

2.1.4 考察

(1) バックグラウンド測定

AFAS-B 及び AFAS-P の Collar 検出器において、シングル値が低下または上昇した事象については、各 Collar 検出器においてほぼ同時に確認された事象であることから、検出器の異常ではなく、環境の変化（AFAS 検出器近傍の設備の移動、隣接する部屋内の放射線源の増減）または装置への供給電圧の変動等により起こった事象であると推測される。また、ダブル値においてみられた、単発的な高計数値が 1 日に数回程度測定される事象についても、各 Collar 検出器においてほぼ同時に確認された事象であることから、宇宙線などによる影響であると考えられる。なお、このような異常値は、通常、INCC ソフトウェアの QC Test 機能により排除されるため、測定に影響を及ぼすことはない。

以上のように、いくつかの異常値が取得されたが、各検出器により得られたほぼ全てのシングル値は、誤差 (3σ) の範囲内に収まっていた。このことから、測定期間中、各検出器は安定して動作し、データを取得できていたと考えられる。

また、本測定において、測定環境の温度及び湿度の変動が測定に与える影響はみられなかったことから、J-MOX においても AFAS 測定環境の温度及び湿度の変動範囲が本測定と同等（温度：約 17°C ～ 26°C 、湿度：約 23%～78%）であれば、測定に影響を及ぼすことはないと考えられる。なお、AFAS の各検出器の内部は乾燥剤（デシケーター）により低湿度状態が保たれており、外部の湿度の影響を受けにくい構造となっている。本測定期間においても、毎月実施した維持管理作業の際、必要に応じ乾燥剤を交換するなど適切に管理を行っていたため、外部の湿度の影響は受けにくい状態を維持できたものと考えられる。

(2) ^{252}Cf 中性子線源測定

いずれの検出器においても、各月の計数値と期待値の相対差%Difference は、管理限界値の範囲内となったことから、本期間において AFAS の性能は正常に維持されていたと考えられる。

2.2 パルス間隔分布の評価

2.2.1 目的

装置に不具合が発生した場合、その原因特定の判断材料となる、アンプ毎のパルス間隔分布を評価する。

2.2.2 方法

JAEA が所有するリストモジュール (PTR-32HV) を用いて ^{252}Cf 中性子線源測定を実施し、AFAS の各検出器のアンプ毎のパルス間隔分布を評価する。また、本評価結果と平成 30 年度に実施した性能確認試験 (参考文献 2) における評価結果を比較する。平成 30 年度の評価結果の例を図 2.2.2-1 に示す。

本評価は、AFAS-B 及び AFAS-P の各検出器について行う。各検出器のアンプ数及び配置図を表 2.2.2-1 及び図 2.2.2-2～2.2.2-5 に示す。

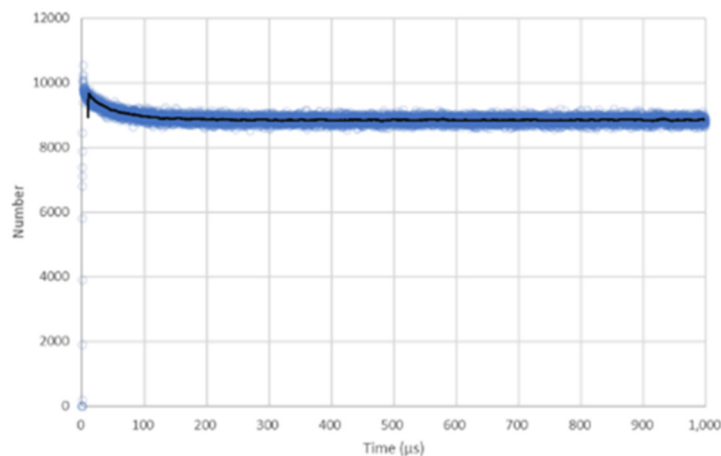


図 2.2.2-1 AFAS-B Collar 検出器 アンプ A のパルス間隔分布の例

表 2.2.2-1 各検出器におけるアンプ数

検出器		アンプ 個数
AFAS-B	Fork 検出器	2
	Collar 検出器	6
AFAS-P	Fork 検出器	2
	Collar 検出器	10

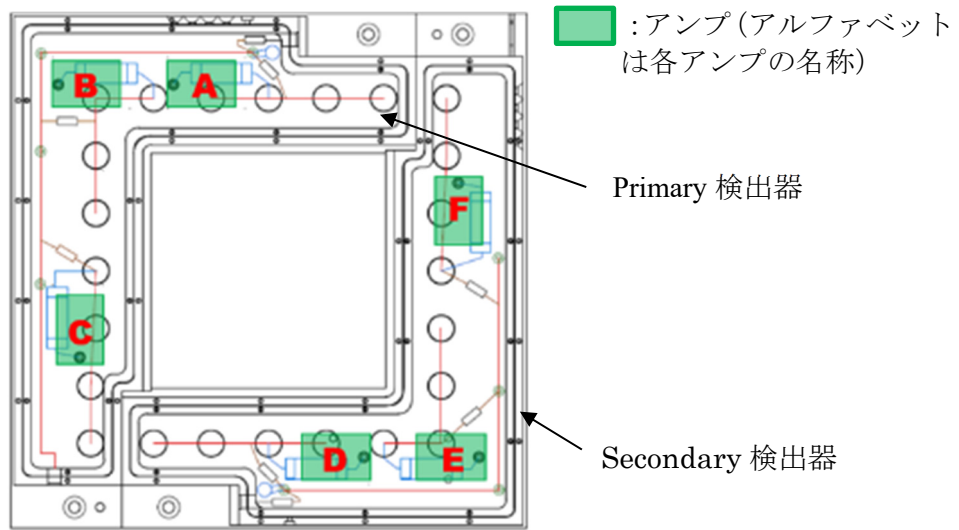


図 2.2.2-2 AFAS-B Collar 検出器のアンプ配置図

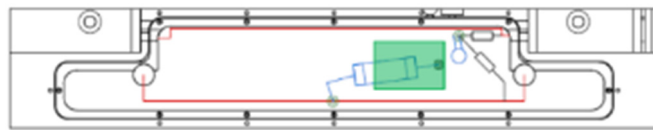


図 2.2.2-3 AFAS-B Top Fork 及び Bottom Fork 検出器のアンプ配置図

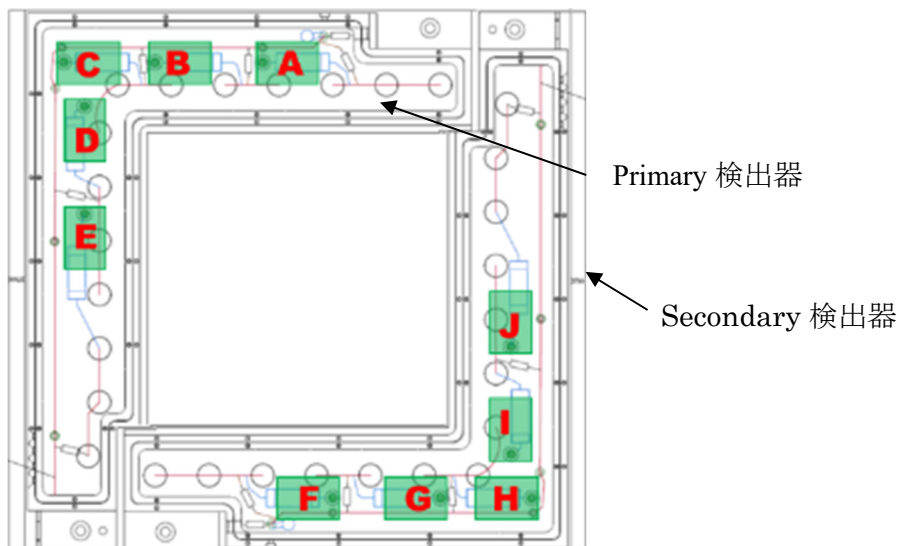


図 2.2.2-4 AFAS-P Collar 検出器のアンプ配置図

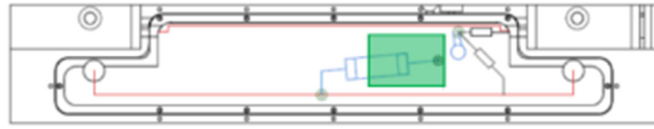


図 2.2.2-5 AFAS-P Top Fork 及び Bottom Fork 検出器のアンプ配置図

詳細な試験手順を以下に示す。

- ① AFAS の各検出器を試験用架台に設置する。
- ② 線源固定治具を用いて、1.6 項の表 1.6-1 に示す ^{252}Cf 中性子線源 (Q2-334) を任意の検出器にセットする。
- ③ 検出器にリストモジュールを接続する。
- ④ 検出器のジャンクションボックスの蓋を外す。
- ⑤ 任意のアンプ以外のアンプのジャンパーピン (写真 2.2.2-1 参照) を取り外し、計数機能を停止させる。
- ⑥ リストモジュール用ソフトウェアを用いてパルスを測定 (測定時間 : Collar 検出器 : 10 分、Fork 検出器 : 100 分) し、パルス間隔分布を評価する。
- ⑦ 全てのアンプについて、⑤～⑥を実施する。
- ⑧ 全ての検出器について、②～⑦を実施する。

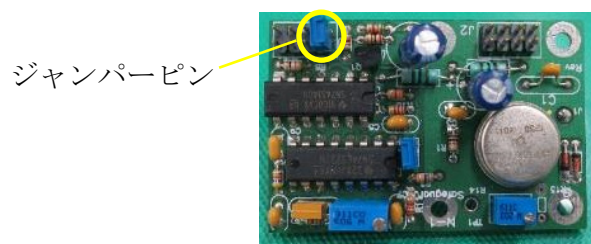


写真 2.2.2-1 AFAS のアンプ (AMPTEK A111)

2.2.3 結果

AFAS-B Collar 検出器における各アンプのパルス間隔分布を評価した。本評価結果と平成 30 年度（2018 年度）に実施した性能確認試験^(参考文献 2)における評価結果を比較した結果（0～1000 μ s 及び 0～100 μ s の分布）を図 2.2.3-1～2.2.3-12 に示す。各グラフ中の×印及び破線は平成 30 年度（2018 年度）に評価したパルス間隔分布及びその近似曲線を示し、○印及び実線は平成 31 年度（2019 年度）に評価したパルス間隔分布及びその近似曲線を示す。

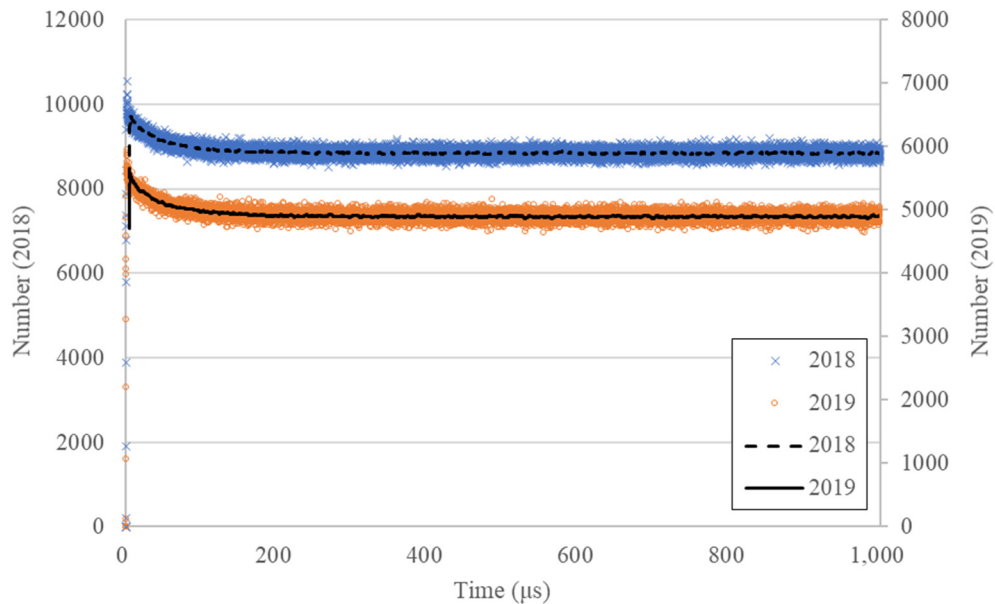


図 2.2.3-1 AFAS-B Collar 検出器 アンプ A のパルス間隔分布の比較（0～1000 μ s）

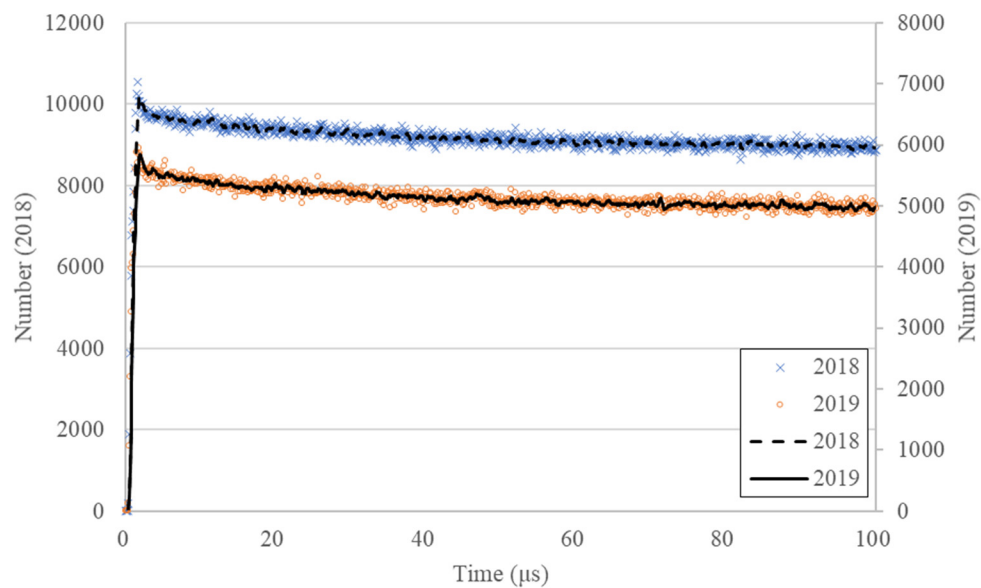


図 2.2.3-2 AFAS-B Collar 検出器 アンプ A のパルス間隔分布の比較（0～100 μ s）

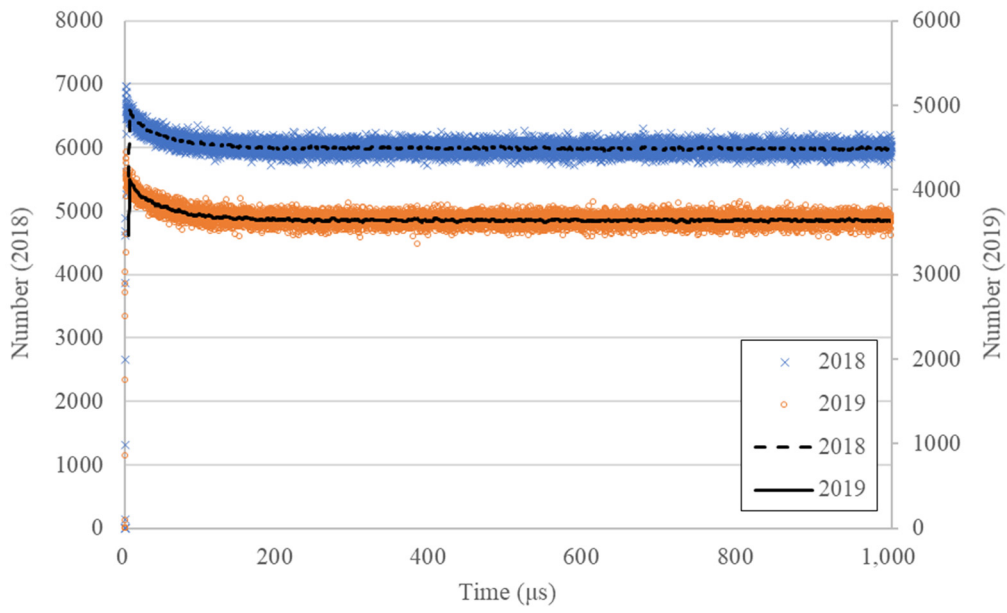


図 2.2.3-3 AFAS-B Collar 検出器 アンプ B のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

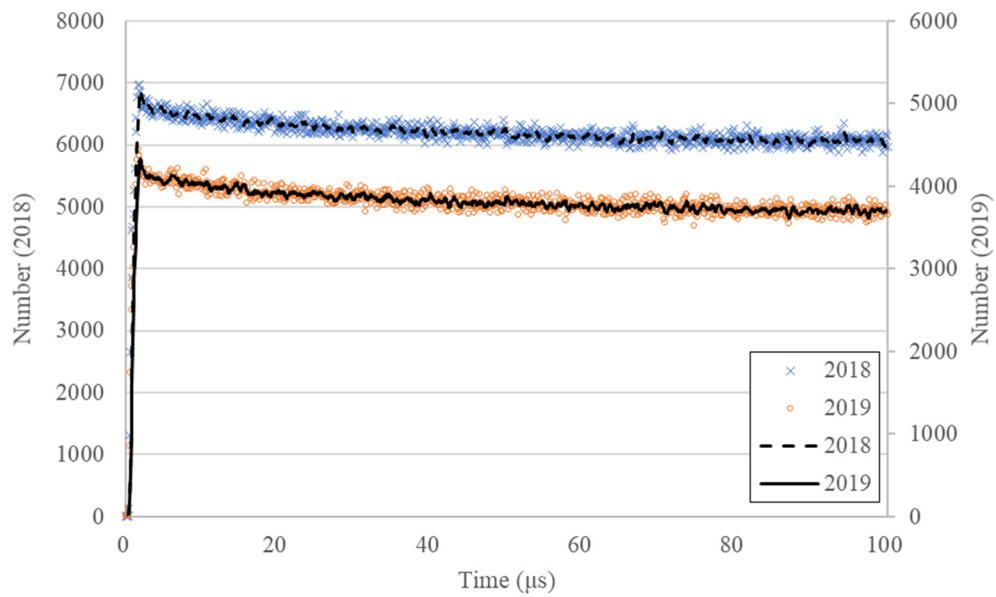


図 2.2.3-4 AFAS-B Collar 検出器 アンプ B のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

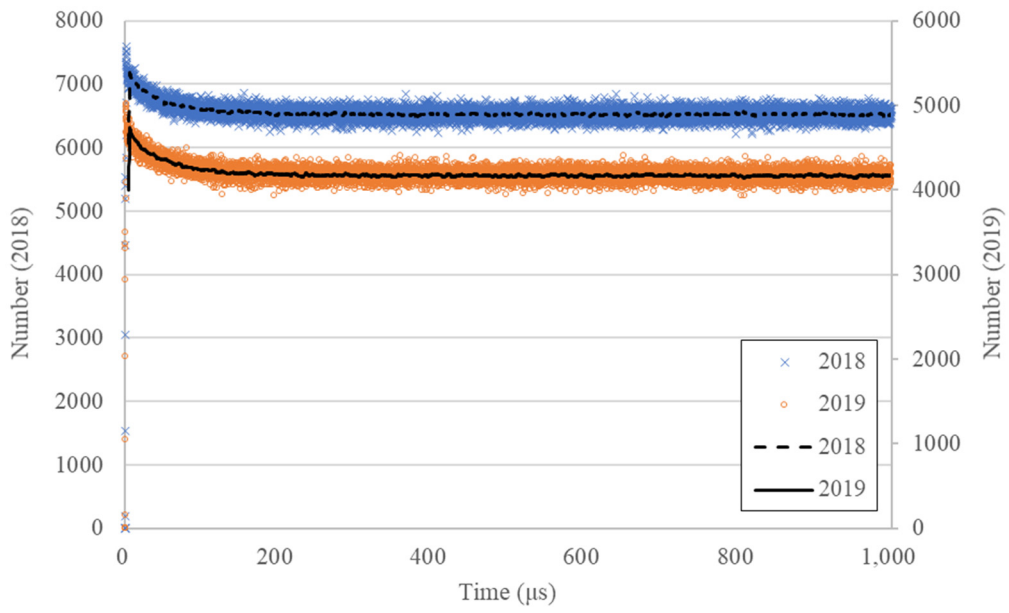


図 2.2.3-5 AFAS-B Collar 検出器 アンプ C のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

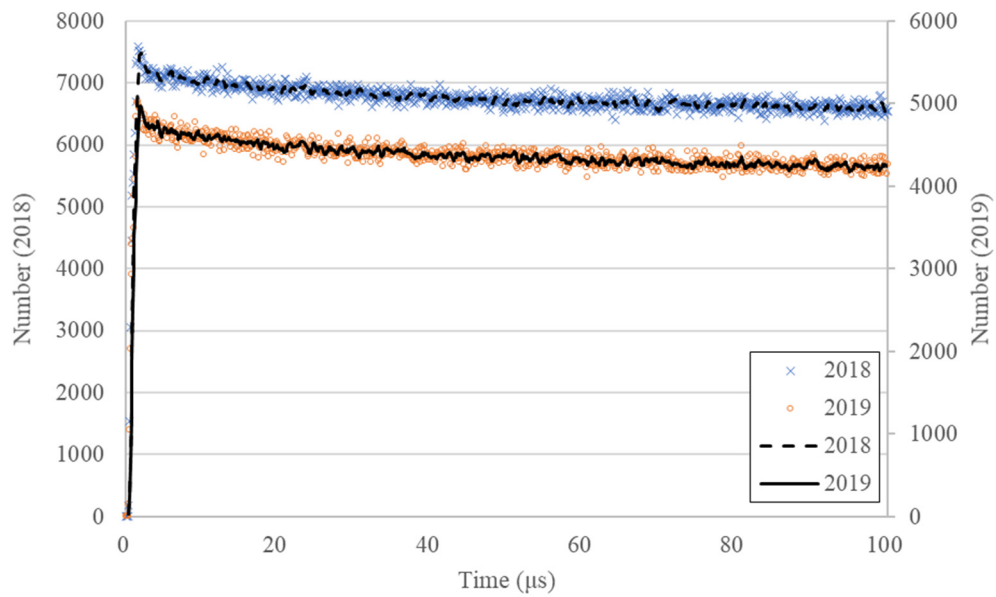


図 2.2.3-6 AFAS-B Collar 検出器 アンプ C のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

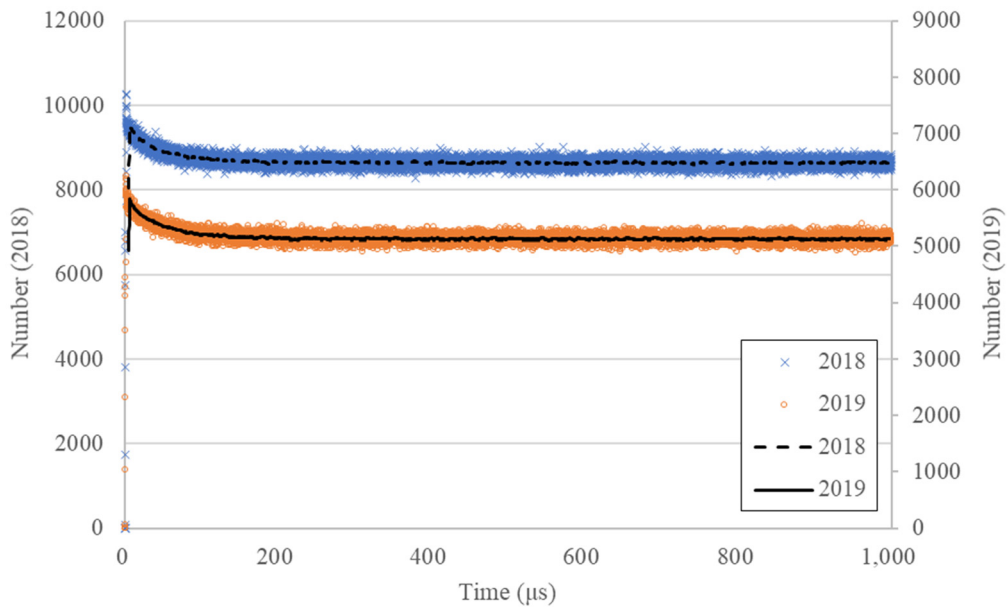


図 2.2.3-7 AFAS-B Collar 検出器 アンプ D のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

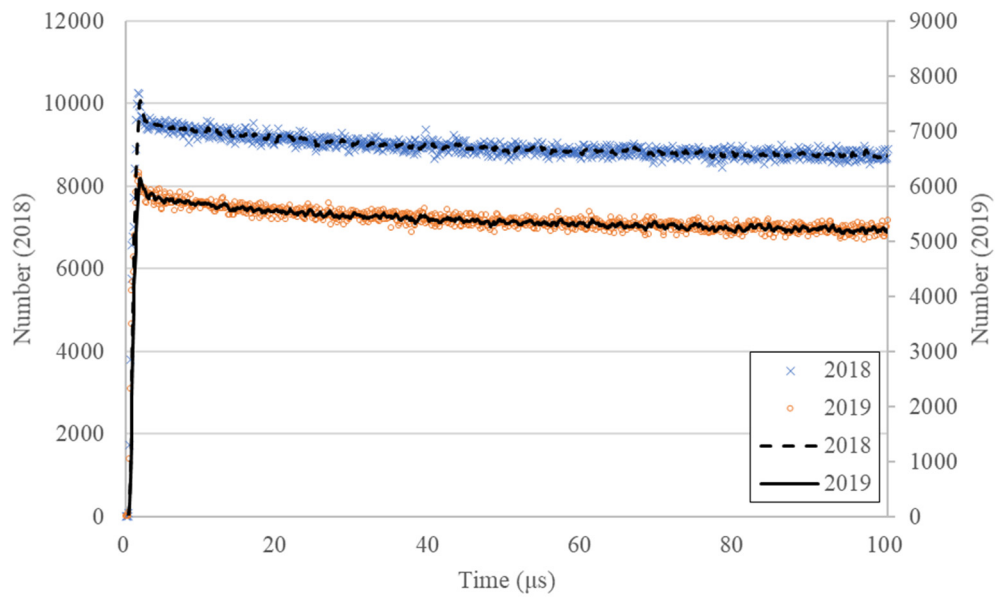


図 2.2.3-8 AFAS-B Collar 検出器 アンプ D のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

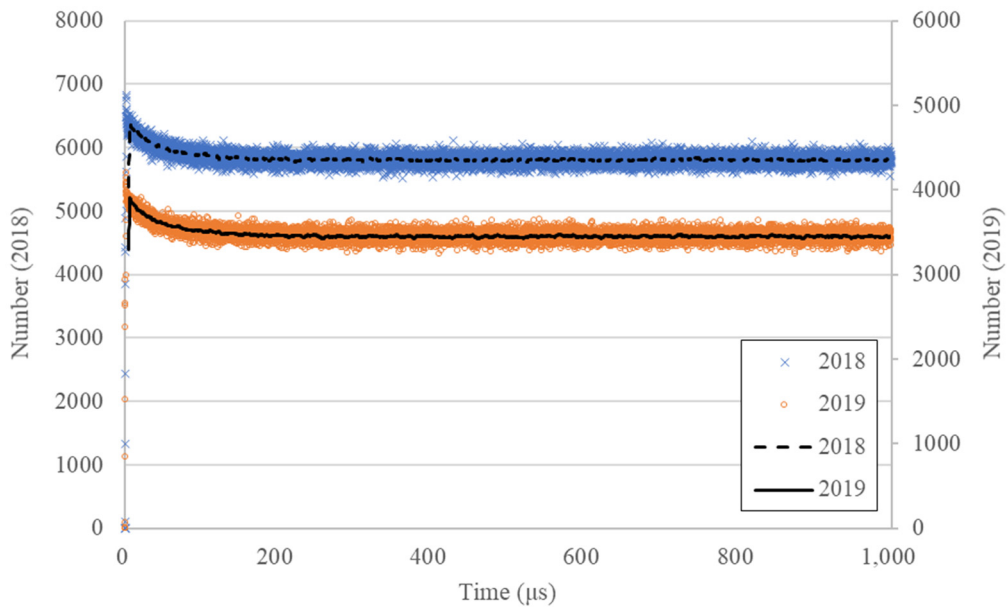


図 2.2.3-9 AFAS-B Collar 検出器 アンプ E のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

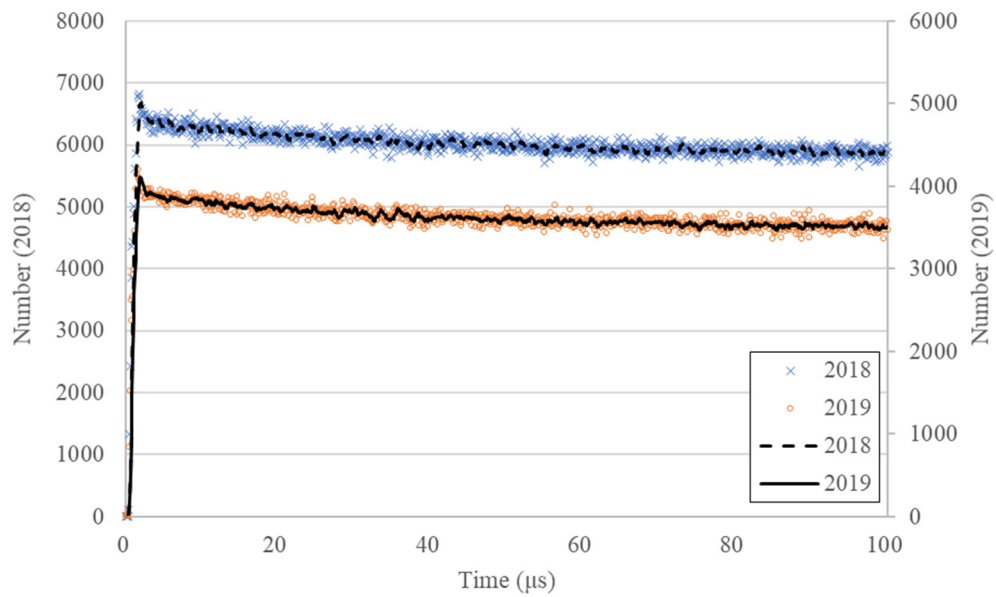


図 2.2.3-10 AFAS-B Collar 検出器 アンプ E のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

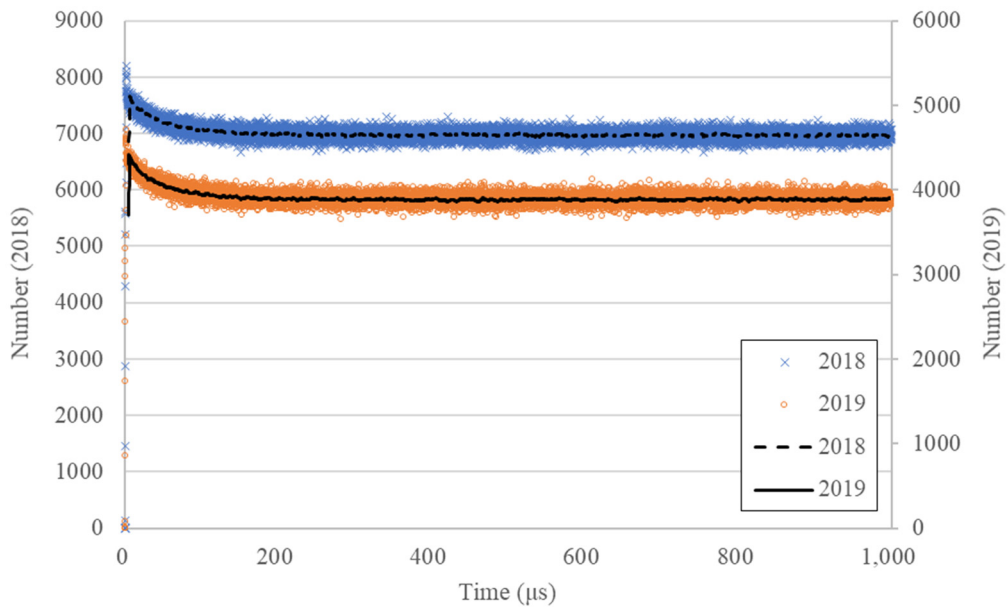


図 2.2.3-11 AFAS-B Collar 検出器 アンプ F のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

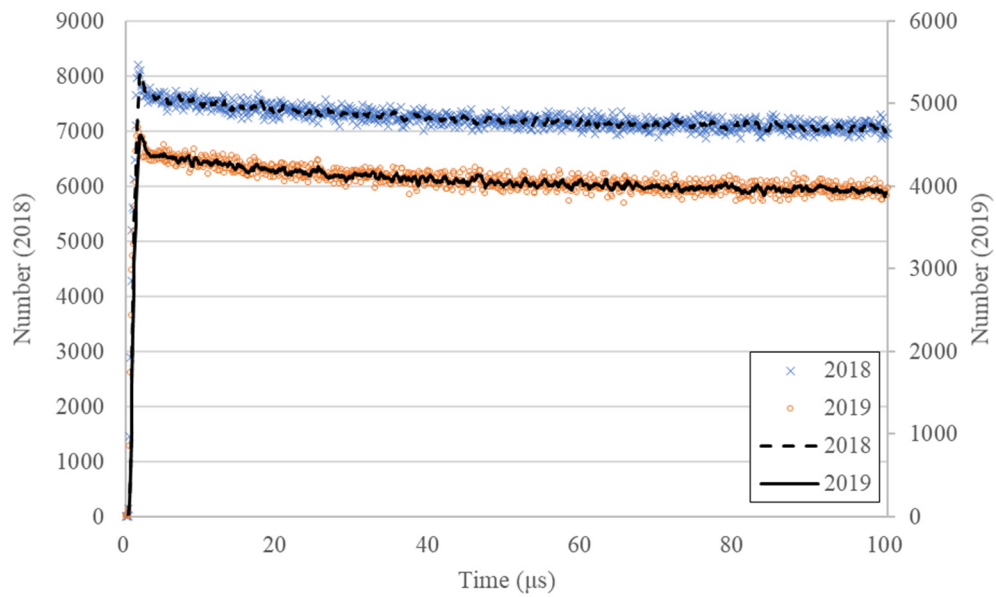


図 2.2.3-12 AFAS-B Collar 検出器 アンプ F のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

AFAS-B Top Fork 検出器におけるアンプのパルス間隔分布を評価した。本評価結果と平成 30 年度（2018 年度）に実施した性能確認試験（参考文献 2）における評価結果を比較した結果（0～1000 μ s 及び 0～100 μ s の分布）を図 2.2.3-13 及び図 2.2.3-14 に示す。各グラフ中の×印及び破線は平成 30 年度（2018 年度）に評価したパルス間隔分布及びその近似曲線を示し、○印及び実線は平成 31 年度（2019 年度）に評価したパルス間隔分布及びその近似曲線を示す。

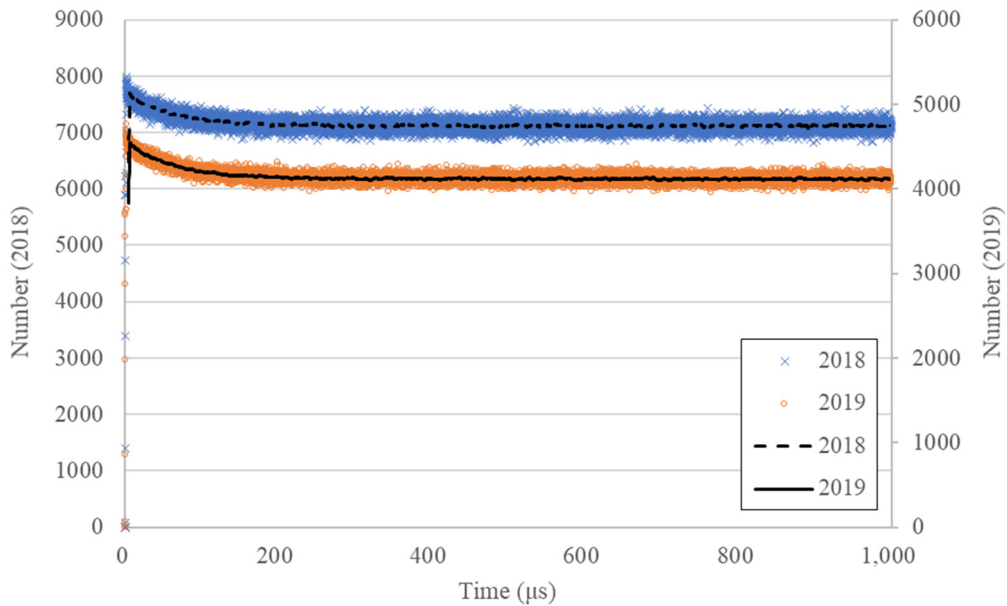


図 2.2.3-13 AFAS-B Top Fork 検出器 パルス間隔分布の比較（0～1000 μ s）

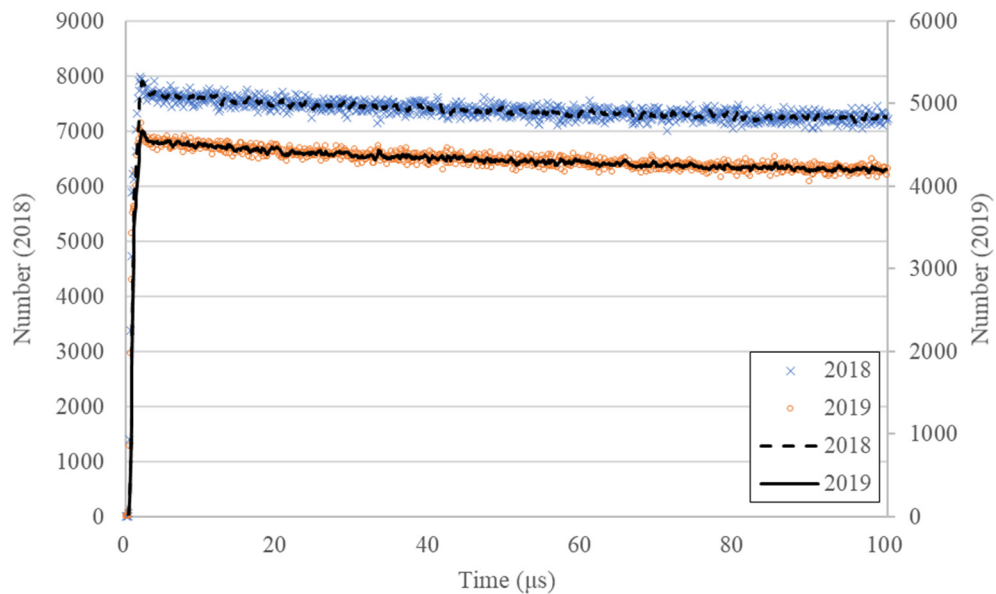


図 2.2.3-14 AFAS-B Top Fork 検出器 パルス間隔分布の比較（0～100 μ s）

AFAS-B Bottom Fork 検出器におけるアンプのパルス間隔分布を評価した。本評価結果と平成 30 年度（2018 年度）に実施した性能確認試験（参考文献 2）における評価結果を比較した結果（0～1000 μ s 及び 0～100 μ s の分布）を図 2.2.3-15 及び図 2.2.3-16 に示す。各グラフ中の×印及び破線は平成 30 年度（2018 年度）に評価したパルス間隔分布及びその近似曲線を示し、○印及び実線は平成 31 年度（2019 年度）に評価したパルス間隔分布及びその近似曲線を示す。

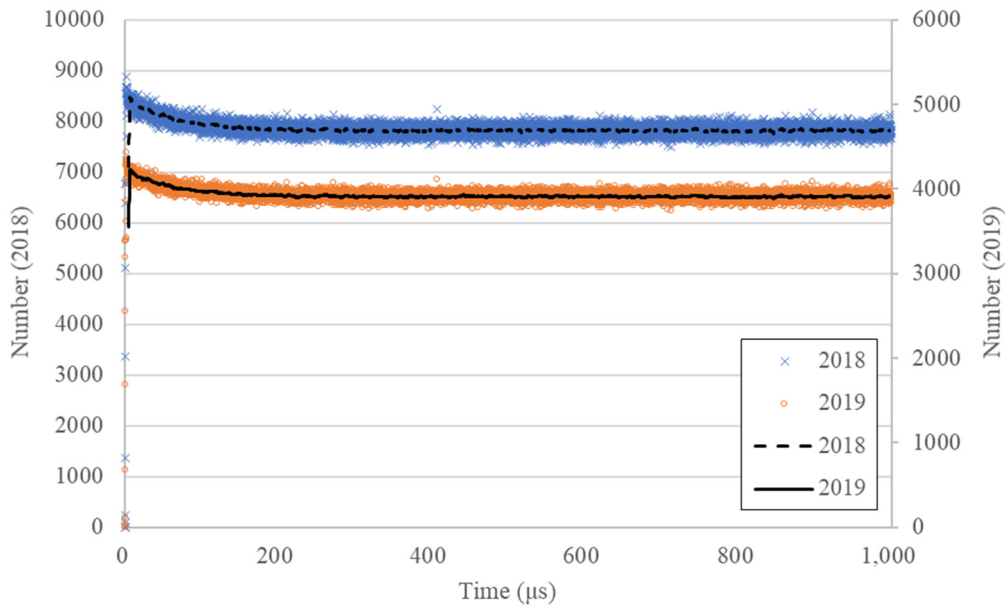


図 2.2.3-15 AFAS-B Bottom Fork 検出器のパルス間隔分布の比較（0～1000 μ s）

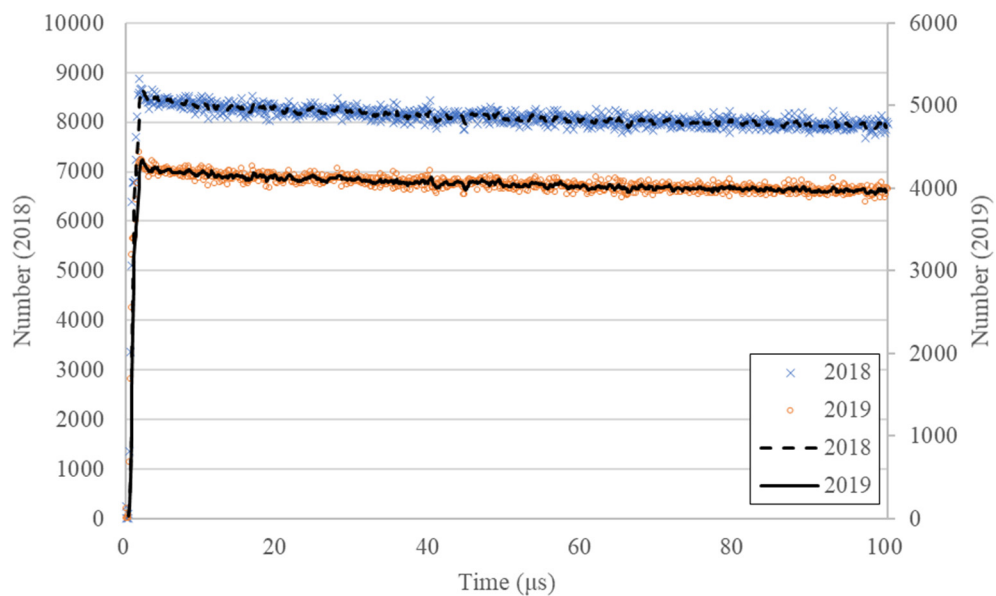


図 2.2.3-16 AFAS-B Bottom Fork 検出器のパルス間隔分布の比較（0～100 μ s）

AFAS-P Collar 検出器における各アンプのパルス間隔分布を評価した。本評価結果と平成 30 年度（2018 年度）に実施した性能確認試験（参考文献 2）における評価結果を比較した結果（0～1000 μ s 及び 0～100 μ s の分布）を図 2.2.3-17～2.2.3-36 に示す。各グラフ中の×印及び破線は平成 30 年度（2018 年度）に評価したパルス間隔分布及びその近似曲線を示し、○印及び実線は平成 31 年度（2019 年度）に評価したパルス間隔分布及びその近似曲線を示す。

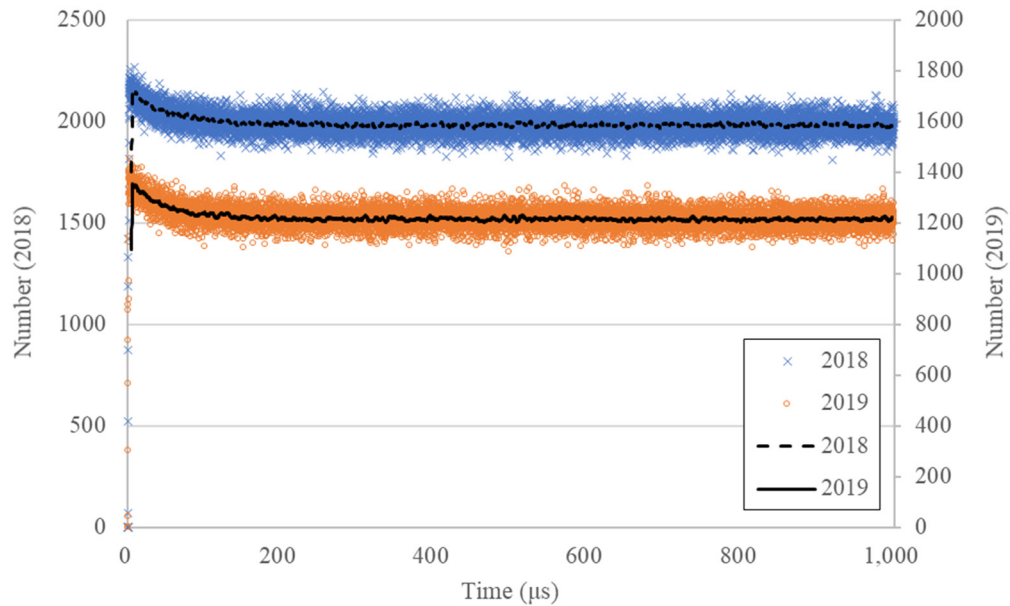


図 2.2.3-17 AFAS-P Collar 検出器 アンプ A のパルス間隔分布の比較（0～1000 μ s）

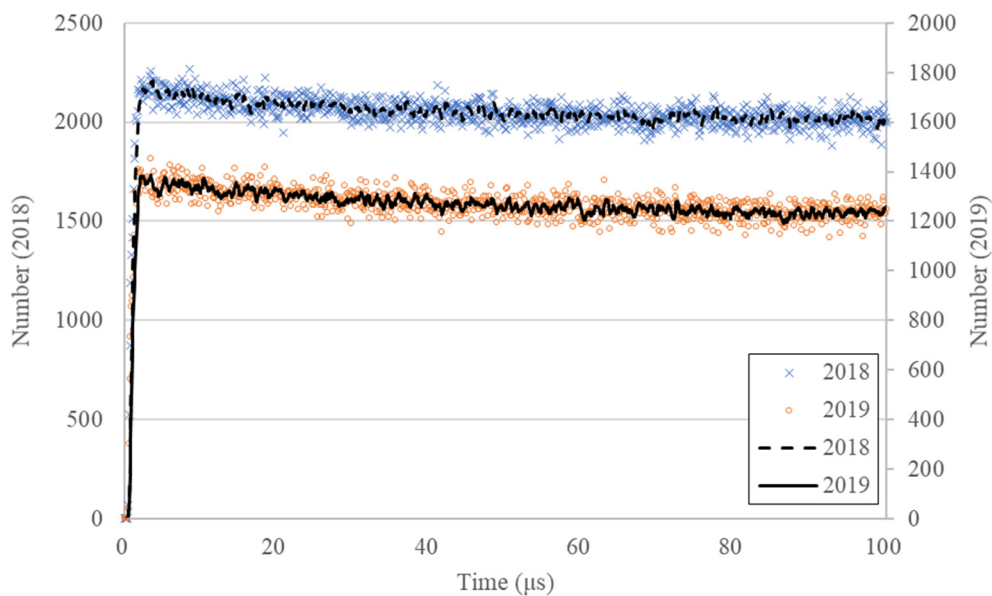


図 2.2.3-18 AFAS-P Collar 検出器 アンプ A のパルス間隔分布の比較（0～100 μ s）

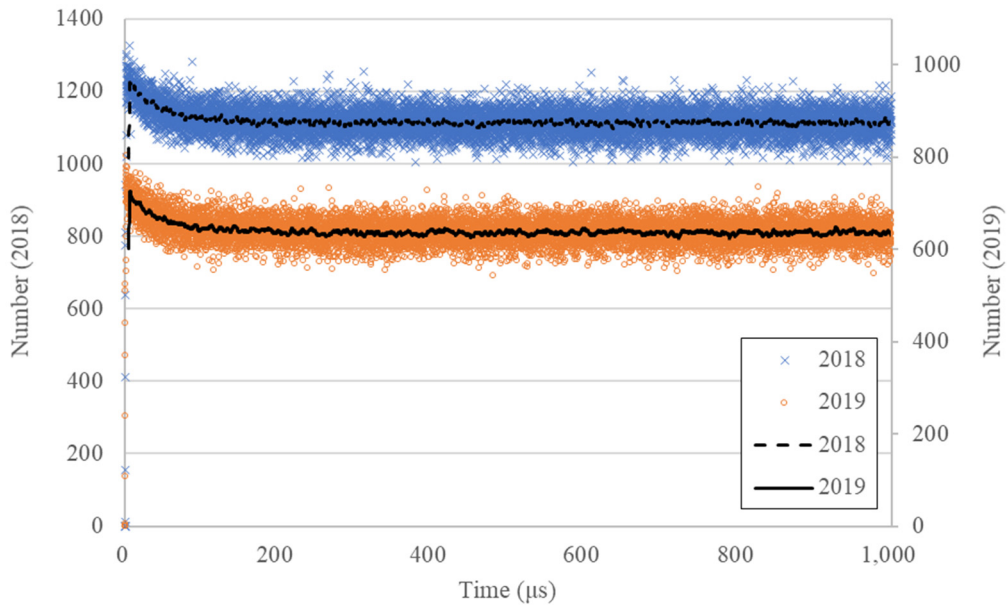


図 2.2.3-19 AFAS-P Collar 検出器 アンプ B のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

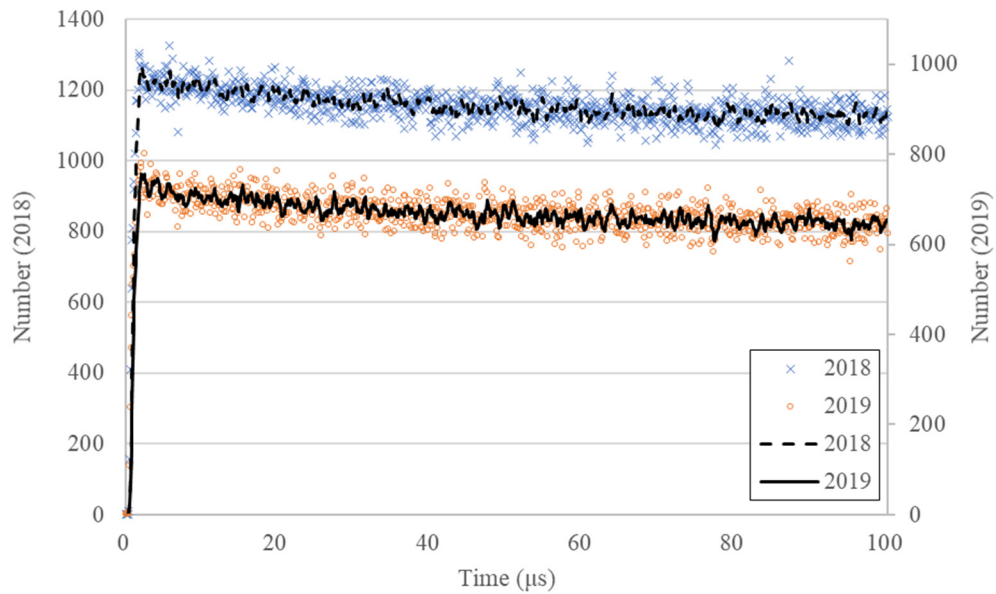


図 2.2.3-20 AFAS-P Collar 検出器 アンプ B のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

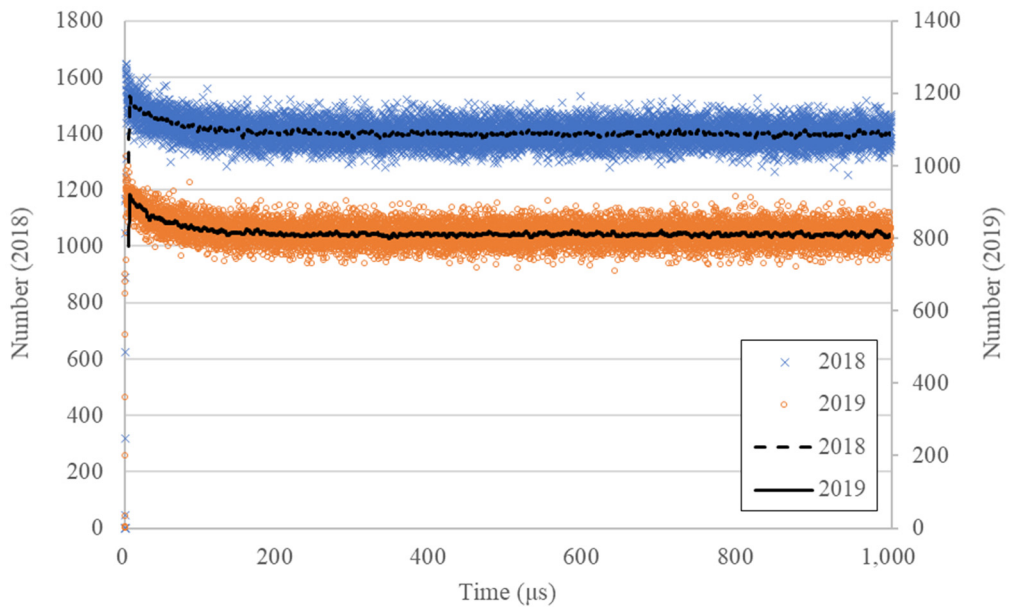


図 2.2.3-21 AFAS-P Collar 検出器 アンプ C のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

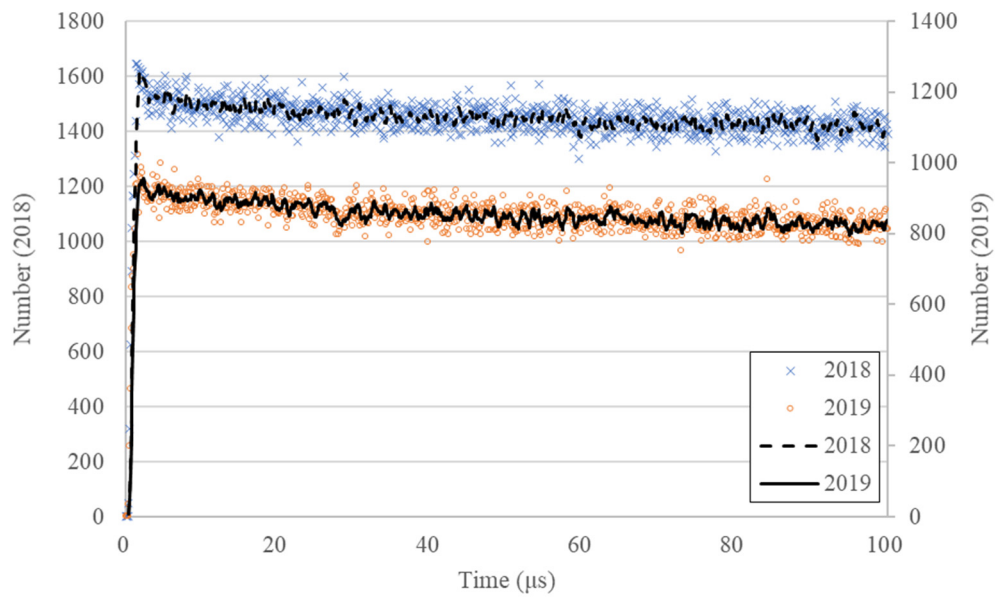


図 2.2.3-22 AFAS-P Collar 検出器 アンプ C のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

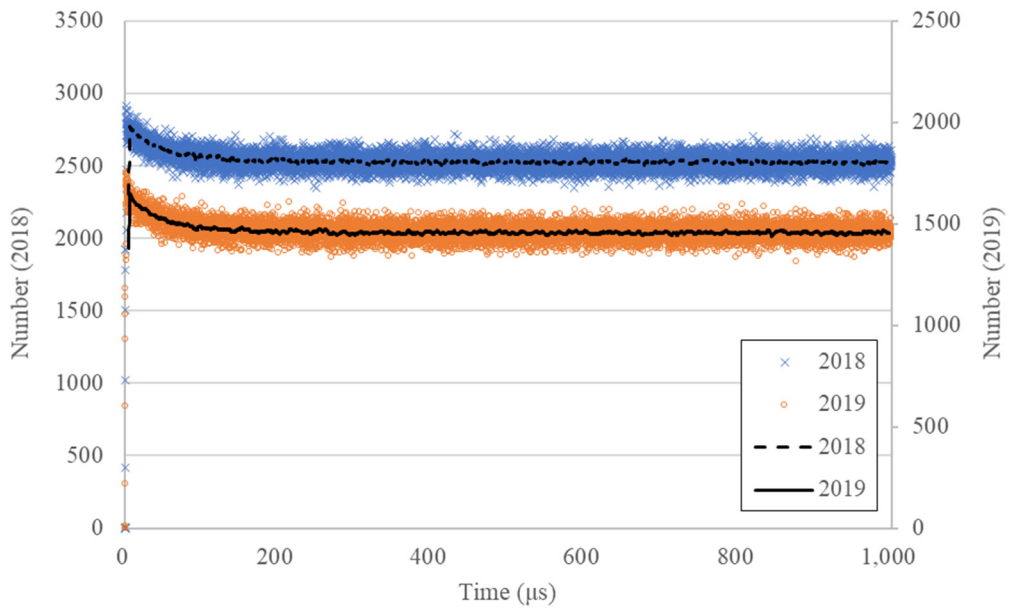


図 2.2.3-23 AFAS-P Collar 検出器 アンプ D のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

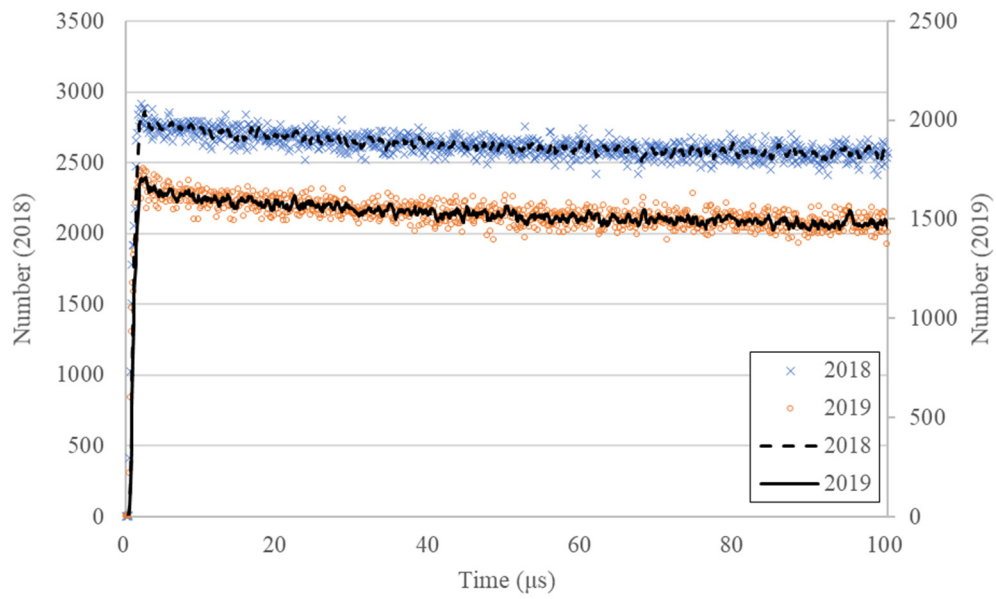


図 2.2.3-24 AFAS-P Collar 検出器 アンプ D のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

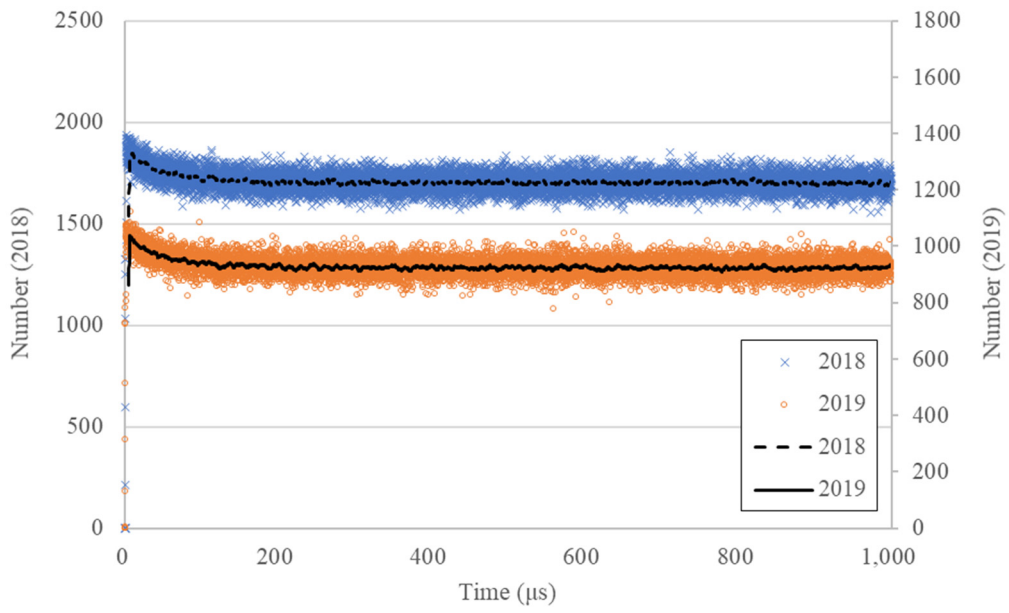


図 2.2.3-25 AFAS-P Collar 検出器 アンプ E のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

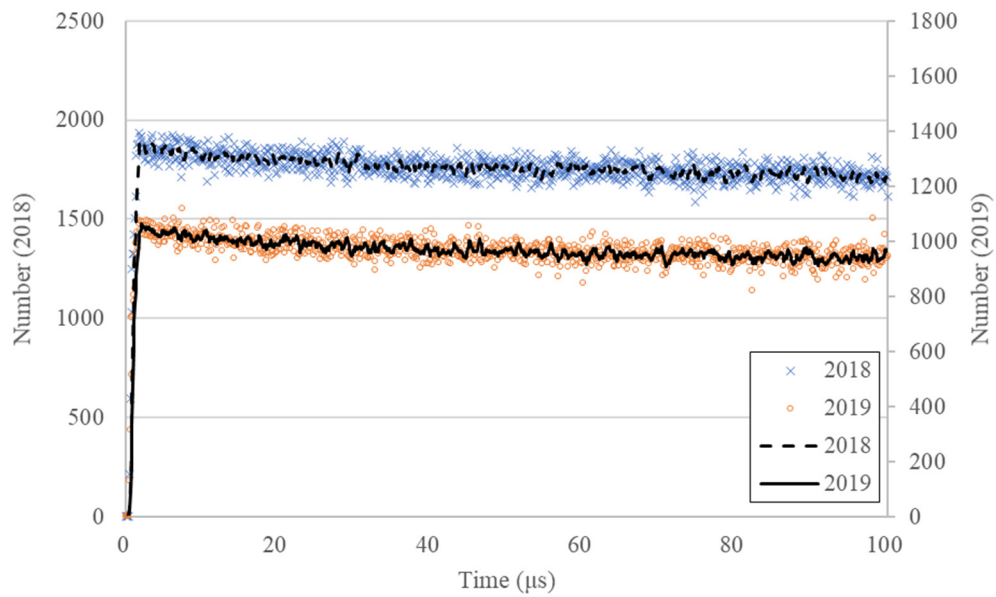


図 2.2.3-26 AFAS-P Collar 検出器 アンプ E のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

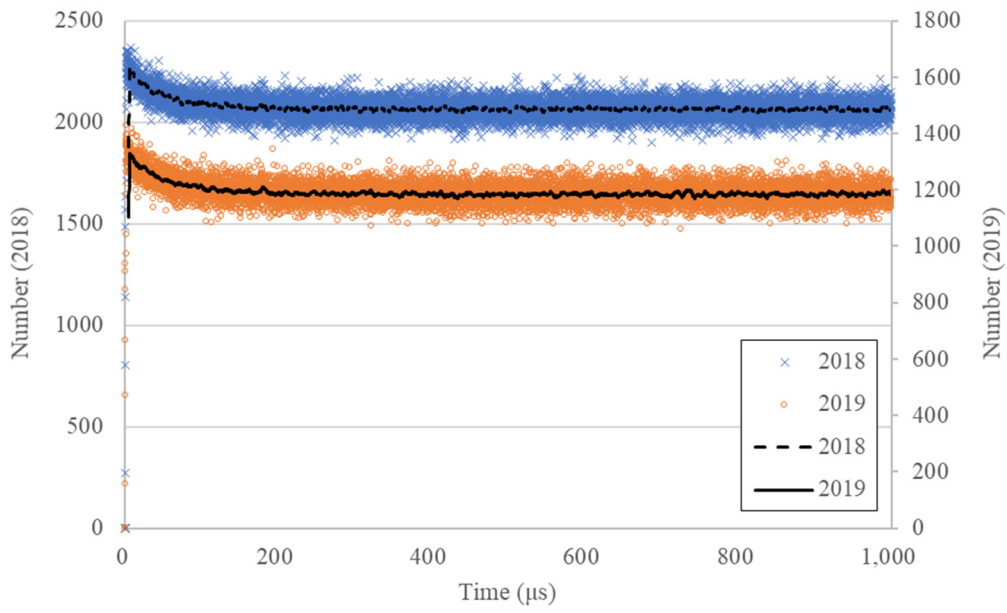


図 2.2.3-27 AFAS-P Collar 検出器 アンプ F のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

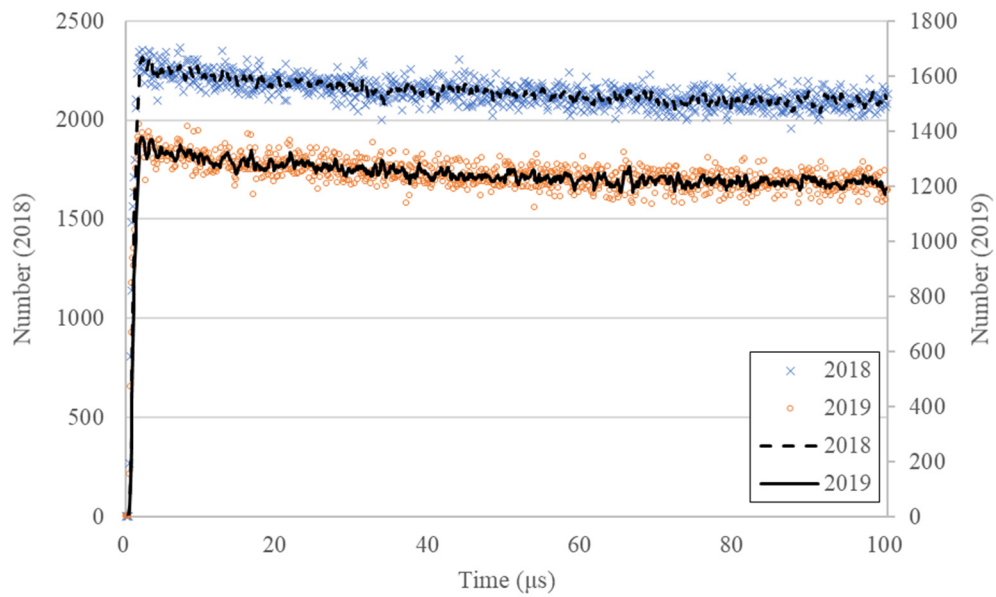


図 2.2.3-28 AFAS-P Collar 検出器 アンプ F のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

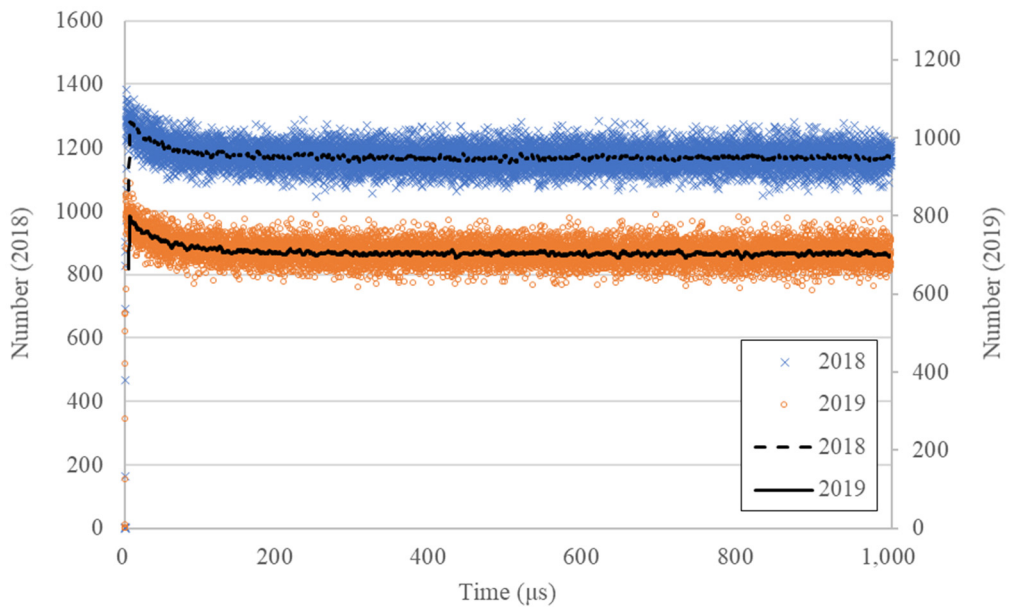


図 2.2.3-29 AFAS-P Collar 検出器 アンプ G のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

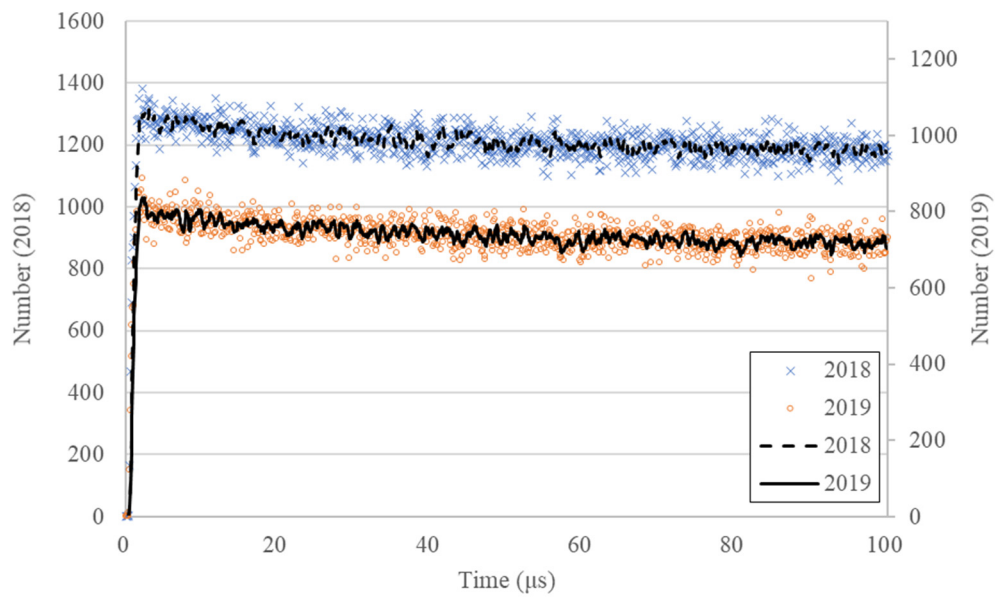


図 2.2.3-30 AFAS-P Collar 検出器 アンプ G のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

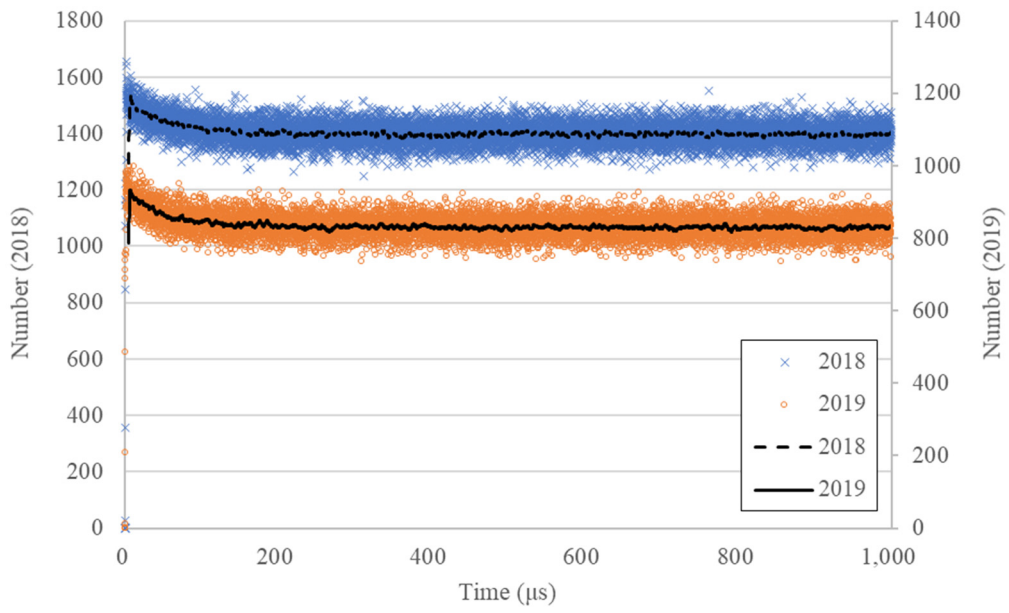


図 2.2.3-31 AFAS-P Collar 検出器 アンプ H のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

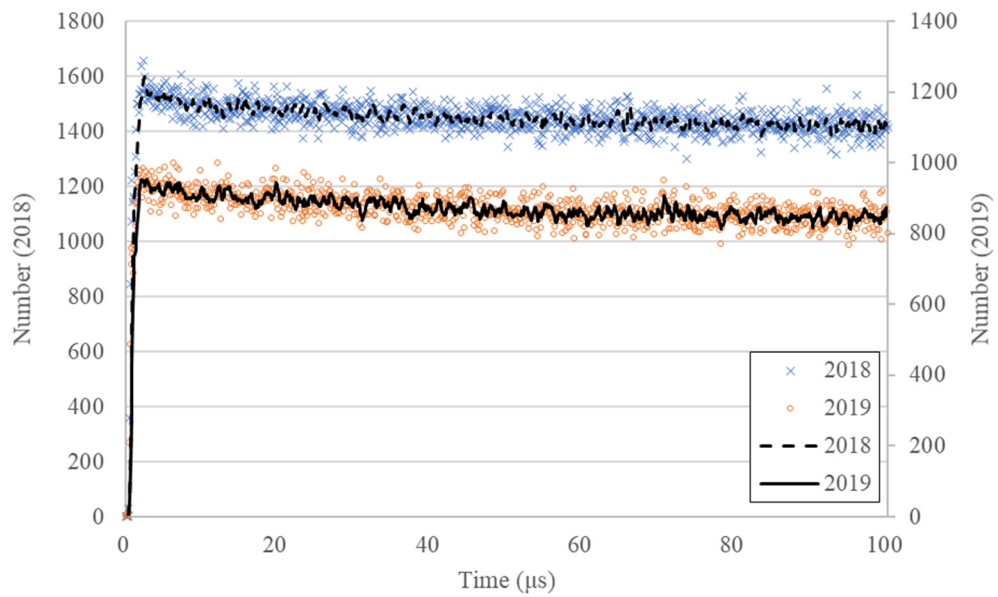


図 2.2.3-32 AFAS-P Collar 検出器 アンプ H のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

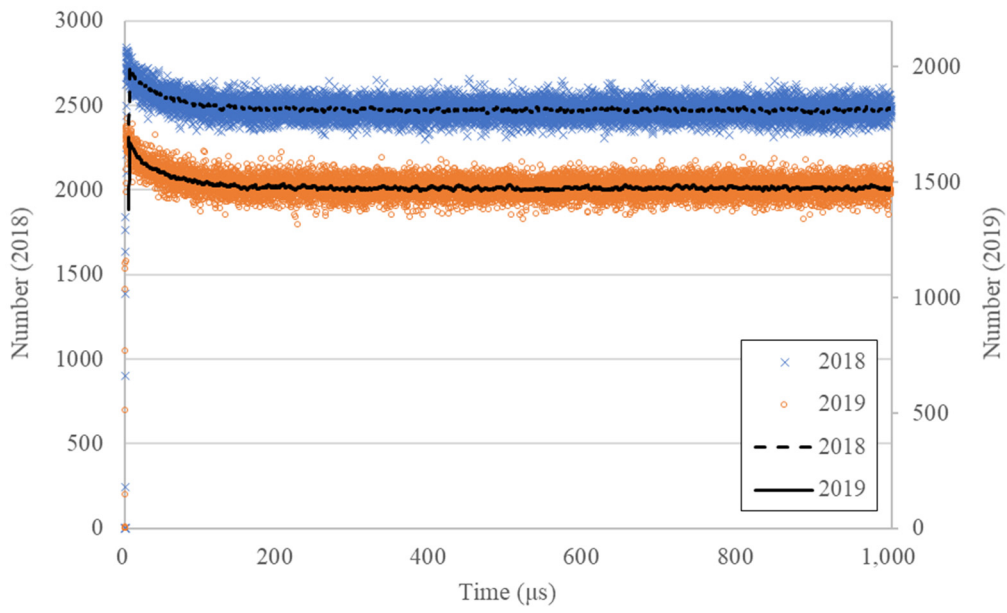


図 2.2.3-33 AFAS-P Collar 検出器 アンプ I のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

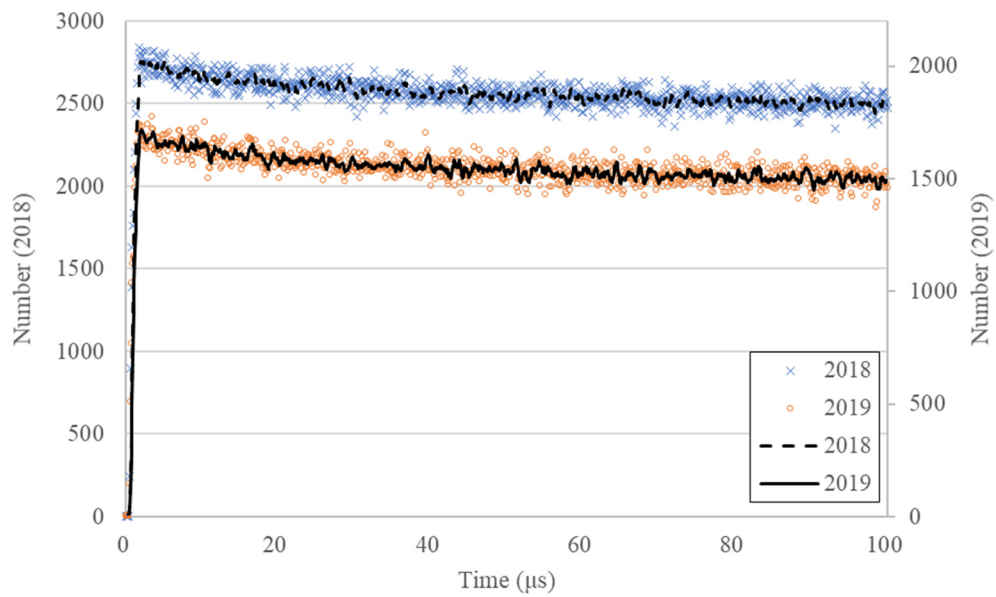


図 2.2.3-34 AFAS-P Collar 検出器 アンプ I のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

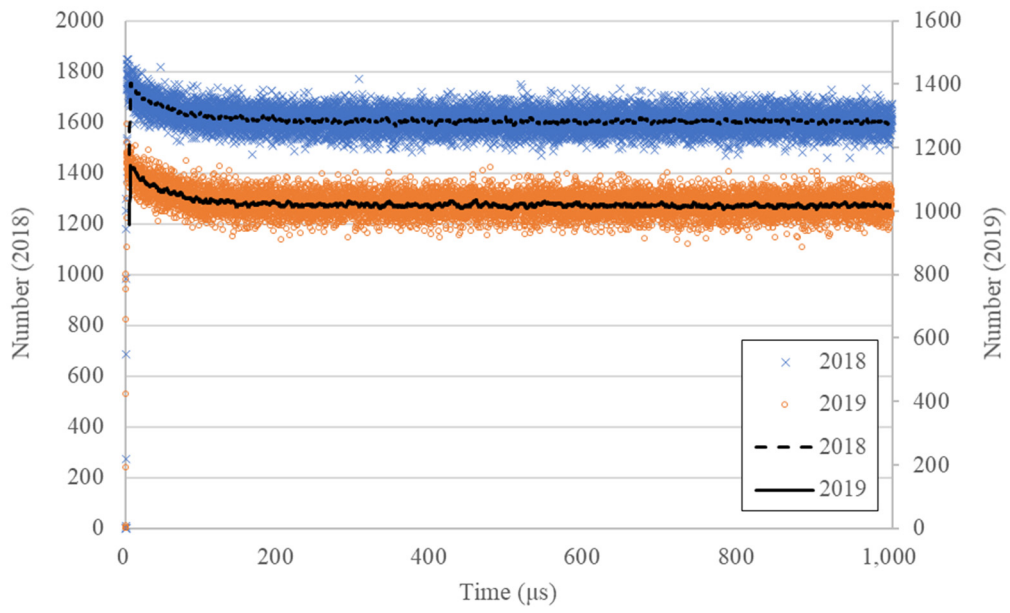


図 2.2.3-35 AFAS-P Collar 検出器 アンプ J のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

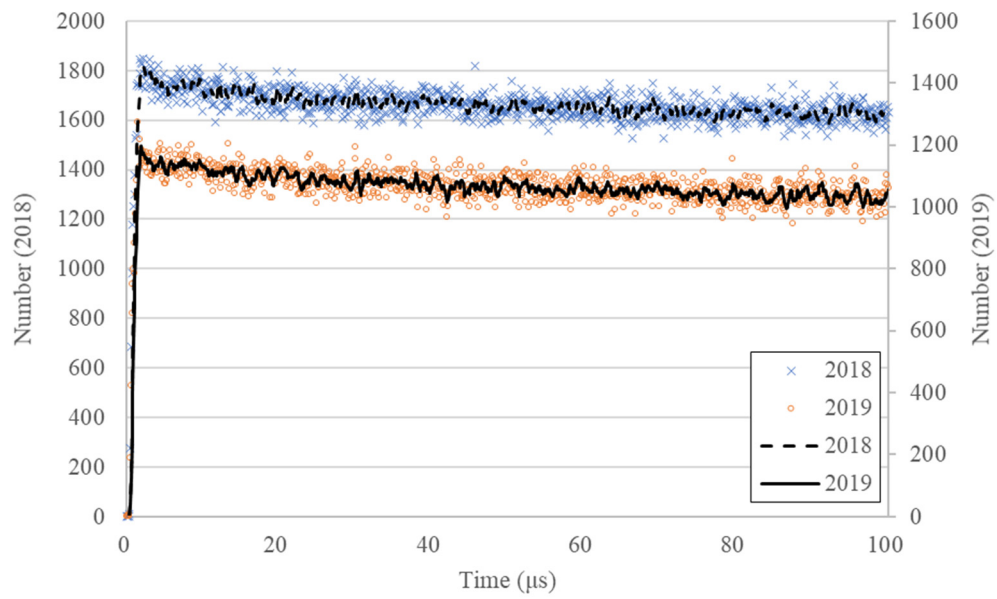


図 2.2.3-36 AFAS-P Collar 検出器 アンプ J のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

AFAS-P Top Fork 検出器におけるアンプのパルス間隔分布を評価した。本評価結果と平成 30 年度（2018 年度）に実施した性能確認試験^(参考文献 2)における評価結果を比較した結果（0～1000 μ s 及び 0～100 μ s の分布）を図 2.2.3-37 及び図 2.2.3-38 に示す。各グラフ中の×印及び破線は平成 30 年度（2018 年度）に評価したパルス間隔分布及びその近似曲線を示し、○印及び実線は平成 31 年度（2019 年度）に評価したパルス間隔分布及びその近似曲線を示す。

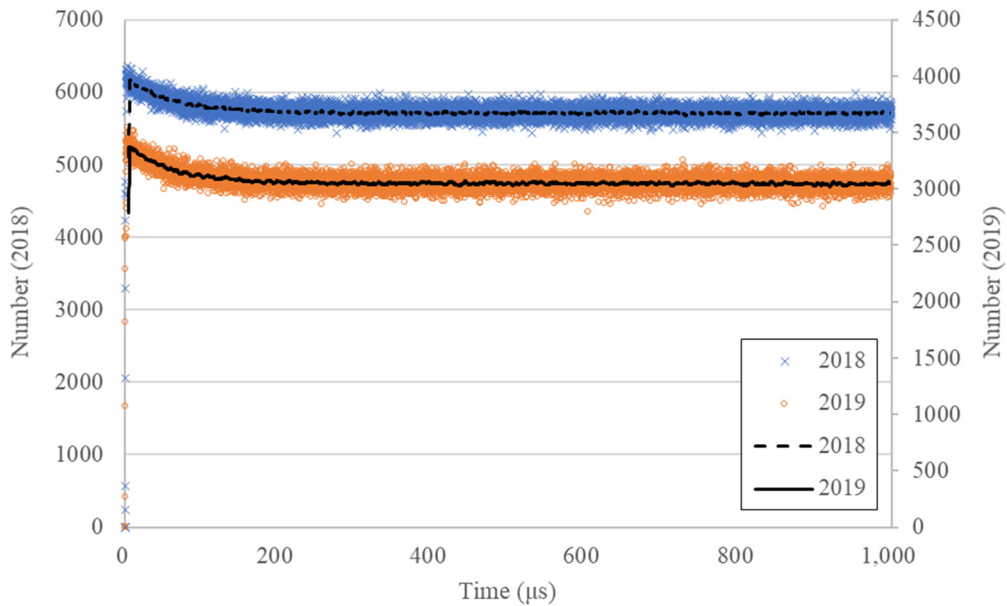


図 2.2.3-37 AFAS-P Top Fork 検出器のパルス間隔分布の比較（0～1000 μ s）

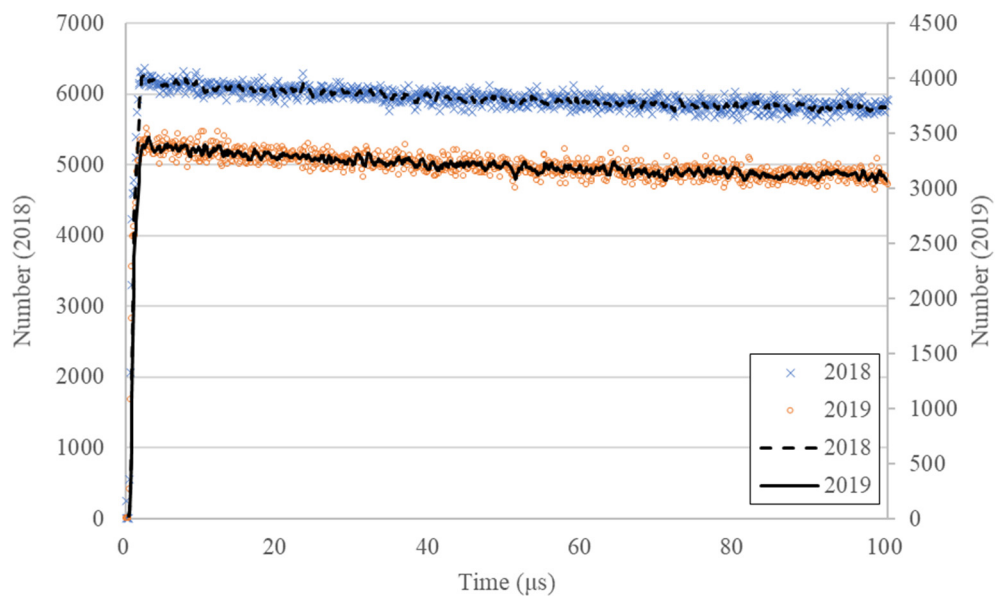


図 2.2.3-38 AFAS-P Top Fork 検出器のパルス間隔分布の比較（0～100 μ s）

AFAS-P Bottom Fork 検出器におけるアンプのパルス間隔分布を評価した。本評価結果と平成 30 年度（2018 年度）に実施した性能確認試験（参考文献2）における評価結果を比較した結果（0～1000 μ s 及び 0～100 μ s の分布）を図 2.2.3-39 及び図 2.2.3-40 に示す。各グラフ中の×印及び破線は平成 30 年度（2018 年度）に評価したパルス間隔分布及びその近似曲線を示し、○印及び実線は平成 31 年度（2019 年度）に評価したパルス間隔分布及びその近似曲線を示す。

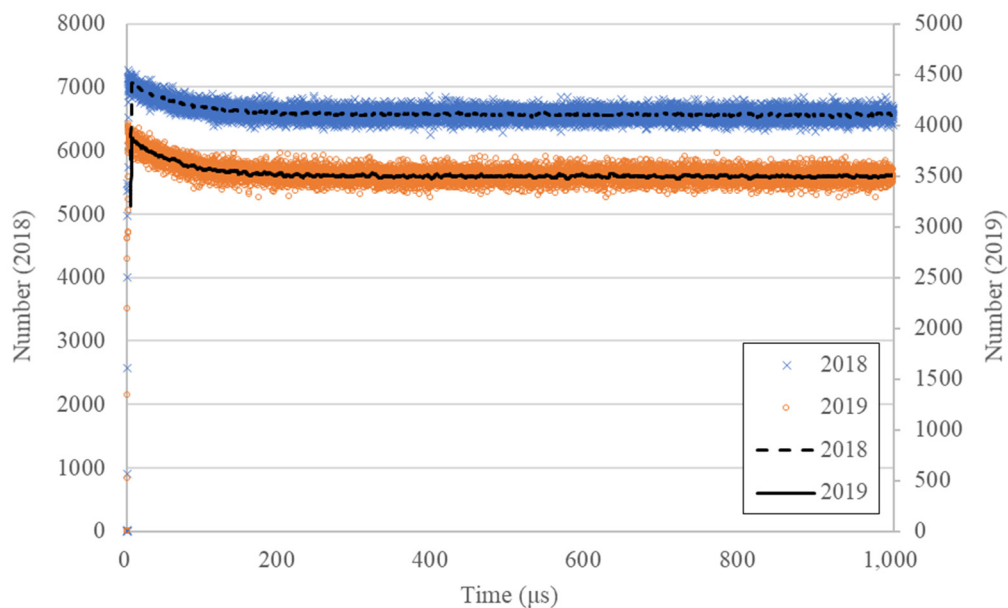


図 2.2.3-39 AFAS-P Bottom Fork 検出器のパルス間隔分布の比較（0～1000 μ s）

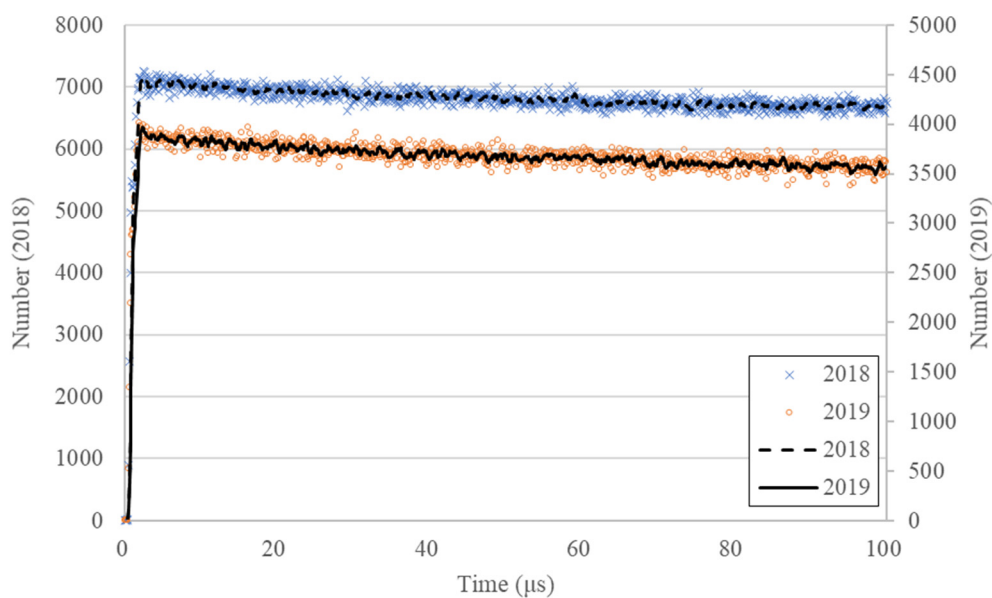


図 2.2.3-40 AFAS-P Bottom Fork 検出器のパルス間隔分布の比較（0～100 μ s）

2.2.4 考察

本試験では平成 30 年度における評価に用いた ^{252}Cf 中性子線源と同じ線源を用いたため、線源の減衰により得られた計数値が 40～50%程度減少したが、評価したパルス間隔分布は、平成 30 年度に評価したパルス間隔分布とほぼ同一の形状となった。したがって、本試験において得られたパルス間隔分布は正常であり、各アンプ、また、それぞれに接続されている ^3He 比例計数管及びケーブルは健全に保たれていると考えられる。

2.3 AFAS の機器の健全性確認（ノーマリゼーション）方法の検討

2.3.1 目的

J-MOX における AFAS の設置環境^(*)を踏まえ、AFAS の保障措置検査での使用開始前等定期的に必要となる ^{252}Cf 中性子線源による AFAS の健全性確認方法^(**)について検討する。

*7 : J-MOX における AFAS の設置環境では、図 2.3.1-1 に示すように燃料集合体の保護管が AFAS の各検出器内側に配置されるため、 ^{252}Cf 中性子線源を用いた AFAS 健全性確認を実施する場合、検出器の中心に線源を配置することができない。

*8 : 平成 29 年度に実施した性能確認試験^(参考文献3)の結果、Collar 検出器においては、図 2.3.1-2 に示すように、検出器の側面中央の 1 箇所に ^{252}Cf 中性子線源を配置し、10 分間の測定を実施した場合、強度の強い線源を用いても、ダブル値による評価では中性子検出効率の低い（線源から距離の遠い） ^3He 比例計数管 1 本の故障を検知できないこと、また、シングル値による評価でも 0.2MBq 以上の強度の線源の使用が必要であることを確認した。本検討では、これらの結果を踏まえ、図 2.3.1-3 に示すように、線源の配置箇所を複数とした場合における、 ^3He 比例計数管 1 本の故障検知に必要な線源強度を確認する。また、これらの位置に線源を配置した測定を定期的実施する。

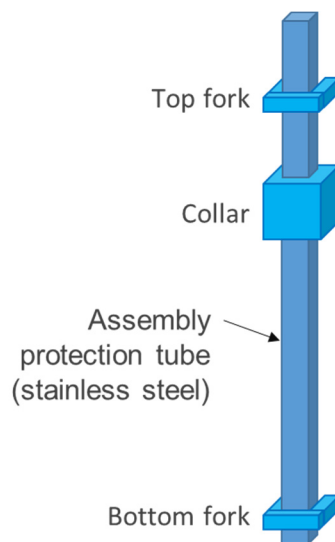


図 2.3.1-1 J-MOX における AFAS の設置環境

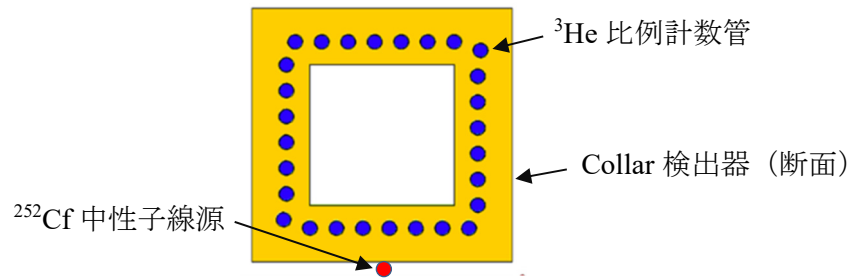


図 2.3.1-2 Collar 検出器における ^{252}Cf 中性子線源の配置位置

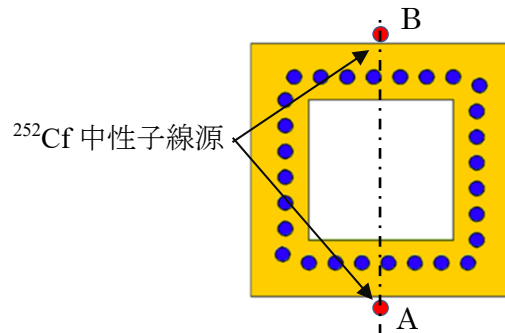


図 2.3.1-3 複数の線源配置位置による健全性確認

2.3.2 方法

線源強度の異なる複数の ^{252}Cf 中性子線源を所定の位置に配置し測定を行い、線源強度と計数誤差 (3σ) の相関を評価する。また、モンテカルロシミュレーションコード (MCNPX) により、全ての ^3He 比例計数管が健全な場合と、1本の ^3He 比例計数管が故障した場合の計数値の差を評価する。これらの評価結果 (例を図 2.3.2-1 に示す) から ^3He 比例計数管 1本の故障検知に必要な線源強度を求める。

本評価は、AFAS-B 及び AFAS-P の Collar 検出器について行う。また、本位置に線源を配置した測定を定期的を実施する。

本評価で使用する線源 (WW-906、H4-694、I7-106、K7-436、Q2-334) を 1.6 項の表 1.6-1 に示す。

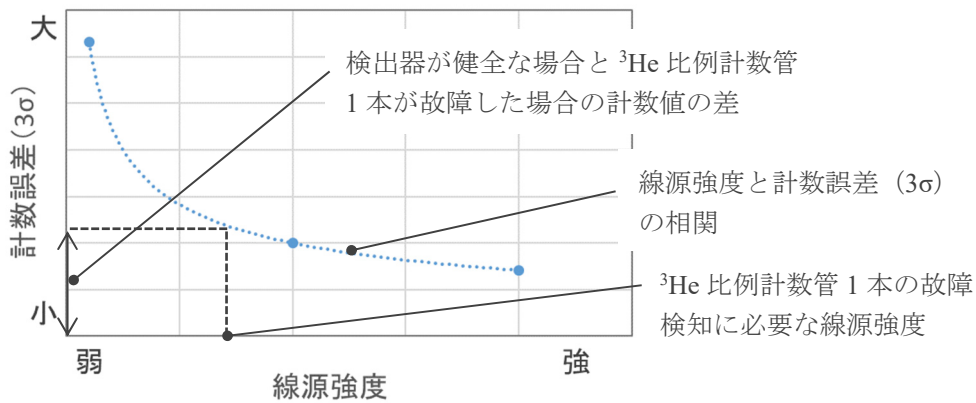


図 2.3.2-1 ^3He 比例計数管 1 本の故障検知に必要な線源強度の評価例

詳細な手順を以下に示す。

(1) ^3He 比例計数管故障検知の可否評価

- ① 固定治具を用いて ^{252}Cf 中性子線源 (WW-906、H4-694、I7-106、K7-436 または Q2-334) を図 2.3.2-2 に示す AFAS-B の Collar 検出器の位置 A に配置し、10 分間の測定を行う。その後、同線源を位置 B に配置し、10 分間の測定を行い、位置 A 及び位置 B において得られた各計数値及び計数誤差を合算する。
- ② ①にて得られた結果から、図 2.3.2-1 に示す線源強度と計数誤差 (3σ) の相関を評価する。
- ③ シミュレーションを行い、線源を位置 A と位置 B に配置した際、全ての ^3He 比例計数管が健全な場合の計数値と、 ^3He 比例計数管 1 本が故障した場合の計数値の差を評価する。
- ④ ②と③の評価結果から、線源を位置 A または位置 B に配置した場合に、最も中性子計数率の低い ^3He 比例計数管 1 本の故障検知に必要な線源強度を求める。
- ⑤ ①～④を AFAS-P の Collar 検出器 (図 2.3.2-3 に示す) についても行う。

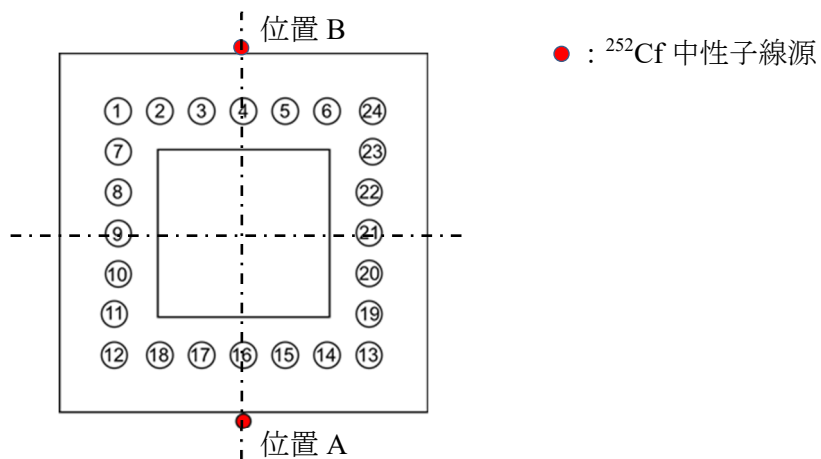


図 2.3.2-2 ^{252}Cf 中性子線源の配置位置 (AFAS-B)

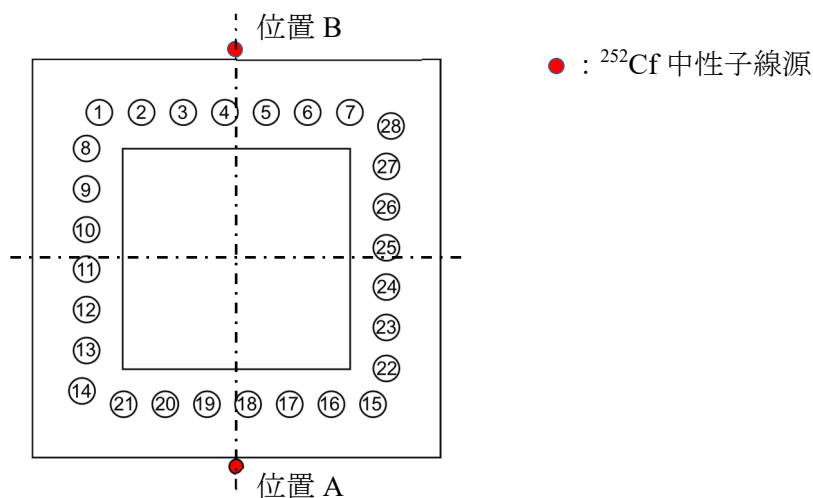


図 2.3.2-3 ^{252}Cf 中性子線源の配置位置 (AFAS-P)

(2) 定期的な ^{252}Cf 中性子線源測定

- ① 固定治具を用いて ^{252}Cf 中性子線源 (K7-436) を図 2.3.2-2 に示す位置 A に配置し、10 分間の測定を行う。その後、位置 B に配置し、10 分間の測定を行い、得られた各ダブル値及び誤差を合算する。
- ② 固定治具を用いて ^{252}Cf 中性子線源 (K7-436) を図 2.3.2-3 に示す位置 A に配置し、10 分間の測定を行う。その後、位置 B に配置し、10 分間の測定を行い、得られた各ダブル値及び誤差を合算する。
- ③ 月 1 回の頻度で①～②を行う。

2.3.3 結果

(1) ^3He 比例計数管故障検知の可否評価

AFAS-B 及び AFAS-P の Collar 検出器において、 ^{252}Cf 中性子線源を位置 A 及び位置 B に配置し、各 10 分間の測定を行い、得られた計数値を合算した。合算したシングル値及びダブル値の各計数誤差%RSD (3σ) (式 (2.3) 及び式 (2.4)) と線源強度の相関を求めた。結果を図 2.3.3-1~2.3.3-4 に示す。

いずれの検出器においても線源強度の増加に伴い計数誤差が減少する傾向がみられた。

$$\%RSD = \frac{3\sigma(\text{Singles})}{\text{Singles}} \times 100 \quad \dots \dots \dots (2.3)$$

$$\%RSD = \frac{3\sigma(\text{Doubles})}{\text{Doubles}} \times 100 \quad \dots \dots \dots (2.4)$$

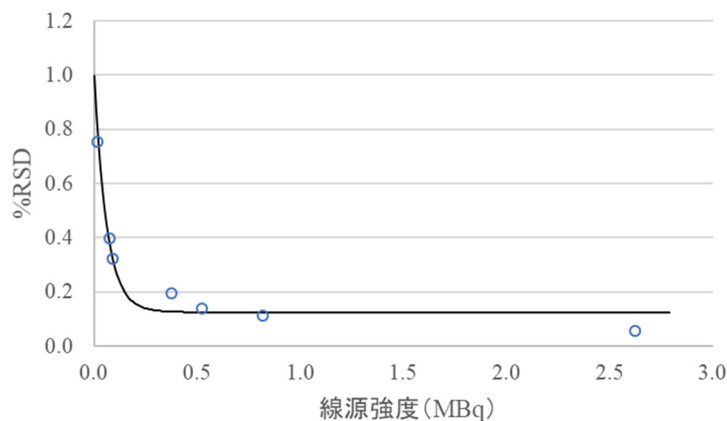


図 2.3.3-1 シングル値の計数誤差と線源強度の相関 (AFAS-B Collar 検出器)

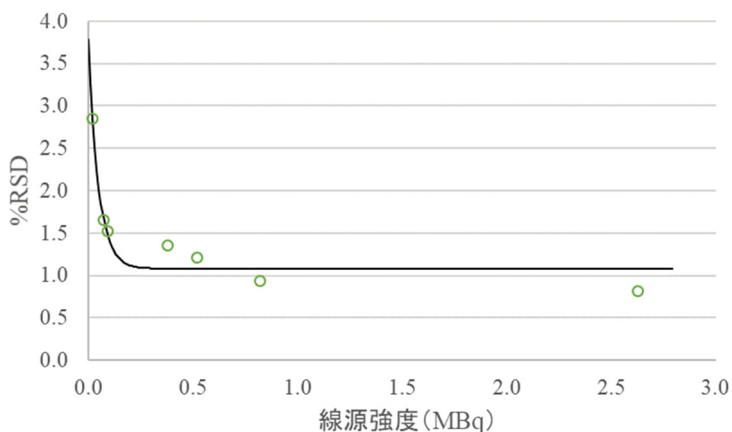


図 2.3.3-2 ダブル値の計数誤差と線源強度の相関 (AFAS-B Collar 検出器)

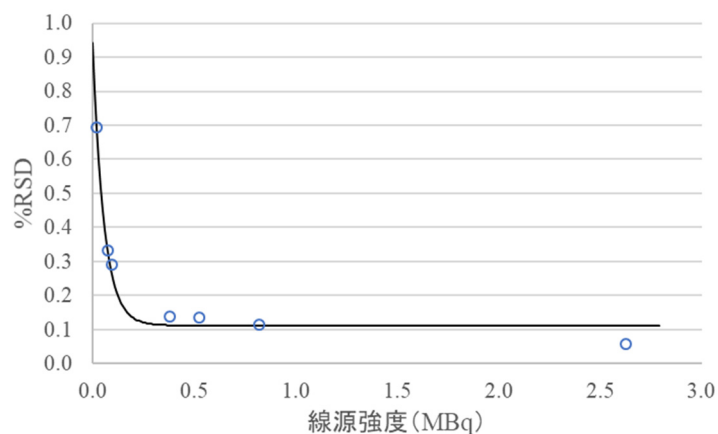


図 2.3.3-3 シングル値の計数誤差と線源強度の相関 (AFAS-P Collar 検出器)

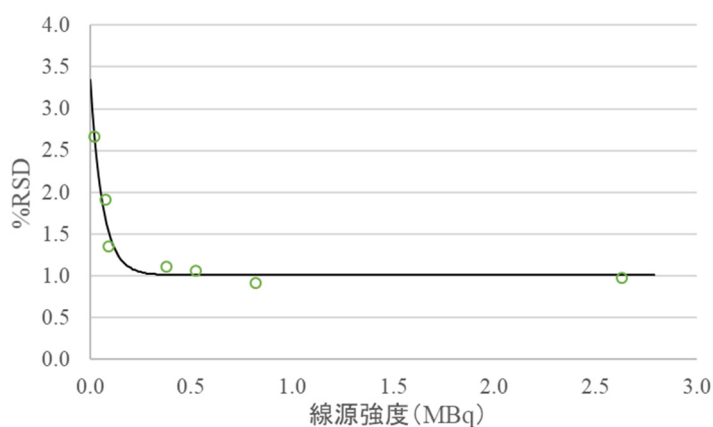


図 2.3.3-4 ダブル値の計数誤差と線源強度の相関 (AFAS-P Collar 検出器)

また、モンテカルロシミュレーションコード (MCNPX) により、全ての ^3He 比例計数管が健全な場合と、1本の ^3He 比例計数管が故障した場合に得られる計数値の差を評価した。結果を表 2.3.3-1 及び表 2.3.3-2 に示す。なお、本評価に用いた AFAS Collar 検出器のシミュレーションモデルは、平成 29 年度の性能確認試験^(参考文献 3)にて実施した評価に用いたモデルと同一のものである。

評価の結果、AFAS-B の Collar 検出器では図 2.3.3-5 に示す 21 番の ^3He 比例計数管、AFAS-P の Collar 検出器では図 2.3.3-6 に示す 12 番の ^3He 比例計数管が故障した場合、健全な場合との計数値の差が最も小さかった。

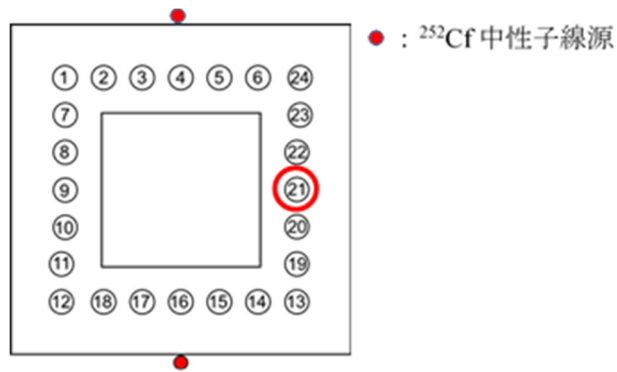


図 2.3.3-5 AFAS-B Collar 検出器の ^3He 比例計数管配置

表 2.3.3-1 AFAS-B Collar 検出器における全ての ^3He 比例計数管が健全な場合と
1本の ^3He 比例計数管が故障した場合の計数値の差

シングル値の差 (%)		ダブル値の差 (%)	
1	1.75	1	3.32
2	4.41	2	8.33
3	9.58	3	17.51
4	13.43	4	23.76
5	9.61	5	17.55
6	4.52	6	8.64
7	1.22	7	2.41
8	0.90	8	1.87
9	0.85	9	1.75
10	0.92	10	1.88
11	1.16	11	2.31
12	1.65	12	3.10
13	1.74	13	3.35
14	4.42	14	8.38
15	9.62	15	17.63
16	13.44	16	23.70
17	9.62	17	17.63
18	4.50	18	8.53
19	1.22	19	2.47
20	0.91	20	1.92
21	0.85	21	1.74
22	0.92	22	1.87
23	1.15	23	2.34
24	1.64	24	3.10

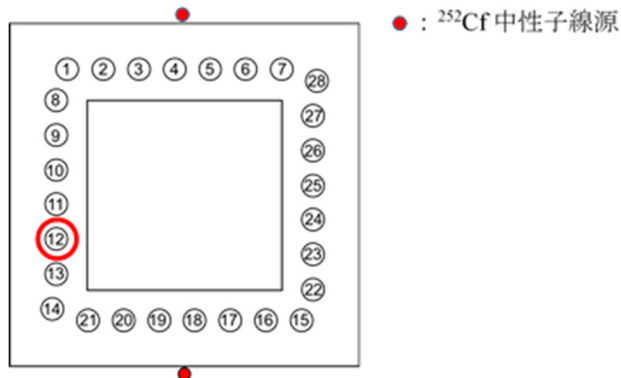


図 2.3.3-6 AFAS-P Collar 検出器の ^3He 比例計数管配置

表 2.3.3-2 AFAS-P Collar 検出器における全ての ^3He 比例計数管が健全な場合と
1本の ^3He 比例計数管が故障した場合の計数値の差

シングル値の差 (%)		ダブル値の差 (%)	
1	1.18	1	2.32
2	3.13	2	6.01
3	8.02	3	14.89
4	14.06	4	24.53
5	11.84	5	21.09
6	5.42	6	10.24
7	2.09	7	3.98
8	0.66	8	1.37
9	0.59	9	1.21
10	0.58	10	1.19
11	0.58	11	1.21
12	0.57	12	1.18
13	0.60	13	1.20
14	0.69	14	1.29
15	1.17	15	2.26
16	3.12	16	6.05
17	8.01	17	14.80
18	14.06	18	24.46
19	11.83	19	20.98
20	5.44	20	10.24
21	2.09	21	4.09
22	0.66	22	1.34
23	0.58	23	1.22
24	0.58	24	1.26
25	0.58	25	1.20
26	0.57	26	1.23
27	0.60	27	1.22
28	0.69	28	1.32

前述の結果から、AFAS-B Collar 検出器では 21 番、AFAS-P Collar 検出器では 12 番の ^3He 比例計数管 1 本の故障が検知可能な線源強度を評価した。結果を図 2.3.3-7~2.3.3-10 に示す。

評価の結果、上記の ^3He 比例計数管 1 本の故障を検知するために必要な線源強度は、AFAS-B の Collar 検出器のシングル値を用いて評価する場合は約 0.01MBq 以上、ダブル値を用いて評価する場合は約 0.07MBq 以上であった。また、AFAS-P の Collar 検出器のシングル値を用いて評価する場合は約 0.03MBq 以上、ダブル値を用いて評価する場合は約 0.16MBq 以上であった。

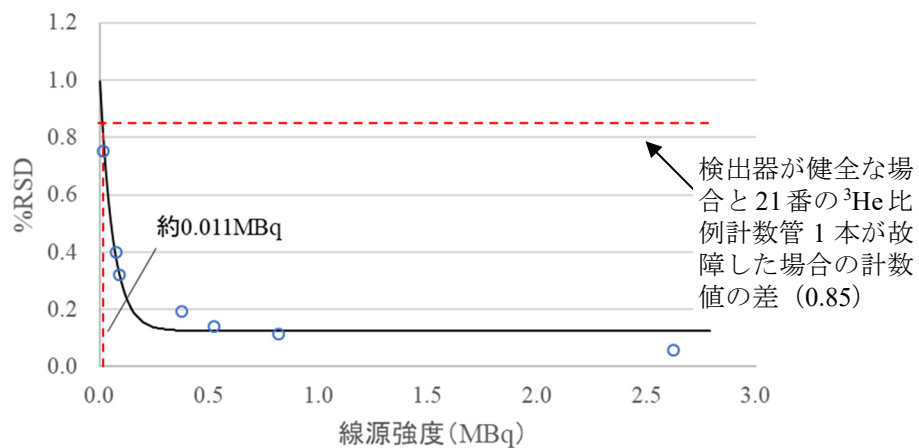


図 2.3.3-7 シングル値の計数誤差と線源強度の相関 (AFAS-B Collar 検出器)

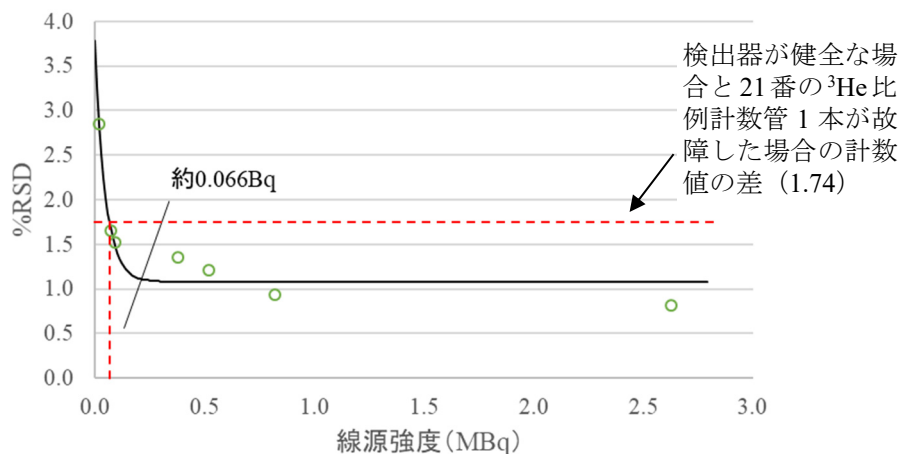


図 2.3.3-8 ダブル値の計数誤差と線源強度の相関 (AFAS-B Collar 検出器)

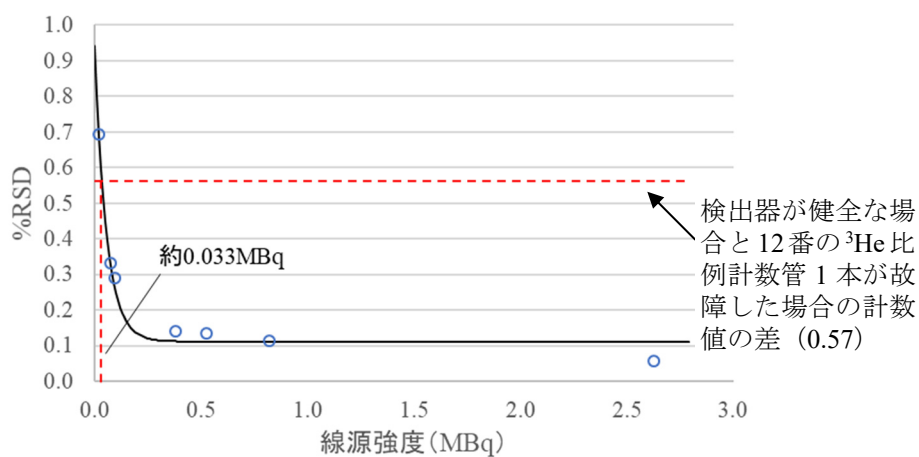


図 2.3.3-9 シングル値の計数誤差と線源強度の相関 (AFAS-P Collar 検出器)

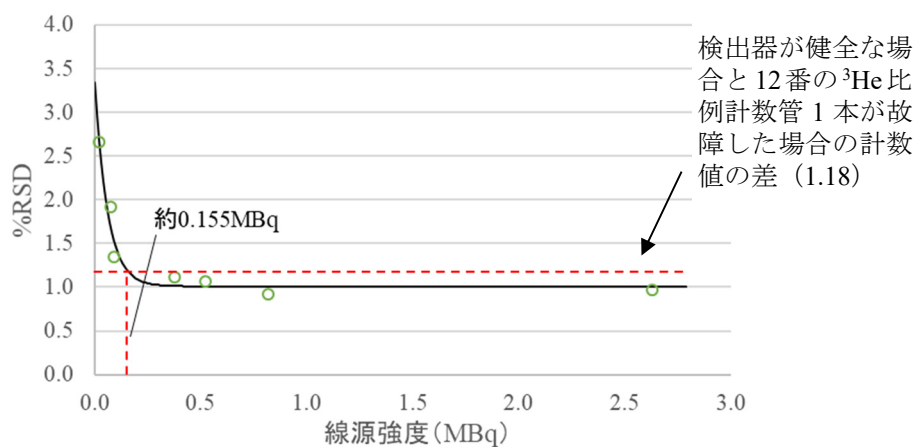


図 2.3.3-10 ダブル値の計数誤差と線源強度の相関 (AFAS-P Collar 検出器)

(2) 定期的な ^{252}Cf 中性子線源測定

AFAS-B 及び AFAS-P において、2019 年 4 月から 2020 年 3 月までの間に月 1 回の頻度で測定を行い、各月ごとにダブル値と期待値の相対差 %Difference (図 2.3.3-11 及び図 2.3.3-12 に示す) を求めた。各グラフ中の赤色の実線は各相対差の平均値を示し、破線は管理限界値 (各相対差の誤差の二乗平均平方根を 3 倍した値を相対差の平均値に加算及び減算し求めた値) を示す。管理限界値の上限値 UL 及び下限値 LL を求める式を 2.1 項の式 (2.1) 及び式 (2.2) に示す。

いずれの検出器においても各相対差は、各管理限界値の範囲内となった。

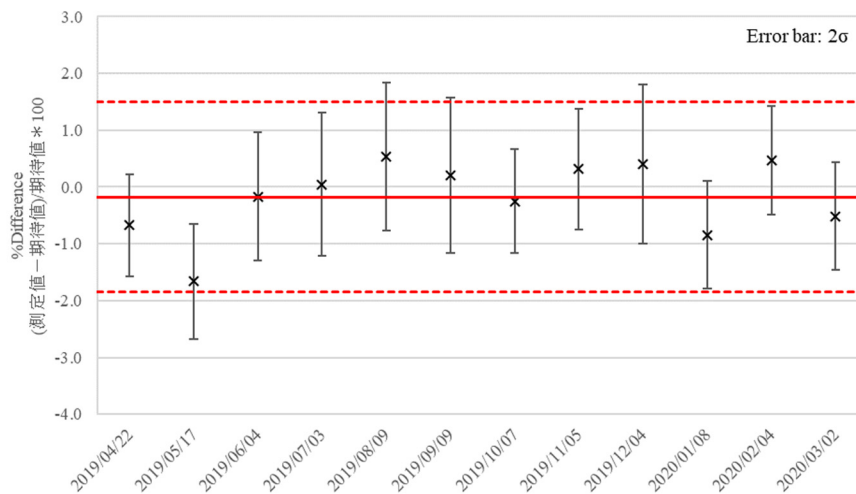


図 2.3.3-11 月ごとの各相対差の評価結果 (AFAS-B Collar 検出器)

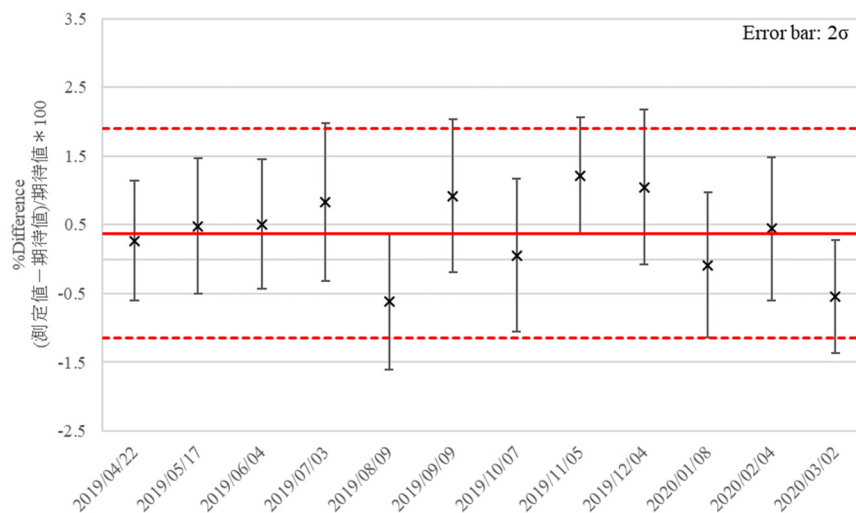


図 2.3.3-12 月ごとの各相対差の評価結果 (AFAS-P Collar 検出器)

2.3.4 考察

(1) ^3He 比例計数管故障検知の可否評価

AFAS の Collar 検出器は、中性子同時計数値（ダブル値）を取得し、 ^{240}Pu 実効質量を算出する装置であるため、本検出器の健全性については ^{252}Cf 中性子線源の測定により得られたダブル値の妥当性により評価されることが適当であると考えられる。しかしながら、平成 29 年度の性能評価試験（参考文献³）において実施した評価では、Collar 検出器の側面 1 箇所線源を配置した場合、計数率の低い ^3He 比例計数管 1 本の故障は、ダブル値による評価では検知できないという結果が得られた。これは、本測定体系においては、どんなに強い線源を用いても、ダブル値の計数誤差 (3σ) は約 1.5% までしか減少せず、計数率の低い ^3He 比例計数管が 1 本故障した場合に Collar 検出器にて得られる計数値の減少率（約 0.6~0.7%）よりも大きいためであった。

そのため、本年度は、Collar 検出器の側面 2 箇所線源を配置した場合の評価を行った。その結果、最も計数率の低い ^3He 比例計数管が 1 本故障した場合の計数値の減少率は約 1.2~1.7% に増加し、ダブル値の計数誤差は最小で約 1% まで減少したため、AFAS-B では約 0.07MBq 以上、AFAS-P では約 0.16MBq 以上の強度の線源を用いた場合、ダブル値による評価が可能であるという結果が得られた。なお、 ^3He 比例計数管が 1 本故障した場合の計数値の減少率が増加した理由は、線源を 2 箇所に配置することにより、線源からの距離に依存する各 ^3He 比例計数管の計数率のばらつきが低減され、均等化されたためであると考えられる。

(2) 定期的な ^{252}Cf 中性子線源測定

線源の配置位置を Collar 検出器の側面 2 箇所とし、定期的な測定を実施した結果、各月で得られたダブル値の測定値と期待値の差 (%Difference) は、いずれの検出器においても各管理限界値の範囲内となった。このことから、本方法は、Collar 検出器のノーマリゼーション測定として問題なく適用可能であると考えられる。

なお、今回の検討では、1 つの線源を 2 箇所に順番に配置し測定を行い、各計数値を合算する方法を適用したが、実際には、2 つの線源を 2 箇所に同時に配置し測定する方法も適用可能であると考えられる。

2.4 AFAS の機器の異常検知方法の検討

2.4.1 目的

燃料集合体の測定における AFAS-P 及び AFAS-B の各検出器の計数値の比^{(*)9}を評価することにより、機器の早期異常検知を可能とする手法を検討する。

*9 : J-MOX において AFAS-B 及び AFAS-P は、図 2.4.1-1 に示すように隣接して設置され、査察官非立会モードにて自動連続測定が行われるため、AFAS-B または AFAS-P のどちらか一方のシステムに MOX 燃料集合体がセットされ測定が行われる場合、もう一方のシステムにおいても同時に計数値を得ることができる。

この際、AFAS-B 及び AFAS-P の各システムにおいて燃料集合体の有効長を求めるために用いられる、各検出器 (Top Fork, Bottom Fork, Collar) にて得られた計数値 (シングル値 S) の和の比である、 $(S_{\text{Top Fork}_B} + S_{\text{Bottom Fork}_B}) / S_{\text{Collar}_B}$ 及び $(S_{\text{Top Fork}_P} + S_{\text{Bottom Fork}_P}) / S_{\text{Collar}_P}$ は、測定される燃料集合体の有効長のみ依存し、Pu 量には依存しないという性質を持つ。したがって、これらの比

Ratio $[(S_{\text{Top Fork}_B} + S_{\text{Bottom Fork}_B}) / S_{\text{Collar}_B}] / [(S_{\text{Top Fork}_P} + S_{\text{Bottom Fork}_P}) / S_{\text{Collar}_P}]$ 及び

Ratio $[(S_{\text{Top Fork}_P} + S_{\text{Bottom Fork}_P}) / S_{\text{Collar}_P}] / [(S_{\text{Top Fork}_B} + S_{\text{Bottom Fork}_B}) / S_{\text{Collar}_B}]$ は、

測定される燃料集合体に含まれる Pu 量に依存せず、常に一定の値になると考えられる。このことから、この「各システムで取得したシングル値の比」を AFAS による燃料集合体測定毎に評価し、継続的に監視することは、機器の早期異常を検知するための有用な手法のひとつとなる可能性がある。

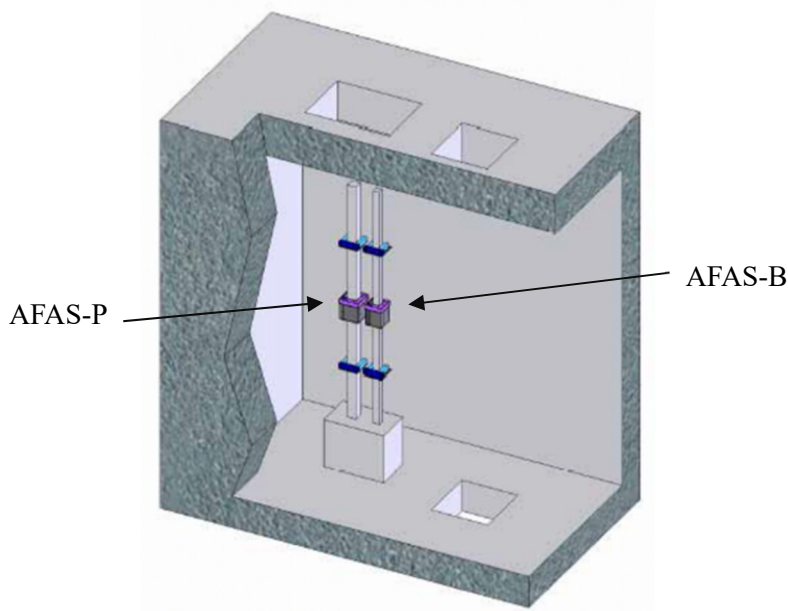


図 2.4.1-1 J-MOX における AFAS 配置

2.4.2 方法

AFAS-B または AFAS-P の各検出器に燃料集合体の代替として ^{252}Cf 中性子線源を複数箇所配置し、測定を行い、AFAS-B 及び AFAS-P の各検出器（Top Fork 検出器、Collar 検出器、Bottom Fork 検出器）にて得られたシングル値の比を求める。本測定は月 1 回の頻度で実施し、各月で求められた各シングル値の比が誤差の範囲で一致することを確認する。

本評価は、AFAS-B 及び AFAS-P の各検出器について行う。

詳細な試験手順を以下に示す。

- ① 線源固定治具を用いて、1.6 項の表 1.6-1 に示す ^{252}Cf 中性子線源（Q2-334）を図 2.4.2-1 に示す AFAS-B における所定の配置位置（位置①～⑤）にセットし、各位置において 10 分間の測定を行う。
- ② ①にて得た各シングル値を検出器毎に合算し、AFAS-B と AFAS-P のシングル値の比 $\text{Ratio} \left[\frac{(S_{\text{Top Fork}_B} + S_{\text{Bottom Fork}_B}) / S_{\text{Collar}_B}}{(S_{\text{Top Fork}_P} + S_{\text{Bottom Fork}_P}) / S_{\text{Collar}_P}} \right]$ を求める。
- ③ 線源固定治具を用いて、1.6 項の表 1.6-1 に示す ^{252}Cf 中性子線源（Q2-334）を図 2.4.2-1 に示す AFAS-P における所定の配置位置（位置⑥～⑩）にセットし、各位置において 10 分間の測定を行う。
- ④ ③にて得た各シングル値を検出器毎に合算し、AFAS-P と AFAS-B のシングル値の比 $\text{Ratio} \left[\frac{(S_{\text{Top Fork}_P} + S_{\text{Bottom Fork}_P}) / S_{\text{Collar}_P}}{(S_{\text{Top Fork}_B} + S_{\text{Bottom Fork}_B}) / S_{\text{Collar}_B}} \right]$ を求める。
- ⑤ ①～④を月 1 回の頻度で行い、各月で得られた AFAS-B と AFAS-P のシングル値の比が誤差の範囲で一致することを確認する。

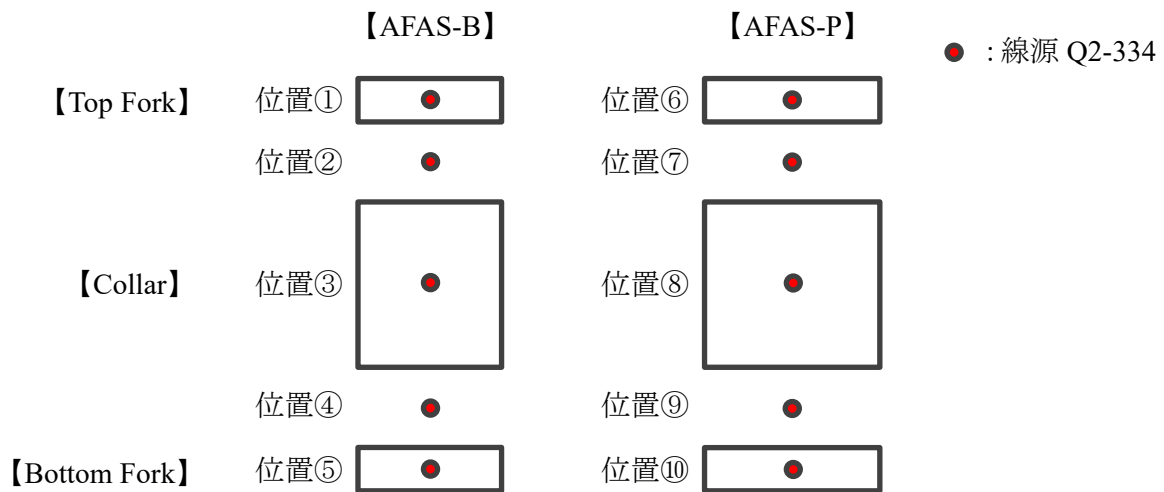


図 2.4.2-1 ^{252}Cf 中性子線源配置

2.4.3 結果

AFAS-B 及び AFAS-P において、2019 年 6 月から 2020 年 3 月までの間に月 1 回の頻度で測定を行い、各月ごとにシングル値の比を求めた。AFAS-B の各位置に線源を配置した際に AFAS-B 及び AFAS-P にて得られた各シングル値の比（図 2.4.3-1 に示す）及び AFAS-P の各位置に線源を配置した際に AFAS-B 及び AFAS-P にて得られた各シングル値の比（図 2.4.3-2 に示す）は、全て誤差（ 2σ ）の範囲で一致した。

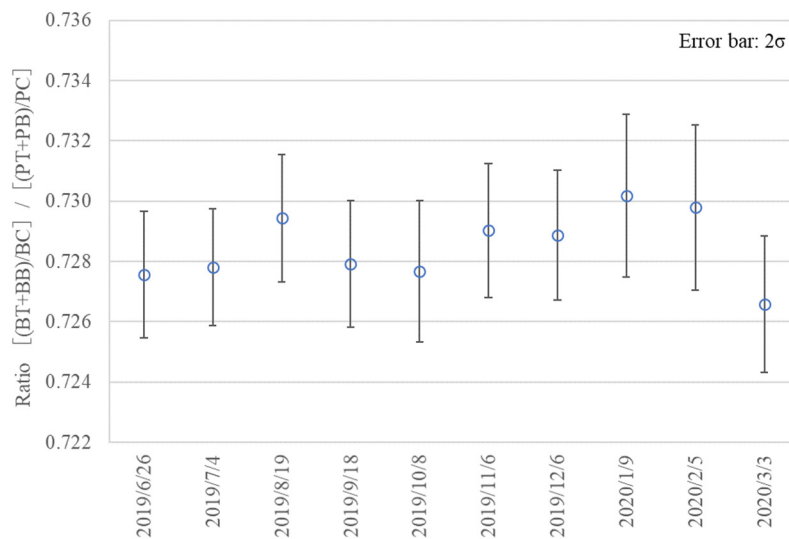


図 2.4.3-1 AFAS-B に線源を配置した際に各検出器で得られたシングル値の比

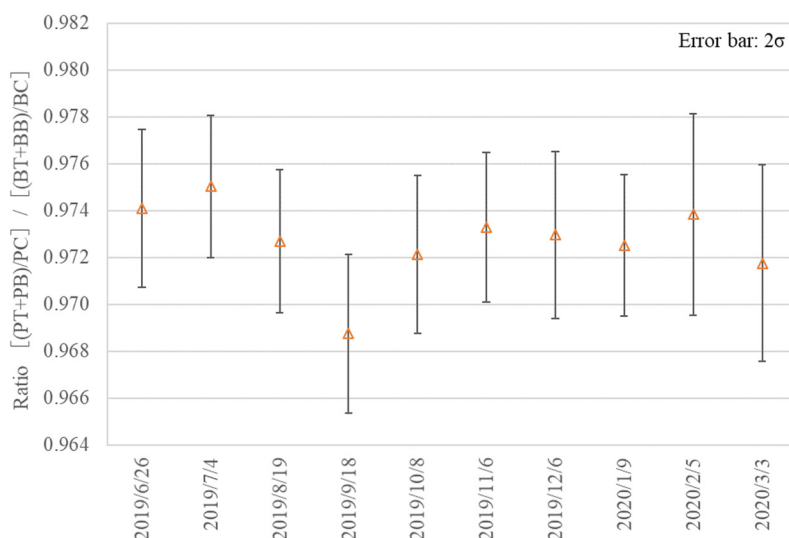


図 2.4.3-2 AFAS-P に線源を配置した際に各検出器で得られたシングル値の比

2.4.4 考察

定期的な線源測定の結果、各月で得られたシングル値の比は、誤差 (2σ) の範囲で一致した。また、本測定期間中、各検出器で得られたシングル値は、線源の減衰により約 16%減少したが、これに依存した比の変動はみられなかった。したがって、シングル値の比は、システムに異常がない場合、燃料集合体に含まれる Pu 量に依存せず常に一定であり、安定して取得可能な値であると考えられる。

一方、システムに異常が発生し、得られる計数率が変動すると、シングル値の比の値も変動する。例として、2020 年 2 月の AFAS-P Collar 検出器にて得られた計数値を 1% 減少させた値に変換し、シングル値の比を再計算した結果を図 2.4.4-1 及び図 2.4.4-2 に示す。

これらのことから、J-MOX における燃料集合体測定の際、AFAS-B 及び AFAS-P にて得られたシングル値の比を継続して収集し監視することは、システムの異常検知に有効であると考えられる。

なお、本方法ではシステム中の異常部位の特定は困難である。このため、J-MOX においては、まず本方法によりシステムの早期異常検知を行ったうえで、異常の原因特定などの詳細な調査については線源を用いた測定により行うという運用とすることが適当であると考えられる。

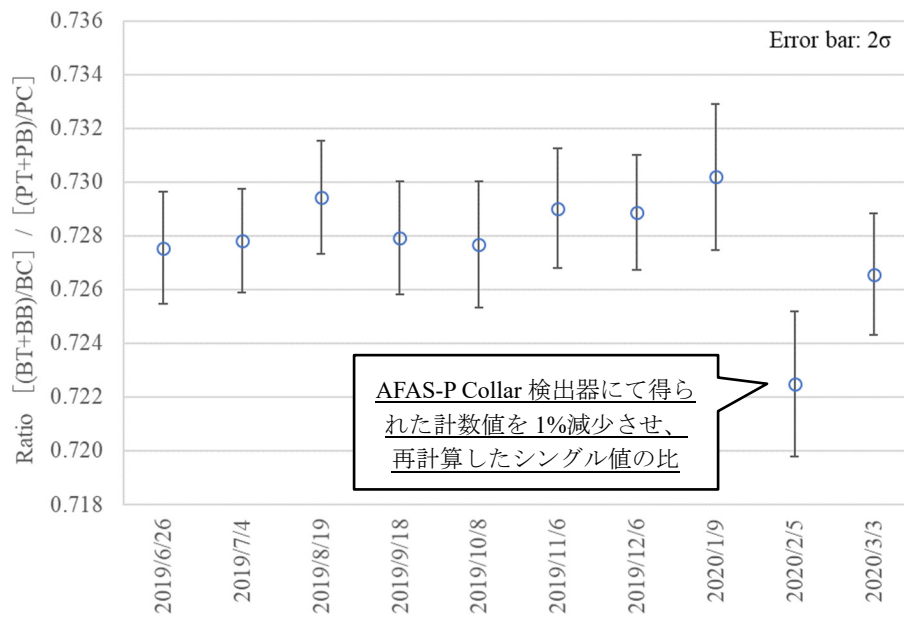


図 2.4.4-1 機器に異常があった場合の各シングル値の比 (AFAS-B に線源を配置)

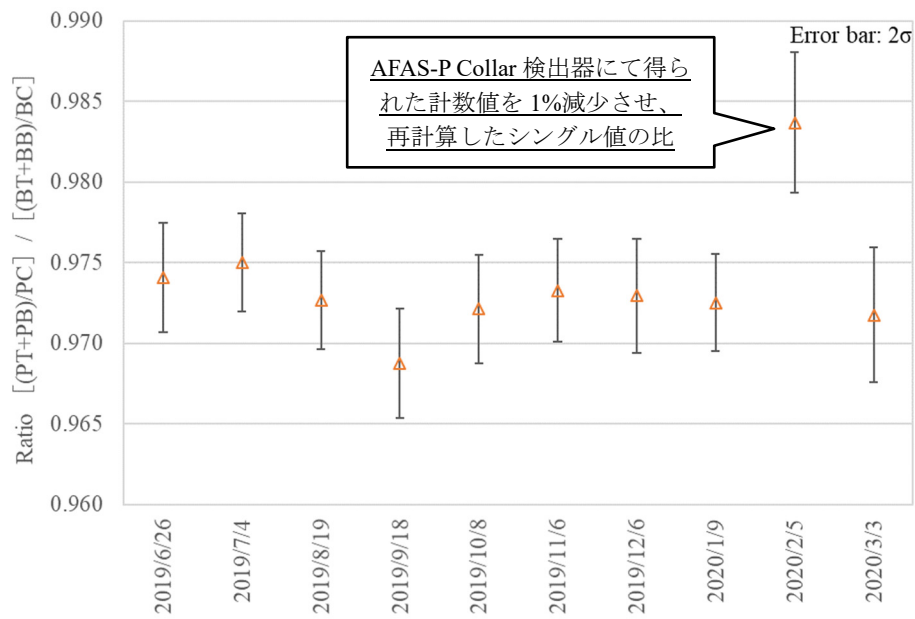


図 2.4.4-2 機器に異常があった場合の各シングル値の比 (AFAS-P に線源を配置)

3. AVIS の性能確認試験

3.1 パルス間隔分布の評価

3.1.1 目的

装置に不具合が発生した場合、その原因特定の判断材料となる、アンプ毎のパルス間隔分布を評価する。

3.1.2 方法

JAEA が所有するリストモジュール (PTR-32HV) を用いて ^{252}Cf 中性子線源測定を実施し、AVIS の中性子検出器のアンプ毎のパルス間隔分布を評価する。また、本評価結果と平成 30 年度に実施した性能確認試験 (参考文献 2) における評価結果を比較する。平成 30 年度の評価結果の例を図 3.1.2-1 に示す。

AVIS の中性子検出器のアンプ数及び配置図を表 3.1.2-1 及び図 3.1.2-2 に示す。

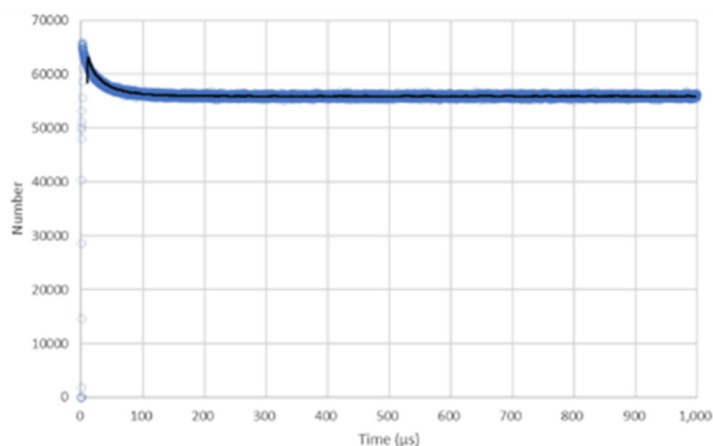


図 3.1.2-1 (例) AVIS の中性子検出器 アンプ A のパルス間隔分布

表 3.1.2-1 AVIS におけるアンプ数

検出器		アンプ 個数
AVIS	Primary 検出器	7
	Secondary 検出器	7

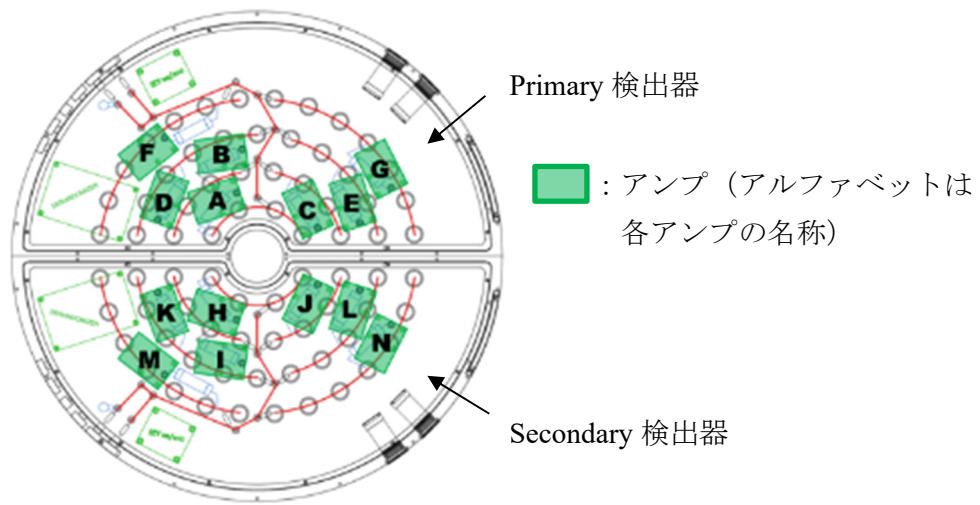


図 3.1.2-2 AVIS のアンプ配置図

詳細な試験手順を以下に示す。

- ① 線源固定治具を用いて、1.6 項の表 1.6-1 に示す ^{252}Cf 中性子線源 (Q2-334) を検出器にセットする。
- ② 検出器にリストモジュールを接続する。
- ③ 検出器のジャンクションボックスの蓋を外す。
- ④ 任意のアンプ以外のアンプのジャンパーピンを取り外し、計数機能を停止させる。
- ⑤ リストモジュール用ソフトウェアを用いてパルスを 10 分間測定し、パルス間隔分布を評価する。
- ⑥ 全てのアンプについて、④～⑤を実施する。

3.1.3 結果

AVISにおける各アンプのパルス間隔分布を評価した。本評価結果と平成30年度(2018年度)に実施した性能確認試験(参考文献²⁾)における評価結果を比較した結果(0~1000 μ s及び0~100 μ sの分布)を図3.1.3-1~3.1.3-28に示す。各グラフ中の×印及び破線は平成30年度(2018年度)に評価したパルス間隔分布及びその近似曲線を示し、○印及び実線は平成31年度(2019年度)年に評価したパルス間隔分布及びその近似曲線を示す。

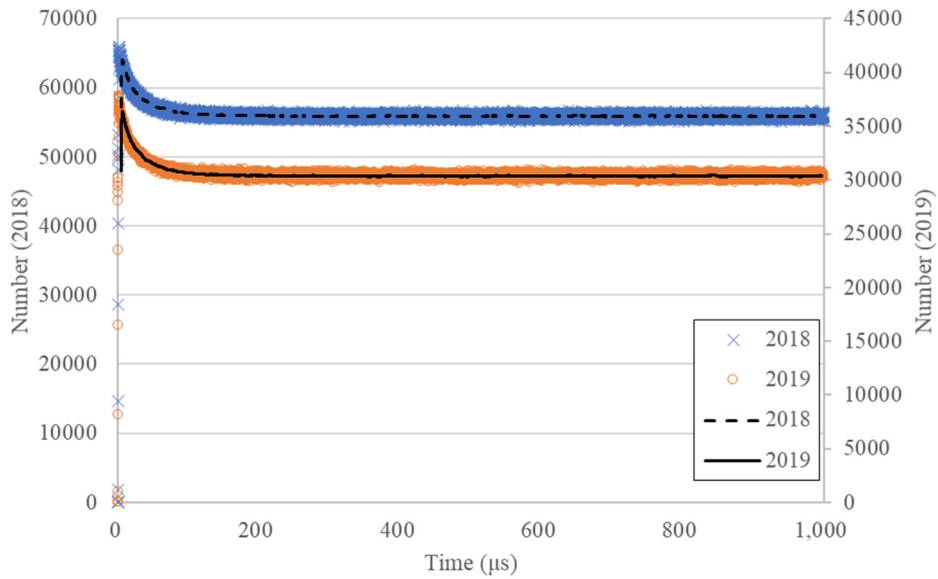


図 3.1.3-1 アンプ A のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

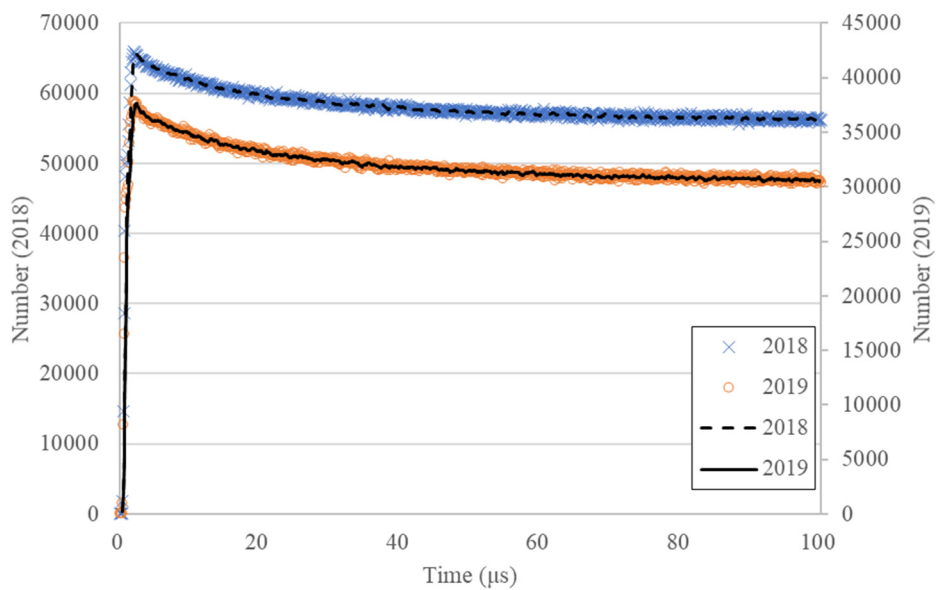


図 3.1.3-2 アンプ A のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

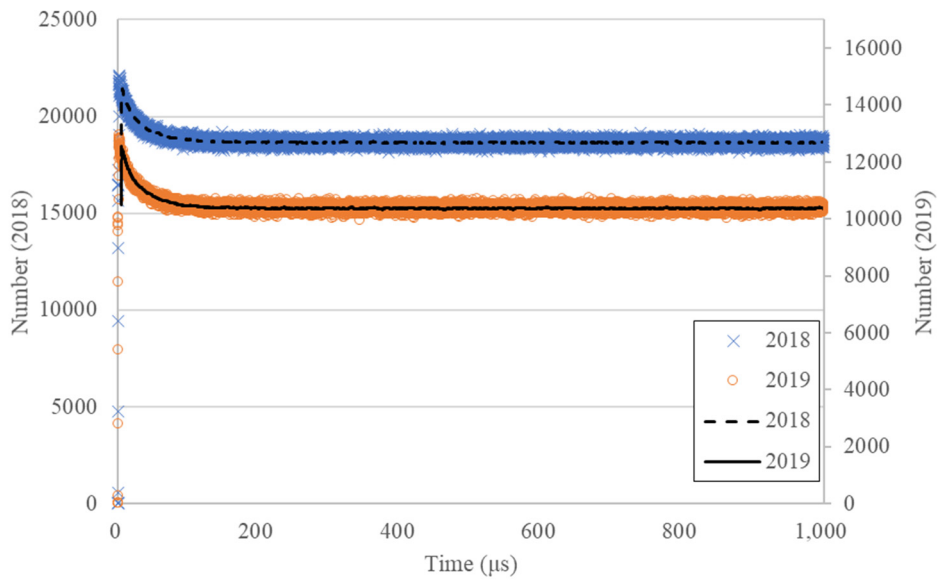


図 3.1.3-3 アンプ B のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

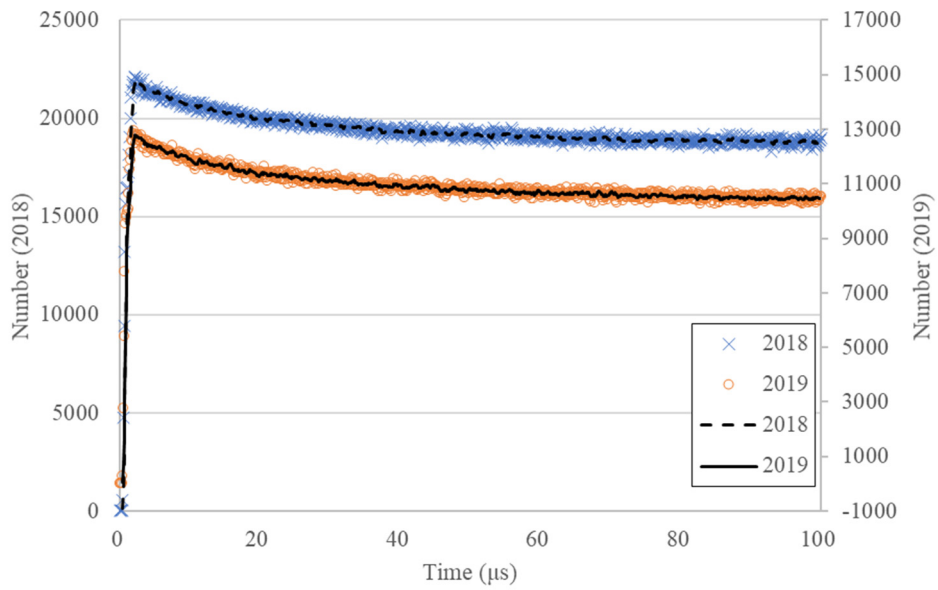


図 3.1.3-4 アンプ B のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

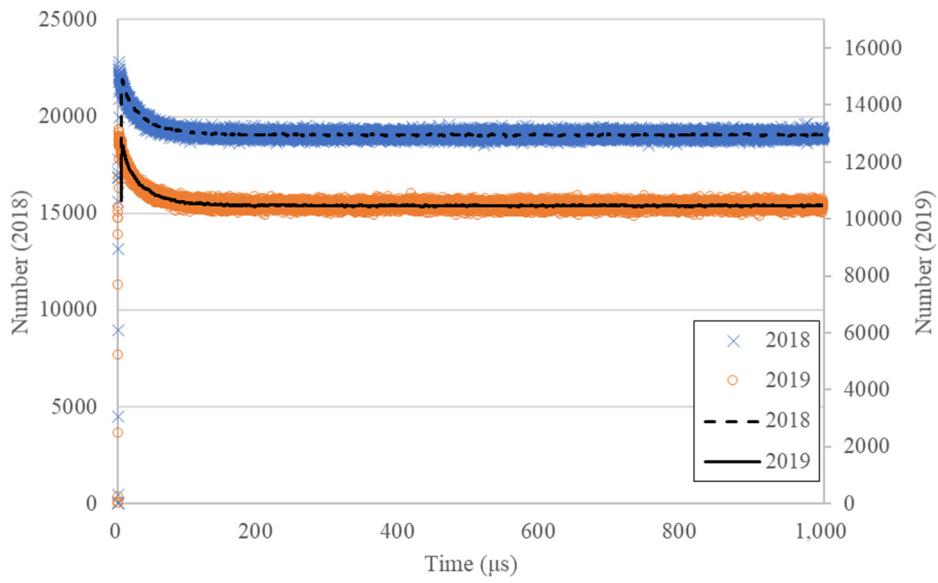


図 3.1.3-5 アンプ C のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

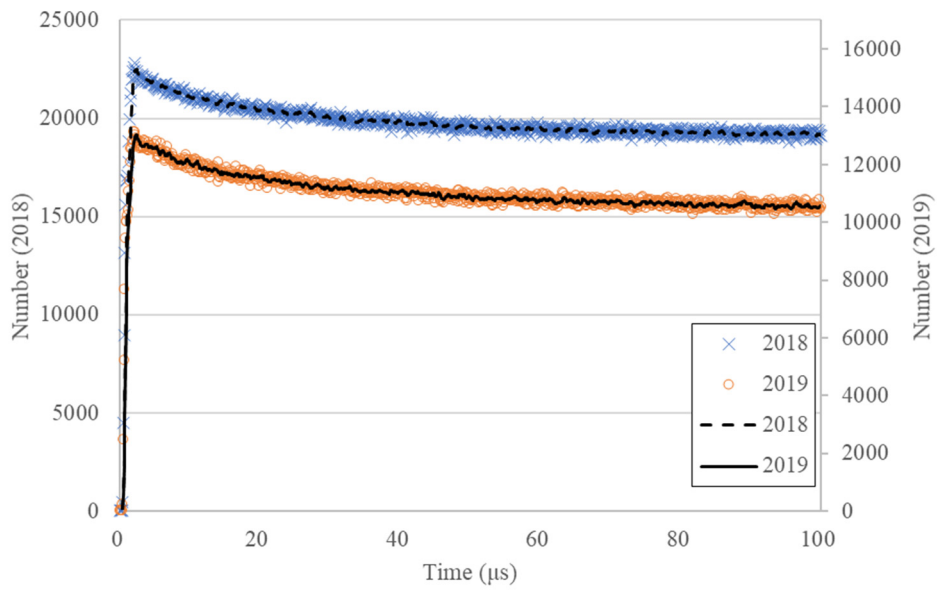


図 3.1.3-6 アンプ C のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

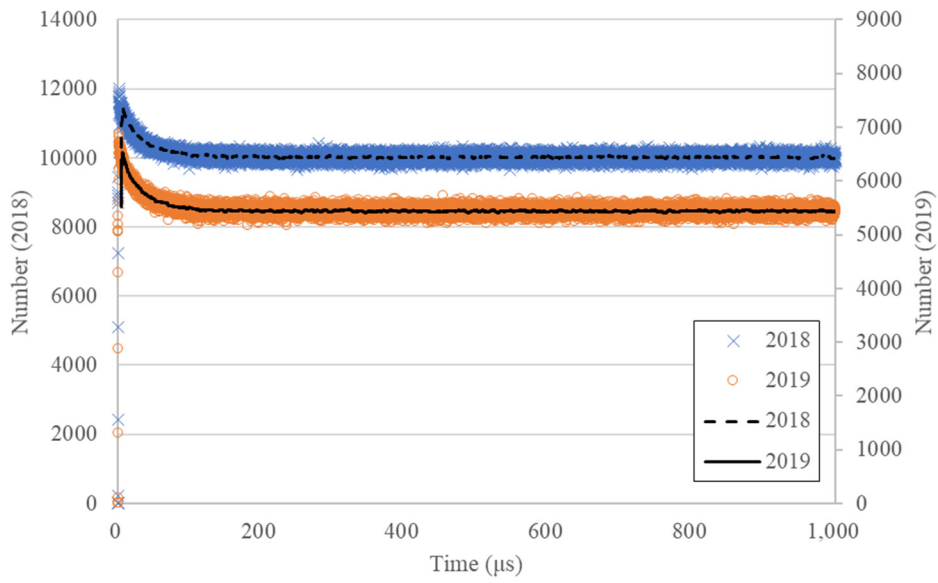


図 3.1.3-7 アンプ D のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

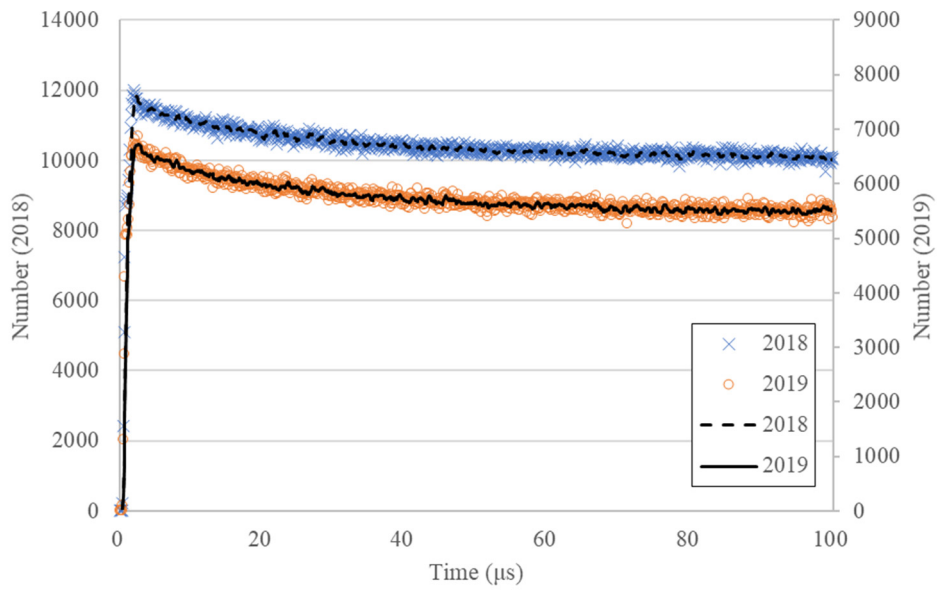


図 3.1.3-8 アンプ D のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

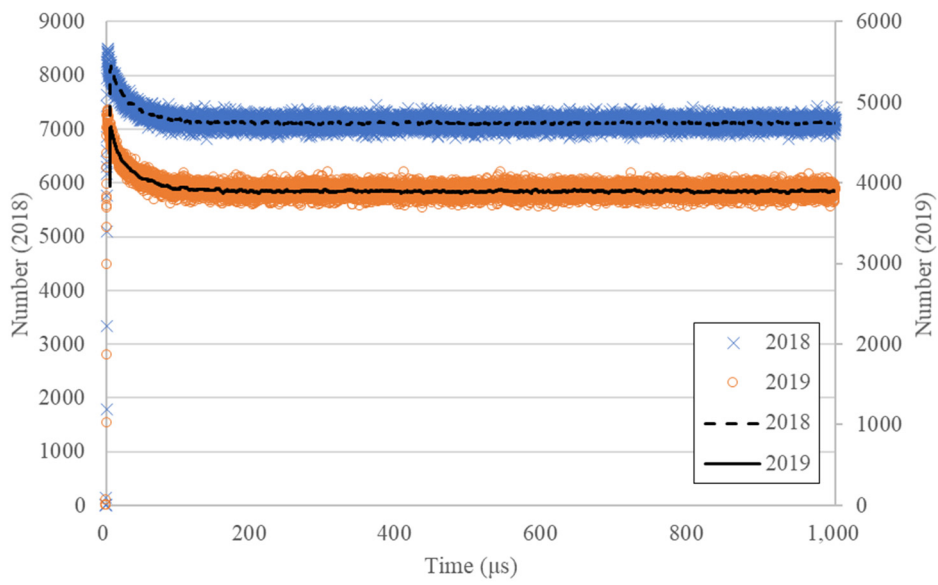


図 3.1.3-9 アンプ E のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

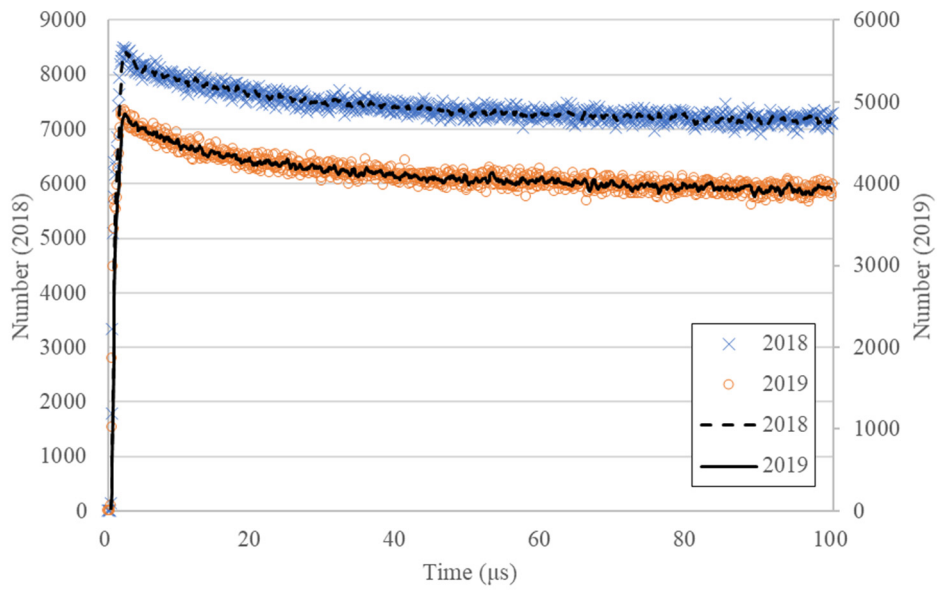


図 3.1.3-10 アンプ E のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

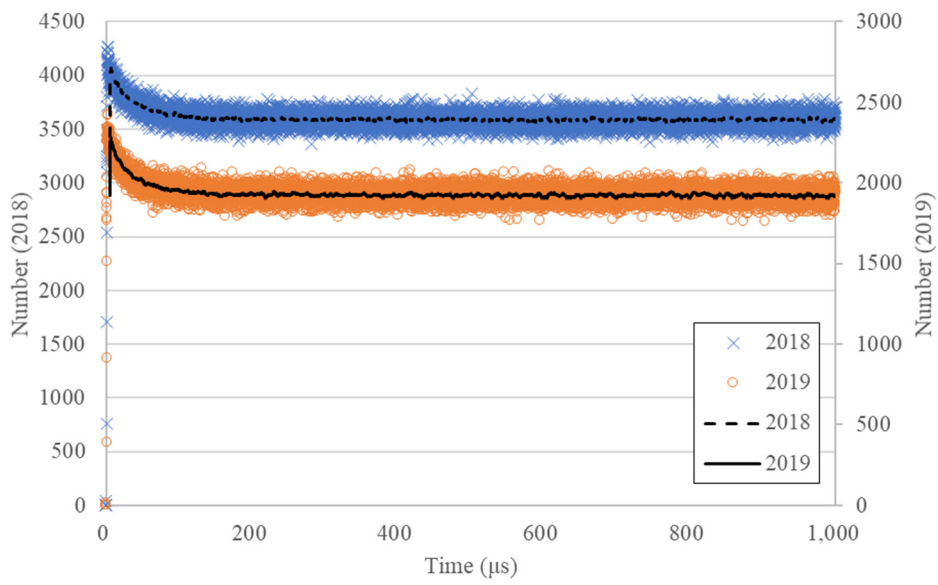


図 3.1.3-11 アンプ F のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

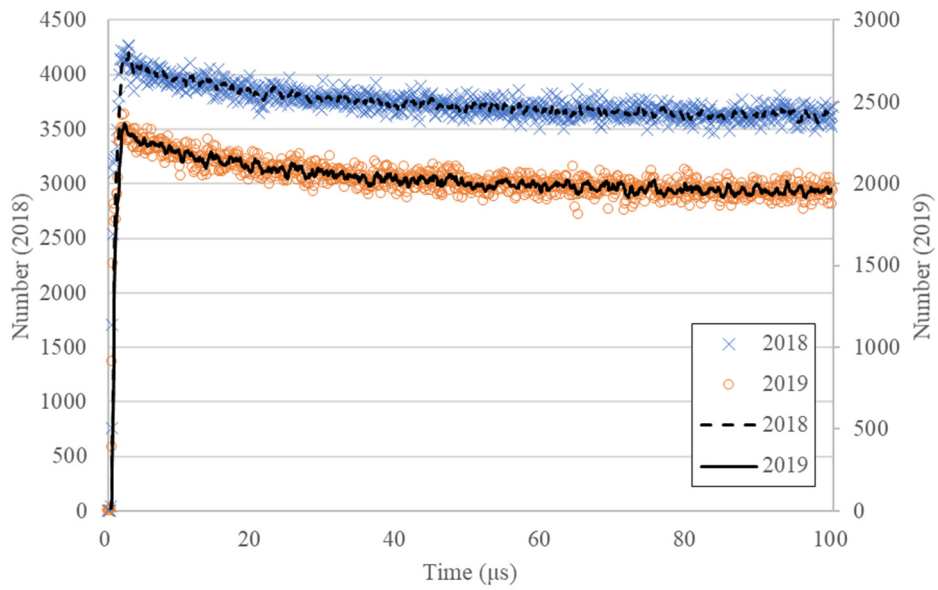


図 3.1.3-12 アンプ F のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

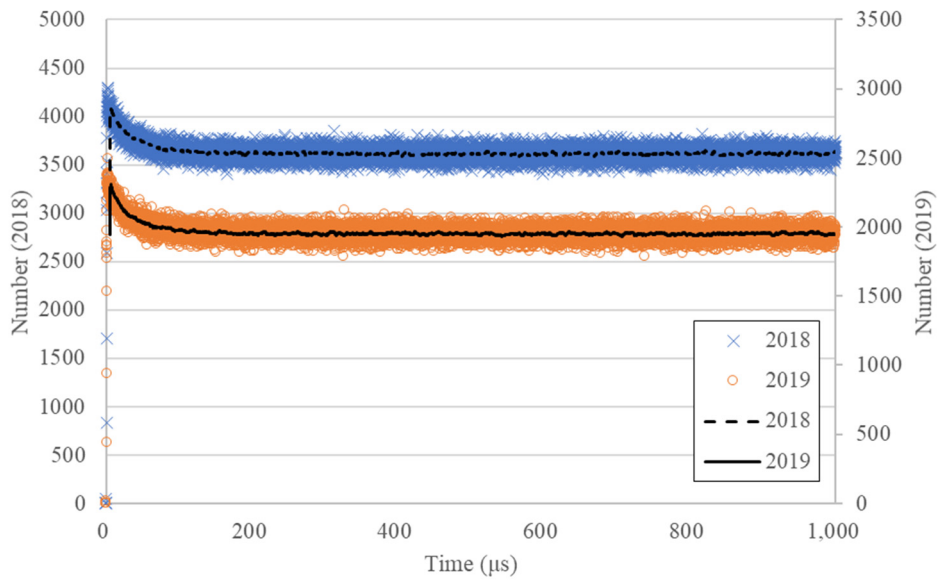


図 3.1.3-13 アンプ G のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

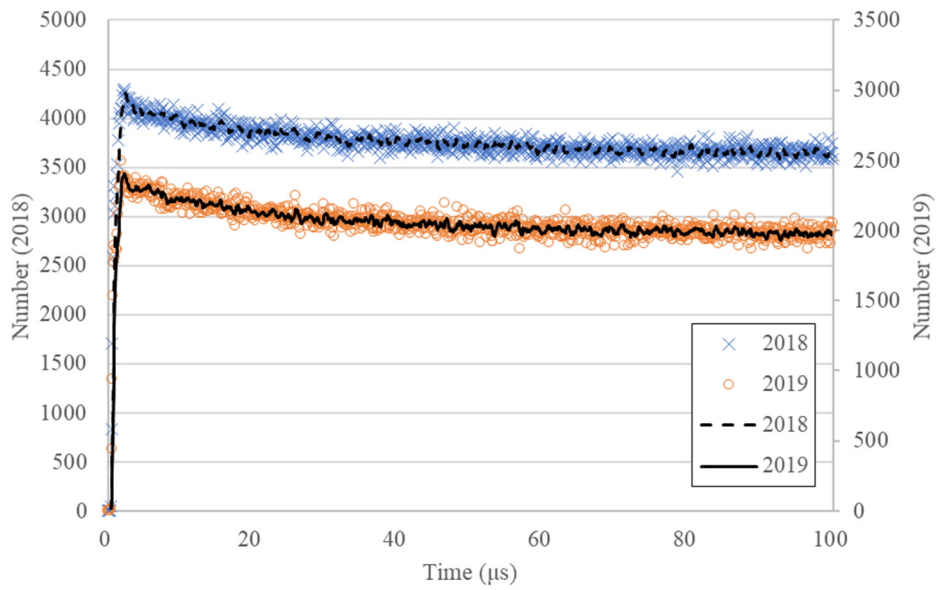


図 3.1.3-14 アンプ G のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

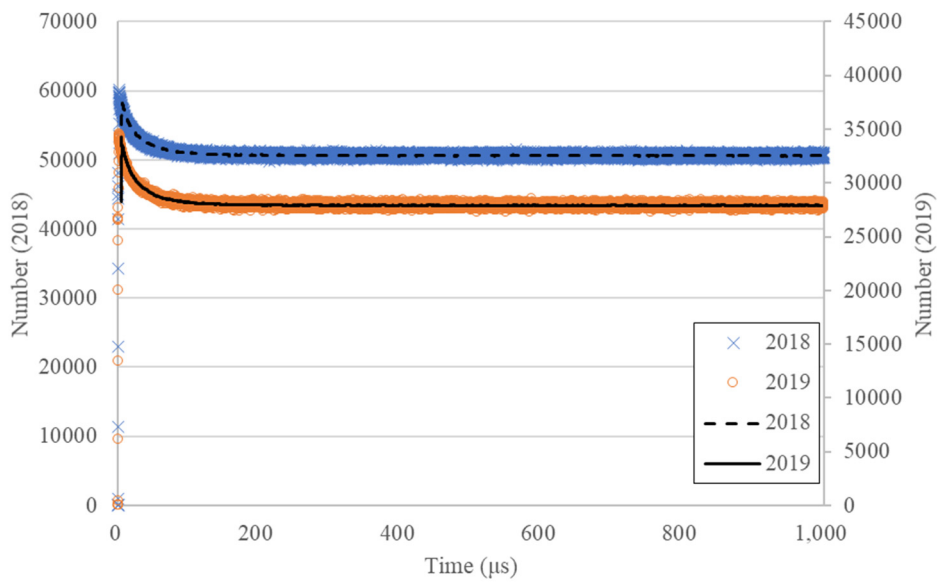


図 3.1.3-15 アンプ H のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

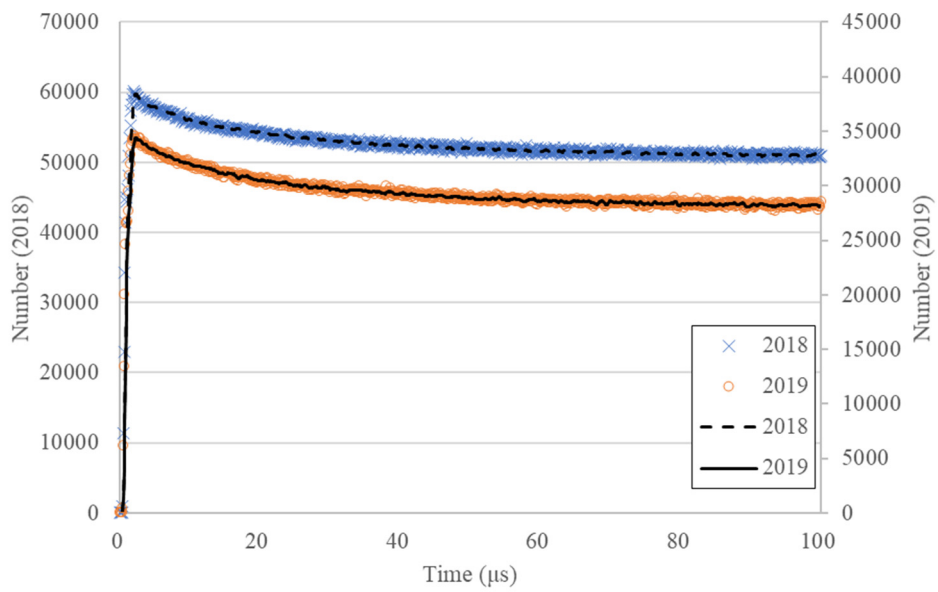


図 3.1.3-16 アンプ H のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

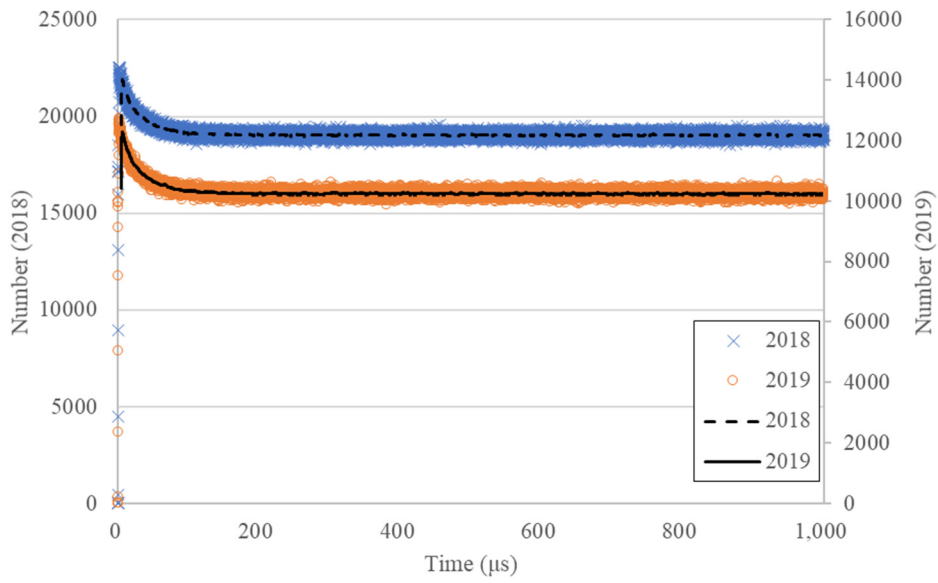


図 3.1.3-17 アンプ I のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

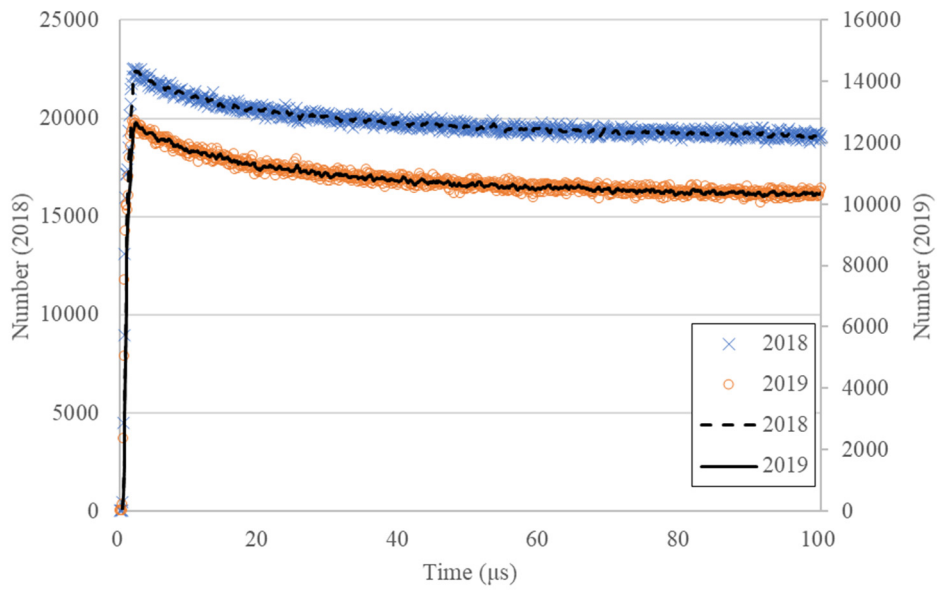


図 3.1.3-18 アンプ I のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

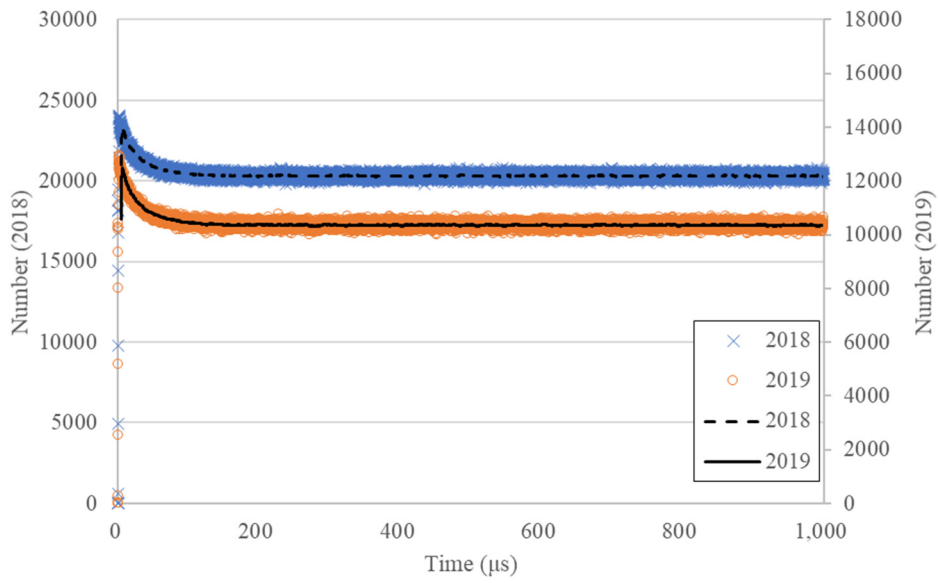


図 3.1.3-19 アンプ J のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

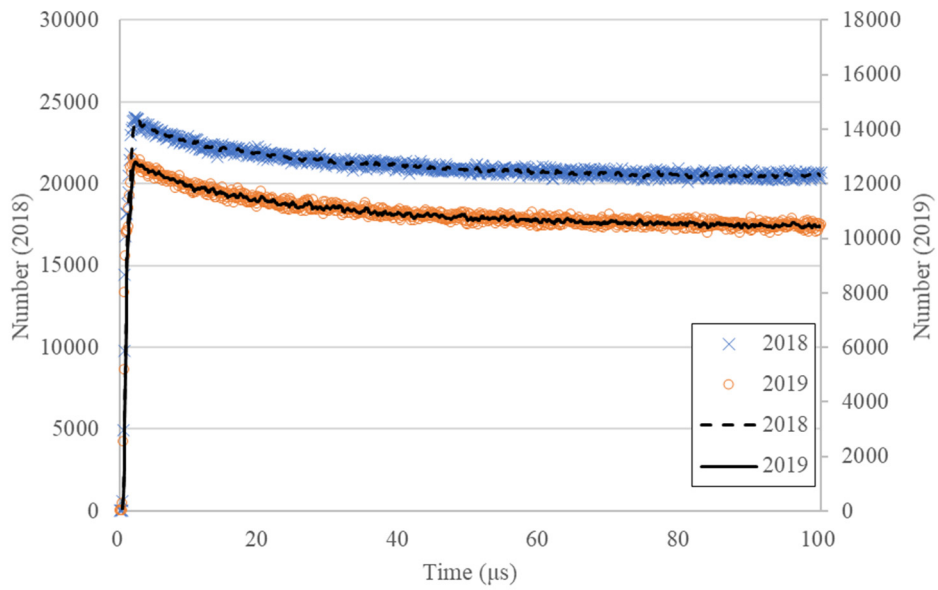


図 3.1.3-20 アンプ J のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

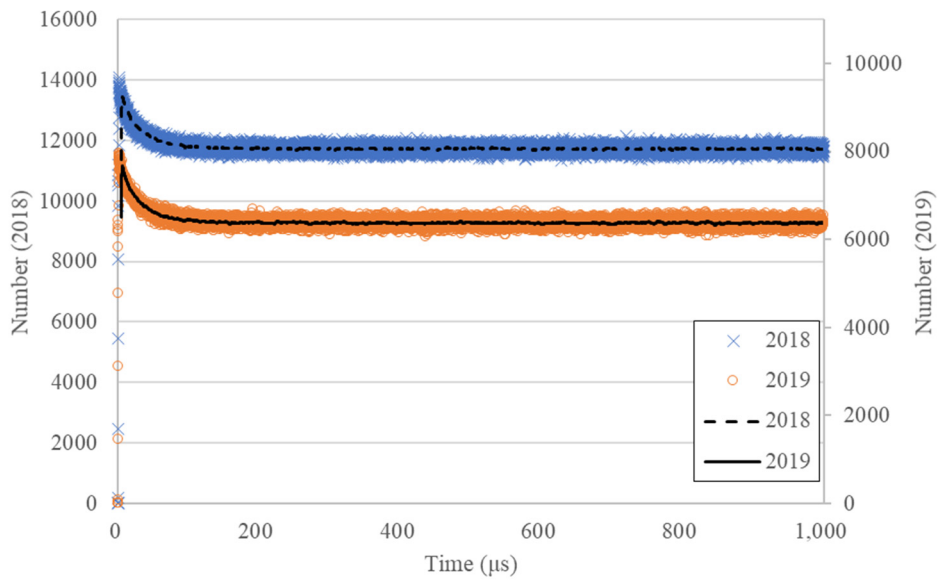


図 3.1.3-21 アンプ K のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

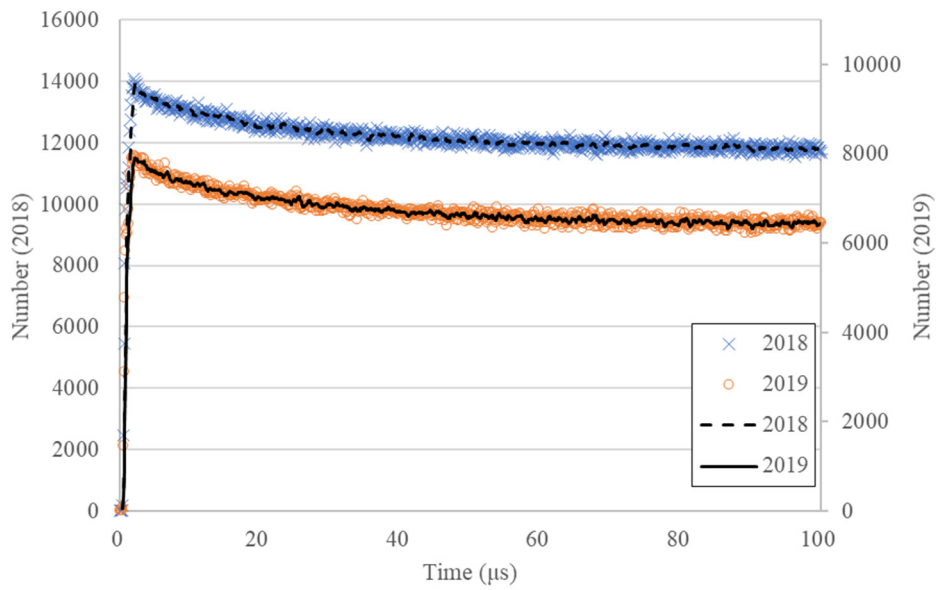


図 3.1.3-22 アンプ K のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

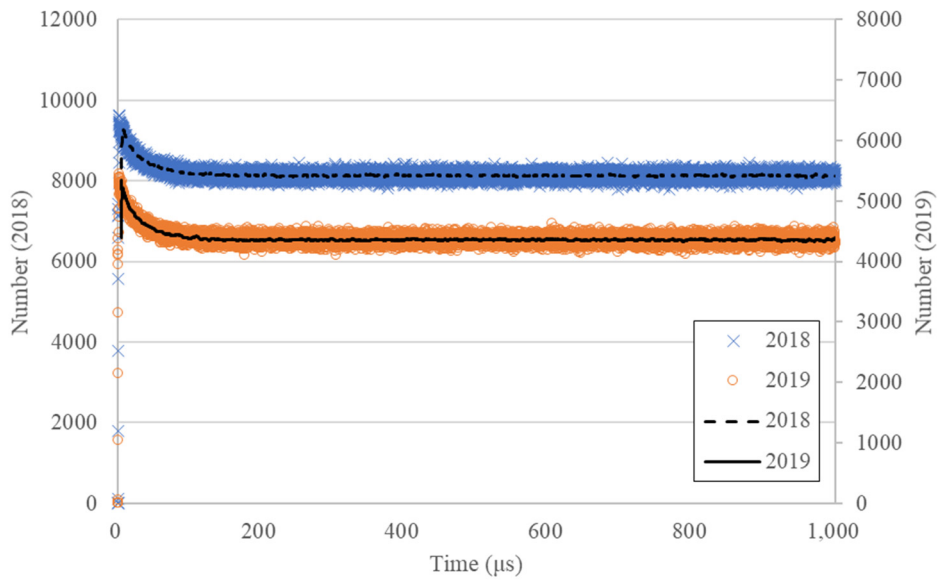


図 3.1.3-23 アンプ L のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

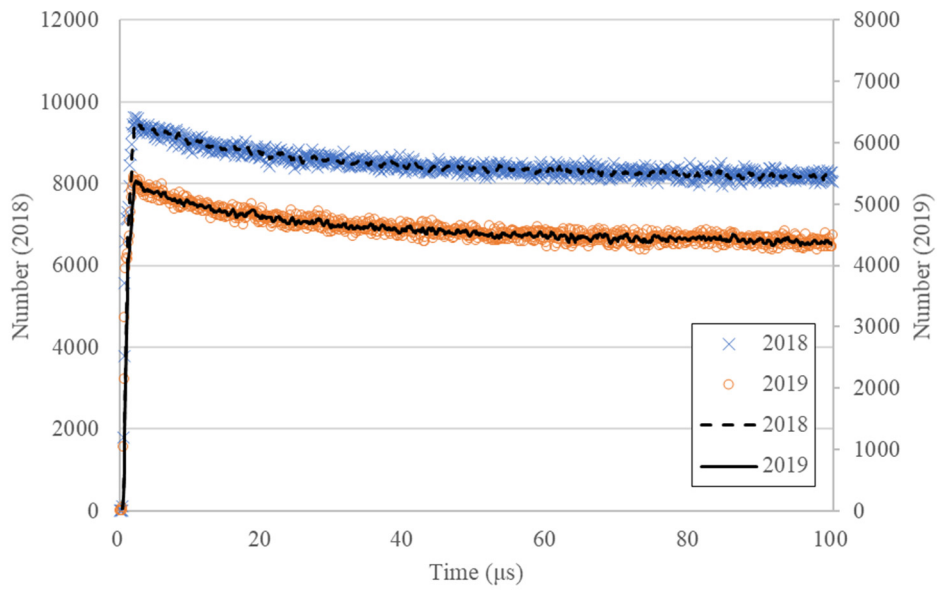


図 3.1.3-24 アンプ L のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

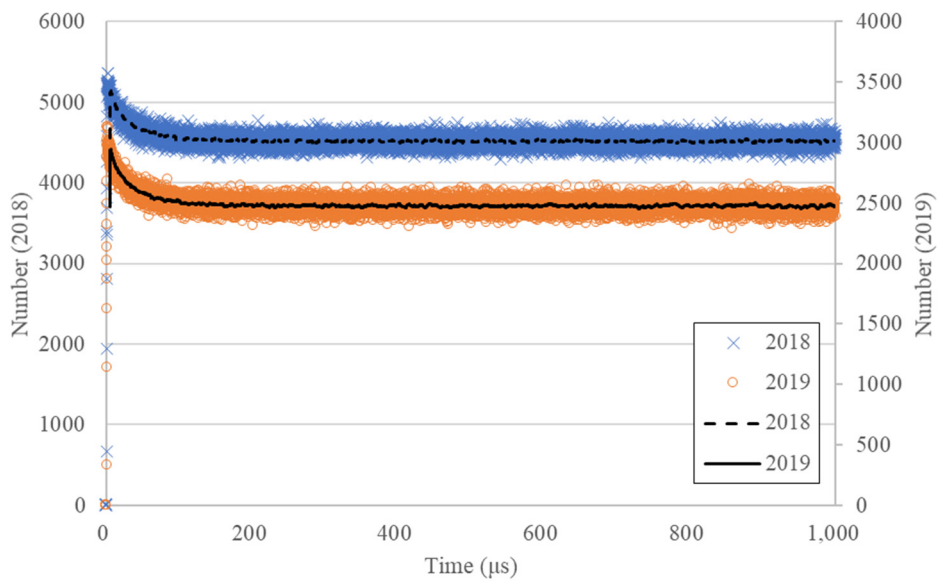


図 3.1.3-25 アンプ M のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

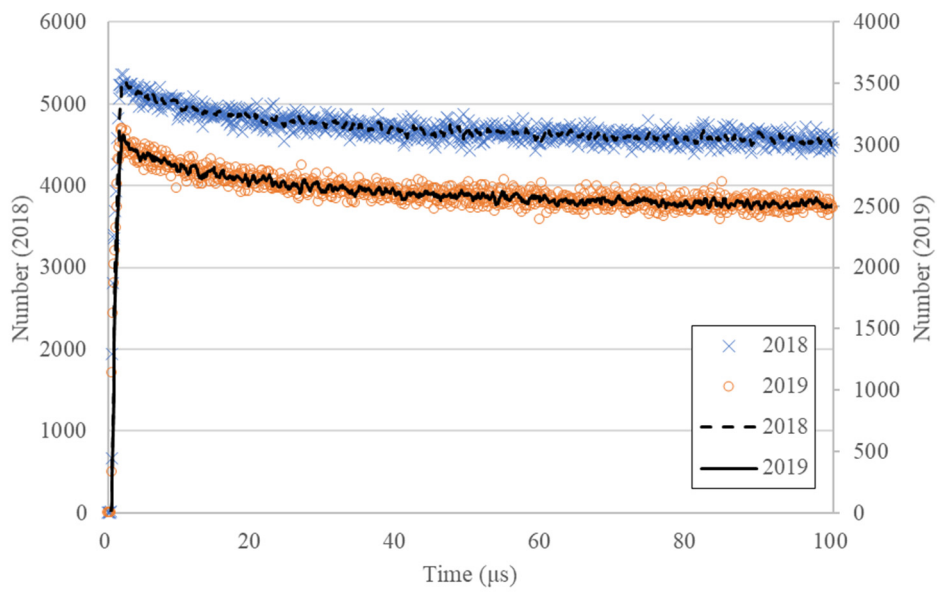


図 3.1.3-26 アンプ M のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

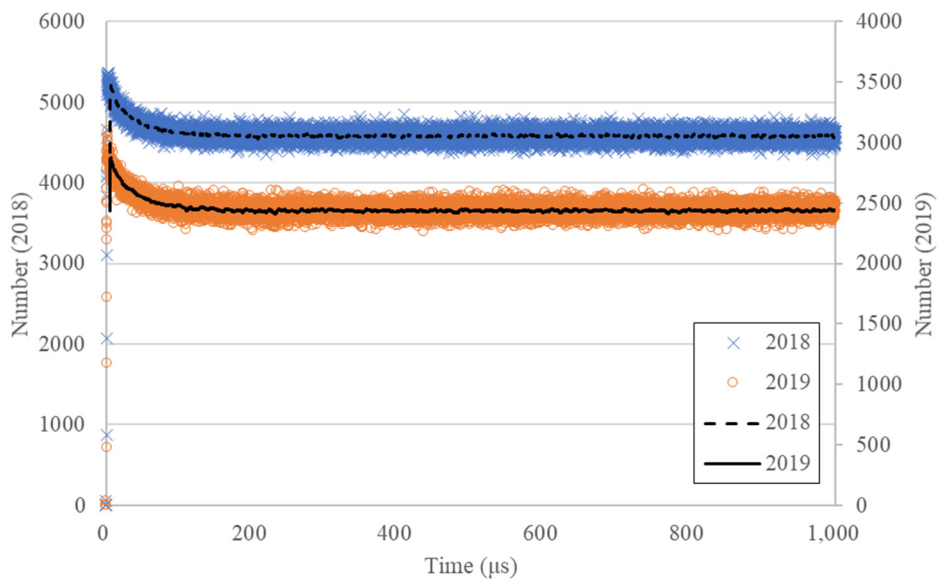


図 3.1.3-27 アンプ N のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

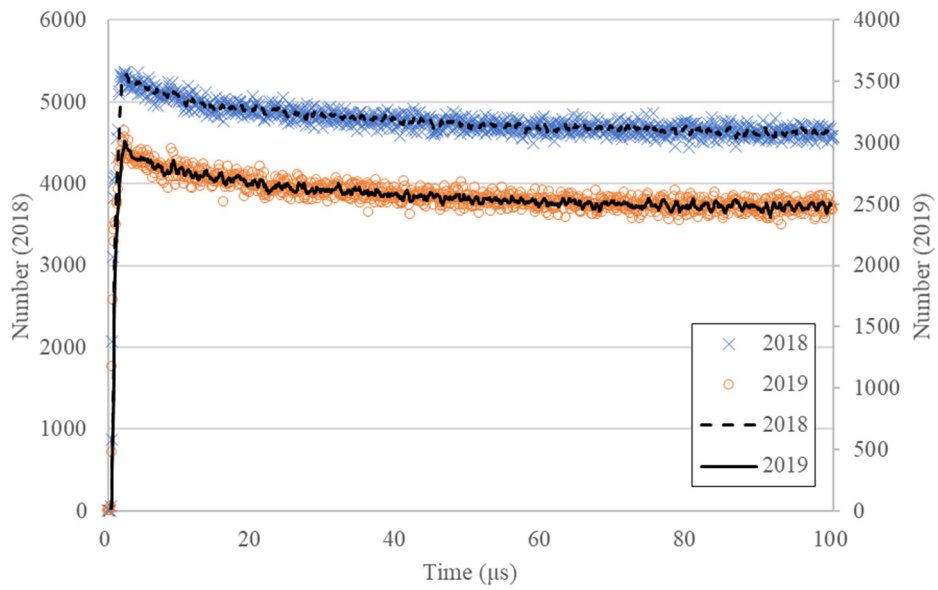


図 3.1.3-28 アンプ N のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

3.1.4 考察

2.2 項の AFAS における評価と同様に、本試験では平成 30 年度における評価に用いた ^{252}Cf 中性子線源と同じ線源を用いたため、線源の減衰により得られた計数値が 40～50% 程度減少したが、評価したパルス間隔分布は、平成 30 年度に評価したパルス間隔分布とほぼ同一の形状となった。したがって、本試験において得られたパルス間隔分布は正常であり、各アンプ、また、それぞれに接続されている ^3He 比例計数管及びケーブルは健全に保たれていると考えられる。

3.2. ガンマ線検出器内液体窒素の量の増減による中性子検出器への影響評価

3.2.1 目的

ガンマ線検出器のデュワ瓶に充填されている液体窒素の量の増減が、中性子検出器による測定に与える影響を評価する。

3.2.2 方法

ガンマ線検出器のデュワ瓶（容量：約 50 リットル）内の液体窒素量を変動させ、中性子検出器による MOX サンプル測定を実施し、液体窒素量の変動が測定に与える影響を評価する。中性子検出器及びガンマ線検出器の配置の概略図を図 3.2.2-1 に示す。

使用する MOX サンプル（A、B、C 及び D）の仕様を 1.7 項の表 1.7-1 及び表 1.7-2 に示す。

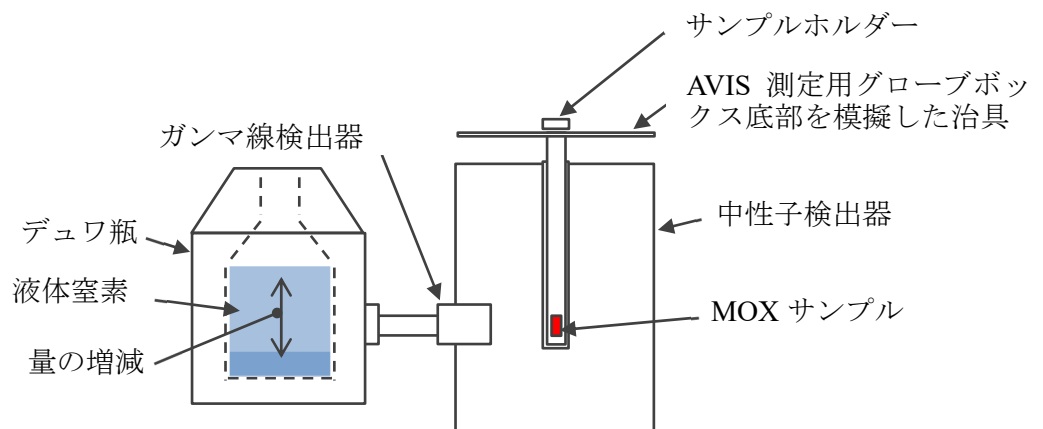


図 3.2.2-1 中性子検出器及びガンマ線検出器の配置（概略図）

詳細な試験手順を以下に示す。

- ① 写真 3.2.2-1 に示す J-MOX における AVIS 測定用グローブボックスの底部を模擬した治具を図 3.2.2-1 に示すように AVIS 検出器上部に設置する。
- ② 中性子検出器にて 10 分間のバックグラウンド測定を実施する。
- ③ 中性子検出器に MOX サンプル (A、B、C または D) をセットする。
- ④ INCC ソフトウェアを用いて 15 分間^(*10) (30 秒×30 回) の測定を実施する。
- ⑤ ガンマ線検出器のデュワ瓶に液体窒素を 10 リットル注入する。
- ⑥ ④～⑤をデュワ瓶内の液体窒素が 50 リットルになるまで繰り返す。
- ⑦ ④により得られた各計数値 (シングル値、ダブル値及びトリプル値) 及び Multiplicity 法と Known α 法により解析された Pu 量と液体窒素量との相関の有無を確認する。
- ⑧ ②～⑦を繰り返し、全ての MOX サンプルについて測定を実施する。

*10 : AVIS の要求仕様書に記載されている J-MOX における AVIS の測定時間は 15 分



写真 3.2.2-1 J-MOX における AVIS 測定用グローブボックス底部を模擬した治具

3.2.3 結果

ガンマ線検出器のデュワ瓶内の液体窒素量を変動させ (0～50 リットル)、中性子検出器による MOX サンプル (A、B、C 及び D) 測定を行い、得られた各計数値 (シングル値、ダブル値及びトリプル値) 及び解析された Pu 量の比較結果を図 3.2.3-1～3.2.3-20 に示す。

得られた各計数値及び解析された各 Pu 量は、いずれのサンプルにおいても誤差 (2σ) の範囲で一致した。

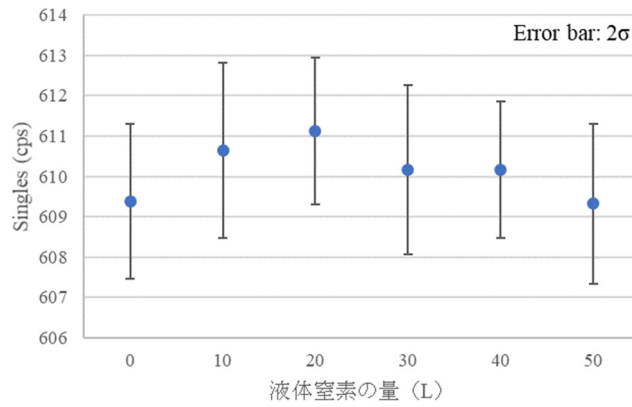


図 3.2.3-1 サンプル A のシングル値の比較

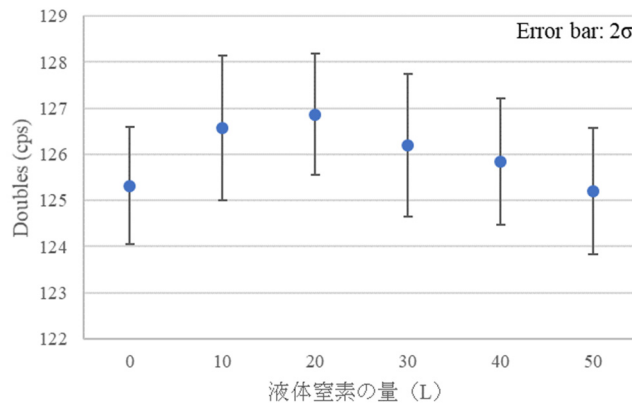


図 3.2.3-2 サンプル A のダブル値の比較

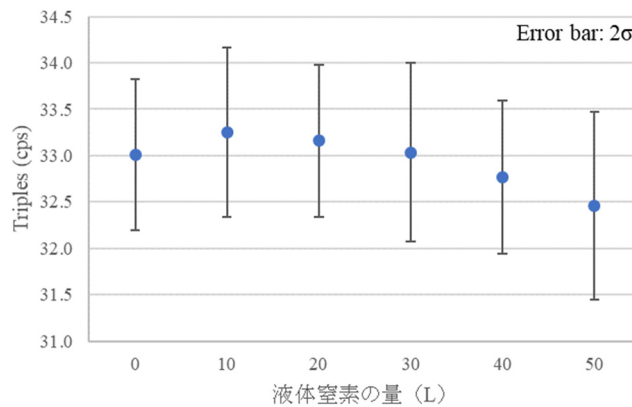


図 3.2.3-3 サンプル A のトリプル値の比較

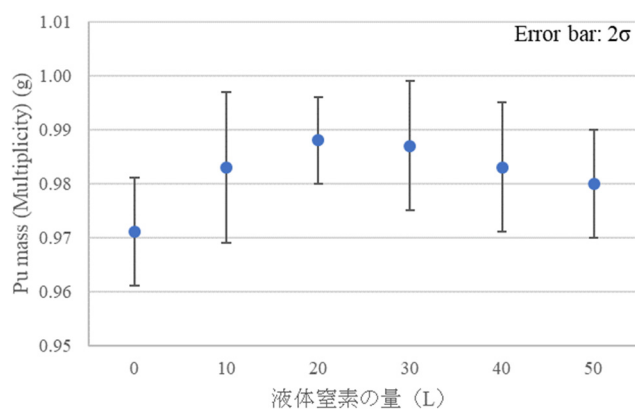


図 3.2.3-4 サンプル A の Pu 量 (Multiplicity 法) の比較

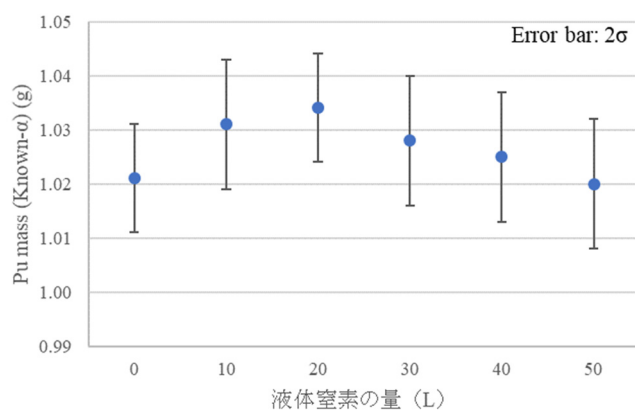


図 3.2.3-5 サンプル A の Pu 量 (Known-α 法) の比較

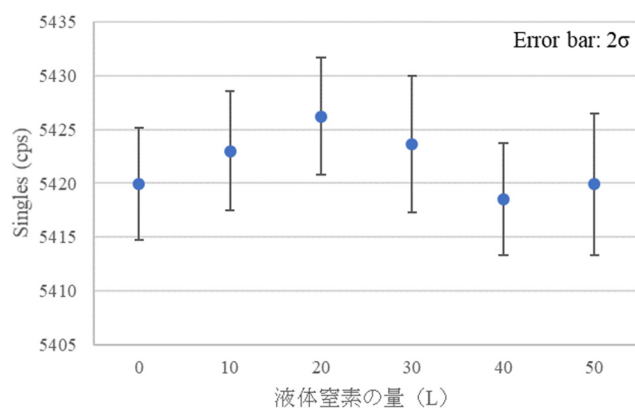


図 3.2.3-6 サンプル B のシングル値の比較

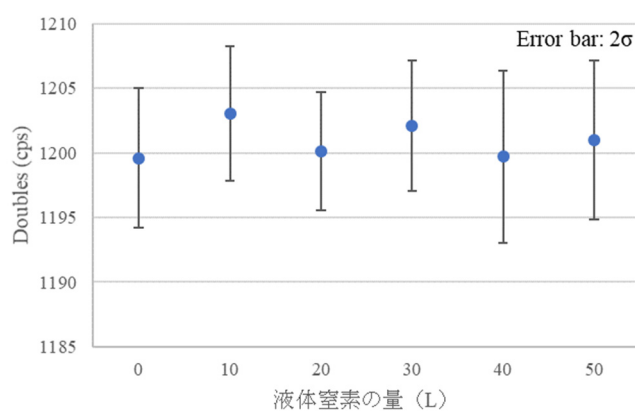


図 3.2.3-7 サンプル B のダブル値の比較

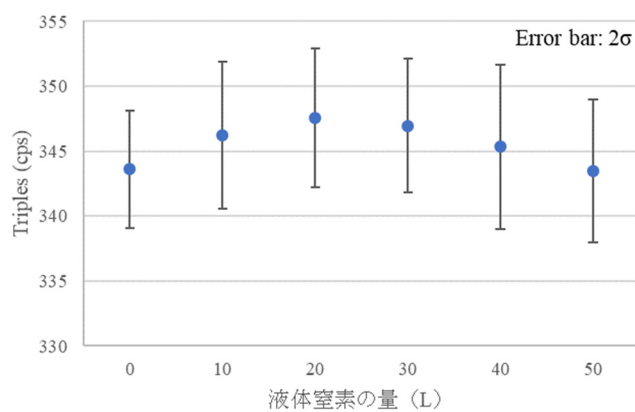


図 3.2.3-8 サンプル B のトリプル値の比較

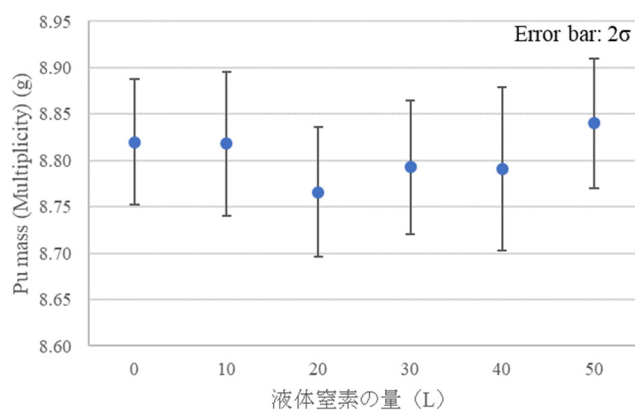


図 3.2.3-9 サンプル B の Pu 量 (Multiplicity 法)の比較

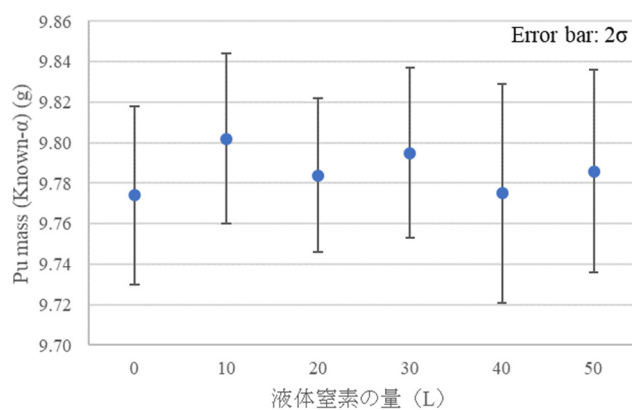


図 3.2.3-10 サンプル B の Pu 量 (Known- α 法)の比較

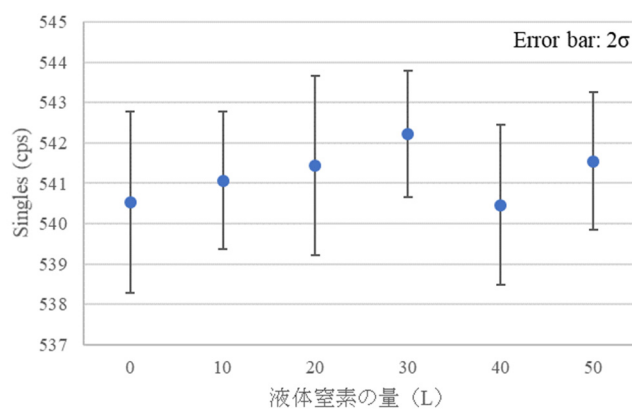


図 3.2.3-11 サンプル C のシングル値の比較

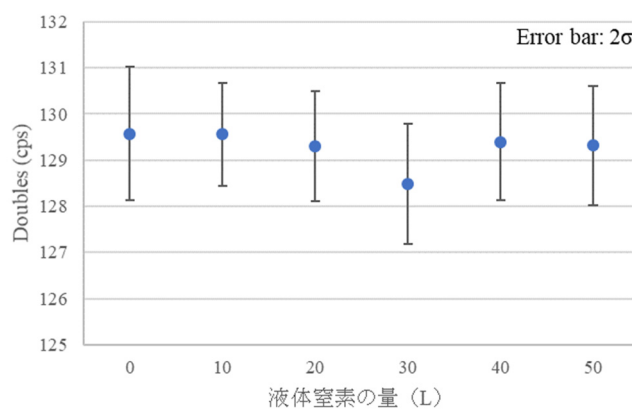


図 3.2.3-12 サンプル C のダブル値の比較

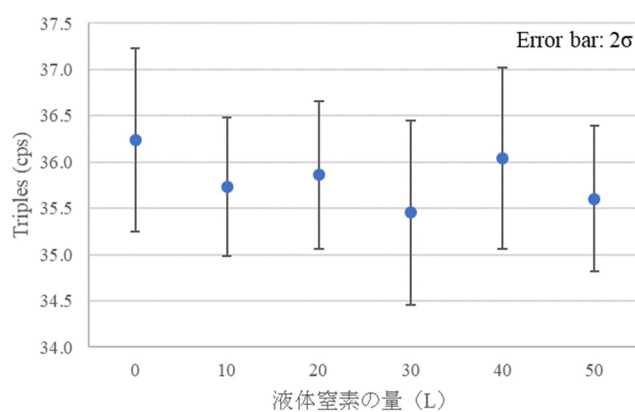


図 3.2.3-13 サンプル C のトリプル値の比較

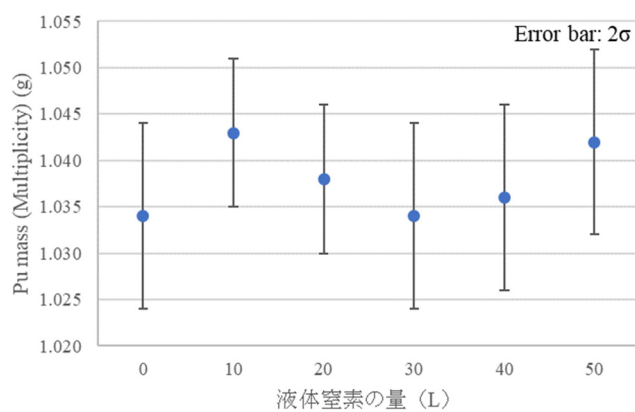


図 3.2.3-14 サンプル C の Pu 量 (Multiplicity 法)の比較

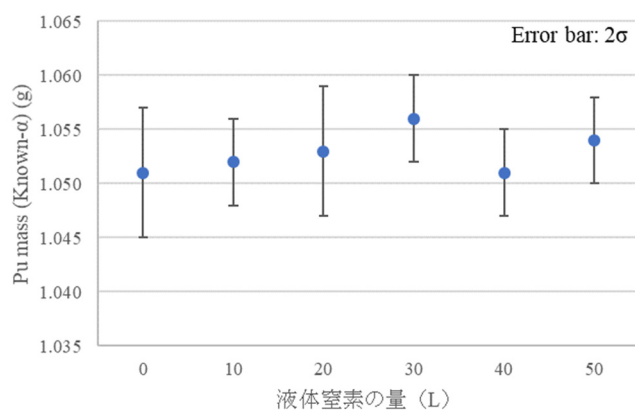


図 3.2.3-15 サンプル C の Pu 量 (Known-α 法)の比較

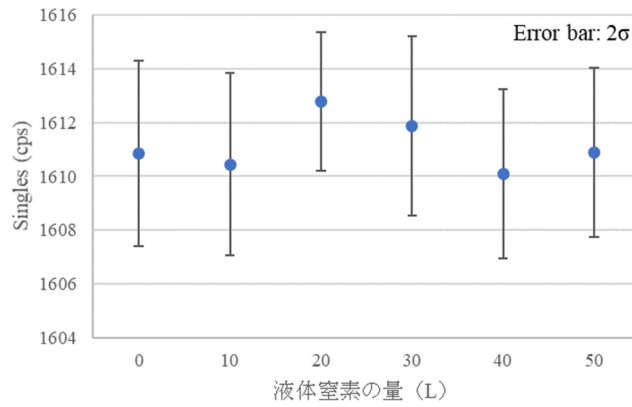


図 3.2.3-16 サンプル D のシングル値の比較

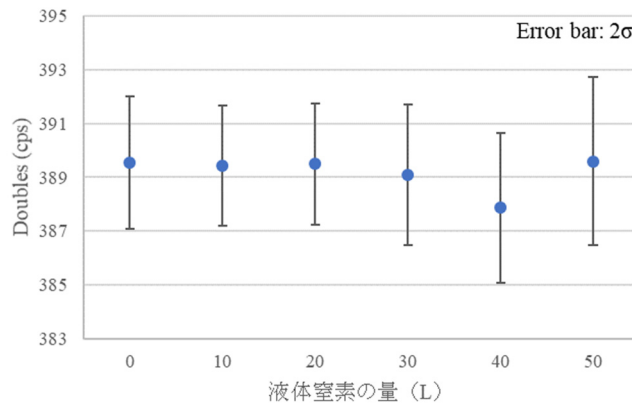


図 3.2.3-17 サンプル D のダブル値の比較

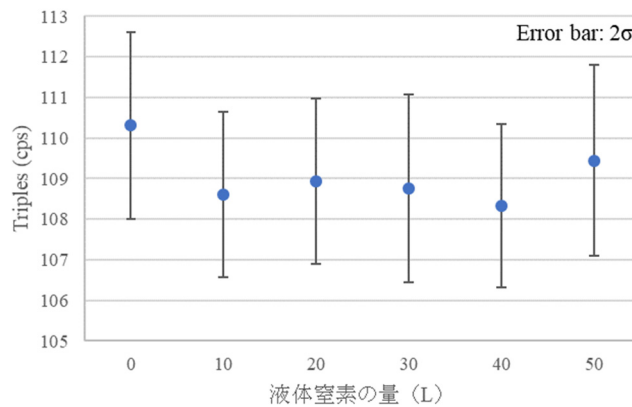


図 3.2.3-18 サンプル D のトリプル値の比較

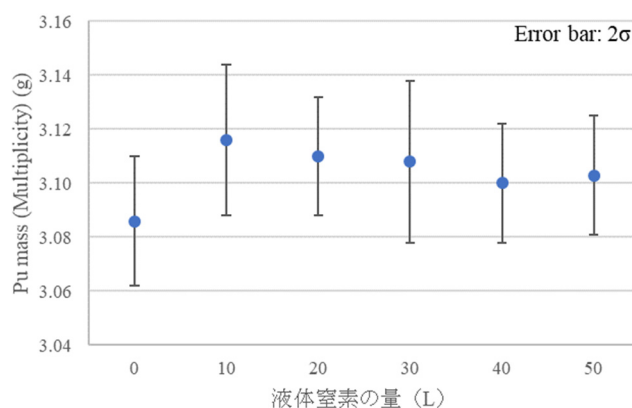


図 3.2.3-19 サンプル D の Pu 量 (Multiplicity 法)の比較

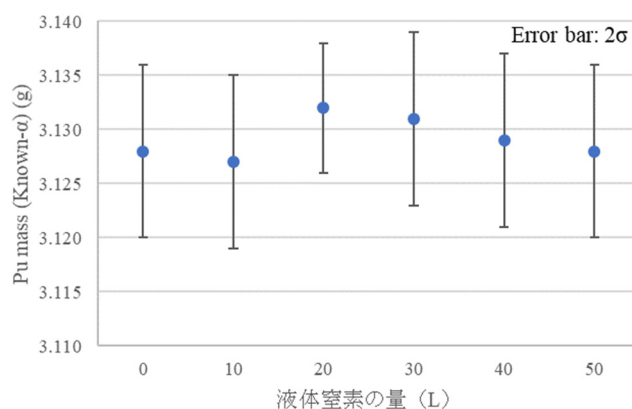


図 3.2.3-20 サンプル D の Pu 量 (Known- α 法)の比較

3.2.4 考察

ガンマ線測定器のデュワ瓶内の液体窒素量を変動させ、測定された各計数値及び Pu 量は、いずれの MOX サンプルにおいても誤差 (2σ) の範囲で一致し、有意な差はみられなかった。したがって、デュワ瓶内の液体窒素が中性子検出器による測定に与える影響は無視できるほど小さいと考えられる。

なお、J-MOX において、現在のガンマ線検出器と異なる種類や形状の検出器との交換が行われ、中性子検出器にガンマ線検出器のデュワ瓶がより接近するような配置となる場合は、必要に応じて再度液体窒素の存在が中性子測定に与える影響の有無について確認する必要があると考えられる。

3.3. サンプルホルダーの設計変更に伴う中性子・ガンマ線検出器への影響評価

3.3.1 目的

中性子検出器のサンプルホルダーの設計変更^(*11)が、中性子検出器及びガンマ線検出器による測定に与える影響を評価する。

*11：MOX サンプルを収納する箇所の周囲の材質（SUS304）厚さが 1mm から 2mm に変更された。サンプルホルダーの概略図を図 3.3.1-1 に示す。

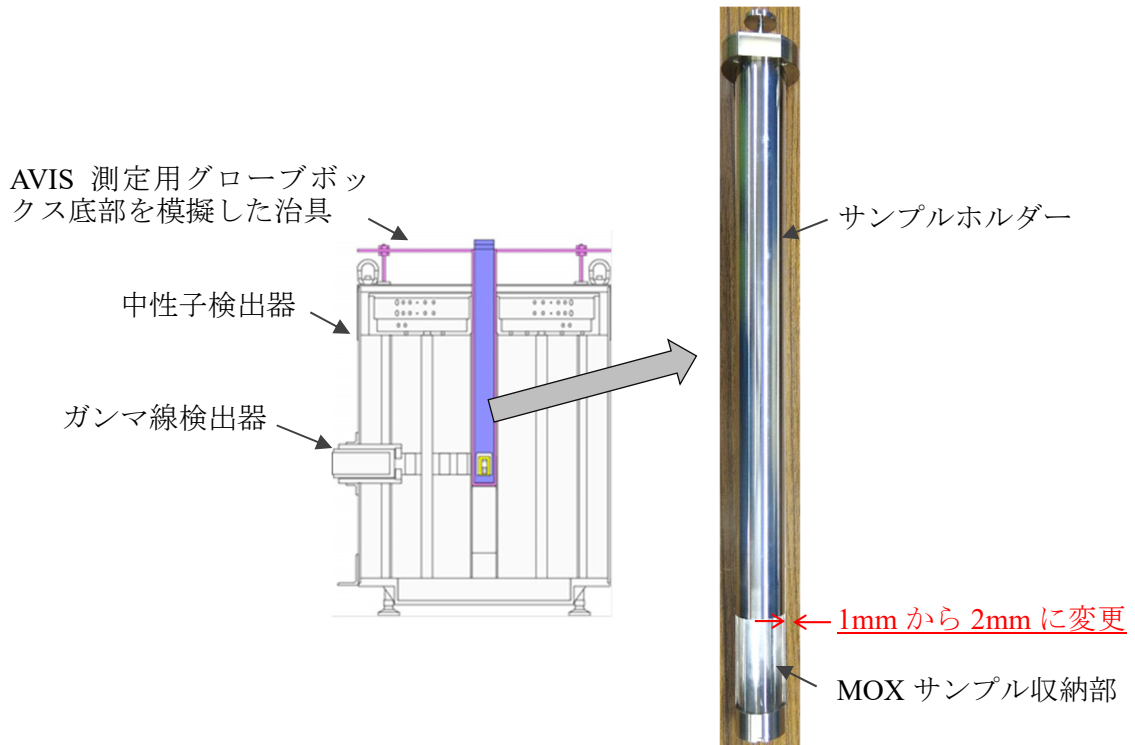


図 3.3.1-1 サンプルホルダー（概略図）

3.3.2 方法

実際に寸法変更前後のサンプルホルダーを製作^(*12)し、これらを用いて中性子検出器及びガンマ線検出器^(*13)による測定を行い、得られた各計数値及び Pu 量測定結果を比較する。

使用する MOX サンプル（A、B、C 及び D）の仕様を 1.7 項の表 1.7-1 及び表 1.7-2 に示す。

*12：寸法変更前のサンプルホルダーは、過去の性能確認試験において既に製作済み。

*13：AVIS 用ガンマ線検出器は、平成 29 年 4 月に故障が確認されたため、本試験では代替として JAEA が所有するガンマ線検出器（写真 3.3.2-1 及び写真 3.3.2-2）を用いた。



写真 3.3.2-1 JAEA 所掌のガンマ線検出器（検出器部）
（Canberra Model: GL0515R S/N: 04034924）

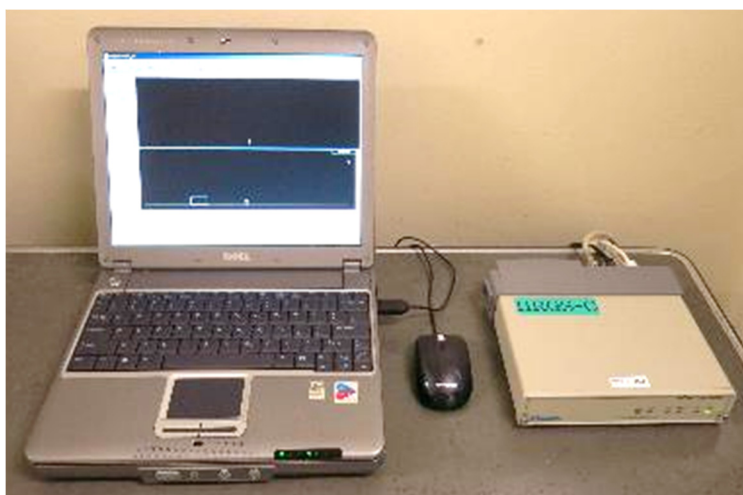


写真 3.3.2-2 JAEA 所掌のガンマ線検出器（MCA 及び PC）
（MCA : Canberra Model: IN2K S/N: 03030916）
（PC : DELL LATITUDE X300 PR04S）
（Software : Genie 2000 V2.1A、MGA version : MGA V9.63F）

詳細な試験手順を以下に示す。

(1) 中性子検出器による測定

- ① 写真 3.2.2-1 に示す J-MOX における AVIS 測定用グローブボックスの底部を模擬した治具を図 3.3.1-1 に示すように AVIS 検出器上部に設置する。
- ② 空のサンプルホルダー（寸法変更前、または変更後）をサンプルキャビティに挿入する。
- ③ 10 分間のバックグラウンド測定を実施する。
- ④ サンプルホルダーに MOX サンプル（A、B、C または D）をセットし、サンプルキャビティに挿入する。
- ⑤ INCC ソフトウェアを用いて 15 分間^(*14)（30 秒×30 回）の測定を実施する。
- ⑥ ④～⑤を繰り返し、全ての MOX サンプルについて測定を実施する。
- ⑦ サンプルホルダーを変更し、②～⑥を繰り返す。
- ⑧ ⑤により得られた、各サンプルホルダーを用いた場合の各計数値（シングル値、ダブル値及びトリプル値）及び解析された Pu 量を比較し、有意差の有無を確認する。

*14: AVIS の要求仕様書に記載されている J-MOX における AVIS の測定時間は 15 分

(2) ガンマ線検出器による測定

- ① サンプルホルダーに MOX サンプル（A、B、C または D）をセットし、AVIS 測定用グローブボックスの底部を模擬した治具に挿入する。
- ② ガンマ線検出器（JAEA 所有に代替）を図 3.3.1-1 に示すようにサンプルの側方 22cm の位置に設置する。
- ③ 15 分間の測定を実施する。
- ④ ①～③を繰り返し、全ての MOX サンプルについて測定を実施する。
- ⑤ サンプルホルダーを変更し、①～④を繰り返す。
- ⑥ ③により得られた、各サンプルホルダーを用いた場合の $^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比、 $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比及び ^{240}Pu 実効質量(%)を比較し、有意差の有無を確認する。

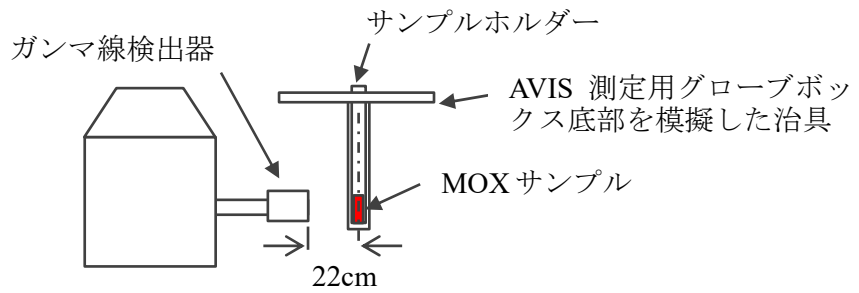


図 3.3.2-1 ガンマ線検出器の配置

3.3.3 結果

(1) 中性子検出器による測定

サンプル収納部の寸法変更前後（変更前：1mm、変更後：2mm）の各サンプルホルダーを用いて MOX サンプル測定を行い、得られた各計数値（シングル値、ダブル値及びトリプル値）及び Multiplicity 法と Known α 法により解析された Pu 量の比較結果を図 3.3.3-1～3.3.3-20 に示す。

各サンプルホルダーを用いて測定された各計数値及び各 Pu 量は、いずれのサンプルにおいても誤差 (2σ) の範囲で一致した。

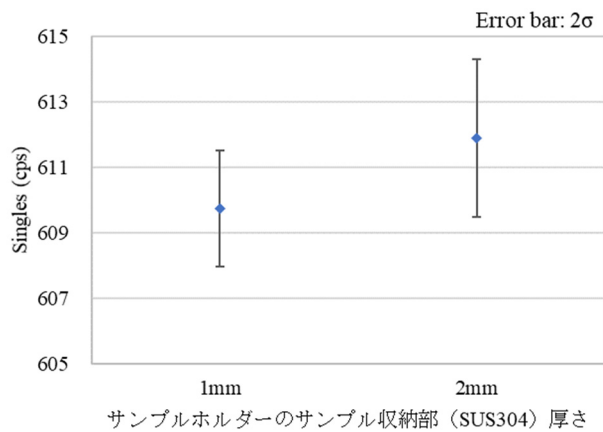


図 3.3.3-1 サンプル A のシングル値の比較

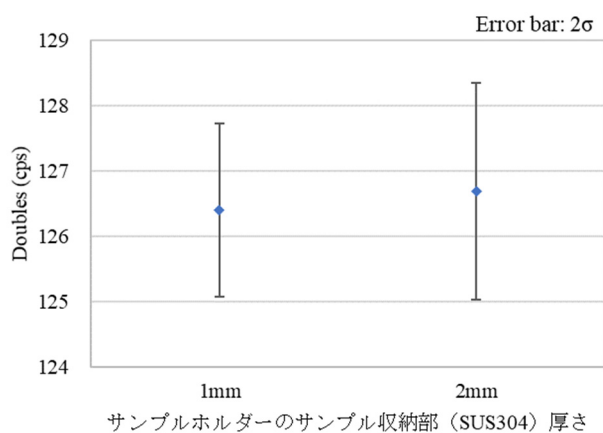


図 3.3.3-2 サンプル A のダブル値の比較

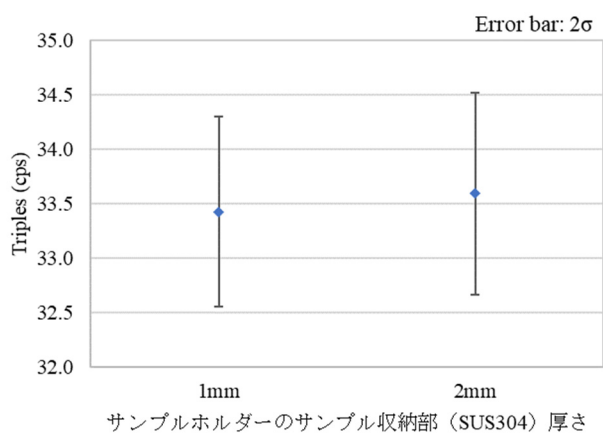


図 3.3.3-3 サンプル A のトリプル値の比較

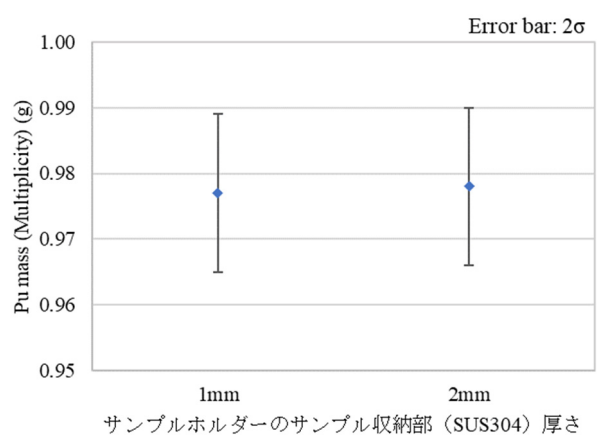


図 3.3.3-4 サンプル A の Pu 量 (Multiplicity) の比較

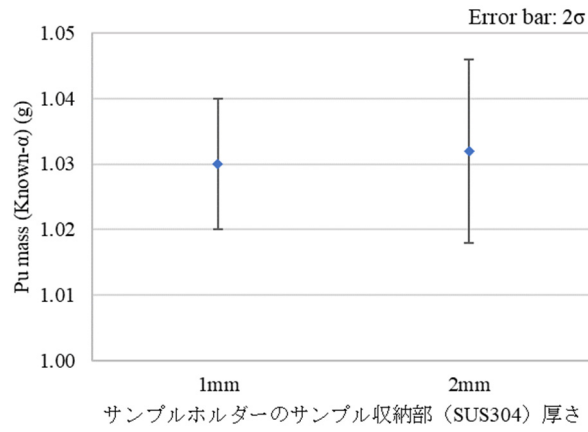


図 3.3.3-5 サンプル A の Pu 量 (Known- α) の比較

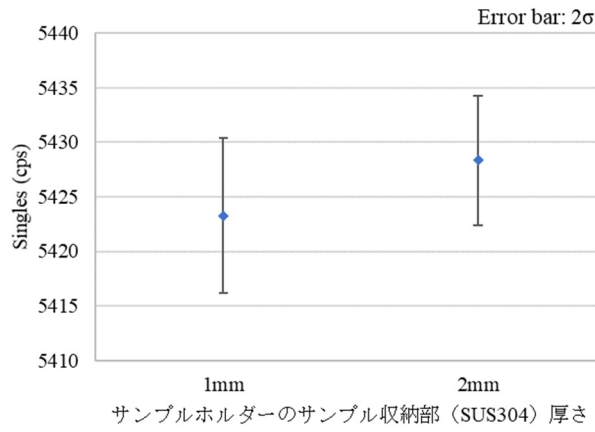


図 3.3.3-6 サンプル B のシングル値の比較

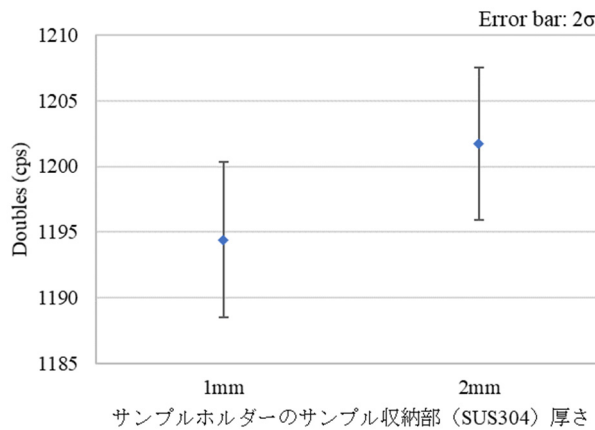


図 3.3.3-7 サンプル B のダブル値の比較

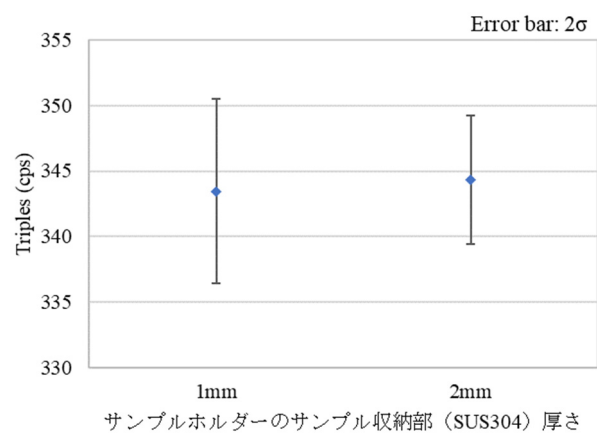


図 3.3.3-8 サンプル B のトリプル値の比較

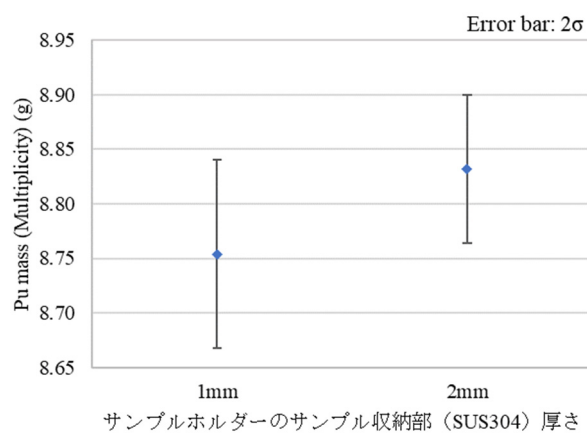


図 3.3.3-9 サンプル B の Pu 量 (Multiplicity) の比較

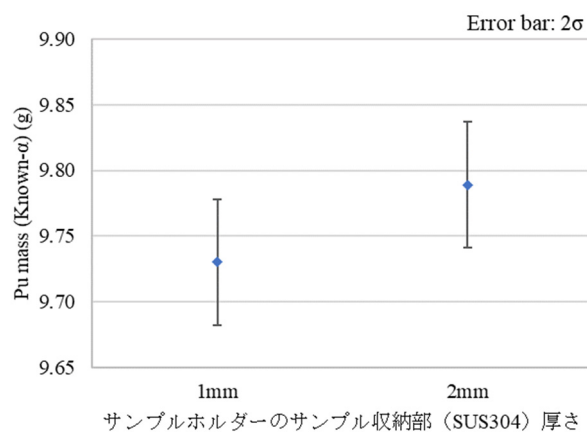


図 3.3.3-10 サンプル B の Pu 量 (Known-alpha) の比較

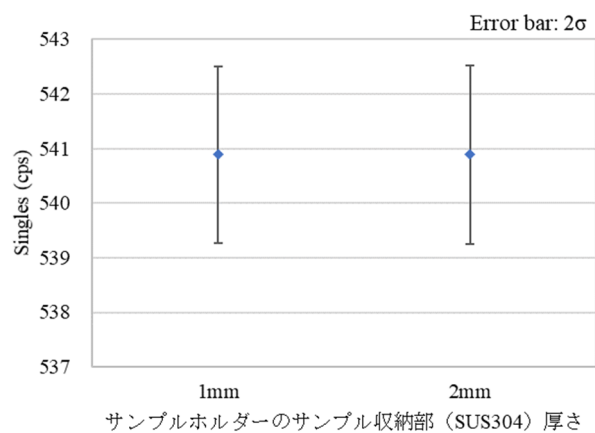


図 3.3.3-11 サンプル C のシングル値の比較

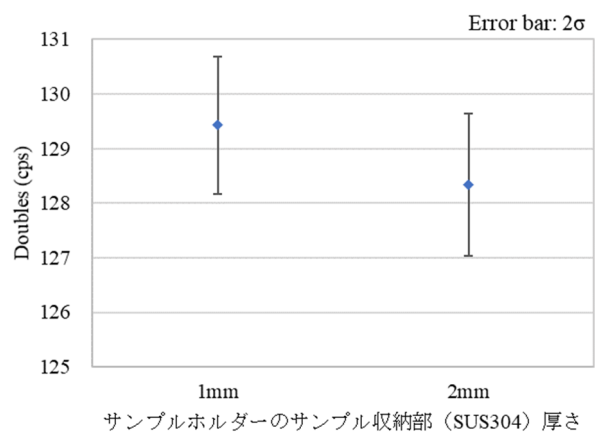


図 3.3.3-12 サンプル C のダブル値の比較

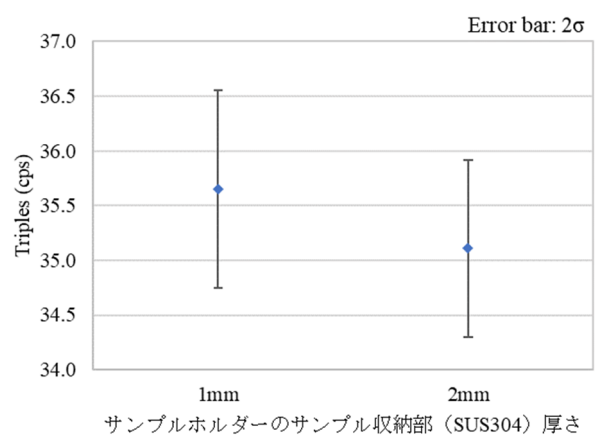


図 3.3.3-13 サンプル C のトリプル値の比較

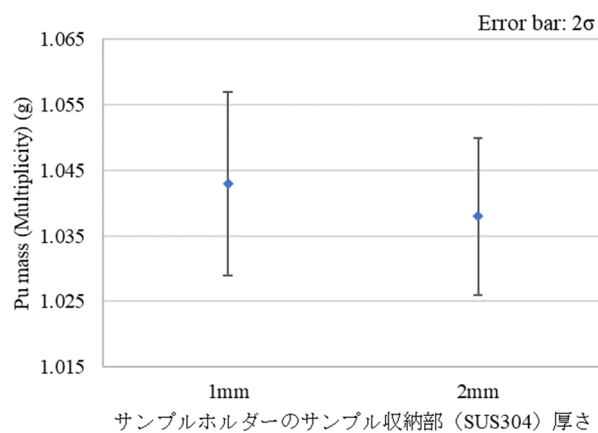


図 3.3.3-14 サンプル C の Pu 量 (Multiplicity) の比較

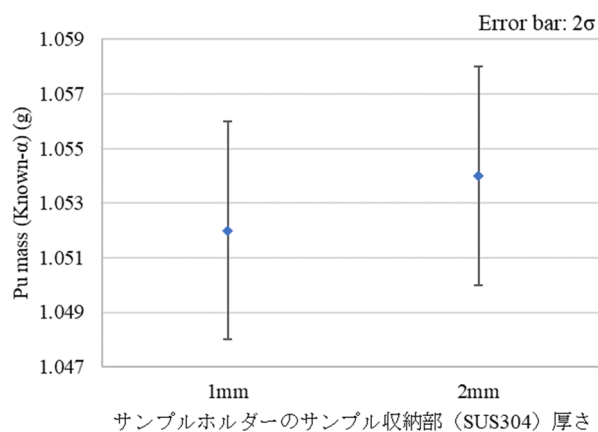


図 3.3.3-15 サンプル C の Pu 量 (Known-α) の比較

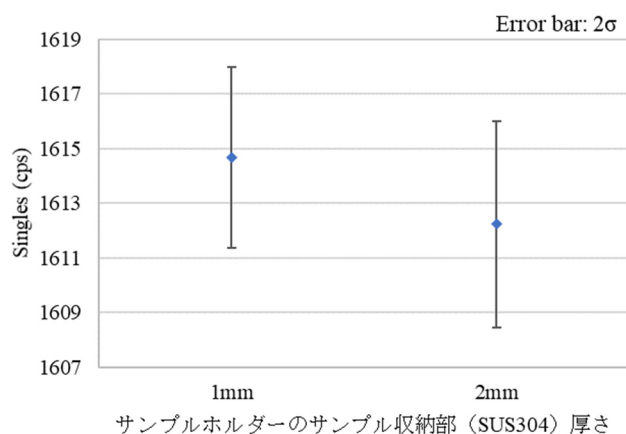


図 3.3.3-16 サンプル D のシングル値の比較

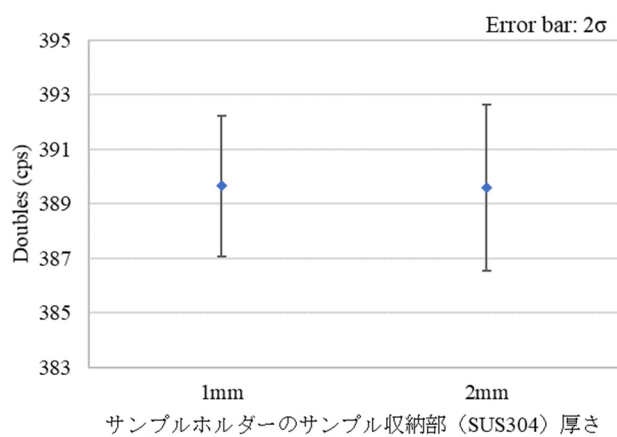


図 3.3.3-17 サンプル D のダブル値の比較

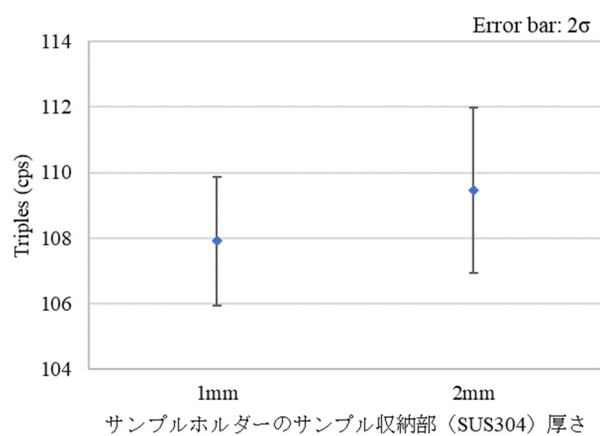


図 3.3.3-18 サンプル D のトリプル値の比較

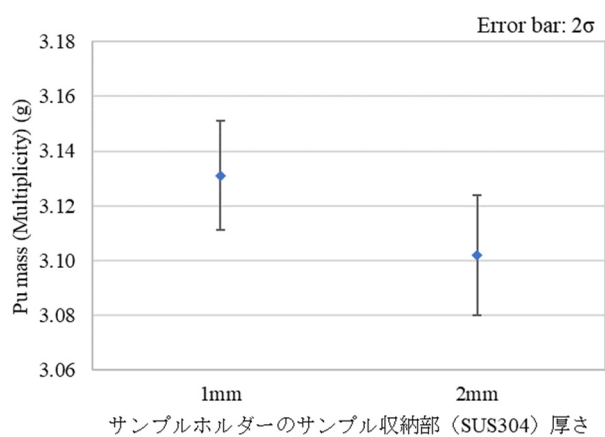


図 3.3.3-19 サンプル D の Pu 量 (Multiplicity) の比較

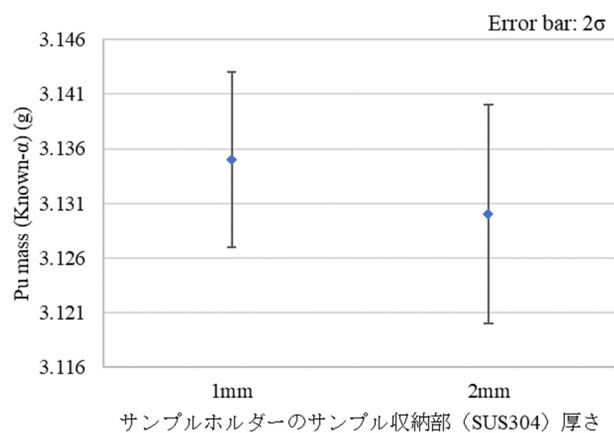


図 3.3.3-20 サンプル D の Pu 量 (Known-α) の比較

(2) ガンマ線検出器による測定

サンプル収納部の寸法変更前後（変更前：1mm、変更後：2mm）の各サンプルホルダーを用いて MOX サンプル測定を行い、得られた $^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比、 $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比及び ^{240}Pu 実効質量(%)の比較結果を図 3.3.3-21～3.3.3-32 に示す。

各サンプルホルダーを用いて測定された $^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比、 $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比及び ^{240}Pu 実効質量(%)は、いずれのサンプルにおいても誤差（ 2σ ）の範囲で一致した。

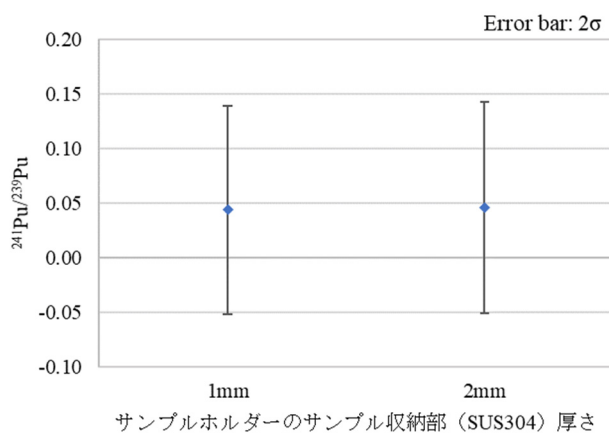


図 3.3.3-21 サンプル A の $^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比の比較

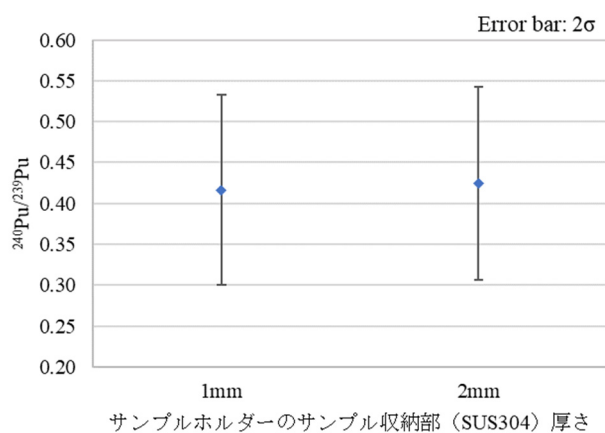


図 3.3.3-22 サンプル A の $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比の比較

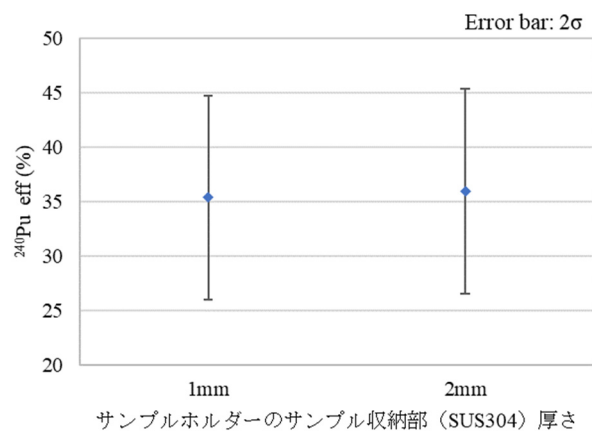


図 3.3.3-23 サンプル A の ^{240}Pu 実効質量(%)の比較

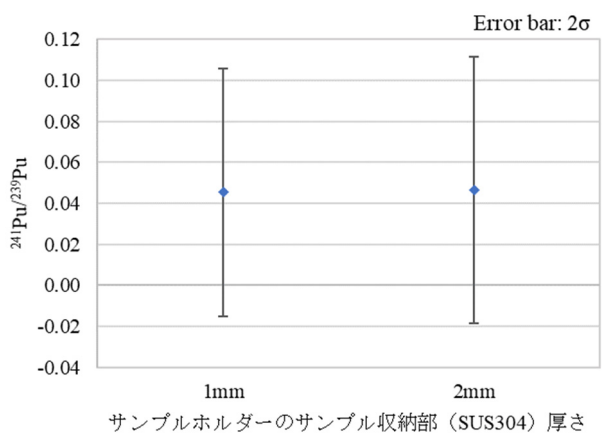


図 3.3.3-24 サンプル B の $^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比の比較

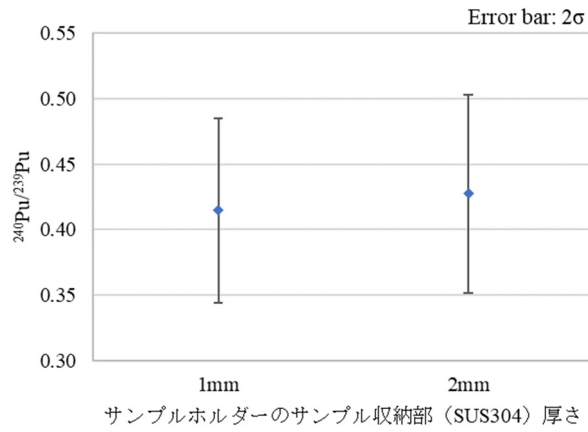


図 3.3.3-25 サンプル B の $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比の比較

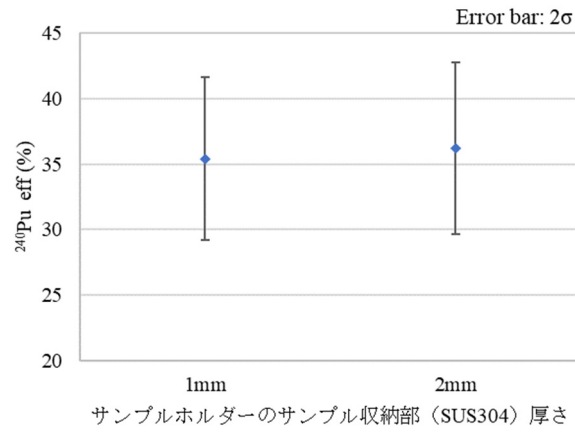


図 3.3.3-26 サンプル B の ^{240}Pu 実効質量(%)の比較

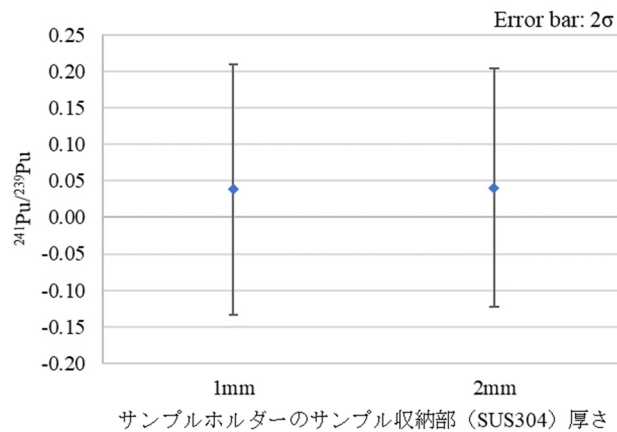


図 3.3.3-27 サンプル C の $^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比の比較

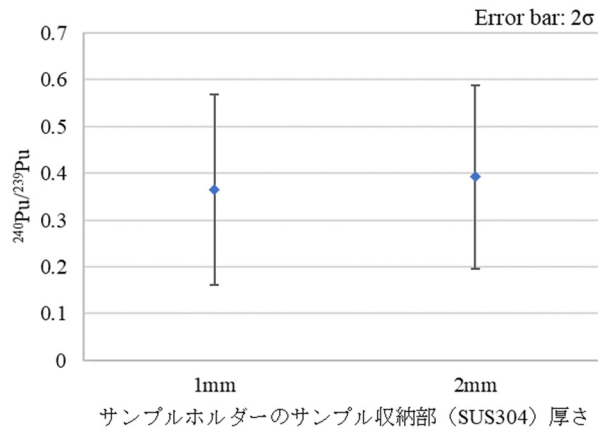


図 3.3.3-28 サンプル C の $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比の比較

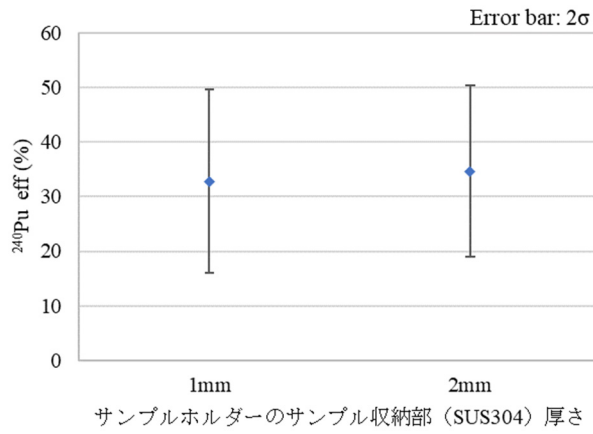


図 3.3.3-29 サンプル C の ^{240}Pu 実効質量(%)の比較

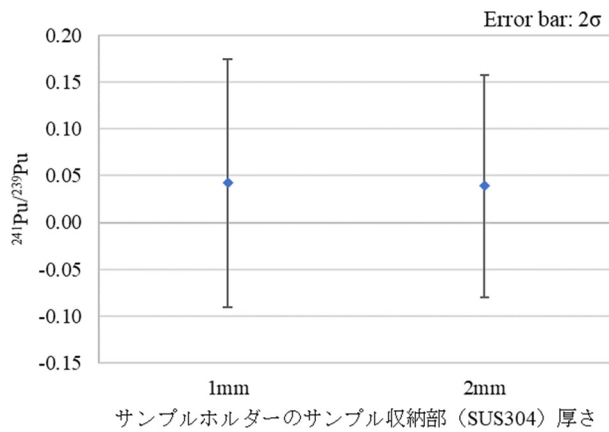


図 3.3.3-30 サンプル D の $^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比の比較

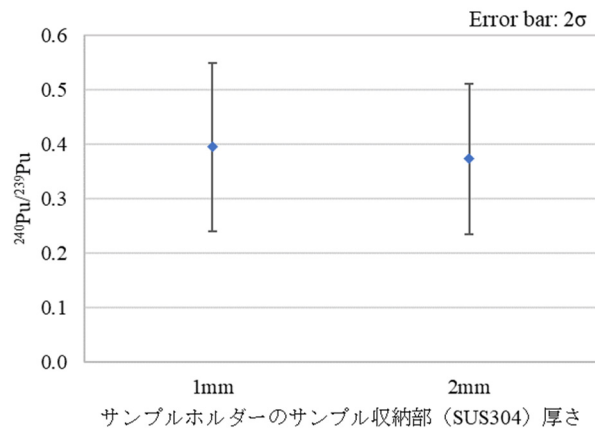


図 3.3.3-31 サンプル D の $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比の比較

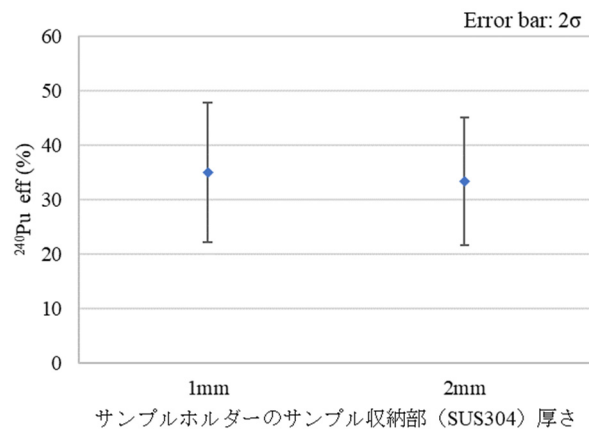


図 3.3.3-32 サンプル D の ^{240}Pu 実効質量(%)の比較

3.3.4 考察

(1) 中性子検出器による測定

いずれのサンプルにおいても、各サンプルホルダーを用いて測定された各計数値及び Pu 量は誤差 (2σ) の範囲で一致し、有意な差はみられなかった。したがって、サンプルホルダーの設計変更が、AVIS の中性子検出器による測定に与える影響は無視できるほど小さいと考えられる。

(2) ガンマ線検出器による測定

いずれのサンプルにおいても、各サンプルホルダーを用いて測定された $^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比、 $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比及び ^{240}Pu 実効質量(%)は誤差 (2σ) の範囲で一致し、有意な差はみられなかった。したがって、サンプルホルダーの設計変更が、AVIS のガンマ線検出器による測定に与える影響は無視できるほど小さいと考えられる。

4. IPCA の性能確認試験

4.1. 長期管理限界の妥当性確認

4.1.1 目的

IPCA を構成する中性子検出器、HPGe（高純度ゲルマニウム）ガンマ線検出器及びロードセル（荷重変換器）から得られる計測値の長期管理限界の妥当性確認（長期管理限界内に収まっているか否かの確認）を定期的に行う。

4.1.2 方法

中性子検出器については、連続的なバックグラウンド測定を実施し、検出器の長期安定性を評価すると共に、本測定期間における測定環境の温度及び湿度を測定し、測定値との相関の有無を確認する。また、定期的な Pu 線源、Am-Li 線源、Cm244 線源の測定を実施し、得られた計数値及びこれらから評価された検出器の中性子検出効率が長期管理限界内に収まっていることを確認する。

HPGe ガンマ線検出器については、定期的な Pu 線源測定を実施し、得られた Pu 同位体組成比が長期管理限界内に収まっていることを確認する。

ロードセルについては、定期的な分銅測定を実施し、得られた重量が長期管理限界内に収まっていることを確認する。

詳細な試験手順を以下に示す。

(1) 中性子検出器におけるバックグラウンド測定

- ① 連続的なバックグラウンド測定及び測定環境の温湿度測定を実施する。
- ② 上記測定により取得した計数値のばらつきを求め、検出器の長期安定性を評価する。また、温湿度と計数値の相関の有無を評価する。
- ③ ①～②を月 1 回の頻度で実施する。

(2) 中性子検出器における Pu 線源及び Am-Li 線源、Cm-244 線源測定

- ① 線源（Pu 線源、または Am-Li 線源、または Cm-244 線源）を検出器にセットする。
- ② 線源測定を実施する。
- ③ Pu 線源測定により取得したシングル値から求めた中性子検出効率及び Am-Li 線源及び Cm-244 線源測定により取得したシングル値が長期管理限界内に収まっていることを確認する。
- ④ ①～③を月 1 回の頻度で実施する。

(3) HPGe ガンマ線検出器における Pu 線源測定

- ① Pu 線源を検出器にセットする。
- ② Pu 線源測定を実施する。
- ③ Pu 線源測定により取得したガンマ線スペクトルから Pu 同位体組成比を求める。
- ④ $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比及び $^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比が長期管理限界内に収まっていることを確認する。
- ⑤ ①～④を月 1 回の頻度で実施する。

(4) ロードセルにおける分銅測定

- ① 分銅をロードセルにセットする。
- ② 分銅測定を実施する。本測定は月 1 回の頻度で実施する。
- ③ ①～②を月 1 回の頻度で実施する。

4.1.3 結果

2019 年 4 月から 2020 年 3 月の期間において、LANL が実施した IPCA の長期管理限界の妥当性確認結果を添付資料に示す。いずれの項目においても測定結果は管理値以内であった。

4.1.4 考察

各測定結果は、いずれも管理値以内であったことから、本期間において IPCA の性能は正常に維持されていたと考えられる。

5. 結論

AFAS の性能確認試験では、「長期管理限界の妥当性確認」、「パルス間隔分布の評価」、「AFAS の機器の健全性確認（ノーマリゼーション）方法の検討」及び「AFAS の機器の異常検知方法の検討」を実施した。

「長期管理限界の妥当性確認」では、AFAS の長期安定性及び ^{252}Cf 中性子線源測定により得られた計数値が長期管理限界内に収まることを確認するため、2019 年 4 月から 2020 年 3 月までの期間において連続的なバックグラウンド測定及び定期的な ^{252}Cf 中性子線源測定を実施した。その結果、各検出器において得られたほぼ全てのバックグラウンドの測定値は誤差 (3σ) の範囲内に収まり、 ^{252}Cf 中性子線源測定の計数値は長期管理限界の範囲内に収まったことから、本測定期間中、AFAS は正常な状態を維持し、長期間安定して動作していたことを確認した。

「パルス間隔分布の評価」では、装置不具合原因を特定する際の判断材料となるアンプ毎のパルス間隔分布を取得するため、リストモジュールを用いて ^{252}Cf 中性子線源測定を実施した。その結果、得られたパルス間隔分布は、平成 30 年度に得られたパルス間隔分布とほぼ同一の形状となったことから、本試験において得られたパルス間隔分布は正常であり、各アンプ、また、それぞれに接続されている ^3He 比例計数管及びケーブルは健全に保たれていることを確認した。

「AFAS の機器の健全性確認（ノーマリゼーション）方法の検討」では、J-MOX の AFAS 設置環境における Collar 検出器の健全性確認方法を検討するため、 ^{252}Cf 中性子線源を Collar 検出器の側面 2 箇所配置した場合の ^3He 比例計数管故障検知の可否の評価を実施した。その結果、AFAS-B では約 0.07MBq 以上、AFAS-P では約 0.16MBq 以上の強度の線源を用いた場合、ダブル値による評価が可能であることを確認した。また、本位置に線源を配置し定期的な測定を月 1 回の頻度で実施した結果、各月において測定されたダブル値とその期待値との差は管理限界値の範囲内に収まったことから、本測定方法は Collar 検出器の健全性確認方法として適用可能であることを確認した。

「AFAS の機器の異常検知方法の検討」では、AFAS の測定において燃料集合体の有効長を求めるために取得される Fork 検出器と Collar 検出器のシングル値の比 ($S_{\text{Top Fork}} + S_{\text{Bottom Fork}} / S_{\text{Collar}}$) が、システムの異常を検知するために利用可能であるかを確認するため、燃料集合体の代替として ^{252}Cf 中性子線源の定期的な測定を月 1 回の頻度で実施した。その結果、各月において AFAS-B と AFAS-P において測定されたシングル値の比は、線源の減衰による計数値の減少 (10 カ月間で約 16%減少) に依存せず誤差 (2σ) の範囲で一致したこと、また意図的に一つの検出器の計数率を変動させた場合、本誤差の範囲を超え有意差が生じることを確認したことから、将来 J-MOX において燃料集合体測定時に AFAS-B 及び AFAS-P において取得されるシングル値の比を継続して収集し監視することは、システムの異常を検知するために有用な方法であることを確認した。

AVIS の性能確認試験では、「パルス間隔分布の評価」、「ガンマ線検出器内液体窒素の量の増減による中性子検出器への影響評価」及び「サンプルホルダーの設計変更に伴う中性子・ガンマ線検出器への影響評価」を実施した。

「パルス間隔分布の評価」では、AFAS における試験と同様に、リストモジュールを用いて ^{252}Cf 中性子線源測定を実施した。その結果、得られたパルス間隔分布は、平成 30 年度に得られたパルス間隔分布とほぼ同一の形状となったことから、本試験において得られたパルス間隔分布は正常であり、各アンプ、また、それぞれに接続されている ^3He 比例計数管及びケーブルは健全に保たれていることを確認した。

「ガンマ線検出器内液体窒素の量の増減による中性子検出器への影響評価」では、中性子検出器の側面に配置されているガンマ線検出器のデュワ瓶に充填されている液体窒素量の増減が、中性子検出器による測定に与える影響を評価するため、液体窒素量を変動させ、MOX サンプル測定を実施した。その結果、得られた各計数値及び解析された各 Pu 量は、いずれのサンプルにおいても誤差 (2σ) の範囲で一致したことから、デュワ瓶内の液体窒素が中性子検出器による測定に与える影響は無視できるほど小さいことを確認した。

「サンプルホルダーの設計変更に伴う中性子・ガンマ線検出器への影響評価」では、中性子検出器のサンプルホルダーの設計変更が AVIS の中性子検出器及びガンマ線検出器による測定に与える影響を評価するため、設計変更前後の各サンプルホルダーを用いて MOX サンプル測定を実施した。その結果、中性子検出器及びガンマ線検出器において、各サンプルホルダーを用いて測定された各計数値、各 Pu 量、 $^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比、 $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比及び ^{240}Pu 実効質量 (%) は、いずれのサンプルにおいても誤差 (2σ) の範囲で一致したことから、サンプルホルダーの設計変更が、中性子検出器及びガンマ線検出器による測定に与える影響は無視できるほど小さいことを確認した。

IPCA の性能確認試験「長期管理限界の妥当性確認」では、IPCA の長期安定性及び IPCA の各検出器及びロードセルにおいて得られた計測値が長期管理限界内に収まることを確認するため、2019 年 4 月から 2020 年 3 月までの期間において、中性子検出器については、連続的なバックグラウンド測定及び定期的な中性子線源測定を、ガンマ線検出器については、定期的な Pu 線源測定を、ロードセルについては、定期的な分銅測定を実施した。その結果、各検出器及びロードセルにおいて取得された計数値及び重量測定値は長期管理限界の範囲内に収まったことから、本測定期間中、IPCA は正常な状態を維持し、長期間安定して動作したことを確認した。

以上

【参考文献】

参考文献 1 : M. T. Swinhoe, J. B. Marlow, and H.O. Menlove, “Technical Specification for the Improved Plutonium Canister Assay System (IPCA 2)” (2009)

参考文献 2 : 大型 MOX 燃料加工施設保障措置システムの性能確認試験 (平成 30 年度)

参考文献 3 : 大型 MOX 燃料加工施設保障措置システムの性能確認試験 (平成 29 年度)