

# 現状報告及び夏のシャットダウン以前のビームについて ～KEK-PS E471 実験準備状況～

## E471 実験グループ 2002.2.19

### 1. 初めに

$K$  中間子は原子核中で核子 (特に陽子) と非常に強い引力的相互作用をし、原子核密度を異常に高める ( $\rho = 7 \sim 10 \times \rho_0$ ) ばかりか、この強い引力のため全アイソスピン 0 の準安定な軌道を形成することが予想されている [1]。このように密度が高いと、カイラル対称性の自発的破れが部分的に回復するはずであるが、上記の理論計算にはこの自由度は考慮されていない。実際にこのような状態が形成され系統的な研究が行われれば、バリオンがどのように質量を獲得するかの研究や、中性子星内の物理を実験室で直接研究する手段が開かれる。E471 実験は、世界に先駆けてこのような状態の特定を目指す物である。

### 2. 実験的傍証

最近、米国 JLab において一連の軽い原子核標的を用いた  $(e, e'K^+)$  実験が行われた [2]。これらのエネルギースペクトラムは、ハイパー核探査のために行われた物ではあるが、 $K$  中間子が核内に束縛されればそれに対応した構造が出現する可能性がある。図にそのスペクトラムを示す。

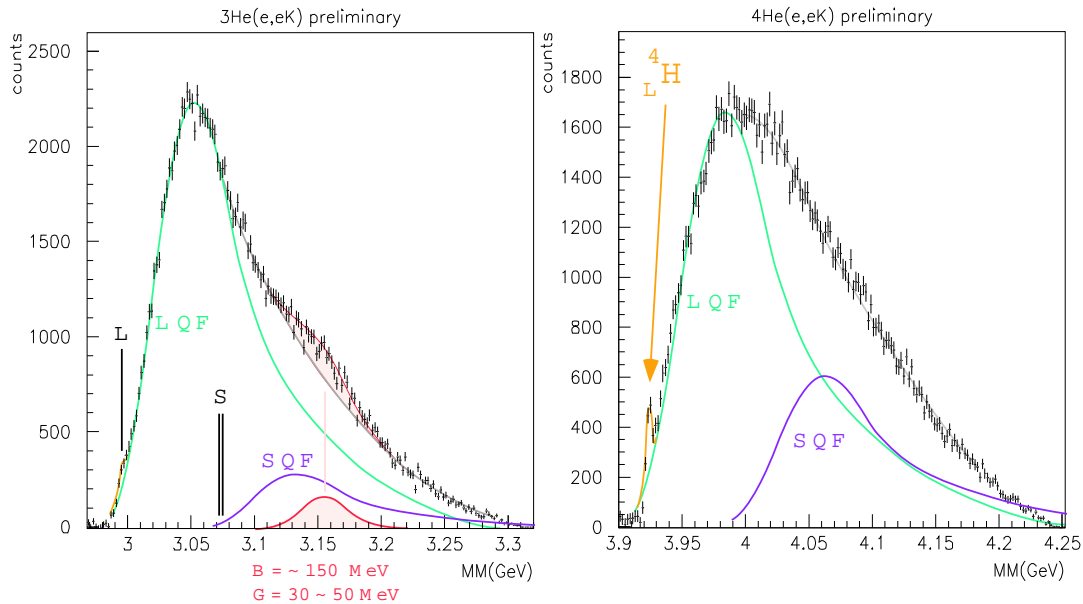


図 1: Jlab  $(e, e'K^+)$  実験スペクトラム。 ${}^3\text{He}$  標的のスペクトラムにのみ異常な盛り上がりが見られる。このスペクトラムは単純にはハイパー核生成ピークと  $\Lambda$  及び  $\Sigma$  quasi-free production ( $\Lambda, \Sigma$ - $QF$ ) の重ね合わせであると解釈できる。各々の  $QF$  スペクトラム形状は phase space と原子核の形状因子によって表されるので、この異常な盛り上がりを見逃すことは、 $\Sigma$ - $QF$  と  $\Lambda$ - $QF$  と  $\Sigma$ - $QF$  が核子のそれぞれ  $s$  波及び  $p$  波成分とのみ選択的に結合するという説明困難な仮定を置かざるを得ない。

図から分かるとおり、 ${}^3\text{He}$  標的には、 $K$  中間子束縛エネルギーにしておよそ 150 MeV の位置に幅およそ 30 MeV の異常な盛り上がりが存在する。このことは、 $K$  中間子深束縛核同定としては十分な根拠とは言えないが、その存在を示唆するデータとして注目される。このため、KEK PS-E471 における一刻も早い実験的検証が重要となる。

### 3. これまでの経緯と準備概要

E471 実験プロポーザルは、 $K$  中間子深束縛核生成分岐比が大きく、比較的同定が容易であると予想される  ${}^4\text{He}(\text{stopped}K^-, n)$  反応を用いて、最善と考える実験方法に基づく提案であった [3]。理論予想は、分岐比約 2%、束縛エネルギー 108 MeV、崩壊幅 20 MeV で在るが、分岐比・束縛エネルギーが小さくても幅が大きくても実験的検証は極端に困難になる。

必要になるビームタイムは、実験装置側からは主に

- 標的物質質量
- 中性子検出器立体角・検出効率(厚み)
- バージェックステンパー立体角

の3点から算出された。しかしながら、プロポーザル提出時の KEK を取り巻く状況から、

- ビームタイム  $\sim 1/2$
- 実験費  $\sim 1/3$

で実験を実現することが要請された。我々はこれにともない、実験装置を根本的に見直す作業から開始した。これに対する我々の現在の解決案は以下の通りである。

- 標的物質質量：  
E462 の静止パイオン吸収反応からの中性子スペクトルからこれに伴うバックグラウンドが少ないことが判明したため、標的物質質量を倍にする。
- 中性子検出器配置：  
プロポーザルにある総量  $3.5\text{ m}^3$  の中性子検出器は現実的でない。検出器サイズをさげて時間分解能を上げ、TOF に必要な距離を  $2.5\text{ m}$  から  $2\text{ m}$  とし、必要な総量を  $2.3\text{ m}^3$  に圧縮する。全体で多少エネルギー分解能が劣化するが、理論予想される自然幅以下(分解能 15 MeV)を確保する。
- 新設中性子検出器：  
中性子検出器は、その主要部分について KEK の実験費とは別に予算を確保し、時間分解能の良いプラスチックカウンターを総量で  $1\text{ m}^3$  新設する。
- E462 中性子検出器：  
KEK ですでに時間分解能について実績のある中性子検出器  $0.5\text{ m}^3$  を流用する。

- CMU 中性子検出器：  
BNL-E931 で使用中の中性子カウンター 約  $1 m^3$  を3月末を目処に KEK に輸送する。時間分解能は十分でないが、TOF 距離で性能を確保する。
- 理研 中性子検出器：  
総量  $0.3 m^3$ 。性能的には十分であるが、体積当たりの PMT 数が多く読み出しに負担がかかる。回路の手当が出来ると言う条件の下に増強を考える。

これらが総て満たされれば、初期の目的を達成することは必ずしも不可能ではない。E462 中性子検出器については、現在ソウル大の Bhang 氏を中心として K6 に於いて「p-shell ハイパー核の弱崩壊研究」の為の実験提案がなされる予定であり、もしこれが認められる場合には、実験提案通り5月中にデータ収集が修了するよう、ビームの配分に考慮がなされることを期待したい。これが満たされない場合、非常に時間分解能の良い KEK の検出器の流用が不可能になり、本実験に重大な支障をきたす。

#### 4. 夏のシャットダウン以前のビームが不可欠な理由

実験を指定されたビームタイム内に完了するための最大の問題点は、実験の立ち上げ期間である。実験の立ち上げ期間は、実験の種類に依存するが、我々のように総てを新しく開始するためにはそれなりの期間が不可避免的に必要であり、圧縮できる性質の物ではない。秋の本実験を効率よく遂行するために、夏のシャットダウン以前に充分時間的余裕を持って確認しておかなければならないことを以下に列挙する。

- 1) くさび形ビーム減速材最適化とビームチューニング
- 2) タイミングカウンターを使った反応時間計測の最適化
- 3) TDC 情報 2重 discri. の必要性の検証
- 4)  $K^-$  ビーム取り出し時の実験エリア内の中性子バックグラウンド・マップ計測
- 5) 実験システム全体のデバッグ

この理由としては、1)  $K^-$  中間子を非常に薄い標的に効率よく止める必要があり、その為にくさび形減速材で運動量分散を抑える、2) 液体ヘリウムの阻止能が低いためタイミングカウンタ (T0) だけでは反応時間決定精度が低いが、クライオスタットの窓材とそこから上流の減速材の距離を最適化し静止時間分散を抑える、3) 一般に TOF 分解能を要求する場合シグナルを検出器近傍と TDC 直前とで2重にデジタル信号に掛けるが、我々の中性子検出器は数量が多いので、可能であれば1回で済ませたいが、最低限必要となる 300 psec の分解能が確保できるかどうか現場で試験する必要があることであり、これらはシミュレーションだけに頼るのは危険である。4), 5) についても本実験以前にデータを収集し試験する必要がある。以上まとめたように、夏以前に我々が必要なのはビーム強度ではない。最大強度によるテストも必要ではあるが短時間で良く、K6 の実験提案に必要なビームに対する影響は殆どなく両立する。

去年12月の主幹との会合で、夏前のビーム使用を示唆していただいた。我々にとって極めて重要であり、それ無しには実験は極めて困難であると考え。何故なら、秋に立ち上げを開始し仮に装置全体に関わる支障が発見された場合、ビームタイム中に十分な対処は

可能でない。特に、K5はこれまで中性子バックグラウンドと言う観点から十分な調査がなされたことはなく、シールド増強等の必要が生じた場合これを短期間で完了することは不可能である。

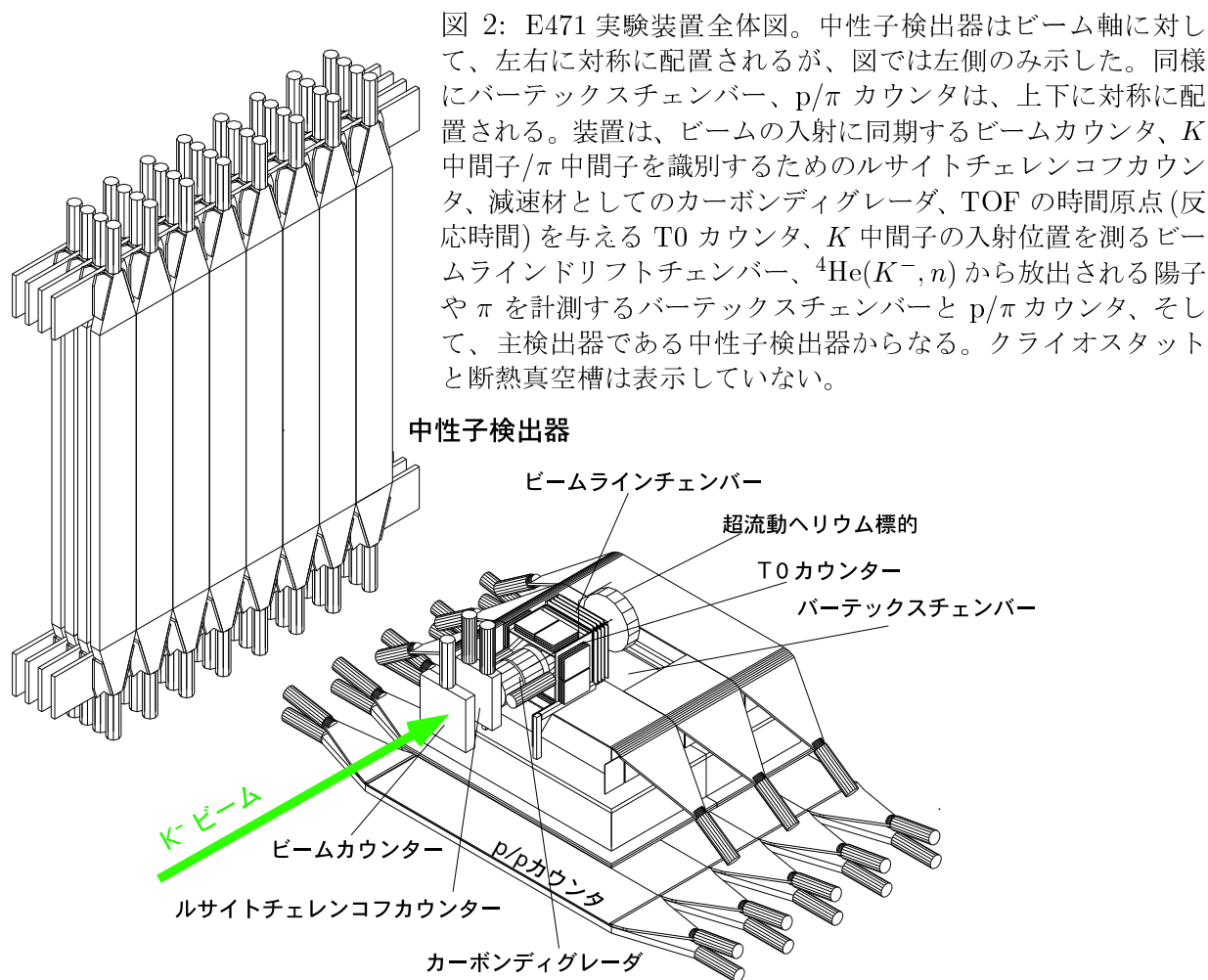
また1月の会合で、可能であればアサインされたビームタイムを延長することなく5月に実験開始が可能であるかが問われた。第1に、アサインされたビームタイムはプロポーザル承認時のKEKの厳しい事情による物である。我々もそれを理解しそれに合わせるべくつとめてはきたが、既に述べたとおり、実験の立ち上げ期間の圧縮は原理的に不可能である。第2に、通常実験の立ち上げ期間と本実験の間には時間的猶予が必要である。立ち上げ期間をビームタイムとして計算するのであれば、事情の変化に伴い、是非とも立ち上げ期間を別途お認め頂きたい。

さらに、前会合で我々は実験装置全般を可能な限り5月のビームタイム前に完成するよう全力で努力することを約束した。以下にその詳細を述べる。



## 実験装置の概要

実験装置は KEK-PS K5 ビームラインに設置され、おおまかには以下の三つの部分に分けて考える事ができる。すなわち、 $K$  中間子を静止させ、 $K$  中間子の深い束縛状態生成反応  ${}^4\text{He}(K^-, n)$  を起こす超流動ヘリウム標的システム、放出される中性子を検出する中性子検出器、さらに前記反応に起因する事象を選択的に測定するためのトリガー系である。図 2 に示すのが、実験装置の全体図である。



$K$  中間子は、K5 ビームラインの最終四重極電磁石から入射し、図のように i) ビームカウンタ、ii) ルサイトチェレンコフ検出器、iii) カーボンディグレーダー、iv) T0 カウンタ、v) ビームラインドリフトチェンバーの順に通って標的に到達する。各装置の概略と準備状況については後述する。標的中で、 ${}^4\text{He}(K^-, n)$  反応により放出される中性子のエネルギーは、標的から約 2 メートル離れて置かれた検出器を用いて飛行時間計測法によって計測される。同時に、バーテックスチェンバーや  $p/\pi$  カウンタによって計測事象を選択することによって  $K$  中間子の深い束縛状態の生成を同定する事ができる (詳しくは [3] 参照)。

# スケジュール

図3に、実験準備のスケジュールの概略を示す。前述のように、我々は平成13年中より実験準備の完了目標を平成14年4月下旬として、網わたりの日程に基づいて装置の完成を急いだ。その結果図に有るように、ほぼ予定通りの4月末には全ての検出器群が完成する目処を立てる事ができた。

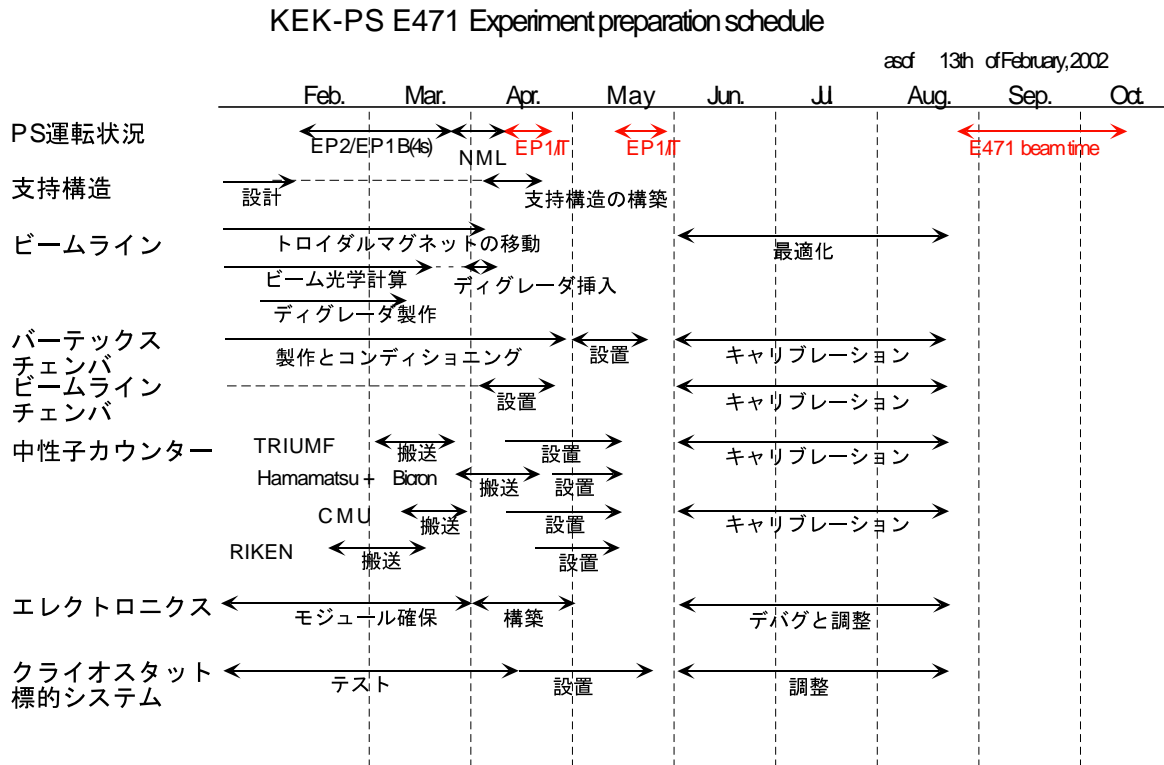


図3: E471 実験準備スケジュール。主な装置に関する準備状況をまとめた。殆どどの装置は4月末を目処に完成する。

現在、実験装置の架台の詳細な設計・安全性の検討が岩井(KEK・工作)を中心に進んでおり、4月中旬には完成予定。実験装置が何時から組み出せるかはK5エリアの片づけの予定に大きく依存するが、今里(KEK)を中心に作業が進んでいる。

## ビームラインチェンバー

ビームラインチェンバーは、ドリフト長 2.5 mm (セルサイズ = 5 mm) の平面型多芯式ドリフトチェンバー (MWDC) であり、水平方向 (X) と垂直方向 (Y) に張られたワイヤによって K 中間子の入射位置を 約 300 ミクロン (半値全幅) の精度で検出する。有効面積は 16 cm × 16 cm で、一面辺りのワイヤ数は、32 本である。X, Y 面とそれぞれ半セルずれるようにワイヤを張った面 X', Y' も含めて、(X-X'-Y-Y') の四面によって一セットを構成

する。ビームラインチェンバーは、4セット (=16 面) を積み上げた構造になっており、十分な冗長性を確保している。

チェンバー自体は、既に平成 12 年中に完成しており、平成 13 年中に KEK-PS  $\pi 2$  ビームラインにおいて、テスト実験を行い十分な性能が得られる事が確認された。

ビームラインチェンバーの下流は、クライオスタットの窓 (アルミ 0.5 mm 厚) の後に標的層が置かれるため、チェンバー最終面での信号の大きさは、標的中の静止深さと強い相関があり、解析の際の時間補正について重要な情報を与える。これも実際に K 中間子を使い本実験前に確認しておく必要がある。

## バーテックスチェンバー

コストを削減するため、当初の計画より標的に近づけサイズがコンパクトな物を設計した。また、斜め入射に強くするためドリフトセルは通常の箱形では無く、ドリフトセルは約 1 cm のハニカム構造を採用した。ハニカム構造が作る電位が同心円に出来るだけ近くようにするため、水平方向・垂直方向それぞれの 3 面の組が 4 層配置され、全 12 面からなる (図 4 参照)。ワイヤーはフィードスルーで保持する構造を持つ。ビームラインチェンバーと共に冗長性が高い理由は、終状態に  $\Lambda$  生成した事象を選択的に取り込むため、通常の実験手法とは反対に  $\Lambda$  の飛程分だけ vertex が一致しない事象を選択的に選ぶのに必要だからである。

現在、林栄精機で組立作業中であり、4 月下旬に線源でシグナル全数確認後納入される予定である。フィードスルーであるため、立ち上げにはそれほどの時間を要しないと考えられる。

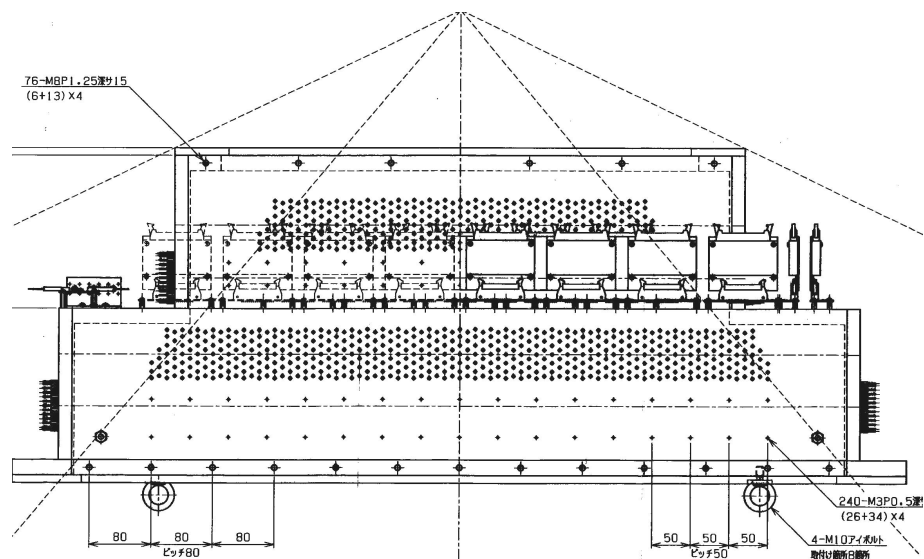


図 4: バーテックスチェンバー。

# 超流動ヘリウム標的システム

本実験のキーとなるのがこの超流動ヘリウム標的システムである。標的システムは、i) 標的を包む薄い膜からできた標的セル、ii) 標的セルと外界を隔てる断熱真空槽、iii) 標的セルにヘリウムを供給し同時に標的セルを冷却するクライオスタット、からなる。

## 1. 標的セル

標的セルは、図5のような形状をしており、直径約 240 mm 厚み 0.3 mm のアルミニウムの枠に対して、入射窓として 75  $\mu\text{m}$  厚のマイラーを接着して標的層とし、ここに 20 Torr の超流動ヘリウムを導入する。この場合、入射窓の物質量比は、約 3 % である。セルの外側は真空なので、入射窓には 20 Torr 分の内圧がかかる事になる。図5は実際に製作されたセルのプロトタイプであるが、十分な耐圧性能を持つ事が確認されている。セル内部の温度が不用意に上昇しないように、自動監視による制御システムの構築を行っている。



図 5: 実際に製作されたセルの写真。上部にヘリウムを供給するための金具が見える。

## 2. 断熱真空槽

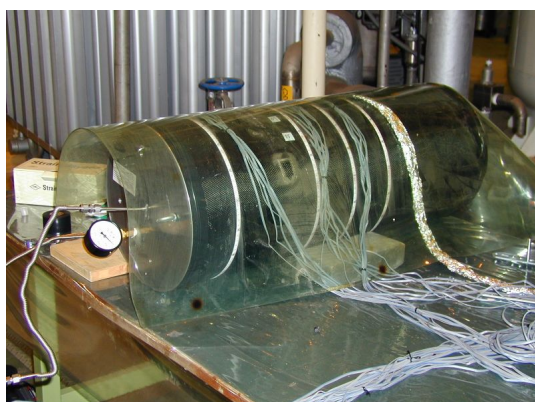


図 6: 断熱真空槽耐圧試験の様子。多数の歪みゲージを貼って、内部の圧力を下げた時の円筒の変形を計測した。

軽い材料で、高い耐圧性能を得る事が必要だったので、断熱真空容器の材料には物質量比のヤング率の大きい炭素繊維強化プラスチック (CFRP) を候補として開発を行った。図6は、その際に行った大気圧に対する耐圧試験の様子である。CFRP 断熱真空槽の周囲に歪みゲージを貼って、容器の変形を計測したその結果 口径 300 mm $\phi$  長さ 750 mm に対して、0.9 mm 厚の CFRP に補強リブを二本接着した図のような構造によって、大気圧程度の外圧に対して十分な強度を得る事ができた。通常のステンレス鋼の断熱真空層に比べ、物質量でおよそ 1/10、多重散乱角でおよそ 1/5 を達成し、バックグラウンド削減・バーテックス決定精度に大きく寄与している。

精密な安全係数を知るため、平成 14 年 3 月中に「海洋科学技術センター」で大気圧以上の負荷を与えて実際に測定する予定である。また、歪みゲージを常時監視する事により圧潰前に回避するシステムを構築している。

## 3. クライオスタット

標的は、i) 窓材を標的物質に対して充分薄くする、ii) 時間原点 (T0) を精度良く決めるため、窓の形状が平板である、の 2 点が必要であることから減圧する必要がある。また標的を減圧し超流動とすると、飛躍的に熱伝導率が上がり、冷却に必要な部分を標的から遠ざ

けられ、実験上都合がよい。

クライオスタットは、石元 (KEK) を中心にすでに平成 13 年 10 月からテストが開始されている。装置が複雑なため定常的な運転のためには、十分な試験が必要である。現在、標的セルは取り付けずに試験しているが、標的セルへの長い配管の先端まで 2K に冷却されることが確認された。さらに、5 月の連休前を目標に現在も試験が続けられている。

#### 4. ヘリウム回収ライン

北カウンターホールのヘリウム回収ラインは、ヘリウムを大量に消費する実験が当面無いということから、一度撤去されていた。本実験は、大量のヘリウムを消費するので再敷設が不可欠である。これを最低限の予算で可能にする努力が、木村 (KEK・低温) を中心に行われている。工事は、3 月に着工・完成する予定。

## 中性子検出器

我々が必要なのは時間分解能がよい、両読みのプラスチックシンチレータである。本実験は E462 と共に中性子カウンターを含め、検出効率の絶対効率とそのエネルギー依存性が重要であり、これまでも理研を含め応田 (KEK) を中心にテスト実験が重ねられている。今後とも必要に応じてテストする予定。

当初、E462 の検出器以外、世界中の研究所から必要数をそろえようとしたが、そのサイズはまちまちであり、効率よく実験装置に配置することは殆ど不可能であった。また、殆どが年式が古く KEK に搬送しテストしても実際には使えない公算も高い。

このため、すでに述べたとおり  $1 m^3$  を新設すると共に、充分テストされている E462 からの流用のカウンタを中心に配置し、まとまった数量がある CMU 及び理研 (一部 TRIUMF に保管) のカウンターをその周辺に配置することとした。

既存の検出器は E462 の物を除き、KEK に場所が確保でき次第、輸送する予定。

## エレクトロニクス

エレクトロニクスについては、これまでいくつかの大型の実験が並行して走っていたので、どの程度の回路が実際に確保できるか非常に不透明であった。また、我々も最近まで中性子検出器をどうするかについて正確には決められていなかった。この為、必要回路数を見積もることが困難でありこの点について十分な検討がなされていない。いくつかの大型実験が今年の3月に終了の予定であり、検出器についても最終決定されたので、今後必要数が確保できるか正確かつ早急に検討する必要がある。

本実験においては、多数の中性子検出器、1つの平面型多芯式ドリフトチェンバー、2つのフィードスルー型多芯式ドリフトチェンバー、その他のトリガー用、及び Veto 用の検出器を読み出す。また、中性子検出器の TDC 読み出しの必要性から、多数の波高弁別回路が必要とされる。それぞれのチャンネル数の合計は、表 1 に与えられている。

	ADC(CH)	TDC(CH)	波高弁別回路
中性子検出器	536	536	536
平面型 MWDC	32	512	512(ASD)
フィードスルー型 MWDC	-	840	840(ASD)
Veto 検出器	100	-	100
Trigger 検出器	50	30	50

表 1: 読み出しのチャンネル数。MWDC に対しては、波高弁別回路の数は必要とされる ASD のチャンネル数である。

後述するように、これらの読み出しには TKO モジュールが用いられる。

MWDC に関しては、本実験においては ASD (Amplifier Shaper Discriminator) を用いて読み出される。この IC カードの現在の型は MWDC に直接に接続され、その出力を外部から与えられる閾値電圧で弁別し、LVDS 論理信号を出力する。本実験ではその発展型として、ECL 論理信号を出力する型を新たに設計し、使用する予定である。TKO 規格の TDC は ECL 信号で動作するので、この新しい型を用いることにより、中間の波高変換器が不用になり、大幅なコスト削減が可能になる。この為の PreAmp ボードの設計・製作が佐々木 (KEK) の協力・指導の元進んでおり、3月下旬に完成予定。

ここでは、中性子検出器の TDC は波高弁別回路を 1 回通るだけで十分な時間分解能が出ると仮定した。テストの結果十分でなかった場合にはさらに多くの波高弁別回路が必要となる。

## データ取得システム

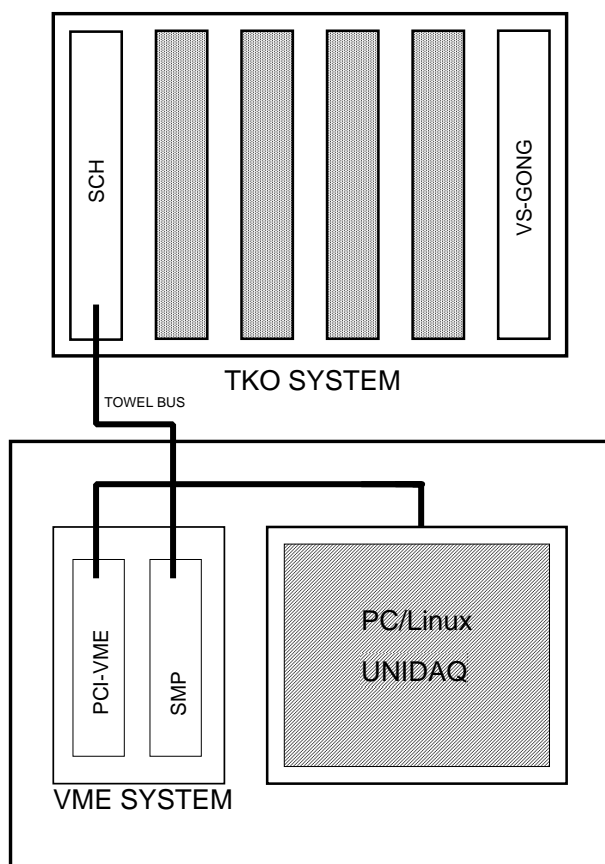


図 7: データ取得システムの概要

読み出しのチャンネル数、及びトリガーレートとしては、

**ADC** 800チャンネル

**TDC** 1400(ドリフトチェンバー)+600(中性子検出器その他)チャンネル

トリガーレート 約 100Hz

が予想される。

このデータ取得システムについては、平成 13 年度中に KEK-PS  $\pi 2$  ビームラインで行われたテスト実験 T489 において、適切な動作が確認されている。

## 参考文献

- [1] Y. Akaishi and T. Yamazaki, Nucl. Phys. A684 (2001) 409-413.
- [2] B. Zeidman *et al.*, Nucl. Phys. A691 (2001) 37c-42c.
- [3] M. Iwasaki *et al.*, Nucl. Inst. Meth. A473 (2001) 286-301.

データ取得システムとしては、フロントエンドとしてTKOシステムを用い、TKOシステムと計算機とのインターフェースとしてVME SMPモジュールを使用する(図7)。VME bus上のVME SMPモジュールにアクセスすれば、TKOシステムを制御し、データを取得することが出来る。

VME SMPモジュールは二つのメモリーバッファを装備し、一方のバッファからのデータの読み出しの間ももう一方のバッファを用いたデータ取得が可能であり、結果として、高速でデッドタイムの少ないデータ取得システムの構築が可能となる。

データ取得用計算機としてはPC/Linuxが用いられ、PC/LinuxとVME busの間のインターフェース用のモジュールとして、BIT3社の617型が使用される。このシステムの一つの好ましい特徴として、システムのトータルのコストが低いことが挙げられる。