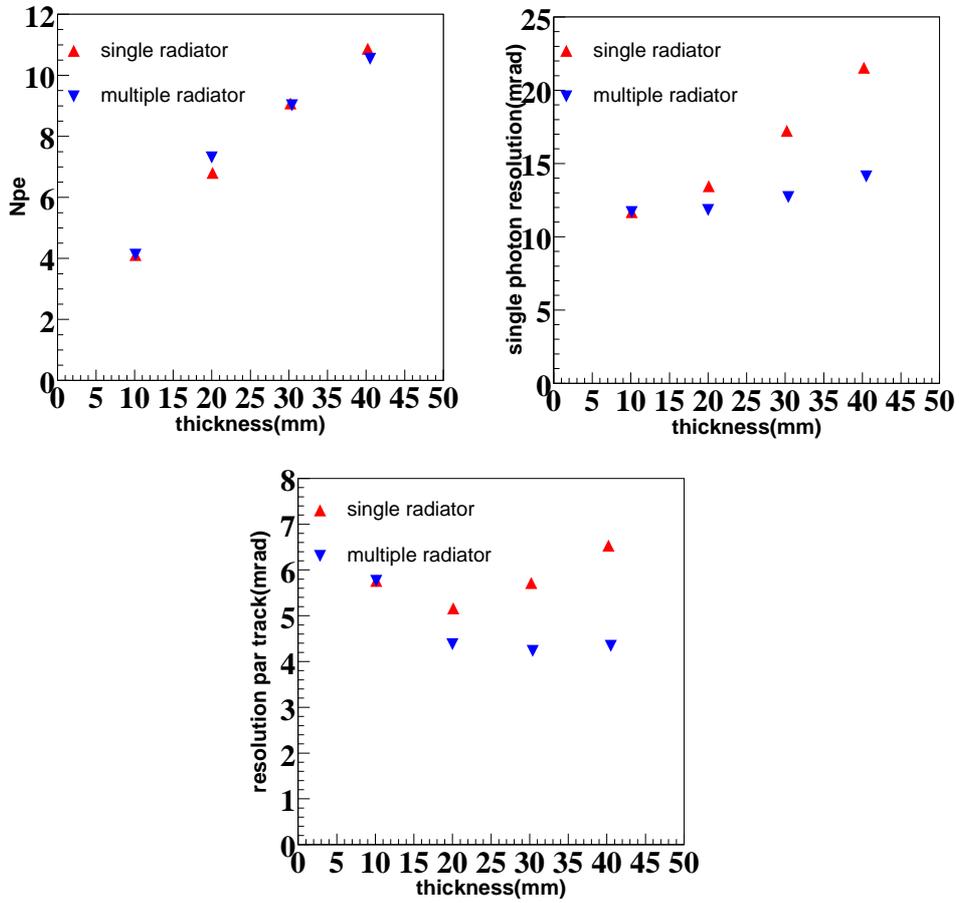


図 4.6: シングル、マルチラディエータの比較
 左上：検出光子数の変化、右上：1phot 当たりの角度分解能、下：1track 当たりの角度分解能

	屈折率	厚さ (mm)	透過長 (mm)
同一屈折率サンプル	1.045	10	44
1 層目	1.045	10.1	44.4
2 層目	1.050	9.9	41.3
3 層目	1.055	10.4	35.6
4 層目	1.062	10.1	32.1

表 4.3: マルチラディエータに使用したエアロゲルサンプル ID
 マルチラディエータと比較するサンプルとして同一屈折率を用意し、平均厚さ 10mm、平均透過長 44mm のものを 4 層用意し。マルチラディエータと 1 層ずつ比較を行う。

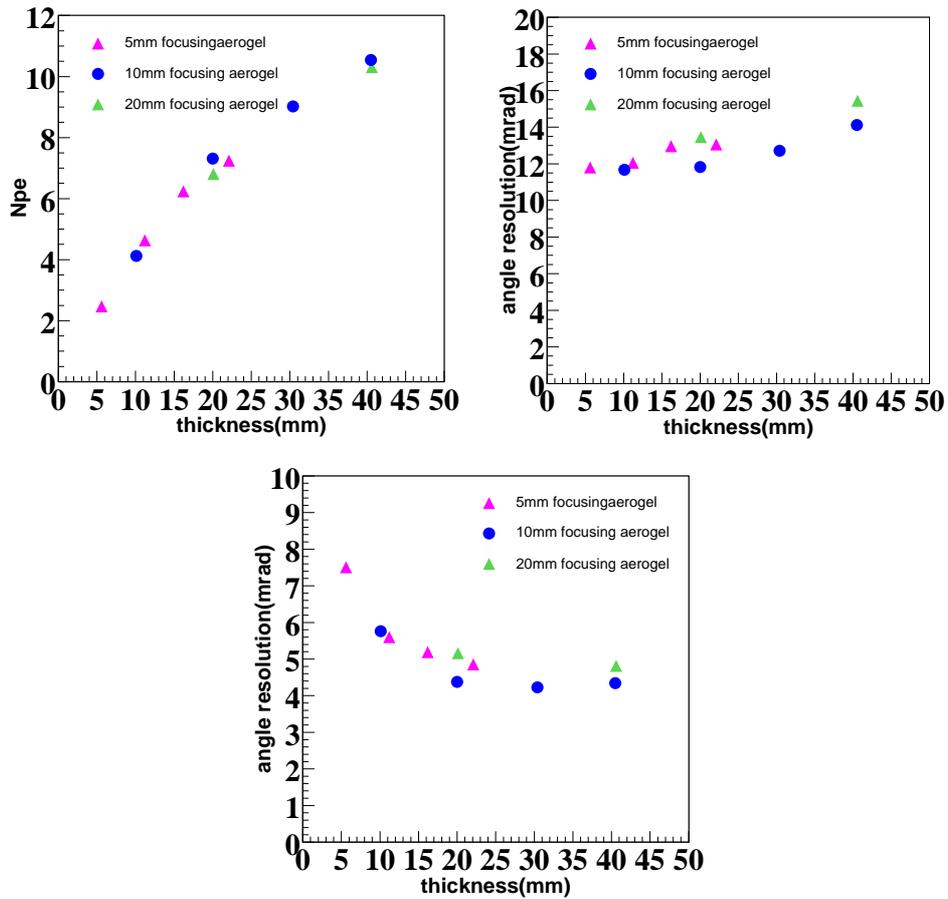


図 4.7: 各々の層の厚さでのマルチラディエータの比較
 左上：検出光子数の変化、右上：1photon 当たりの角度分解能、下：1track 当たりの角度分解能

悪化している。これは、5mm ラディエータを重ねることのできた表面での散乱等による分解能の影響であると共に、5mm、10mm において σ_{emit} よりも σ_{pixel} が支配的であるためだと考えられる。このとき 5mm でそれらの要因により、今回は 10mm ラディエータが最も π/K 識別能力が高かった。

屈折率の組み合わせによるマルチラディエータの評価

2層ラディエータを用いて屈折率の組み合わせによる、各々の評価を行った。今回は上流側のエアロゲルを固定して下流のエアロゲルの屈折率 1.045 ~ 1.055 まで変えて行った。用いたエアロゲルのデータを表 (4.5) に示す。図 (4.8) より屈折率 ± 0.002 程度では 1track 当たりの角度分解能は 0.3mrad しか変化しないことが示され、これはシリカエアロゲルを製作上で出てくる屈折率の誤差 ± 0.0003 よりも遥かに小さく、マルチラディエータをセットアップする上で問題は無いことが示された。

なお、(図 4.8) で用いられたフィットの関数を (式 4.2 ~ 4.7) で表す。

	屈折率	厚さ (mm)	透過長 (mm)
1層	1.050	5.6	32.4
2層	1.053	5.6	34.4
3層	1.056	5.0	30.4
4層	1.057	5.9	32.2
	屈折率	厚さ (mm)	透過長 (mm)
1層	1.045	10.1	44.4
	1.046	10.0	43.8
2層	1.055	10.4	35.6
	1.055	10.1	34.5

表 4.4: 5,20mm マルチラディエーターに使用したエアロゲルサンプル ID
 上：厚さ 5mm のエアロゲルでマルチフォーカスさせたときの ID
 下：厚さ 20mm のエアロゲルでマルチフォーカスさせたときの ID、このとき厚さ 10mm の同屈折率エアロゲルを 2 つ用いて 20mm のエアロゲルとして測定した。

	屈折率	厚さ (mm)	透過長 (mm)
上層	1.045	11.0	43.5
下層	1.045	11.0	42.5
	1.046	10.0	44.4
	1.049	10.1	38.8
	1.050	9.9	38.1
	1.052	9.6	36.3
	1.055	10.4	35.6

表 4.5: 屈折率の組み合わせに用いたエアロゲル ID

まず、各々の層で発生した光子がチェレンコフ角度の違いによって重なるので、その幅を平均二乗偏差で表す。

$$\begin{aligned}\sigma_R^2 &= \langle R^2 \rangle - \langle R \rangle^2 \\ &= \frac{1}{12(N_1 + N_2)^2} \{-3[a_1 N_1 + (a_2 + 2d)N_2]^2 \\ &\quad + 4(N_1 + N_2)[a_1^2 N_1 + (a_2^2 + 3a_2 d + 3d^2)N_2]\} \end{aligned} \quad (4.2)$$

a_1 、 a_2 は各々ゲルから発生するチェレンコフリングの内径と外径の差である。

$$a_1 = d_1 \tan \theta_1, a_2 = d_2 \tan \theta_2 \quad (4.3)$$

d_1 、 d_2 は上流、下流のゲルの厚さ。

$$d = (L - d_0)(\tan \theta_{10} - \tan \theta_{20}) + d_2 \tan \theta_{12} \quad (4.4)$$

θ_{10} 、 θ_{20} は発生したチェレンコフ角がエアロゲルを出るときに屈折した角度である。 θ_{12} は上流側のゲルで発生したチェレンコフ角の下流側に入ったときに屈折した角度である。チェレンコフ光の発生点の不確定性によるエラーは以下で表される。

$$\sigma_{emit} = \frac{\sigma_R}{(L - \frac{d_0}{2})} \cos^2 \theta \quad (4.5)$$

θ は各々チェレンコフ角の平均値である。

ピクセルサイズからくるエラーは以下で表される。

$$\sigma_{pixel} = \frac{A}{(L - \frac{d_0}{2})\sqrt{12}} \cos^2 \theta \quad (4.6)$$

A はピクセルサイズを表す。

以上から求められる 1トラック当たりの角度分解能は以下で表される。

$$\sigma_{track} = \frac{1}{\sqrt{N_1 + N_2}} \sqrt{\sigma_{emit}^2 + \sigma_{pixel}^2 + \sigma_{rest}^2} \quad (4.7)$$

4.4.3 2層一体型エアロゲルの評価

今回、屈折率に 1.05 と 1.055 のもの 2 層エアロゲルの検出光子数と角度分解能を調べた。2 層一体型ゲルとして接着型とケミカル型を用意、Reference として 2 枚のエアロゲルを並べてビームに当てた。図 (4.9) は測定したゲルの検出光子数と角度分解能を表している。これらの分布は 1track 当たりの角度分解能に換算すると 0.1mrad にも満たない値で分布している。接着型、ケミカル型での接着面での寄与が単層 2 枚を並べる方法と比べて RICH の性能として問題になる点は見つからなかった。

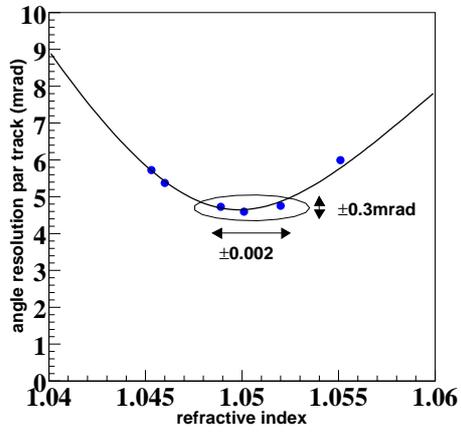


図 4.8: デュアルラディエータの屈折率の組み合わせによる角度分解能

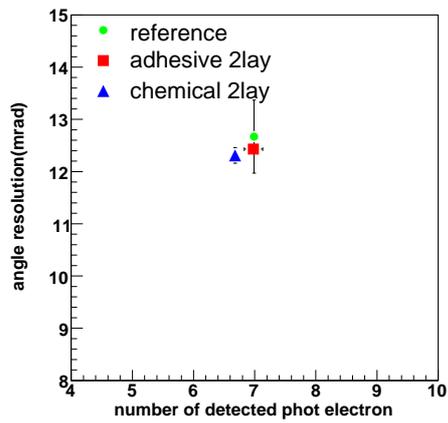


図 4.9: 2層一体型エアロゲルの検出光子数と分解能
 緑 は2枚を並べてビームを当てた横軸:Npeと縦軸:角度分解能の値である。赤 は2層一体接着型エアロゲルの値であり、青 は2層一体ケミカル型エアロゲルの値である。

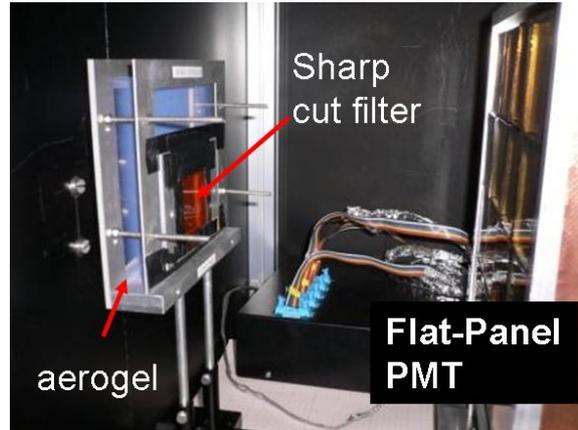


図 4.10: シャープカットフィルターのセットアップ

シャープカット波長域	チェレンコフ角 (rad)	角度分解能 (mrad)	検出光子数
全波長域	0.3306	13.2	7.5
370nm~	0.3285	12.9	3.9
420nm~	0.3279	13.0	2.5
480nm~	0.3270	13.0	1.1
560nm~	0.3265	13.5	0.2

表 4.6: シャープカットフィルターを用いたときの各々の結果

4.4.4 シャープカットフィルター

シャープカットフィルターを用いてある特定波長領域以下を透過させずチェレンコフリングを観測した。まずシャープカットフィルターを(図 4.10)のように、エアロゲルのビームが当たりチェレンコフ光が出てくるあたりに取り付けビームを入射した。シャープカットフィルターは厚さ 2mm でそれぞれ 370nm、420nm、480nm、560nm の波長領域でカットされるものを用いた。それぞれの透過率は(図 4.12)である。用いられた輻射体は厚さ 19.3mm、透過長 37.9mm、屈折率 1.055 を用いた。なお、フィルターの部分(厚さ 2mm)の屈折を考慮してフィルターの屈折率を 1.5 とし屈折部分を補正して解析した(図 4.11)。

表(4.6)よりフィルターのカットできる領域が高波長になるとチェレンコフ角が低くなる。これは屈折率の波長依存性より波長が短いほどその時の輻射体の屈折率が高くなるという事と一致している。しかし、波長依存による角度分解能の影響が発生点の不確かさ σ_{emit} 、光検出器のピクセルエラー σ_{pixel} と比べて低いため角度分解能の影響をみることは出来なかった。

また、検出光子数について式(2.3)より、QE(図 4.14)、波長依存による透過率と屈折率の関係(図 4.15)を用いて実験値と計算値を比べた(図 4.13)。それより各々の値で検出光子数が $\pm 10\%$ の範囲で計算値と合っている。これらの誤差が出た原因として、図(4.14)は PMT の平均的な QE であるため、16 個の QE の特性による差が出たものと考えられる。

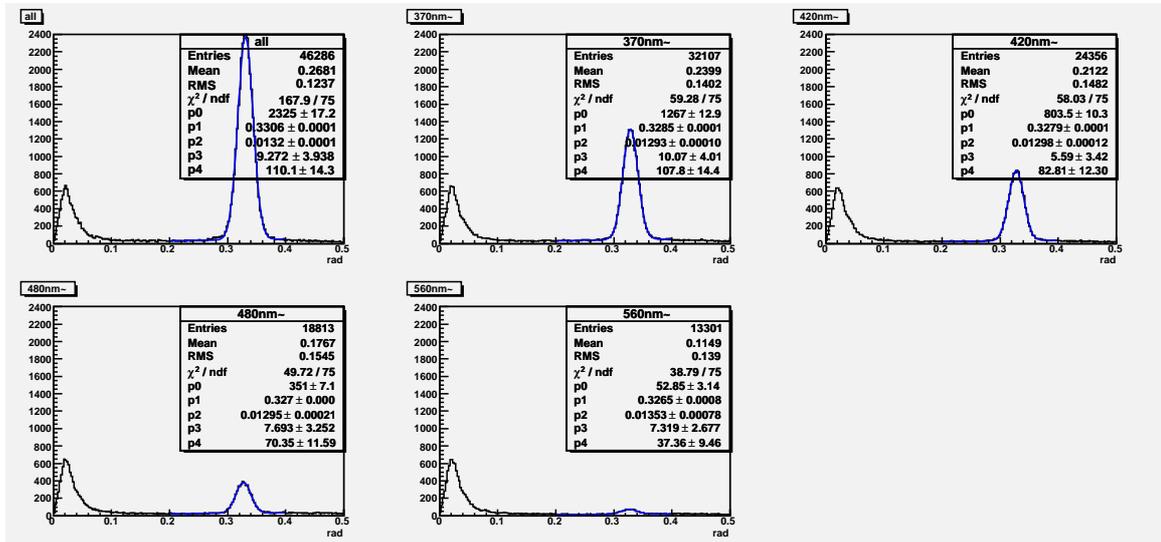


図 4.11: 各々のフィルターを用いた時のチェレンコフ角分布
 左上: フィルターなしの分布、中上: 370nm~のカットフィルターを用いた分布、右上: 420nm~、
 左下: 480nm~、中下: 560nm~

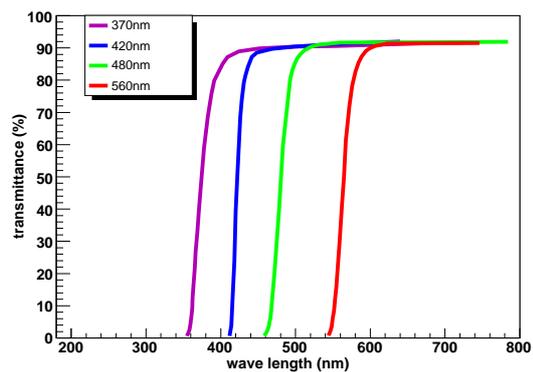


図 4.12: シャープカットフィルターの透過率
 □ 光機製のシャープカットフィルターの透過長

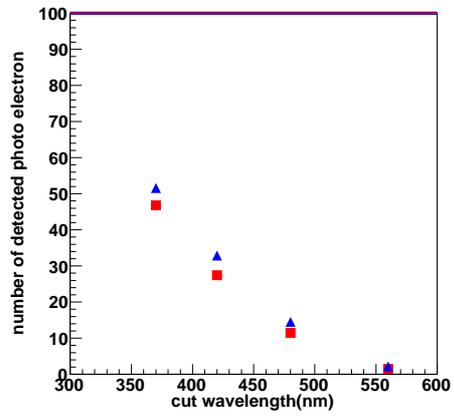


図 4.13: 実験値と計算値の波長依存性の比較
 検出光子数 (全波長領域の値を 100% として残りを % で示す) 青 : 実験値、赤 : 計算値

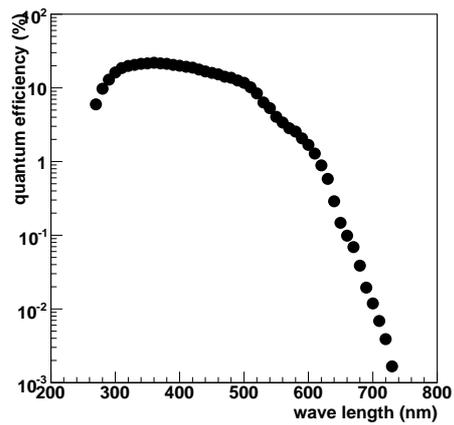


図 4.14: H8500 の量子効率

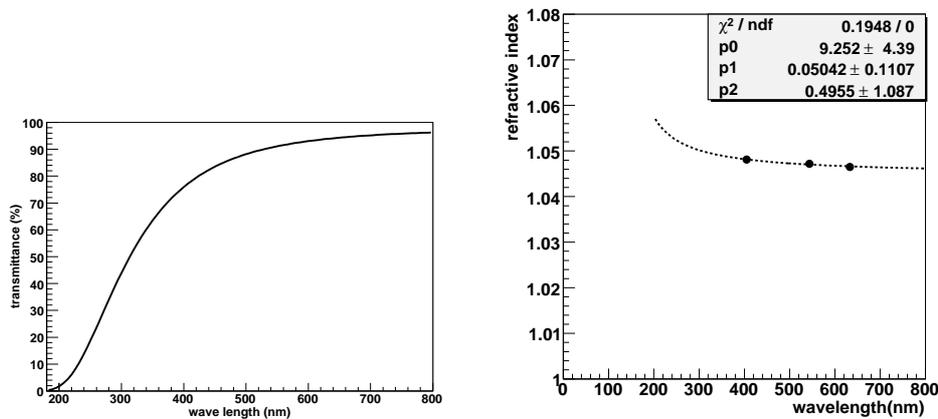


図 4.15: 波長依存の透過率と屈折率

左：透過率、右：屈折率

4.4.5 エアロゲルのウォータージェットカット境界面

第3章で話したように、RICHで用いられるエアロゲルは六角形にウォータージェットカッターで切り取られ、セットアップされることが考えられている。そのウォータージェットカットによる影響を確かめるため、カットされた境界面にビームを当てる。今回は、シリカエアロゲルを十字にカットしその境界面を調べた。用いられたエアロゲルは屈折率1.049、厚さ19.6mm、透過長38.9mmのものを用いた。またこのテストではウォータージェットでカットすることで境界面を作ったものと、ウォータージェットでカットされていない面を並べて境界面を作ったものとを比較している。

図4.17はウォータージェットカット境界面と普通の境界面のチェレンコフ角、検出光子数、角度分解能の二次元分布である。これより、検出光子数ではどちらの境界面に対しても影響を受けていることが分かる。またチェレンコフ角分布はウォータージェット境界面では違いに大きな差は無かったが、普通の境界面ではその周りで激しく影響していることがわかり、その関係で角度分解能にはウォータージェットより普通の境界面の周りにおいて悪化していることが分かる。これらは、境界面での反射や屈折が影響されていると考えられる。これらの考察については4.5節でシミュレーションを用いて述べることにする。

4.5 ビームテストのシミュレーション用いた考察

シャープカットフィルター用いたときとウォータージェット境界面のRICHの評価をモンテカルロシミュレーションを行って評価する。なおジオメトリーは実際のビームテストとほぼ同じであるが、今回のシミュレーションでは多重散乱を考えていないのでRICH2があることを考慮していない。

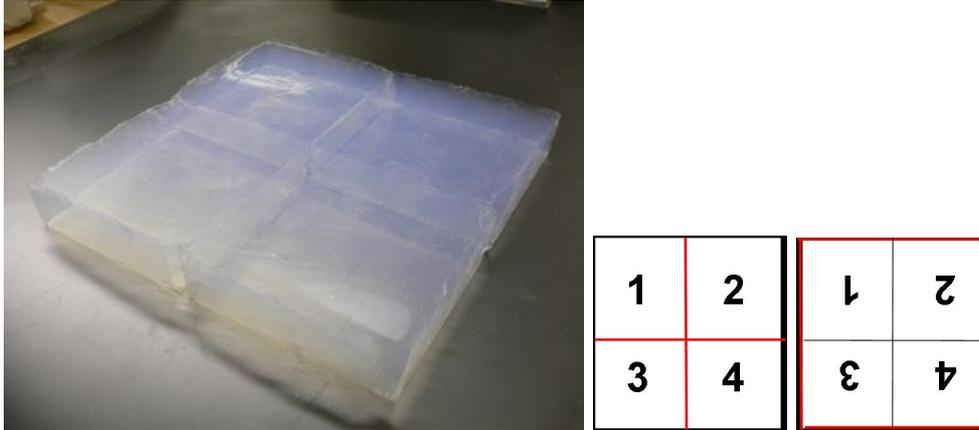


図 4.16: ウォータジェットカットされたエアロゲル

右側の二つの図の赤線はウォータジェットでカットされた面を表し、黒線は外側のエアロゲルの型の面を表す。

4.5.1 シミュレーションの流れ

どのようにシミュレーションを行ったかを説明する。まず、入射粒子は $3\text{GeV}/c$ の運動量と $139\text{MeV}/c^2$ の質量を持った π 粒子を用意する。次に MWPC に入射する場所をガウシアンで乱数で振り、さらにガウシアンで粒子の入射角度を決める。その後エアロゲルに入射した粒子はフランクタムの式 (2.3) より発生する光子数とその波長が決定する。そこで、あらかじめ計ってある透過率のデータを用いて透過長を決め、エアロゲル内でレイリー散乱される光子は計算を止め、透過する光子はエアロゲルを出て光検出器に向かう。光検出器に届いた粒子は H8500 の QE のデータ (図 4.14) を用いて、検出されるか否かを判定する。

4.5.2 用いたデータ

- 透過長によって得られたデータ (節参照)
- エアロゲルの波長依存によるデータ (節参照)
- Flat Panel PMT の量子効率 (図 4.14)

4.5.3 シミュレーション結果

以上のセットアップ、データを用いてチェレンコフリングを観測した (図 4.18)。用いたエアロゲルは屈折率 1.048、厚さ 20mm、透過長 40mm である。表 (4.7) はシミュレーションとビームテストの結果を示した。検出光子数は実験値と比べて 2 倍以上の差があり、その原因は分かっていない。また、角度分解能の差は我々が把握していないエラーが $6 \sim 7\text{mrad}$ 程あり、それと同じ程のエラーが出ている。

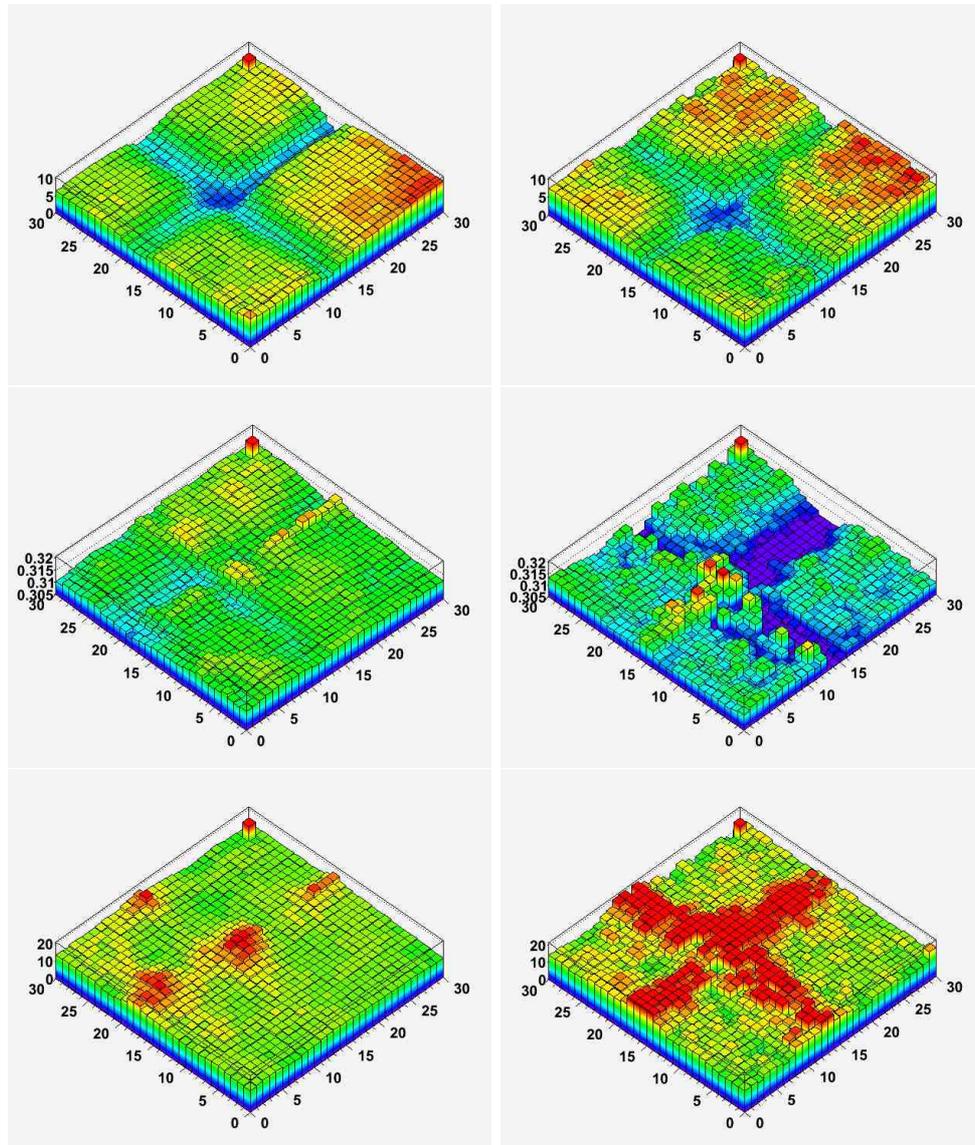


図 4.17: ウォータージェット境界面上での N_{pe} と角度分解能の変化

左: ウォータージェットカットの境界面周りに $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ の範囲にビームを当てた時の 2 次元分布。

右: ウォータージェットカットしていない境界面にビームを当てた時の 2D プロット。

上: 検出光子数、中: チェレンコフ角分布、下: 1photo 当たりの角度分解能

	MC シミュレーションの結果	ビームテストの結果
検出光子数	14.2	7.4
角度分解能	11.1	13.6

表 4.7: シミュレーションとビームテストの比較

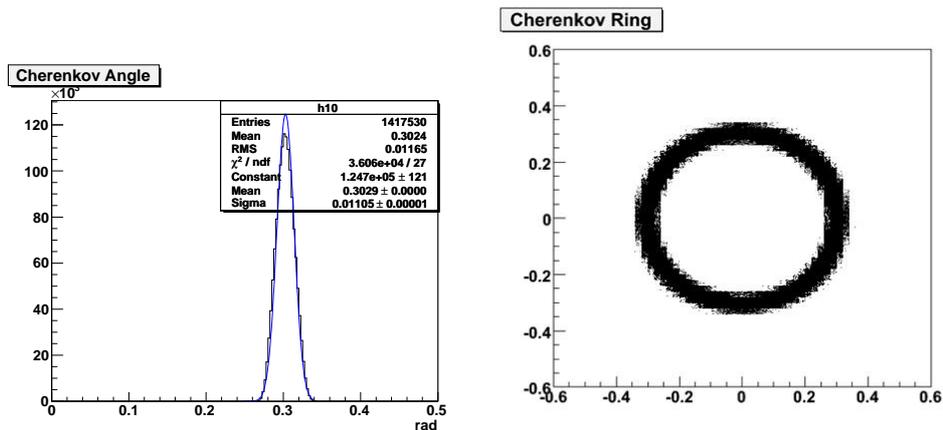


図 4.18: シミュレーションによるチェレンコフ角分布

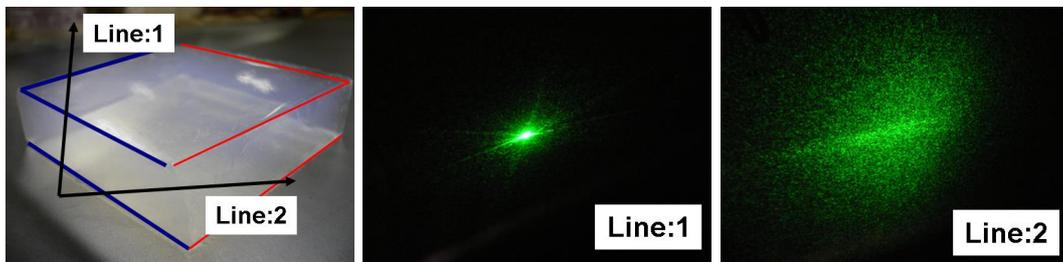


図 4.19: ウォータージェットカット境界面にレーザーを当てた写真
 左: 青色が普通の境界面、赤色がウォータージェットカットされた境界面。
 中: 普通の境界面にレーザーを当てた写真。
 右: ウォータージェットカット境界面にレーザーを当てた写真。

4.5.4 ウォータージェット境界面の評価

ウォータージェットの境界面を評価する上で図 (4.19) はウォータージェットの境界面と普通の境界面に 543.5nm のレーザーを当てたものである。普通の境界面は型から出したままの比較的きれいな面であるために、目立った散乱はしていない。しかし、ウォータージェットでカットされた境界面は切るときの影響で表面が粗く、激しく散乱しているのが分かる。これらの状況を考えて、いくつかのシミュレーションの方法を取った。

表 (4.8) はシミュレーションによる境界面での影響を 3 タイプに分けて考えたのを図で表したものである。type-A は主にウォータージェットでできた面を仮定した。type-B, C は普通の境界面での振る舞いを仮定した。また type-C の形は普通の境界面を用いたとき、そのエアロゲル製造過程でアルコゲルを型からはずすときに必ずできる形である。注意すべきことはウォータージェットは出来上がったエアロゲルをカットするので、このような形にはならないことである。

ウォータージェット境界面の理解を深めるため、境界面を跨ぐようにしてビームを当て、その時の境界面での各々の項を実験とシミュレーションの type-A と比べてみた図 (4.20) 検出光子数の増減、チェレンコフ角、角度分解能はそれぞれよく合っている。

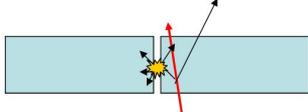
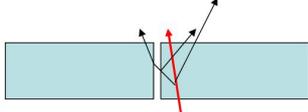
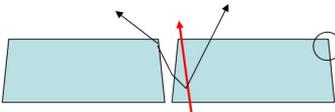
<p>A</p> 	<p>発生したチェレンコフ光が境界面で等方的に散乱することを仮定して計算を行った。</p>
<p>B</p> 	<p>チェレンコフ光が境界面で屈折の条件により、反射、屈折を行うことを仮定。また、このとき散乱することを考慮していない。</p>
<p>C</p> 	<p>屈折、反射、散乱の条件は B と同じであり、今回は輻射体が左図のように台形になっている場合を仮定する。また、その角度は $\pi/2+20\text{mrad}$ とした。これは普通の境界面が平均的にこのような形となっていることを考慮した。</p>

表 4.8: シミュレーションにおける仮定

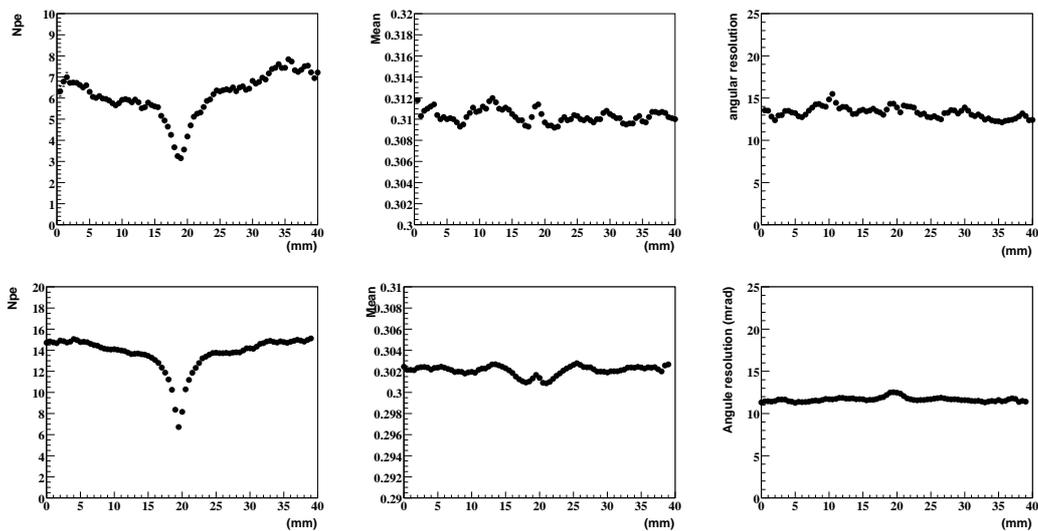


図 4.20: ウォータージェットカット境界面の比較

上：ビームテストの結果、下：シミュレーション type-A
 左：検出光子数、中：チェレンコフ角、右：角度分解能

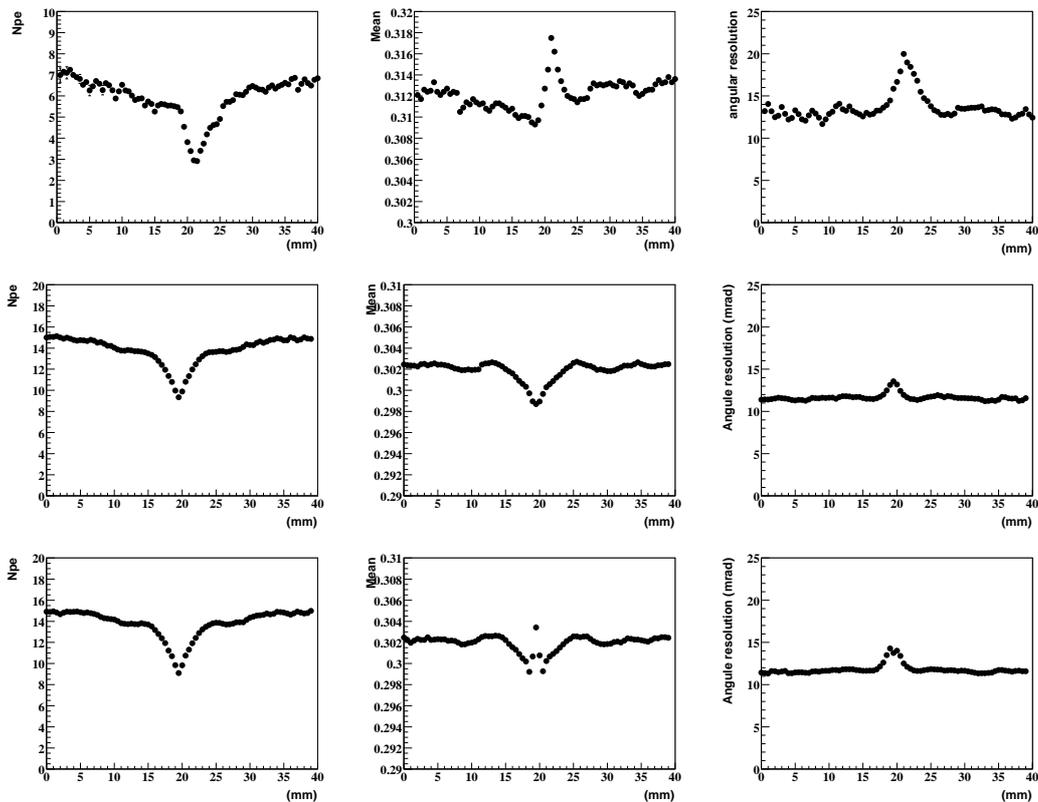


図 4.21: 普通の境界面の比較

上：ビームテストの結果、中：シミュレーション type-B、下：シミュレーション type-C
 左：検出光子数、中：チェレンコフ角、右：角度分解能

普通の境界面を同じように跨ぐようにしてビームを当て、その時の境界面の各々の項を実験と type-B、C と比べてみた図 (4.21)。検出光子数の増減はほぼ同じである。チェレンコフ角は type-B では中心の角度の変化が説明できないが type-C によって、それが境界面の角度差によって出来ているということが理解できる。また、角度分解能は実験値よりも悪くなっていないことから、さらなる影響を考慮する必要がある。

以上より、表面が粗いウォータージェットの方が角度分解能が良いという理由の一つとして、境界面で散乱され検出光子数は減るものの、角度分解能に大きな影響を与えないということが考えられる。また、フラットな表面をもつ普通の境界面は少しの角度差によって反射、屈折したものが角度分解能に影響を与えてしまっている。

第5章 結論

5.1 エアロゲル

透過長の向上

エアロゲルは DMF の導入のおかげで、屈折率 1.055 以上では透過長は 2 倍以上向上した。それによって、マルチラディエーターで用いられるエアロゲルの調合比は屈折率 1.045 ~ 1.060 まで決定し、これらを用いることで検出光子数の増加が見込まれる。

2 層一体型エアロゲルの製作

一体型ゲルを作る方法は二つあり、ケミカル方式と接着方式である。今回それらを製作する方法が決定した。今後これらの調合比を決定する必要がある。

5.2 RICH

輻射体の向上による RICH 性能の向上

輻射体シリカエアロゲルの透過長の向上により、40mm 以上のエアロゲルを用いても検出光子数が増加することが可能となった。それによって、マルチラディエータの導入が可能となり、検出光子数を増加させなおかつ 1phot 当たりの角度分解能の悪化を防ぐことに成功し、今回マルチラディエータによって示された π/K 識別能力は検出光子数 9.0、1track 当たりの角度分解の 4.2mrad で 5σ 以上を達成した。

マルチラディエータの厚さによる考察

また、マルチフォーカスする上で各々の層での厚さは 5mm と 10mm において優位な差は現れなかった。これは光検出器のピクセルサイズによるエラーがゲルの厚さからくるチェレンコフ光の発生点の不確定性よりも大きいためであると考えられる。しかし、20mm よりも 10mm の方がマルチラディエータに適していることは判明した。

屈折率の組み合わせによる影響

屈折率を組み合わせによる角度分解能の影響は、最も良くなる組み合わせから ± 0.002 程度では角度分解能は 0.3mrad 程度しか変化しないことがわかった。これは制作上できるエラー (測定誤差も入れて) ± 0.0003 よりもはるかに小さいことから、RICH 構築に大きな問題にはならないことが分かっている。

2 層エアロゲルの RICH

2 層一体型エアロゲルはケミカル方式、接着方式において。単層を二枚並べる方法と比べて性能として同じであった。両方の方式で RICH のセットアップをすることは可能であることが分かった。

RICH の波長依存性

シャープカットフィルターを用いての波長依存は検出光子数について実験値と理論値で $\pm 10\%$ の範囲で理解できたが、波長依存による角度分解能の影響が発生点の不確定性 σ_{emit} 、光検出器のピクセルエラー σ_{pixel} と比べて低いために波長依存の角度分解能の値を計ることはできなかった。

ウォータージェットカット境界面の評価

ウォータージェットによる境界面に入った光子は乱反射し、検出光子数は減少するが角度分解能には影響をほとんど与えない。普通の境界面に入った光子は反射、屈折を行い、検出光子数を減少させ角度分解能を悪化させることが分かっている。現段階では角度分解能の影響を考えて、エアロゲルをセットアップする際には境界面をウォータージェットでカットすることが好ましい。

5.3 今後の課題

エアロゲルの 2 層一体型の制作方法と単層で最適化された調合比を用いて、2 層エアロゲルの製作する上での調合比等を練らなければならない。またマルチラディエーターを構築するときのそれぞれの層の厚さの最適化、粒子が角度をつけてエアロゲルを通過したときのマルチラディエーターから発生するチェレンコフリングの振る舞いを実験、またはシミュレーションによって確認する必要がある。さらに、セットアップのときに境界面同士をつけるときに接着剤を用いるか、またそのときの接着剤による影響等を調べる必要が要されている。

謝辞

本研究を行なうにあたり多くの方々に御協力、御指導頂きました。河合秀幸助教授、吉田滋助教授、間瀬圭一助手には本研究に参加する機会を与えてくださったこと感謝致します。

高エネルギー加速器研究機構の足立一郎助手、西田昌平助手、海野祐士氏には多くの助言、協力を頂き深く感謝いたします。

東京都立大学の住吉孝行教授、名古屋大学の飯嶋徹助教授、東邦大学の小川了助教授には貴重な助言を与えてくださり深く感謝致します。

名古屋大学の井門氏、小酒井良延氏、林大司氏、藤田恭一氏、馬塚優里氏にはビームテスト実験を始め、研究を行なうに際し多くの貴重な資料、研究手法等与えてくださり感謝致します。

Jozef Stefan institute の Peter Krizan 氏、Samo korpar 氏、Rok Pestonik 氏、Andrej Gorisek 氏にはビームテストの際、多大なるご協力、助言を頂き感謝致します。

松下電工株式会社の横川弘氏には本研究の重要項目であるエアロゲルの製作に関して、多くの資料、ご意見、ご助言等を与えてくださり深く感謝致します。

東邦大学の鎌形英美理氏には研究での協力や助言を頂き感謝いたします。

首都大学の西澤勲氏、東京理科大の宮沢優一氏には AR の友として一年を送れたことに感謝いたします

千葉大学での学生生活にてお世話になりました中山博史氏、宮本寛子氏、田端誠氏、高橋慧氏、稲葉未南氏、富岡功輔？、小島信広？石井良和氏、長谷川祐介、小野美緒氏には有意義な研究生活を送ることが出来感謝致します。

最後に家族に感謝を申し上げ謝辞と致します。

関連図書

- [1] I.Adachi et al. New silica aerogel for RICH Radiator、Nucl. Instr. Meth.(2005) 146.
- [2] T.Matsumoto et al. Studies of proximity focusing RICH with an aerogel radiator using flat-panel multi-anode PMTs(Hamamatsu H8500), Nucl.Instr.Meth.(2004)
- [3] P. Krizan, S. Korpar, T. Iijima , Nucl. Instr. and Meth. A 565 (2006) 457.
- [4] 大場隆人、中央大学、修士論文 (1998)
- [5] 田端岳彦、千葉大学、修士論文 (2002)
- [6] 小西正信、千葉大学、修士論文 (2005)
- [7] 小酒井良延、名古屋大学、修士論文 (2005)
- [8] 福嶋知一、千葉大学、修士論文 (2006)
- [9] 田端誠、千葉大学、修士論文 (2006)