

いよいよ始まった Double Chooz 実験

東京工業大学 大学院理工学研究科

石塚 正基

ishitsuka@phys.titech.ac.jp

東北大学 大学院理学研究科

(現在 新潟大学 理学部)

中島 恭平

kyohei@hep.sc.niigata-u.ac.jp

新潟大学 理学部

早川 知克

hayakawa@hep.sc.niigata-u.ac.jp

首都大学東京 理工学研究科

前田 順平

maeda@hepmail.phys.se.tmu.ac.jp

2011 年 5 月 9 日

1 はじめに

原子炉ニュートリノ振動実験 Double Chooz は 2010 年末に後置検出器の主要部を完成させ[1], 2011 年より未知のニュートリノ混合角 θ_{13} の精密測定に向けデータ収集を開始した。現在までに得られている θ_{13} の上限値 $\sin^2 2\theta_{13} < 0.15$ に対し, 後置検出器のみを用いた 1 年間の測定で $\sin^2 2\theta_{13} < 0.06$ の感度が期待されている。CHOOZ 実験から約 15 年を経て, いよいよ θ_{13} 精密測定が始まることになる。Double Chooz 実験では, 2012 年には前置検出器を完成させ, 最終的には $\sin^2 2\theta_{13} < 0.03$ までの感度で測定を行う。

今回の研究紹介では Double Chooz 検出器建設および検出器試運転の様子を中心に報告する。Double Chooz 実験の物理的背景と検出器については[2]に説明されているため, 今回は概要を説明するのみとした。Double Chooz 日本グループは特に光電子増倍管の開発, 動作試験および設置作業, オンラインデータ収集システムの構築, 検出器コミッション, 検出器較正において中心的な役割を果たして来た。今後は前置検出器の建設と平行してデータ解析を中心に進めていくことになる。データ解析はまだ始まったばかりであり, 今回は残念ながら物理として興味深い情報はお見せできない点をご理解いただきたい。

2 物理的背景

現在のところ, ニュートリノの世代間の三つの混合角のうち θ_{12} と θ_{23} はすでに有限値が測定されているが, θ_{13} については $\sin^2 2\theta_{13} < 0.15$ という上限値が得られているのみである[3]。残された未知の混合角 θ_{13} の測定は現在のニュートリノ物理学におけるもっとも大きな課題のひとつである。

さらに, ニュートリノにおける CP 対称性の破れは, 我々の宇宙における物質と反物質の非対称性を理解するための鍵を握る可能性があると考えられているが, いまだ測定はなされていない。このように現在の素粒子物理学における重要な課題であるニュートリノにおける CP 対称性の破れ (δ_{CP}) の測定であるが, ニュートリノ振動実験では, δ_{CP} はすべての混合角との組み合わせが観測量となる。結果として, θ_{13} の大きさにより δ_{CP} に対する測定感度も変わるため, δ_{CP} の測定に必要な実験のデザインを決定するためには, まずは θ_{13} の値を知る必要がある。このような理由からも残された未知の混合角 θ_{13} の測定の意義は大きい。

現在では θ_{13} の測定を目的として (1) Double Chooz 実験をはじめとする原子炉ニュートリノ実験, (2) T2K 実験をはじめとする加速器を用いた長基線ニュートリノ実験の二つの異なるアプローチによる実験が測定を開始している。これら二つの実験は相補的なものであり, θ_{13} の値を高精度で決定するためには, 双方の実験による測定が重要である。

原子炉ニュートリノによる実験では反電子ニュートリノの生存確率は以下の式

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) = 1 - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2(1.27 \Delta m_{31}^2 [eV^2] L [m] / E_\nu [MeV])$$

で表され, 反電子ニュートリノの欠損量から直接 θ_{13} が決定される。一方, 加速器実験では観測量は一般に純粋な θ_{13} ではなく他の混合角や質量階層性および δ_{CP} を含む関数となり, θ_{13} の測定に対する不定性は避けられない。そのため, 加速器実験により θ_{13} が 0 ではないと確定された場合でも, その値を精度よく決定するためには原子炉ニュートリノ実験による測定が重要である。

3 Double Chooz 実験の概要

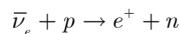
3.1 原子炉ニュートリノ振動実験

Double Chooz 実験^[4]は約 150 名(8 カ国)からなる国際共同実験であり、フランス Chooz 原子力発電所で行われる。2008 年には神戸大学がホストになって Double Chooz 実験共同研究者会議が行われた(図 1)。Chooz 原子力発電所は熱出力 4.2GW の 2 基の原子炉からなる。原子炉からは核分裂に伴い膨大な量の反電子ニュートリノが放出されるため、ライネスとコーワンによるニュートリノの発見以降、ニュートリノ源として様々な実験に用いられてきた。



図 1 Double Chooz 実験共同研究者(2008 年, 神戸大学にて)

Double Chooz 実験では原子炉ニュートリノによる逆ベータ崩壊反応を遅延同時計測法により同定する。反電子ニュートリノはターゲットである液体シンチレータ中の陽子と反応し、陽電子と中性子を放出する。



このうち、陽電子が初期信号として観測される。陽電子のエネルギーはニュートリノのエネルギーと $E_e = E_\nu - 1.8\text{MeV}$ の関係を持つ。初期信号のエネルギーはこれに対消滅から生じる 1.02MeV を足したものになる。ニュートリノ振動の確率はエネルギーに依存するため、エネルギースペクトルを解析に用いることにより測定感度が向上する。一方、中性子は弾性散乱により熱中性子化した後、平均 30 μs 後に Gd に吸収され、計 8MeV のガンマ線を放出する。この信号を後発信号と呼ぶ。後発信号のエネルギーは自然界に存在する同位体による放射線のエネルギーよりも十分大きいため、バックグラウンドの影響を受けにくい。これら二つの連続信号を要求することにより、バックグラウンドを大幅に削減することができる。

3.2 Double Chooz 検出器

後置検出器の設置場所として、Chooz 実験で用いられた実験室を拡張して利用した。原子炉からの距離は 1.05km であり、約 2MeV で振動確率が最大になる計算である。前置検出器は原子炉から 400m の距離に新しく地下実験室を作り、設置する。前置検出器については実験室の掘削が始まったところで、2012 年の完成予定である。

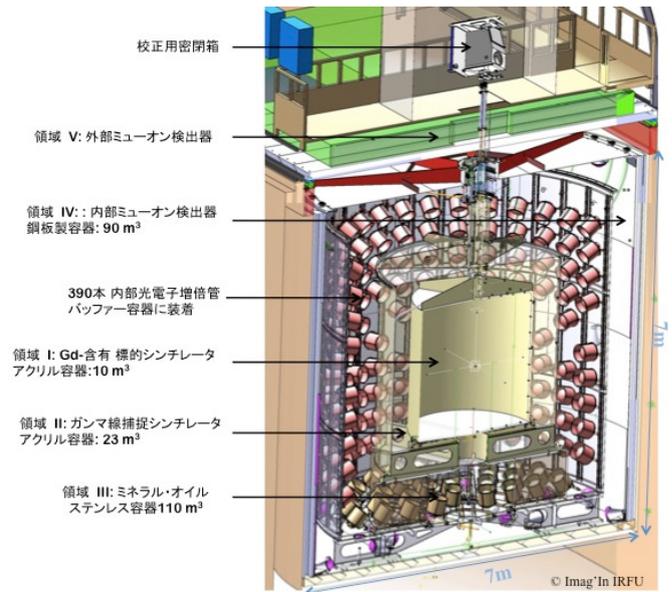


図 2 Double Chooz 検出器概略図

Double Chooz 検出器の概略図を図 2 に載せる。検出器は 4 層の円筒形タンクからなる。内側から順番に説明する。

(1) ニュートリノ標的層(10.3m³)

Gd を含む液体シンチレータで満たされる。この領域内でニュートリノ反応が起きた場合、Gd による中性子捕獲に起因する計 8MeV のガンマ線信号が観測される。ニュートリノ標的の体積は CHOOZ 検出器に比べて約 2 倍に拡大されている。

(2) ガンマ線捕獲層(23m³)

Gd を含まない液体シンチレータで満たされる。ニュートリノ標的層から漏れ出たガンマ線のエネルギーを測定する

(3) バッファ層(110m³)

パラフィンオイルからなる不感領域であり、光電子増倍管や環境からのガンマ線を遮蔽する。バッファ層は CHOOZ 検出器にはなかったものであり、Double Chooz 検出器での改良のひとつである。Double Chooz 実験では環境放射線バックグラウンドが十分小さいため、測定エネルギーしきい値をニュートリノ反応のしきい値よりも低く設定することができ、検出効率に対する系統誤差を抑えることができる。

(4) 内部ミュオン検出器(90m³)

液体シンチレータで満たされ、宇宙線ミュオンの veto カウンターとして用いられる。また、周辺の岩盤からの高速中性子を遮蔽する役割もある。

(1)-(2)-(3)は合わせてニュートリノ検出器と呼ばれる。ニュートリノ検出器と内部ミュオン検出器は光学的に分離され、ニュートリノ検出器には 10inch 光電子増倍管が 390 本、内部ミュオン検出器には 8inch 光電子増倍管が 78 本設置される。

検出器全体は厚さ 15 cm の消磁された鉄製のシールドで囲まれ、上部にはプラスチックシンチレータからなる外部ミュオン検出器が設置される。これらも CHOOZ 実験からの改良点である。

4 Double Chooz 検出器の建設

前身の CHOOZ 実験用実験室のリフォームと鉄シールドの敷設が完了した 2008 年末から、後置検出器の建設が開始された(図 3)。現場では日米欧の各グループが協力して作業にあたり、2010 年 2 月に無事ニュートリノ検出器および内部ミュオン検出器が完成した。表 1 に作業スケジュールを示す。

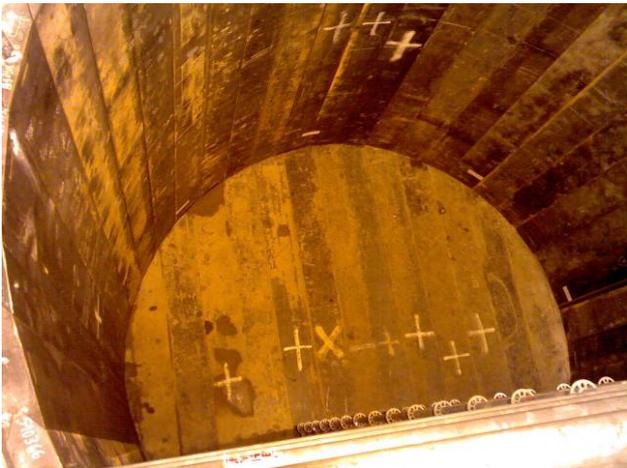


図 3 実験室内のピットに設置された鉄シールド
この中に内部ミュオン検出器が設置された。

表 1 後置検出器建設スケジュール

| | |
|-------------|-----------------------------|
| 2008 年 12 月 | 実験室のリフォームと鉄シールド敷設完了 |
| 2009 年 1 月 | 内部ミュオン検出器内壁完成 |
| 2009 年 2 月 | 内部ミュオン検出器用光電子増倍管設置 |
| 2009 年 4 月 | バッファータンク導入完了 |
| 2009 年 6 月 | バッファータンク側面底面の光電子増倍管設置 |
| 2009 年 11 月 | ニュートリノ標的およびガンマ線捕獲層用アクリル容器導入 |
| 2009 年 12 月 | ニュートリノ検出器完成 |
| 2010 年 2 月 | 内部ミュオン検出器完成 |

4.1 内部ミュオン検出器建設

2009 年 1 月に外壁の建設と内壁のペインティングが完了し、ドイツ、アメリカ、フランスグループが中心となって内部ミュオン検出器用光電子増倍管の設置が行われた。現場ではアメリカグループにより設置前の動作確認が行われ、続いてドイツグループにより検出器側面と底面に 54 本の光電子増倍管が設置された。またフランスグループにより、光電子増倍管校正用光ファイバの取り付けと動作試験が行われ、準備期間を含めてすべての作業が予定通りに完了した(図 4)。



図 4 内部ミュオン検出器用光電子増倍管設置作業

この作業は、原子力発電所内にある実験室において外国グループが中心となって行われたはじめての現場作業であり、また実験室と検出器をクリーンな状態を保ちつつ行う必要があるはじめての導入作業であったが、大きなトラブルもなく完了した。

4.2 バッファータンク導入

バッファータンクの建造は材料選定から始まった。検出器の材料には長期測定に耐え得る安定性と低バックグラウンドであることが要求される。材料選定においては、液体シンチレータとの材料適合性と放射性不純物含有量に特に注意した。バッファータンクの材料であるステンレスも、大量の放射性不純物(特に ^{60}Co)を含むことがあるため、材料の選定が慎重に行われた。

バッファータンクのピットへの導入は、現場のクレーンが利用できなかったため、タンクを三つのリングに分け内部ミュオン検出器内で組み立てる方式が取られた。さらに、バッファータンク外壁は内部ミュオン検出器の内側内壁を兼ねるため、ドイツグループによって反射材の貼付作業がリングの溶接の合間に行われた。こうしてニュートリノ検出器の側面および底面部分が完成し、2009 年 4 月にははいよいよニュートリノ検出器内層の建設へと移行した(図 5)。



図 5 バッファータンク(左)と、バッファータンク外壁面に反射材を貼るドイツグループのメンバー(右)

4.3 ニュートリノ検出用光電子増倍管設置

ニュートリノ検出用光電子増倍管は、日本グループが浜松ホトニクス社と共同開発した低バックグラウンド型10インチ光電子増倍管[5]を用いた。ニュートリノ検出用光電子増倍管は、Double Chooz 実験の中でも特に重要な装置である。すべての光電子増倍管は事前に日本とドイツ MPI-K で動作試験がおこなわれた。日本での動作試験の詳細は[6]に述べられている。光電子増倍管の検出器への設置作業は、日本を中心にスペイン、ドイツ、アメリカ、フランス、イギリスグループが参加して行われた。日本からは多数の研究者や学生が現地に常駐し、2 ヶ月にわたる長期作業において中心的な役割を果たした。

現場では、設置直前の動作試験、バッファータンク内壁への固定、ケーブリング、エレクトロニクスへの接続の各作業が並行して行われ、バッファータンク側面および底面に 330 本の光電子増倍管を設置した。また、同時に温度・磁気センサー、光電子増倍管校正用光ファイバの導入作業、光電子増倍管の測量も行われた。簡単な作業ではなかったが、安全かつクリーンに設置作業を完了することができた(図 6, 7, 8)。



図6 ニュートリノ検出用光電子増倍管導入時のピット
埃よけのためにピット全体をテントで覆い、バッファータンクに足場を設置して作業を行う。



図7 一本目の光電子増倍管設置
作業者はクリーン服、手袋、靴、マスク、ヘルメットを着用し、クリーンかつ安全に作業を遂行した。

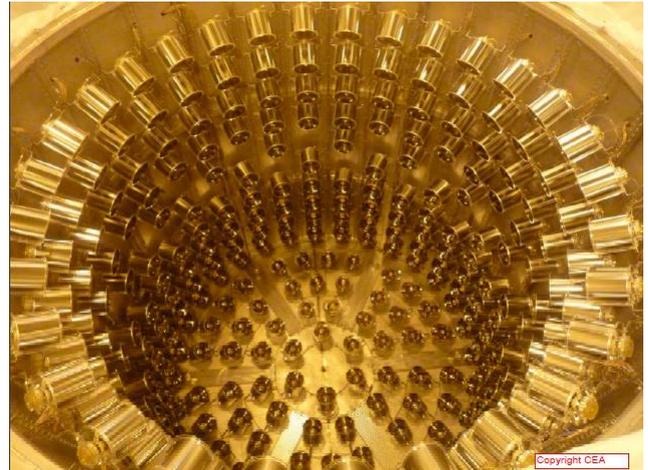


図8 バッファータンク側面および側面に設置された
330本の光電子増倍管

すべての光電子増倍管は磁気シールドで囲われている。

4.4 アクリル容器導入

液体シンチレータ用アクリル容器は、ニュートリノ検出器でもっとも脆い部分であり、制作、輸送、設置が細心の注意を払って行われた。液体シンチレータを汚さないように、ニュートリノ標的アクリル容器内はクリーン度 ISO5 以上、実験室内も ISO6 以上の環境を保つ必要があり、これらの条件の下、手狭な実験室内の作業スペースやりくりしながらの導入作業は実際とても難しいものであった。

ガンマ線捕獲層用アクリル容器は、長距離輸送によるダメージを避けるために原子炉内の施設で組み立て作業が行われた。制作後は専用のツールで横倒しの状態で実験室に搬入され、ピットへの導入時にピット直上で回転しバッファータンクに設置するという方法が取られた(図9)。



図9 ガンマ線捕獲層用アクリル容器導入

ニュートリノ標的アクリル容器は同時に3つ制作され、容積が近い2つが選ばれそれぞれ後置検出器用、前置検出器用とされた。クレーンによりニュートリノ標的アクリル容器がピットに導入された後、検出器校正用のチューブおよび液体シンチレータ充填用チューブの取り付けと容器の測量が行われ、最後にガンマ線捕獲層用アクリル容器の上蓋が現場で接着され、2009年11月、ついにアクリル容器が完成した(図10)。



図10 ニュートリノ標的用アクリル容器設置後の様子

4.5 ニュートリノ検出器および内部ミュオン検出器閉蓋

バッファータンク上蓋内壁への60本の光電子増倍管の取り付け作業の後、2009年12月には、ニュートリノ検出器内部の最終確認とバッファータンクの閉蓋作業が行われた。光電子増倍管が取り付けられたバッファータンク上蓋は液体シンチレータ注入システムや検出器校正システムとのインターフェースにもなっているため、閉蓋作業は細心の注意を払って行われた。

バッファータンク閉蓋後は、内部ミュオン検出器用光電子増倍管の取り付け、校正用光ファイバ、センサーの設置、各種チューブの取り出しが年末クリスマス休暇返上で行われた。日本を含め5グループが入れ替わり立ち替わりピット作業にあたり、2009年中にすべての作業を完了した。

2010年2月には、検出器に付いているすべてのフランジが閉じられた。同時に日本グループ担当のニュートリノ検出用光電子増倍管(390本)の導入後の簡易動作試験も行われ、すべての光電子増倍管が正常に動作していることが確認された。こうしてデータ収集系への接続と液体シンチレータ充填作業を残しニュートリノ検出器と内部ミュオン検出器は約1年2カ月をかけて完成した(図11, 12)。

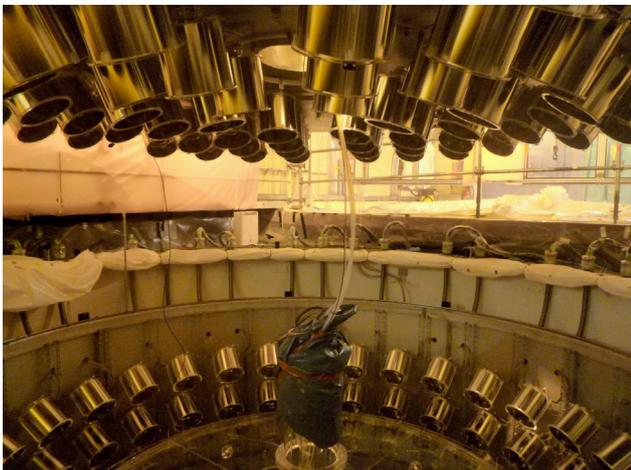


図11 ニュートリノ検出器上蓋が閉じられる様子



図12 上蓋が閉じられたニュートリノ検出器

5 液体シンチレータの注入

筆者(中島)は、2010年10月から12月にかけて後置検出器の液体シンチレータ注入作業を行った。参加者は日本、ヨーロッパ、アメリカグループからバランスよく構成され、もっとも多い時で15人程度が1日3シフト制で液入れ作業を行った。Double Chooz 検出器は図2に示す様に4層から形成され、外側2層がステンレス製、内側2層がアクリル製タンクでできている。

液入れ時には、アクリル容器である内側2層が液面差による圧力によって破損する恐れがあるため、隣接する層間の液面差を抑えつつ液入れを進める必要がある。特にDouble Chooz 検出器はチムニー部の断面積が本体部に対して小さいため、液体シンチレータの体積が温度変化によって増減してしまうと、チムニー部の液入れ時にその影響が液面差として顕著に現れてしまうので細心の注意が必要である。

5.1 窒素パージング

筆者は液入れの準備期間として2010年7月から現地に滞在した。この時期には液入れの前段階として検出器本体への窒素パージが始まった。窒素流量は各層とも1~2m³/hourで、絶対圧が数mbar程度となるように調整されている。窒素パージング時の注意点は液入れと同様、各層間の差圧であり、特に内側2層のアクリル容器に圧がかからないよう留意する。窒素パージは液入れと比較して状態を安定に保ちやすいので、日中は実験室で監視し、それ以外の時間も無人で窒素を流し続け、外部からインターネット経由で監視を行った。

パージングの効果は排気ラインに設置した酸素濃度計によってモニターされ、目標濃度である100ppm以下には3週間程度で到達した。その後、原子炉敷地内で液入れの作業を行うにあたって、安全性の確認の許可が得られるまでに時間を要したので、その間、液入れ開始まで窒素パージングを続行した。

窒素パージングにおいては、ドイツ MPI-K 所属の渡辺秀樹氏(元東北大学研究員)が中心的な役割を果たした。

5.2 液入れ

液体シンチレータはあらかじめ成分が調整された状態で実験室地上の液貯蔵タンクに運ばれる(図13)。液入れ時はこの液貯蔵タンクから、地下の実験施設にある小型貯蔵タンク(図14)に送り、ここで液温度や流量をコントロールしながら検出器へ注入するという手順を踏む。



図13 原子炉施設内へ液体シンチレータが運ばれる様子



図14 実験室内の液入れ用ステーション
左側：液入れ用の小型タンクやバルブ類
右側：窒素パージ関連の配管系

特別な理由がない限り、基本的に夜間や休日に原子炉施設内に立ち入ることはできない。このため、ニュートリノ標的層のチムニー部に到達するまでの比較的安全な「本体液入れ」は1日2シフト制で行われた。シフト毎に地下実験室に2人以上、地上の液貯蔵庫に2人を配置し、安全性を確保した上で液入れを進める。液入れ時にもっとも注意すべき液面については、各層とも液面計が2種類設置されており、照合をしながら液入れを行うことができる。図15はニュートリノターゲット層用のレーザー型液面計で、検出器中央のチムニー上部に設置されているものである。

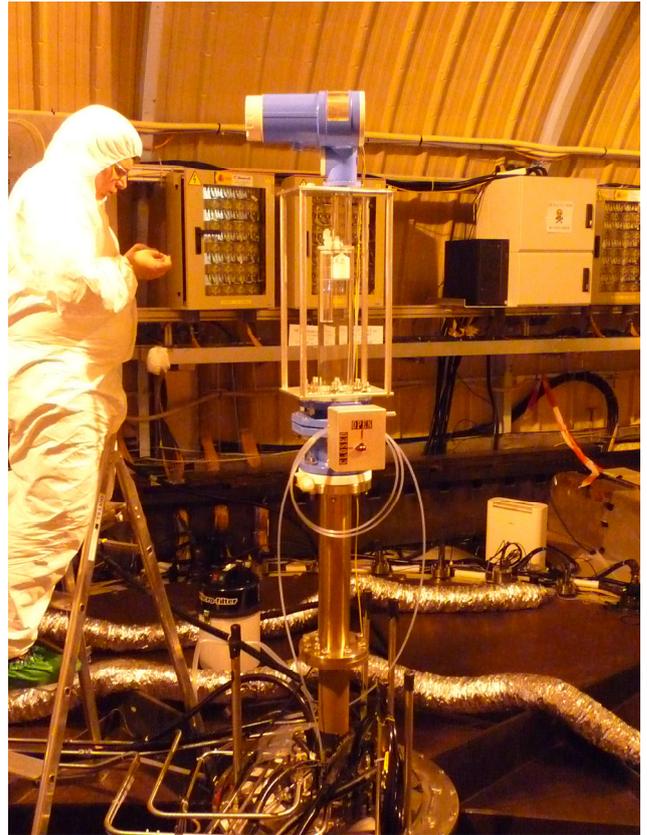


図15 ニュートリノ標的内の液面測定の様子

シフトの仕事は実験施設内に入り出した際の安全確認やバルブの開閉状態の確認、また流量計などの各種計量装置のモニターなどである。液入れ時は流量を調整し、各層の液面值や差圧の監視を行う。

2010年12月上旬には液面がチムニーに達し、3シフト制24時間体制での作業が始まった。チムニー部の液入れは、図14の液入れ用ステーション内に設けられた目盛りのついた小型タンクを用いて、手でバルブ開閉をして行う。チムニー部の液入れ時は、各層間の液面差のバランスを取るのに若干のコツがあるがそのノウハウは秘密なので残念ながらここで詳しく述べることはできない。細心の注意が必要であるチムニー液入れは一週間足らずで終了した。余談であるが、やはりキリスト教圏であるヨーロッパではクリスマスの影響を強く感じ、何とかその前に作業を終わらせようという意思を感じた。そして幸いなことに、液入れはクリスマスより前の12月13日に無事終了した。

液入れ時にもっとも苦勞したことは、検出器への安全確保のために気を抜けないということもあるが、一番は液貯蔵庫での寒さに耐えながらのシフトであった。ここでのシフトは作業自体は少ないのだが、安全確保のため常に2人以上が待機している必要がある。10月下旬には早くも氷点下の日があり、その頃はヒーターもなかったため、身を寄せ合ってハロゲンライトの放熱で暖を取ったりした。日本のコラボレータに寒さを訴えたら、有り難いことに日本が

らホッカイロを輸入してきてくれた。興味深いことに、ヨーロッパとアメリカグループのコラボレータが誰もホッカイロを知らなかった。ロシア人ですら。ホッカイロは日本独自の文化なのだろうか？

最後に、図 16 に共に働いたコラボレータたちの液入れ時の様子を載せる。液入れ最終段階では彼らとの結束も深まり、最後にはフランスらしく皆でシャンパンを空けたのが今となってはいい思い出である。



図 16 液入れ時の様子

左上：コラボレータの議論の様子
左下：各層の液面差や差圧をモニターする画面
右：検出器への流量を監視・調整している様子

6 Double Chooz オンラインシステムの構築

6.1 Double Chooz におけるシグナル読み出し

Double Chooz 検出器ではニュートリノ検出器に 390 本の 10 inch PMT (R7081MODASSY[5]), 内部ミュオン検出器に 78 本の浜松ホトニクス社製 8inch PMT (R1408) を用いる。シグナルの読み出しと HV 供給は 1 本のケーブルでまとめる。これは検出器内のケーブルが占める体積を減らし、グラウンドループを避ける効果があるが、シグナルと HV を分けるスプリッター回路が必要となる。スプリッター回路はスペイングループが HV からのノイズを落とすフィルタ付きのものを開発した。HV システムは首都大学東京を中心として日本グループが担当しており、CAEN 社製の HV フレームとモジュールを利用してゲインが揃うように個別に HV を印加している。HV の状態は数秒おきにネットワークを介してモニターされる。ゲインの HV 依存性は事前に日本およびドイツで測定しており、それを用いて HV の基準値を設定した[6]。

図 17 に読み出しシステムの概略図を示す。Front-end electronics ではシグナルを増幅すると共に、トリガー用の信号(ストレッチャーシグナルと呼ばれる)を発生させる。Double Chooz 実験のオンラインシステムの特徴として、FADC を用いることにより信号波形を DAQ によって取得している。シグナルは二つの異なる増幅率で増幅され、一

方はニュートリノ事象用(ν -FADC)、もう一方は宇宙線ミュオン用(μ -FADC)の FADC で読み出される。 ν -FADC は CAEN とフランスの APC 研究所が共同開発した V1721 で 500MHz サンプリグトリガーシグナルに対して $4\mu\text{s}$ のバッファを備えている。システムは前置検出器で見込まれているトリガーレートである 300Hz でも dead time フリーとなるようにデザインされている。トリガーは、検出器の総光量にあたる電荷や PMT のヒット数などの情報によって決定される。

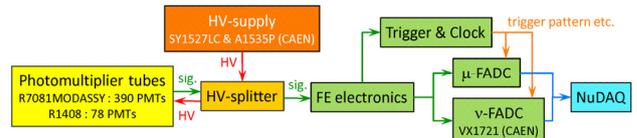


図 17 Double Chooz におけるニュートリノおよび内部ミュオン検出器読み出しシステムの概念図

これ以外に外部ミュオン検出器用のシステムが存在する。



図 18 Electronics ハットの様子

手前に見えるものが front-end electronics と μ -FADC である。一番奥に見えるものが HV システムで、その手前のラックには同じく日本グループが貢献しているニュートリノ検出器用の LED を用いた検出器校正システムが設置される。

6.2 オンラインソフトウェアの開発

ニュートリノ検出器および内部ミュオン検出器内からの信号は、NuDAQ と呼ばれるデータ収集プログラム (DAQ) により記録される。これ以外に外部ミュオン検出器用の DAQ も存在し、これらの DAQ をコントロールするためのランコントロールは日本グループで開発された。図 19 にシフターが扱うランコントロールのスクリーンショットを示す。このグラフィカルユーザインターフェースによって、シフターは物理ランやキャリブレーションランなどを設定できるようになっている。またモニタリングシステムやアラートシステムなど、DAQ 以外のオンラインソフトウェアも日本グループが開発している。オンラインソフトウェアの開発は東京工業大学、首都大学東京、広島工業大学、東北学院大学が中心となって行われた。

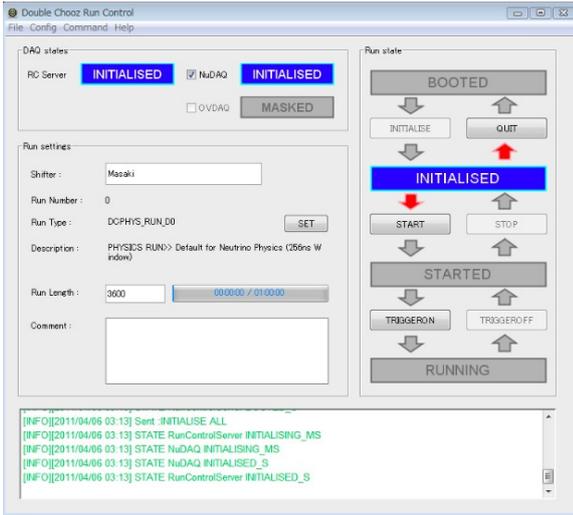


図19 ランコントロールのグラフィカルユーザインターフェース

6.3 調整作業：物理ランに向けて

すべての読み出し系が構築された後、検出器内の遮光を確認し、PMTにHVが印加された。遮光の確認には設定値よりも低いHVの値を設定し、ラボの中の電気を消して懐中電灯で可能性のある部分に光を照射して、信号を一つ一つ確認するという地道な作業であった。ニュートリノ検出器が一通り完成してから初めて実際にHVをかけ、オシロスコープによく見るシグナルが現れたときにはほっとしたのを今でも覚えている。図20はそのときの集合写真である。



図20 PMTにHVを印加したときの記念写真

前列が前田、2列目左から2人目が石塚、後列左から2人目が東工大院生の今野君。

この後はDAQやトリガーシステムの試運転作業が始まった。次の日にはNuDAQによって波形が取得され、2010年の会議で報告されている(図21)。続いて、液体シンチレータの充填と平行してエレクトロニクス、DAQ、およびトリガーの調整作業を行った。

実際に取得された宇宙線ミュオンと思われるイベントディスプレイを図22に示す。このイベントディスプレイは東工大院生の今野君が開発したものであり、解析に役立っている。

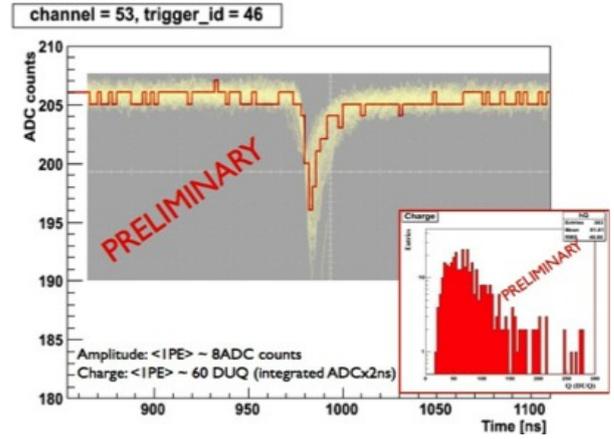


図21 実際に取得された1光電子の波形データ
オシロスコープのスナップショットを裏に重ねている。

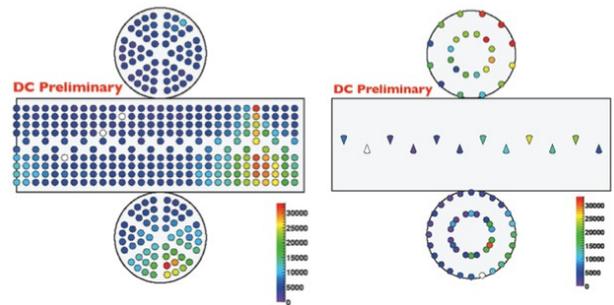


図22 宇宙線ミュオンと思われる事象のイベントディスプレイ
左はニュートリノ検出器を、右は内部ミュオン検出器の同事象をそれぞれ表しており、色(濃淡)は光量を表している。

7 まとめと今後

Double Chooz 実験が測定を開始し、T2K 実験と合わせてニュートリノ実験もいよいよ θ_{13} の精密測定フェーズに入りつつある。ここ数年のニュートリノ物理における最大の関心が θ_{13} の測定であり、それに続く CP の破れの測定の可能性であったことを考えると、今後の精密測定に対する期待は非常に大きい。

Double Chooz 実験で期待される θ_{13} に対する測定感度を図23に示す。

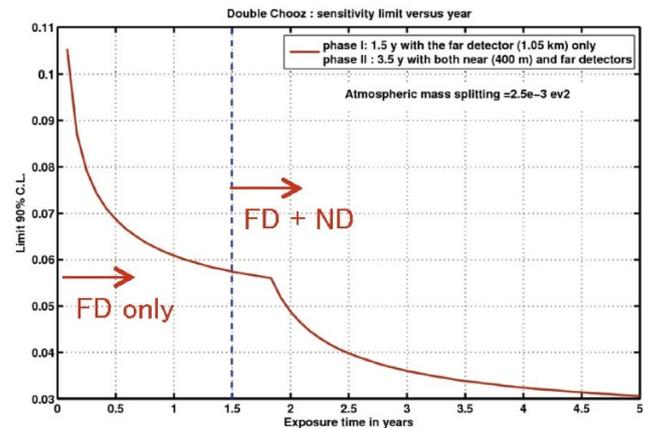


図23 Double Chooz 実験で期待される θ_{13} に対する測定感度
後置検出器の測定はすでに開始している。前置検出器については1年半後に測定を開始すると仮定した。

最初は後置検出器のみで測定を行い、1年半後に完成した前置検出器と合わせて二つの検出器での測定を開始すると仮定した。Double Chooz 実験では3節で説明した検出器のデザインの改良により、単独の検出器でも測定感度が飛躍的に向上している。CHOOZ 実験による上限値 $\sin^2 2\theta_{13} < 0.15$ に対し、1年間の測定で $\sin^2 2\theta_{13} < 0.06$ の感度が期待されている。

CHOOZ 実験では主にニュートリノフラックス、標的となる陽子の数、検出効率の不定性から系統誤差は2.7%と見積もられた。Double Chooz 実験では二つの同一構造の検出器を原子炉から異なる距離に設置する。双方の検出器による測定量を比較することにより、ニュートリノフラックスや検出効率などの不定性が相殺できる。約1年半後には二基の検出器による測定を開始し、1%以下の系統誤差による精密測定を目指す。最終的には今後5年間の測定で $\sin^2 2\theta_{13} < 0.03$ の感度が期待されている。

2節でも述べたように、 θ_{13} の値はニュートリノにおけるCP対称性の破れの測定とも密接にからんでいる。そのため、今後数年間の測定結果により、次世代のニュートリノ振動実験の方向性が決まってくるであろう。Double Chooz の測定結果にご期待いただきたい。

8 謝辞

Double Chooz 実験日本グループの研究は科研費補助金(特別推進研究・課題番号20001002)その他の予算により行われています。ここに感謝致します。

参考文献

- [1] プレスリリース ;
http://doublechooz.in2p3.fr/Status_and_News/Press/Press_release_Dec2010.pdf
- [2] 末包文彦, 高エネルギーニュース **26-3**, 200 (2007).
 末包文彦, 高エネルギーニュース **23-3**, 157 (2004).
- [3] M. Apolonio *et al.*, Eur. Phys. J. C **27**, 331-374 (2003).
- [4] F. Ardellier *et al.*, arXiv:hep-ex/0606025 (2006).
- [5] Hamamatsu Photonics K.K., LARGE PHOTOCATHODE AREA PHOTOMULTIPLIER TUBES.
 R. Abbasi *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **618**, 139 (2010).
- [6] T. Matsubara *et al.*, arXiv:1104.0786 (2011).