

ハイパーカミオカンデ前置水チェレンコフ検出器の耐震構造設計及び基礎実験

○山岡広^{A)}、阿久津良介^{A)}、小林隆^{A)}、多田将^{A)}、中平武^{A)}、石塚正基^{B)}
^{A)}高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所
^{B)}東京理科大学

概要

ハイパーカミオカンデ計画では岐阜県神岡の地下600mに建設が進められているが、前置水チェレンコフ検出器と呼ばれる検出器が東海村 J-PARC に近接する場所に設置される予定である。この検出器は、地面に直径10m、深さ40mの縦穴を掘り、そこに直径9m、長さ12mの検出器を縦穴に水を入れる事で検出器を浮かべるものである。実験中はこの縦穴の任意の位置で測定を行っているが、測定条件を変更するときは水の水量を調整することで検出器をガイドレールにしたがって上下に移動させる。設計では、この移動機構の構造を検討すると共に、地震時に検出器を保護するための構造も考えなければならない。このため、耐震基準を設定し耐震解析をおこなって構造を検討した。また、簡単な基礎振動試験も行った。報告では一連の設計検討結果及び基礎振動試験結果について報告する。

1. はじめに

ハイパーカミオカンデ計画[1]では茨城県東海村にある J-PARC 内のニュートリノ実験施設より射出されたニュートリノビームを約300km離れた岐阜県神岡に建設中のハイパーカミオカンデ検出器に打ち込んで実験を行う。図1にハイパーカミオカンデ施設の全体図を示す。

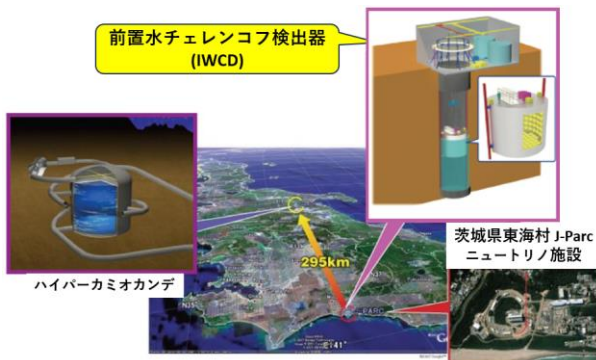


図1. ハイパーカミオカンデ施設全体図

ハイパーカミオカンデ実験では、更なる実験感度向上のため、検出器本体は直径68m、深さ71mの円筒形タンクに超純水を満たし、タンクの壁にはフォトマルセンサー(以下、PMT)が約40万本取付けられ、これによりスーパーカミオカンデの10倍の感度でチェレンコフ光を捉える実験をおこなう。

一方、長距離移動するニュートリノの変化を正しく理解するためには、初期状態の把握も欠かせないため、茨城県東海村にある J-PARC 施設から1~2km地点に前置水チェレンコフ検出器 (IWCD) [2][3]を建設予定である。この施設は、図2に示す通り地面に直径10m、深さ40mの立坑を掘り、そこに水を張って直径9m、高さ12mの検出器を浮かべる予定であ

る。そして、ビーム中心方向から角度を変えて測地をおこなうため、立て坑内を上下に移動させる移動装置が必要である。上下に移動するには立坑内の水位を調整することでおこなう。これにより、振動する前のニュートリノのエネルギーやビーム中のニュートリノの数を PMT を用いて調べる。

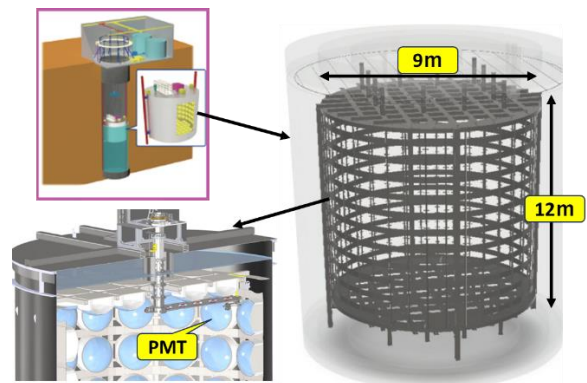


図2. 前置水チェレンコフ検出器

移動機構の設計では高さ40mの間にガイドレールを敷設し、そこを検出器が安定に上下動しなければならない。また、測定中は地震が来たときでも検出器が健全であるよう耐震性を持たせなければならない。

このための上下移動機構の設計及び耐震解析等をおこない、検出器移動機構システムの設計をおこなった。また、耐震構造設計では設計の健全性を確認するため、簡単な模型をつくり振動実験もおこなった。

2. 上下移動機構の設計

2.1 境界条件

移動機構の設計にあたってはいくつかの境界条件が示された。

- 検出器の境界は9mを守ること。
- 立坑内壁の10m以内に収まること。
- 材質は水中でも汚染されないステンレスとする。

- 高さ 40 m に渡ってスムーズに移動できること。
- 検出器荷重は 40 t である。
- 水に浮かべているので水平荷重を考慮する。

2.2 設計方針

移動機構システムの設計にあたっては、大きく4つに分離した。1つ目は設計地震力地震に耐える構造を考えることである。2つ目はスムーズな上下移動が可能な機構を設計すること。そして3つ目は、ガイドレールの変形を吸収出来るような手段を考えることである。ガイドレールは立坑内壁に取付けられるが、真直度や立坑の真円度はゼロではないため、この誤差を吸収出来る移動機構の設計が必要になった。4つ目はガイドレールの設計である。長さ40mのガイドレールを1本で製作する事は不可能なので、取付け方法を考慮しながら適正なサイズを選定した。

この結果、地震力を吸収するために、ゴム製の緩衝材(通称、防舷材)を用いることとし、上下移動機構では水平方向に360°動けるフリーベアリングを用いる事とした。また、誤差の吸収では水圧式ジャッキを用いて誤差を吸収する事とした。

2.3 防舷材の選定

防舷材の選定にあたっては、後に述べる耐震解析より決められた。材質は合成ゴムである。初期の設計では防舷材のサイズを幅300mm×高さ300mmとし、検出器に防舷材を一周巻くこととした。それを軸方向に4カ所設置し、ガイドレールの本数は8カ所にした。

耐震解析では出来るだけ小さいサイズの防舷材と必要本数になるよう解析を繰り返した。最終的に防舷材のサイズは幅150mm×高さ150mmで十分であることがわかった。また防舷材を周方向に1周巻く必要は無く、軸方向の数は4カ所、ガイドレールの本数は4本で耐震条件を満たすことが出来た。

2.4 フリーベアリングシステムの設計

フリーベアリングはフリーベアコーポレーションが発売しているステンレス製のフリーベアスライダを選定した。許容荷重は1tである。このベアリングをガイドレールに半径方向に4個、ガイドレールのサイドに2個ずつ圧縮バネで押しつける構造にした。バネの自然長は90mmで40mmの圧縮量がある。1本のバネ定数は55N/mmである。このため、半径方向の総合バネ定数は440N/mmである。したがって検出器が40mm動いたと仮定しても4つのフリーベアリングで受ける荷重は1760kgなのでフリーベアリング1個の許容荷重以下である。

2.5 水圧式ジャッキの採用

ガイドレールを敷設したときにガイドレールを精度良く据え付けることは難しく、また相対するガイドレールとの設置精度にも誤差が発生してしまう。このため、防舷材をガイドレールに接触したまま検出器を上下させる事は出来ないし、逆にガイドレールの真直度や真円度を数ミリ以内に抑えて敷設する事は非常に困難である。

このため、防舷材の後ろに水圧式ジャッキを取付

けることにした。この水圧式ジャッキは大阪ジャッキ製のもので、ステンレスで製作されており、油ではなく水道水で作動する。最大能力は220Nでストロークは最大50mmである。検出器が動いていない実験時は水圧ジャッキのピストンを30mm程度押し出した状態で防舷材がガイドレールに軽く接触するようにして、検出器の移動時は水圧式ジャッキの圧力を解放する事でガイドレールとの間に30mm程度の隙間が生まれ、検出器の上下移動を可能な構造にした。

2.6 ガイドレールの設計

先に述べたように40m長さのレールを1本で製作するのは不可能である。基本方針に材質はステンレス製を使うこととしているが、鉄筋コンクリート製で製作した場合のコストやガイドレールの最適形状を検討した。最適形状は、型枠製作や鉄筋構造等から決められる。また、厚みの製作精度を±1mmに設定した。

その結果、長さは1本あたり2mがコスト面や製作性の面から最適となった。したがって、これを80本(2m×20本×4箇所)用意することになる。ステンレスでガイドレールを製作した場合とコストを比較すると一桁鉄筋コンクリート製ガイドレールが安いことがわかり、鉄筋コンクリート製のガイドレールを採用することとした。設置コストの観点から、現在、2m長のガイドレール80本と、製作コストは高くなるが4mのガイドレール40本の場合の総合的なコストについて検討しているところである。

図3に現在の最終的な移動機構の3次元図を示す。

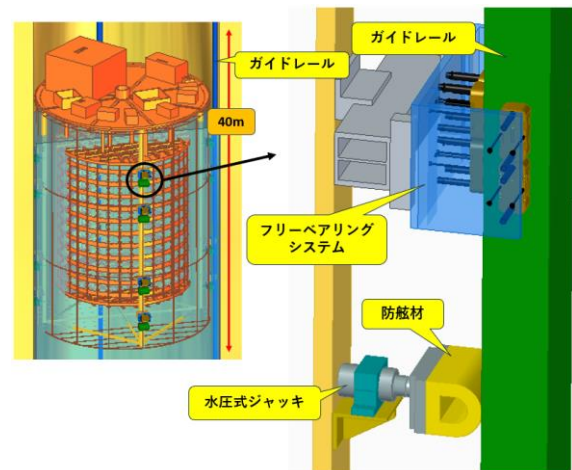


図3. IWCD 移動機構 3D 図

3. IWCD の耐震解析

3.1 耐震基準の設定

耐震基準の設定では ISO3010 の設計指針を採用した。この設計指針では装置の設置場所に於ける(最大加速度 vs. 周期)を設定するものである。

基本式を計算する事で500年に1回起きる可能性のある最大応答加速度を計算すると共に25年に1回起きる可能性のある最大応答加速度を計算した。そ

それぞれの基準は500年に1回起きる地震の場合は装置が永久変形してもよいが壊れてしまわない事という定義で、25年に1回起きる可能性のある地震は装置の応力が弾性範囲で直ぐに実験が開始出来ることという定義である。その結果、茨城県東海村に於ける応答加速度は500年に1回の地震では最大685 gal、25年に1回の地震では225 galと計算された。

耐震解析にあたっては最初に茨城県東海村で実際に起きた地震波を探した。その結果、3つの地震波を得る事ができ、その地震波の時間データから応答加速度スペクトラムを求め、更に最大値応答加速度を685 galとして設定し、これを耐震解析の入力値とした。入手する事の出来た3つの地震波を全て解析して特性を比較したが地盤が同じなので近似した応答加速度スペクトラムとなった。図4にIWCD耐震解析で用いた加速度応答スペクトルを示す。左の時間データのプロットでは最大約200 galの加速度であるが、震度階に直すとおおよそ震度5強の地震レベルである。

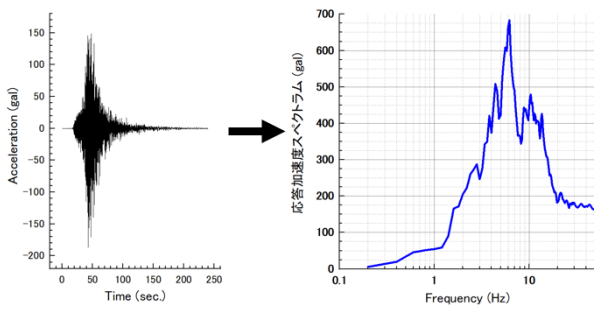


図4. IWCD耐震解析用入力加速度

3.2 耐震解析用解析モデル

耐震解析モデルを図5に示す。図5左のIWCD全体図から左の解析モデルを抜き出した。

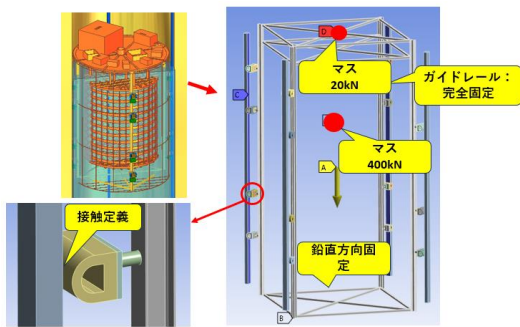


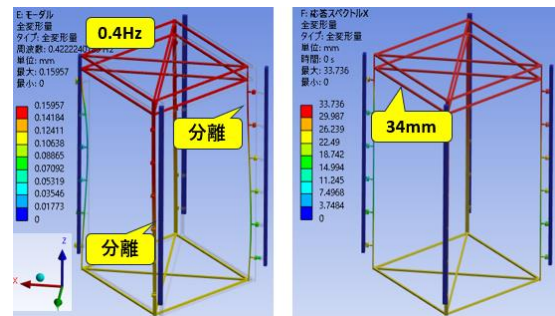
図5. IWCD耐震解析用モデル

先にも述べたように、地震力に対しては防舷材で支持する方針である。このため、フリーベアリングシステム部はモデル化していない。支持構造部分は防舷材やフリーベアリングシステムを取付けている4本の支持ビームと上部及び底部の支持フレームから構成される。防舷材とガイドレールとの間は‘滑りなし摩擦’を定義している。このため、防舷材は圧縮荷重には抵抗するが引張荷重には抵抗しないという定義である。また、中央部に検出器のマスとして40tを定義し、上部フレームには機器類重量2tを定義した。

拘束条件として、外側に位置するガイドレールを完全固定すると共に内側底部の上下方向を固定した。耐震解析は応答スペクトラム解析である。時刻歴応答解析という手法もあるが、地震波を入力して応答を求めると非常に解析時間及び多大なディスクスペースがかかる。応答スペクトラム解析は拘束点に図4で定義された応答加速度スペクトラムを入力し、拘束点を水平方向に加振させることで応答応力や応答変位を求める解析である。解析では始めに重力加速度が定義されている静解析を実施し、その後に静解析結果を考慮されたモーダル解析を実施する。モーダル解析とは構造の固有振動数を求めるための解析である。更にもモーダル解析結果が入力された応答スペクトラム解析を実施して地震に対する応答応力や応答変位が求められ、評価がなされた。応答スペクトラム解析の基本原理はモーダル解析で求められた固有振動数に対する応答加速度スペクトラムを入力値として静解析を実施するようなものである。

耐震解析では防舷材の大きさを数種類選択すると共に、1本のガイドレール当たりの防舷材の数を変更して、出来るだけ寸法が小さくなるように解析をおこなった。設計基準は「鋼構造設計基準」に示されている許容応力以下であると共に、許容変位量はフリーベアリングの後ろに取付けられているバネの圧縮変位量40mm以下とした。

モーダル解析及びスペクトラム解析での変位量の結果を図6に示す。加振方向は水平X方向である。



(a) モーダル解析結果 (b) スペクトラム解析

図6. IWCD構造体の耐震解析結果

モーダル解析に於ける1次モードは0.4 Hzで非常に低い値となった。これは緩衝材に合成ゴムを使用しているためである。このモードの有効質量も大きな割合を占めていた。また、モード形状で右側のガイドレールと緩衝材が離れていることが確認できたことから接触が正確に定義出来ていることがわかった。スペクトラム解析で入力された応答加速度スペクトラムに対して応答変位は34mmで、許容変位の40mm以下となった。応力値は66MPaで許容応力である205MPaより十分に低い値となった。

耐震設計に於いては通常地震の固有値である1~15 Hz程度の周波数を避けるため支持構造体の固有値を20 Hz以上に設定する。しかし本件の場合、物理的な大きさが非常に大きく、また重量もあることから20 Hz以上の固有値をもつ構造体を設計することは非常に困難である。このため、逆に固有値の低い合成ゴム

を緩衝材として使用することで固有振動数を低い方に下げ、地震の影響を避けることにした。また、固有振動数が低い場合、長時間揺れが収まらないという現象が起こるが、本件の場合、ゴムの減衰が大きいことからその様なことは起こらないと予想される。

4. 振動基礎試験

4.1 振動試験装置の設計

モーダル解析の結果、固有振動数は0.4 Hz程度で非常に低い値である。このため、地震波の固有値である数 Hzの振動に対して構造体が地震波を確実に逃がす事が出来るかどうか試験装置を設計して振動試験を行うことにした。

設計ではゴムの緩衝材を板の両側に取付け、それをフレームに取付けた板で挟み込んで、加振機で振動を与えた。緩衝材を取付けたフレームと外側のフレームの底部は自由にスライド出来るようにレール上に載せている。試験形状の写真を図7に示す。

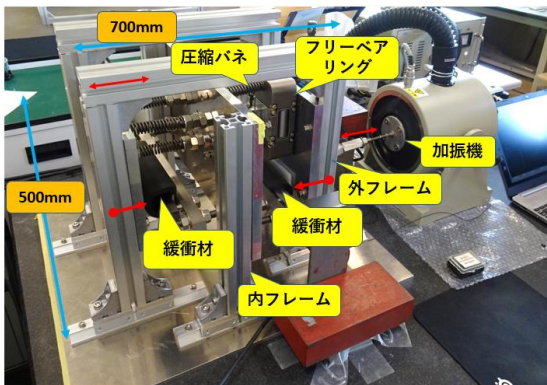


図7. 振動試験装置全景

4.2 データ収集システム

図8にデータ収集の模式図を示す。

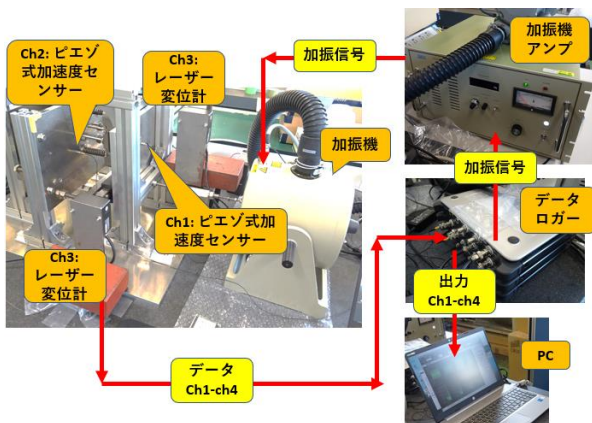


図8. データ収集システム

加振機により外側フレームを加振し、その時の緩衝材に取付けたピエゾ式センサー及び試験装置の横に設置したレーザー変位計で応答を測定した。ピエゾセンサーの感度は1 mV=1 m/s²で、レーザー変位計は1 V=5 mmである。ピエゾ式の加速度センサーを内フレームと外側のフレームにそれぞれ取付け、入

力信号と出力信号をそれぞれ測定した。レーザー変位計の測定も同様である。加振信号はデータロガーから出力し、応答信号もデータロガーで収集してPCに記録した。加振信号は、サイン波、スイープサイン波及び地震波である。

4.3 振動測定

もし内部フレームの振動が外側フレームの振動より小さくなれば、外部からの振動を逃がしているということになる。このため、外部フレームと内部フレームの振動を測定し、周波数応答関数を求めた。この値が1以下になれば内側フレーム振動は外側のフレームより小さいということになり、振動を逃がしているということになる。

用いられたピエゾ式加速度センサーの感度は2 Hz以下は感度がないのでサイン波を2 Hzから20 Hzまでそれぞれ変化させたときの入力と出力の周波数応答関数を測定した。20 Hzで試験を終える理由は地震波の周波数が15 Hz程度までだからである。周波数応答関数の測定結果を図9に示す。

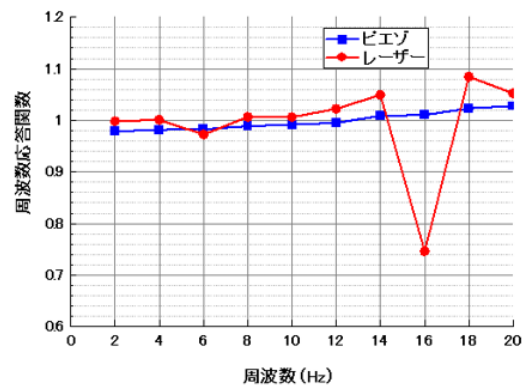


図9. 周波数応答関数測定結果

周波数応答関数の測定結果を見るとほぼ数値は1以上で内部フレーム板に取付けられているゴム緩衝材での減衰は見られなかった。レーザー変位計による測定で16 Hzの時に0.75で振動が減衰したように見られるが、これは測定架台の共振により入力側のレーザー変位が大きくなったためである。

4.4 振動試験装置の固有値測定

周波数応答関数が1以下にならないため、振動試験装置の固有振動数をハンマー試験(インパルス試験)により求めた。

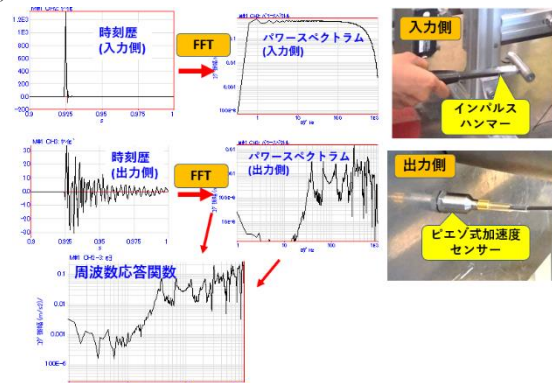


図10. インパルス試験原理

測定原理は図10に示すように、任意の地点にピエゾ式加速度センサーを取付け、ロードセルが取付けられているインパルスハンマーで各部を叩いて周波数応答関数を測定する試験である。各点の周波数応答関数を結びつけると加速度と位相差により、各モードでの固有振動数及びそれらのモード形状が求められる。

測定結果は1次モードで約100 Hzの固有振動数と測定された。このため、20 Hzまでの試験では周波数応答関数が1以下にならないということが実験的に理解出来た。実機の構造は先に述べているように固有振動数が0.4 Hzで地震の固有振動数より低い周波数である。このため、試験装置も同じように1 Hz以下の固有振動数にしなければならない事がわかった。

4.5 再振動試験

試験装置の固有振動数が100 Hz程度という事がわかったので、試験装置を改造して固有振動数が1 Hz以下になるようにインパルス試験を繰り返しながら固有振動数を実験的に求めながら改造をおこなった。改造した点はフリーベアリングが支えているバネを外して、ゴム緩衝材部に更に柔らかい緩衝材を挟んだ。

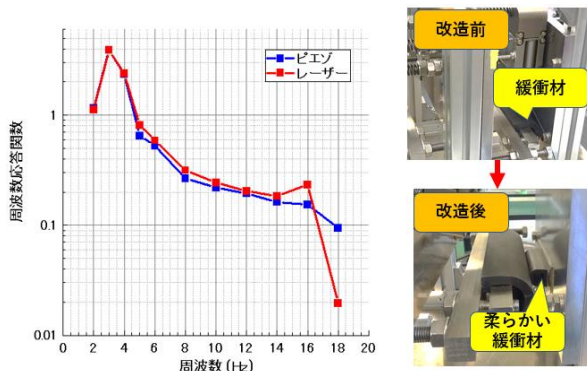


図11. 再振動試験測定結果

その後、同じようにサイン波を変化させながら周波数応答関数を測定した。測定結果を図11に示す。

周波数応答関数の測定値を見ると3 Hz付近に大きな山が見える。目標の1 Hz以下の固有振動数にはならなかったが5 Hzを超えると周波数応答関数が1以下に減少した。18 Hzでは1/100程度まで周波数応答関数を下げる事が出来た。これは外側フレーム(入力側)が大きく振動しても、内側フレーム(出力側)には振動が伝わらないことを示している。

この結果から、実機でも構造の固有振動数を下げ

ることで地震荷重を逃がすことができると考えられる。

5. まとめ

IWCD 検出器上下移動機構の設計に於いては、2種類の役割に分け、1つはガイドレールに沿って滑らかに移動できるための機構で、もう一つは地震時の荷重を支える支持材である。このため、上下移動時にはバネで支えられたフリーベアリングシステムを採用し、地震荷重の支持は水圧ジャッキに取付けられているゴム製の防舷材を用いた。

耐震解析では茨城県東海村で実際に起きた地震波を採用しISO3010の設計基準を元に解析をおこなった。その結果、地震に対する強度は構造の固有振動数が0.4 Hzと低い事も十分に耐えられる構造であることがわかった。

またこの構造は振動試験でも実証され、地震時には外(地盤)は揺れるが中(検出器)は揺れないという事がわかった。最新の前置水チェレンコフ検出器を図12に示す。



図12. 前置水チェレンコフ検出器

今後、水圧式ジャッキやフリーベアリング等の各要素の試験やプロトタイプでの試験を行い、健全性を確認する予定である。

参考文献

- [1] K.abe, et al., “Hyper-Kamiokande Design Report” arXiv:1805.04163, 9th May 2018
- [2] S. Bhadra, et al., “Letter of Intent to Construct a nuPRISM Detector in the J-PARC Neutrino Beamline”, arXiv:1412.3086
- [3] “J-PARC annual report 2021”, pp. 25 – pp. 26