

令和 6 年 5 月 17 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2023

課題番号：18K03682

研究課題名（和文）J-PARCニュートリノビームラインの放射化水及び放射化空気の研究

研究課題名（英文）Study of radioactive water and air in the J-PARC neutrino beam line

研究代表者

大山 雄一（Oyama, Yuichi）

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授

研究者番号：30213896

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）： J-PARCニュートリノビームラインにおいて、ビームライン機器の冷却水は、ビーム運転を継続するにつれて高濃度の放射能を含むようになる。これはビームにより生じる中性子が冷却水中の酸素原子を破壊することによるものである。このうちベリリウム7やマンガン54等の金属イオン性放射能は、イオン交換樹脂を用いて測定限界以下まで除去することができた。

一方、トリチウムについては一般排水以外の除去方法は不可能であり、またその生成量が初期の予想値よりも大きいことが問題になっていた。この原因が鉄板で生成されたトリチウムの冷却水への流出であることを突き止め、定量的に説明できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

加速器の運転で生じる放射能処理の問題は、社会的な影響も極めて大きい問題である。イオン交換樹脂の通水という簡単な方法で大強度陽子加速器から生じたトリチウム以外の放射能を十分除去できることを示したことは今後の加速器ビームラインの設計に大きな影響を与える。

またトリチウムについては、鉄構造体で生成されたトリチウムが冷却水に流出する現象を初めて定量的に評価した。そのトリチウム量が冷却水の酸素原子核の破壊から生じたものよりも大きいことは今後のビームライン建設におけるトリチウム量の算出において大きな影響を与えるであろう。

研究成果の概要（英文）： In the J-PARC neutrino beamline, the cooling water of the beamline components becomes highly radioactive as the beam operation continues. This is due to the spallation of oxygen atoms in the cooling water by neutrons produced by the beam. Metal ionic radioactivity such as beryllium-7 and manganese-54 could be removed to below the limit of measurement by using ion exchange resins.

On the other hand, for tritium, removal methods other than drainage were impossible. The critical problem was that the amount of tritium produced was larger than expected. It was found that the tritium produced from iron structure was leaked into the cooling water. It was shown that this could be explained quantitatively.

研究分野：高エネルギー物理学

キーワード：ニュートリノ J-PARC 放射化水 トリチウム ベリリウム マンガン 大強度陽子ビーム

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

J-PARC ニュートリノ実験施設において、ビーム運転で生じる放射化空気や放射化水の処理は実験のアキレス腱である。たとえば放射化空気の排気管理の失敗により実験停止に追い込まれる可能性さえあることは、隣のハドロン実験施設の例を挙げるまでもない。

陽子ビームのターゲットへの衝突によりターゲットステーションでは大量の熱や放射線が発生する。ターゲットを格納するヘリウム容器外に漏れ出した中性子が、地下ビームライン室の空気中の窒素・酸素およびアルゴン原子核を核破壊し、さまざまな短寿命(半減期が数時間以下)の放射性物質が生成される。

ニュートリノビームライン・ターゲットステーションのビーム軸に垂直な断面図

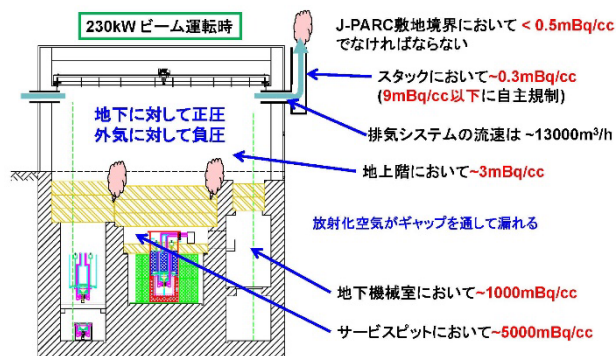


図1

を図1に示す。230kWで運転した時の放射能濃度の測定値も併せて記す。地下ビームライン室の放射能濃度は1000mBq/cc～5000mBq/ccであるが、地下ビームライン室と地上階の間の気密構造に加えて、大量の外から取り込んだ排気システムの空気と混ぜて排気しているため、排気スタックからの排気の放射能濃度は4桁小さい0.3mBq/cc程度にまで抑えられている。

排気スタックでの放射能濃度は9mBq/cc以下でなければならない。放射能濃度をコンクリートブロック遮蔽体、気密シート、ケーブル貫通孔の目張り、ビームライン室・地上部・建屋外部の間の気圧差等の微妙な調整によって4桁小さくすることによって達成されており、現在の放射能濃度約0.3mBq/ccは決して安定なものではなかった。ひとつ操作を間違えると排気スタックでの放射能濃度は激増する危険性があった。2倍以上ビーム強度を上げた状態でも安全に実験を継続するためには、さらなる排気管理と地下ビームライン室や地上階における放射能濃度の測定等の知識の蓄積が望まれていた。

一方、ターゲットステーションで大量の熱が発生する。この熱によるビームライン機器の破損を防ぐために、冷却水を循環させてビームライン機器を冷却している。冷却水及び配管から溶解した金属イオンがビームにより放射化する。生成される放射能のうち生成量と半減期を考えると、対策が必要なものは主に ^3H 、 ^7Be 、 ^{22}Na 、 ^{54}Mn 等である。このうち ^3H 以外の放射能はイオン交換樹脂で除去する。イオン交換樹脂を用いた安全・効率的な除去方法のノウハウが必要であった。また ^3H については、福島第一原発の処理水問題でクローズアップされているように、除去は原理的に不可能ではあるが、十分な希釈を行う手順を確立することに加えてできるだけ生成を抑えるために、少なくとも発生量を正確に見積もるだけの知識を蓄積する必要である。

2. 研究の目的

J-PARC ニュートリノビームラインはメインリングからの陽子ビーム入射を受けニュートリノビームを生成しT2K実験に供給する。メインリングのビーム強度1.3MWまでの増強が進んでおり、ニュートリノビームラインとしてはこの大強度ビームに対して排出される放射化水・

放射化空気が規制値を超えないように制御することが最大の目的である。また、2021年度からビーム強度 1.3MW へ向けて国の原子力規制庁や茨城県にビーム増強の許可を得る必要があった。その際、ビーム増強後も放射化水・放射化空気の排出量が規制値を越えないことを証明する必要がある。このような事情から本研究の目的の軸足は放射能排出量の正確な見積りと、それが規制値を超えそうな場合はその対策に移っていった。

3. 研究の方法

通常の方法でニュートリノビームラインからの放射化水の放射能濃度を測定し、また放射化空気の放射能濃度を測定する。そこから算出した放射能排出量が、規制値よりも十分小さく、またビーム強度増強後も規制値を越える可能性が無いのであればその水・空気についてはそれ以上深追いしない。規制値を超える可能性がある水・空気に関してのみ対応策を考えるという方針で対応した。

4. 研究成果

いままでの放射能排出量と今後の予想等を(1)放射化空気、(2)放射化水中の ^3H 以外の核種、及び(3)放射化水中の ^3H について示す。

(1)放射化空気

ニュートリノビームラインで生じる放射性ガスは空気中の窒素や酸素、ヘリウム容器中ヘリウムの核破壊から生じる ^3H (半減期 12.3 年)と空気中の ^{40}Ar の中性子捕獲から生じる ^{41}Ar (半減期 109 分)の2核種について検討すればよい。他の放射能は気体にならない、半減期が短い、生成量が少ない等々の理由で無視できる。

ビームラインからターゲットステーション棟地上階への放射化空気を削減するために、ターゲットステーション上部コンクリートシールドをコーキング・気密シートで覆い地下の空気が漏れないようにした。これにより地上階への漏れは1/2.6に削減した。さらに地上階から排気筒への排出を減らすためにターゲットステーション排気系統にバイパスラインを作って、多くの ^{41}Ar が排気されずターゲットステーション上屋で崩壊するようにした。これにより1/2.3に削減できた。

ニュートリノビームライン運転開始時に国・地方自治体に ^3H の発生量は430GBq/年と示した。削減努力の結果、削減後の排出量をスケールさせると将来の目標である $1.3\text{MW}\times 10^7$ 秒/年のビーム運転では、排出量は237GBq/年と見積もられた。1.3MW運転に支障がないことが示された。

またターゲットステーション排気筒からの ^{41}Ar の放出管理値は、法令と排気筒の高さ、事業所境界までの距離、大気の安定度等から算出され、330GBq/3ヵ月である。削減後の排出量をスケールさせると $1.3\text{MW}\times 10^7$ 秒/年のビーム運転では、排出量は42GBq/3ヵ月と見積もられ、こちらも将来の運転に支障がないことが示された。

ターゲットステーションからの放射化空気の排気は、運転中の排気、週1回のメンテナンスに伴う排気、年1回のシャットダウン後の排気に大別される。週1回のメンテナンス時の排気開始を遅らせることにより ^{41}Ar の崩壊を待つことについても定量的に検討され、2時間程度の待機時間延長により入域者の安全を確保できることが示された。

(2)放射化水中の ^3H 以外の核種

^3H 以外の冷却水中の放射能はすべて金属イオンの放射能であり、イオン交換樹脂の通水で除去できる。特に生成量が多い放射能は ^7Be で、年間排出量を 1200MBq 以下にすることが必要である。イオン交換樹脂通水時間を増やすことにより放射能除去率を上げることに成功した。最終的には一般排水中の ^7Be 量を測定限界以下にすることができた。尚、イオン交換樹脂の種類もいろいろ変更して検討を行ったが本質的な差異は見られなかった。5 年間の ^7Be 生成量、排出量、除去率を表 1 に示す。

	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度	2023年度
ビーム量 (POT)	5.16×10^{20}	4.77×10^{20}	0.47×10^{20}	1.31×10^{20}	No beam	3.23×10^{20}
^7Be 量 生成量→除去後 (除去率)	~315GBq →100MBq (99.97%)	~290GBq →4MBq (99.99%)	~29GBq →ND	~80GBq →0.13MBq (>99.999%)	-----	197GBq →ND

表 1

(3) 放射化空気放射化水中の ^3H

2021 年度からビーム強度 1.3MW へ向けての国や県への申請で、最も大きな問題は放射化水中の ^3H 量であった。2009 年の 750kW 申請ではニュートリノ実験施設からの排水中の ^3H の予想値は $750\text{kW} \times 208$ 日運転で 120GBq と申請したのだが、実際の運転では $450\text{kW} \times 102$ 日運転で既に 195GBq の ^3H が生成された。最初の計算の 8 倍である。この理由を明確にすることが求められた。

1.3MW 申請を機に再計算をしたところ、冷却水の酸素の核破壊から生じる ^3H 量は 2009 年計算の約 3 倍であることが示された。相違の原因は最初の ^3H 生成量計算以降、土壇場での冷却水系の設計変更をしたことであり、実際の冷却水量は最初の計算の約 3 倍であった。冷却水についての見積りが甘かったと結論した。

最初の計算値と実測値の食い違いは約 8 倍であり、冷却水量だけでは説明がつかない。この差異は「鉄板から冷却水に流出する ^3H 」説明できると考えられる。2018 年に、ターゲットステーション冷却水の ^3H 濃度がビーム運転をしていないのに増加する現象が確認された。これを図 2 に示す。1 日あたりの ^3H 濃度上昇は約 25Bq/cc、 ^3H 量約 0.195GBq に相当である。同様の現象が Fermilab のニュートリノビームライン (NuMI) との情報交換で指摘された。計算によると冷却対象の鉄板で生成される ^3H の総量は 1.3MW \times 208 日運転で 5600GBq もの量に達することになり、このほんの一部が流出したと考えても十分説明がつく。過去の ^3H 濃度の上昇から算出して、1.3MW \times 208 日運転では 980GBq の ^3H が流出するであろうとの計算を得た。



図 2

ここまでの計算を表 2 にまとめる。実測値 (b) と計算値 (f) はよく一致しており、冷却水中の ^3H 量は十分説明できたことになる。

	計算/実測(1.3MW x 208日相当)	^3H (GBq)
(a)	2009年計算	208
(b)	10年以上のビーム運転での実測	1700
(c)	2020年計算	650
(d)	2020年計算による鉄板中の ^3H 生成量	5600
(e)	鉄板から冷却水への ^3H 流出量	980
(f)	計算による総 ^3H 量(=(c)+(e))	1630

表 2

鉄板からの ^3H は、冷却水の酸素原子の核破壊から直接生成された ^3H よりも多いという事実は

我々の想像を超えるものであった。これらの結果に基づき、 $1.3 \text{ MW} \times 208 \text{ 日}$ 運転で 1700 GBq/年 を公式の ^3H 生成量見積とした。

1.3MW 申請に際し、ニュートリノ実験施設からの排水中の ^3H 量を 1700GBq とする場合、2002 年に茨城県と J-PARC の間の「J-PARC 全体からの排水中の総 ^3H は 1300GBq/年 以下」という合意を超えることになり、大きな困難があるとの示唆を受けた。これを受けて、ニュートリノビームラインからの年間の ^3H 排出量を 1100GBq として申請し、年間最大ビーム量を 31×10^{20} POT/年 ($1.3\text{MW} \times 134 \text{ 日}$ 相当) とすることで妥協した。

本科研費の研究で、今後の放射化空気の排気と ^3H 以外の放射能の排水については 1.3MW 運転で支障がないことを証明できた。排水中の ^3H についてはその生成量を定量的に説明することに成功した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計24件（うち査読付論文 24件 / うち国際共著 23件 / うちオープンアクセス 24件）

1. 著者名 K.Abe, T.Ishida, Y.Oyama et al.	4. 巻 17
2. 論文標題 Scintillator ageing of the T2K near detectors from 2010 to 2021	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 P10028
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/17/10/P10028	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 K.Abe, T.Ishida, Y.Oyama et al.	4. 巻 103
2. 論文標題 Improved constraints on neutrino mixing from the T2K experiment with 3.13×10^{21} protons on target	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Phys.Rev.D	6. 最初と最後の頁 112008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.112008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 K.Abe, T.Ishida, Y.Oyama et al.	4. 巻 103
2. 論文標題 First T2K measurement of transverse kinematic imbalance in the muon-neutrino charged-current single-pi+ production channel containing at least one proton	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Phys.Rev.D	6. 最初と最後の頁 112009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.112009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 K.Abe, T.Ishida, Y.Oyama et al.	4. 巻 580
2. 論文標題 Constraint on the matter-antimatter symmetry-violating phase in neutrino oscillations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 339-344
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-020-2177-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 K.Abe, T.Ishida, Y.Oyama et al.	4. 巻 124
2. 論文標題 Search for Electron Antineutrino Appearance in a Long-Baseline Muon Antineutrino Beam	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys.Rev.Lett	6. 最初と最後の頁 161802
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.124.161802	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 K.Abe, T.Ishida, Y.Oyama et al.	4. 巻 101
2. 論文標題 First combined measurement of the muon neutrino and antineutrino charged-current cross section without pions in the final state at T2K	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys.Rev.D	6. 最初と最後の頁 112001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.112001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 K.Abe, T.Ishida, Y.Oyama et al.	4. 巻 101
2. 論文標題 Simultaneous measurement of the muon neutrino charged-current cross section on oxygen and carbon without pions in the final state at T2K	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys.Rev.D	6. 最初と最後の頁 112004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.012004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 K.Abe, T.Ishida, Y.Oyama et al.	4. 巻 102
2. 論文標題 First measurement of the charged current $\bar{\nu}_{\mu}$ double differential cross section on a water target without pions in the final state	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys.Rev.D	6. 最初と最後の頁 12007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.012007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 K.Abe, T.Ishida, Y.Oyama et al.	4. 巻 10
2. 論文標題 Measurement of the charged-current electron (anti-)neutrino inclusive cross-sections at the T2K off-axis near detector ND280	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J.High Energ. Phys.	6. 最初と最後の頁 114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP10(2020)114	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 K.Abe, T.Ishida, Y.Oyama et al.	4. 巻 103
2. 論文標題 T2K measurements of muon neutrino and antineutrino disappearance using 3.13×10^{21} protons on target	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Phys.Rev.D	6. 最初と最後の頁 L001101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.L011101	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 K.Abe, T.Ishida, Y.Oyama et al.	4. 巻 2021
2. 論文標題 Measurements of $\bar{\nu}_{\mu}$ and $\bar{\nu}_{\mu} + \nu_{\mu}$ charged-current cross-sections without detected pions nor protons on water and hydrocarbon at mean antineutrino energy of 0.86GeV	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Prog.Theor.Exp.Phys.	6. 最初と最後の頁 ptab014
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptab014	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 K. Abe, T. Ishida, Y. Oyama et al.	4. 巻 99
2. 論文標題 Search for light sterile neutrinos with the T2K far detector Super-Kamiokande at a baseline of 295 km	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 71103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.99.071103	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 K. Abe, T. Ishida, Y. Oyama et al.	4. 巻 46
2. 論文標題 Search for neutral-current induced single photon production at the ND280 near detector in T2K	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics	6. 最初と最後の頁 08LT01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6471/ab227d	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 K. Abe, T. Ishida, Y. Oyama et al.	4. 巻 2019
2. 論文標題 Measurement of the muon neutrino charged-current cross sections on water, hydrocarbon and iron, and their ratios, with the T2K on-axis detectors	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 093C02
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptz070	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 K. Abe, T. Ishida, Y. Oyama et al.	4. 巻 100
2. 論文標題 Measurement of neutrino and antineutrino neutral-current quasielasticlike interactions on oxygen by detecting nuclear deexcitation gamma rays	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 112009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.112009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 K. Abe, T. Ishida, Y. Oyama et al.	4. 巻 101
2. 論文標題 Measurement of the muon neutrino charged-current single π^+ production on hydrocarbon using the T2K off-axis near detector ND280	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 12007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.012007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 K.Abe, T.Ishida, Y.Oyama et al	4. 巻 98
2. 論文標題 Measurement of inclusive double-differential ν_{μ} charged-current cross section with improved acceptance in the T2K off-axis near detector	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 12004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.98.012004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 K.Abe, T.Ishida, Y.Oyama et al	4. 巻 98
2. 論文標題 Characterization of nuclear effects in muon-neutrino scattering on hydrocarbon with a measurement of final-state kinematics and correlations in charged-current pionless interactions at T2K	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 32003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.98.032003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 K.Abe, T.Ishida, Y.Oyama et al	4. 巻 121
2. 論文標題 Search for CP violation in Neutrino and Antineutrino Oscillations by the T2K experiment with 2.2×10^{21} protons on target	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 171802
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.121.171802	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 K.Abe, T.Ishida, Y.Oyama et al.	4. 巻 83
2. 論文標題 Measurements of neutrino oscillation parameters from the T2K experiment using 3.6×10^{21} protons on target	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The European Physical Journal C	6. 最初と最後の頁 782
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjc/s10052-023-11819-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 K.Abe, T.Ishida, Y.Oyama et al.	4. 巻 108
2. 論文標題 Updated T2K measurements of muon neutrino and antineutrino disappearance using 3.6×10^{21} protons on target	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 72011
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.108.072011	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 K.Abe, T.Ishida, Y.Oyama et al.	4. 巻 108
2. 論文標題 Measurements of the ν_{μ} and $\bar{\nu}_{\mu}$ -induced Coherent Charged Pion Production Cross Sections on ^{12}C by the T2K Experiment	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 92009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.108.092009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 K.Abe, T.Ishida, Y.Oyama et al.	4. 巻 108
2. 論文標題 First measurement of muon neutrino charged-current interactions on hydrocarbon without pions in the final state using multiple detectors with correlated energy spectra at T2K	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 112009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.108.112009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Yuichi Oyama	4. 巻 2023
2. 論文標題 Toward the confirmation of atmospheric neutrino oscillations	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 ptad097
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptad097	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 7件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Yuichi Oyama
2. 発表標題 Recent status of the tritium problem at J-PARC neutrino beamline
3. 学会等名 12th International Workshop on Neutrino Beams and Instrumentation (NB12022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuichi Oyama
2. 発表標題 Tritium problems in the J-PARC neutrino beamline
3. 学会等名 US/Japan workshop on tritium transport study (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuichi Oyama
2. 発表標題 J-PARC Neutrino Beamline and 1.3 MW Upgrade
3. 学会等名 NuFact2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuichi Oyama
2. 発表標題 Tritium problems in the J-PARC neutrino beamline
3. 学会等名 NB12019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大山 雄一
2. 発表標題 J-PARCニュートリノビームラインにおけるトリチウム問題
3. 学会等名 富山大学双方向型共同研究報告会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuichi Oyama
2. 発表標題 Status of the T2K experiment
3. 学会等名 CNNP2020（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuichi Oyama
2. 発表標題 Radio-active waste treatment
3. 学会等名 J-PARC Neutrino beam line upgrade Technical Advisory Meeting（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Welcome to the T2K Intranet
<https://www.t2k.org/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	山田 善一 (Yamada Yoshikazu) (00200759)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子 原子核研究所・教授 (82118)	
研究分担者	石田 卓 (Ishida Taku) (70290856)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子 原子核研究所・講師 (82118)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	Department of Physics, Boston University	University of California, Irvine	University of Colorado at Boulder	他9機関
カナダ	University of British Columbia	University of Regina	TRIUMF	他4機関
スイス	LHEP	ETH	University of Geneve	
フランス	IRFU, CEA Saclay	Ecole Polytechnique, IN2P3-CNRS	LPNHE	
英国	Imperial College, London	STFC	Oxford University	