11/24/2006 FIFC

J-PARC E15 実験

A search for deeply-bound kaonic nuclear states by in-flight ^{3}He(K^{-}, n) reaction

技術評価委員会　資料

目次

1　E15 実験概要

2　E15 実験で使用するＫ中間子ビーム運動量選択に関する妥当性

3　K1.8BR ビームライン（K1.8 ビームラインと同時に review 済）

4　実験装置

4.1　ビームラインスペクトロメータ

4.2　液体ヘリウム３標的

4.3　Forward spectrometer

4.3.1　中性子カウンター

4.3.2　Beam sweeping magnet

4.4　Cylindrical Detector System (CDS)

4.4.1　ソレノイド電磁石

4.4.2　崩壊粒子飛跡検出器　(CDC)

4.4.3　トリガーホドスコープ

4.4.4　Ｋ中間子崩壊Ｖｅｔｏカウンター

4.5　Data Acquisition System

5　予算状況

6　実験組織

7　安全面に関する事項

1. Ｅ１５実験概要

反Ｋ中間子－核子の sub-threshold resonance であるΛ(1405)はエネルギー的にＫ中間子－陽子質量より 30MeV 低いところに位置するストレンジネスを含むアイソスピン 0 のバリオンと分類されているが、純粋なクオークモデルの枠組み（クオーク３つから構成されていると考える）では説明することが非常に困難であることが長年知られている。Λ(1405)に深く関連する謎として、Ｋ中間子水素原子の強い相互作用によるアトミック準位のシフトの符号が理論値と異なり、「Ｋ中間子水素原子パズル」として PDG にも多くの紙面が割かれていた。近年、Λ(1405)についての理論的研究が進んではきたものの、“３クオークと５クオークの複合状態“であるという解釈、“３クオーク状態ではあるが、double pole resonance である”という主張など、未だ議論が続いている未解決問題である。そんな中、1997 年に KEK-E228 実験(KpX) がこの謎を解決に導いたが、この結果は同時に反Ｋ中間子－核子間に強い引力が働いていると理解されるようになった。“Λ(1405)はＫ中間子－陽子の束縛状態である”という考え方自体はそれまでにも議論されてきたが、赤石－山崎はその考えをさらに推し進め、その自然な拡張として、Ｋ中間子原子核の存在を予言した。この考えの非常に興味深い点は、非常に強い引力により系内の核子がその斥力芯を超えるほどの高密度の状態を形成する事が示唆される事に在り、そのような状態が見つかればカイラル対称性の理解に大きく貢献する事が期待される。

このＫ中間子原子核探索実験は、KEK E471,E548,E549 実験、DAΦNE-FINUDA 実験、さらには GSI-FOPI 実験などで精力的に行われてきたが、今のところＫ中間子原子核存否について決定的な証拠を得るに至っていない。
以下にこれまで行われた実験手法を表 １としてまとめる。

Experiemnt	System	Experimental method
KEK E471/E549	stopped K^-, ^{4}He	missing mass
FINUDA	stopped K^-, ^{6}Li,^{7}Li,^{9}Be,^{13}C, D_2	Invariant mass
BNL E930, KEK E548	in-flight K^-, ^{16}O,^{12}C	missing mass
GSI FOPI	Heavy ion reaction	Invariant mass

表 １　これまでに行われた実験および実験手法に関するまとめ

表１に示してあるとおり、これまでの実験では欠損質量法(missing mass)もしくは不変質量法(invariant mass)のいずれかの観点からＫ中間子原子核探索実験が

行われてきた。また、K中間子入射エネルギーも、静止法(stopped)と in-flight 法の違いが在り、それぞれ期待されるシグナルの収量、バックグラウンド面で一長一短が在る。

そこで E15 実験では、まず「最も基本的なK中間子原子核」である K^-pp 状態に注目し、"missing mass spectroscopy" および K^-pp 束縛状態の崩壊粒子をすべて測定する "invariant mass spectroscopy" 両面から測定する事でスペクトラムの解釈に関する不定性を完全に排除した実験を行う。これにより、そもそも K^-pp 束縛状態が存在するのか、さらにはΛ(1405)が本当に"K中間子ー陽子の束縛状態"であるのかどうかについての明快な結論を出すことを目指す。

具体的実験手法としては ^3He 標的を使い　In-flight (K-,n)反応での K^-pp の直接生成を行い、生成反応に伴う中性子と崩壊粒子の同時計測を行う。反応により前方に放出される中性子を 0 度方向に設置する中性子カウンターで測定し、K1.8BR ビームラインスペクトロメータで測定する入射K中間子ビームの運動量とあわせ、missing mass spectroscopy を行う。同時に、標的を被い囲むように飛跡検出器を設置、K^-pp の予想される崩壊モードである

$$K^-pp \rightarrow \underline{\Lambda}\, p$$
$$\underline{\Lambda} \hookrightarrow p\,\pi^-$$

において終状態として放出される $pp\pi^-$ を測定し、K^-pp の質量再構成を行う。標的を被い囲むように設置する飛跡検出器　(Cylindrical Detector System、CDS)は読み出し回路まで含め E15 実験のために新設する検出器である。

2. Ｋ中間子ビーム運動量選択に関する妥当性

実験で用いるＫ中間子ビーム運動量の選択は、Ｋ中間子束縛核の生成効率を最大にするように決定する必要が在り、反応に伴う運動量移行が入射Ｋ中間子運動量変化に較べて小さくＫ中間子の核に対する付着率があまり変わらないと仮定すると、

１）　Ｋ中間子ー核子反応断面積

２）　Ｋ中間子ビーム強度の運動量依存性

の二つの積を最大にすることと同値である。また、実際の生成検出効率は実験装置の分解能と比例するだけでなく、崩壊幅決定精度の上でもエネルギー精度を上げる事が重要である。このためさらに、

３）　Missing mass 分解能の入射運動量依存性

を加えた三つの観点から総合的に決定する必要がある。

まず図 1 にK⁻N素過程生成断面積の入射運動量依存性を示す。図からわかるとおり、K⁻N素過程生成断面積は入射Kビーム運動量約 1.0 GeV/c 近傍で最大値を取っていることが容易に読み取れる。J-PARC ハドロン実験ホールには DAY-1 実験開始時に２本のビームライン、K1.8 および K1.8BR であるが、高輝度 1.0 GeV/c Ｋ中間子ビームを得ることが出来るビームラインは K1.8BR のみである。よって、以後 K1.8BR のケースについて考えてゆく。図 2 にＫ中間子ビーム強度の運動量依存性を示す。ビーム強度自身は運動量に対し単調増加している。ここで問題の(ビーム強度 X 反応断面積) の運動量依存性を図 3 として示す。

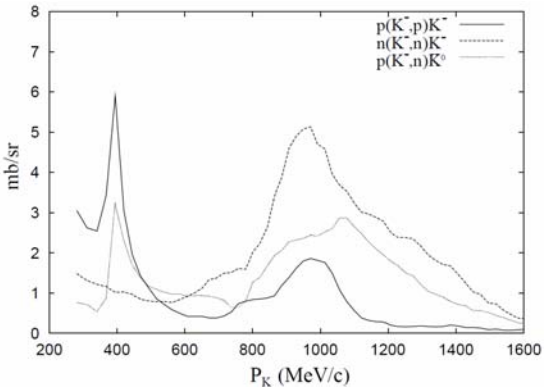

図　1　（Ｋ－,Ｎ）素過程反応断面積（PRL83-4701）

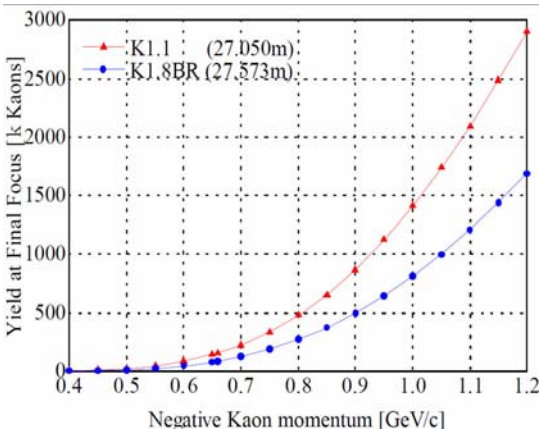

図 2　K- beam 強度の入射運動量依存性

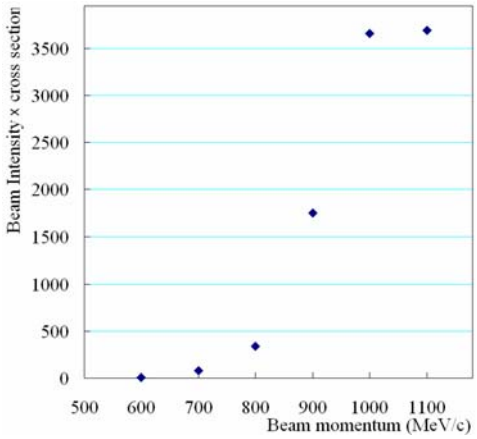

図 3　(ビーム強度 X 反応断面積)の運動量依存性

図 3 から、本実験にとって最適なビーム運動量は 1.0GeV/c 以上ということであるということが出来る。ただし、K1.8BR ビームラインで得られる最大ビーム運動量は 1.1GeV/c であることを考慮すると、本実験にとっての最適運動量領域は

K中間子ビーム運動量　＝　1.0 GeV/c～1.1 GeV/c

であると言う結論に至る。

さて、本実験では　^{3}He(K-,n) 反応において K-pp 束縛状態を生成、ビーム軸方向（0 度）に放出される中性子の運動量を測定し、入射K中間子ビーム運動量と総合することで missing mass を導き出し、K-pp 束縛状態の存否を明らかにすることがひとつの目標である。図 4 に反応に伴う運動量移行(前方中性子運動量と入射K中間子運動量の差)をビーム運動量の関数で表したものを示す。図は、先程仮定した運動量移行の入射K中間子運動量に対する依存性が小さい事を示すと同時に、K中間子束縛核生成シグナルに相当する中性子は反応により入射ビーム運動量以上の運動量で前方に放出されるということを意味している。中性子の運動量は中性子の飛行時間（Time-of-flight）と飛行距離（flight path length）から求めるため、飛行距離一定

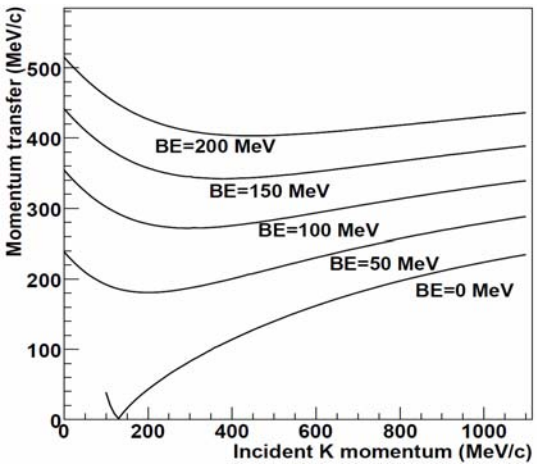

図 4　^{3}He(K−, n) 反応において中性子が受ける運動量移行

の場合、運動量測定の精度を上げるためには出来るだけ低い入射ビーム運動量で実験することが好ましい。たとえば、飛行距離を 12m に固定、中性子カウンターの時間分解能を 150ps と仮定した場合、最終結果として得られる missing mass の分解能は

ΔMx (FWHM)= 28 MeV/c^2 @ K_{beam}=1.0 GeV/c

ΔMx (FWHM)= 38 MeV/c^2 @ K_{beam}=1.1 GeV/c

となる。

以上のことを総合し、我々は本実験をＫ１．８ＢＲビームライにおいて 1.0 GeV/c のＫ中間子ビームを用いて行うこととする。

3. K1.8BR ビームライン（K1.8 ビームラインと同時に review 済）

4. 実験装置

4.1 ビームラインスペクトロメータ

K1.8BR のビームスペクトロメータは、SQDQ で構成される電磁石系とその上流・下流に設置される飛跡検出器、トリガー並びに TOF 測定用のプラスチックシンチレータ、K 中間子とπ中間子の弁別のためのチェレンコフカウンターで構成されている。図 5 に K1.8BR のビームラインスペクトロメータの構成を示す。

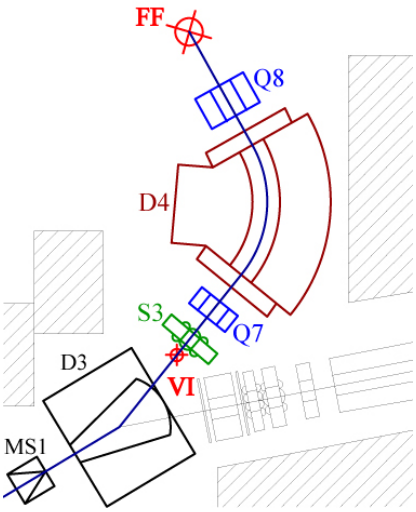

図 5 K1.8BR ビームライン

SQDQ で構成されているビーム光学系は、六極電磁石から上流に 30 cm 離れたところにある VI 点と最下流の最終フォーカス(FF)点 で point to point になるようにデザインされている。TRANSPORT を用いて計算された 1 次のトランスポート行列要素は、**R11=-0.36, R12=0, R16=1.06 cm/%**となる。この光学系において VI と FF での位置測定精度を **σ =0.2 mm** と仮定すると、運動量分解能 dp/p は **0.02 %（rms）**となり、後述する前方中性子に対するエネルギー分解能に較べて十二分に高い。このため、ここで重要となるのはチェンバーの耐計数率である。

K中間子運動量 1.0 GeV/c を VI での DAY-1（30 GeV, 9 μA, 0.7 sec flat top）時の荷電粒子計数値は、TURTLE を用いたシミュレーションの結果、

2.8 MHz/plane@ＶＩ および 1.1 MHz/plane@ＦＦ

と見積もられる。また、ＶＩおよびＦＦにおけるK中間子ビームの拡がりを図 6-a）および図 6-b）として示す。

図６ a)によると、ビームが x 軸に対し -5cm 付近でピーク構造を持っていることが読み取れる。ビーム上流飛跡検出器をＶＩ点に設置する場合、この X=-5cm 付近が最も計数率が高いということになる。

ここで、1 次ビームの条件として、陽子の運動量 30GeV/c, beam current を 9μA を仮定したとき、VI 点において X= -5cm 付近の single hit rate を Decay TURTLE により算した結果、140kHz/0.5cm を得る。このことを考慮し、飛跡検出器を設計する必要がある。

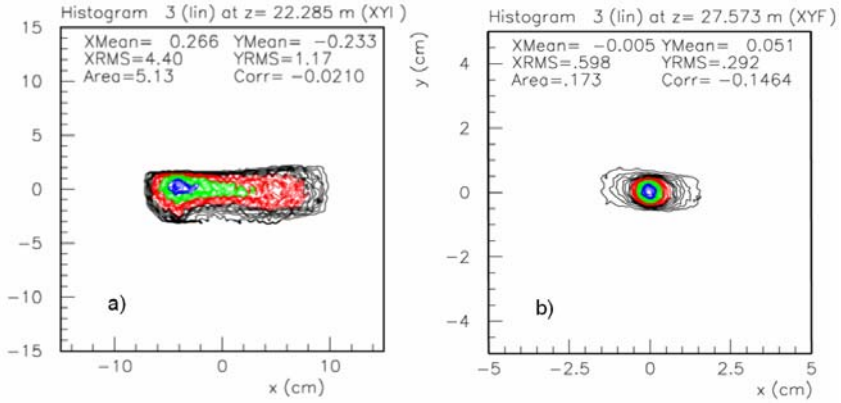

図 6　K中間子ビームの広がり　a）ＶＩ点，　b）ＦＦ点

3.1.1　　ビームライン飛跡検出器

本実験では、ＶＩおよびＦＦの上流に飛跡検出器　ＢＬＣ１およびＢＬＣ２を設置する。ＢＬＣ１として、ＫＥＫ－ＰＳ　Ｅ４７１およびＥ５４９実験で使用してきたビームラインドリフトチェンバー（ＢＬＣ）を使用することする。以下にＢＬＣ１のパラメータを示す。

有効面積	16cm X 16 cm
ワイヤー構成	X-X’-Y-Y’ ４セット（計 16 planes）
アノードワイヤー数	32 wires / plane　（計 512 wires）
セルサイズ	5 mm cell (2.5mm drift length)

また、下流部分、ＦＦ上流に設置するＢＬＣ２としては、ＫＥＫ－ＰＳ Ｅ５４９実験で製作、使用したプロトンドリフトチェンバー（ＰＤＣ）を設置する。以下にＢＬＣ２のパラメータを示す。

有効面積	25cm X 25 cm
ワイヤー構成	X-X’-Y-Y’ ４セット（計 16 planes）
アノードワイヤー数	32 wires / plane　（計 512 wires）
セルサイズ	8 mm cell (4.0 mm drift length)

ワイヤーチェンバー　Front-End electronics としては、現在、測定器開発グループ谷口氏が開発している、時定数が短く、Pole-Zero Cancellation が組み込まれた新しい　preamp-shaper-discriminator ASIC (ASD chip)を実装した ASD board を製作し使用する。ASD board の試作は、新しい ASD チップが使用可能となる H19 年度始めに行う。

ASD board 上で信号はデジタル化（LVDS 信号）され、最大 8m離れたところに設置する COPPER system、FINNESE Card multi-hit TDC にケーブルで送り、データ処理後、下流の Event builder へ転送する。

3.1.2 チェレンコフ検出器

ビームスペクトロメータから出てくるＫ中間子ビーム中に含まれるπ中間子をターゲット直前で識別するために、我々は Aerogel をラディエーターに持つチェレンコフ検出器を CDS すぐ上流に設置する。チェレンコフ検出器の信号は TKO システム　Charge-ADC および TDC で収集する。

3.1.3 ビームホドスコープ　（ビームライン　ＴｏＦ）

ビームライン K1.8BR においては、VI – FF までの距離が約 4.4m である。E15 実験で使用するビーム運動量が 1.0GeV/c であるため、Ｋ中間子とビーム中バックグラウンドであるπ中間子では VI – FF 飛行時間で約 1.6 ns の時間差が生じる計算となる。そこで、offline データ解析における粒子識別を目的とした飛行時間差測定系（ToF）、ビームホドスコープ、を VI – FF に設置する。測定器としては ToF 測定装置として最も信頼できるシンチレータの両端を光電子増倍管で読み出す構造とする。VI および　FF に設置するカウンター構成は以下の通りである。

	シンチレータサイズ　mm^3（幅X長さX厚	セグメント数	有効面積 mm^2
BH1(@VI)	10x80x5	20	200x80
BH2(@FF)	5x60x5	10	50x60

表 2　ビームホドスコープの概要

ビームホドスコープ読み出し回路は既存の TKO Charge-ADC および TDC で収集する。

3.2　液体ヘリウム３標的

E15 実験の検出器系は CDS を中心として標的のほぼ全方位を検出器で覆う構成になっており、この検出器系に組み込むために液体ヘリウム３標的は標的容器と冷凍器を離した L 型の構造をしている。標的は KEK-PS E471, E549, E570 実験に使用された超流動ヘリウム４標的を改良し使用する。図 7 に液体ヘリウム３標的の構成を示す。

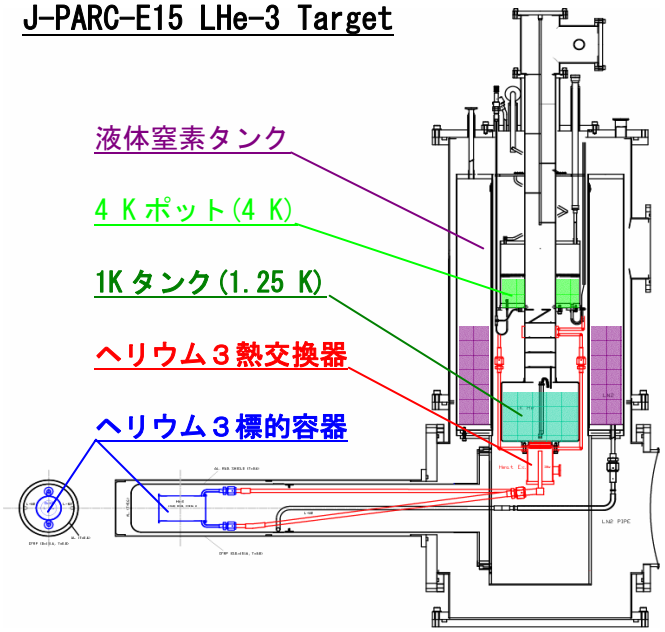

図 7　液体ヘリウム３標的の構成

3.2.1　ヘリウム 3 熱交換器

超流動ヘリウム４標的の冷凍器システムは、ポンプによる減圧で 1 K 部分（標的容器とリザーブタンク）を 1.25 K まで冷却し保持することができ、このリザーブタンク底部に新たにヘリウム 3 用の熱交換器を取り付けることで ^{3}He 液化させる。熱交換器は熱伝導の良い無酸素銅で製作し、上部には液体 ^{4}He との接触面積を増やすためにフィンが取り付けてある。図 8 に試作ヘリウム３熱交換器の写真を示す。

図 8　ヘリウム３熱交換器

外部より気体で導入される ^{3}He は、リザーブタンク上部の配管で予備的に冷やされ後熱交換器へと導かれる。^{3}He の 1atm での沸点は 3.19 K で、沸点における密度 0.059 g/ml、気液比 438、潜熱 6.96 J/g であり、温度 1.3 K 以下では密度は 0.081 g/ml となる。到達温度 T_4=1.25 K の超流動ヘリウム４冷凍器を用いた場合の ^{3}He の温度 T_3 は以下のようになる。

$$T_3 = T_4 + dT_{4He\text{-}Cu} + dT_{Cu} + dT_{3He\text{-}Cu}$$

ここで、$dT_{4He\text{-}Cu}$, dT_{Cu} , $dT_{3He\text{-}Cu}$ はそれぞれの境界と固体内における温度上昇である。銅の

熱伝導率:λ_{cu} = 1.0 [W/cmK]と表面積から、T_4 = 1.25K からの温度上昇を計算すると図７のようになる。超流動ヘリウム４冷凍器の１K 部品への熱流入の測定値はリザーブタンク内の液面計の減少速度から約 0.2 W である。主な熱流入が熱輻射であると考えられるので、超流動ヘリウム４の標的容器とリザーブタンクの表面積がほぼ等しいことから、ヘリウム３熱交換器から下流の部分全ての熱流入は約 0.1W と見積もられる。この熱流入に相当する温度上昇は 0.05 K であり、^{3}He 標的を 1.30 K で運転する事が可能となる。

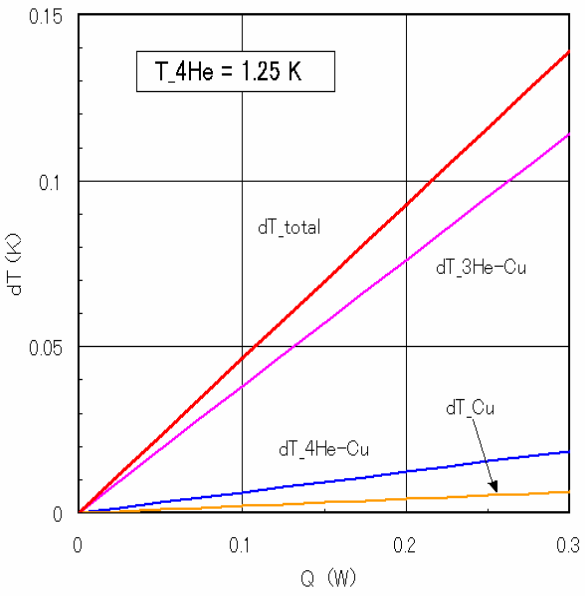

図 9　液体３Ｈｅ標的の温度上昇

600 ml のターゲットに必要な^{3}He は標準状態でおよそ 380 リッターであるが、流入が計算以上に大きくここで求めた温度以上でのオペレーションを余儀なくされた場合の余裕と、液面調整用の余裕と考慮して最低 400~450 リッターの ^{3}He が必要となる。熱交換器から標的容器までの配管が長いため本標的システムでは熱交換器と標的容器を繋ぐ配管を 2 本にし ^{3}He 循環させることで ^{3}He 自体を冷媒として温度勾配を小さくする。

図 11 に ^{3}He 循環方式を示す。逆流防止のために導出管（3/8 インチ）は、導入管（1/4 インチ）より直径の大きなものを使用することで帰路側のインピーダンスが常に小さくなるように設計されている。

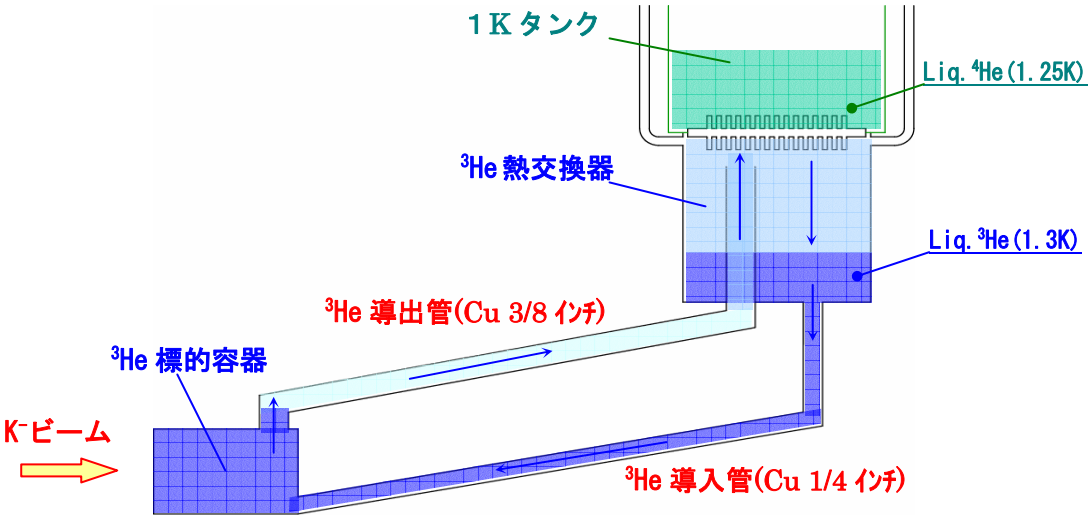

図 10　^{3}He 循環方式

3.2.2　ヘリウム 3 標的容器

^{3}He は大変高価であるため、標的容器の破壊によるガスの損失は絶対にあってはならない。したがって、標的容器は差圧 1 気圧に十分耐えるように設計をする必要がある。しかし、反応粒子のエネルギー損失や多重散乱等のバックグラウンド軽減のために、標的容器に使われる物質量は可能な限り減らしたい。そこで、フレームとビーム軸方向のウィンドウをステンレスにし、胴まき部分をベリリウムで製作することにした。図 12 に ^{3}He 標的容器の設計図を示す。ビーム軸方向のウィンドウに使用されるステンレスの厚さは 0.1 mm、胴まき部分のベリリウムの厚さは 0.2 mm である。構造計算ではウィンドウにほんの少し曲率を与えることで耐圧 1 気圧を達成できている。次にテストのために試作器を製作しテストを行った。試作器の写真を図 12 に示す。ベリリウムは高価な材料であるため今回の試作器では胴まきの部分に厚さ 0.1 mm のステンレスを代用した。耐圧試験の結果、差圧 2 気圧で十分な強度を持つことがわかった。

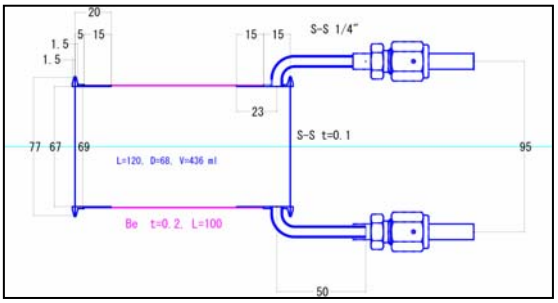

図 12　^{3}He 標的容器の設計図

図 12　試作 ^{3}He 標的容器

3.2.3　ガスハンドリングシステム

標的容器と同様の理由により、操作ミスによるガス損失を防ぐため、安全で効率良くガスを使用、保管ができる図 13 のようなガスハンドリングシステムの製作を予定している。このシステムは ^{3}He を大気圧程度で保管するためのタンク、液体窒素を使ったガス純化装置、圧力差をつけガスの導入、回収を行うための気密性の高い真空ポンプ、バルブ、配管、圧力センサー、流量計で構成され標的内部に重力だけで ^{3}He を循環させる事が出来なかった場合のバックアッププランとして、このシステム使って強制的

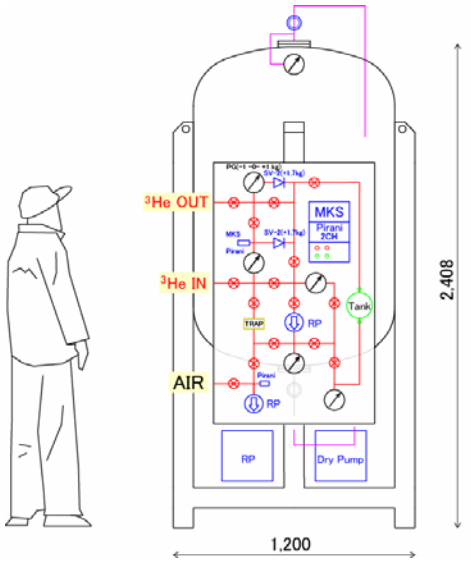

図 13　ガスハンドリングシステム

に循環させることを考えている。

3.2.4　開発状況

冷凍器本体の改造、熱交換器、ヘリウム３用の配管、試作標的容器が完成し既に KEK に納品されている。現在これらの組立作業と内部センサーの結線作業が行われている。図 14 に開発状況の写真を示す。開発の予定としては、2006 年中には 1 度全てを組み上げた真空・冷却テストを実施する予定である。その際 ^{3}He ガスの代わりに ^{4}He ガスを用いて、到達温度、熱流入、ガス内部循環などを綿密に調べ、改良等を進めていく。来年度夏には ^{3}He を使わない全てのテストを終え、来年度末の完成を目指している。

図 14 開発状況

3.3 Forward spectrometer

3.3.1 中性子カウンター

本実験では ^{3}He(K^{-},n) 反応でビーム入射軸（0 度）方向に放出される中性子を如何に効率よく、さらに優れたエネルギー分解能で検出するかが大きな課題である。我々は、中性子検出方法としてはプラスチックシンチレータによる飛行時間差測定法（Time-Of-Flight, TOF）を用いることとする。検出器としては KEK-PS E549 中性子カウンターを移設し使用する。中性子カウンターにより測定する missing mass の分解能は、中性子の Flight path length が長いほど精度が上がる。以下に、中性子カウンターの時間分解能を 150 ps (σ)とし、入射粒子のエネルギー分解能、Δp/p=0.1%、と仮定したときの missing mass 分解能と flight path length の関係を図 15 に示す。左から flight path length が 11m, 12m そして 13m としたときである。

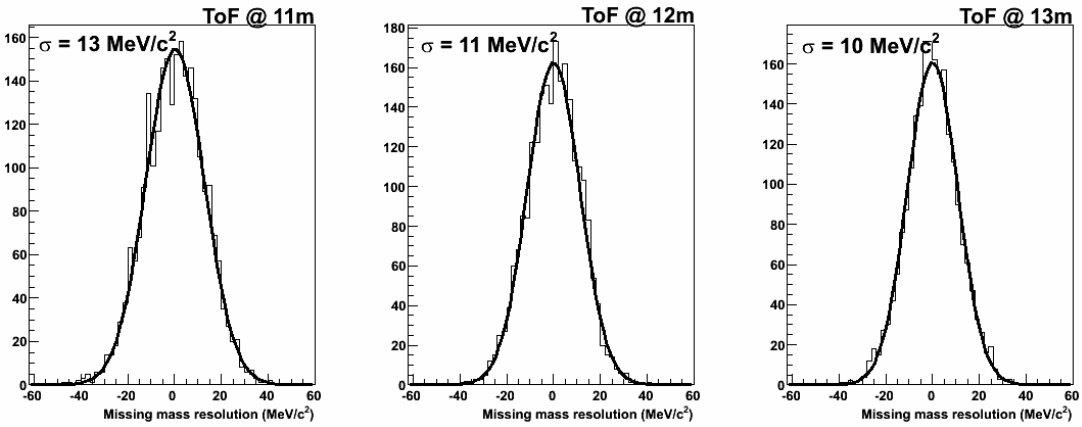

図 15 中性子飛行距離を変えたときの Missing mass 分解能

E15 実験では、中性子カウンターを K1.8BR 実験エリアで許される最大 Flight path length である標的中心位置から 12m後方に中性子カウンター表面が来るように設置する。図 16 に、K1.8BR ビームラインの実験エリア配置図を示す。このときに予想される missing mass 分解能は 12 MeV/c^{2} (σ)すなわち 28 MeV/c² (FWHM)となる。中性子カウンターの読み出し回路については、既存の TKO システム Charge-ADC および TDC を用い収集する。

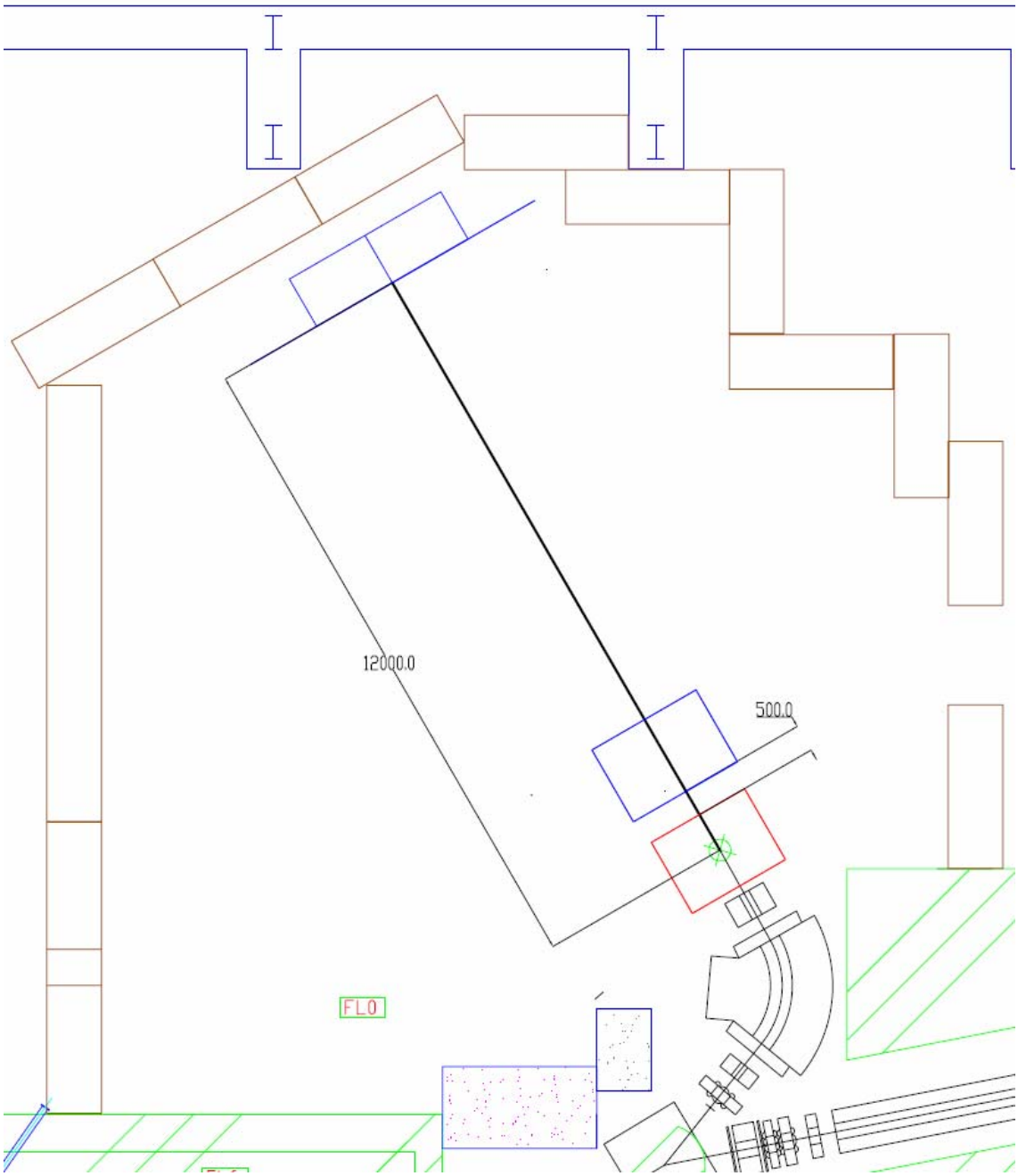

図 16　K1.8BR 実験エリア配置図

3.3.2 Beam sweeping magnet

Beam sweeping magnet は CDS の下流に設置する２重極電磁石である。
本電磁石を設置することにより、標的で反応しなかったＫ中間子ビーム飛跡をビーム入射軸（0 度）から遠ざけ 0 度方向に設置する中性子カウンターへのビーム粒子の直接ヒット、さらに、ビームＫ中間子の Decay-in-flight から来る荷電粒子のヒットを削減できる。以下に中性子カウンター表面の位置、すなわち標的中心から 12m 離れた位置での予想されるビームの運動量空間での広がりを Beam sweeping magnet　に励磁する磁場強度の関数として示す。

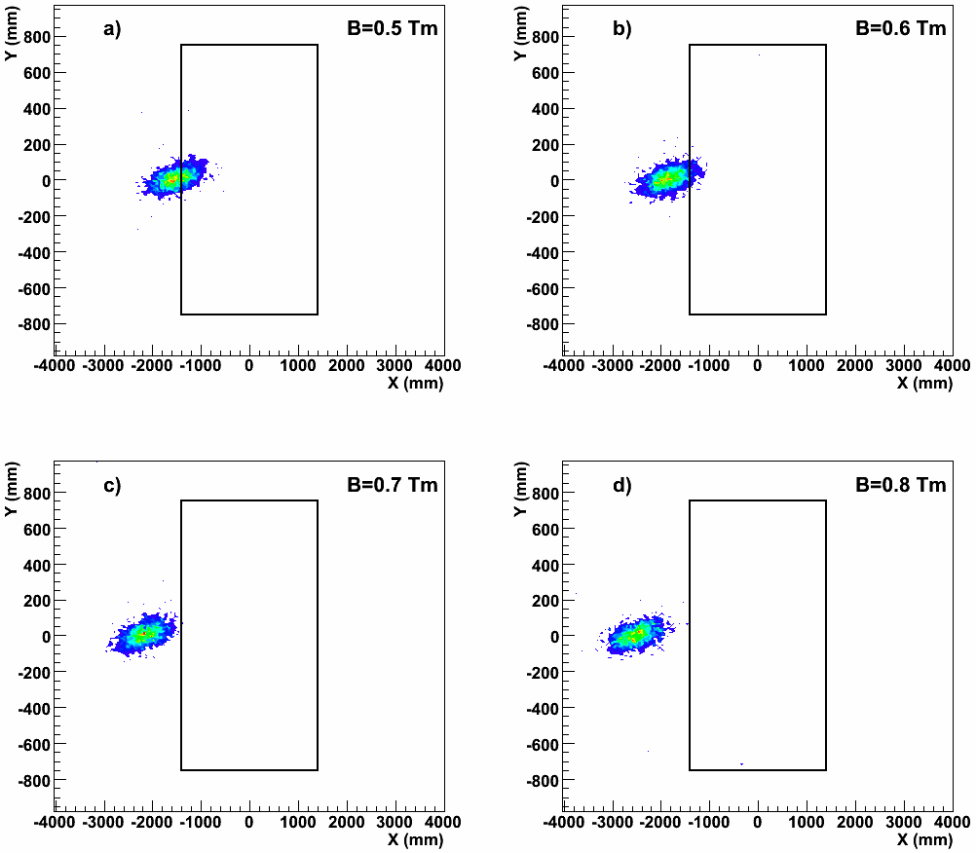

図 17　Dipole 磁場を変化させたときの予想される K 中間子ビームの広がり＠ｚ＝１２ｍ。中央の box は中性子カウンターアクセプタンス

検出器シミュレーションの結果、磁石に必要な磁場強度として最低　0.6 Tm 以上が必要であること得た。
以上を満たす電磁石としては以下の３つをあげることが出来る。
KURAMA（KEK-PS K2 beam line)、牛若(KEK-PS π2 beam line)　もしくは
静（KEK-PS T3 beam line)。そこで、E15 実験 Forward spectrometer 用電磁石として上記のいずれかを使用したいと考えている。また、電磁石運転に必要な電源についても既存の電源を使用したい。

3.4 Cylindrical Detector System (CDS)

E15 実験において最も重要な検出器である **CDS** についてここに示す。**CDS** はソレノイド電磁石とその内部空間に設置される崩壊粒子飛跡検出器（Cylindrical Drift Chamber、**CDC**）、**CDC** の外側を被うように設置するトリガーホドスコープおよびCDC内部に設置するシンチレーションカウンターであるK中間ｂ子崩壊Ｖｅｔｏカウンターで構成された複合検出器群である。本検出器は、^{3}He(K-,n) 反応で生成される K^-pp 束縛状態の崩壊粒子であるΛ及び陽子を高い検出効率で同定することを主眼に設計したものである。また、再構成された K^-pp 束縛状態の不変質量分解能が少なくとも現在理論的に予言されている K^-pp 束縛状態崩壊幅、60 MeV/c^2 (FWHM) を決定できる分解能である 40 MeV/ c^2 以下となるよう設計する。

そこでまず、目標分解能達成に必要な CDS に必要なパラメータの評価を以下に行う。まず、ソレノイド電磁石中を運動する粒子の運動量分解能が以下のように表現できることは良く知られている。

$$\delta P = \sqrt{\left(\frac{\delta P_T}{\sin\theta}\right)^2 + \left(P_T \frac{\cos\theta}{\sin^2\theta}\delta\theta\right)^2}$$

P_T は横方向運動量をあらわす。δP_T は横方向運動量分解能、$\delta\theta$ は polar angle に対する分解能である。さらに、δP_T は以下のように分解できる。

$$\frac{\delta P_T}{P_T} = \sqrt{\left(\frac{\delta P_T}{P_T}\right)_m^2 + \left(\frac{\delta P_T}{P_T}\right)_{MS}^2}$$

ここで、$(\delta P_T/P_T)_m$ および$(\delta P_T/P_T)_{MS}$ はそれぞれ、以下のパラメータ

$$\begin{aligned}
\sigma_{r\phi} &= \text{special resolution in the } r-\phi \text{ plane per wire (m)} \\
L &= \text{lever arm length (m)} \\
B &= \text{magnetic field (T)} \\
A_N &= \frac{720}{N+5} \text{where N is the number of sampling points} \\
\beta &= \text{velocity of the particle} \\
X_0 &= \text{radiation length of chamber gas.}
\end{aligned}$$

を用い次のように表現できる。

$$\left(\frac{\delta P_T}{P_T}\right)_m = \frac{P_T \sigma_{r\phi}}{0.3 L^2 B}\sqrt{A_N} \quad \text{および} \quad \left(\frac{\delta P_T}{P_T}\right)_{MS} = \frac{0.05}{\beta B}\sqrt{\frac{1.43}{LX_0}}$$

また、δθ　は

$$\delta\theta = \sqrt{(\delta\theta)_m^2 + (\delta\theta)_{MS}^2}$$

と分解でき、それぞれの項を

$$(\delta\theta)_m = \frac{\sin^2\theta}{L_{arm}}\delta_z \qquad \text{および} \qquad (\delta\theta)_{MS} = \frac{0.015}{p\beta c}\sqrt{\frac{L_{arm}}{X_0}}$$

と書くことが出来る。以上を整理すると、検出器のもつ運動量分解能は測定器内部の磁場強度 **B** および飛跡検出器の腕の長さ　**L²** の積の関数として評価できるということが出来る。そこで、最終的に得られる運動量分解能と **BL²** の関係を図 18 として示す。

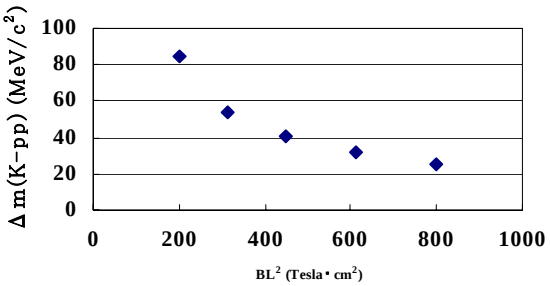

図 18　不変質量とＢＬ２の相関

この結果は、CDS で再構成される粒子の質量分解能が **40MeV/c** であることを要求すると、検出器としての **BL²** は最低　**450**（**Tesla cm²**）必要であることがわかる。そこで我々は、**B=0.5T**、**L=30cm** を最低限満足するように CDS を設計することとする。

このソレノイド運転磁場　**B=0.5T**、飛跡検出器（CDC）の腕の長さ **L=30cm**、さらに、ヘリウム標的の直径が **15cm** であることと、CDH として最低厚さ **3cm** のシンチレータを使用すること、CDC、CDH などを固定するためのサポート構造体の設置を考慮すると、製作するソレノイド電磁石内部空洞の大きさは最低 **r = 60 cm** の円筒が必要であると言う結論に至る。

図 19 に、我々の製作する CDS の概要をとして示す。

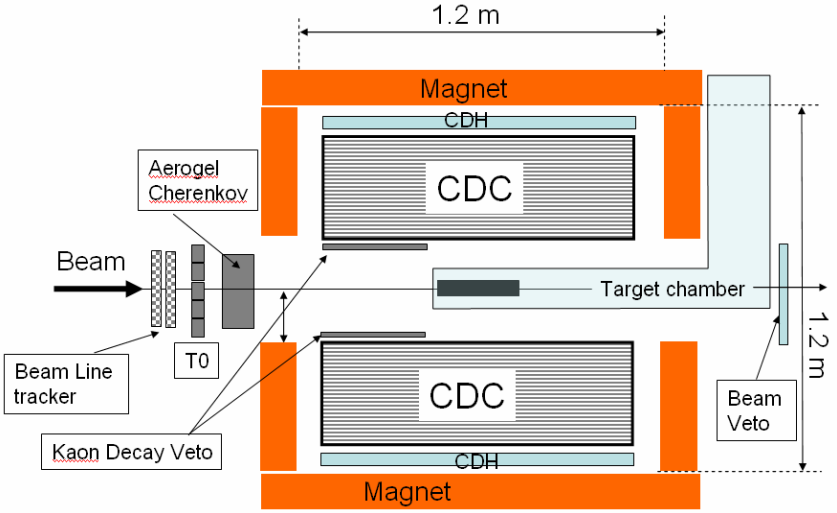

図 19　CDS システム概略図

3.3.1　　ソレノイド電磁石

本実験で使用するソレノイド電磁石に要求される性能を以下に示す。

１）　^{3}Ｈｅ標的、飛跡検出器 lever arm 長 **30cm** 以上を持つ CDC、
その周りに CDH のすべてを収めることが出来ること。

２）　検出器固定用のジグなど構造体が無理なく検出器と共存できる。

３）　内部磁場強度が最低 **0.5T** まで励磁できる。

４）　内部での磁場一様性を保つため、磁石周囲を鉄で被い、
さらにエンドキャップは鉄の蓋をつける。

５）　鉄の蓋にはビームおよび内部に設置する検出器からの信号線が
抜けるように穴をあけてある。

６）　以上の使用を満たしつつ、CDC が設置される領域で内部磁場均一性が
±２％以内となっている。

以上の６点を考慮しソレノイド電磁石の設計を行った。２次元磁場計算ソフトウエアーＰＯＩＳＳＯＮを用い計算した磁場強度分布を図 20 として示す。

図が示すとおり、CDC の領域において、磁場の均一性が±２％以内であることを確認した。そこで、この結果を元に、設計を進め、E15 実験用ソレノイド電磁石に関する基本的なパラメータを以下のように決定した。

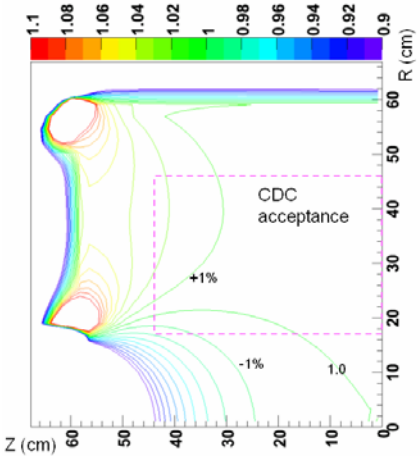

図 20　ソレノイド内部磁場マップ

<u>ソレノイド電磁石基本パラメータ</u>

口径	Φ１２００ｍｍ
磁極長	１２００ｍｍ
磁場強度	０．７Ｔ　（Ｍａｘ）
電流	１０００Ａ
電圧	３５０Ｖ
直流抵抗	０．３Ω
電力	３５０ｋＷ
水路	３４水路
重量	２０トン

Ｅ１５実験用ソレノイド電磁石は現在　平成１９年３月に納品に向けた準備が進んでいる。

3.3.2　　崩壊粒子飛跡検出器　(ＣＤＣ)

Ｅ１５実験 Cylindrical Drift Chamber (CDC) の概要を図 21 に示す。

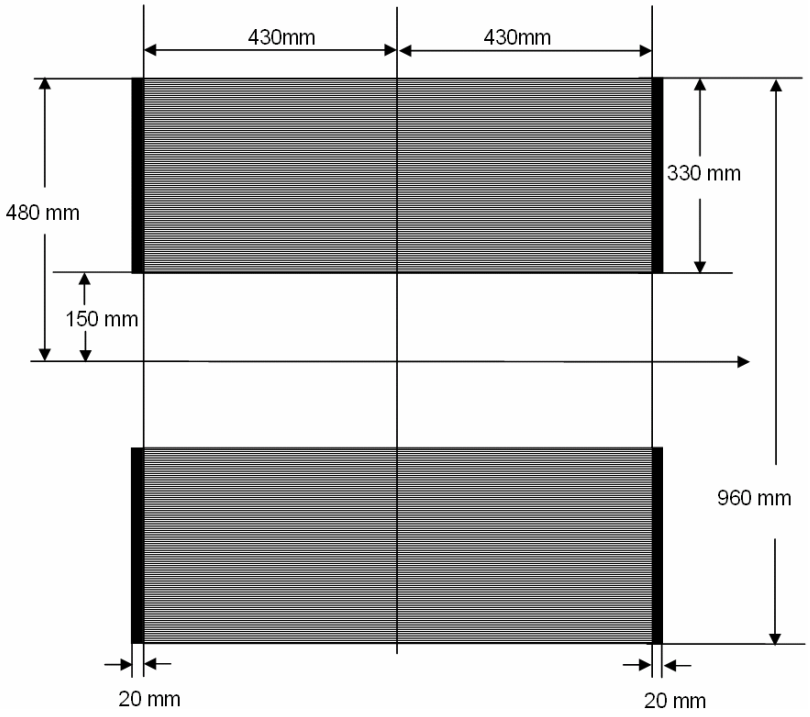

図 21　CDC 概要

Ｅ１５実験 CDC は 長さ 86 cm、内径 15cm、外形 48cm の円筒形の形状をしている。エンドプレートは厚さ 2cm のアルミニウム板で製作する。ワイヤーはフィードスルーコネクターを通してエンドプレートに固定する。円筒内側および外側の壁についてはワイヤーが作る応力を考慮し、さらに総合的に物質量を軽減するために、カーボンファイバーで製作する円筒を考えている。厚さについては現在検討中である。

セルの形状としては六角形構造とし、典型的に 1.5cm X 1.5cm サイズとする。六角形構造にすることで、CDC 上のほとんどのセルについて、ヒットポジションをセル内で円近似可能であるという利点を有する。これは、CDC 内部に合計１７層の読み出し層を持たせることになる。ワイヤー構成としては、ワイヤーがビーム軸に平行な Axial layer とビーム軸に対し角度を持たせた Stereo layer より構成する。 Axial layer ３層を持って　Axial super layer (A) を、Stereo layer ２層で Stereo Super layer (U or V) を構成させる。
この Super layer を CDC 内部に ＡＵＶＡＵＶＡ の計 7 super layer 設置する。最終的に E15 実験 CDC は 1842 個のセル（読み出しチャンネル）を有することになる。表 3 に CDC のレイヤーごとのワイヤー構成をまとめる。

Layer#	radius (mm)	Opening angle of a cell (deg)	# of cells	sense wire spacing (mm)	wire orientation	tilt angle (deg)
1	170	6.0	60	17.80	A	0.0
2	185	6.0	60	19.37	A	0.0
3	200	6.0	60	20.94	A	0.0
4	225	5.0	72	19.63	U	10.0
5	240	5.0	72	20.94	U	10.0
6	260	4.0	90	18.15	V	−8.0
7	275	4.0	90	19.20	V	−8.0
8	300	3.0	120	15.71	A	0.0
9	315	3.0	120	16.49	A	0.0
10	330	3.0	120	17.28	A	0.0
11	355	3.0	120	18.59	U	9.0
12	370	3.0	120	19.37	U	9.0
13	390	2.5	144	17.02	V	−10.0
14	405	2.5	144	17.67	V	−10.0
15	430	2.4	150	18.01	A	0.0
16	445	2.4	150	18.64	A	0.0
17	460	2.4	150	19.27	A	0.0

表 3　CDC ワイヤー構成

チェンバーガスとしては物質量の軽減を目的とし、Helium ベースのガスを用いる予定である。現在のところ　Hellium:Ethane =50%:50% を使用する予定である。

次に、ＣＤＣ内側から 3 super layer について 0.5T 磁場中での Garfield により計算した電場を図 23 に、50ns 等ドリフト時間等高線を図 22 に示す。

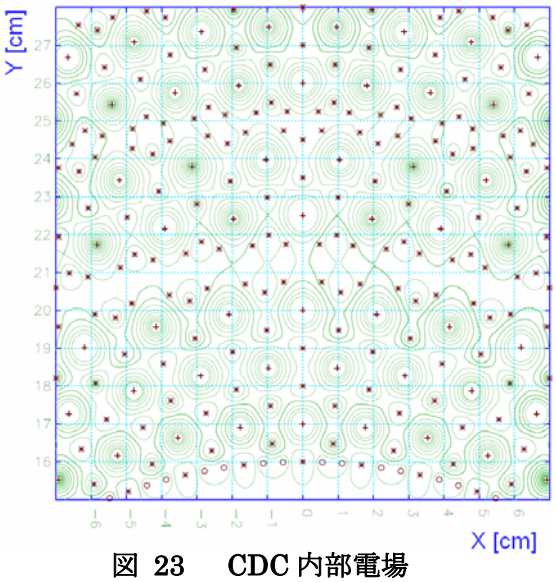

図 23　CDC 内部電場

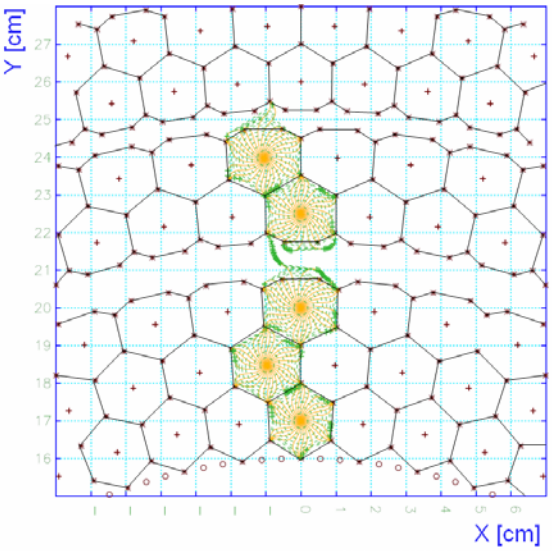

図 22　50ns 等ドリフト時間等高線

CDC readout system

CDC からの信号は　ビームラインワイヤーチェンバー読み出し回路と同様に、現在測定器開発グループ谷口氏が開発している、時定数が短く、Pole-Zero Cancellation が組み込まれた新しい　preamp-shaper-discriminator ASIC (ASD chip)を実装した ASD board を製作し使用する。ASD board は CDC end cap に実装され、ケーブルにてデジタル化（ＬＶＤＳ）された信号を CDC より取り出す。その後、LVDS 信号は E471-E549 実験で使用した LDVS-ECL 変換ボードを経由し、ECL 信号に変換、TKO system Dr.T II にて読み出す。

3.3.3　　トリガーホドスコープ (ＣＤＨ)

トリガーホドスコープはソレノイド電磁石内部 r = 50cm の位置に CDC を囲むように設置するシンチレータカウンターである。個々のシンチレータは 6cm x 3cm x 90cm (幅 x 厚さ x 長さ)　の大きさをもち、その両端に、光電子増倍管を取り付けた構造を持っている。全数で 50 本のシンチレータを用い CDC を囲むように設置する。使用する光電子増倍管はソレノイド電磁石中で運転するため、磁場耐性に優れたファインメッシュ型光電子増倍管（Hamamatsu, H8409）を使用することとする。

光電子増倍管からの信号読み出し回路としては既存の TKO システム Charge-ADC および TDC を使用する。Ｈ１８年度に、光電子増倍管５０本の購入を行い、全数Ｈ１９年３月に納品される。残り５０本はＨ１９年度に追加購入する。

3.3.4　　Ｋ中間子崩壊Ｖｅｔｏカウンター

^{3}Ｈｅ標的を CDC 中央に設置するため、Ｋ中間子と同定するための（π中間子でない）検出器　Aerogel カウンター　から　標的までの空間はＫ中間子の Decay volume となってしまい、Ｋ中間子崩壊から来る荷電粒子によるＣＤＨのヒット（特に $K^- \rightarrow \pi^- \pi^0$ モード）はまさに実験のトリガーレベルのバックグラウンドとなってしまう。そこで、Ｋ中間子崩壊が作る偽トリガーイベント除去を目的とし、Aerogel カウンターと標的の間に厚さ１ｃｍのシンチレータの円筒型検出器を設置する。読み出し方法としてはシンチレータに溝を掘り、Wave length shifting fiber を埋め込み、信号をソレノイド電磁石外部に引き出す。引き出されたファイバーはマルチアノード光電子増倍管につなぎ、信号を TKO システム Charge-ADC, TDC に送る。本検出器、実機製作へ向けたＲ＆Ｄは現在進行中である。

3.4 Data Acquisition System (DAQ)

E15 実験データ収集システムは KEK オンライングループ開発の COPPER System と既存 TKO System とが混在したシステムとなっている。 E15 実験装置と使用する DAQ システムをまとめると以下のようになる。

ビームラインスペクトロメータ	
飛跡検出器	COPPER
ホドスコープ	TKO
ＰＩＤカウンター	TKO
CDC, CDH	TKO
中性子カウンター	TKO

本実験においては、TKO システム、COPPER システムと言う違う概念を持つシステムが全体として共存しているため、矛盾なく event build するための安全策をあらかじめ講じておく必要がある。現在考えている仕様では、データ転送および event build を spill off の間に行う。ＫＥＫオンライングループにより開発されている COPPER システムでは各モジュールに対し外部から 3bits のカウンターを送ることが出来、さらに各モジュール内部で 24bits のカウンターを持っている。spill 毎にこの内部 24bit カウンターをクリアーすることで COPPER 上のイベントに対し個々に spill 中のトリガーＩＤをつけることが可能となる。一方、ＴＫＯシステムでは現在そのような機能は設定されておらず、COPPER 同様、TKO 用イベントカウンターを製作する必要がある。この新しい TKO 用イベントカウンター仕様決定および製作関しては、現在ＫＥＫオンライングループの協力を得て進めている。

5. 予算状況

本実験実施に必要な実験装置の建設は、Ｈ１７年度－２１年度の予定で認められている特定領域研究「ストレンジネスで探るクオーク多体系」（代表：永江知文）のうちの計画研究「Ｋ中間子が拓く超高密度クォーク物質の研究」を基に進めている。本計画研究の交付内定額の総計は 270,550 千円である。
本研究費のうち、実験準備費として使用できる費用（人件費、旅費等を除いた額）は　195,000 千円である。本研究費は主にＣＤＳ本体および読み出し回路群の整備および　^{3}Ｈｅ標的Ｒ＆Ｄ－実機製作に使用するものである。

以下に建設したものおよびこれから建設予定の装置、物品について項目別に概算見積もりを表 4 として示す。

	シンチレーター	50	4,000
	光電子増倍管	100	22,000
	光電子増倍管用HV電源		10,000
	K-decay veto		
	シンチレーター + WLS		300
	マルチアノードPMT	1	260
CDC読み出し回路			
	Amp-Shaper-Discri (ASD) chip	150	750
	ASD board	70	2,100
	ケーブル		5,000
ビームライン検出器 (ワイヤーチェンバー)			
	Amp-Shaper-Discri (ASD) chip	100	1,500
	ASD board	40	1,200
	TDC daughter card(COPPER)	40	2,400
	定電圧電源		2,000
	ケーブル		3,000
ビームライン検出器			
	Beam Hodoscope シンチレータ	30	300
^{3}He標的			
	^{3}Heガス		30,000
	標的R&Dおよび実機製作		10,000
DAQ, Trigger			
	COPPER用クレート	2	840
	COPPERメインボード	9	2,700
	COPPERプロセッサー	9	1,350
	Trigger モジュール		2,000
	Discriminator 等　回路計		4,000
	計算機　ディスクサーバー		4,000
実験装置架台等			
	CDC 架台、サポートフレーム		10,000
	検出器移設関係		5,000
		合計	194,700

表 4　予算概略

6. 実験組織

実験責任者： 岩崎 雅彦（理研）、永江 知文（ＫＥＫ）

測定器建設： 味村 周平（大阪大）、板橋 健太（理研）、應田 治彦（理研）、
大西 宏明（理研）、岡田 信二（理研）、阪口 篤志（大阪大）、
佐藤 将春（理研）、鈴木 隆敏（理研）、関本 美知子（ＫＥＫ）、
友野 大　（理研）、福田 共和（大阪電通大）、
藤岡 宏之（ＫＥＫ）、溝井 浩（大阪電通大）

^{3}He 標的： 飯尾 雅実（理研）、石元　茂（ＫＥＫ）

K1.8BR ビームライン関係：
ハドロンビーム建設グループ

以下に測定器建設に関する参加機関別の責任分担を示す。

CDS 建設

CDC 設計－建設
理研－ＫＥＫ－阪大－大阪電通大

CDH 設計－建設
理研－ＫＥＫ

ソレノイド電磁石
理研

ビームラインスペクトロメータ用検出器、中性子カウンター
理研

^{3}He 標的
理研－ＫＥＫ

ＤＡＱ
理研

7. 安全面に関する事項

1. 可燃ガス対策

飛跡検出器（ビームラインチェンバー　および　CDC）に使用する可燃ガス（イソブタン もしくは　エタン）については、製作時また設置前にガス漏れの確認を行う。さらに、ガス系の配管には注意を払い実験ホール外部への排気システムを整備する。また、ソレノイド電磁石内部に納まってしまう CDC から事故で可燃ガスがもれ、ソレノイド電磁石内部に可燃ガスが溜まることを防ぐため、実験中はあらかじめ、ソレノイド電磁石内部に乾燥空気を下流より流し続けることを検討する。

2. 高電圧に関する対策

飛跡検出器にかける高電圧についてはコネクター端子を露出させないよう設計することにより感電に対する対策とする。また、CDC に関しては、信号線（GND）は CDC　上流より読み出し、高圧線は下流より電圧を与える等設計段階から高電圧側、GND 側を区別し事故を未然に防ぐ努力をする。

3. 放射線防護に関する事項

実験エリア全体を遮蔽体で覆われた構造にする。

4. 実験用電磁石運転に関する事項

CDS ソレノイド は磁場の均一性を高めるため両端に蓋をつけている。このため、事故により冷却水が止まってしまった場合、磁石内部の温度が急上昇する恐れがある。磁石内部の検出器を事故による破損から守るため、電磁石水冷装置に取り付けた流量計は磁石電源インターロックと直結させる。また、安全性をたけめるため、実験中はソレノイド内部の温度をモニターすることをシフト員に対し徹底する。

5. ^{3}He 標的に関する安全対策

標的の断熱真空槽の真空度が 10^{-4}Torr 以下で ^{3}He の導入を開始するが、その際、断熱真空用のポンプの出口を、大型バルーンとガスハンドリングシステムに繋ぎかえる。そうすることで標的内部の容器破壊等で ^{3}He が断熱真空槽に洩れてしまった場合、バルーンに回収することができ、ガスハンドリングシステム単体でガスの純化作業ができるので、バルーンに回収された ^{3}He の不純物を取り除き再びタンクへ戻すことができる。