

大型混合酸化物燃料加工施設保障措置機器
性能確認試験報告書
(令和3年度)

2022年3月

日本原子力研究開発機構
核燃料サイクル工学研究所
プルトニウム燃料技術開発センター

本資料は、日本原子力研究開発機構が実施した受託業務の成果を取りまとめたものです。したがって、その利用は限られた範囲としており、その取扱には十分な注意を払ってください。この資料の全部又は一部を複写・複製・転載あるいは引用する場合、特別な許可を必要としますので、下記にお問い合わせください。

〒319-1194

茨城県那珂郡東海村村松 4 番地 33

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

核燃料サイクル工学研究所

プルトニウム燃料技術開発センター

技術部 技術課

大型混合酸化物燃料加工施設保障措置機器性能確認試験報告書
(令和3年度)

要旨

本報告は、原子力規制庁殿と国立研究開発法人日本原子力研究開発機構との間で令和3年4月に締結した受託業務契約「令和3年度軽水炉等改良技術確証試験等委託費（大型混合酸化物燃料加工施設保障措置機器性能確認試験）事業」に基づき実施した保障措置機器に対する性能確認試験の結果をとりまとめたものである。

本業務において性能確認試験の対象とした保障措置機器は、燃料集合体測定機器（AFAS）、バルク工程内 MOX 粉末・ペレット測定機器（AVIS）及び MOX 原料粉末貯蔵容器測定機器（IPCA）である。

AFAS の性能確認試験のうち、「長期管理限界の妥当性確認」では、令和3年4月から令和4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、AFAS が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、リストモジュールを用いて ^{252}Cf 中性子線源を測定し、得られたパルス間隔分布が正常であり、各アンプ、また、それぞれが接続されている ^3He 比例計数管及びケーブルが健全に保たれていることを確認した。

「AFAS の機器の異常検知方法の検討」では、モンテカルロシミュレーション（MCNPX）による評価を実施し、AFAS のシングル値の比を継続的に監視することで、一方の AFAS で燃料集合体を測定中に、他方の AFAS の検出器の異常を検知することが可能であることを確認した。

「AFAS の故障時の測定パラメータの再評価方法の検討及び故障時の測定性能の評価」では、AFAS 故障時を想定した燃料集合体を用いた測定パラメータの再評価及びそのパラメータを適用した場合の AFAS の測定性能を評価し、本方法により、AFAS が故障した場合にシステムを停止することなく、燃料集合体測定を継続することが可能であることを確認した。

AVIS の性能確認試験のうち、「パルス間隔分布の評価」では、AFAS と同様に、得られたパルス間隔分布が正常であり、各アンプ、また、それぞれが接続されている ^3He 比例計数管及びケーブルが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、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を変動させながら、連続的な ^{252}Cf 中性子線源測定を行うことにより、計数誤差及び配置誤差を低減させた状態の AVIS 測定において液体窒素量の変動が中性子検出器による測定に与える影響は小さいことを確認した。

IPCA の性能確認試験として実施した、「長期管理限界の妥当性確認」では、令和 3 年 4 月から令和 4 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 Pu 線源、中性子線源、分銅測定を実施し、各検出器及びロードセルが正常に長期間安定して動作することを確認した。

目次

1. 試験概要	1
1.1 試験対象機器	1
1.2 試験項目	3
1.3 試験スケジュール	4
1.4 試験実施場所	4
1.5 測定パラメータ	5
1.6 試験に使用した ^{252}Cf 中性子線源	7
1.7 試験に使用した燃料集合体	7
2. AFAS の性能確認試験	9
2.1 長期管理限界の妥当性確認	9
2.1.1 目的	9
2.1.2 方法	9
2.1.3 結果	12
2.1.4 考察	55
2.2 パルス間隔分布の評価	56
2.2.1 目的	56
2.2.2 方法	56
2.2.3 結果	59
2.2.4 考察	79
2.3 AFAS の機器の異常検知方法の検討	80
2.3.1 目的	80
2.3.2 方法	81
2.3.3 結果	85
2.3.4 考察	94
2.4 AFAS の故障時の測定パラメータの再評価方法の検討及び故障時の測定性能の評価	101
2.4.1 目的	101
2.4.2 方法	101
2.4.3 結果	104
2.4.4 考察	106
3. AVIS の性能確認試験	107
3.1 パルス間隔分布の評価	107
3.1.1 目的	107
3.1.2 方法	107
3.1.3 結果	109
3.1.4 考察	123

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	124
3.2.1 目的	124
3.2.2 方法	125
3.2.3 結果	126
3.2.4 考察	127
4. IPCA の性能確認試験	130
4.1 長期管理限界の妥当性確認	130
4.1.1 目的	130
4.1.2 方法	130
4.1.3 結果	131
4.1.4 考察	131
5. 結論	132

図目次

図 1.7-1	封入棒集合体の側面図及び断面図.....	7
図 2.1.2-1	AFAS 機器接続図.....	10
図 2.1.3-1	バックグラウンドのシングル値 (2021/5/26～2021/6/15) (AFAS-B Collar 検出器).....	14
図 2.1.3-2	バックグラウンドのシングル値 (2021/7/15～2021/9/13) (AFAS-B Collar 検出器).....	14
図 2.1.3-3	バックグラウンドのシングル値 (2021/9/17～2021/12/02) (AFAS-B Collar 検出器).....	14
図 2.1.3-4	バックグラウンドのシングル値 (2021/12/3～2021/12/23) (AFAS-B Collar 検出器).....	15
図 2.1.3-5	バックグラウンドのシングル値 (2022/1/6～2022/1/25) (AFAS-B Collar 検出器).....	15
図 2.1.3-6	バックグラウンドのダブル値 (2021/5/26～2021/6/15) (AFAS-B Collar 検出器).....	15
図 2.1.3-7	バックグラウンドのダブル値 (2021/7/15～2021/9/13) (AFAS-B Collar 検出器).....	16
図 2.1.3-8	バックグラウンドのダブル値 (2021/9/17～2021/12/02) (AFAS-B Collar 検出器).....	16
図 2.1.3-9	バックグラウンドのダブル値 (2021/12/3～2021/12/23) (AFAS-B Collar 検出器).....	16
図 2.1.3-10	バックグラウンドのダブル値 (2022/1/6～2022/1/25) (AFAS-B Collar 検出器).....	17
図 2.1.3-11	シングル値と温度の相関 (2021/5/26～2021/6/15) (AFAS-B Collar 検出器).....	17
図 2.1.3-12	シングル値と温度の相関 (2021/7/15～2021/9/13) (AFAS-B Collar 検出器).....	17
図 2.1.3-13	シングル値と温度の相関 (2021/9/17～2021/12/2) (AFAS-B Collar 検出器).....	18
図 2.1.3-14	シングル値と温度の相関 (2021/12/3～2021/12/23) (AFAS-B Collar 検出器).....	18
図 2.1.3-15	シングル値と温度の相関 (2022/1/6～2022/1/25) (AFAS-B Collar 検出器).....	18
図 2.1.3-16	ダブル値と温度の相関 (2021/5/26～2021/6/15) (AFAS-B Collar 検出器).....	19
図 2.1.3-17	ダブル値と温度の相関 (2021/7/15～2021/9/13) (AFAS-B Collar 検出器).....	19
図 2.1.3-18	ダブル値と温度の相関 (2021/9/17～2021/12/2) (AFAS-B Collar 検出器).....	19
図 2.1.3-19	ダブル値と温度の相関 (2021/12/3～2021/12/23) (AFAS-B Collar 検出器).....	20
図 2.1.3-20	ダブル値と温度の相関 (2022/1/6～2022/1/25) (AFAS-B Collar 検出器).....	20
図 2.1.3-21	シングル値と湿度の相関 (2021/5/26～2021/6/15) (AFAS-B Collar 検出器).....	20
図 2.1.3-22	シングル値と湿度の相関 (2021/7/15～2021/9/13) (AFAS-B Collar 検出器).....	21
図 2.1.3-23	シングル値と湿度の相関 (2021/9/17～2021/12/2) (AFAS-B Collar 検出器).....	21
図 2.1.3-24	シングル値と湿度の相関 (2021/12/3～2021/12/23) (AFAS-B Collar 検出器).....	21
図 2.1.3-25	シングル値と湿度の相関 (2022/1/6～2022/1/25) (AFAS-B Collar 検出器).....	22
図 2.1.3-26	ダブル値と湿度の相関 (2021/5/26～2021/6/15) (AFAS-B Collar 検出器).....	22
図 2.1.3-27	ダブル値と湿度の相関 (2021/7/15～2021/9/13) (AFAS-B Collar 検出器).....	22
図 2.1.3-28	ダブル値と湿度の相関 (2021/9/17～2021/12/2) (AFAS-B Collar 検出器).....	23
図 2.1.3-29	ダブル値と湿度の相関 (2021/12/3～2021/12/23) (AFAS-B Collar 検出器).....	23
図 2.1.3-30	ダブル値と湿度の相関 (2022/1/6～2022/1/25) (AFAS-B Collar 検出器).....	23
図 2.1.3-31	バックグラウンドのシングル値 (2021/5/26～2021/6/15) (AFAS-P Collar 検出器).....	24
図 2.1.3-32	バックグラウンドのシングル値 (2021/7/15～2021/9/13) (AFAS-P Collar 検出器).....	24
図 2.1.3-33	バックグラウンドのシングル値 (2021/9/17～2021/12/02) (AFAS-P Collar 検出器).....	25

図 2.1.3-34	バックグラウンドのシングル値 (2021/12/3 ~ 2021/12/23) (AFAS-P Collar 検出器)	25
図 2.1.3-35	バックグラウンドのシングル値 (2022/1/6 ~ 2022/1/25) (AFAS-P Collar 検出器).....	25
図 2.1.3-36	バックグラウンドのダブル値 (2021/5/26 ~ 2021/6/15) (AFAS-P Collar 検出器).....	26
図 2.1.3-37	バックグラウンドのダブル値 (2021/7/15 ~ 2021/9/13) (AFAS-P Collar 検出器).....	26
図 2.1.3-38	バックグラウンドのダブル値 (2021/9/17 ~ 2021/12/02) (AFAS-P Collar 検出器).....	26
図 2.1.3-39	バックグラウンドのダブル値 (2021/12/3 ~ 2021/12/23) (AFAS-P Collar 検出器).....	27
図 2.1.3-40	バックグラウンドのダブル値 (2022/1/6 ~ 2022/1/25) (AFAS-P Collar 検出器).....	27
図 2.1.3-41	シングル値と温度の相関 (2021/5/26 ~ 2021/6/15) (AFAS-P Collar 検出器).....	27
図 2.1.3-42	シングル値と温度の相関 (2021/7/15 ~ 2021/9/13) (AFAS-P Collar 検出器).....	28
図 2.1.3-43	シングル値と温度の相関 (2021/9/17 ~ 2021/12/2) (AFAS-P Collar 検出器).....	28
図 2.1.3-44	シングル値と温度の相関 (2021/12/3 ~ 2021/12/23) (AFAS-P Collar 検出器).....	28
図 2.1.3-45	シングル値と温度の相関 (2022/1/6 ~ 2022/1/25) (AFAS-P Collar 検出器).....	29
図 2.1.3-46	ダブル値と温度の相関 (2021/5/26 ~ 2021/6/15) (AFAS-P Collar 検出器)	29
図 2.1.3-47	ダブル値と温度の相関 (2021/7/15 ~ 2021/9/13) (AFAS-P Collar 検出器)	29
図 2.1.3-48	ダブル値と温度の相関 (2021/9/17 ~ 2021/12/2) (AFAS-P Collar 検出器)	30
図 2.1.3-49	ダブル値と温度の相関 (2021/12/3 ~ 2021/12/23) (AFAS-P Collar 検出器).....	30
図 2.1.3-50	ダブル値と温度の相関 (2022/1/6 ~ 2022/1/25) (AFAS-P Collar 検出器)	30
図 2.1.3-51	シングル値と湿度の相関 (2021/5/26 ~ 2021/6/15) (AFAS-P Collar 検出器).....	31
図 2.1.3-52	シングル値と湿度の相関 (2021/7/15 ~ 2021/9/13) (AFAS-P Collar 検出器).....	31
図 2.1.3-53	シングル値と湿度の相関 (2021/9/17 ~ 2021/12/2) (AFAS-P Collar 検出器).....	31
図 2.1.3-54	シングル値と湿度の相関 (2021/12/3 ~ 2021/12/23) (AFAS-P Collar 検出器).....	32
図 2.1.3-55	シングル値と湿度の相関 (2022/1/6 ~ 2022/1/25) (AFAS-P Collar 検出器).....	32
図 2.1.3-56	ダブル値と湿度の相関 (2021/5/26 ~ 2021/6/15) (AFAS-P Collar 検出器)	32
図 2.1.3-57	ダブル値と湿度の相関 (2021/7/15 ~ 2021/9/13) (AFAS-P Collar 検出器)	33
図 2.1.3-58	ダブル値と湿度の相関 (2021/9/17 ~ 2021/12/2) (AFAS-P Collar 検出器)	33
図 2.1.3-59	ダブル値と湿度の相関 (2021/12/3 ~ 2021/12/23) (AFAS-P Collar 検出器).....	33
図 2.1.3-60	ダブル値と湿度の相関 (2022/1/6 ~ 2022/1/25) (AFAS-P Collar 検出器)	34
図 2.1.3-61	バックグラウンドのシングル値 (2021/5/26 ~ 2021/6/15) (AFAS-B Top Fork 検出器).....	34
図 2.1.3-62	バックグラウンドのシングル値 (2021/7/15 ~ 2022/1/25) (AFAS-B Top Fork 検出器).....	35
図 2.1.3-63	シングル値と温度の相関 (2021/5/26 ~ 2021/6/15) (AFAS-B Top Fork 検出器).....	35
図 2.1.3-64	シングル値と温度の相関 (2021/7/15 ~ 2022/1/25) (AFAS-B Top Fork 検出器).....	35
図 2.1.3-65	シングル値と湿度の相関 (2021/5/26 ~ 2021/6/15) (AFAS-B Top Fork 検出器).....	36
図 2.1.3-66	シングル値と湿度の相関 (2021/7/15 ~ 2022/1/25) (AFAS-B Top Fork 検出器).....	36
図 2.1.3-67	バックグラウンドのシングル値 (2021/5/26 ~ 2021/6/15) (AFAS-P Top Fork 検出器)	37
図 2.1.3-68	バックグラウンドのシングル値 (2021/7/15 ~ 2022/1/25) (AFAS-P Top Fork 検出器)	37
図 2.1.3-69	シングル値と温度の相関 (2021/5/26 ~ 2021/6/15) (AFAS-P Top Fork 検出器).....	37
図 2.1.3-70	シングル値と温度の相関 (2021/7/15 ~ 2022/1/25) (AFAS-P Top Fork 検出器).....	38

図 2.1.3-71	シングル値と湿度の相関 (2021/5/26～2021/6/15) (AFAS-P Top Fork 検出器).....	38
図 2.1.3-72	シングル値と湿度の相関 (2021/7/15～2022/1/25) (AFAS-P Top Fork 検出器).....	38
図 2.1.3-73	バックグラウンドのシングル値 (2021/5/26～2021/6/15) (AFAS-B Bottom Fork 検出器).....	39
図 2.1.3-74	バックグラウンドのシングル値 (2021/7/15～2022/1/25) (AFAS-B Bottom Fork 検出器).....	39
図 2.1.3-75	シングル値と温度の相関 (2021/5/26～2021/6/15) (AFAS-B Bottom Fork 検出器).....	40
図 2.1.3-76	シングル値と温度の相関 (2021/7/15～2022/1/25) (AFAS-B Bottom Fork 検出器).....	40
図 2.1.3-77	シングル値と湿度の相関 (2021/5/26～2021/6/15) (AFAS-B Bottom Fork 検出器).....	40
図 2.1.3-78	シングル値と湿度の相関 (2021/7/15～2022/1/25) (AFAS-B Bottom Fork 検出器).....	41
図 2.1.3-79	バックグラウンドのシングル値 (2021/5/26～2021/6/15) (AFAS-P Bottom Fork 検出器).....	41
図 2.1.3-80	バックグラウンドのシングル値 (2021/7/15～2022/1/25) (AFAS-P Bottom Fork 検出器).....	42
図 2.1.3-81	シングル値と温度の相関 (2021/5/26～2021/6/15) (AFAS-P Bottom Fork 検出器).....	42
図 2.1.3-82	シングル値と温度の相関 (2021/7/15～2022/1/25) (AFAS-P Bottom Fork 検出器).....	42
図 2.1.3-83	シングル値と湿度の相関 (2021/5/26～2021/6/15) (AFAS-P Bottom Fork 検出器).....	43
図 2.1.3-84	シングル値と湿度の相関 (2021/7/15～2022/1/25) (AFAS-P Bottom Fork 検出器).....	43
図 2.1.3-85	月ごとの%Difference の評価結果(2021年4月～7月) (AFAS-B Top Fork 検出器).....	45
図 2.1.3-86	月ごとの%Difference の評価結果(2021年7月～2022年3月) (AFAS-B Top Fork 検出器).....	45
図 2.1.3-87	月ごとの%Difference の評価結果(2021年4月～2022年3月) (AFAS-B Collar 検出器).....	45
図 2.1.3-88	月ごとの%Difference の評価結果(2021年4月～7月) (AFAS-B Bottom Fork 検出器).....	46
図 2.1.3-89	月ごとの%Difference の評価結果(2021年7月～2022年3月) (AFAS-B Bottom Fork 検出器).....	46
図 2.1.3-90	月ごとの%Difference の評価結果(2021年4月～7月) (AFAS-P Top Fork 検出器).....	46
図 2.1.3-91	月ごとの%Difference の評価結果(2021年7月～2022年3月) (AFAS-P Top Fork 検出器).....	47
図 2.1.3-92	月ごとの%Difference の評価結果(2021年4月～2022年3月) (AFAS-P Collar 検出器).....	47
図 2.1.3-93	月ごとの%Difference の評価結果(2021年4月～7月) (AFAS-P Bottom Fork 検出器).....	47
図 2.1.3-94	月ごとの%Difference の評価結果(2021年7月～2022年3月) (AFAS-P Bottom Fork 検出器).....	48
図 2.1.3-95	計数値と温度の相関 (2021年4月～7月) (AFAS-B Top Fork 検出器).....	48
図 2.1.3-96	計数値と温度の相関 (2021年7月～2022年3月) (AFAS-B Top Fork 検出器).....	48
図 2.1.3-97	計数値と温度の相関 (2021年4月～2022年3月) (AFAS-B Collar 検出器).....	49
図 2.1.3-98	計数値と温度の相関 (2021年4月～7月) (AFAS-B Bottom Fork 検出器).....	49
図 2.1.3-99	計数値と温度の相関 (2021年7月～2022年3月) (AFAS-B Bottom Fork 検出器).....	49
図 2.1.3-100	計数値と温度の相関 (2021年4月～7月) (AFAS-P Top Fork 検出器).....	50
図 2.1.3-101	計数値と温度の相関 (2021年7月～2022年3月) (AFAS-P Top Fork 検出器).....	50
図 2.1.3-102	計数値と温度の相関 (2021年4月～2022年3月) (AFAS-P Collar 検出器).....	50
図 2.1.3-103	計数値と温度の相関 (2021年4月～7月) (AFAS-P Bottom Fork 検出器).....	51
図 2.1.3-104	計数値と温度の相関 (2021年7月～2022年3月) (AFAS-P Bottom Fork 検出器).....	51
図 2.1.3-105	計数値と湿度の相関 (2021年4月～7月) (AFAS-B Top Fork 検出器).....	51
図 2.1.3-106	計数値と湿度の相関 (2021年7月～2022年3月) (AFAS-B Top Fork 検出器).....	52
図 2.1.3-107	計数値と湿度の相関 (2021年4月～2022年3月) (AFAS-B Collar 検出器).....	52

図 2.1.3-108	計数値と湿度の相関 (2021 年 4 月～7 月)(AFAS-B Bottom Fork 検出器).....	52
図 2.1.3-109	計数値と湿度の相関 (2021 年 7 月～2022 年 3 月)(AFAS-B Bottom Fork 検出器).....	53
図 2.1.3-110	計数値と湿度の相関 (2021 年 4 月～7 月)(AFAS-P Top Fork 検出器).....	53
図 2.1.3-111	計数値と湿度の相関 (2021 年 7 月～2022 年 3 月)(AFAS-P Top Fork 検出器).....	53
図 2.1.3-112	計数値と湿度の相関 (2021 年 4 月～2022 年 3 月)(AFAS-P Collar 検出器).....	54
図 2.1.3-113	計数値と湿度の相関 (2021 年 4 月～7 月)(AFAS-P Bottom Fork 検出器).....	54
図 2.1.3-114	計数値と湿度の相関 (2021 年 7 月～2022 年 3 月)(AFAS-P Bottom Fork 検出器).....	54
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.....	56
図 2.2.2-2	AFAS-B Collar 検出器のアンプ配置図.....	57
図 2.2.2-3	AFAS-B Top Fork 及び Bottom Fork 検出器のアンプ配置図.....	57
図 2.2.2-4	AFAS-P Collar 検出器のアンプ配置図.....	57
図 2.2.2-5	AFAS-P Top Fork 及び Bottom Fork 検出器のアンプ配置図.....	58
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).....	59
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).....	59
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).....	60
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).....	60
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).....	61
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).....	61
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).....	62
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).....	62
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).....	63
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).....	63
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).....	64
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).....	64
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).....	65
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).....	65
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).....	66
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).....	66
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).....	67
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).....	67
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).....	68
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).....	68
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).....	69
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).....	69
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).....	70
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).....	70
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).....	71

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).....	71
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).....	72
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).....	72
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).....	73
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).....	73
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).....	74
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).....	74
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).....	75
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).....	75
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).....	76
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).....	76
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).....	77
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).....	77
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).....	78
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).....	78
図 2.3.2-1	MCNPX でモデル化する J-MOX の AFAS 測定環境のイメージ(BWR 用燃料集合体測定時)		82
図 2.3.2-2	MCNPX でモデル化する J-MOX の AFAS 測定環境のイメージ(PWR 用燃料集合体測定時)		82
図 2.3.2-3	シングル値とその誤差の評価のための ²⁵² Cf 中性子線源配置位置		83
図 2.3.3-1	BWR 用燃料集合体 (有効長が標準) を測定した場合の シミュレーションモデル		85
図 2.3.3-2	PWR 用燃料集合体 (有効長が標準) を測定した場合の シミュレーションモデル		86
図 2.3.3-3	シングル値及びその誤差の相関評価 (AFAS-B Top Fork 検出器)		88
図 2.3.3-4	シングル値及びその誤差の相関評価 (AFAS-B Collar 検出器)		88
図 2.3.3-5	シングル値及びその誤差の相関評価 (AFAS-B Bottom Fork 検出器)		89
図 2.3.3-6	シングル値及びその誤差の相関評価 (AFAS-P Top Fork 検出器)		89
図 2.3.3-7	シングル値及びその誤差の相関評価 (AFAS-P Collar 検出器)		90
図 2.3.3-8	シングル値及びその誤差の相関評価 (AFAS-P Bottom Fork 検出器)		90
図 2.3.3-9	BWR 用燃料集合体の有効長ごとのシングル値の比の比較		92
図 2.3.3-10	PWR 用燃料集合体の有効長ごとのシングル値の比の比較		93
図 2.3.4-1	有効長が標準の場合を基準とした各シングル値の比の変化率の比較(AFAS-B)		94
図 2.3.4-2	有効長が標準の場合を基準とした各シングル値の比の変化率の比較(AFAS-P)		95
図 2.3.4-3	Top Fork 検出器を除いた場合の BWR 用燃料集合体の有効長ごとのシングル値の比の比較		96
図 2.3.4-4	Top Fork 検出器を除いた場合の PWR 用燃料集合体の有効長ごとのシングル値の比の比較		96
図 2.3.4-5	燃料集合体が AFAS-B に配置されている場合の AFAS-P のシングル値の比の比較		98
図 2.3.4-6	燃料集合体が AFAS-P に配置されている場合の AFAS-B のシングル値の比の比較		98
図 2.3.4-7	BWR 用燃料集合体(有効長が上限値)が配置されている場合のシングル値の比の比較		99
図 2.3.4-8	BWR 用燃料集合体(有効長が標準)が配置されている場合のシングル値の比の比較		99
図 2.3.4-9	BWR 用燃料集合体(有効長が下限値)が配置されている場合のシングル値の比の比較		99

図 2.3.4-10	PWR 用燃料集合体(有効長が上限値)が配置されている場合のシングル値の比の比較.....	100
図 2.3.4-11	PWR 用燃料集合体(有効長が標準)が配置されている場合のシングル値の比の比較.....	100
図 2.3.4-12	PWR 用燃料集合体(有効長が下限値)が配置されている場合のシングル値の比の比較.....	100
図 2.4.2-1	AFAS-P Collar 検出器のアンプ配置図及び対象のアンプ.....	102
図 2.4.3-1	²⁴⁰ Pu 実効質量 (g/cm) 及び誤差 (2σ) の比較.....	105
図 3.1.2-1	AVIS の中性子検出器 アンプ A のパルス間隔分布の例.....	107
図 3.1.2-2	AVIS のアンプ配置図.....	108
図 3.1.3-1	アンプ A のパルス間隔分布の比較 (0~1000μs).....	109
図 3.1.3-2	アンプ A のパルス間隔分布の比較 (0~100μs).....	109
図 3.1.3-3	アンプ B のパルス間隔分布の比較 (0~1000μs).....	110
図 3.1.3-4	アンプ B のパルス間隔分布の比較 (0~100μs).....	110
図 3.1.3-5	アンプ C のパルス間隔分布の比較 (0~1000μs).....	111
図 3.1.3-6	アンプ C のパルス間隔分布の比較 (0~100μs).....	111
図 3.1.3-7	アンプ D のパルス間隔分布の比較 (0~1000μs).....	112
図 3.1.3-8	アンプ D のパルス間隔分布の比較 (0~100μs).....	112
図 3.1.3-9	アンプ E のパルス間隔分布の比較 (0~1000μs).....	113
図 3.1.3-10	アンプ E のパルス間隔分布の比較 (0~100μs).....	113
図 3.1.3-11	アンプ F のパルス間隔分布の比較 (0~1000μs).....	114
図 3.1.3-12	アンプ F のパルス間隔分布の比較 (0~100μs).....	114
図 3.1.3-13	アンプ G のパルス間隔分布の比較 (0~1000μs).....	115
図 3.1.3-14	アンプ G のパルス間隔分布の比較 (0~100μs).....	115
図 3.1.3-15	アンプ H のパルス間隔分布の比較 (0~1000μs).....	116
図 3.1.3-16	アンプ H のパルス間隔分布の比較 (0~100μs).....	116
図 3.1.3-17	アンプ I のパルス間隔分布の比較 (0~1000μs).....	117
図 3.1.3-18	アンプ I のパルス間隔分布の比較 (0~100μs).....	117
図 3.1.3-19	アンプ J のパルス間隔分布の比較 (0~1000μs).....	118
図 3.1.3-20	アンプ J のパルス間隔分布の比較 (0~100μs).....	118
図 3.1.3-21	アンプ K のパルス間隔分布の比較 (0~1000μs).....	119
図 3.1.3-22	アンプ K のパルス間隔分布の比較 (0~100μs).....	119
図 3.1.3-23	アンプ L のパルス間隔分布の比較 (0~1000μs).....	120
図 3.1.3-24	アンプ L のパルス間隔分布の比較 (0~100μs).....	120
図 3.1.3-25	アンプ M のパルス間隔分布の比較 (0~1000μs).....	121
図 3.1.3-26	アンプ M のパルス間隔分布の比較 (0~100μs).....	121
図 3.1.3-27	アンプ N のパルス間隔分布の比較(0~1000μs).....	122
図 3.1.3-28	アンプ N のパルス間隔分布の比較(0~100μs).....	122
図 3.2.1-1	Multiplicity 法により解析した Pu 量の比較 (平成 31 年度の性能確認試験結果)	124
図 3.2.2-1	ガンマ線検出器の配置 (概要図)	125

図 3.2.3-1	シングル値と期待値の%Difference と液体窒素量の相関.....	126
図 3.2.3-2	ダブル値と期待値の%Difference と液体窒素量の相関.....	126
図 3.2.4-1	シングル値と期待値の%Difference と液体窒素量の相関.....	127
図 3.2.4-2	ダブル値と期待値の%Difference と液体窒素量の相関.....	128
図 3.2.4-3	検出器周辺の温湿度の変動と液体窒素量の比較.....	128
図 3.2.4-4	シングル値と期待値の%Difference と温度の相関.....	128
図 3.2.4-5	シングル値と期待値の%Difference と湿度の相関.....	129
図 3.2.4-6	ダブル値と期待値の%Difference と温度の相関.....	129
図 3.2.4-7	ダブル値と期待値の%Difference と湿度の相関.....	129

表目次

表 1.2-1 AFAS 性能確認試験項目	3
表 1.2-2 AVIS 性能確認試験項目	3
表 1.2-3 IPCA 性能確認試験項目	3
表 1.3-1 性能確認試験スケジュール	4
表 1.5-1 AFAS-B 用中性子検出器の測定パラメータ	5
表 1.5-2 AFAS-P 用中性子検出器の測定パラメータ	5
表 1.5-3 中性子検出器パラメータ	6
表 1.6-1 試験に使用した ^{252}Cf 中性子線源	7
表 1.7-1 燃料集合体の仕様	8
表 1.7-2 燃料集合体の同位体組成比 (集合体平均)	8
表 2.1.3-1 Collar 検出器の各期間におけるバックグラウンドのシングル値の平均値	13
表 2.1.3-2 Fork 検出器の各期間におけるバックグラウンドのシングル値の平均値	13
表 2.2.2-1 各検出器におけるアンプ数	56
表 2.3.3-1 シミュレーションにより求めた有効長の異なる燃料集合体測定時の各検出器のシングル値の 検出効率	87
表 2.3.3-2 BWR 用燃料集合体の有効長ごとの中性子放出率、シングル値及び その誤差 (σ)	91
表 2.3.3-3 PWR 用燃料集合体の有効長ごとの中性子放出率、シングル値及び その誤差 (σ)	93
表 2.4.3-1 検出器が正常な状態における燃料集合体測定結果	104
表 2.4.3-2 検出器のアンプ 1 個の機能を停止した状態における燃料集合体測定結果	104
表 2.4.3-3 アンプ 1 個の機能を停止した状態において適用するスロープ b 及び ρ_0 の再評価結果	105
表 2.4.3-4 検出器が正常な状態及びアンプ 1 個の機能を停止した状態において得られた ^{240}Pu 実効質量 (g/cm) の相対誤差 (%RSD)	105
表 3.1.2-1 AVIS におけるアンプ数	107

写真目次

写真 1.1-1 AFAS の外観写真	1
写真 1.1-2 AVIS の外観写真	2
写真 1.1-3 IPCA の外観写真	2
写真 2.2.2-1 AFAS のアンプ (AMPTEK A111)	58

添付資料目次

【線源情報】

線源証明書 添付-1

【AFAS 性能確認試験】

(1) 2.1 長期管理限界の妥当性確認 添付-10

(2) 2.4 AFAS の故障時の測定パラメータの再評価方法の検討及び故障時の
測定性能の評価 添付-50

【IPCA 性能確認試験】

(1) 4.1 長期管理限界の妥当性確認 添付-60

1. 試験概要

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下、「JAEA」という）は、原子力規制庁殿と令和3年4月に締結した受託業務契約「令和3年度軽水炉等改良技術確証試験等委託費（大型混合酸化物燃料加工施設保障措置機器性能確認試験）事業」に基づき、大型混合酸化物燃料加工施設（以下、「J-MOX」という）に設置される保障措置機器である燃料集合体測定機器（以下、「AFAS」という）、バルク工程内 MOX 粉末・ペレット測定機器（以下、「AVIS」という）及び MOX 原料粉末貯蔵容器測定機器（以下、「IPCA」という）の性能確認試験を実施した。

1.1 試験対象機器

(1) AFAS

AFAS は、軽水炉用 MOX 燃料集合体用の非破壊測定装置であり、PWR 用の AFAS-P 及び BWR 用の AFAS-B の 2 式から構成される。1 式の AFAS は、単位長さあたりの Pu 量測定用の中性子検出器 1 台（Collar 検出器）と燃料集合体の有効長（充填されている MOX ペレットのスタック長）測定用の中性子検出器 2 台（Top Fork 検出器及び Bottom Fork 検出器）により構成される。装置の外観写真を写真 1.1-1 に示す。

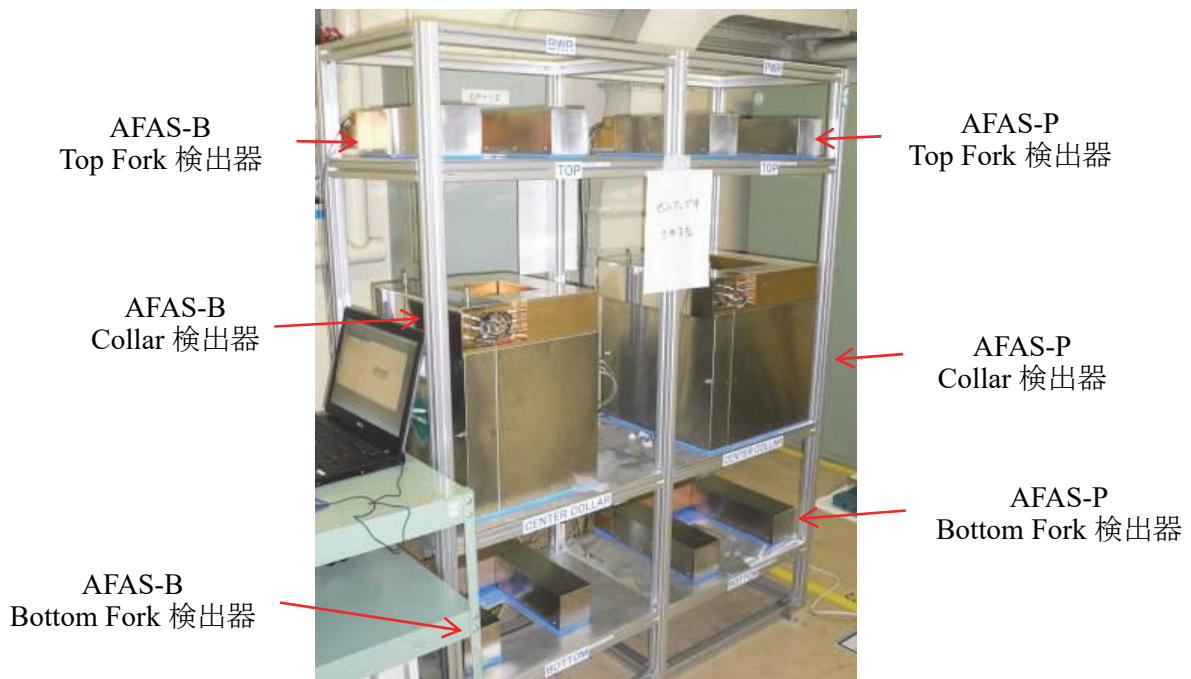


写真 1.1-1 AFAS の外観写真

(2) AVIS

AVIS は、工程内から収去した粉末及びペレット用の非破壊測定装置であり、Pu 量測定用の中性子検出器及び Pu 同位体組成比測定用の高純度ゲルマニウム (HPGe) 半導体検出器 (ガンマ線検出器) により構成される。装置の外観写真を写真 1.1-2 に示す。



写真 1.1-2 AVIS の外観写真

(3) IPCA

IPCA は、MOX 原料粉末用の非破壊測定装置であり、Pu 量測定用の中性子検出器、Pu 同位体組成比測定用の電気冷却式高純度ゲルマニウム (HPGe) 半導体検出器 (ガンマ線検出器) 3 台及びロードセル (荷重変換器) により構成される。装置の外観写真を写真 1.1-3 に示す。

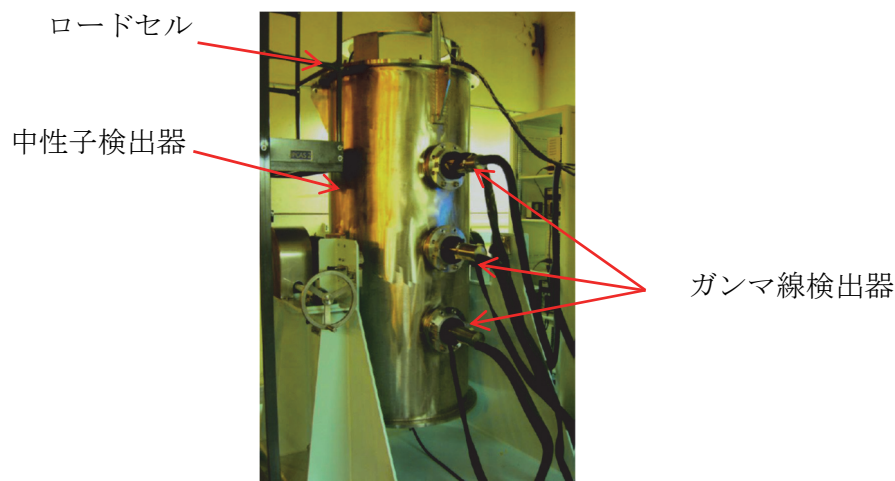


写真 1.1-3 IPCA の外観写真

(公益財団法人 核物質管理センター “H25 年度 大型 MOX 燃料加工施設保障措置試験” 報告書より引用)

1.2 試験項目

(1) AFAS の性能確認試験

AFAS の性能確認試験項目を表 1.2-1 に示す。各試験の詳細については 2.項に示す。

表 1.2-1 AFAS 性能確認試験項目

機器名	試験項目	参照項
AFAS	長期管理限界の妥当性確認	2.1
	パルス間隔分布の評価	2.2
	AFAS の機器の異常検知方法の検討	2.3
	AFAS の故障時の測定パラメータの再評価方法の検討及び故障時の測定性能の評価	2.4

(2) AVIS の性能確認試験

AVIS の性能確認試験項目を表 1.2-2 に示す。各試験の詳細な内容については 3.項に示す。

表 1.2-2 AVIS 性能確認試験項目

機器名	試験項目	参照項
AVIS	パルス間隔分布の評価	3.1
	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

(3) IPCA の性能確認試験

IPCA の性能確認試験項目を表 1.2-3 に示す。各試験の詳細な内容については 4.項に示す。

表 1.2-3 IPCA 性能確認試験項目

機器名	試験項目	参照項
IPCA	長期管理限界の妥当性確認	4.1

1.3 試験スケジュール

AFAS、AVIS 及び IPCA の性能確認試験スケジュールを表 1.3-1 に示す。

表 1.3-1 性能確認試験スケジュール

内容	令和3年度											
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
性能確認試験												
報告書作成												
試験に係る会合等	LANL ^(*1) との技術会合（リモート会議） 											

*1: LANL（米国ロスアラモス国立研究所（Los Alamos National Laboratory））

1.4 試験実施場所

(1) AFAS 性能確認試験

- ・プルトニウム燃料第二開発室 試験検査室（C）（C-137）
- ・プルトニウム燃料第二開発室 集合体貯蔵室（C-130）

(2) AVIS 性能確認試験

- ・プルトニウム燃料第一開発室 燃料要素組立室（R-120）
- ・プルトニウム燃料第一開発室 固体廃棄物一時保管室（R-123）

(3) IPCA 性能確認試験

- ・ロスアラモス国立研究所

1.5 測定パラメータ

(1) AFAS 用測定パラメータ

本試験に用いた AFAS-B 及び AFAS-P の各検出器の測定パラメータを表 1.5-1 及び表 1.5-2 に示す。

表 1.5-1 AFAS-B 用中性子検出器の測定パラメータ

項目	Collar	Top Fork	Bottom Fork
シフトレジスタの種類	JSR-15	JSR-15	JSR-15
プレディレイ (μs)	1.50	1.50	1.50
ゲート幅 (μs)	64.00	64.00	64.00
印加電圧 (V)	1,720	1,720	1,720
ダイアウエイタイム (μs)	50.0000	50.0000	50.0000
中性子検出効率(²⁵² Cf)	0.1970	0.0080	0.0060
Multiplicity デッドタイム補正係数	160.0000×10 ⁻⁹	0.0000	0.0000
デッドタイム補正係数 <i>a</i>	0.6419×10 ⁻⁶	0.0000	0.0000
デッドタイム補正係数 <i>b</i>	0.1030×10 ⁻¹²	0.0000	0.0000

表 1.5-2 AFAS-P 用中性子検出器の測定パラメータ

項目	Collar	Top Fork	Bottom Fork
シフトレジスタの種類	JSR-15	JSR-15	JSR-15
プレディレイ (μs)	1.50	1.50	1.50
ゲート幅 (μs)	64.00	64.00	64.00
印加電圧 (V)	1,720	1,720	1,720
ダイアウエイタイム (μs)	50.0000	50.0000	50.0000
中性子検出効率(²⁵² Cf)	0.1620	0.0126	0.0127
Multiplicity デッドタイム補正係数	86.5000×10 ⁻⁹	0.0000	0.0000
デッドタイム補正係数 <i>a</i>	0.3458×10 ⁻⁶	0.0000	0.0000
デッドタイム補正係数 <i>b</i>	0.02989×10 ⁻¹²	0.0000	0.0000

(2) AVIS 用測定パラメータ

本試験に用いた AVIS の中性子検出器の測定パラメータを表 1.5-3 に示す。

表 1.5-3 中性子検出器パラメータ

項目	パラメータ
シフトレジスターの種類	JSR-15
プリディレイ(μs)	1.50
ゲート幅(μs)	64.00
印加電圧(V)	1,740
ダイアウエイタイム(μs)	30.00
中性子検出効率	0.6750
Multiplicity デッドタイム補正係数	72.6000×10^{-9}
デッドタイム補正係数 <i>a</i>	0.2904×10^{-6}
デッドタイム補正係数 <i>b</i>	0.0211×10^{-12}
ダブルゲートフラクション	0.7930
トリプルゲートフラクション	0.6225
スロープ <i>b</i>	3.240449×10^2
Alpha weight	1.000
ρ_0	4.707231×10^{-1}
K	2.166

(3) IPCA 用測定パラメータ

本試験に用いた IPCA の中性子検出器の測定パラメータについては、LANL 報告書 “Technical Specification for the Improved Plutonium Canister Assay System (IPCA 2)” (参考文献 1) を参照のこと。

1.6 試験に使用した ^{252}Cf 中性子線源

本試験に使用した ^{252}Cf 中性子線源の線源番号及び中性子放出率を表 1.6-1 に示す。表中の中性子放出率は、各線源の線源証明書に記載されている値を、評価日に合わせて崩壊計算することにより求めた値である。なお、LANL において使用された中性子線源については、LANL 報告書“Annual IPCA2 Performance Report for JFY21”（添付資料）を参照のこと。

表 1.6-1 試験に使用した ^{252}Cf 中性子線源

線源番号	中性子放出率(n/s)	評価日
H4-694	2.7×10^4	2021/4/1
K7-436	5.3×10^4	
Q2-334	1.7×10^5	
T1-349	3.4×10^5	

1.7 試験に使用した燃料集合体

AFAS の性能確認試験に使用した燃料集合体（封入棒集合体）の側面図及び断面図を図 1.7-1 に示す。また、集合体の仕様及び同位体組成比を表 1.7-1 及び表 1.7-2 に示す。本集合体は、プルトニウム燃料第二開発室に残存していた新型転換炉ふげん用製品ペレットを充填した封入棒 28 本から構成されたものであり、前年度（令和 2 年度）に実施した AFAS の性能確認試験においても使用された。

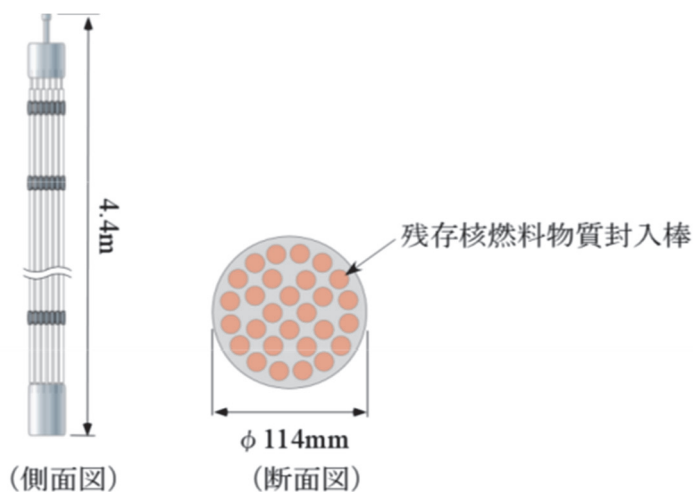


図 1.7-1 封入棒集合体の側面図及び断面図

表 1.7-1 燃料集合体の仕様

集合体 No.	Pu 量 (g)	Pu 含有率 ^(*3) (%)	有効長 ^(*4) (m)	内容
A	3533.991	2.10	3.7	残存核燃料物質 (製品ペレット)
B	3139.806	1.96	3.7	残存核燃料物質 (製品ペレット) 過去に製造したふげん取替燃料棒 (5 本)
C	1983.007	1.36	3.8	残存核燃料物質 (原料粉末・スクラップ)

*3 : Pu 含有率(%)=Pu 重量/MOX 重量×100

*4 : 燃料集合体を構成する各燃料棒に充填されているペレットのスタック長の平均

表 1.7-2 燃料集合体の同位体組成比 (集合体平均)

集合体 No.	同位体組成比						崩壊計算日
	²³⁸ Pu (%)	²³⁹ Pu (%)	²⁴⁰ Pu (%)	²⁴¹ Pu (%)	²⁴² Pu (%)	²⁴¹ Am ^(*5) (%)	
A	1.3233	61.4933	27.8411	3.8401	5.5022	6.3855	2013/1/30
B	1.2638	62.3620	27.3883	3.7397	5.2462	6.4546	2013/1/30
C	0.8404	68.9247	24.2715	2.4621	3.5013	6.2192	2013/1/30

*5 : ²⁴¹Am 量/Pu 量×100

2. AFAS の性能確認試験

2.1 長期管理限界の妥当性確認

2.1.1 目的

J-MOX において査察官非立会測定システムとして使用される AFAS の長期安定性を確認する。また、AFAS の各検出器から得られる計数値の長期管理限界^{*6)}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。

*6: 長期管理限界：長期間の使用を考慮した管理限界（統計的に有効な一定数の測定値をグラフ化した時の、測定値がかなり高い確率で存在する範囲の境界）

2.1.2 方法

連続的なバックグラウンド測定を実施し、AFAS の各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、計数値との相関の有無を確認する。

また、定期的な ^{252}Cf 中性子線源測定を実施し、長期にわたり取得した各計数値及び誤差より、各検出器の長期管理限界を評価する。また、測定環境の温湿度と計数値の相関の有無を評価する。

これらの測定は、Multi-Instrument Collect（以下、「MIC」という）ソフトウェア及び IAEA Neutron Coincidence Counting（以下、「INCC」という）ソフトウェアを用いて実施する。

本確認は、AFAS-B 及び AFAS-P の各検出器について行う。

本評価で使用する ^{252}Cf 中性子線源（H4-694）を 1.6 項の表 1.6-1 に示す。

なお、2021 年 4 月現在、AFAS-B 及び AFAS-P 共に専用の中性子計数装置である AMSR-150（以下、「AMSR」という）が故障しているため、本確認は、代替として JAEA 所掌の JSR-12 を用いて実施する。JSR-12 を用いた場合の機器接続図を図 2.1.2-1 に示す。

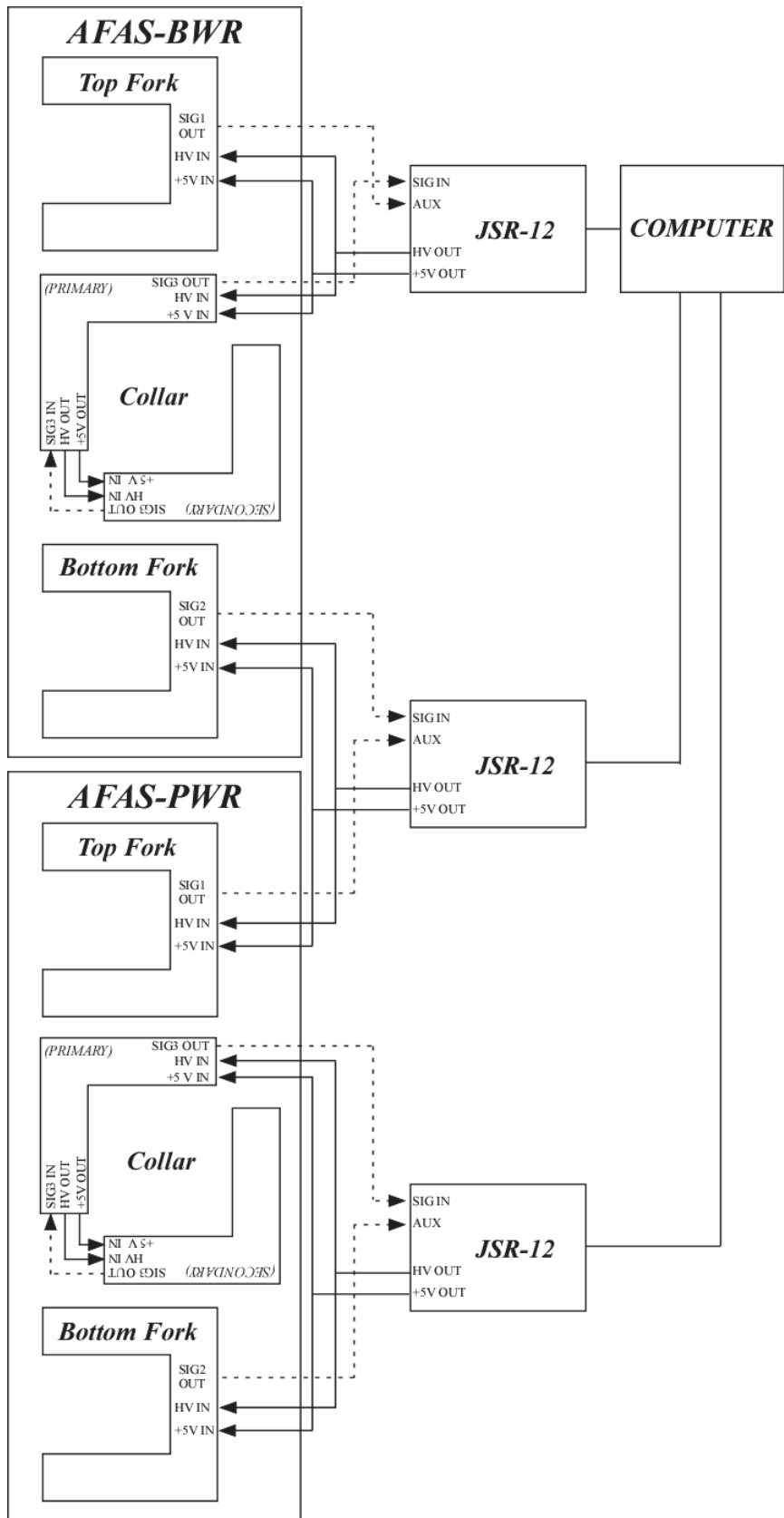


図 2.1.2-1 AFAS 機器接続図

詳細な試験手順を以下に示す。

(1) バックグラウンド測定

- ① AFAS の各検出器及び温湿度計を試験用架台に設置する。
- ② MIC ソフトウェアを用いて、連続的なバックグラウンド測定を実施し、INCC ソフトウェアを用いて各計数値を評価する。測定条件を以下に示す。また、測定期間における温湿度の測定も同時に実施する。
 - ・測定時間：60 秒×∞回
 - ・測定期間：2021 年 4 月～2022 年 3 月(*7)
 - ・取得する計数値：Collar 検出器：シングル値、ダブル値
Fork 検出器：シングル値
- ③ ②にて取得した各計数値における異常値の有無を確認し、各検出器の長期安定性を評価する。また、測定環境の温湿度と計数値の相関の有無を評価する。

*7: AFAS の他の試験期間及び維持管理時、また核燃料物質を近傍で取り扱う査察期間等及び電源が使用不可となる施設保守期間等を除く。

(2) ^{252}Cf 中性子線源測定

- ① AFAS の各検出器及び温湿度計を試験用架台に設置する。
- ② 線源固定治具を用いて、 ^{252}Cf 中性子線源 (H4-694) を任意の検出器にセットする。
- ③ MIC ソフトウェアを用いて、 ^{252}Cf 中性子線源測定を月 1 回の頻度で実施し、INCC ソフトウェアを用いて各計数値を評価する。測定条件を以下に示す。また、測定時における温湿度の測定も同時に実施する。
 - ・測定時間：600 秒
 - ・取得する計数値：Collar 検出器：ダブル値
Fork 検出器：シングル値
- ④ 全ての検出器について、②～③を実施する。
- ⑤ ②～④により得られた各計数値及び誤差より、各検出器の長期管理限界を評価する。また、測定環境の温湿度と計数値の相関の有無を評価する。

2.1.3 結果

(1) バックグラウンド測定

連続的なバックグラウンド測定の結果及びバックグラウンド計数値と測定環境の温度及び湿度の相関の評価結果を検出器毎に次頁以降の①～⑥に示す。評価結果については、測定期間中の環境変化（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）により、バックグラウンドの計数値が変動した期間ごとに分けて示した。なお、核燃料物質の近傍での取り扱いや施設のメンテナンス等により測定できない期間を除いた結果、評価対象期間は 2021 年 5 月から 2022 年 1 月までとなった。バックグラウンド測定結果を示すグラフ中の赤色の実線は各計数値の平均値を示し、破線は平均値の $\pm 3\sigma$ （ 3σ は標準偏差を 3 倍した値）を示す。また、Collar 検出器及び Fork 検出器の各期間におけるバックグラウンドのシングル値の平均値を表 2.1.3-1 及び表 2.1.3-2 に示す。

AFAS-B Collar 検出器におけるシングル値は図 2.1.3-1~5 に示す通りであり、ほぼ全ての計数値は平均値の $\pm 3\sigma$ の範囲内に収まった。ダブル値の平均値は、全期間において約 0.005cps であった。異常な事象として、シングル値においては、6/11、9/22、10/26、11/19 及び 12/1 に一時的な計数値の低下（約 6.5cps~7.5cps）が確認された（図 2.1.3-1 及び図 2.1.3-3 に示す）。

AFAS-P Collar 検出器におけるシングル値は図 2.1.3-31~35 に示す通りであり、ほぼ全ての計数値は平均値の $\pm 3\sigma$ の範囲内に収まった。ダブル値の平均値は、全期間において約 0.094cps であった（異常値を含む）。異常な事象として、シングル値においては、AFAS-B Collar 検出器と同様に 6/11、9/22、10/26、11/19 及び 12/1 に一時的な計数値の低下（約 9.2cps~10.4cps）が確認された（図 2.1.3-31 及び図 2.1.3-33 に示す）。また、シングル値及びダブル値において、5 月~10 月の間に単発的な高い計数値（シングル値：約 14cps~35cps、ダブル値：約 10cps~3080cps）が 30 回程度確認された（図 2.1.3-31~33 及び図 2.1.3-36~38 に示す）。

Fork 検出器における各検出器のシングル値の平均値は表 2.1.3-2 に示す通りであり、ほぼ全ての計数値は平均値の $\pm 3\sigma$ の範囲内に収まった。

測定期間中、測定環境の温度は約 20°C~27°C、湿度は約 40%~82%の範囲で変動した。図 2.1.3-11~30、図 2.1.3-41~60、図 2.1.3-63~66、図 2.1.3-69~72、図 2.1.3-75~78 及び図 2.1.3-81~84 に示すように、各検出器の計数値と温度及び湿度に相関関係はみられなかった。

表 2.1.3-1 Collar 検出器の各期間におけるバックグラウンドのシングル値の平均値

検出器	バックグラウンドのシングル値の平均値 (cps)				
	2021/5/26	7/15	9/17	12/3	2022/1/6
	6/15	9/13	12/2	12/23	1/25
AFAS-B Collar	8.896	10.076	9.314	9.800	9.503
AFAS-P Collar	9.794	11.773	11.249	11.890	11.380

表 2.1.3-2 Fork 検出器の各期間におけるバックグラウンドのシングル値の平均値

検出器	バックグラウンドの シングル値の平均値 (cps)	
	2021/5/26	2021/7/15
	6/15	2022/1/25
AFAS-B Top Fork	1.051	1.167
AFAS-P Top Fork	1.615	1.819
AFAS-B Bottom Fork	0.865	1.001
AFAS-P Bottom Fork	1.226	1.385

① AFAS-B Collar 検出器

- ・バックグラウンドのシングル値：図 2.1.3-1～5
- ・バックグラウンドのダブル値：図 2.1.3-6～10
- ・シングル値と温度の相関：図 2.1.3-11～15
- ・ダブル値と温度の相関：図 2.1.3-16～20
- ・シングル値と湿度の相関：図 2.1.3-21～25
- ・ダブル値と湿度の相関：図 2.1.3-26～30

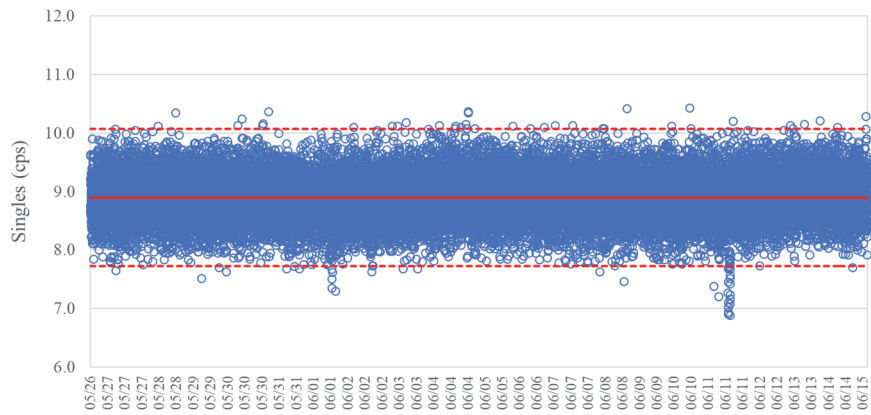


図 2.1.3-1 バックグラウンドのシングル値 (2021/5/26 ~ 2021/6/15)
(AFAS-B Collar 検出器)

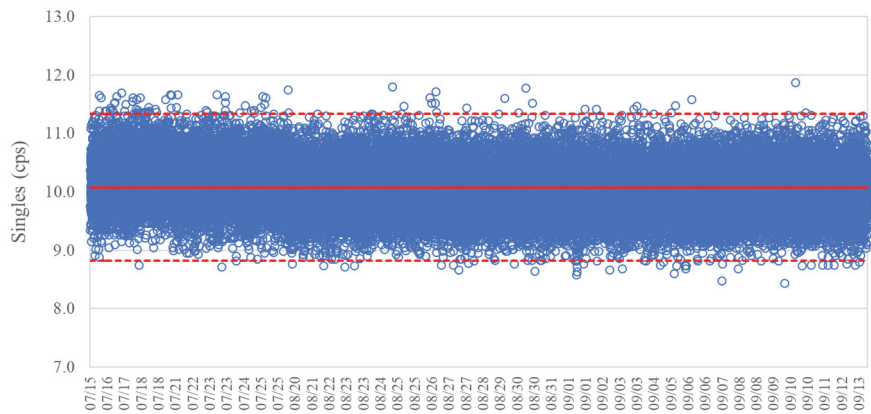


図 2.1.3-2 バックグラウンドのシングル値 (2021/7/15 ~ 2021/9/13)
(AFAS-B Collar 検出器)

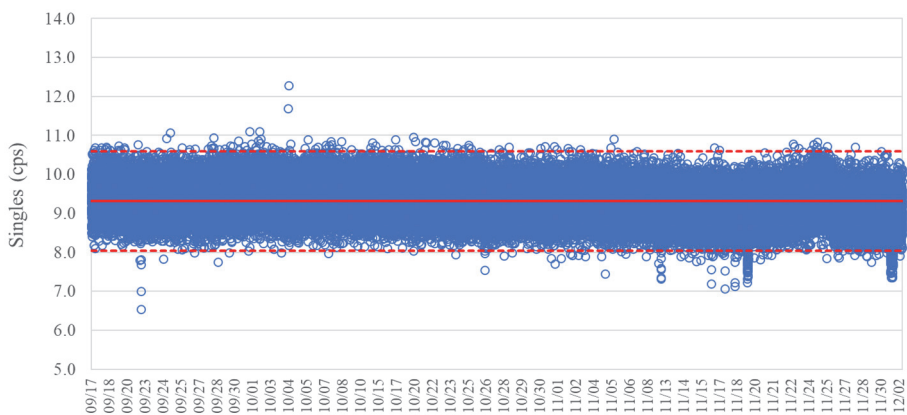


図 2.1.3-3 バックグラウンドのシングル値 (2021/9/17 ~ 2021/12/02)
(AFAS-B Collar 検出器)

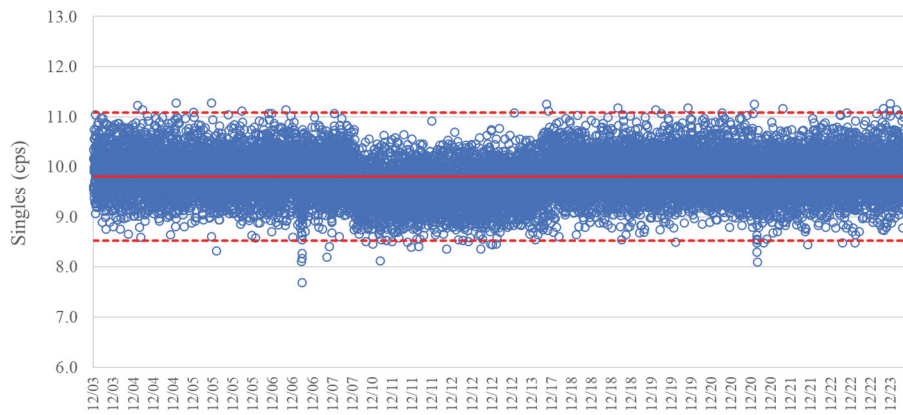


図 2.1.3-4 バックグラウンドのシングル値 (2021/12/3 ~ 2021/12/23)
(AFAS-B Collar 検出器)

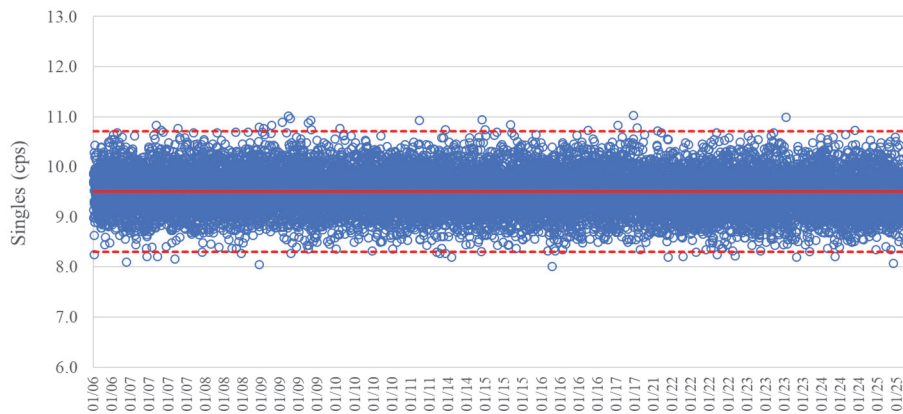


図 2.1.3-5 バックグラウンドのシングル値 (2022/1/6 ~ 2022/1/25)
(AFAS-B Collar 検出器)

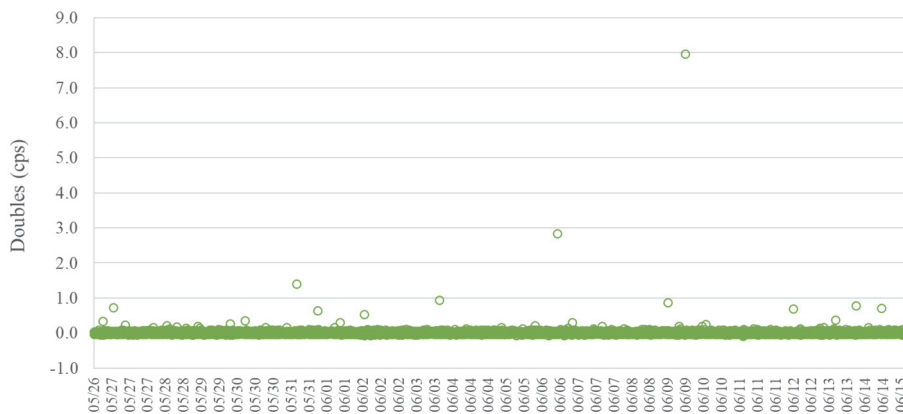


図 2.1.3-6 バックグラウンドのダブル値 (2021/5/26 ~ 2021/6/15)
(AFAS-B Collar 検出器)

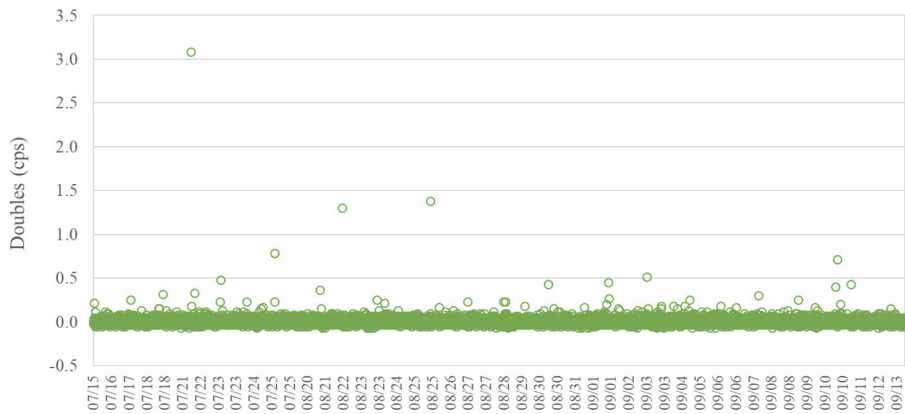


図 2.1.3-7 バックグラウンドのダブル値 (2021/7/15 ~ 2021/9/13)
(AFAS-B Collar 検出器)

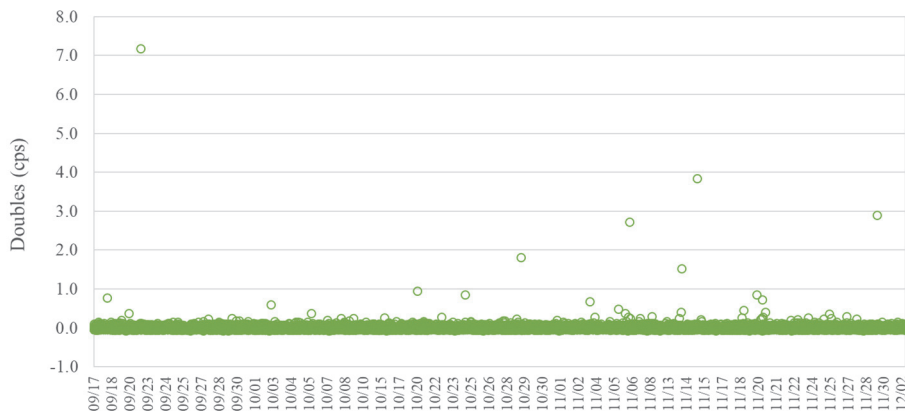


図 2.1.3-8 バックグラウンドのダブル値 (2021/9/17 ~ 2021/12/02)
(AFAS-B Collar 検出器)

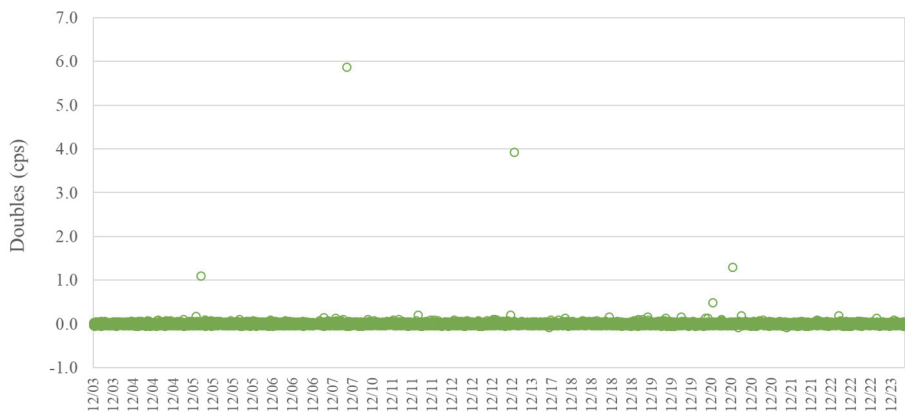


図 2.1.3-9 バックグラウンドのダブル値 (2021/12/3 ~ 2021/12/23)
(AFAS-B Collar 検出器)

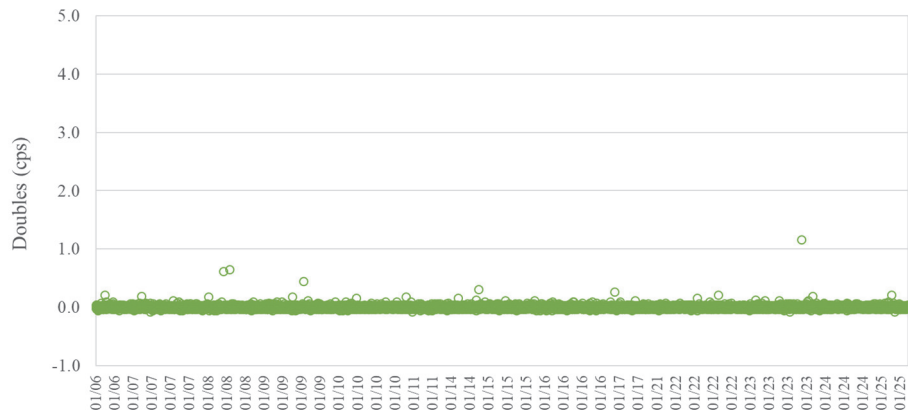


図 2.1.3-10 バックグラウンドのダブル値 (2022/1/6 ~ 2022/1/25)
(AFAS-B Collar 検出器)

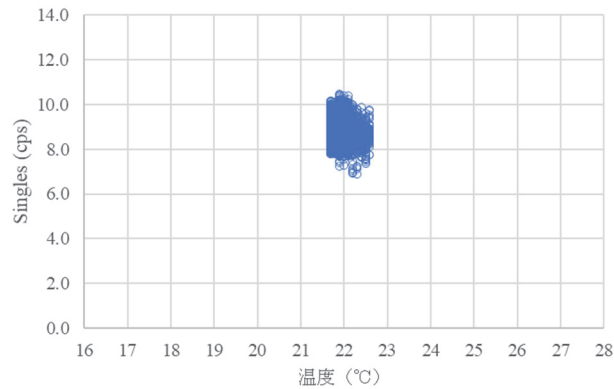


図 2.1.3-11 シングル値と温度の相関 (2021/5/26 ~ 2021/6/15)
(AFAS-B Collar 検出器)

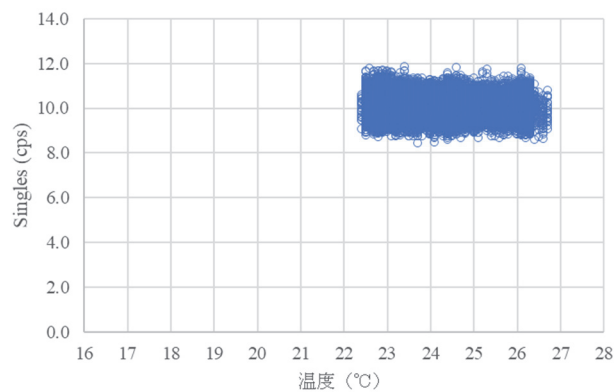


図 2.1.3-12 シングル値と温度の相関 (2021/7/15 ~ 2021/9/13)
(AFAS-B Collar 検出器)

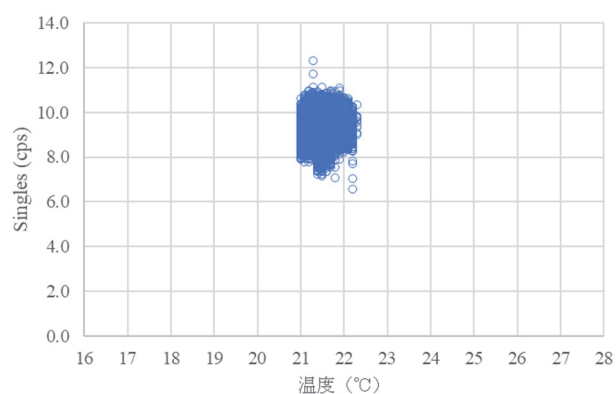


図 2.1.3-13 シングル値と温度の相関 (2021/9/17 ~ 2021/12/2)
(AFAS-B Collar 検出器)

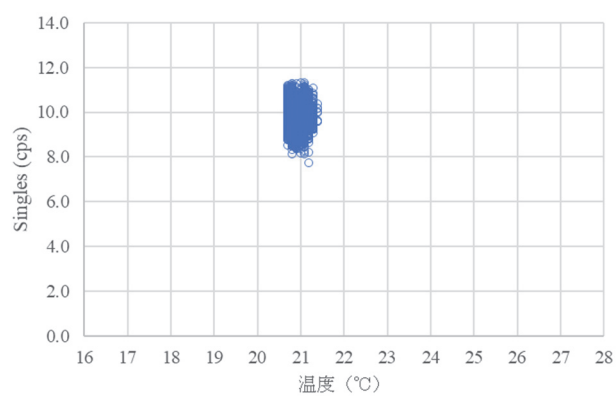


図 2.1.3-14 シングル値と温度の相関 (2021/12/3 ~ 2021/12/23)
(AFAS-B Collar 検出器)

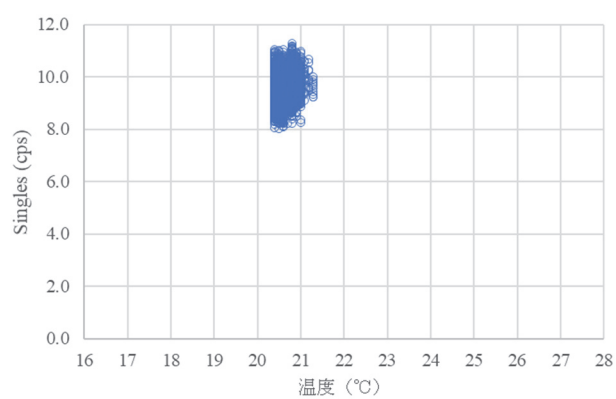


図 2.1.3-15 シングル値と温度の相関 (2022/1/6 ~ 2022/1/25)
(AFAS-B Collar 検出器)

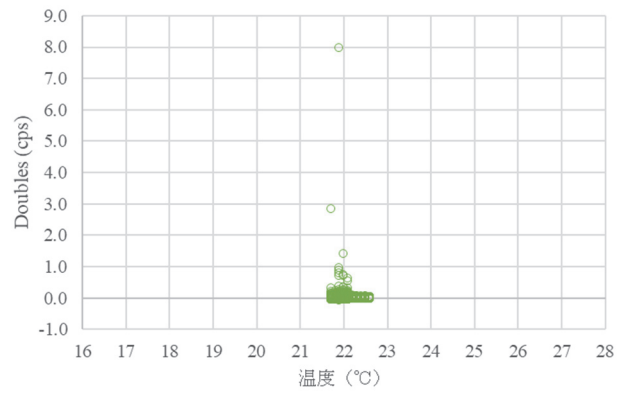


図 2.1.3-16 ダブル値と温度の相関 (2021/5/26 ~ 2021/6/15)
(AFAS-B Collar 検出器)

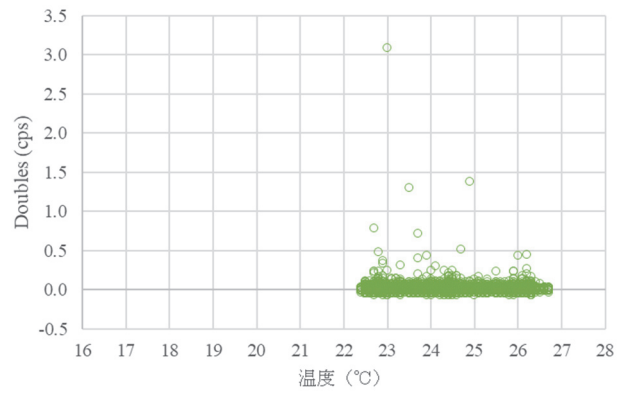


図 2.1.3-17 ダブル値と温度の相関 (2021/7/15 ~ 2021/9/13)
(AFAS-B Collar 検出器)

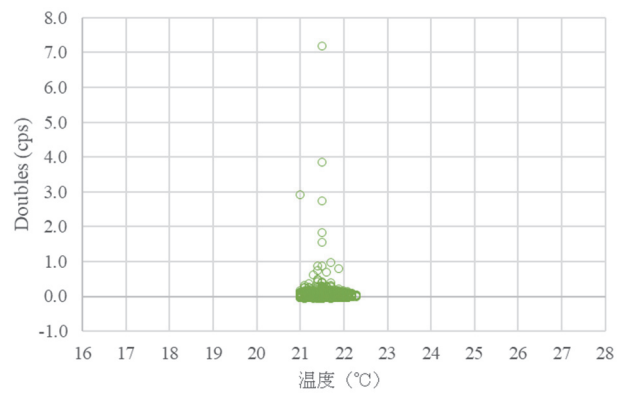


図 2.1.3-18 ダブル値と温度の相関 (2021/9/17 ~ 2021/12/2)
(AFAS-B Collar 検出器)

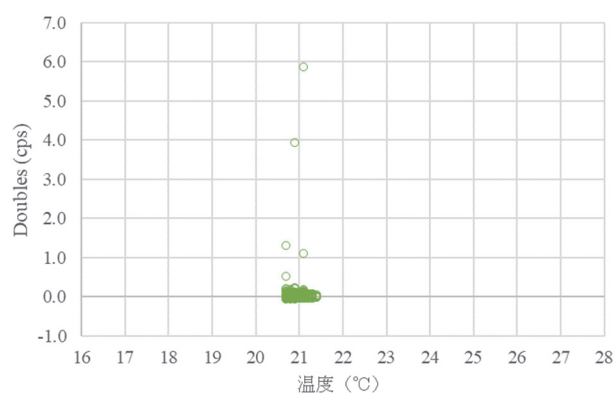


図 2.1.3-19 ダブル値と温度の相関 (2021/12/3 ~ 2021/12/23)
(AFAS-B Collar 検出器)

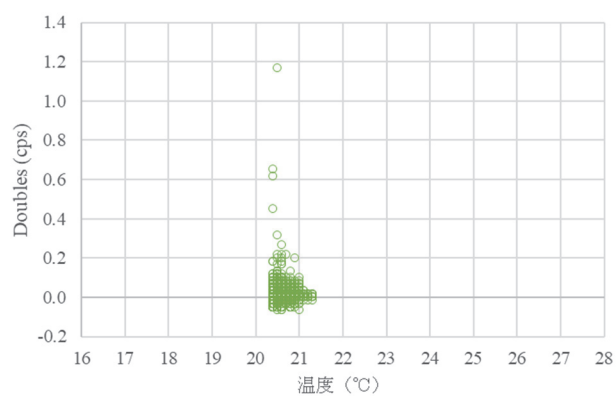


図 2.1.3-20 ダブル値と温度の相関 (2022/1/6 ~ 2022/1/25)
(AFAS-B Collar 検出器)

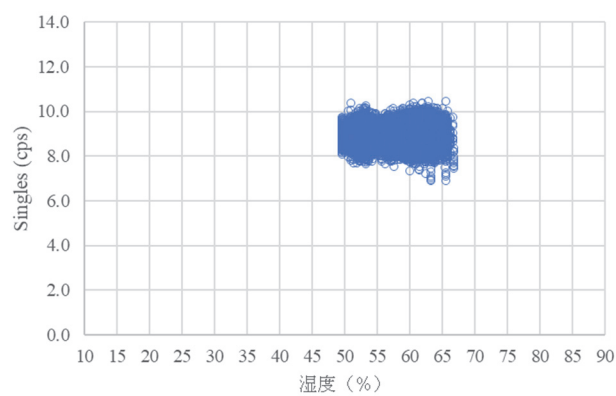


図 2.1.3-21 シングル値と湿度の相関 (2021/5/26 ~ 2021/6/15)
(AFAS-B Collar 検出器)

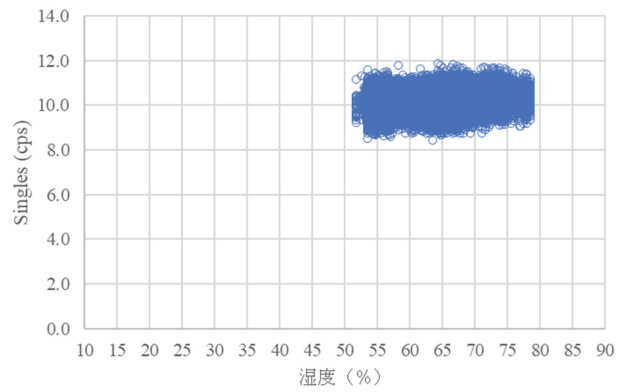


図 2.1.3-22 シングル値と湿度の相関 (2021/7/15 ~ 2021/9/13)
(AFAS-B Collar 検出器)

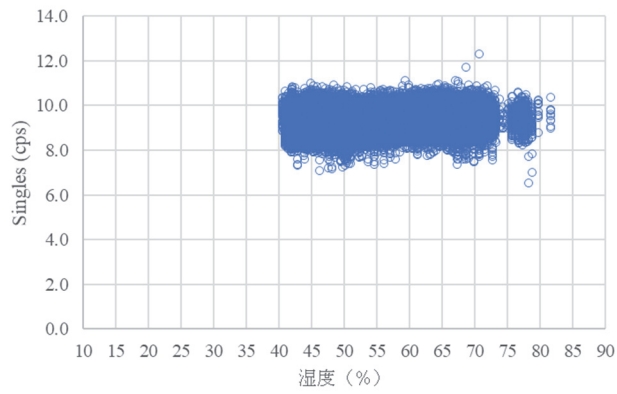


図 2.1.3-23 シングル値と湿度の相関 (2021/9/17 ~ 2021/12/2)
(AFAS-B Collar 検出器)

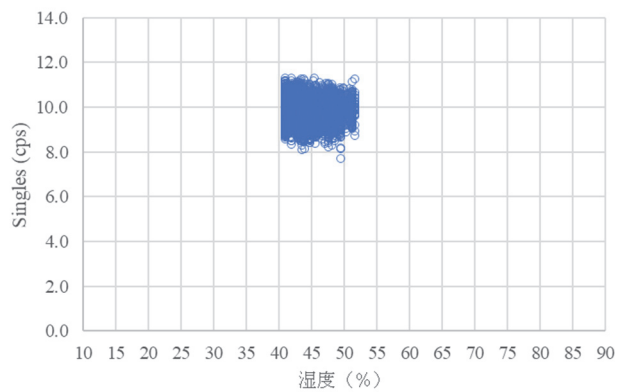


図 2.1.3-24 シングル値と湿度の相関 (2021/12/3 ~ 2021/12/23)
(AFAS-B Collar 検出器)

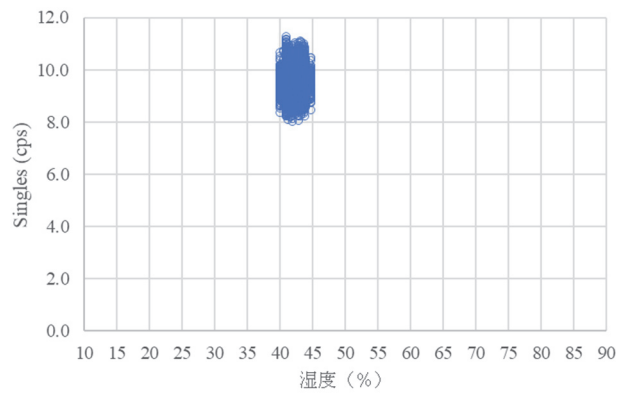


図 2.1.3-25 シングル値と湿度の相関 (2022/1/6 ~ 2022/1/25)
(AFAS-B Collar 検出器)

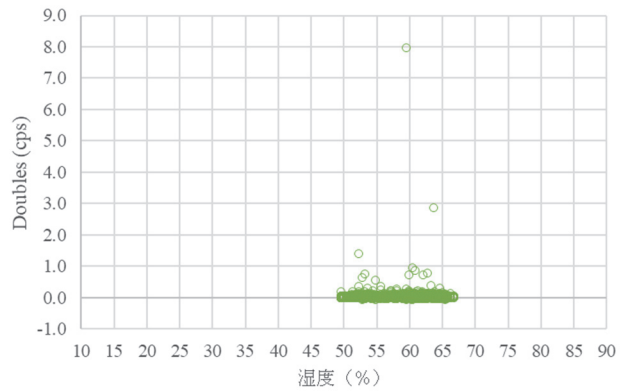


図 2.1.3-26 ダブル値と湿度の相関 (2021/5/26 ~ 2021/6/15)
(AFAS-B Collar 検出器)

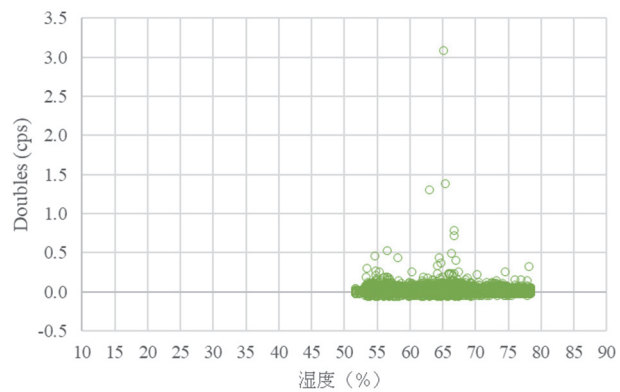


図 2.1.3-27 ダブル値と湿度の相関 (2021/7/15 ~ 2021/9/13)
(AFAS-B Collar 検出器)

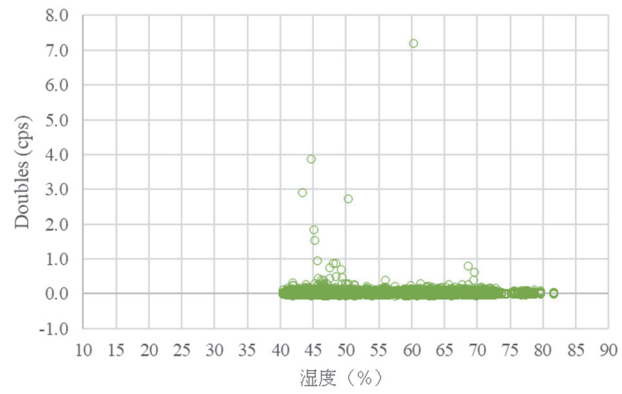


図 2.1.3-28 ダブル値と湿度の相関 (2021/9/17 ~ 2021/12/2)
(AFAS-B Collar 検出器)

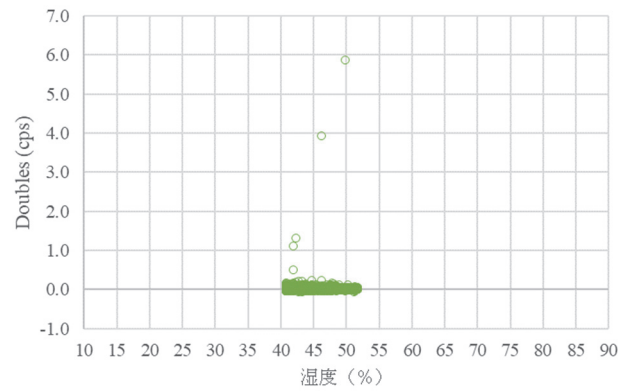


図 2.1.3-29 ダブル値と湿度の相関 (2021/12/3 ~ 2021/12/23)
(AFAS-B Collar 検出器)

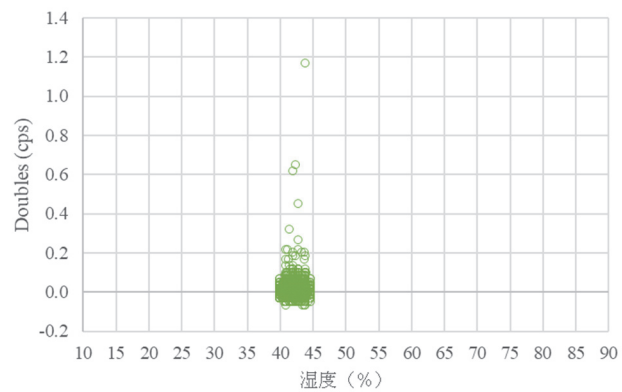


図 2.1.3-30 ダブル値と湿度の相関 (2022/1/6 ~ 2022/1/25)
(AFAS-B Collar 検出器)

② AFAS-P Collar 検出器

- バックグラウンドのシングル値：図 2.1.3-31～35
- バックグラウンドのダブル値：図 2.1.3-36～40
- シングル値と温度の相関：図 2.1.3-41～45
- ダブル値と温度の相関：図 2.1.3-46～50
- シングル値と湿度の相関：図 2.1.3-51～55
- ダブル値と湿度の相関：図 2.1.3-56～60

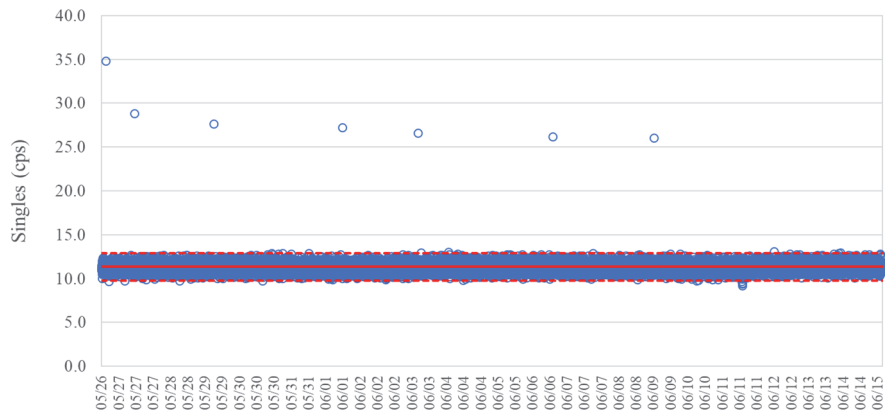


図 2.1.3-31 バックグラウンドのシングル値 (2021/5/26～2021/6/15)
(AFAS-P Collar 検出器)

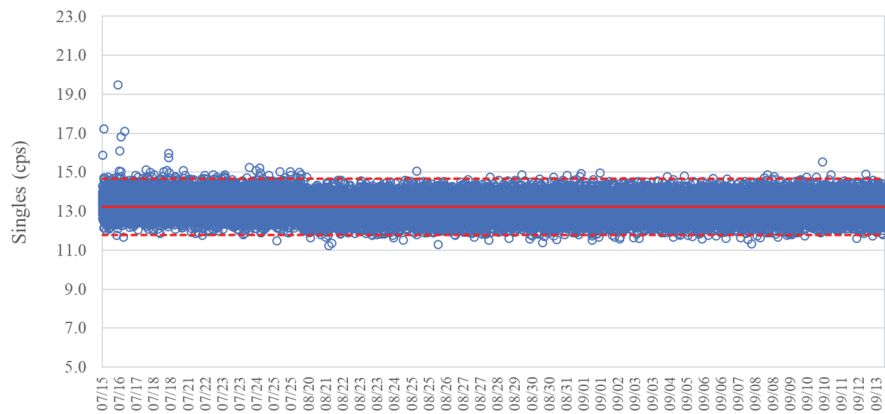


図 2.1.3-32 バックグラウンドのシングル値 (2021/7/15～2021/9/13)
(AFAS-P Collar 検出器)

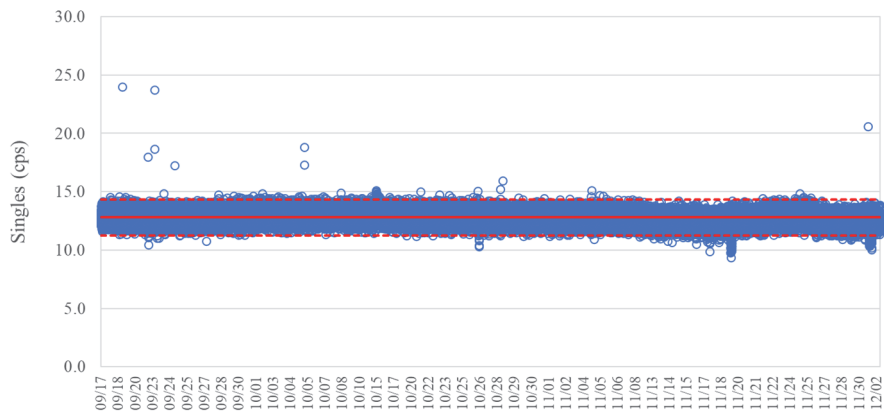


図 2.1.3-33 バックグラウンドのシングル値 (2021/9/17 ~ 2021/12/02)
(AFAS-P Collar 検出器)

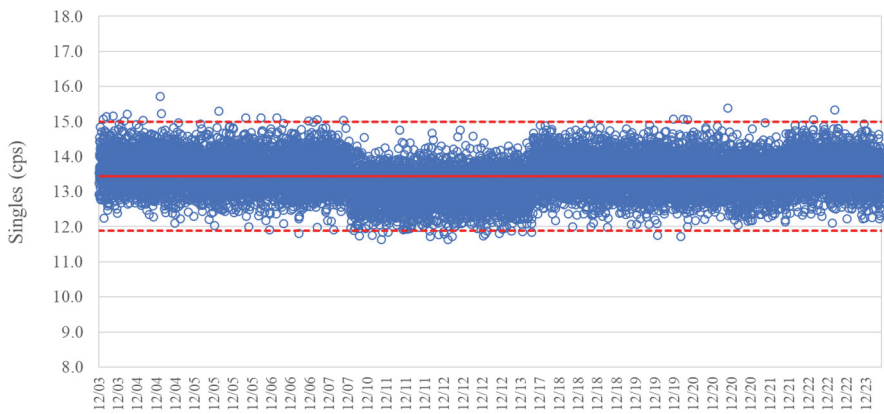


図 2.1.3-34 バックグラウンドのシングル値 (2021/12/3 ~ 2021/12/23)
(AFAS-P Collar 検出器)

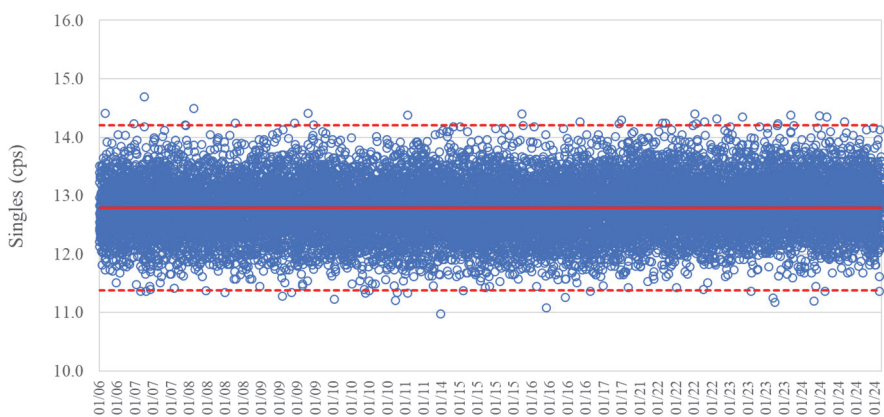


図 2.1.3-35 バックグラウンドのシングル値 (2022/1/6 ~ 2022/1/25)
(AFAS-P Collar 検出器)

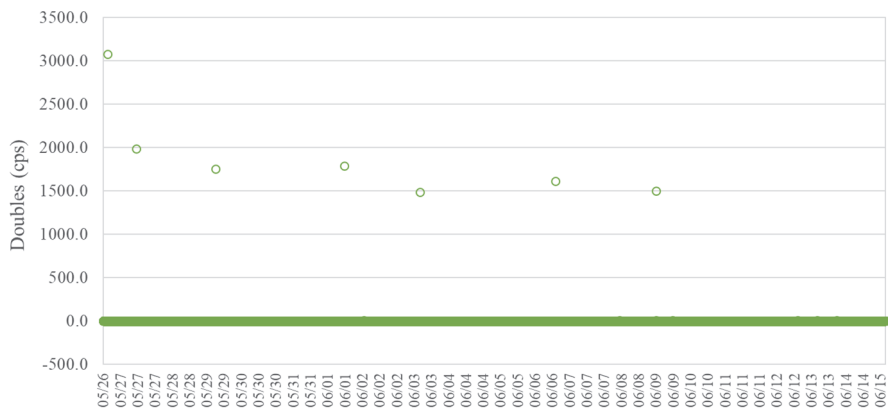


図 2.1.3-36 バックグラウンドのダブル値 (2021/5/26 ~ 2021/6/15)
(AFAS-P Collar 検出器)

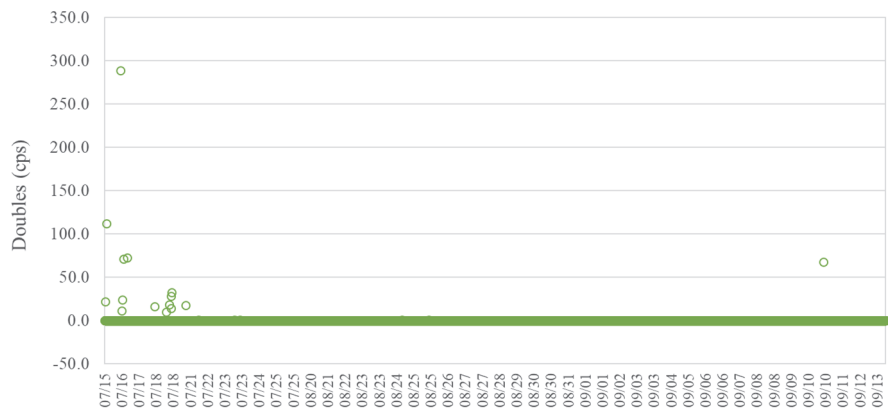


図 2.1.3-37 バックグラウンドのダブル値 (2021/7/15 ~ 2021/9/13)
(AFAS-P Collar 検出器)

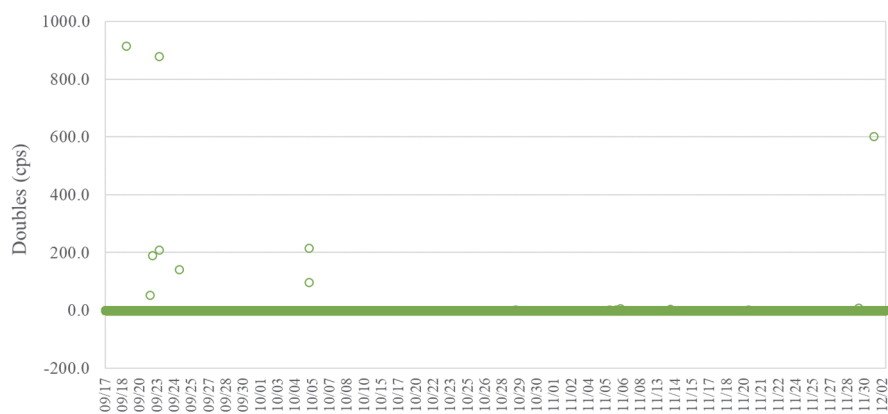


図 2.1.3-38 バックグラウンドのダブル値 (2021/9/17 ~ 2021/12/02)
(AFAS-P Collar 検出器)

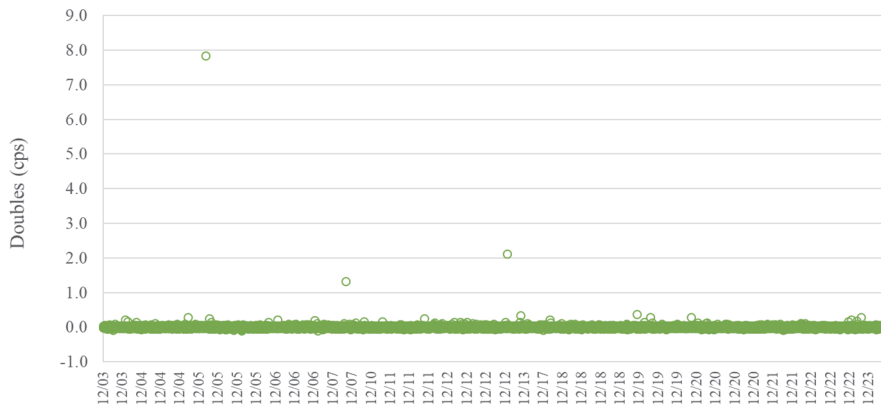


図 2.1.3-39 バックグラウンドのダブル値 (2021/12/3 ~ 2021/12/23)
(AFAS-P Collar 検出器)

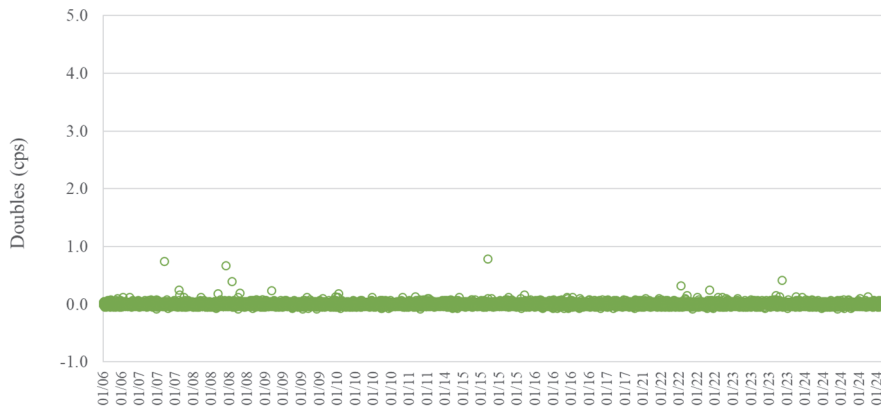


図 2.1.3-40 バックグラウンドのダブル値 (2022/1/6 ~ 2022/1/25)
(AFAS-P Collar 検出器)

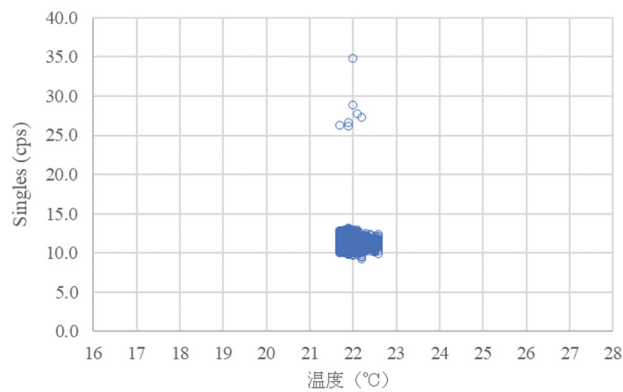


図 2.1.3-41 シングル値と温度の相関 (2021/5/26 ~ 2021/6/15)
(AFAS-P Collar 検出器)

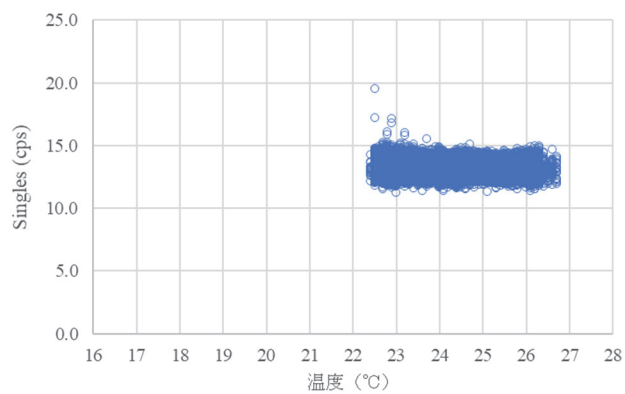


図 2.1.3-42 シングル値と温度の相関 (2021/7/15 ~ 2021/9/13)
(AFAS-P Collar 検出器)

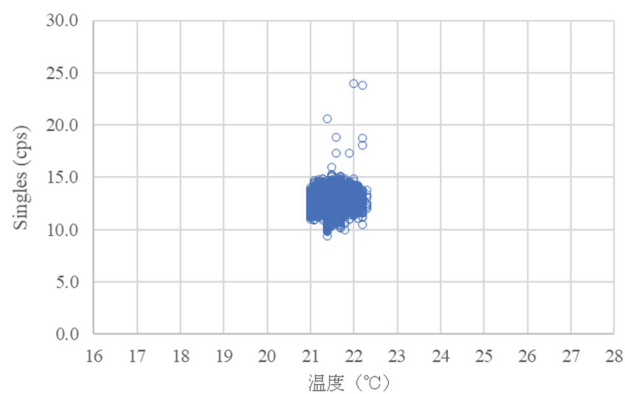


図 2.1.3-43 シングル値と温度の相関 (2021/9/17 ~ 2021/12/2)
(AFAS-P Collar 検出器)

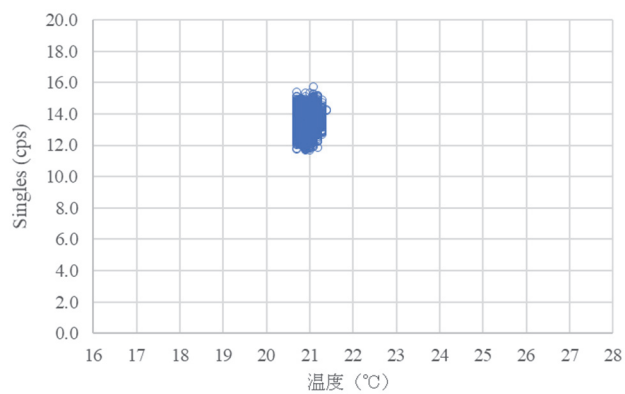


図 2.1.3-44 シングル値と温度の相関 (2021/12/3 ~ 2021/12/23)
(AFAS-P Collar 検出器)

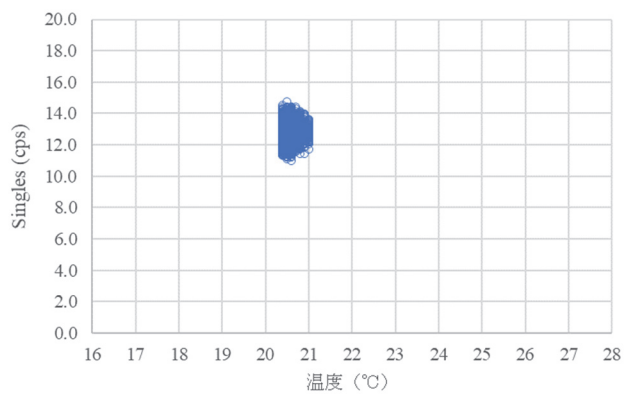


図 2.1.3-45 シングル値と温度の相関 (2022/1/6 ~ 2022/1/25)
(AFAS-P Collar 検出器)

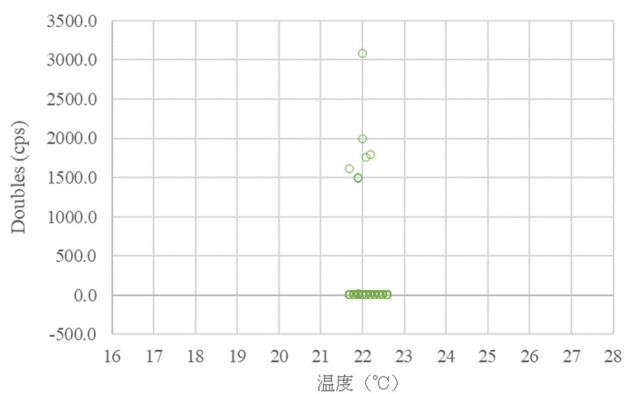


図 2.1.3-46 ダブル値と温度の相関 (2021/5/26 ~ 2021/6/15)
(AFAS-P Collar 検出器)

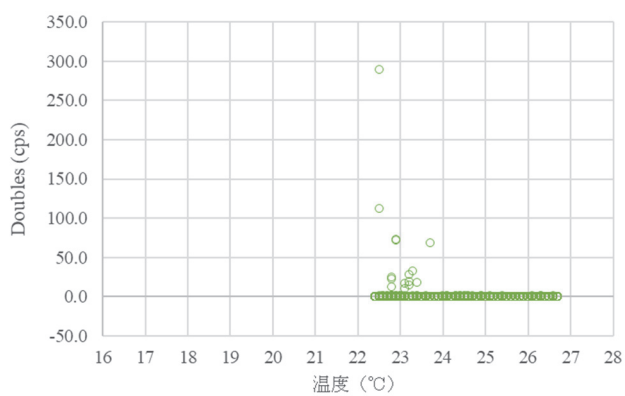


図 2.1.3-47 ダブル値と温度の相関 (2021/7/15 ~ 2021/9/13)
(AFAS-P Collar 検出器)

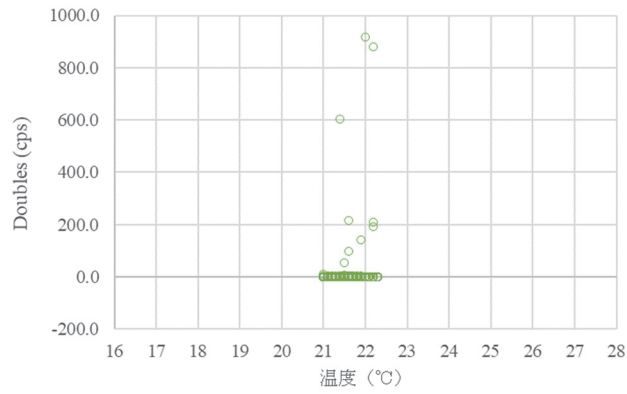


図 2.1.3-48 ダブル値と温度の相関 (2021/9/17 ~ 2021/12/2)
(AFAS-P Collar 検出器)

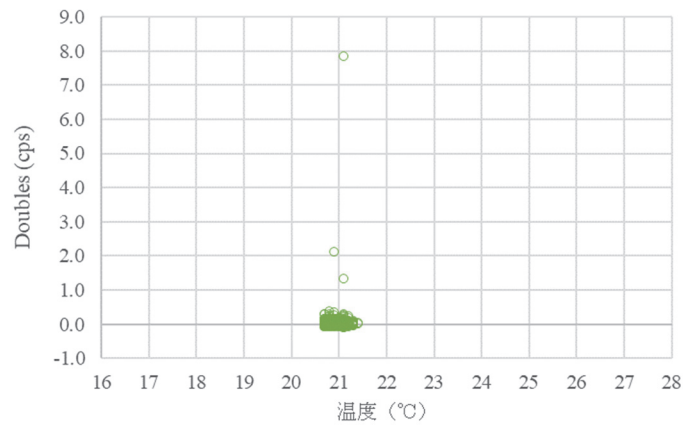


図 2.1.3-49 ダブル値と温度の相関 (2021/12/3 ~ 2021/12/23)
(AFAS-P Collar 検出器)

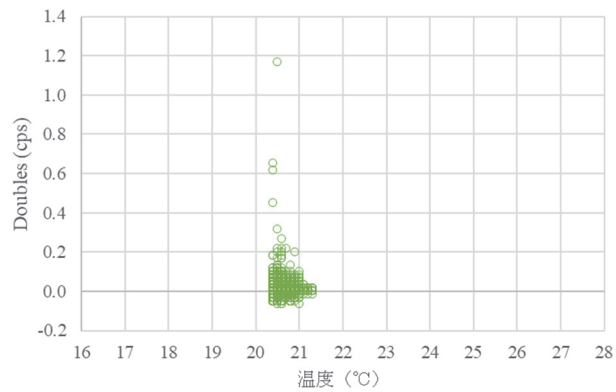


図 2.1.3-50 ダブル値と温度の相関 (2022/1/6 ~ 2022/1/25)
(AFAS-P Collar 検出器)

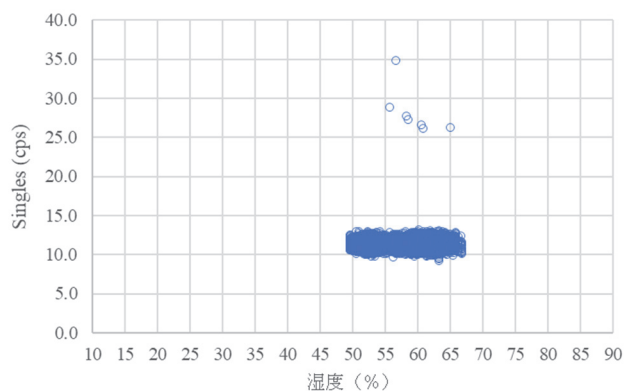


図 2.1.3-51 シングル値と湿度の相関 (2021/5/26 ~ 2021/6/15)
(AFAS-P Collar 検出器)

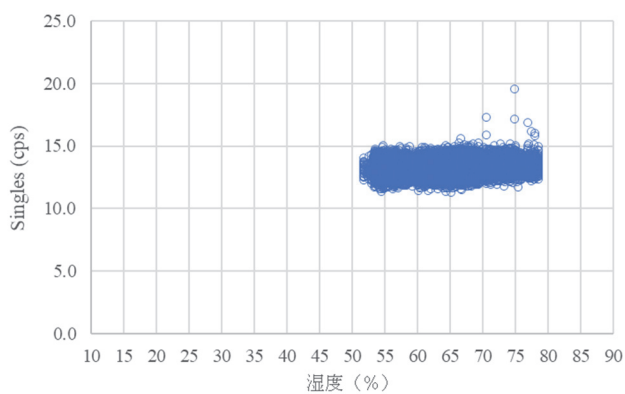


図 2.1.3-52 シングル値と湿度の相関 (2021/7/15 ~ 2021/9/13)
(AFAS-P Collar 検出器)

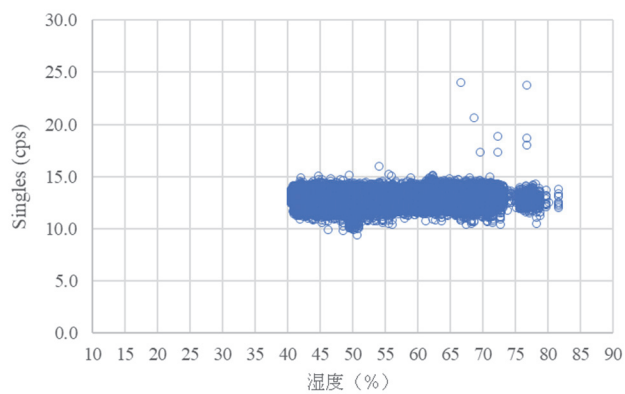


図 2.1.3-53 シングル値と湿度の相関 (2021/9/17 ~ 2021/12/2)
(AFAS-P Collar 検出器)

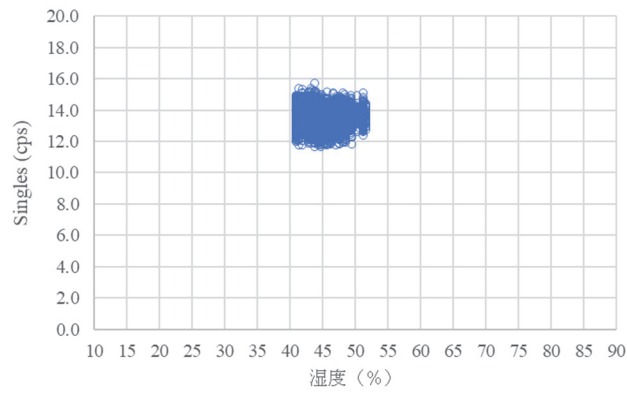


図 2.1.3-54 シングル値と湿度の相関 (2021/12/3 ~ 2021/12/23)
(AFAS-P Collar 検出器)

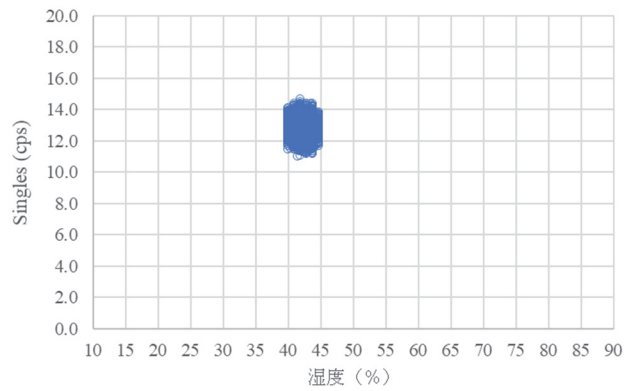


図 2.1.3-55 シングル値と湿度の相関 (2022/1/6 ~ 2022/1/25)
(AFAS-P Collar 検出器)

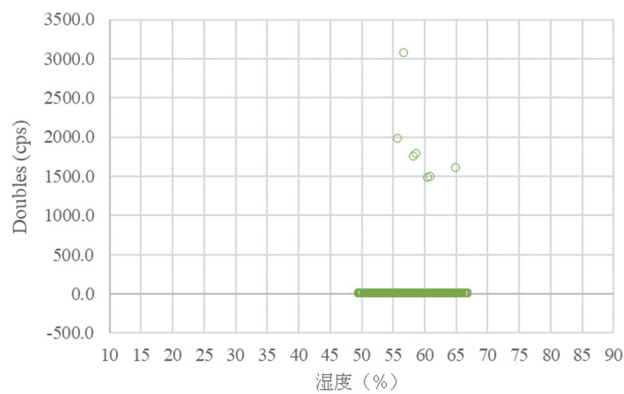


図 2.1.3-56 ダブル値と湿度の相関 (2021/5/26 ~ 2021/6/15)
(AFAS-P Collar 検出器)

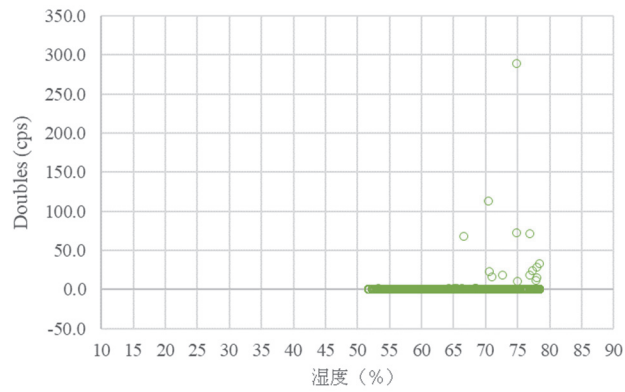


図 2.1.3-57 ダブル値と湿度の相関 (2021/7/15 ~ 2021/9/13)
(AFAS-P Collar 検出器)

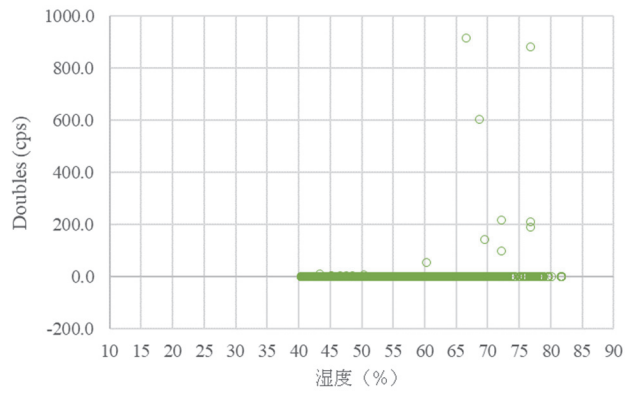


図 2.1.3-58 ダブル値と湿度の相関 (2021/9/17 ~ 2021/12/2)
(AFAS-P Collar 検出器)

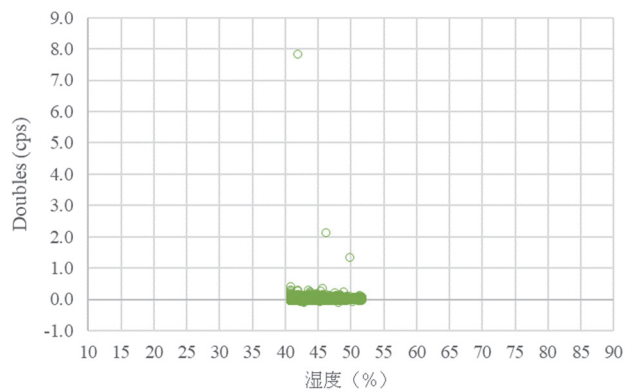


図 2.1.3-59 ダブル値と湿度の相関 (2021/12/3 ~ 2021/12/23)
(AFAS-P Collar 検出器)

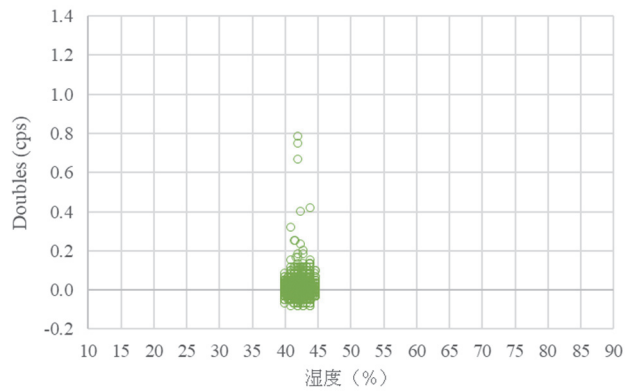


図 2.1.3-60 ダブル値と湿度の相関 (2022/1/6 ~ 2022/1/25)
(AFAS-P Collar 検出器)

③ AFAS-B Top Fork 検出器

- バックグラウンドのシングル値 : 図 2.1.3-61, 62
- シングル値と湿度の相関 : 図 2.1.3-63, 64
- シングル値と湿度の相関 : 図 2.1.3-65, 66

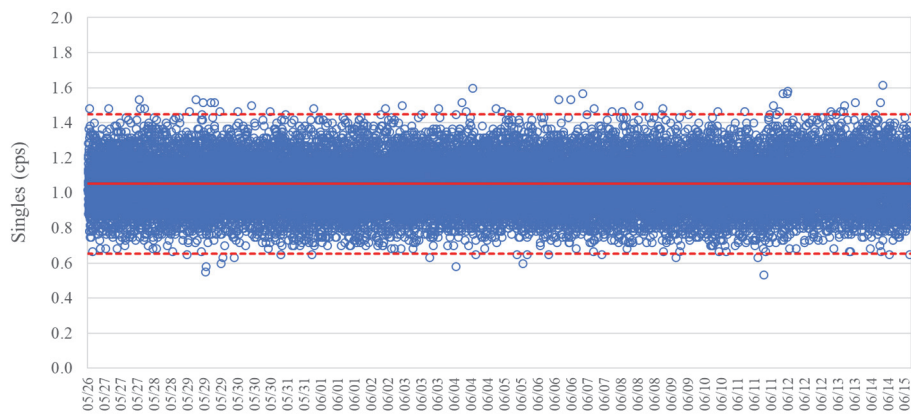


図 2.1.3-61 バックグラウンドのシングル値 (2021/5/26 ~ 2021/6/15)
(AFAS-B Top Fork 検出器)

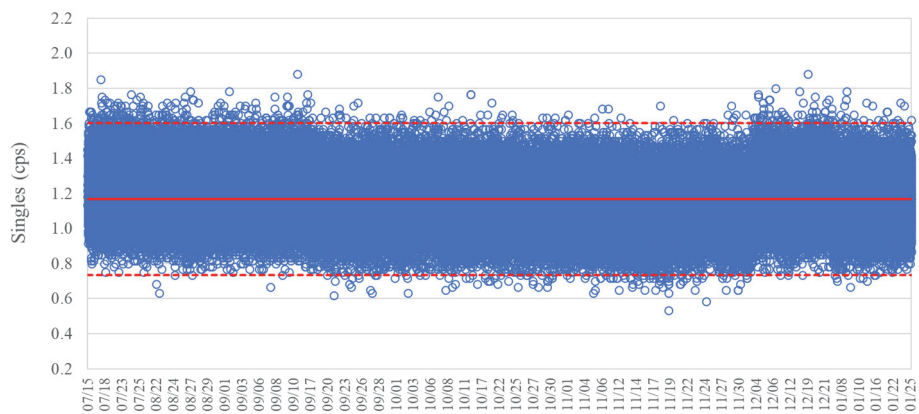


図 2.1.3-62 バックグラウンドのシングル値 (2021/7/15 ~ 2022/1/25)
(AFAS-B Top Fork 検出器)

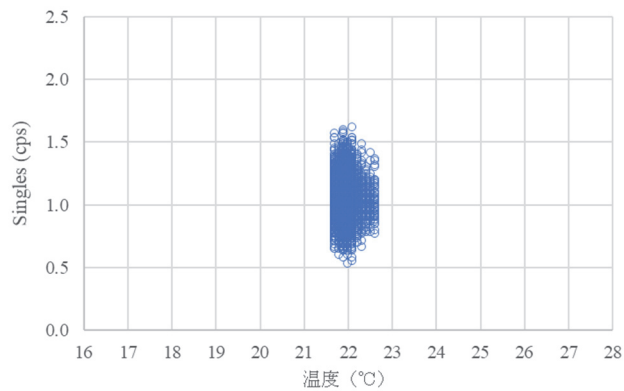


図 2.1.3-63 シングル値と温度の相関 (2021/5/26 ~ 2021/6/15)
(AFAS-B Top Fork 検出器)

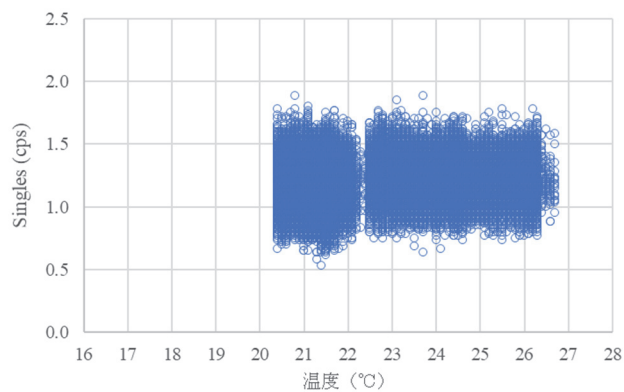


図 2.1.3-64 シングル値と温度の相関 (2021/7/15 ~ 2022/1/25)
(AFAS-B Top Fork 検出器)

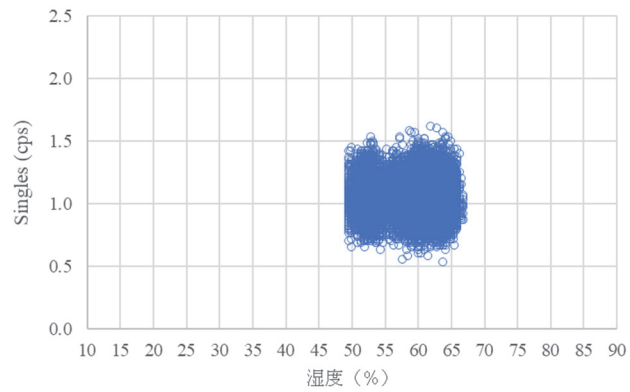


図 2.1.3-65 シングル値と湿度の相関 (2021/5/26 ~ 2021/6/15)
(AFAS-B Top Fork 検出器)

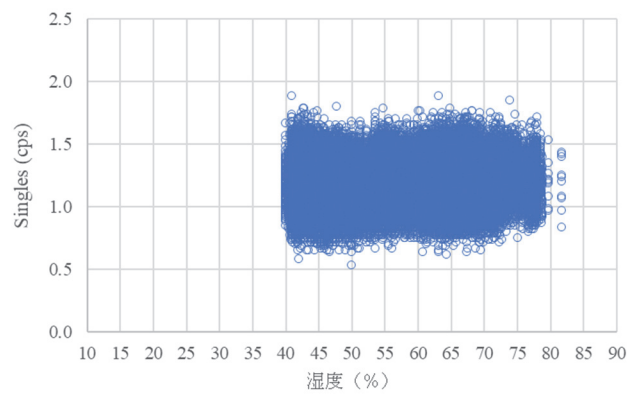


図 2.1.3-66 シングル値と湿度の相関 (2021/7/15 ~ 2022/1/25)
(AFAS-B Top Fork 検出器)

④ AFAS-P Top Fork 検出器

- バックグラウンドのシングル値 : 図 2.1.3-67, 68
- シングル値と湿度の相関 : 図 2.1.3-69, 70
- シングル値と湿度の相関 : 図 2.1.3-71, 72

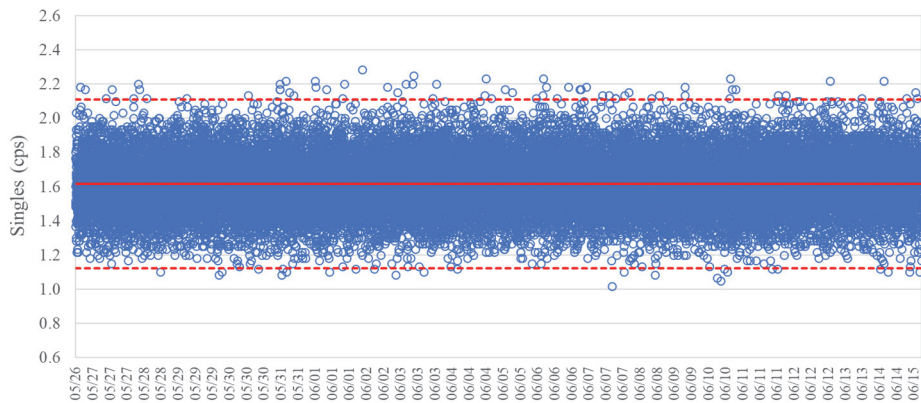


図 2.1.3-67 バックグラウンドのシングル値 (2021/5/26 ~ 2021/6/15)
(AFAS-P Top Fork 検出器)

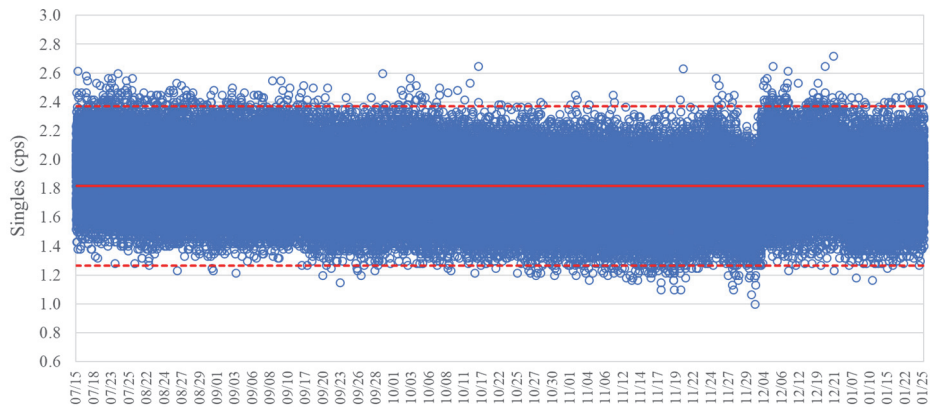


図 2.1.3-68 バックグラウンドのシングル値 (2021/7/15 ~ 2022/1/25)
(AFAS-P Top Fork 検出器)

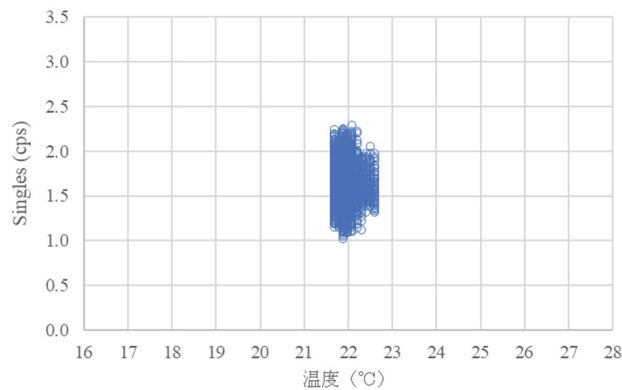


図 2.1.3-69 シングル値と温度の相関 (2021/5/26 ~ 2021/6/15)
(AFAS-P Top Fork 検出器)

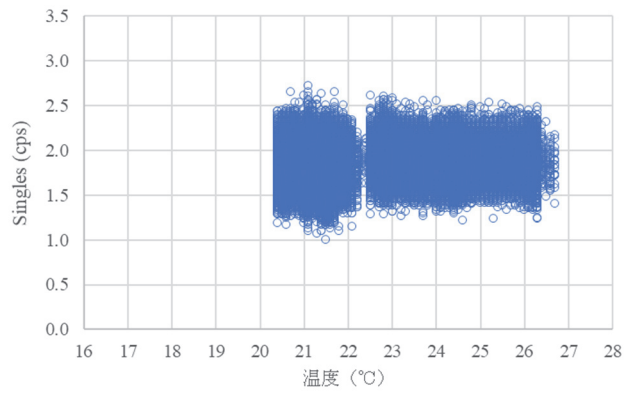


図 2.1.3-70 シングル値と温度の相関 (2021/7/15 ~ 2022/1/25)
(AFAS-P Top Fork 検出器)

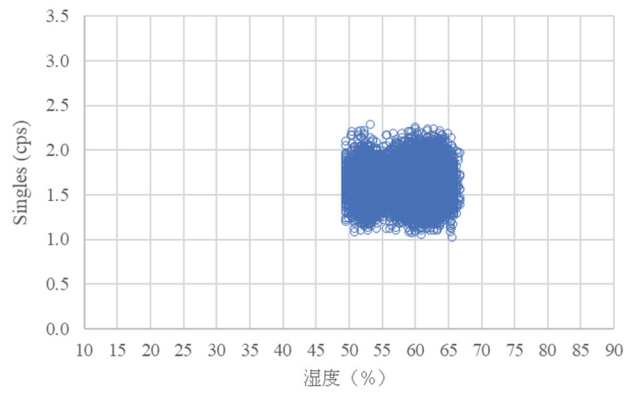


図 2.1.3-71 シングル値と湿度の相関 (2021/5/26 ~ 2021/6/15)
(AFAS-P Top Fork 検出器)

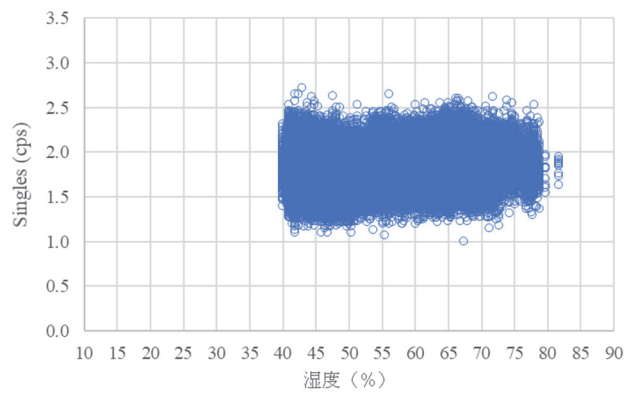


図 2.1.3-72 シングル値と湿度の相関 (2021/7/15 ~ 2022/1/25)
(AFAS-P Top Fork 検出器)

⑤ AFAS-B Bottom Fork 検出器

- バックグラウンドのシングル値：図 2.1.3-73, 74
- シングル値と温度の相関：図 2.1.3-75, 76
- シングル値と湿度の相関：図 2.1.3-77, 78

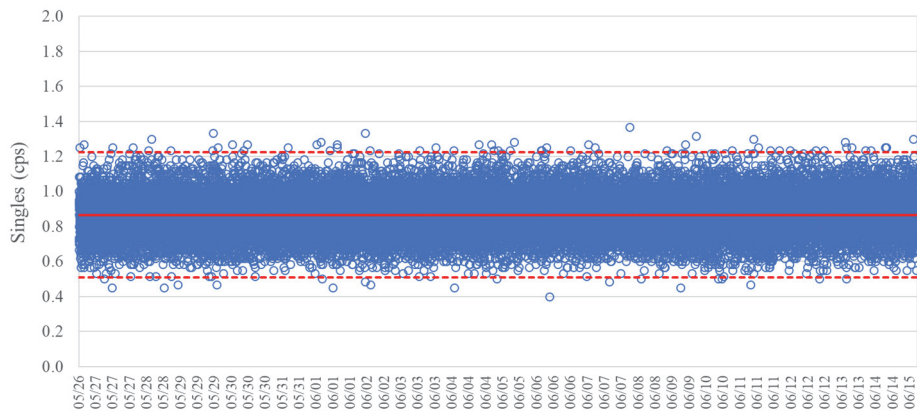


図 2.1.3-73 バックグラウンドのシングル値 (2021/5/26 ~ 2021/6/15)
(AFAS-B Bottom Fork 検出器)

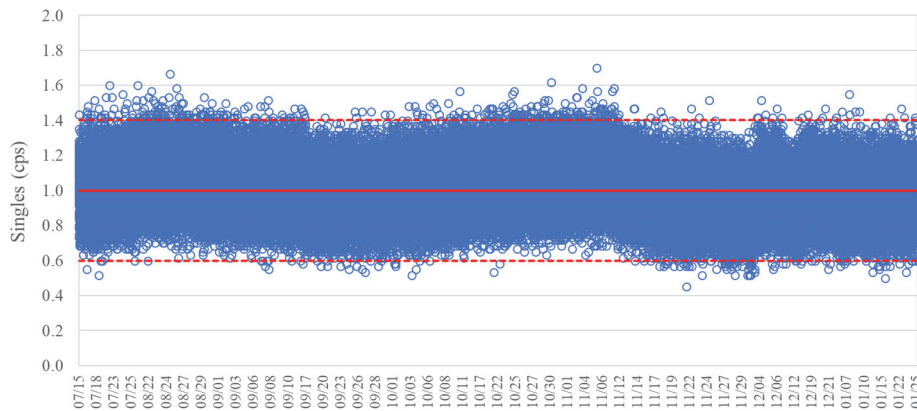


図 2.1.3-74 バックグラウンドのシングル値 (2021/7/15 ~ 2022/1/25)
(AFAS-B Bottom Fork 検出器)

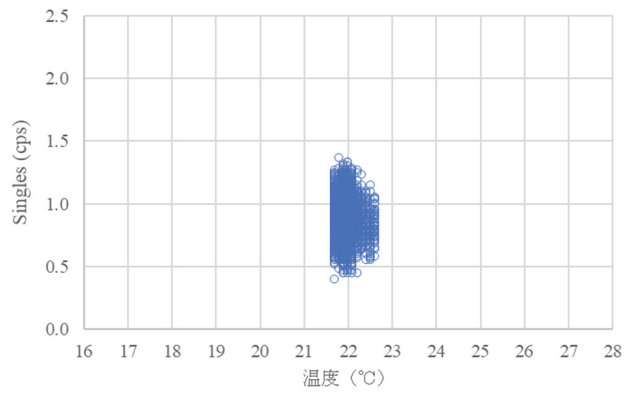


図 2.1.3-75 シングル値と温度の相関 (2021/5/26 ~ 2021/6/15)
(AFAS-B Bottom Fork 検出器)

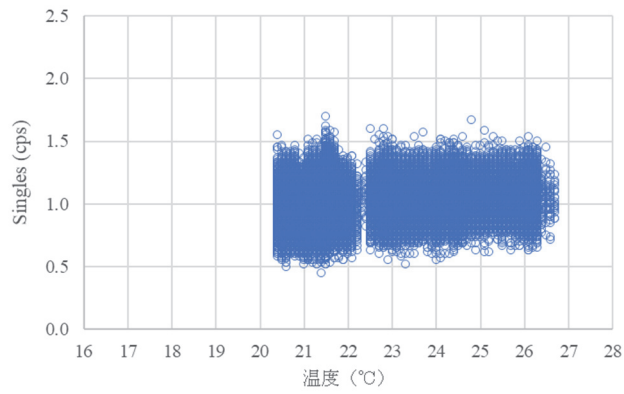


図 2.1.3-76 シングル値と温度の相関 (2021/7/15 ~ 2022/1/25)
(AFAS-B Bottom Fork 検出器)

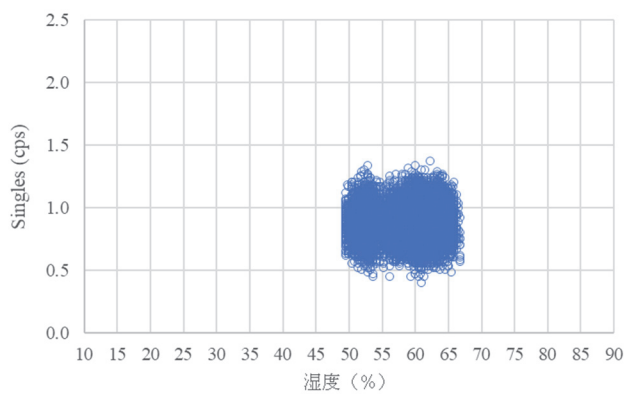


図 2.1.3-77 シングル値と湿度の相関 (2021/5/26 ~ 2021/6/15)
(AFAS-B Bottom Fork 検出器)

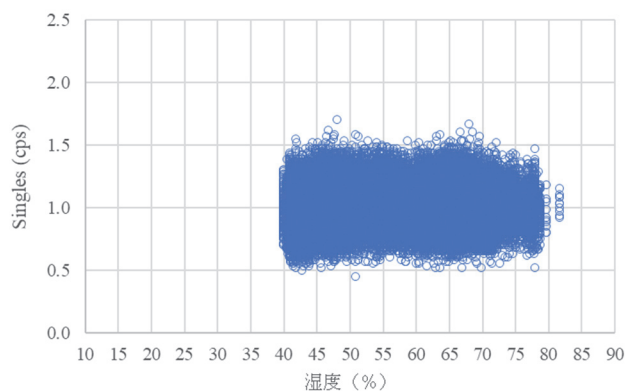


図 2.1.3-78 シングル値と湿度の相関 (2021/7/15 ~ 2022/1/25)
(AFAS-B Bottom Fork 検出器)

⑥ AFAS-P Bottom Fork 検出器

- バックグラウンドのシングル値 : 図 2.1.3-79, 80
- シングル値と湿度の相関 : 図 2.1.3-81, 82
- シングル値と湿度の相関 : 図 2.1.3-83, 84

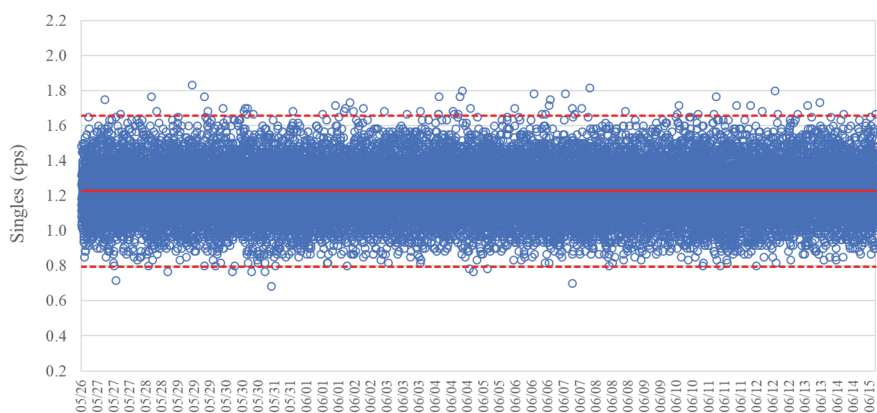


図 2.1.3-79 バックグラウンドのシングル値 (2021/5/26 ~ 2021/6/15)
(AFAS-P Bottom Fork 検出器)

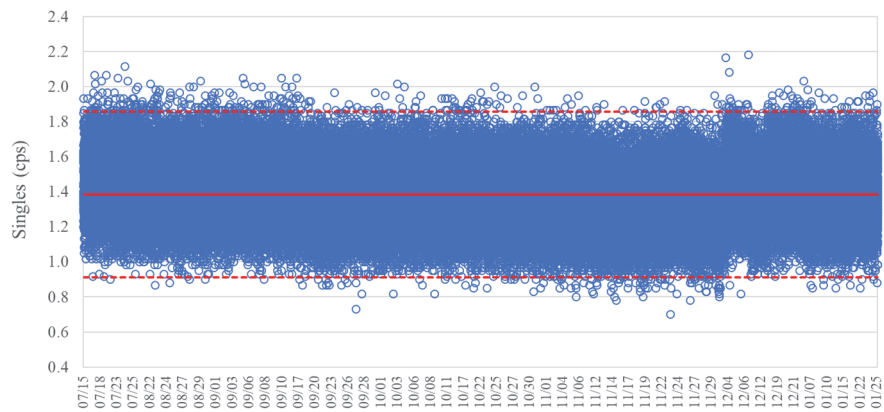


図 2.1.3-80 バックグラウンドのシングル値 (2021/7/15 ~ 2022/1/25)
(AFAS-P Bottom Fork 検出器)

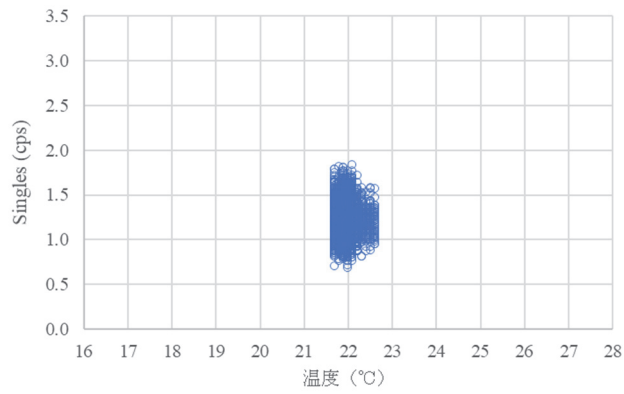


図 2.1.3-81 シングル値と温度の相関 (2021/5/26 ~ 2021/6/15)
(AFAS-P Bottom Fork 検出器)

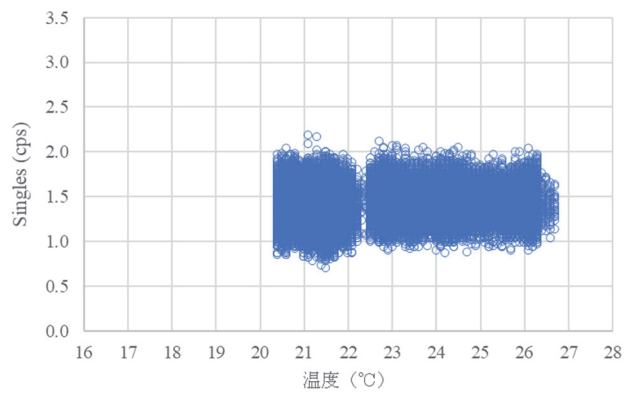


図 2.1.3-82 シングル値と温度の相関 (2021/7/15 ~ 2022/1/25)
(AFAS-P Bottom Fork 検出器)

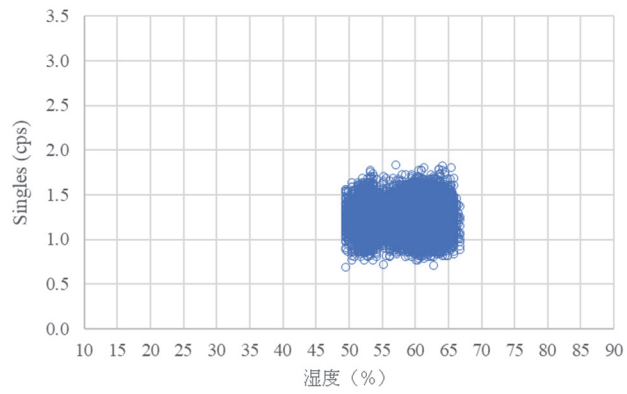


図 2.1.3-83 シングル値と湿度の相関 (2021/5/26 ~ 2021/6/15)
(AFAS-P Bottom Fork 検出器)

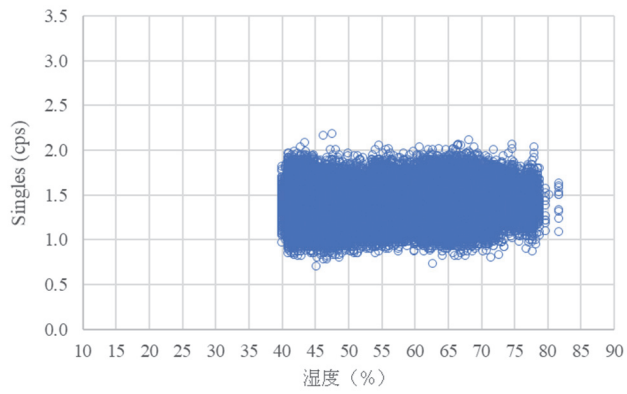


図 2.1.3-84 シングル値と湿度の相関 (2021/7/15 ~ 2022/1/25)
(AFAS-P Bottom Fork 検出器)

(2) ^{252}Cf 中性子線源測定

AFAS-B 及び AFAS-P において、2021 年 4 月から 2022 年 3 月までの間に月 1 回の頻度で測定を行い、各月ごとに計数値と期待値の相対差（以下、「%Difference」という）（図 2.1.3-85～94^{*8}）を示す。各グラフ中の赤色の実線は各 %Difference の平均値を示し、破線は管理限界値（各 %Difference の誤差の二乗平均平方根を 3 倍した値を %Difference 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) 及び (2.2) に示す。いずれの検出器においても各 %Difference は、各管理限界値の範囲内となった。

また、計数値と温度及び湿度との相関の有無の確認結果を図 2.1.3-95～114 に示す。各測定において、温度は約 17°C ～ 22°C 、湿度は約 25%～74%の範囲で変動したが、これらの変動が計数値に与える影響はみられなかった。

*8: INCC ソフトウェアにより計算される期待値は、 ^{252}Cf 中性子線源に不純物として微量に含まれる ^{250}Cf などが放出する中性子の影響により、経年とともに測定値との差が大きくなることが分かっている。2021 年 7 月の時点において、AFAS-B 及び AFAS-P の Top Fork 及び Bottom Fork 検出器の測定値は、前述の理由により判定基準（期待値との差が $\pm 3\%$ 以内であること）を超過するおそれがあったため、2021 年 7 月の AFAS 維持管理作業時に各初期値の再取得を行った。そのため、本確認における当該各検出器の測定結果は、初期値の再取得前後の期間（2021 年 4 月～7 月及び 2021 年 7 月～2022 年 3 月）ごとに示した。

$$UL = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \%Difference_i + 3 \times \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\sigma \%Difference_i)^2} \quad \dots (2.1)$$

$$LL = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \%Difference_i - 3 \times \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\sigma \%Difference_i)^2} \quad \dots (2.2)$$

ただし、 n は 2021 年 4 月から 2022 年 3 月までの間に月 1 回の頻度で測定した回数であり、

$\sigma \%Difference$ は計数値と期待値の %Difference の誤差である。（ $n = 1$ は 2021 年 4 月のデータとする）

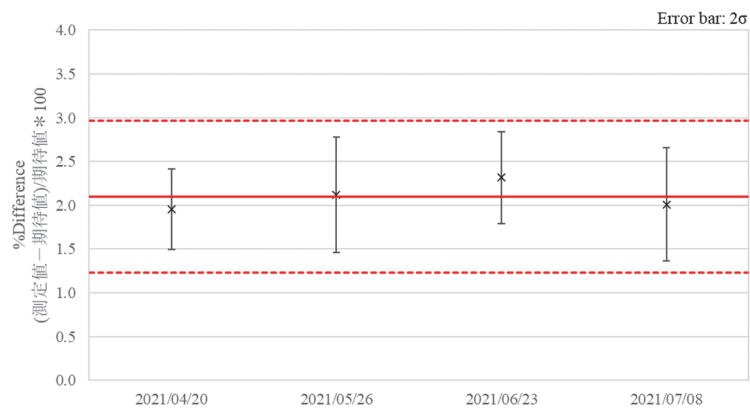


図 2.1.3-85 月ごとの%Difference の評価結果 (2021年4月～7月)
(AFAS-B Top Fork 検出器)

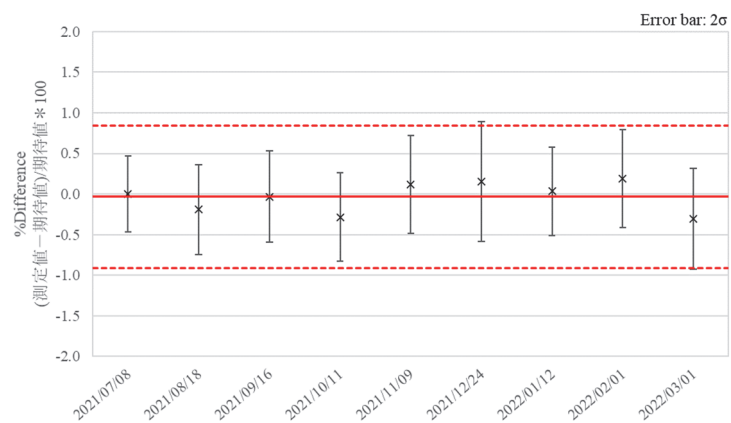


図 2.1.3-86 月ごとの%Difference の評価結果 (2021年7月～2022年3月)
(AFAS-B Top Fork 検出器)

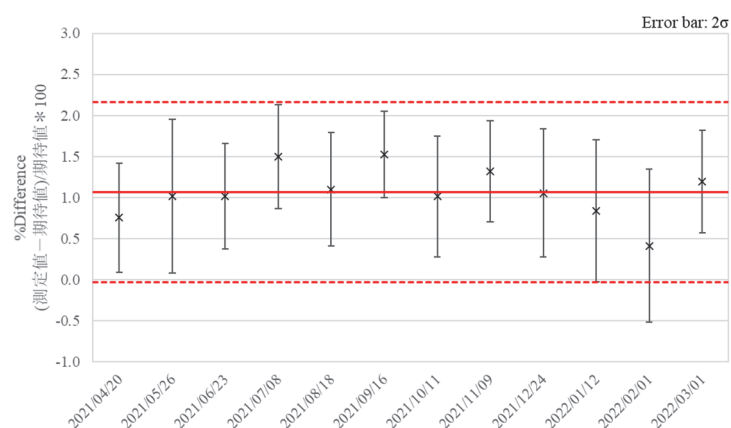


図 2.1.3-87 月ごとの%Difference の評価結果 (2021年4月～2022年3月)
(AFAS-B Collar 検出器)

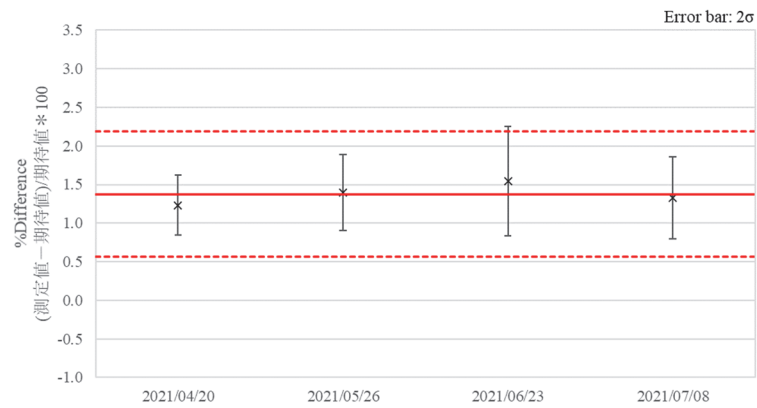


図 2.1.3-88 月ごとの%Difference の評価結果 (2021年4月～7月)
(AFAS-B Bottom Fork 検出器)

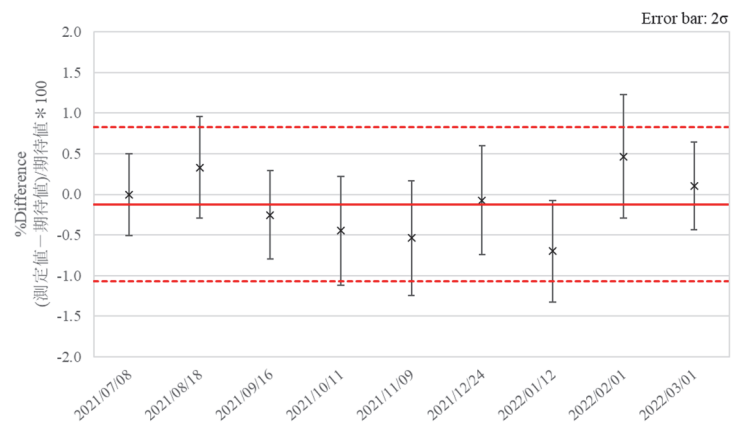


図 2.1.3-89 月ごとの%Difference の評価結果 (2021年7月～2022年3月)
(AFAS-B Bottom Fork 検出器)

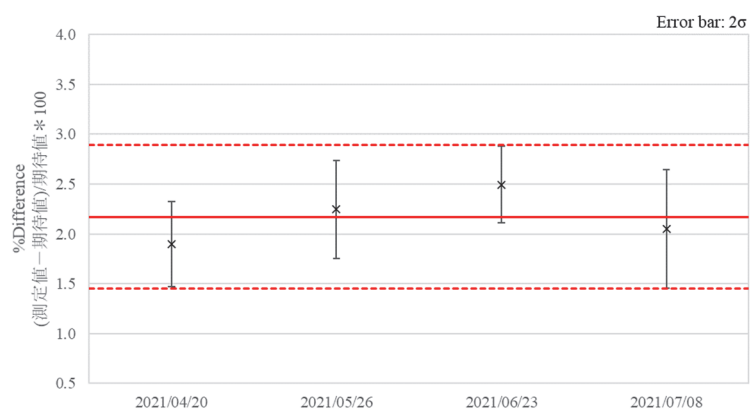


図 2.1.3-90 月ごとの%Difference の評価結果 (2021年4月～7月)
(AFAS-P Top Fork 検出器)

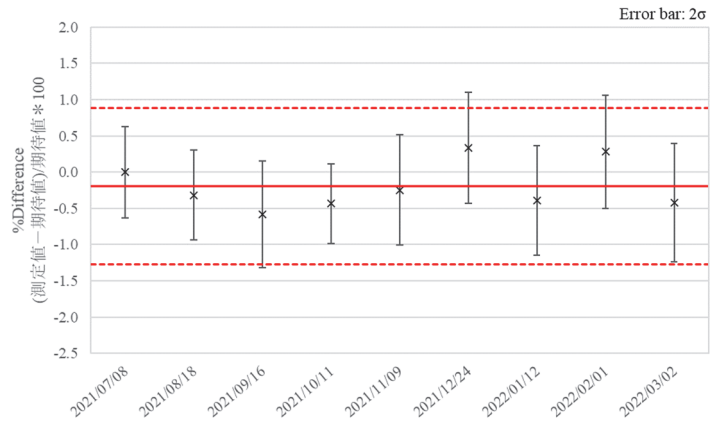


図 2.1.3-91 月ごとの%Difference の評価結果 (2021年7月~2022年3月)
(AFAS-P Top Fork 検出器)

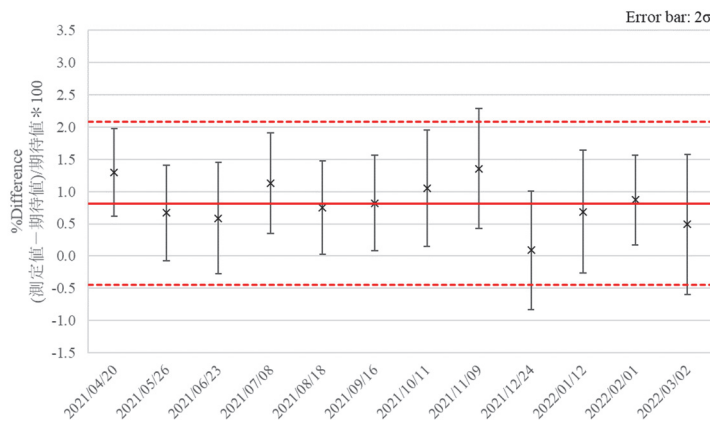


図 2.1.3-92 月ごとの%Difference の評価結果 (2021年4月~2022年3月)
(AFAS-P Collar 検出器)

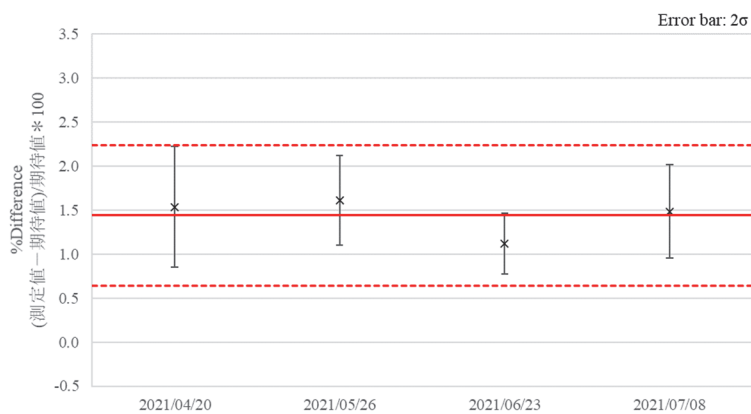


図 2.1.3-93 月ごとの%Difference の評価結果 (2021年4月~7月)
(AFAS-P Bottom Fork 検出器)

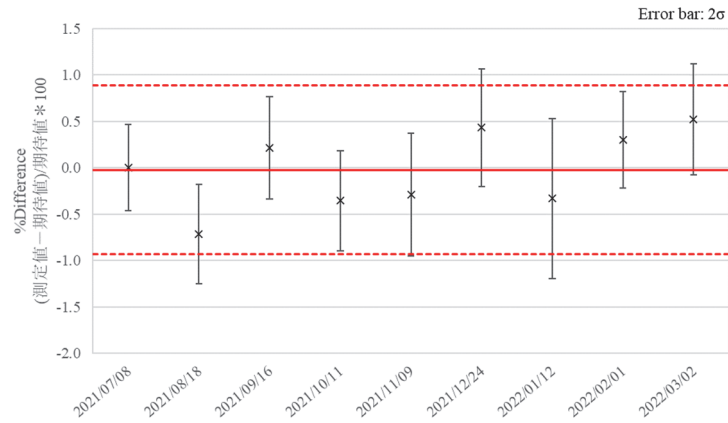


図 2.1.3-94 月ごとの%Difference の評価結果 (2021年7月～2022年3月)
(AFAS-P Bottom Fork 検出器)

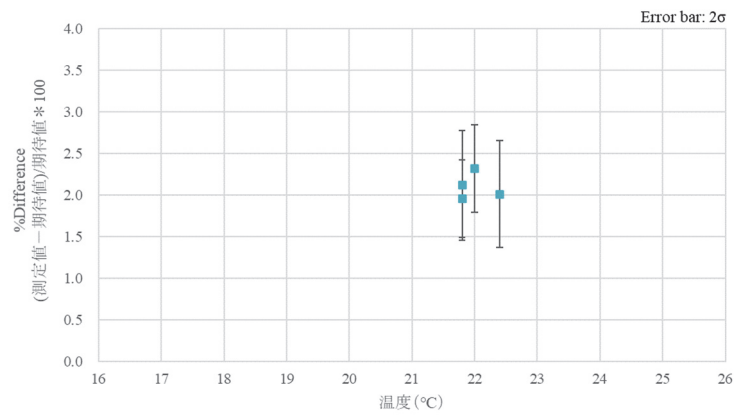


図 2.1.3-95 計数值と温度の相関 (2021年4月～7月)
(AFAS-B Top Fork 検出器)

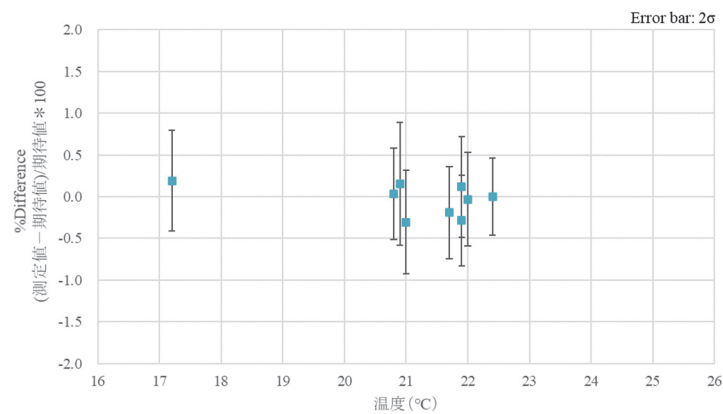


図 2.1.3-96 計数值と温度の相関 (2021年7月～2022年3月)
(AFAS-B Top Fork 検出器)

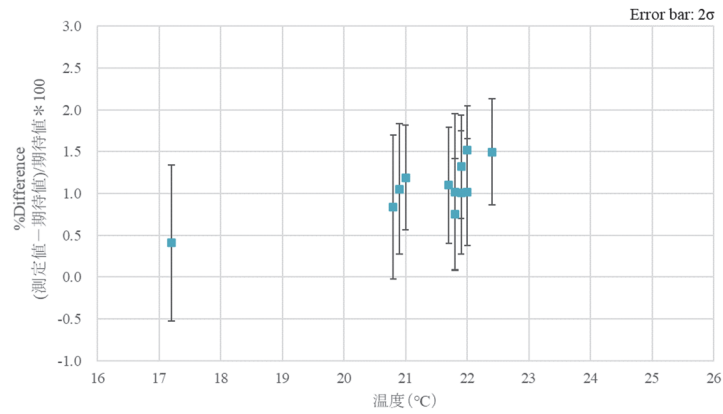


図 2.1.3-97 計数値と温度の相関 (2021年4月～2022年3月)
(AFAS-B Collar 検出器)

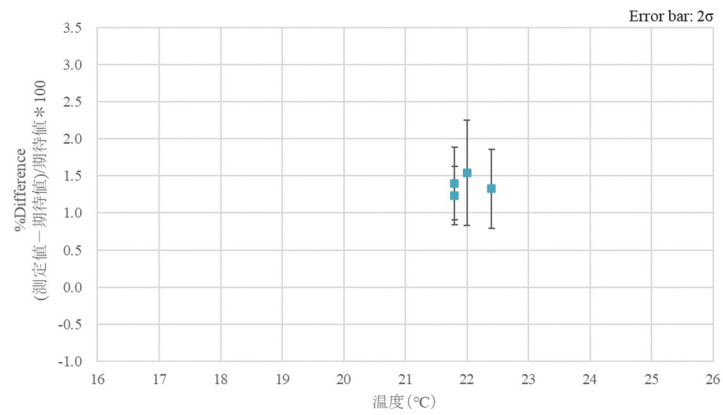


図 2.1.3-98 計数値と温度の相関 (2021年4月～7月)
(AFAS-B Bottom Fork 検出器)

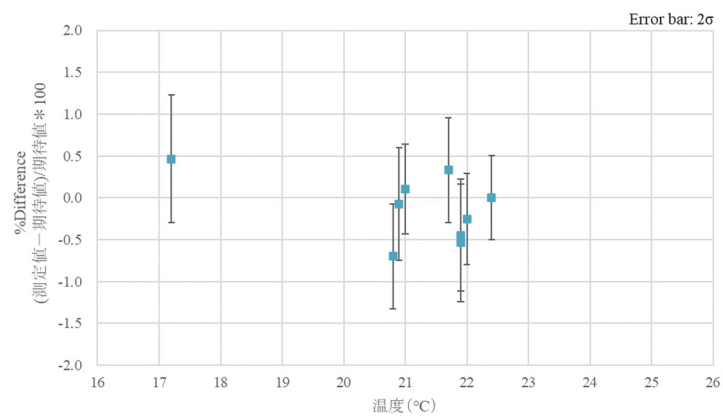


図 2.1.3-99 計数値と温度の相関 (2021年7月～2022年3月)
(AFAS-B Bottom Fork 検出器)

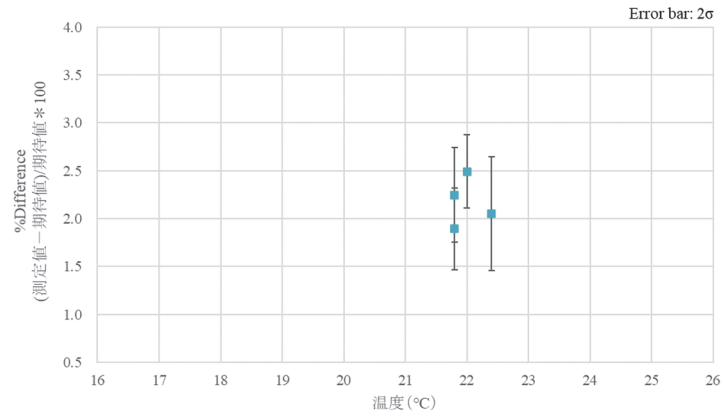


図 2.1.3-100 計数值と温度の相関 (2021年4月~7月)
(AFAS-P Top Fork 検出器)

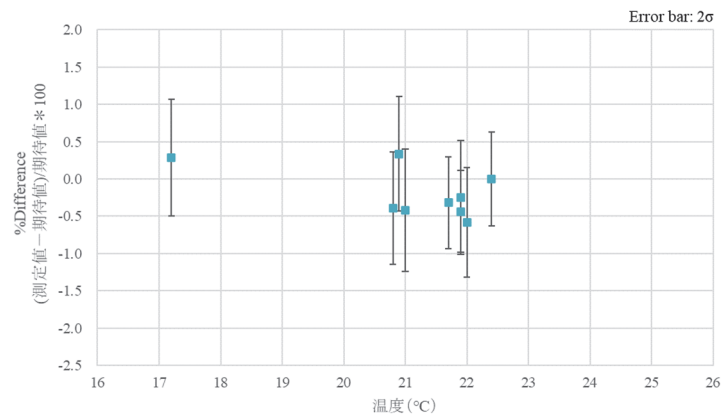


図 2.1.3-101 計数值と温度の相関 (2021年7月~2022年3月)
(AFAS-P Top Fork 検出器)

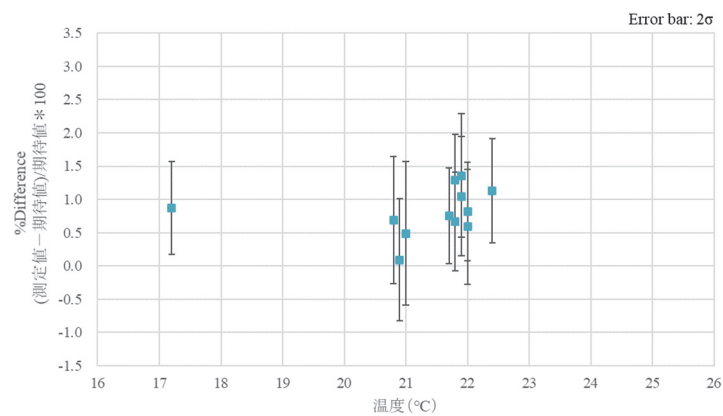


図 2.1.3-102 計数值と温度の相関 (2021年4月~2022年3月)
(AFAS-P Collar 検出器)

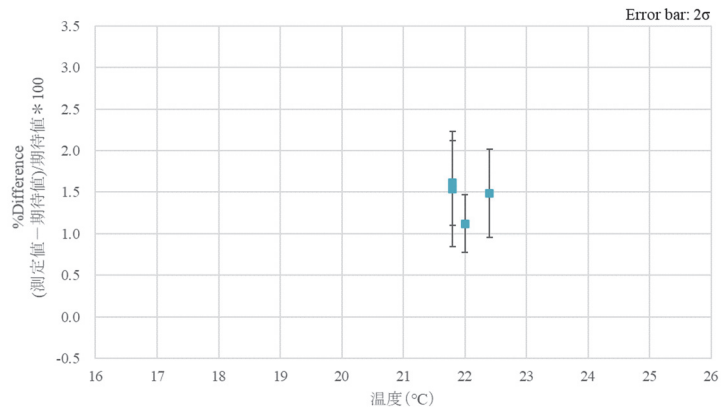


図 2.1.3-103 計数値と温度の相関 (2021年4月~7月)
(AFAS-P Bottom Fork 検出器)

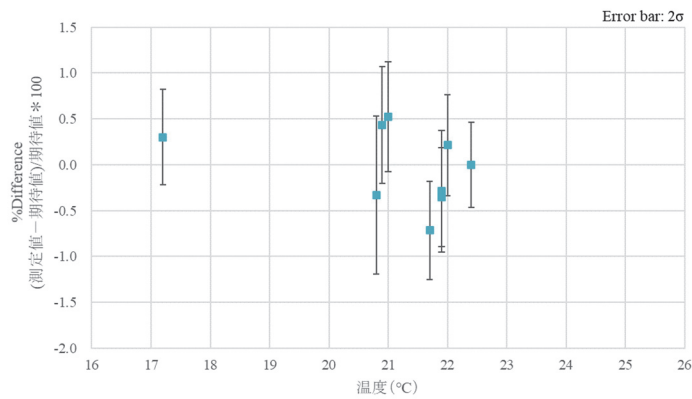


図 2.1.3-104 計数値と温度の相関 (2021年7月~2022年3月)
(AFAS-P Bottom Fork 検出器)

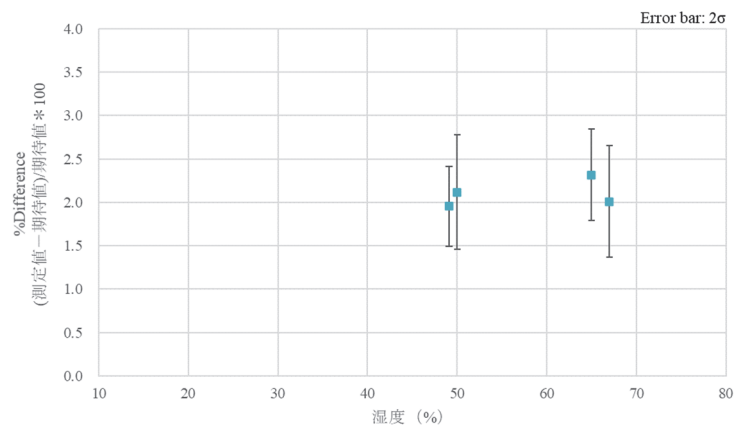


図 2.1.3-105 計数値と湿度の相関 (2021年4月~7月)
(AFAS-B Top Fork 検出器)

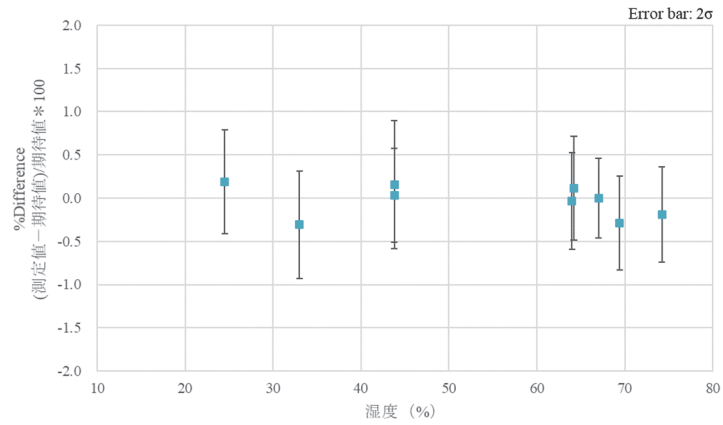


図 2.1.3-106 計数値と湿度の相関 (2021年7月～2022年3月)
(AFAS-B Top Fork 検出器)

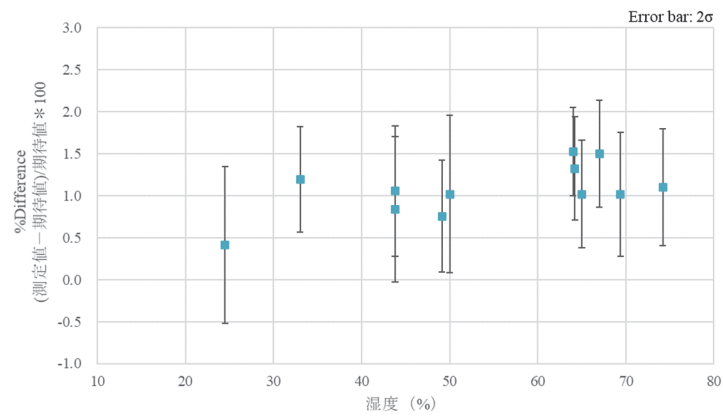


図 2.1.3-107 計数値と湿度の相関 (2021年4月～2022年3月)
(AFAS-B Collar 検出器)

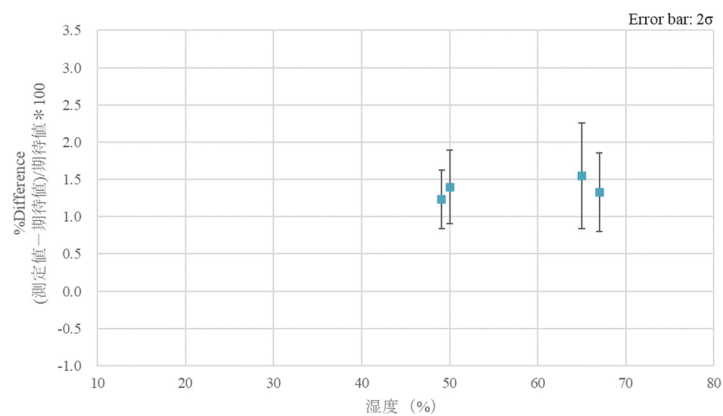


図 2.1.3-108 計数値と湿度の相関 (2021年4月～7月)
(AFAS-B Bottom Fork 検出器)

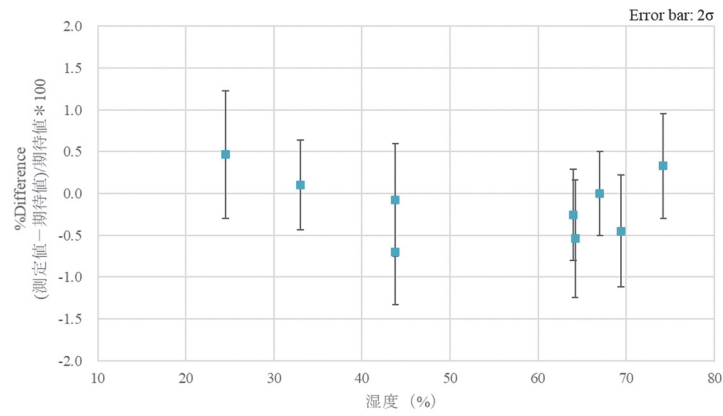


図 2.1.3-109 計数值と湿度の相関 (2021年7月~2022年3月)
(AFAS-B Bottom Fork 検出器)

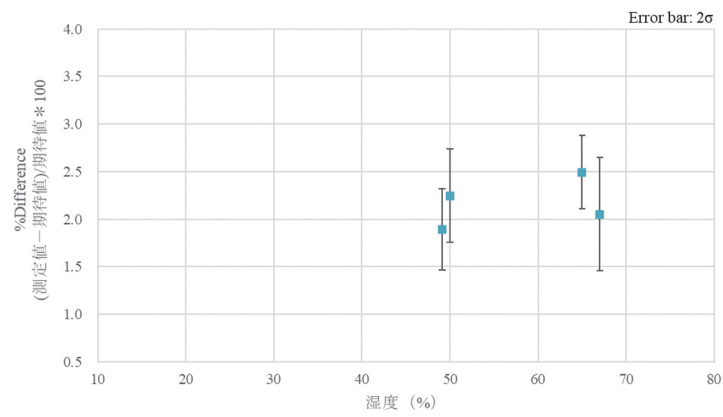


図 2.1.3-110 計数值と湿度の相関 (2021年4月~7月)
(AFAS-P Top Fork 検出器)

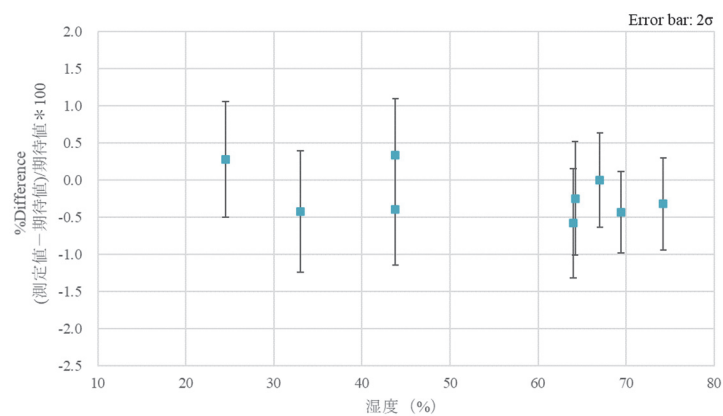


図 2.1.3-111 計数值と湿度の相関 (2021年7月~2022年3月)
(AFAS-P Top Fork 検出器)

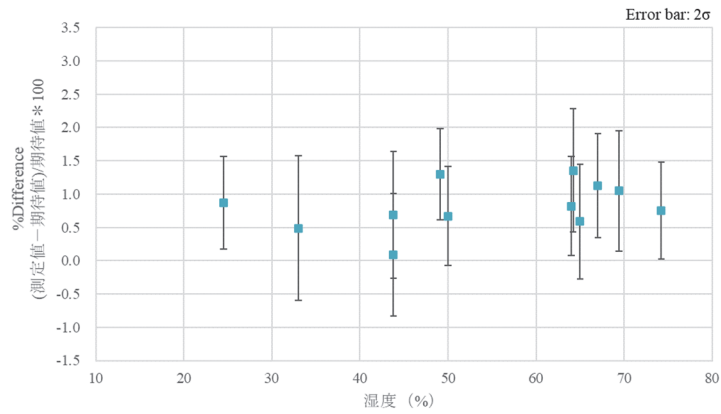


図 2.1.3-112 計数值と湿度の相関 (2021年4月~2022年3月)
(AFAS-P Collar 検出器)

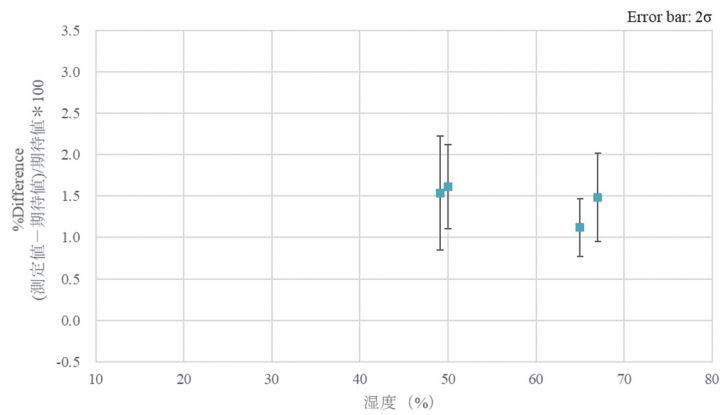


図 2.1.3-113 計数值と湿度の相関 (2021年4月~7月)
(AFAS-P Bottom Fork 検出器)

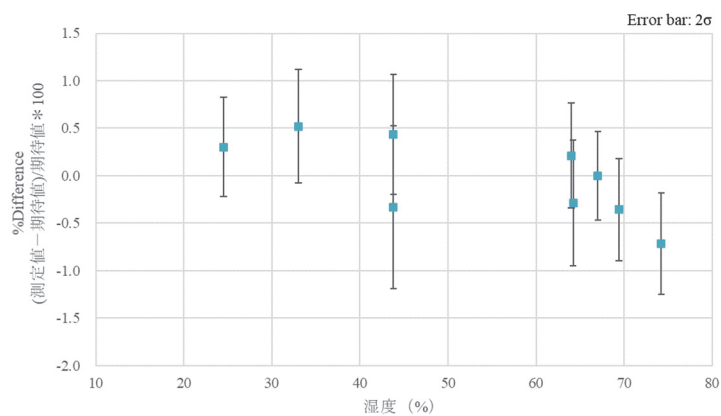


図 2.1.3-114 計数值と湿度の相関 (2021年7月~2022年3月)
(AFAS-P Bottom Fork 検出器)

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、シングル値が一時的に低下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、AFAS-P の Collar 検出器においてみられた、単発的な高計数値が5月～10月に複数回測定される事象については、シングル値及びダブル値において同時に確認されており、他の検出器では確認されなかったため、宇宙線や環境の変化による影響ではないと考えられる。本事象については、前年度（令和2年度）の性能確認試験^(参考文献2)においても同様の事象が確認されており、検出器の不具合により発生している事象である可能性があるため、LANL に報告済みである。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 20°C ～ 27°C 、湿度：約 40% ～ 82% ）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 %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 中性子線源を測定し、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、本評価結果と前年度（令和 2 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 31 年度及び令和 2 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、本評価で使用する ^{252}Cf 中性子線源 (T1-349) を 1.6 項の表 1.6-1 に示す。

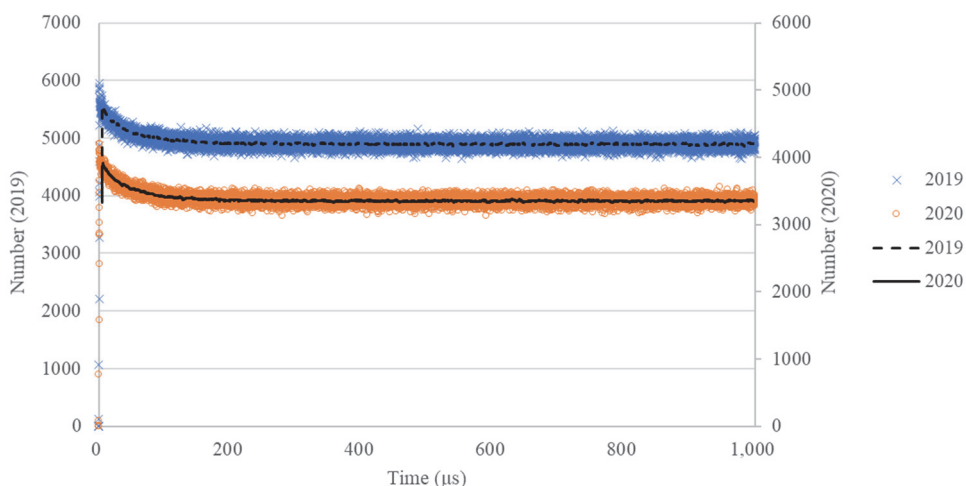


図 2.2.2-1 AFAS-B Collar 検出器 アンプ A のパルス間隔分布の例

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	Top Fork	1
	Collar	6
	Bottom Fork	1
AFAS-P	Top Fork	1
	Collar	10
	Bottom Fork	1

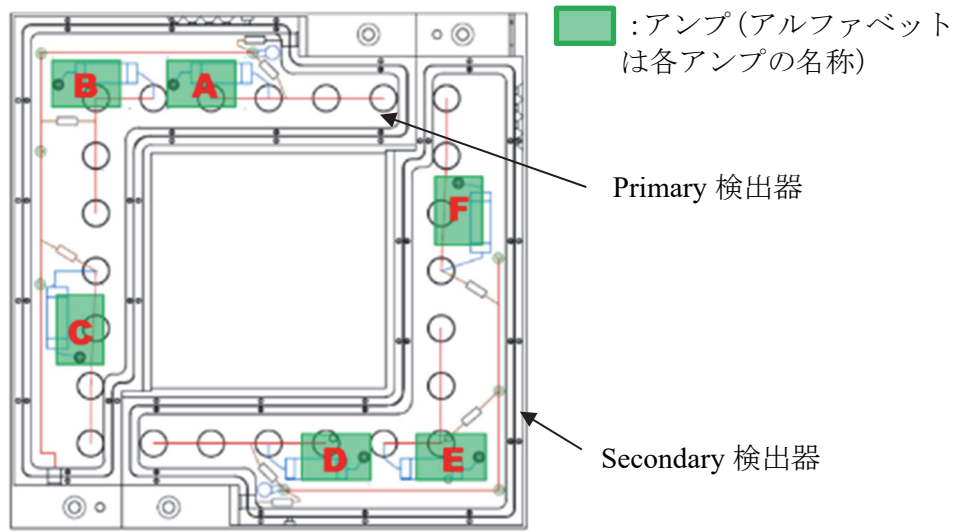


図 2.2.2-2 AFAS-B Collar 検出器のアンプ配置図

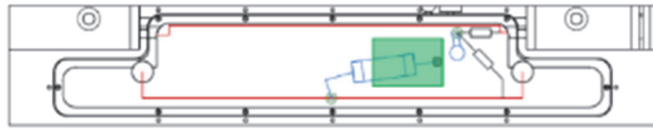


図 2.2.2-3 AFAS-B Top Fork 及び Bottom Fork 検出器のアンプ配置図

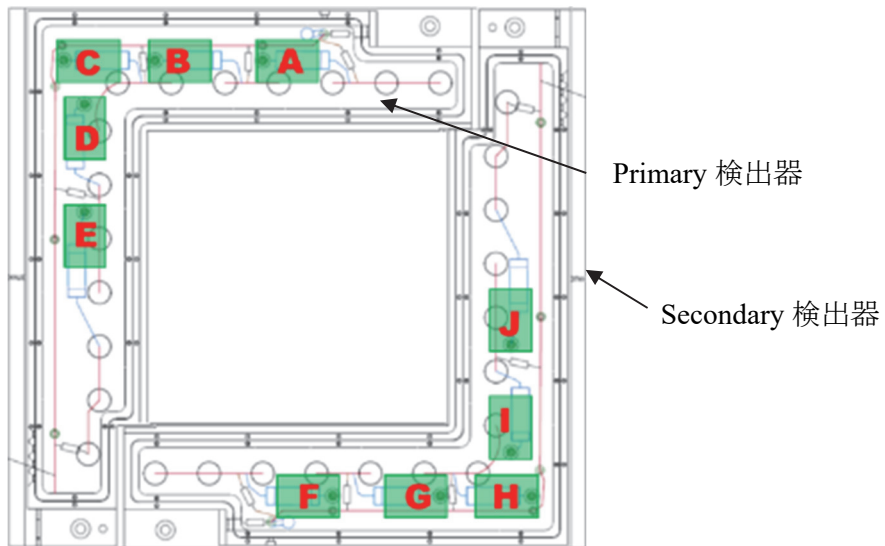


図 2.2.2-4 AFAS-P Collar 検出器のアンプ配置図

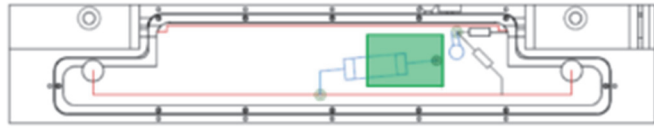


図 2.2.2-5 AFAS-P Top Fork 及び Bottom Fork 検出器のアンプ配置図

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、 ^{252}Cf 中性子線源 (T1-349^{*9}) 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し、パルス間隔分布を評価する。
 - ・ AFAS-B 測定時間 : Collar 検出器 : 10 分、Fork 検出器 : 100 分
 - ・ AFAS-P 測定時間 : Collar 検出器 : 10 分、Fork 検出器 : 100 分
- 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。

*9: 前年度 (令和 2 年度) 以前の同評価に用いていた ^{252}Cf 中性子線源 (Q2-334) は、減衰により線源強度が低下したことから、本年度の検討では、線源強度が高い新たな線源 (T1-349) を使用する。

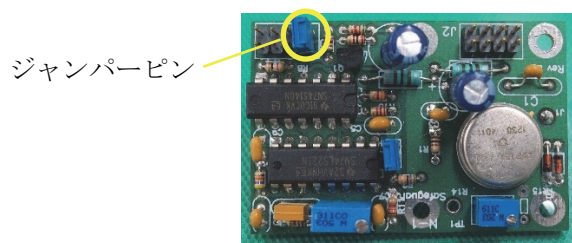


写真 2.2.2-1 AFAS のアンプ (AMPTEK A111)

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。本評価結果と令和 2 年度（2020 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×印及び破線は令和 2 年度（2020 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、○印及び実線は令和 3 年度（2021 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。

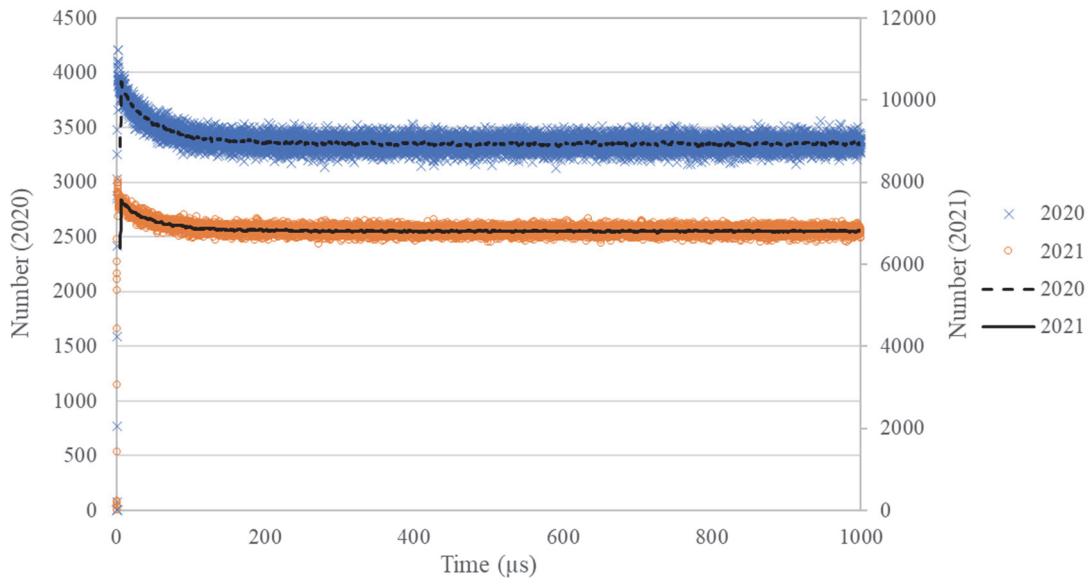


図 2.2.3-1 AFAS-B Collar 検出器 アンプ A のパルス間隔分布の比較（0～1000 μ s）

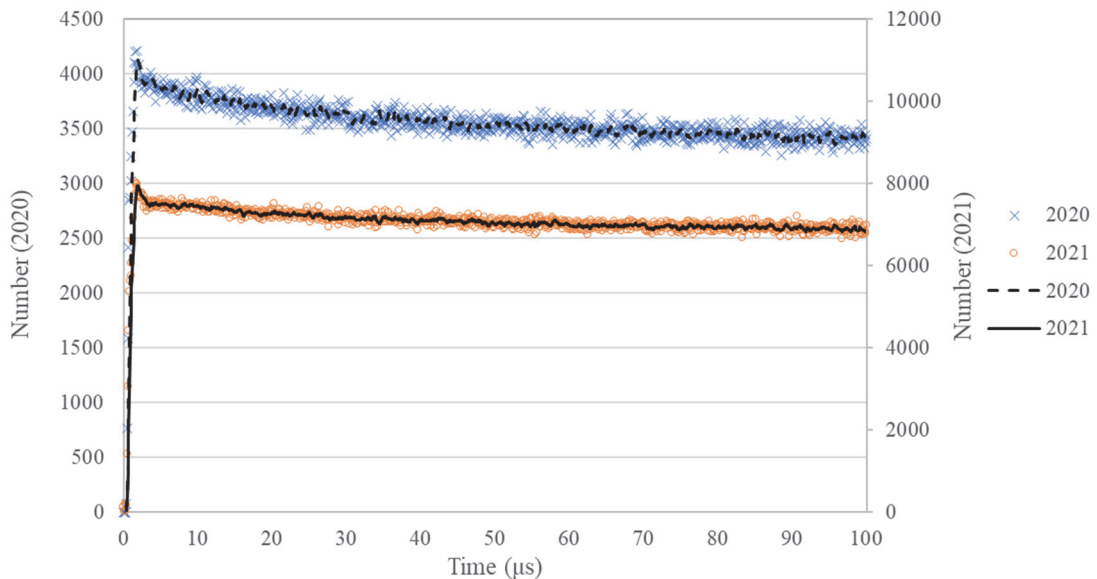


図 2.2.3-2 AFAS-B Collar 検出器 アンプ A のパルス間隔分布の比較（0～100 μ s）

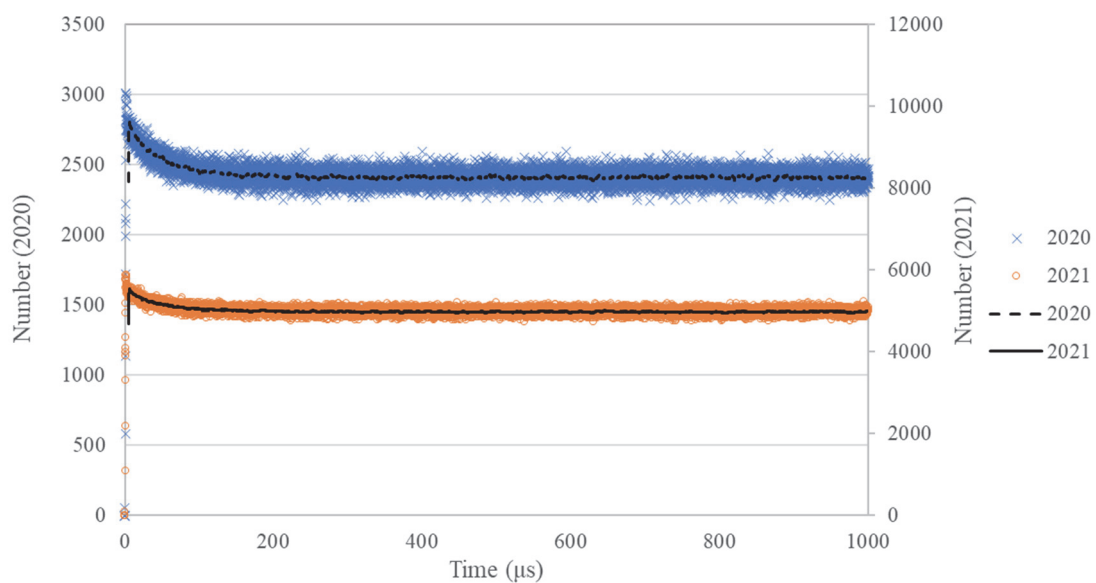


図 2.2.3-3 AFAS-B Collar 検出器 アンプ B のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

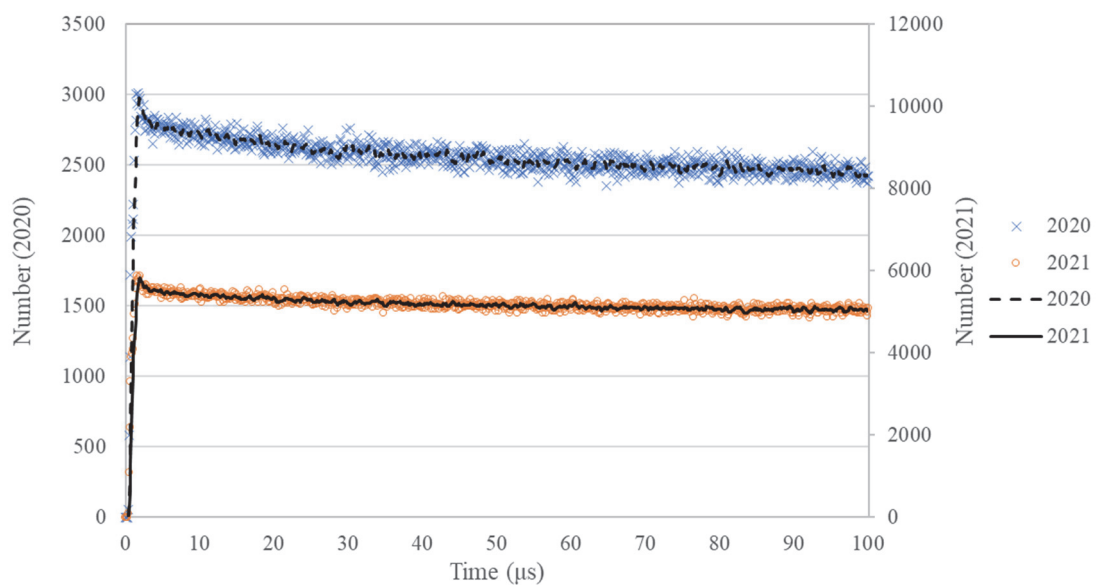


図 2.2.3-4 AFAS-B Collar 検出器 アンプ B のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

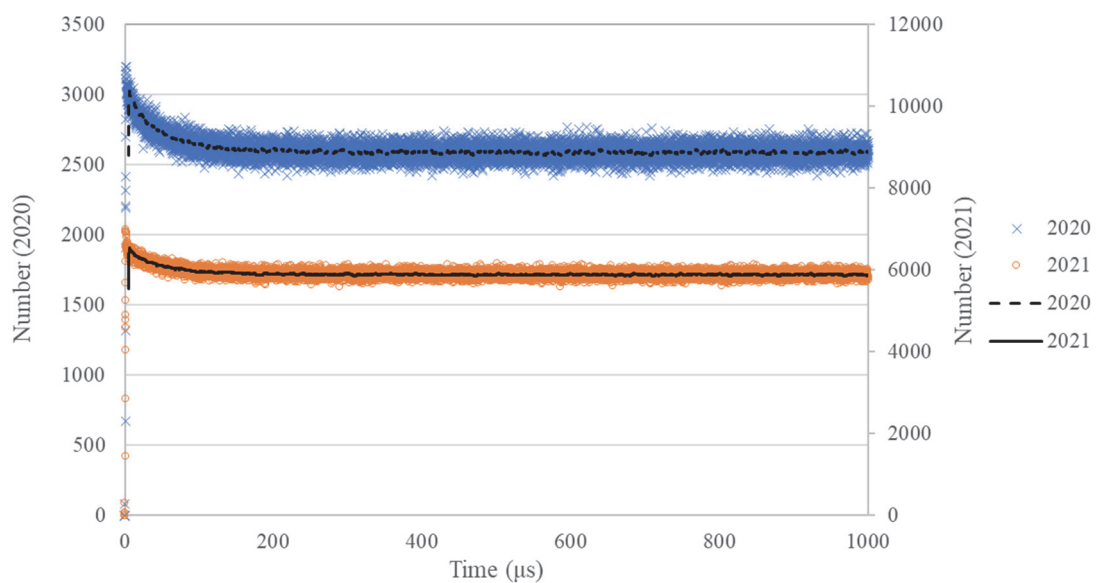


図 2.2.3-5 AFAS-B Collar 検出器 アンプ C のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

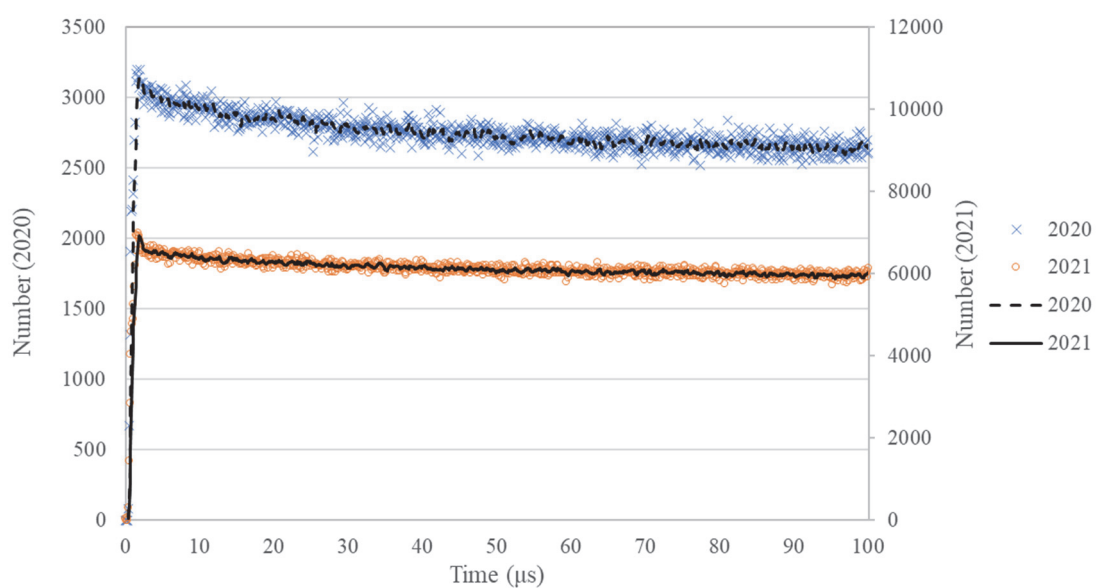


図 2.2.3-6 AFAS-B Collar 検出器 アンプ C のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

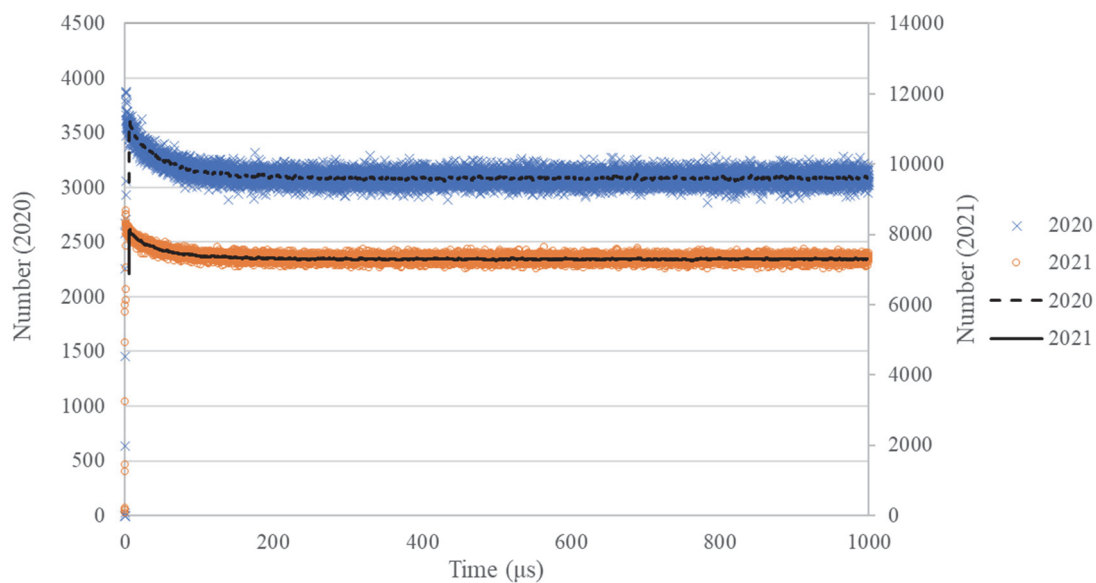


図 2.2.3-7 AFAS-B Collar 検出器 アンプ D のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

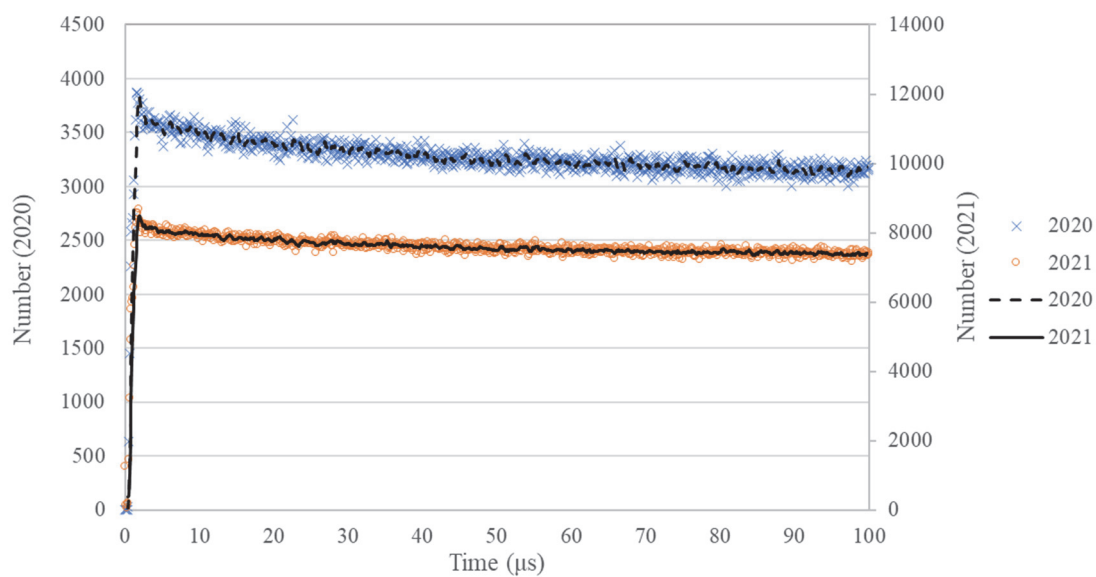


図 2.2.3-8 AFAS-B Collar 検出器 アンプ D のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

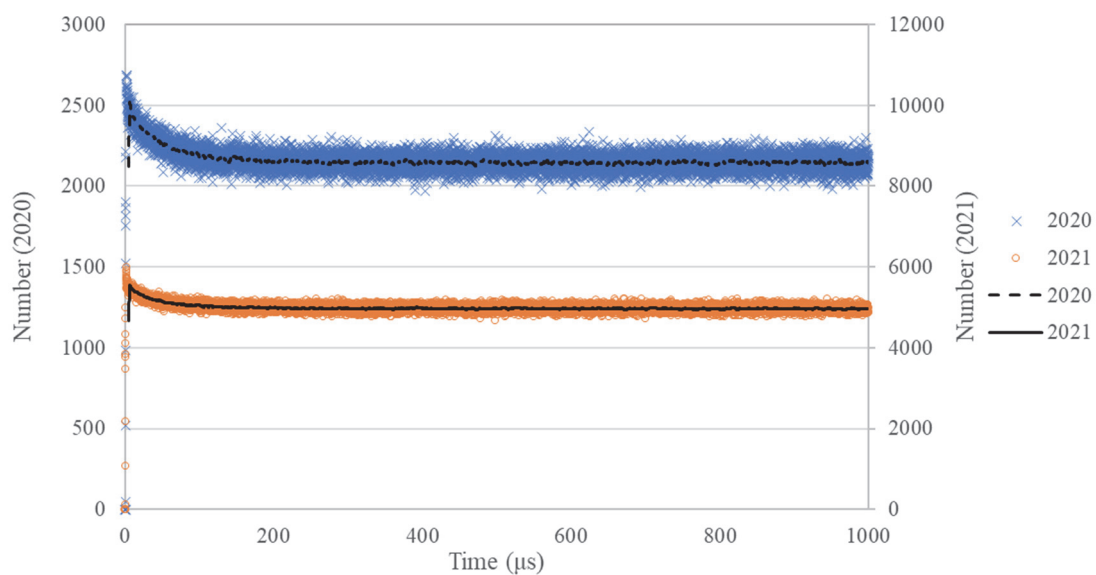


図 2.2.3-9 AFAS-B Collar 検出器 アンプ E のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

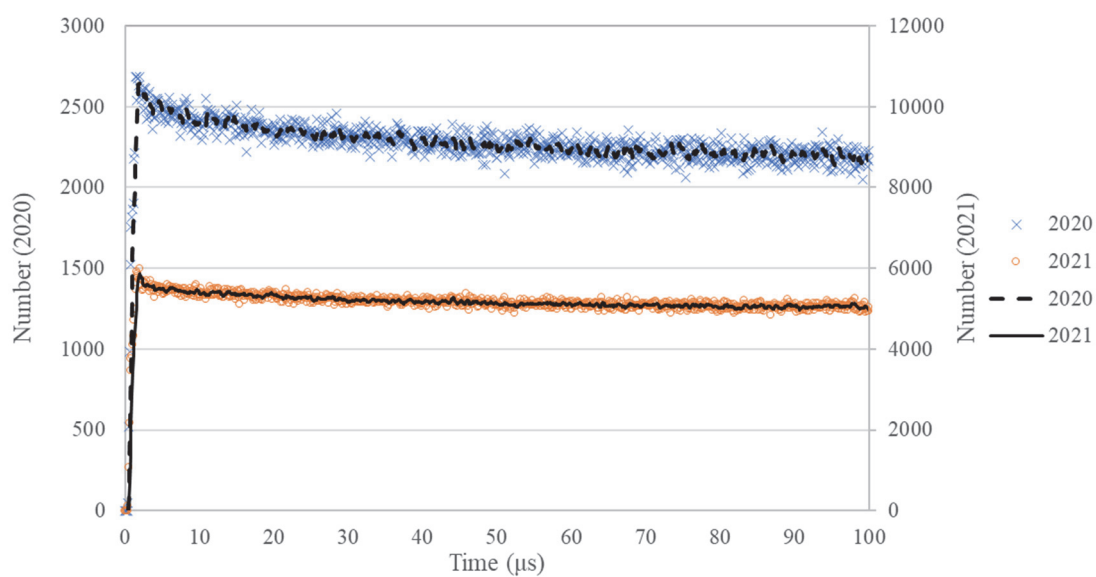


図 2.2.3-10 AFAS-B Collar 検出器 アンプ E のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

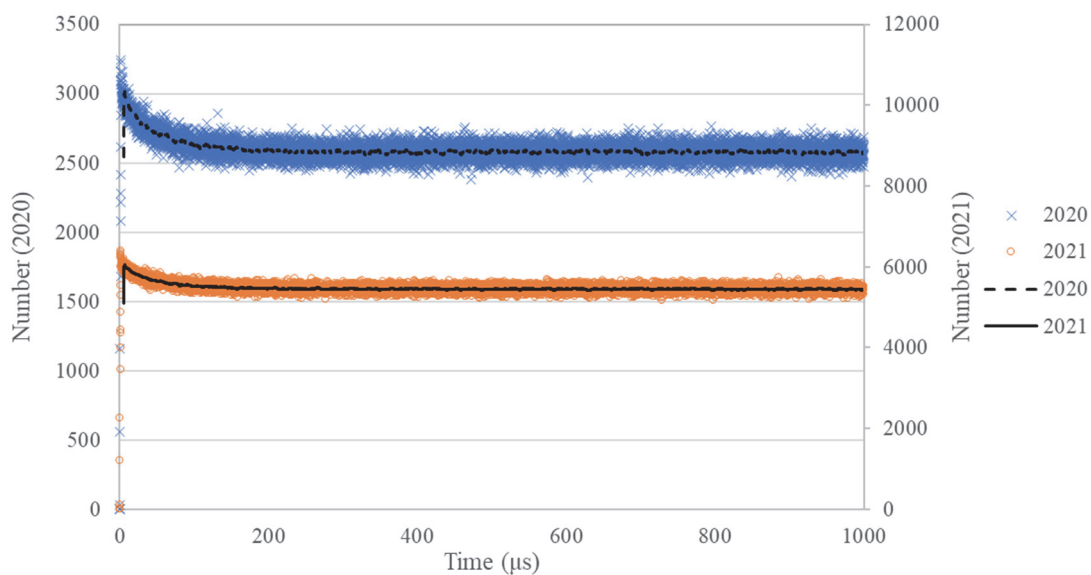


図 2.2.3-11 AFAS-B Collar 検出器 アンプ F のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

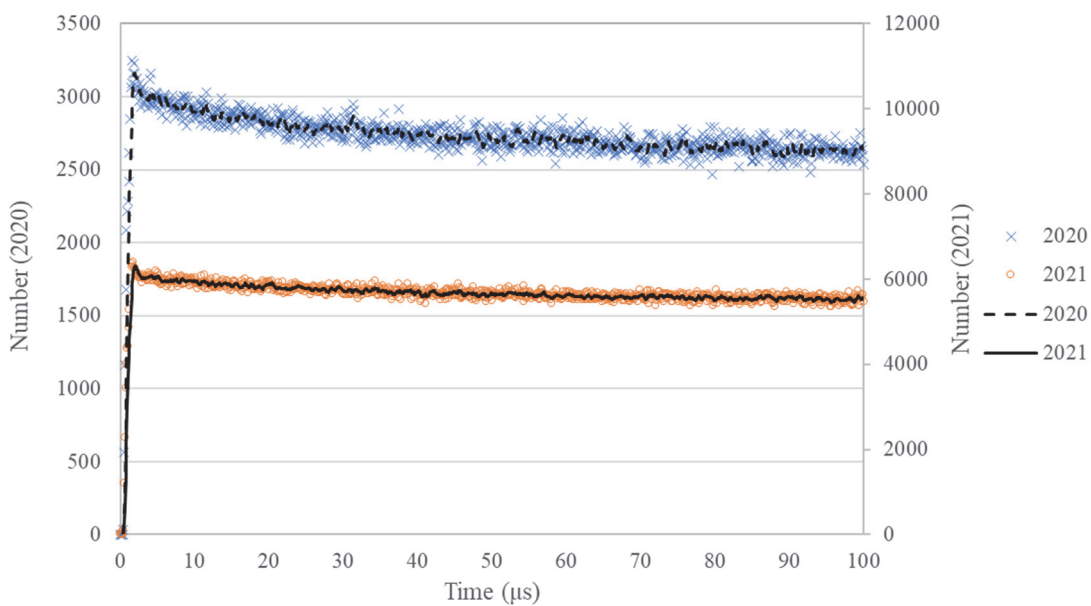


図 2.2.3-12 AFAS-B Collar 検出器 アンプ F のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

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。本評価結果と令和 2 年度（2020 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×印及び破線は令和 2 年度（2020 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、○印及び実線は令和 3 年度（2021 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。

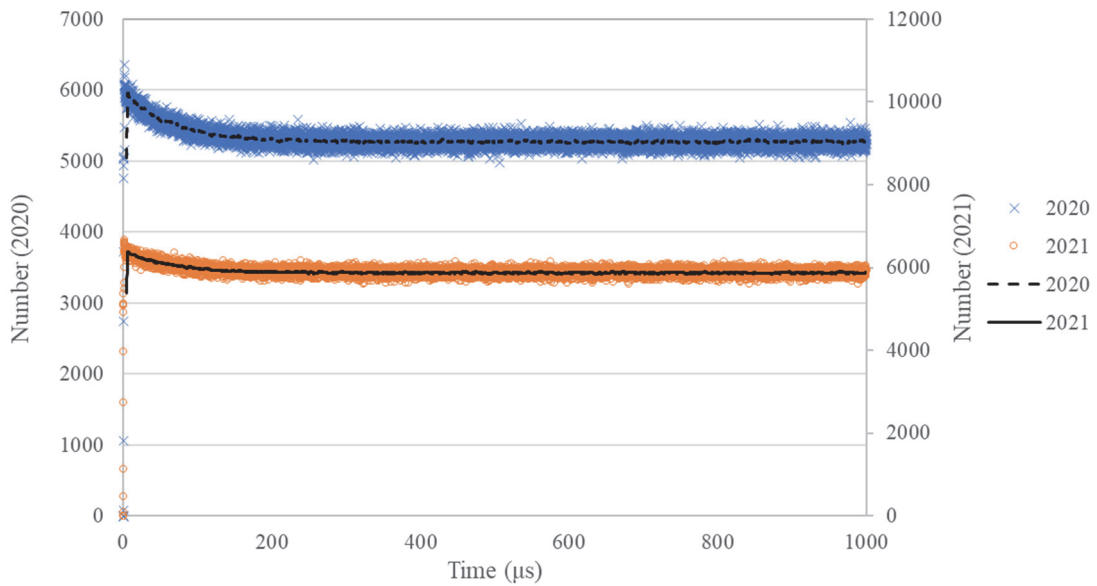


図 2.2.3-13 AFAS-B Top Fork 検出器 パルス間隔分布の比較（0～1000 μ s）

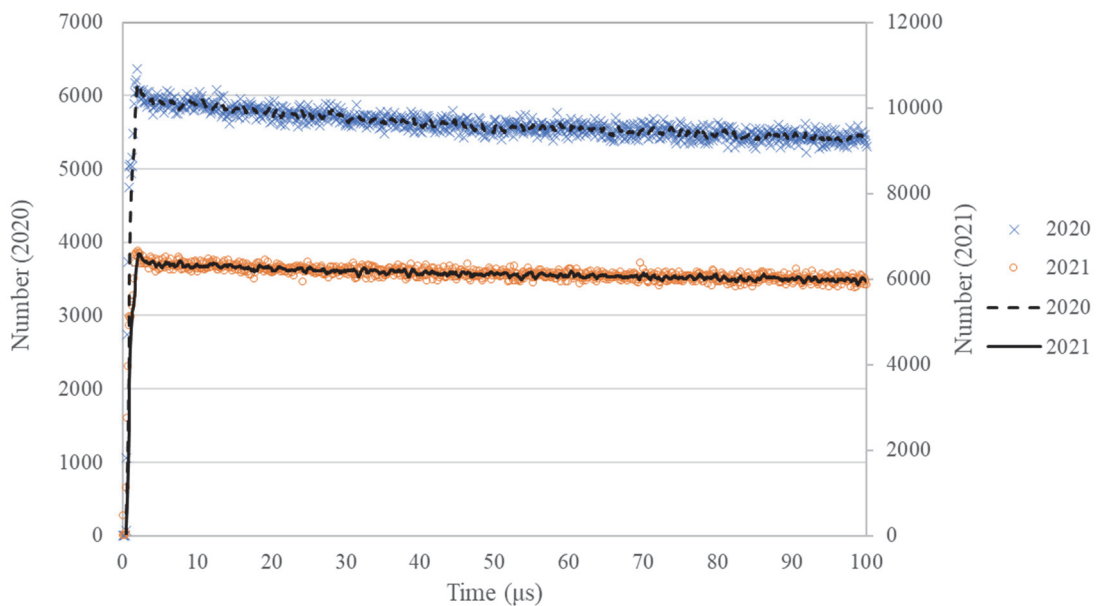


図 2.2.3-14 AFAS-B Top Fork 検出器 パルス間隔分布の比較（0～100 μ s）

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。本評価結果と令和2年度（2020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×印及び破線は令和2年度（2020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、○印及び実線は令和3年度（2021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。

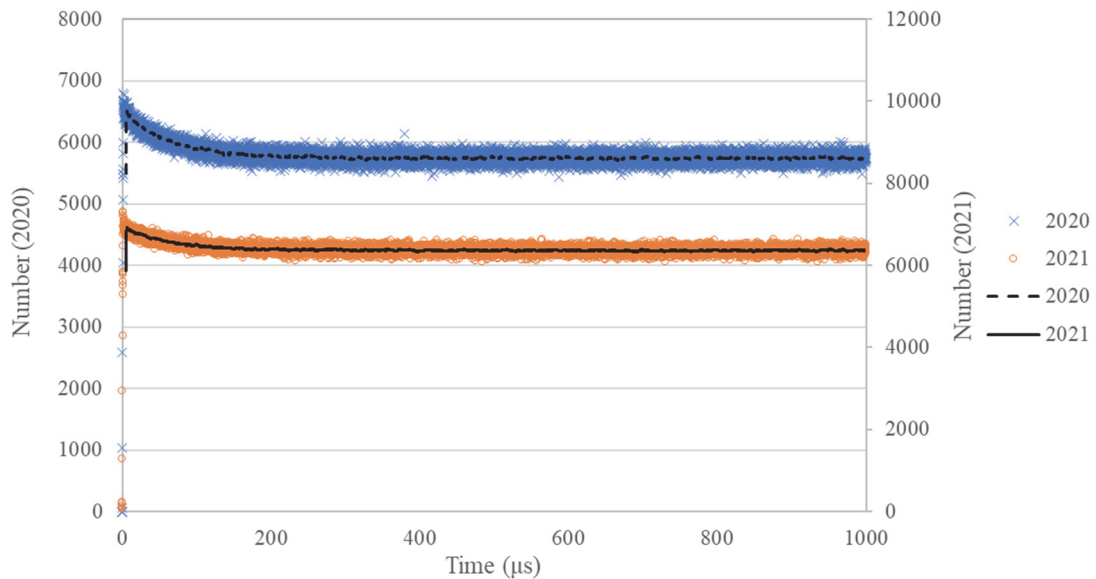


図 2.2.3-15 AFAS-B Bottom Fork 検出器のパルス間隔分布の比較（0～1000 μ s）

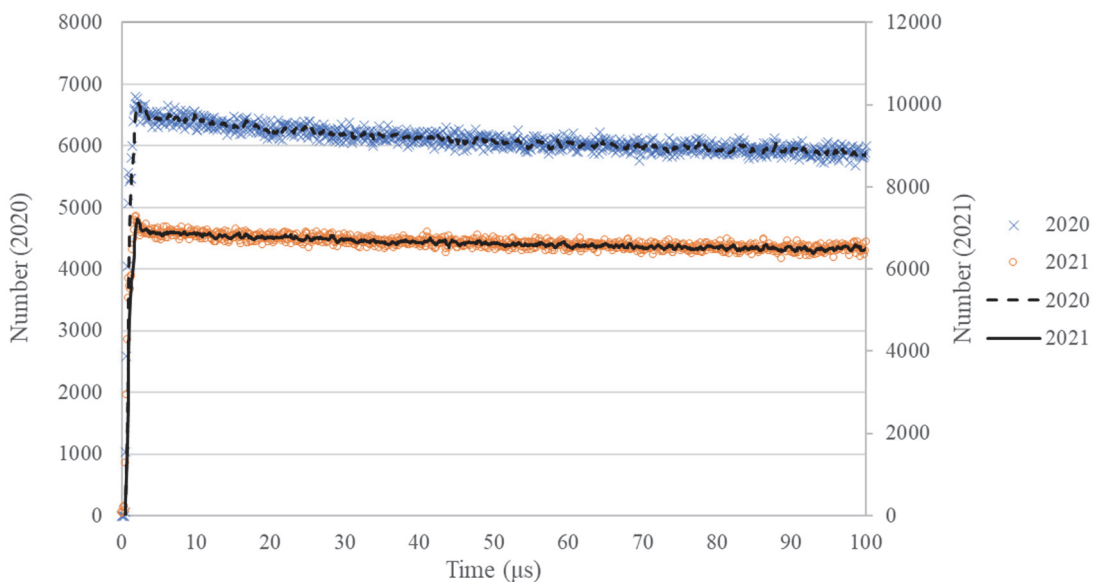


図 2.2.3-16 AFAS-B Bottom Fork 検出器のパルス間隔分布の比較（0～100 μ s）

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。本評価結果と令和 2 年度（2020 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×印及び破線は令和 2 年度（2020 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、○印及び実線は令和 3 年度（2021 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。

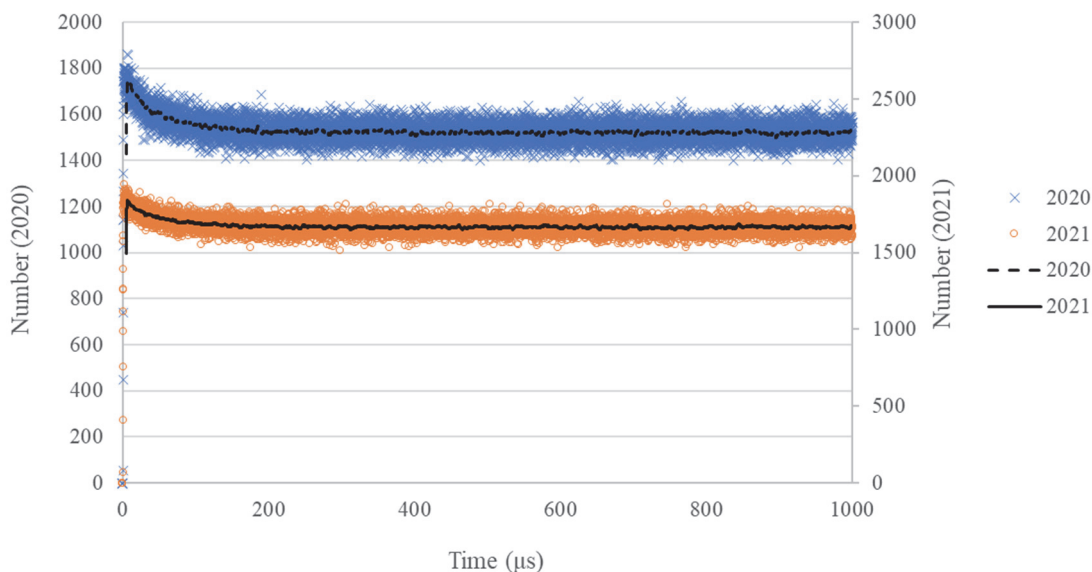


図 2.2.3-17 AFAS-P Collar 検出器 アンプ A のパルス間隔分布の比較（0～1000 μ s）

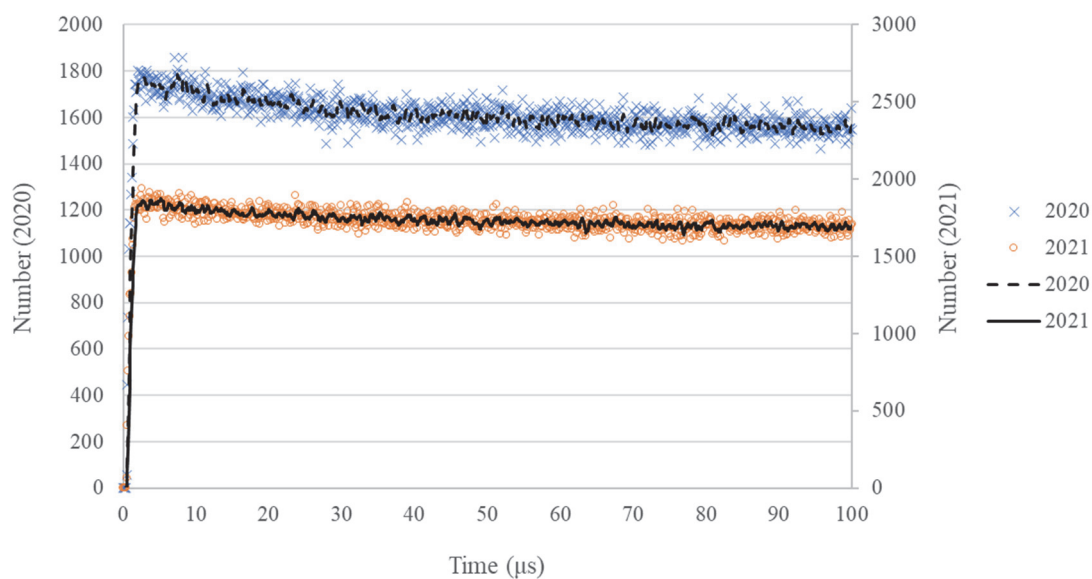


図 2.2.3-18 AFAS-P Collar 検出器 アンプ A のパルス間隔分布の比較（0～100 μ s）

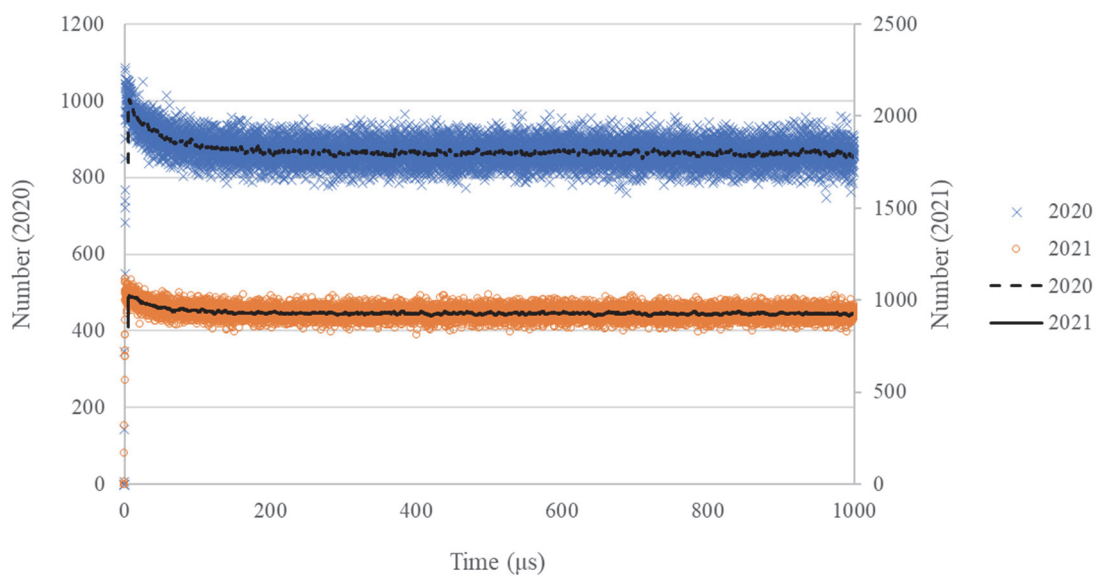


図 2.2.3-19 AFAS-P Collar 検出器 アンプ B のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

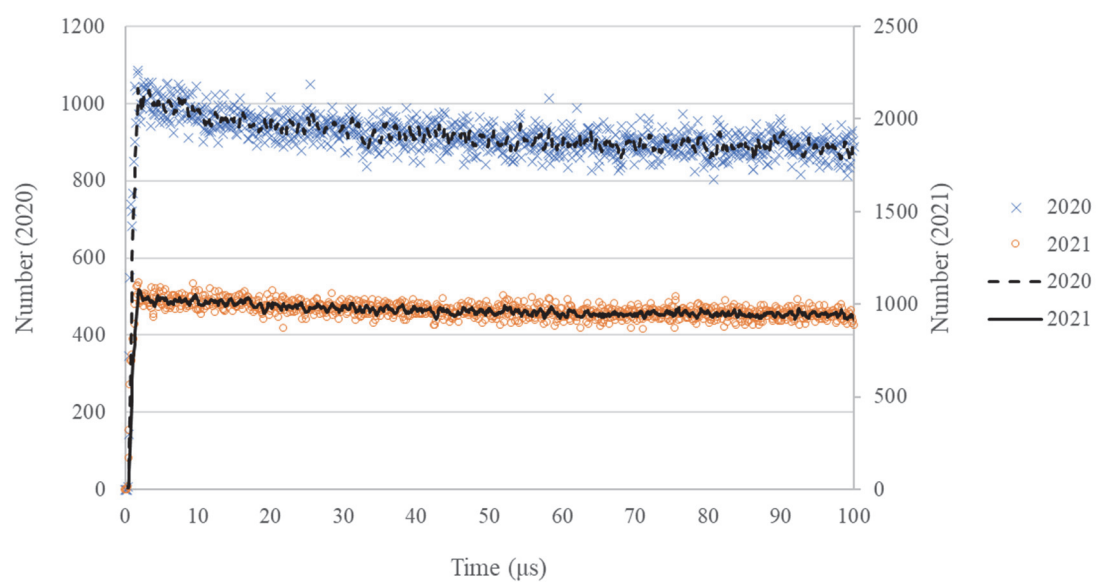


図 2.2.3-20 AFAS-P Collar 検出器 アンプ B のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

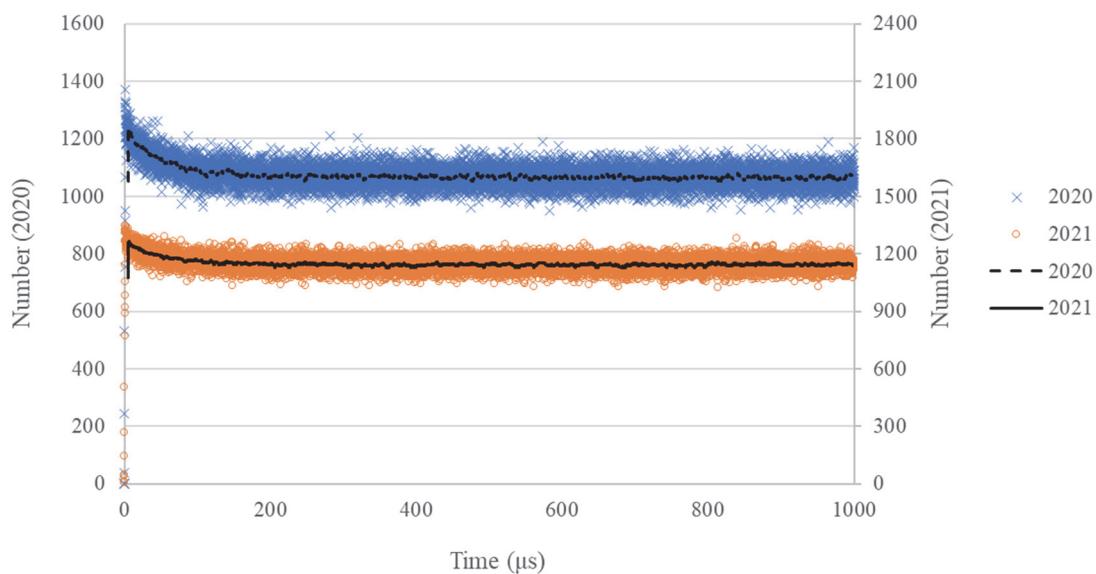


図 2.2.3-21 AFAS-P Collar 検出器 アンプ C のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

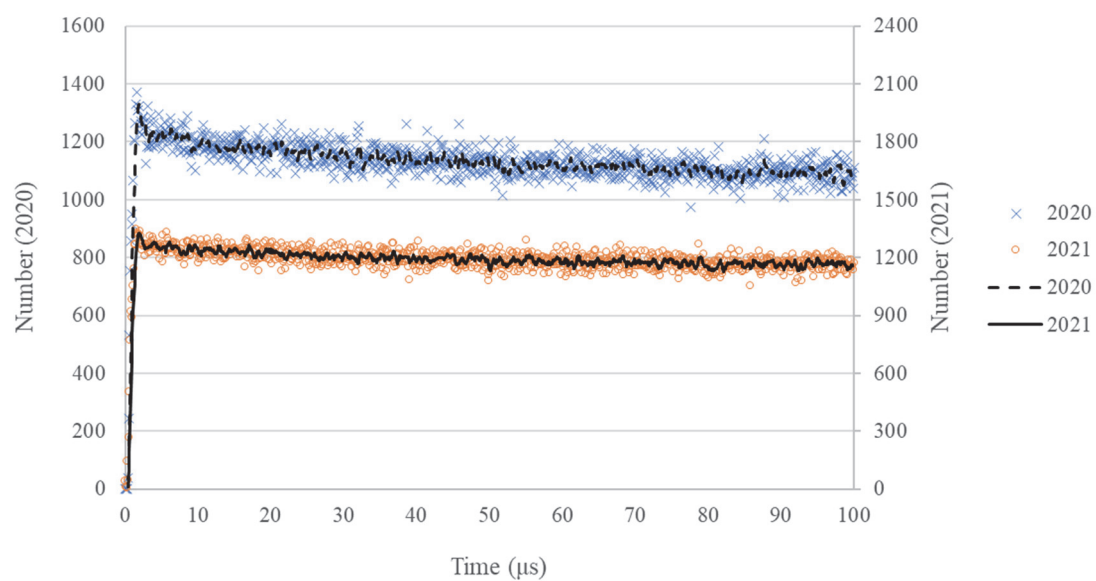


図 2.2.3-22 AFAS-P Collar 検出器 アンプ C のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

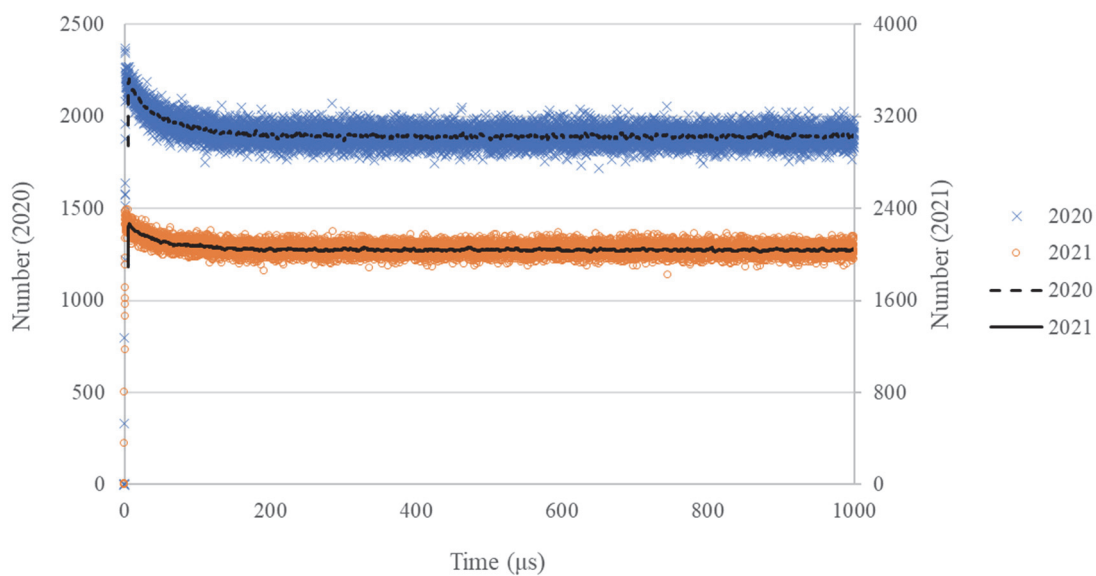


図 2.2.3-23 AFAS-P Collar 検出器 アンプ D のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

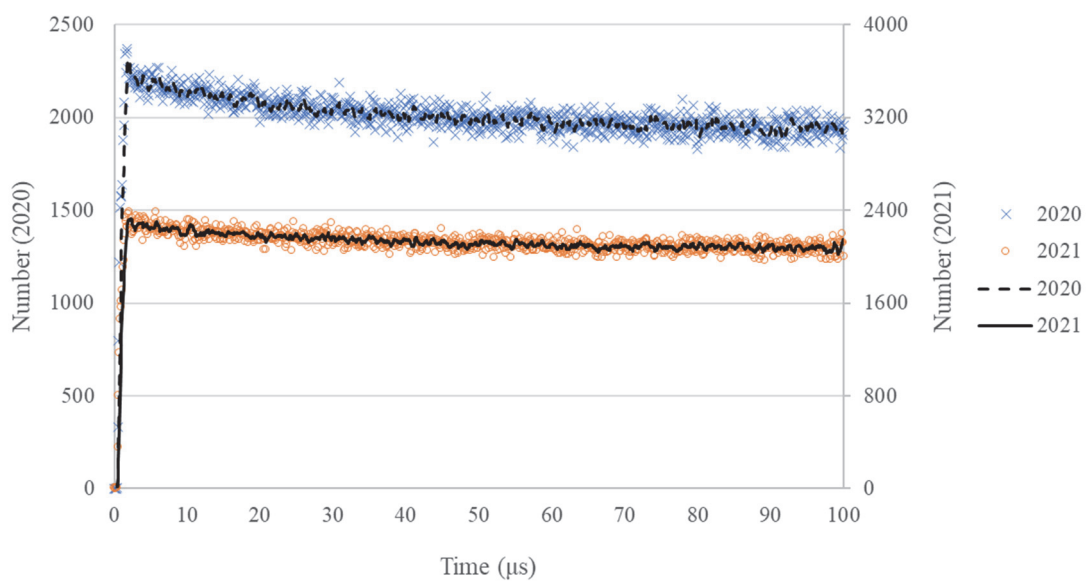


図 2.2.3-24 AFAS-P Collar 検出器 アンプ D のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

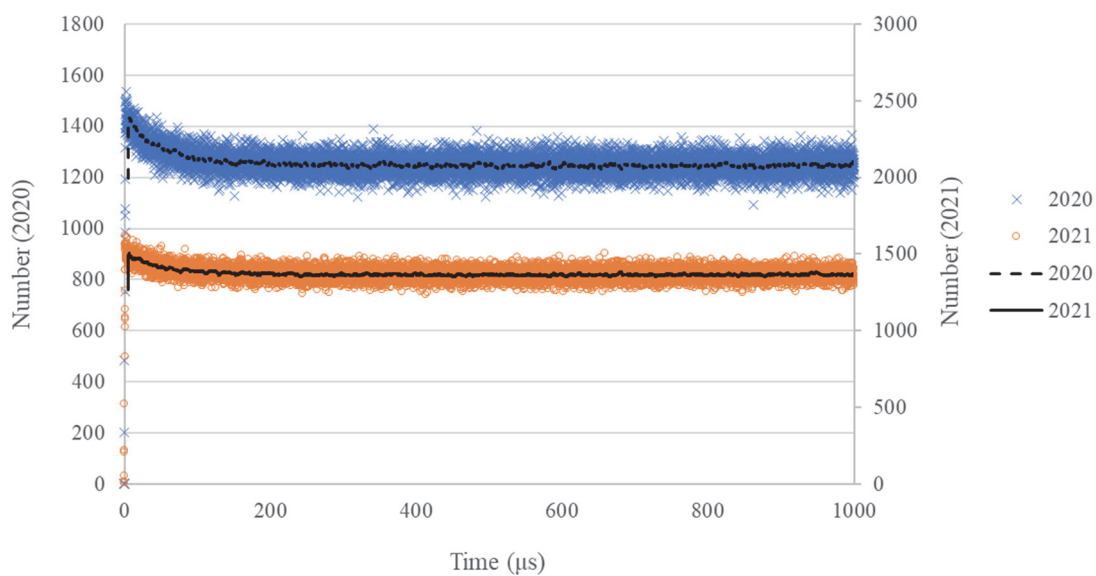


図 2.2.3-25 AFAS-P Collar 検出器 アンプ E のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

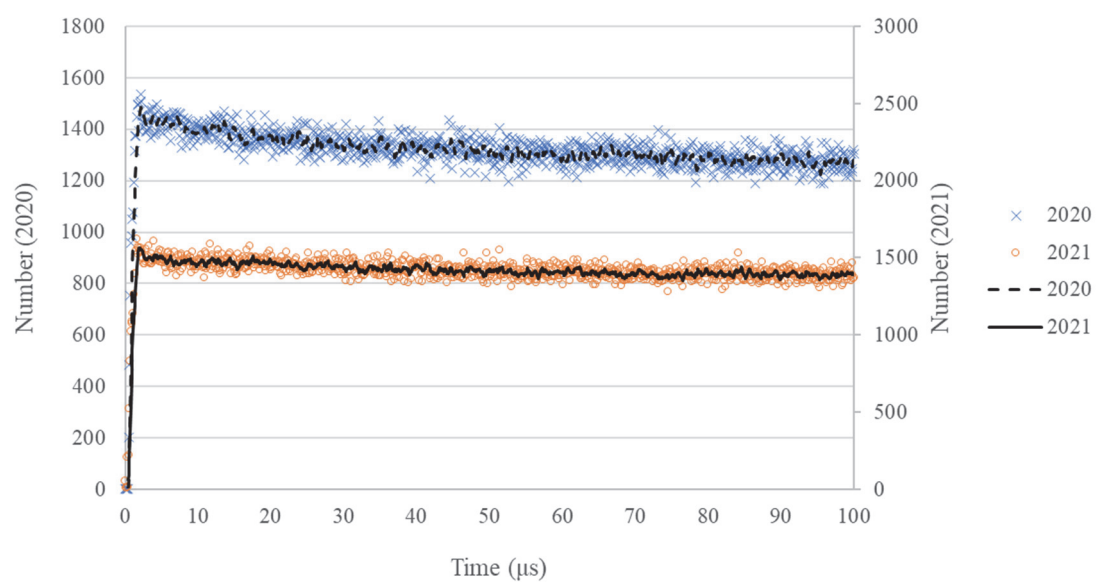


図 2.2.3-26 AFAS-P Collar 検出器 アンプ E のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

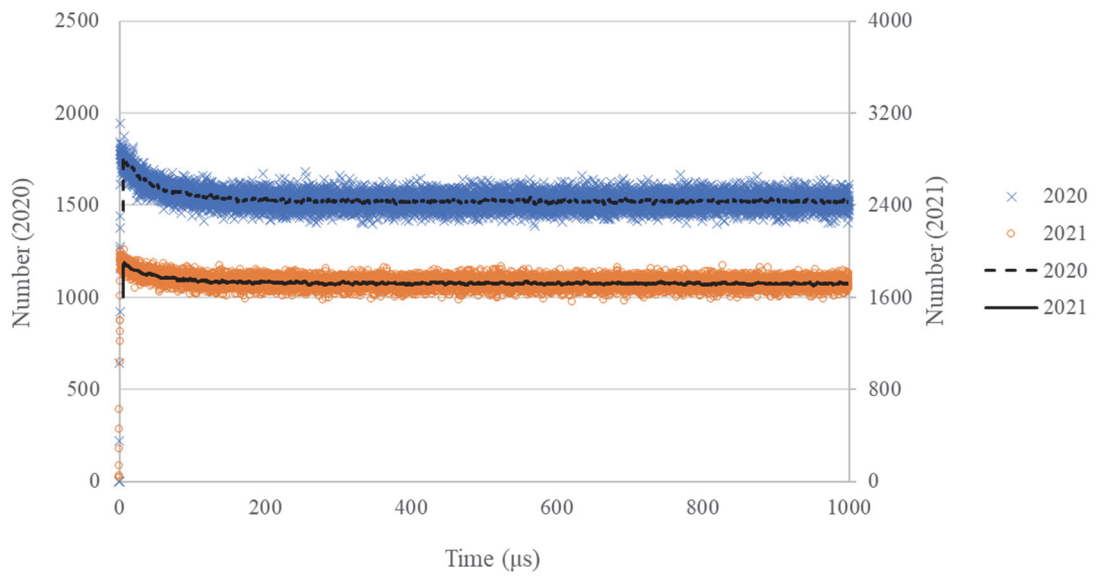


図 2.2.3-27 AFAS-P Collar 検出器 アンプ F のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

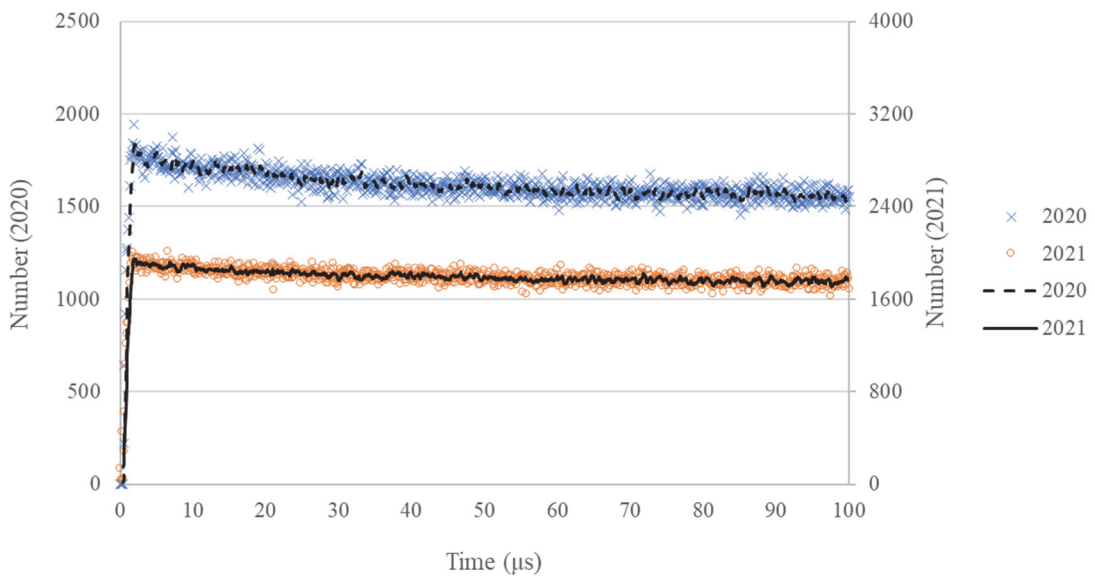


図 2.2.3-28 AFAS-P Collar 検出器 アンプ F のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

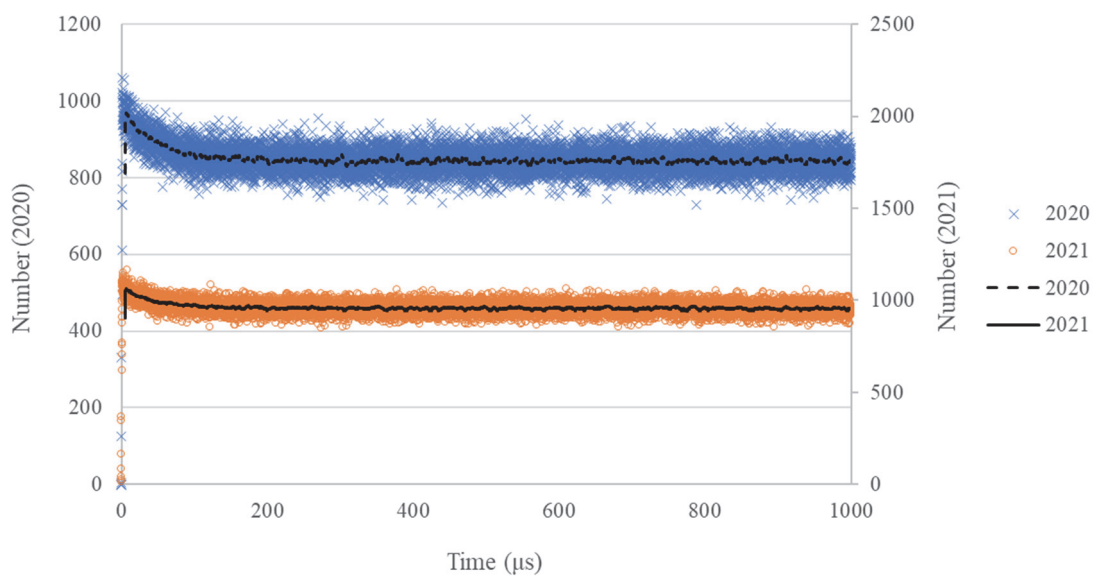


図 2.2.3-29 AFAS-P Collar 検出器 アンプ G のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

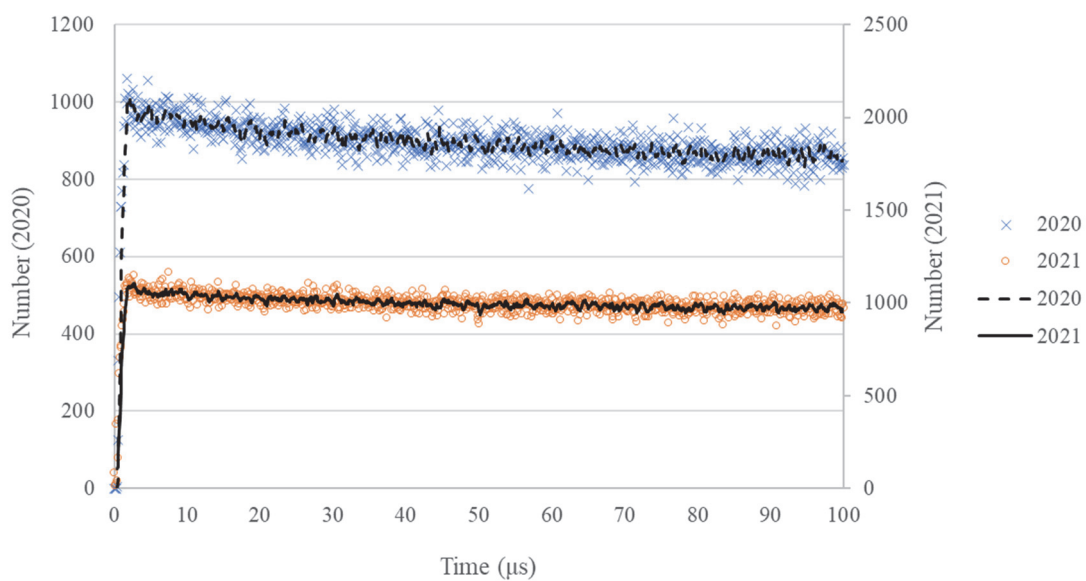


図 2.2.3-30 AFAS-P Collar 検出器 アンプ G のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

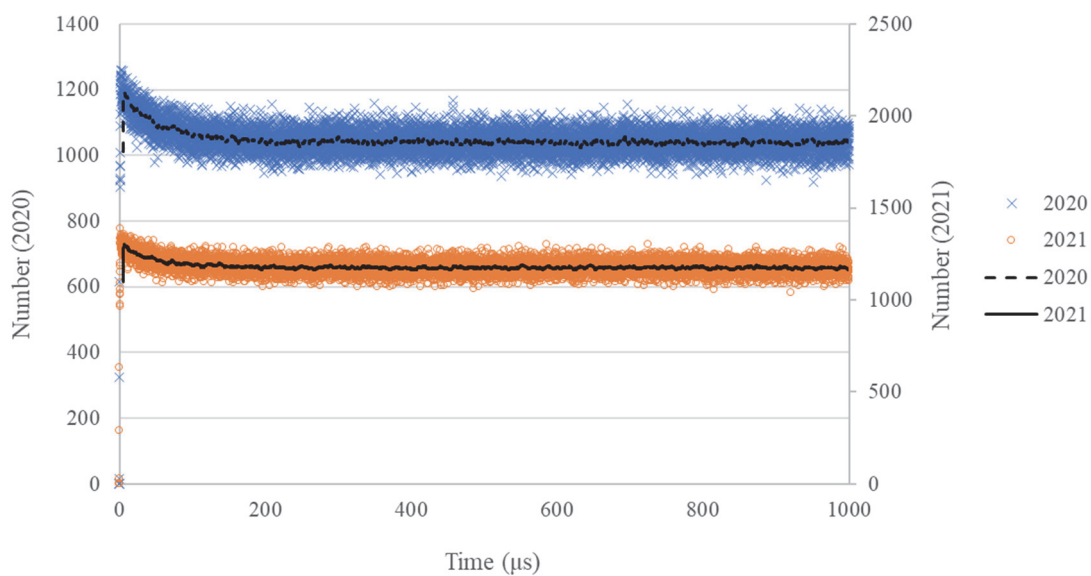


図 2.2.3-31 AFAS-P Collar 検出器 アンプ H のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

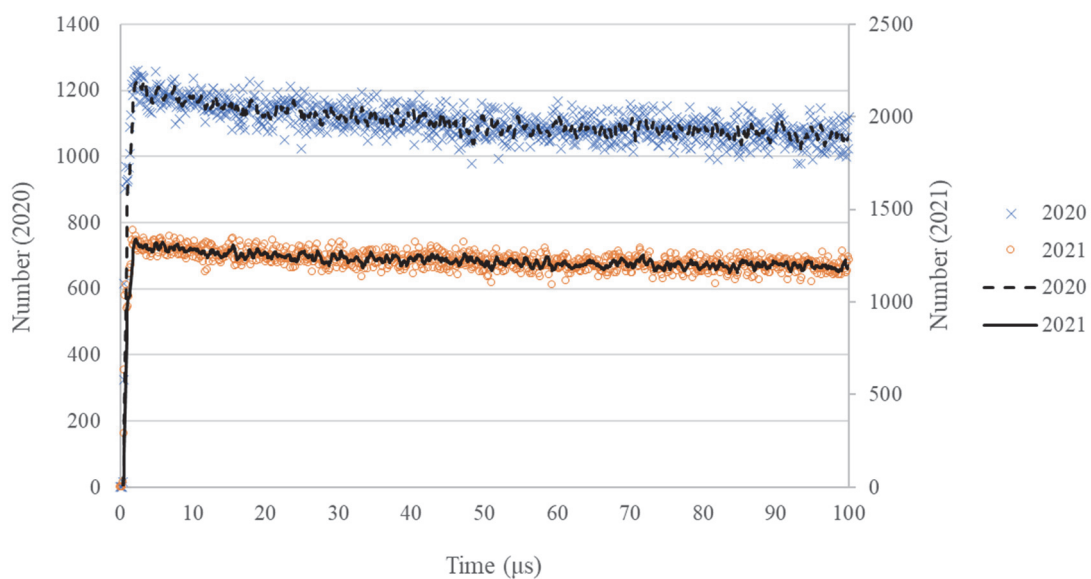


図 2.2.3-32 AFAS-P Collar 検出器 アンプ H のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

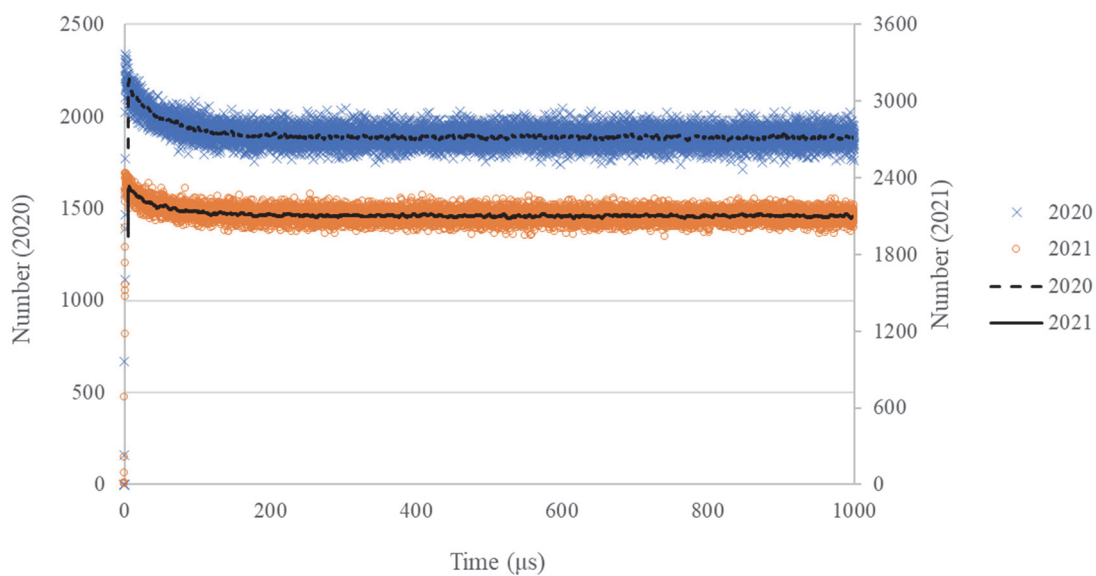


図 2.2.3-33 AFAS-P Collar 検出器 アンプ I のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

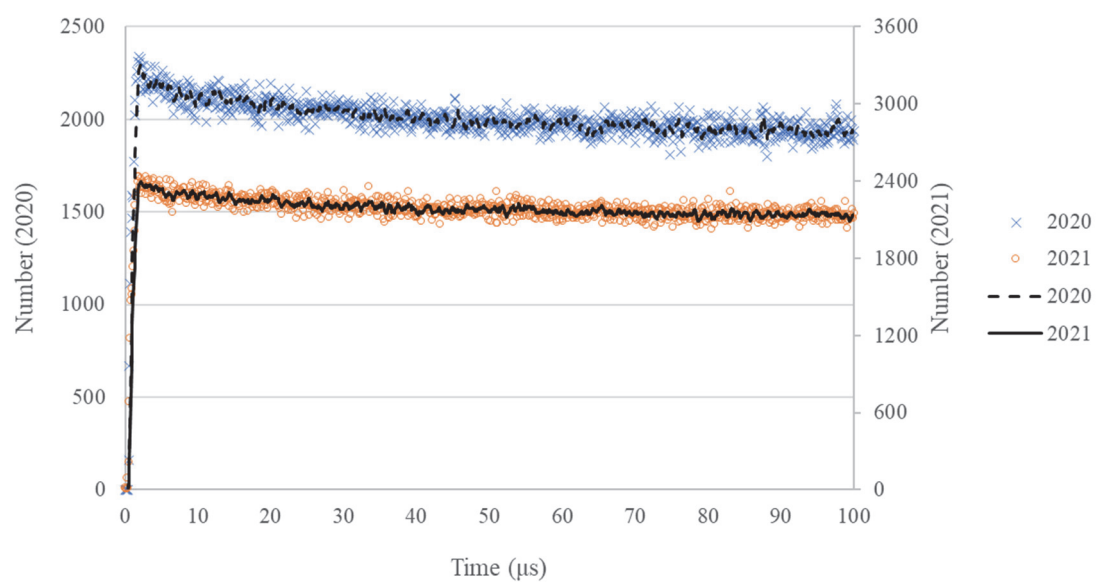


図 2.2.3-34 AFAS-P Collar 検出器 アンプ I のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

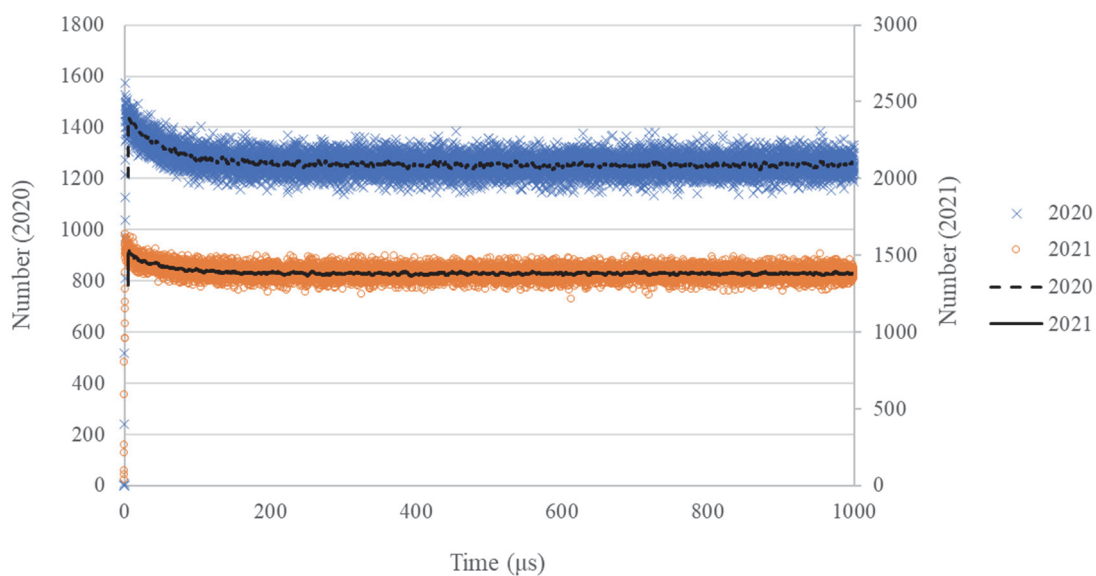


図 2.2.3-35 AFAS-P Collar 検出器 アンプ J のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

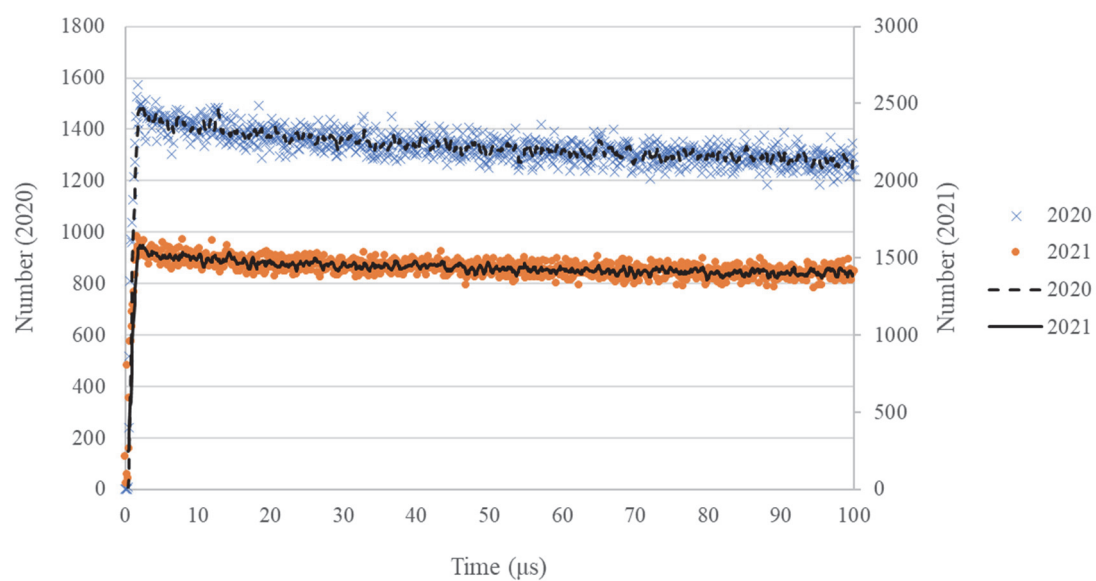


図 2.2.3-36 AFAS-P Collar 検出器 アンプ J のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

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。本評価結果と令和 2 年度（2020 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×印及び破線は令和 2 年度（2020 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、○印及び実線は令和 3 年度（2021 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。

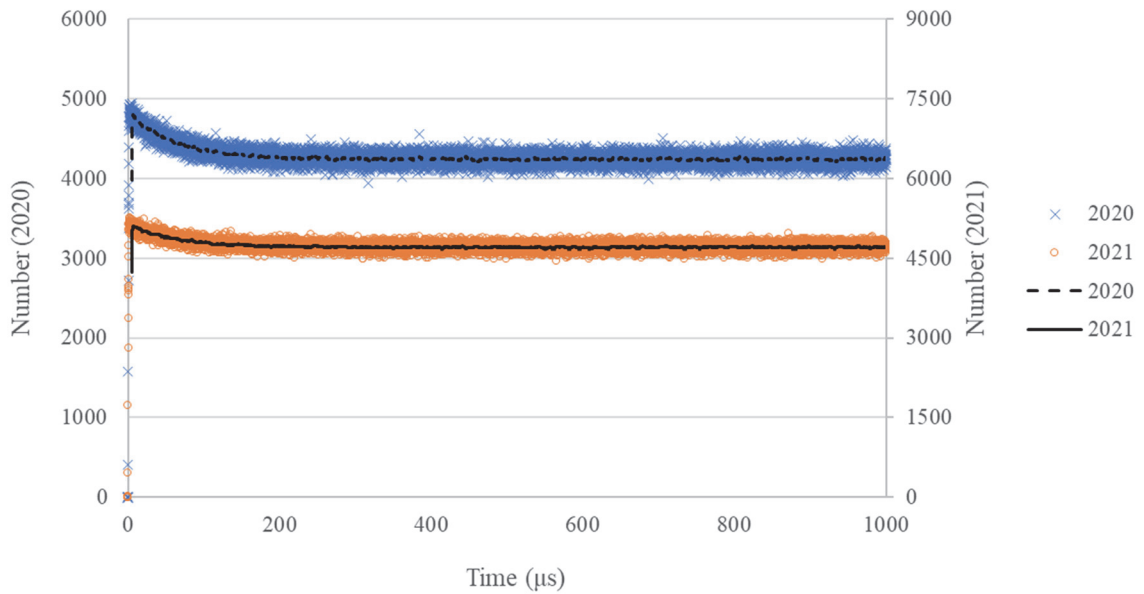


図 2.2.3-37 AFAS-P Top Fork 検出器のパルス間隔分布の比較（0～1000 μ s）

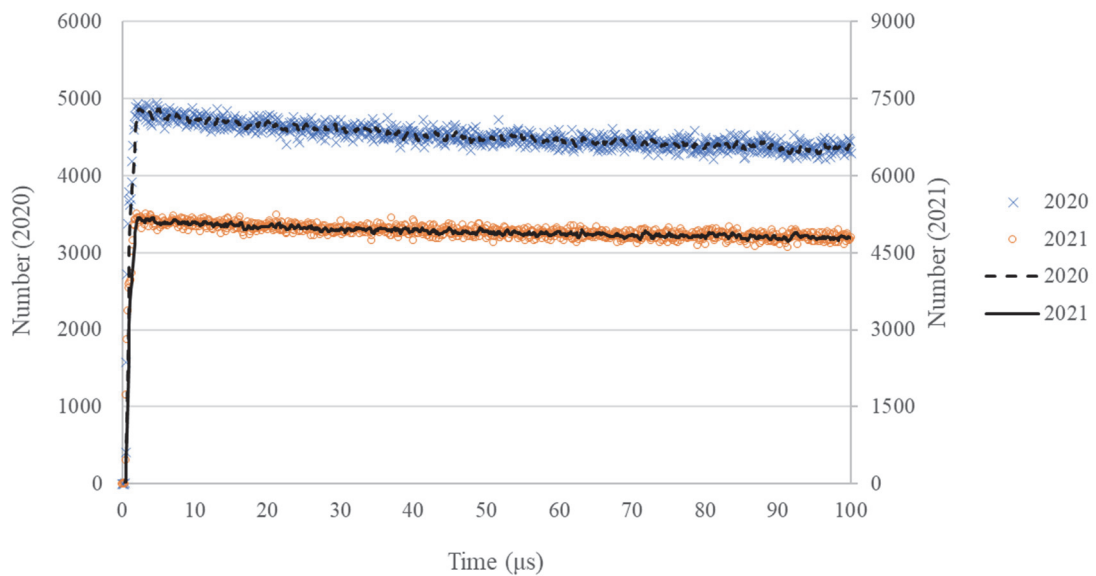


図 2.2.3-38 AFAS-P Top Fork 検出器のパルス間隔分布の比較（0～100 μ s）

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。本評価結果と令和 2 年度（2020 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×印及び破線は令和 2 年度（2020 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、○印及び実線は令和 3 年度（2021 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。

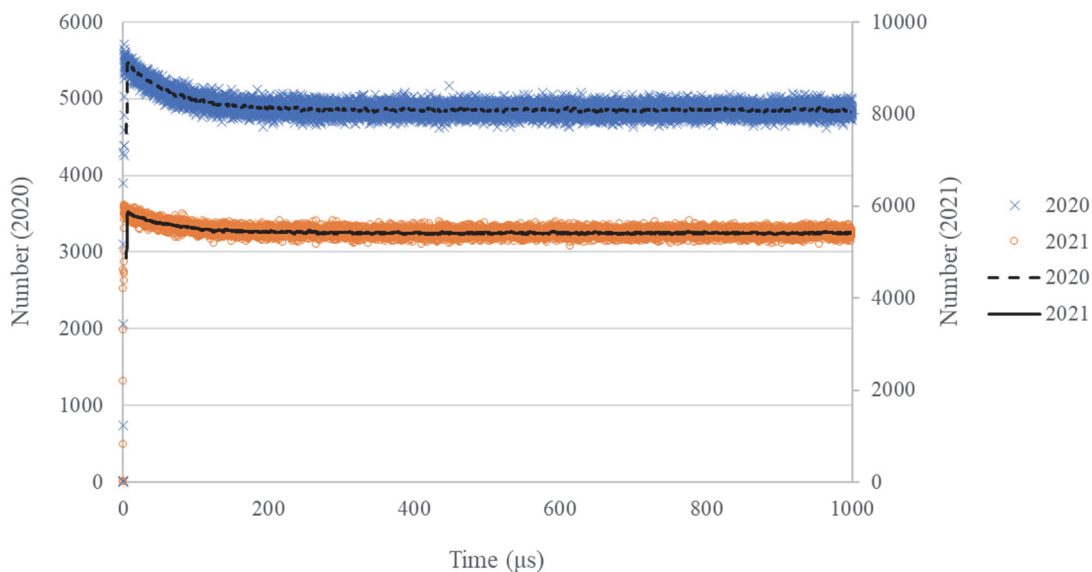


図 2.2.3-39 AFAS-P Bottom Fork 検出器のパルス間隔分布の比較（0～1000 μ s）

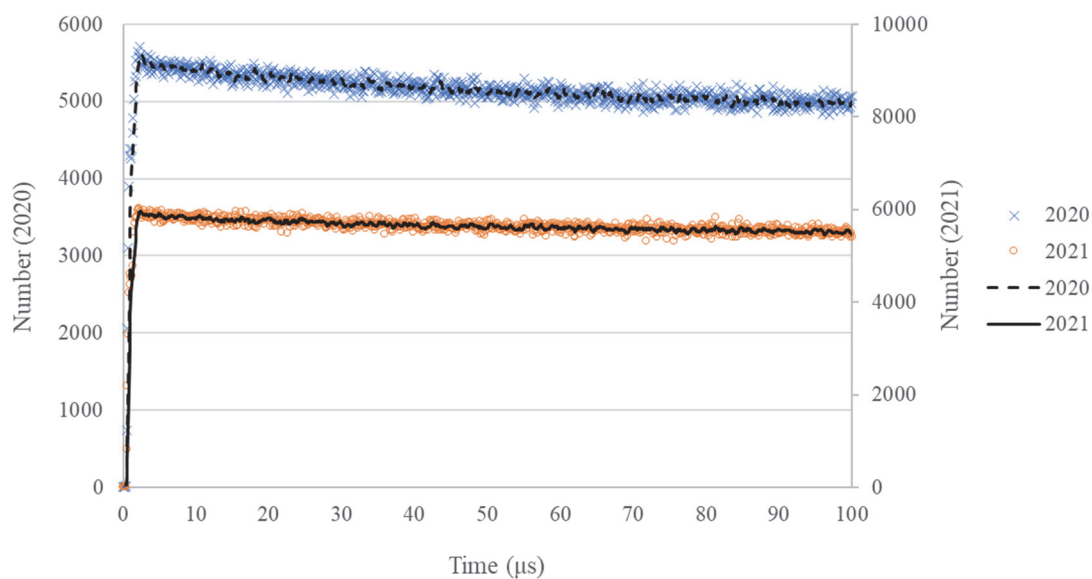


図 2.2.3-40 AFAS-P Bottom Fork 検出器のパルス間隔分布の比較（0～100 μ s）

2.2.4 考察

本年度の試験では、前年度（令和2年度）の評価に用いた²⁵²Cf中性子線源（Q2-334）ではなく、線源強度の高い新たな²⁵²Cf中性子線源（T1-349）を用いたため、得られた計数値に違いはあったが、評価したパルス間隔分布は前年度に評価したパルス間隔分布と同様の傾向を示した。したがって、本年度の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 の機器の異常検知方法の検討

2.3.1 目的

燃料集合体の測定における AFAS-B 及び AFAS-P の各検出器のシングル値の比^(*10)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。

平成 31 年度の性能確認試験^(参考文献 3)における同検討では、AFAS-B 及び AFAS-P のシングル値の比を継続して収集し監視することで、これらのシステムの異常を検知可能であることを確認したが、これは、BWR 及び PWR 用それぞれの燃料集合体の有効長が一定であることが前提となっていた。実際に J-MOX にて製造される BWR 及び PWR 用の燃料集合体は、個々に有効長が異なる^(*11)ため、平成 31 年度に評価した異常検知方法を J-MOX での AFAS 運用に適用することができない可能性がある。そこで、本年度は、燃料集合体の有効長の個体差が本手法に与える影響の有無を確認する。

*10: AFAS-B 及び AFAS-P のシングル値の比は、以下の式 (2.3) 及び (2.4) から求められ、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ことから、機器の早期異常検知に利用できると考えられる。

$$Ratio_{BWR} = \frac{S_{Top Fork B} + S_{Bottom Fork B}}{S_{Collar B}} / \frac{S_{Top Fork P} + S_{Bottom Fork P}}{S_{Collar P}} \dots (2.3)$$

$$Ratio_{PWR} = \frac{S_{Top Fork P} + S_{Bottom Fork P}}{S_{Collar P}} / \frac{S_{Top Fork B} + S_{Bottom Fork B}}{S_{Collar B}} \dots (2.4)$$

$Ratio_{BWR}$: BWR 用燃料集合体が AFAS-B にて測定された場合のシングル値の比

$Ratio_{PWR}$: PWR 用燃料集合体が AFAS-P にて測定された場合のシングル値の比

*11 : J-MOX にて製造される BWR 及び PWR 用の燃料棒の有効長の設計仕様は、それぞれ 3,554mm±10mm 及び 3,648mm±10mm であり、これらの範囲内で燃料棒ごとに有効長の上端位置が異なる。よって、この燃料棒を束ねて組み立てられる燃料集合体についても有効長の上端位置に個体差が生じる。

2.3.2 方法

燃料集合体の有効長の個体差がシングル値の比に与える影響の有無を確認するため、有効長が標準 (BWR:3,554mm, PWR:3,648mm)、上限値 (BWR:3,564mm, PWR:3,658mm) 及び下限値 (BWR:3,544mm, PWR:3,638mm) の各燃料集合体を測定した場合のシングル値の比を求め、各比が誤差の範囲で一致するか否かを確認する。シングル値の比は、モンテカルロシミュレーションコード (MCNPX) を用いて J-MOX における AFAS による燃料集合体の測定を模擬したモデルを作成し、シミュレーションを行うことにより評価する。シミュレーションによる評価が困難なシングル値の比の誤差については、²⁵²Cf 中性子線源測定を行い、実際に取得したシングル値の計数誤差から推定する。

これらの評価は、BWR 及び PWR 用の燃料集合体が、それぞれ AFAS-B 及び AFAS-P にて測定された場合について実施する。

本評価で使用する ²⁵²Cf 中性子線源 (K7-436, Q2-334, T1-349) を 1.6 項の表 1.6-1 に示す。

詳細な試験手順を以下に示す。

(1) シミュレーションによるシングル値の検出効率の評価

- ① MCNPX を用いて、図 2.3.2-1 に示すとおり J-MOX の AFAS 測定環境において BWR 用燃料集合体が AFAS-B にて測定された場合の各検出器 (AFAS-B 及び AFAS-P の Top Fork 検出器、Collar 検出器及び Bottom Fork 検出器) のシングル値の検出効率を取得する。
- ② MCNPX を用いて、図 2.3.2-2 に示すとおり J-MOX の AFAS 測定環境において PWR 用燃料集合体が AFAS-P にて測定された場合の各検出器 (AFAS-B 及び AFAS-P の Top Fork 検出器、Collar 検出器及び Bottom Fork 検出器) のシングル値の検出効率を取得する。
- ③ ①及び②を燃料集合体の有効長が標準、上限値及び下限値それぞれの場合を対象に実施する。

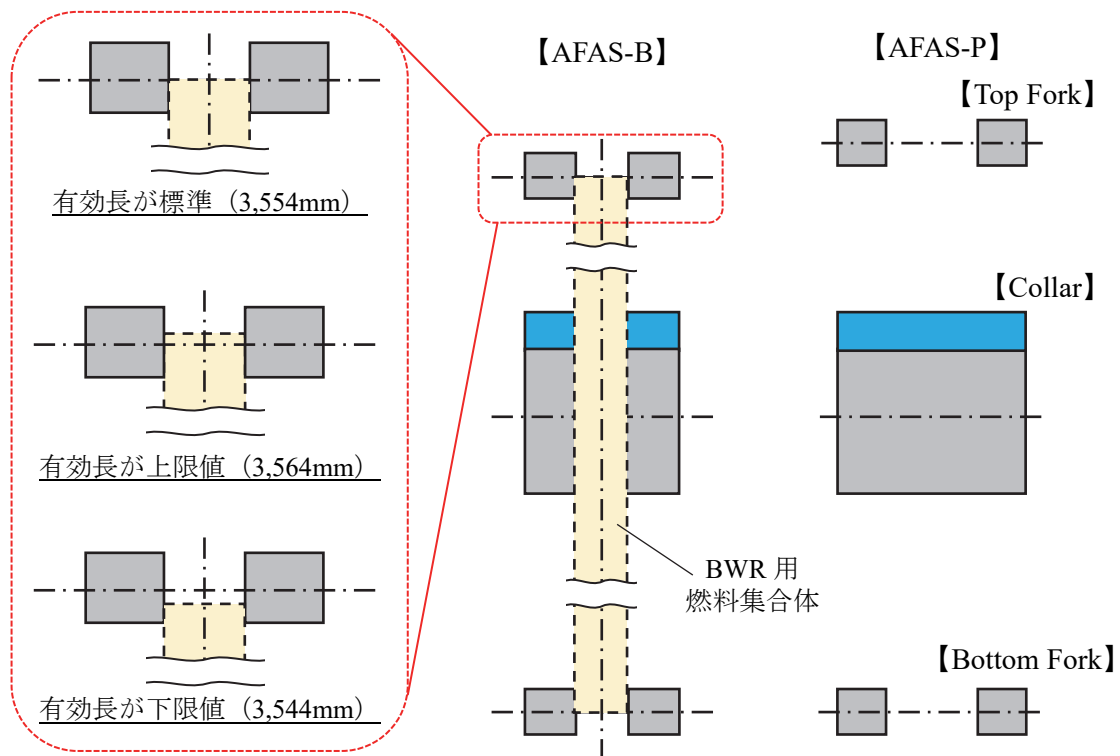


図 2.3.2-1 MCNPX でモデル化する J-MOX の AFAS 測定環境のイメージ
(BWR 用燃料集合体測定時)

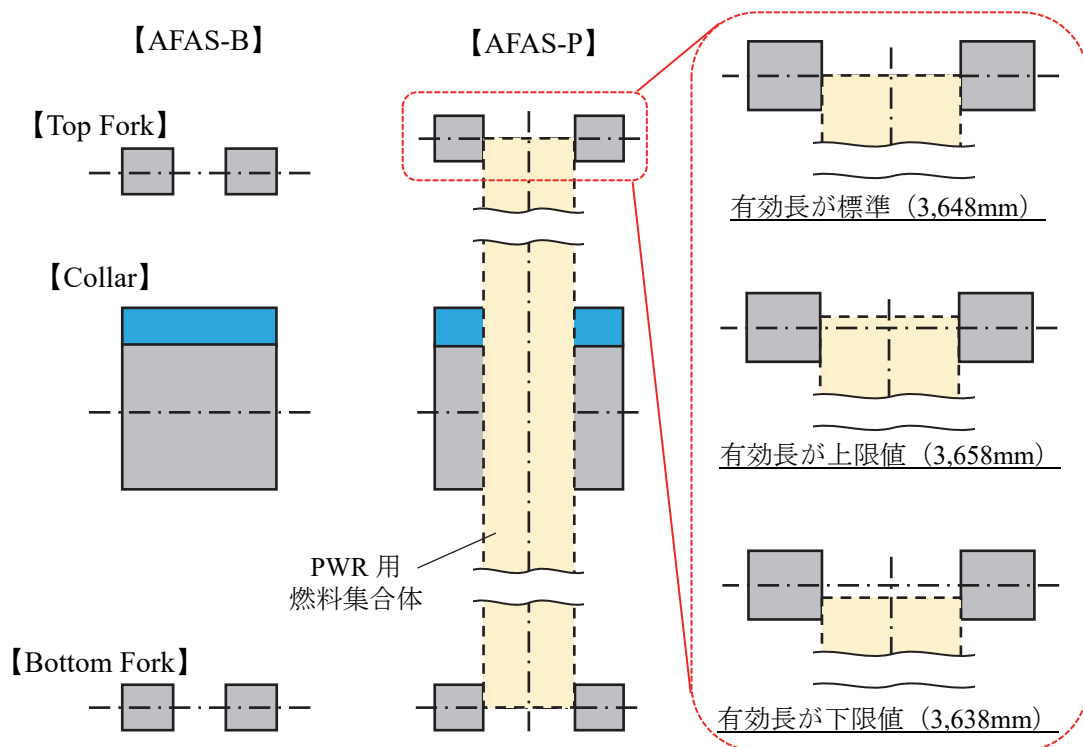


図 2.3.2-2 MCNPX でモデル化する J-MOX の AFAS 測定環境のイメージ
(PWR 用燃料集合体測定時)

(2) シングル値とその誤差の相関評価

- ① 線源固定用治具を用いて、図 2.3.2-3 に示すとおり各検出器（AFAS-B 及び AFAS-P の Top Fork 検出器、Collar 検出器及び Bottom Fork 検出器）の中央（位置 a～f）に ^{252}Cf 中性子線源を配置して 100 分間の測定^(*12)を行い、各検出器のシングル値とその誤差をそれぞれ取得する^(*13)。
- ② ①にて得た各検出器のシングル値とその誤差の相関を評価する。

*12：シングル値の誤差の相関を精度よく評価するため、長時間測定を行う。なお、長時間測定にて得られたシングル値の誤差は、10 分間測定（AFAS の要求仕様書^(参考文献 4)に記載されている J-MOX における燃料集合体の測定時間）の誤差に変換し使用する。

*13：本手順は、②で評価する相関の精度向上を目的として、2 か月に 1 回以上の頻度で実施する。また、 ^{252}Cf 中性子線源は、強度の異なる 3 種類（K7-436, Q2-334, T1-349）の線源を用いる。

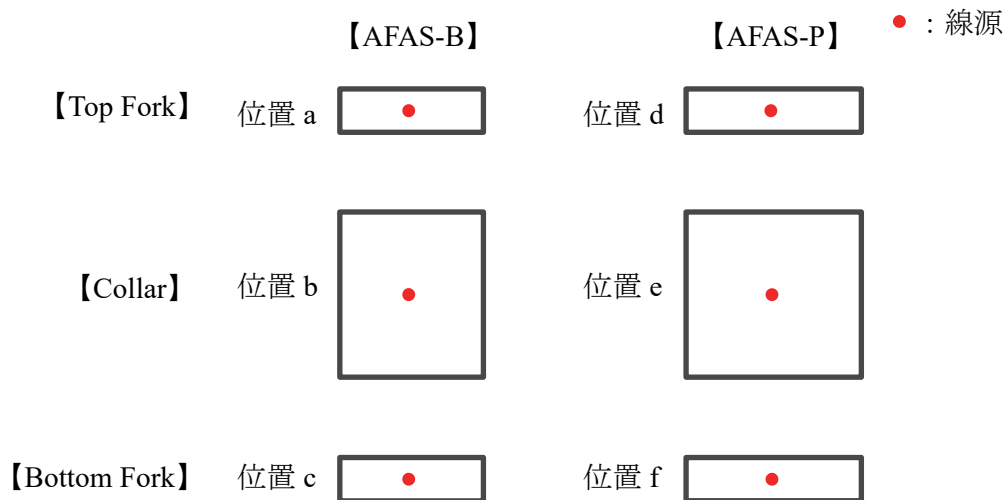


図 2.3.2-3 シングル値とその誤差の評価のための ^{252}Cf 中性子線源配置位置

- (3) 有効長の個体差がシングル値の比に与える影響の評価 (BWR 用燃料集合体測定時)
- ① シミュレーションに用いた BWR 用燃料集合体の同位体組成比、Pu 量^(*14)及び自発核分裂による中性子収率から、BWR 用燃料集合体の有効長が標準である場合の中性子放出率を計算する。
 - ② (1) ①にて得た各検出器のシングル値の検出効率と①にて得た中性子放出率から、BWR 用燃料集合体が AFAS-B にて測定された場合の各検出器のシングル値を推定する。また、そのシングル値の誤差を、(2) ②にて得たシングル値とその誤差の相関から推定する。
 - ③ ①及び②を BWR 用燃料集合体の有効長が上限値及び下限値の場合を対象に実施する。
 - ④ BWR 用燃料集合体の有効長が標準、上限値及び下限値それぞれの場合における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。

*14: 同位体組成比及び Pu 量は、過去に LANL が同様のシミュレーションを実施した際に使用していたパラメータを参考に決定する (参考文献 5)。

- (4) 有効長の個体差がシングル値の比に与える影響の評価 (PWR 用燃料集合体測定時)
- ① シミュレーションに用いた PWR 用燃料集合体の同位体組成比、Pu 量^(*15)及び自発核分裂による中性子収率から、PWR 用燃料集合体の有効長が標準である場合の中性子放出率を計算する。
 - ② (1) ②にて得た各検出器のシングル値の検出効率と①にて得た中性子放出率から、PWR 用燃料集合体が AFAS-P にて測定された場合の各検出器のシングル値を推定する。また、そのシングル値の誤差を、(2) ②にて得たシングル値とその誤差の相関から推定する。
 - ③ ①及び②を PWR 用燃料集合体の有効長が上限値及び下限値の場合を対象に実施する。
 - ④ PWR 用燃料集合体の有効長が標準、上限値及び下限値それぞれの場合における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。

*15: 同位体組成比及び Pu 量は、過去に LANL が同様のシミュレーションを実施した際に使用していたパラメータを参考に決定する (参考文献 6)。

2.3.3 結果

(1) シミュレーションによるシングル値の検出効率の評価

MCNPX を用いて J-MOX における燃料集合体の測定環境を模擬したシミュレーションモデルを作成した。例として、AFAS-B にて BWR 用燃料集合体（有効長が標準）を測定した場合及び AFAS-P にて PWR 用燃料集合体（有効長が標準）を測定した場合のシミュレーションモデルを図 2.3.3-1 及び図 2.3.3-2 に示す。また、シミュレーションにより得られた有効長の異なる燃料集合体測定時の各検出器のシングル値の検出効率を表 2.3.3-1 に示す。

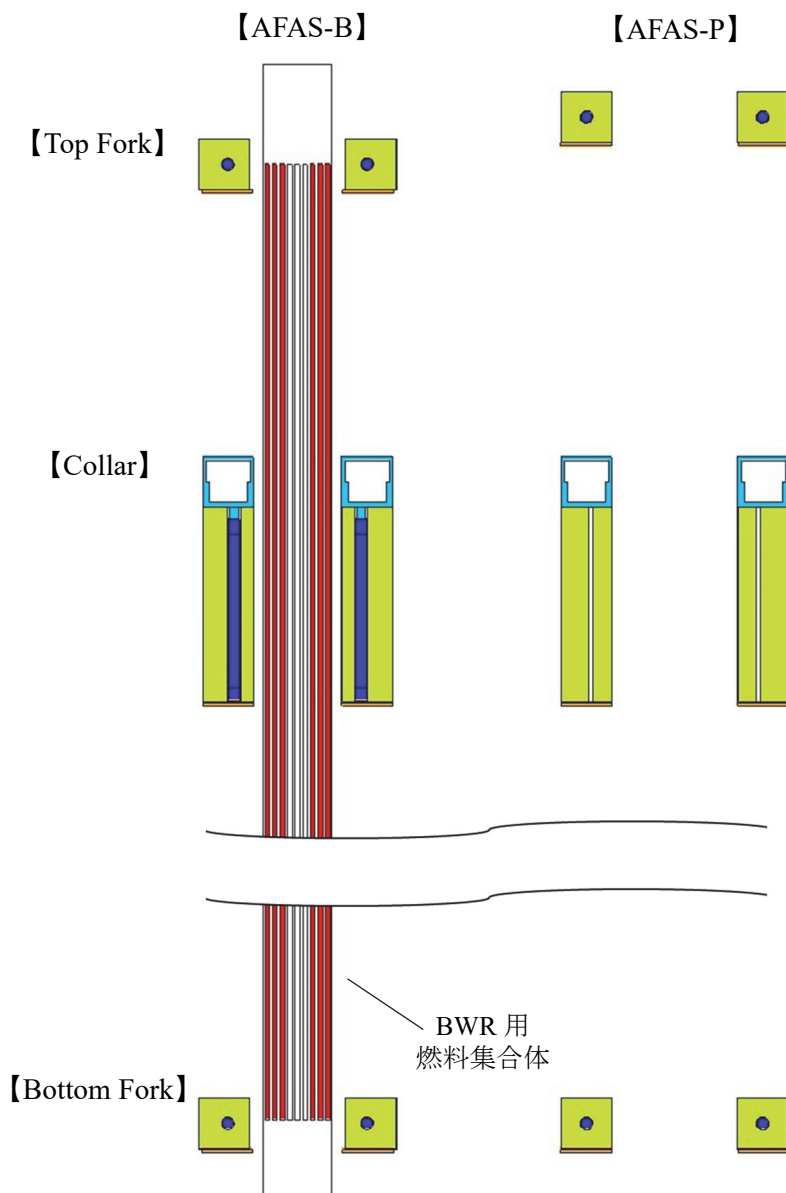


図 2.3.3-1 BWR 用燃料集合体（有効長が標準）を測定した場合のシミュレーションモデル

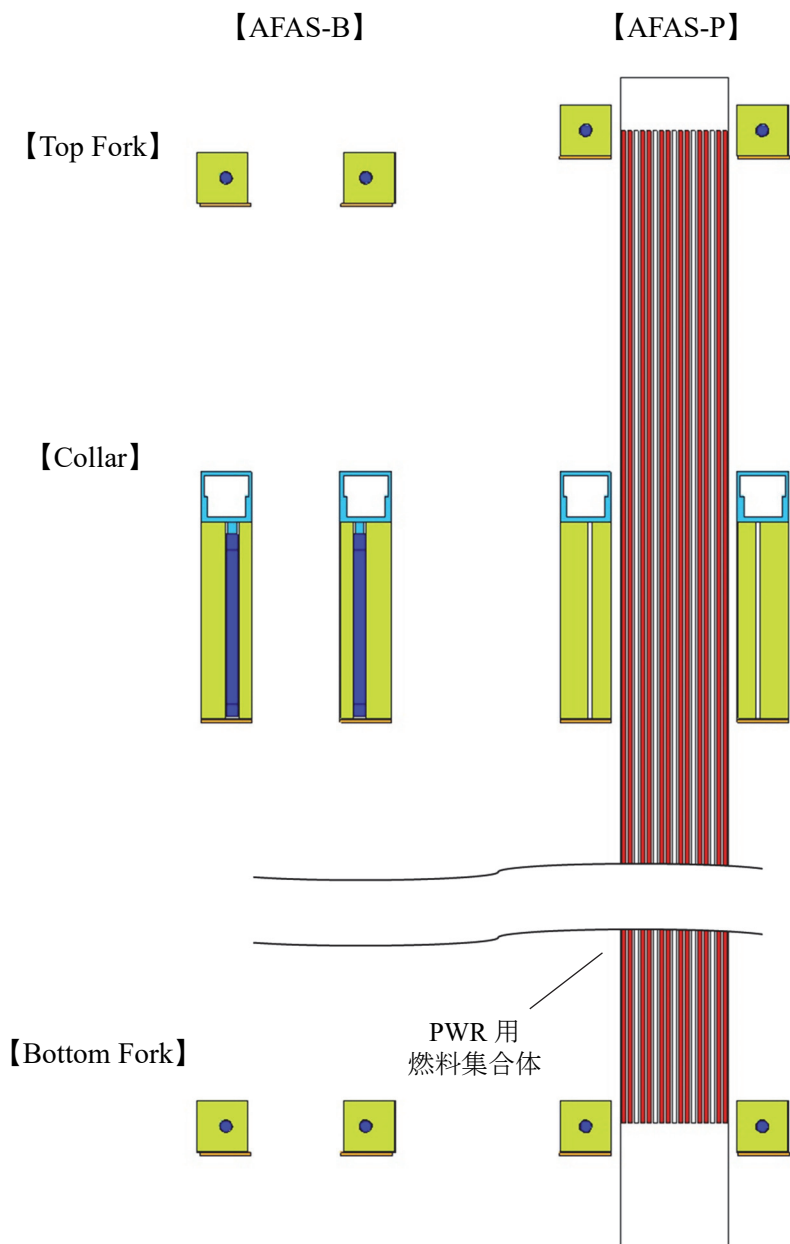


図 2.3.3-2 PWR用燃料集合体（有効長が標準）を測定した場合のシミュレーションモデル

表 2.3.3-1 シミュレーションにより求めた有効長の異なる燃料集合体測定時の
各検出器のシングル値の検出効率

燃料集合体	有効長	検出器		シングル値の検出効率
BWR 用 燃料集合体	上限値 (3,564mm)	AFAS-B	Top Fork	6.13633E-04
			Collar	2.73835E-02
			Bottom Fork	5.45308E-04
		AFAS-P	Top Fork	1.05394E-04
			Collar	1.87035E-03
			Bottom Fork	1.38845E-04
	標準 (3,554mm)	AFAS-B	Top Fork	5.78654E-04
			Collar	2.74546E-02
			Bottom Fork	5.46764E-04
		AFAS-P	Top Fork	1.04859E-04
			Collar	1.86976E-03
			Bottom Fork	1.39010E-04
	下限値 (3,544mm)	AFAS-B	Top Fork	5.44351E-04
			Collar	2.75311E-02
			Bottom Fork	5.48150E-04
AFAS-P		Top Fork	1.05036E-04	
		Collar	1.86900E-03	
		Bottom Fork	1.39315E-04	
PWR 用 燃料集合体	上限値 (3,658mm)	AFAS-B	Top Fork	1.04551E-04
			Collar	1.48737E-03
			Bottom Fork	1.01789E-04
		AFAS-P	Top Fork	6.36824E-04
			Collar	2.69485E-02
			Bottom Fork	5.68169E-04
	標準 (3,648mm)	AFAS-B	Top Fork	1.04341E-04
			Collar	1.48768E-03
			Bottom Fork	1.02109E-04
		AFAS-P	Top Fork	6.01786E-04
			Collar	2.70186E-02
			Bottom Fork	5.69690E-04
	下限値 (3,638mm)	AFAS-B	Top Fork	1.04075E-04
			Collar	1.48791E-03
			Bottom Fork	1.02292E-04
AFAS-P		Top Fork	5.68359E-04	
		Collar	2.70895E-02	
		Bottom Fork	5.71086E-04	

(2) シングル値とその誤差の相関評価

各検出器について、 ^{252}Cf 中性子線源の測定により得られたシングル値及びその誤差を累乗関数で近似した。結果を図 2.3.3-3～図 2.3.3-8 に示す。

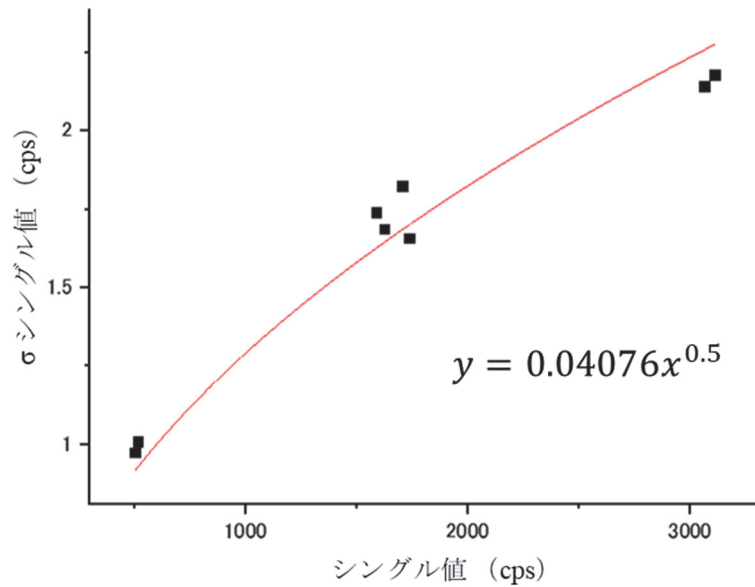


図 2.3.3-3 シングル値及びその誤差の相関評価 (AFAS-B Top Fork 検出器)

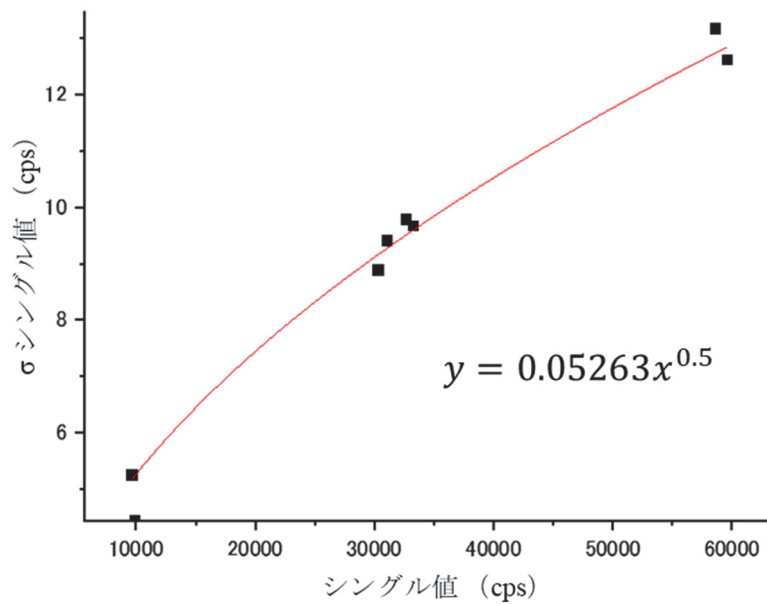


図 2.3.3-4 シングル値及びその誤差の相関評価 (AFAS-B Collar 検出器)

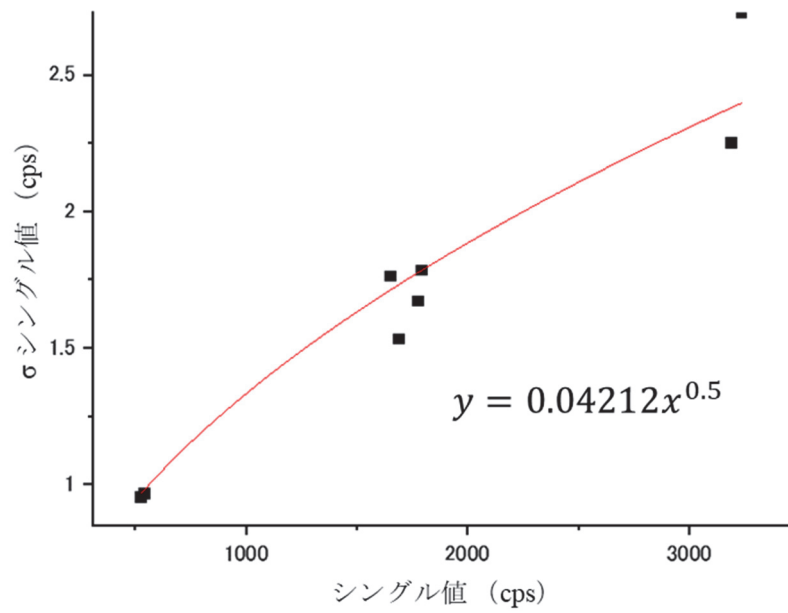


図 2.3.3-5 シングル値及びその誤差の相関評価 (AFAS-B Bottom Fork 検出器)

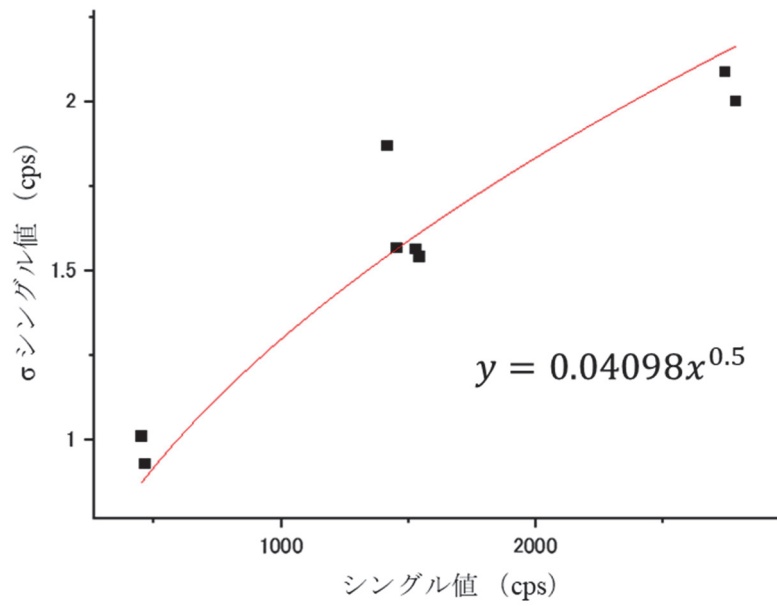


図 2.3.3-6 シングル値及びその誤差の相関評価 (AFAS-P Top Fork 検出器)

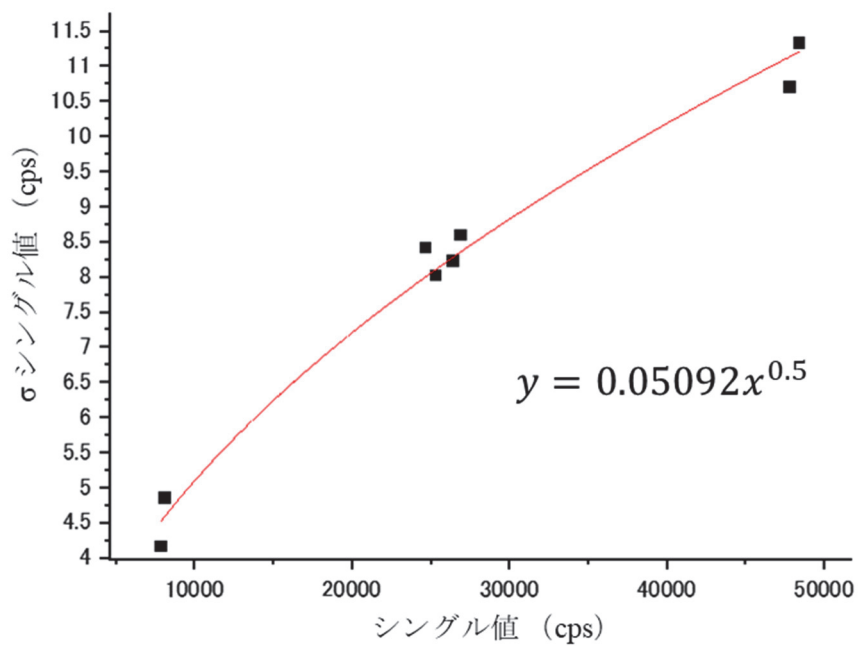


図 2.3.3-7 シングル値及びその誤差の相関評価 (AFAS-P Collar 検出器)

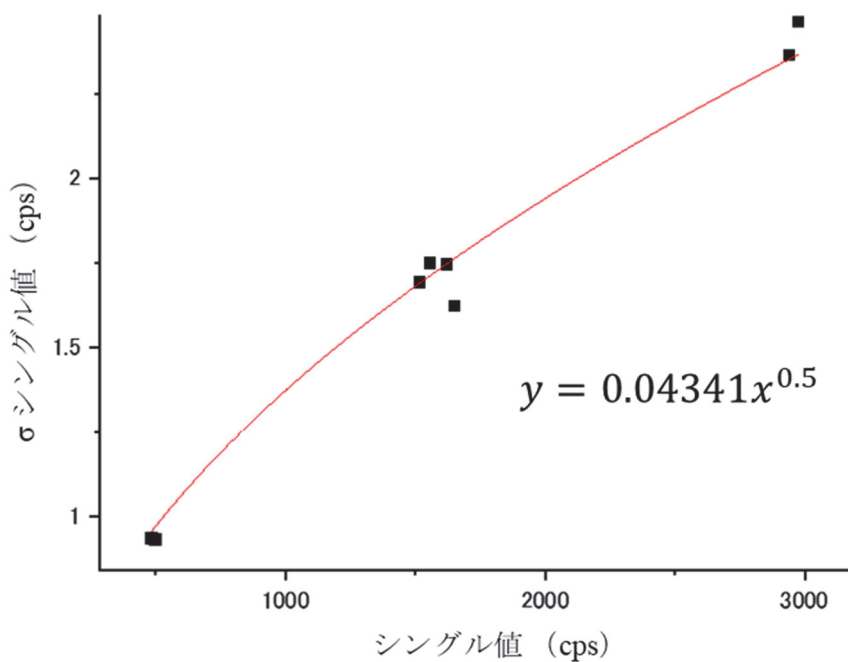


図 2.3.3-8 シングル値及びその誤差の相関評価 (AFAS-P Bottom Fork 検出器)

(3) 有効長の個体差がシングル値の比に与える影響の評価 (BWR 用燃料集合体測定時)

(1) により得られたシングル値の検出効率及び BWR 用燃料集合体の同位体組成比等から求めた中性子放出率を用いて、BWR 用燃料集合体が AFAS-B にて測定された場合の各検出器のシングル値を推定した。また、そのシングル値の誤差を (2) にて評価したシングル値とその誤差の相関より推定した。燃料集合体の有効長が標準、上限値及び下限値のときの中性子放出率、シングル値及びその誤差を表 2.3.3-2 に示す。

また、得られたシングル値及びその誤差から、BWR 用燃料集合体の有効長が異なる場合におけるシングル値の比を求め、比較した。結果を図 2.3.3-9 に示す。

表 2.3.3-2 BWR 用燃料集合体の有効長ごとの中性子放出率、シングル値及びその誤差 (σ)

有効長	検出器		中性子放出率 (n/s)	シングル値 (cps)	誤差 (σ) (cps)
上限値 (3,564mm)	AFAS-B	Top Fork	3.645E+06	3613.134	2.450
		Collar	3.645E+06	161072.528	21.122
		Bottom Fork	3.645E+06	3211.475	2.387
	AFAS-P	Top Fork	3.645E+06	620.196	1.021
		Collar	3.645E+06	11008.235	5.343
		Bottom Fork	3.645E+06	816.348	1.240
標準 (3,554mm)	AFAS-B	Top Fork	3.634E+06	3391.765	2.374
		Collar	3.634E+06	161037.118	21.120
		Bottom Fork	3.634E+06	3210.196	2.386
	AFAS-P	Top Fork	3.634E+06	614.482	1.016
		Collar	3.634E+06	10975.204	5.335
		Bottom Fork	3.634E+06	814.932	1.239
下限値 (3,544mm)	AFAS-B	Top Fork	3.624E+06	3182.884	2.300
		Collar	3.624E+06	161022.681	21.119
		Bottom Fork	3.624E+06	3210.232	2.386
	AFAS-P	Top Fork	3.624E+06	615.332	1.017
		Collar	3.624E+06	10939.073	5.326
		Bottom Fork	3.624E+06	815.653	1.240

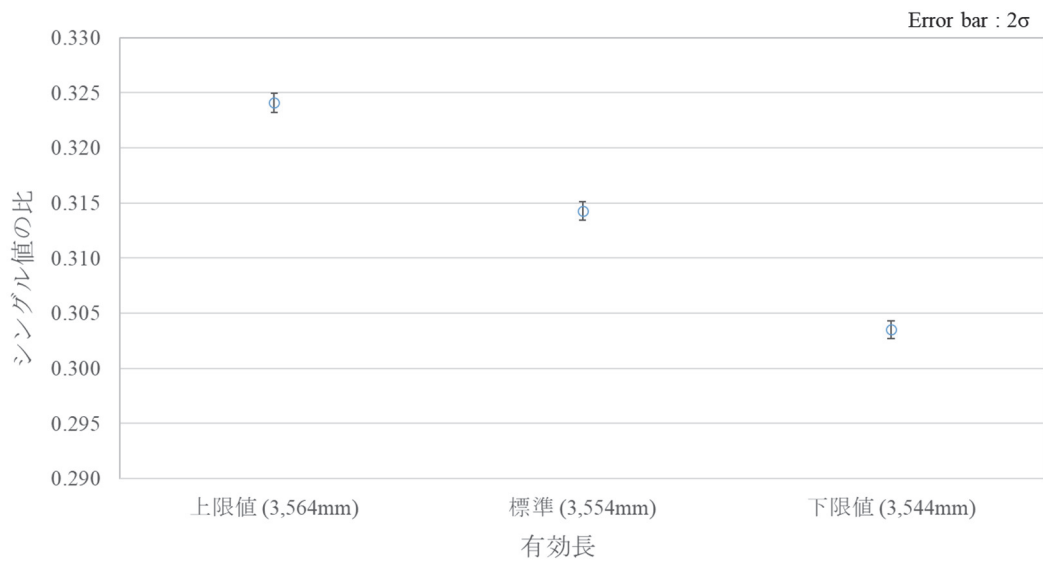


図 2.3.3-9 BWR 用燃料集合体の有効長ごとのシングル値の比の比較

(4) 有効長の個体差がシングル値の比に与える影響の評価 (PWR 用燃料集合体測定時)

(1) により得られたシングル値の検出効率及び PWR 用燃料集合体の同位体組成比等から求めた中性子放出率を用いて、PWR 用燃料集合体が AFAS-P にて測定された場合の各検出器のシングル値を推定した。また、そのシングル値の誤差を (2) にて評価したシングル値とその誤差の相関より推定した。燃料集合体の有効長が標準、上限値及び下限値のときの中性子放出率、シングル値及びその誤差を表 2.3.3-3 に示す。

また、得られたシングル値及びその誤差から、PWR 用燃料集合体の有効長が異なる場合におけるシングル値の比を求め、比較した。結果を図 2.3.3-10 に示す。

表 2.3.3-3 PWR 用燃料集合体の有効長ごとの中性子放出率、シングル値及びその誤差 (σ)

有効長	検出器		中性子放出率 (n/s)	シングル値 (cps)	誤差 (σ) (cps)
上限値 (3,658mm)	AFAS-B	Top Fork	2.094E+07	4072.627	2.601
		Collar	2.094E+07	58017.424	12.677
		Bottom Fork	2.094E+07	3968.615	2.653
	AFAS-P	Top Fork	2.094E+07	24866.418	6.462
		Collar	2.094E+07	1051325.404	52.210
		Bottom Fork	2.094E+07	22164.819	6.463
標準 (3,648mm)	AFAS-B	Top Fork	2.089E+07	4053.892	2.595
		Collar	2.089E+07	57891.758	12.663
		Bottom Fork	2.089E+07	3969.695	2.654
	AFAS-P	Top Fork	2.089E+07	23415.120	6.271
		Collar	2.089E+07	1051320.343	52.210
		Bottom Fork	2.089E+07	22164.509	6.463
下限値 (3,638mm)	AFAS-B	Top Fork	2.083E+07	4033.944	2.589
		Collar	2.083E+07	57726.875	12.645
		Bottom Fork	2.083E+07	3960.368	2.651
	AFAS-P	Top Fork	2.083E+07	22038.257	6.084
		Collar	2.083E+07	1051144.034	52.206
		Bottom Fork	2.083E+07	22148.562	6.460

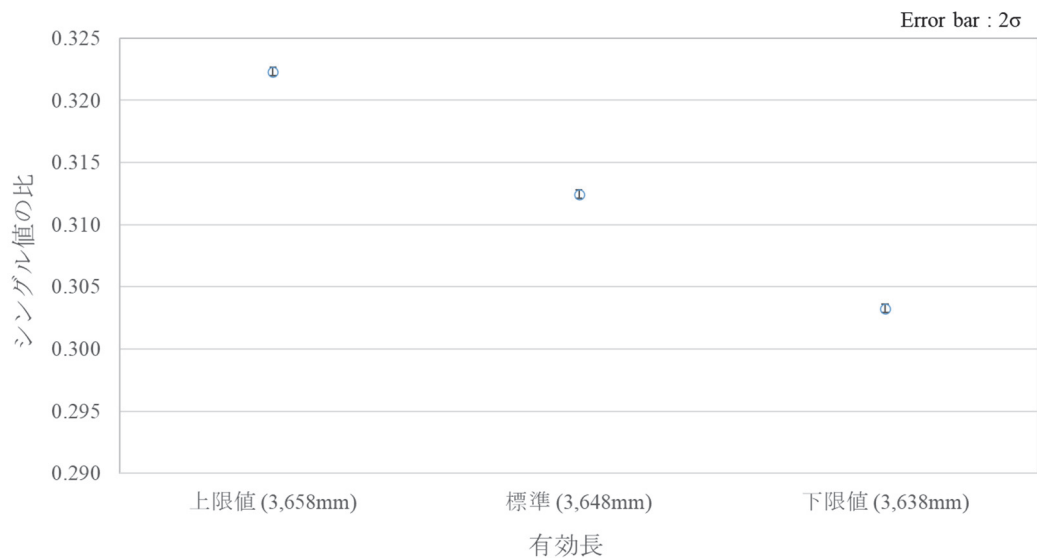


図 2.3.3-10 PWR 用燃料集合体の有効長ごとのシングル値の比の比較

2.3.4 考察

平成 31 年度に評価した異常検知方法を、燃料集合体の有効長の仕様が上限値から下限値の間をとることを考慮しシミュレーションを実施したところ、燃料集合体の有効長が標準、上限値及び下限値のときのシングル値の比は誤差 (2σ) の範囲で一致しなかった。したがって、平成 31 年度に評価した異常検知方法は、燃料集合体の有効長の影響を受けてしまうため、J-MOX における AFAS の異常検知に用いることはできないと考えられる。そこで、シングル値の比が誤差の範囲で一致しなかった理由を調査し、その調査結果をもとに他の異常検知方法について検討した。

これまで検討してきた異常検知方法に用いられているシングル値の比は、燃料集合体が配置されている AFAS-B または AFAS-P の各検出器のシングル値の比を、他方の燃料集合体が配置されていない AFAS の各検出器のシングル値の比で除することにより算出されるため、燃料集合体の有効長に対するそれらのシングル値の比の感度が同一であれば一定の値となると推測される。この感度は、燃料集合体の有効長が標準の場合を基準として、上限値及び下限値における各 AFAS のシングル値の比の変化率で表すことができる。そこで、それらの変化率を評価した結果を図 2.3.4-1 及び図 2.3.4-2 に示す。各有効長における AFAS-B と AFAS-P のシングル値の比の変化率に有意な差が確認された。この理由は、燃料集合体の上端位置を測定する側の AFAS の Top Fork 検出器は、他方の Top Fork 検出器に比べ、有効長に対する感度が高いためであると考えられる。この調査結果をもとに他の異常検知方法を以下のとおり検討した。

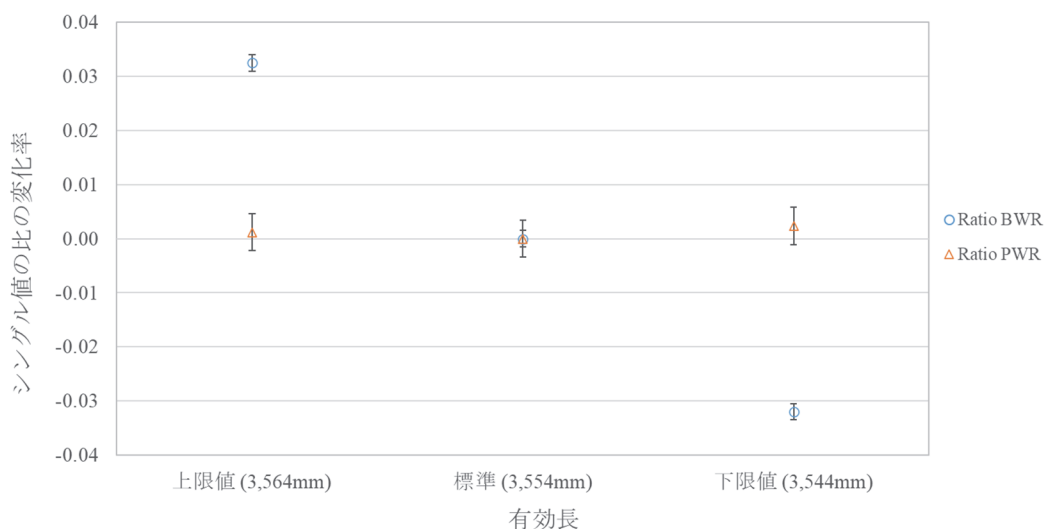


図 2.3.4-1 有効長が標準の場合を基準とした各シングル値の比の変化率の比較
(AFAS-B に燃料集合体を配置)

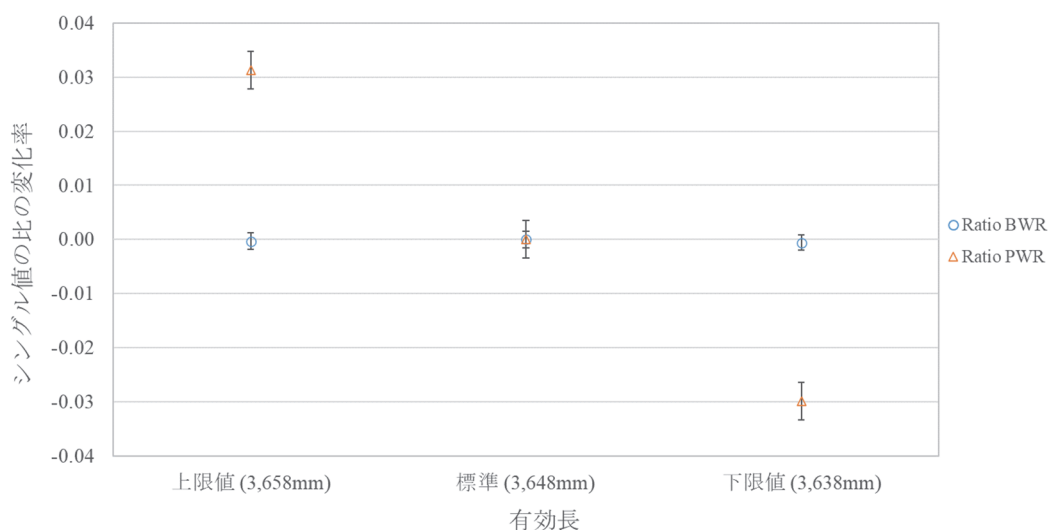


図 2.3.4-2 有効長が標準の場合を基準とした各シングル値の比の変化率の比較
(AFAS-P に燃料集合体を配置)

A) Top Fork 検出器を除くシングル値の比を用いた異常検知方法の検討

前述したとおり、J-MOX にて製造される燃料集合体は、設計仕様の範囲内で有効長の上端位置に違いが生じる。この燃料集合体の上端位置を測定する AFAS の Top Fork 検出器は、有効長に対する感度が高いと推測される。そこで、式 (2.5) 及び (2.6) に示すシングル値の比を用いて、Top Fork 検出器を除く他の検出器の異常を検知可能か評価した。結果を図 2.3.4-3 及び図 2.3.4-4 に示す。BWR 用燃料集合体を測定した場合のシングル値の比は誤差 (2σ) の範囲で一致したが、PWR 用燃料集合体を測定した場合のシングル値の比は、誤差 (2σ) の範囲で一致しなかった。この結果から、Top Fork 検出器に加えて他の検出器も有効長に対する感度を有していると推測される。したがって、このシングル値の比も AFAS の検出器の異常検知に用いることはできないと考えられる。なお、BWR 燃料集合体と PWR 燃料集合体を測定した場合に結果が異なった理由は、各測定における燃料集合体の Pu 量に由来する計数誤差と、有効長に依存して変化したシングル値の比の変化量が異なったためと推測される。

$$Ratio_{BWR} = \frac{S_{Bottom Fork B}}{S_{Collar B}} / \frac{S_{Bottom Fork P}}{S_{Collar P}} \quad \dots \quad (2.5)$$

$$Ratio_{PWR} = \frac{S_{Bottom Fork P}}{S_{Collar P}} / \frac{S_{Bottom Fork B}}{S_{Collar B}} \quad \dots \quad (2.6)$$

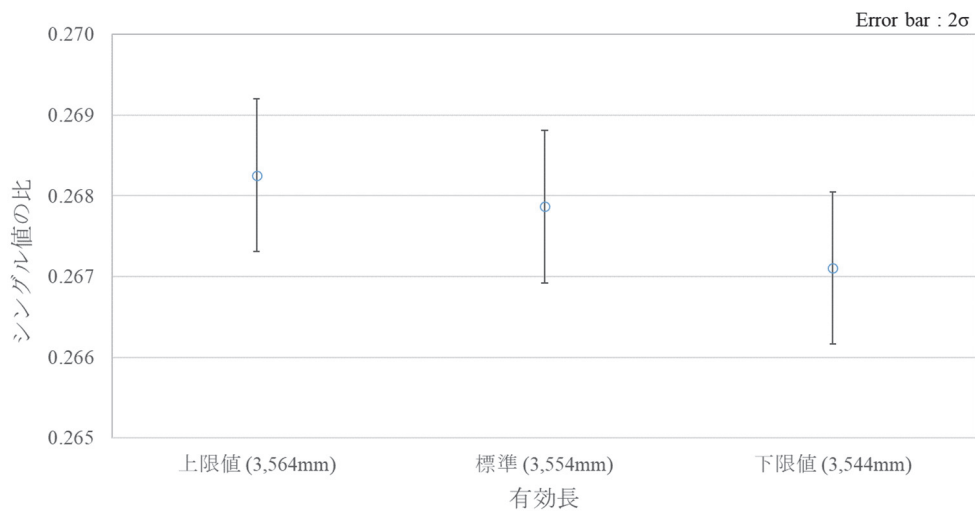


図 2.3.4-3 Top Fork 検出器を除いた場合の BWR 用燃料集合体の有効長ごとのシングル値の比の比較

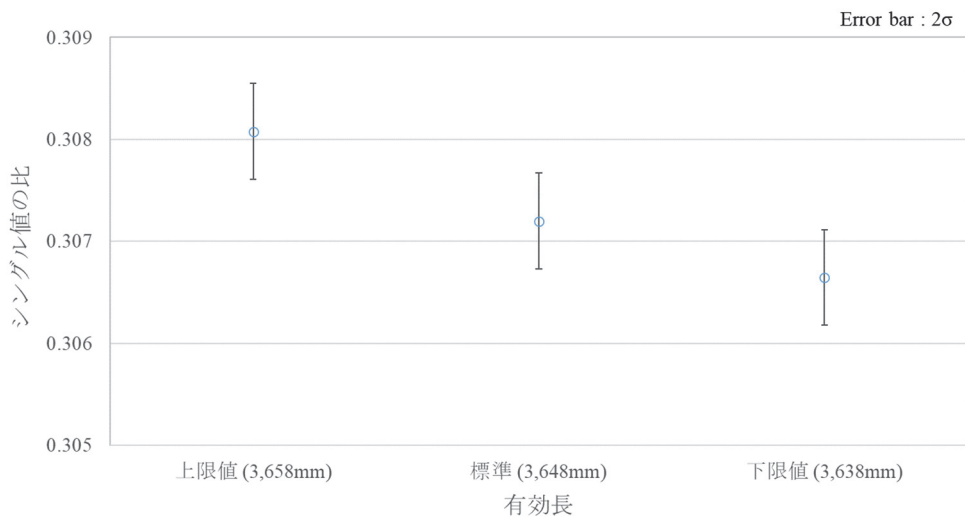


図 2.3.4-4 Top Fork 検出器を除いた場合の PWR 用燃料集合体の有効長ごとのシングル値の比の比較

B) 燃料集合体が配置されていない AFAS のシングル値の比を用いた異常検知方法の検討

燃料集合体が配置されている AFAS と比較して他方の燃料集合体が配置されていない AFAS の方が、燃料集合体の有効長に対する感度は低いと推測される。そこで、式 (2.7) 及び (2.8) に示すシングル値の比を用いて、一方の AFAS で燃料集合体を測定中に、他方の AFAS の検出器の異常を検知可能か評価した。結果を図 2.3.4-5 及び図 2.3.4-6 に示す。シングル値の比は、BWR 用燃料集合体を測定した場合及び PWR 用燃料集合体を測定した場合ともに誤差 (2σ) の範囲で一致した。加えて、AFAS の各検出器を構成する ^3He 比例計数管のうちいずれか 1 本が故障した場合に異常を検知可能か確認するため、Fork 検出器については 50%、Collar 検出器については 1% シングル値を減少させたときのシングル値の比を評価し、正常な状態の AFAS により得られるシングル値の比と比較した。比較結果のうち、Collar 検出器の ^3He 比例計数管 1 本の故障を想定した場合を抜粋し図 2.3.4-7~2.3.4-12 に示す。 ^3He 比例計数管 1 本の故障を想定した場合のシングル値の比のみ誤差 (2σ) の範囲で一致しなかった。これらより、一方の AFAS で燃料集合体を測定中に、他方の AFAS の検出器の異常をその AFAS の検出器のシングル値の比を用いて検知することは可能であると考えられる。

以上のことから、式 (2.7) 及び (2.8) に示した AFAS のシングル値の比を継続的に監視することで、一方の AFAS で燃料集合体を測定中に、他方の AFAS の各検出器の異常を検知することが可能であるとの見通しを得た。しかしながら、本方法では、燃料集合体の有効長及び Pu 量を測定中の AFAS の異常を即時に検知することができない点に留意する必要がある。

$$Ratio_{PWR(FApos.BWR)} = \frac{S_{Top Fork P} + S_{Bottom Fork P}}{S_{Collar P}} \dots (2.7)$$

$$Ratio_{BWR(FApos.PWR)} = \frac{S_{Top Fork B} + S_{Bottom Fork B}}{S_{Collar B}} \dots (2.8)$$

$Ratio_{PWR(FApos.BWR)}$: 燃料集合体が AFAS-B に配置されている場合の AFAS-P のシングル値の比

$Ratio_{BWR(FApos.PWR)}$: 燃料集合体が AFAS-P に配置されている場合の AFAS-B のシングル値の比

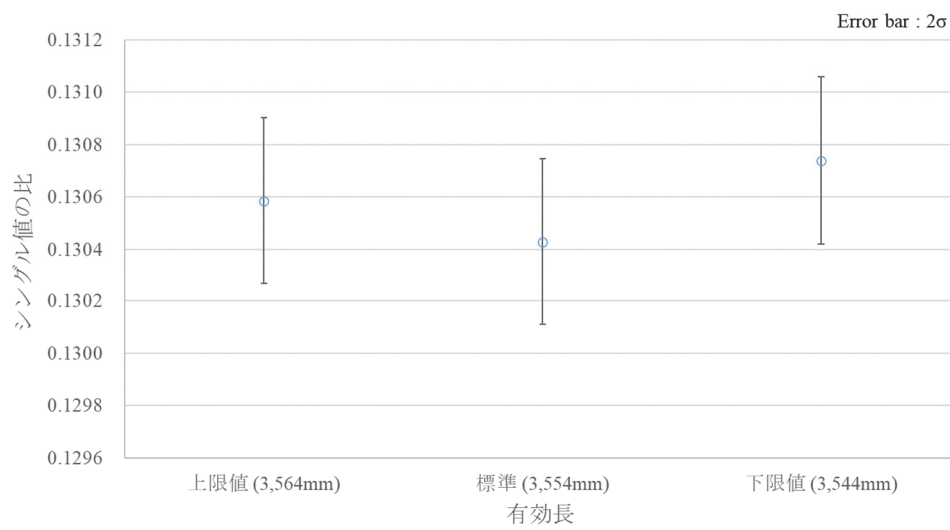


図 2.3.4-5 燃料集合体が AFAS-B に配置されている場合の AFAS-P のシングル値の比の比較

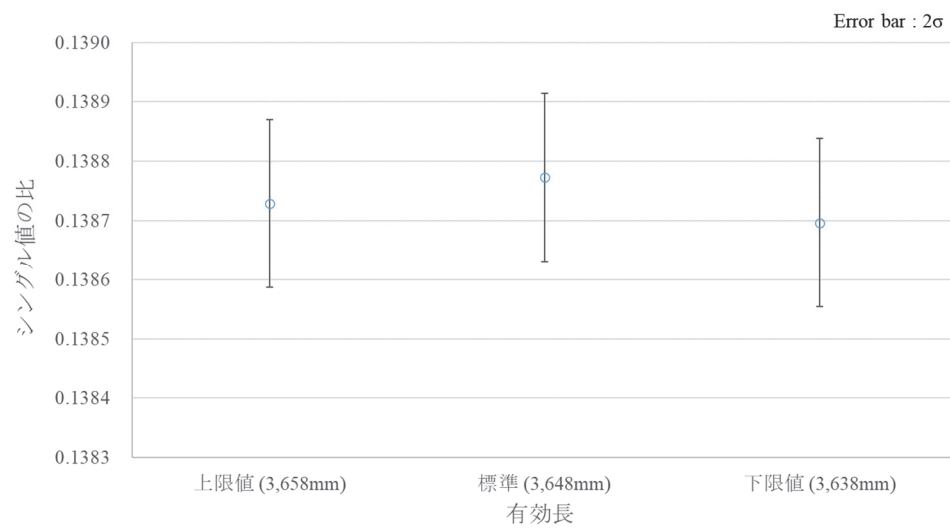


図 2.3.4-6 燃料集合体が AFAS-P に配置されている場合の AFAS-B のシングル値の比の比較

○AFAS-P Collar 検出器の ^3He 比例計数管 1 本の故障を想定した場合の比較結果

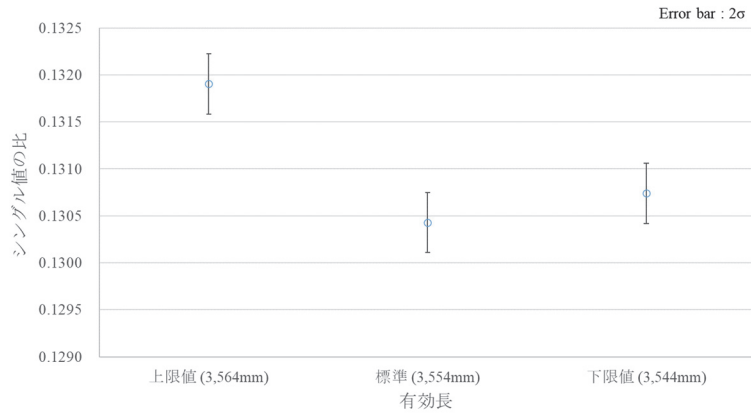


図 2.3.4-7 BWR 用燃料集合体（有効長が上限値）が配置されている場合の AFAS-P のシングル値の比の比較

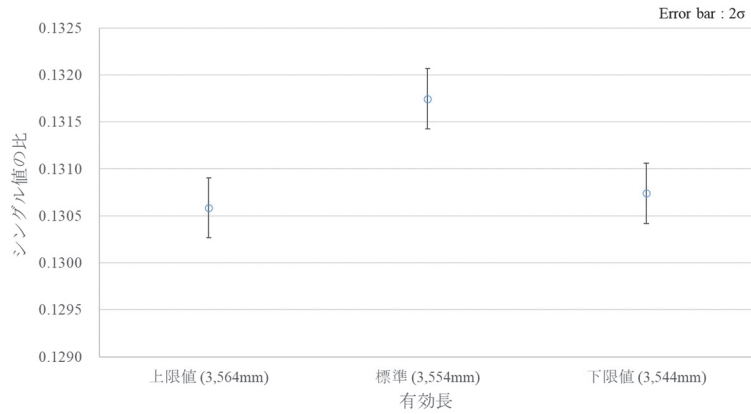


図 2.3.4-8 BWR 用燃料集合体（有効長が標準）が配置されている場合の AFAS-P のシングル値の比の比較

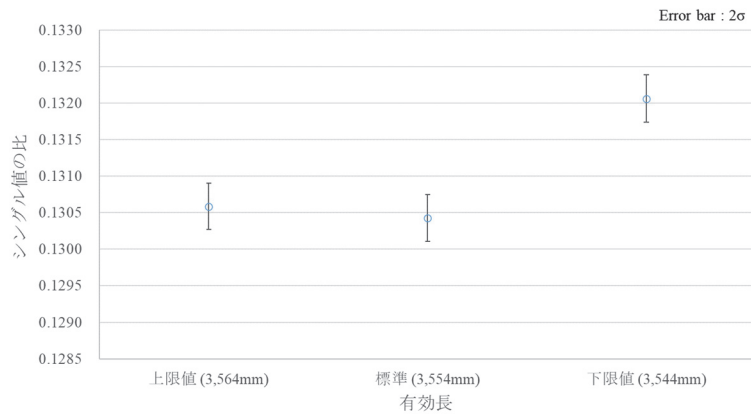


図 2.3.4-9 BWR 用燃料集合体（有効長が下限値）が配置されている場合の AFAS-P のシングル値の比の比較

○AFAS-B Collar 検出器の ^3He 比例計数管 1 本の故障を想定した場合の比較結果

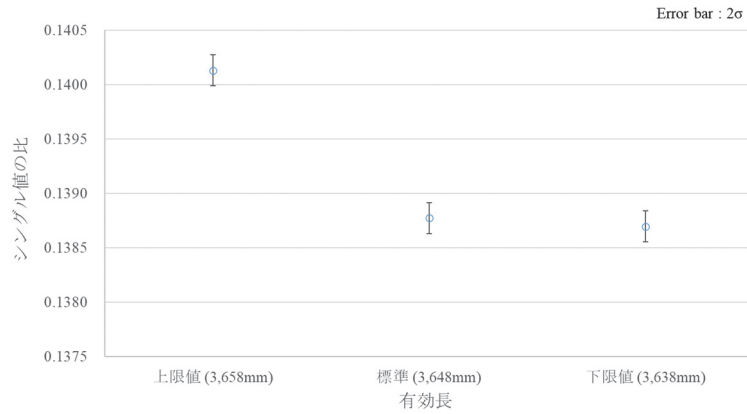


図 2.3.4-10 PWR 用燃料集合体（有効長が上限値）が配置されている場合の AFAS-B のシングル値の比の比較

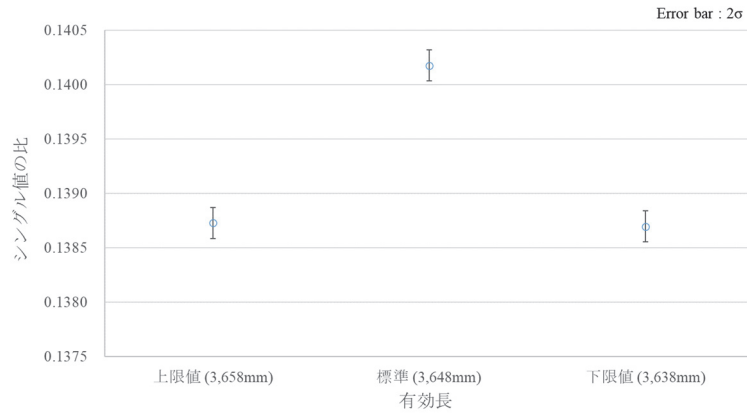


図 2.3.4-11 PWR 用燃料集合体（有効長が標準）が配置されている場合の AFAS-B のシングル値の比の比較

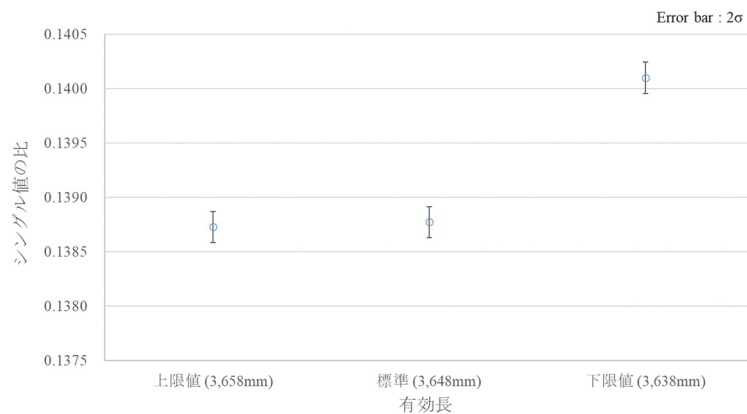


図 2.3.4-12 PWR 用燃料集合体（有効長が下限値）が配置されている場合の AFAS-B のシングル値の比の比較

2.4 AFAS の故障時の測定パラメータの再評価方法の検討及び故障時の測定性能の評価

2.4.1 目的

J-MOX において AFAS が故障した場合にシステムを停止することなく、測定パラメータを再評価することで燃料集合体測定 of 継続を可能とする方法を検討する^(*16)。また、本方法を適用した場合の AFAS の測定性能を評価する。

本検討は、前年度（令和 2 年度）の性能確認試験^(参考文献 2)においても実施したものであり、前年度の検討では、AFAS が故障（アンプ 1 個が機能停止）した場合、²⁵²Cf 中性子線源を用いて AFAS の測定パラメータを再評価することで、システムを停止することなく燃料集合体測定が継続可能であるとの結論を得た。しかしながら、実際の J-MOX における測定環境では、燃料集合体の保護管が AFAS 検出器の内側に設置されるため、前年度の検討で行ったように ²⁵²Cf 中性子線源を AFAS 検出器の中央位置へ配置することは困難である。

したがって、本年度の試験では、J-MOX においても適用可能な、燃料集合体を用いた測定パラメータの再評価方法を検討する。また、本方法を適用した場合の AFAS の測定精度を確認する。

なお、本検討で想定する AFAS の故障箇所は、前年度の検討と同様に Collar 検出器のアンプ 1 個とする。

*16: 査察官非立会測定システムとして使用される AFAS が故障し、復旧までの一定期間燃料集合体の検認が不可能となった場合、施設の操業に影響を及ぼす可能性がある。

2.4.2 方法

Collar 検出器のアンプ 1 個の機能を停止させ、Pu 量の異なる 2 体の燃料集合体（A 及び B）を測定し、得られたそれらの計数値から測定パラメータ（スロープ b 及び ρ_0 ）を再評価する。スロープ b とは、Known α 法における増倍補正されたダブル値 (D_c) と単位長さあたりの ²⁴⁰Pu 実効質量 (g/cm) (m_{240e}) を関連付ける一次方程式の傾きのことであり、 ρ_0 とは、増倍の無いサンプルを測定したときのシングル値とダブル値の比のことである。

また、再評価した測定パラメータの妥当性を確認するため、検出器が正常な状態及びアンプ 1 個の機能を停止した状態において上記とは異なる燃料集合体（C）を測定し、²⁴⁰Pu 実効質量 (g/cm) の測定結果を比較する。さらに、再評価した測定パラメータを用いた場合の測定精度を確認するため、²⁴⁰Pu 実効質量 (g/cm) の相対誤差 (%RSD) を求める。

AFAS-P の Collar 検出器のアンプの配置図を図 2.4.2-1 に示す。本評価において機能を停止するアンプは、Collar 検出器の Primary 検出器側のアンプ B 及び Secondary 検出器

側のアンプ G とする(*17)。

本検討で使用する燃料集合体の仕様及び同位体組成比を 1.7 項の表 1.7-1 及び表 1.7-2 に示す。

*17: 再評価した測定パラメータの妥当性については、前述のとおり、検出器が正常な状態及びアンプ 1 個の機能を停止した状態で燃料集合体を測定し、得られた ^{240}Pu 実効質量 (g/cm) を比較することにより確認する。この妥当性確認においては、 ^{240}Pu 実効質量 (g/cm) の測定精度が高いほど正確な判定が可能のため、前年度 (令和 2 年度) の性能確認試験^(参考文献2)の結果から、測定における計数誤差が小さく ^{240}Pu 実効質量 (g/cm) の測定精度が高いと想定されるアンプ B 及びアンプ G の機能停止を評価対象とした。

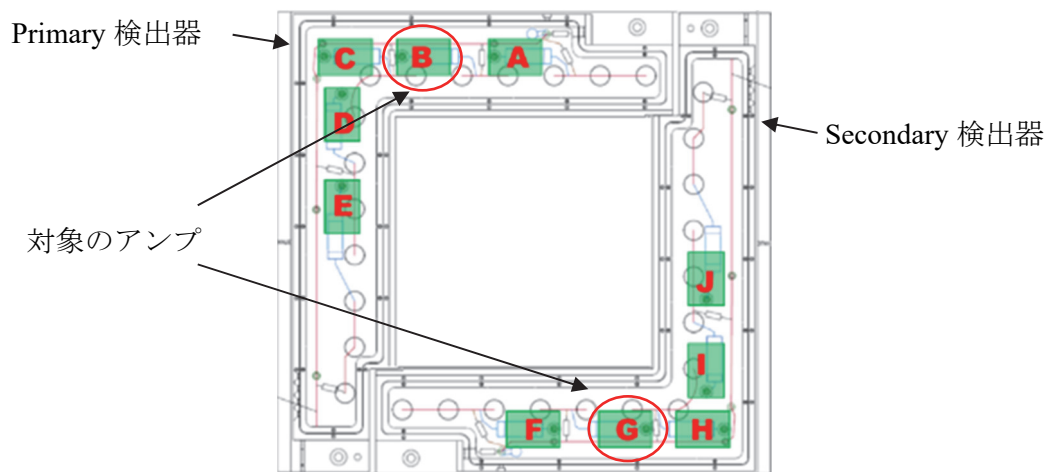


図 2.4.2-1 AFAS-P Collar 検出器のアンプ配置図及び対象のアンプ

詳細な手順を以下に示す。

- (1) AFAS の故障時の測定パラメータの再評価
 - ① AFAS-P の Collar 検出器を燃料集合体測定用架台に設置する。
 - ② INCC の Background 測定モードにより 30 分間のバックグラウンド測定を行う。
 - ③ クレーンを用いて燃料集合体 (A または B) を AFAS-P の Collar 検出器の中心に配置し、INCC の Verification 測定モードによりそれぞれ 10 分間の測定を行う。
 - ④ 検出器のジャンクションボックスの蓋を外し、任意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。その後、検出器のジャンクションボックスの蓋を取り付ける。
 - ⑤ INCC の Background 測定モードにより 30 分間のバックグラウンド測定を行う。
 - ⑥ クレーンを用いて燃料集合体 (A または B) を AFAS-P の Collar 検出器の中心に配置し、INCC の Verification 測定モードによりそれぞれ 10 分間の測定を行う。
 - ⑦ ③にて得られたアンプが正常な状態における α 値、増倍値 M 及び⑥にて測定され

た増倍補正前のダブル値 (D) を式 (2.9) に代入し、アンプ 1 個の機能を停止した状態における増倍補正されたダブル値 (D_c) を再計算する。

- ⑧ ③にて得られたアンプが正常な状態における ^{240}Pu 実効質量 (g/cm) 及び⑦にて得られた増倍補正されたダブル値 (D_c) を Deming^(*18)に代入し、アンプ 1 個の機能を停止した状態におけるスロープ b を評価する。
- ⑨ ③及び⑥にて得られた増倍補正前のシングル値 (S)、 α 値及び増倍値 M 及び⑦にて得られた増倍補正されたダブル値 (D_c) を式 (2.10) に代入し、アンプ 1 個の機能を停止した状態における ρ_0 ^(*19)を評価する。
- ⑩ 対象のアンプについて、④～⑨を実施する。

*18 : LANL が開発したキャリブレーションカーブ評価用ソフトウェア

*19 : 燃料集合体 (A 及び B) の測定結果から得られた各 ρ_0 の平均値

$$D_c = \frac{D}{CF} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (2.9)$$

$$\rho_0 = \frac{D_c M}{S} (1 + \alpha) \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (2.10)$$

ただし、 S : 増倍補正前のシングル値

D : 増倍補正前のダブル値

D_c : 増倍補正されたダブル値

CF : 増倍補正係数 $CF = M^2 (2.166(1 + \alpha)M + (1 - 2.166(1 + \alpha)))$

M : 増倍値

α : 自発核分裂と (α, n) 反応により生じた中性子の比

ρ_0 : 増倍の無いサンプルを測定したときのシングル値とダブル値の比

- (2) 再測定した測定パラメータの妥当性確認及び AFAS の故障時の測定性能の評価
 - ① AFAS-P の Collar 検出器を燃料集合体測定用架台に設置する。
 - ② INCC の Background 測定モードにより 30 分間のバックグラウンド測定を行う。
 - ③ クレーンを用いて燃料集合体 (C) を AFAS-P の Collar 検出器の中心に配置し、INCC の Verification 測定モードにより 10 分間の測定を行う。
 - ④ 検出器のジャンクションボックスの蓋を外し、任意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。その後、検出器のジャンクションボックスの蓋を取り付ける。
 - ⑤ INCC の Background 測定モードにより 30 分間のバックグラウンド測定を行う。
 - ⑥ クレーンを用いて燃料集合体 (C) を AFAS-P の Collar 検出器の中心に配置し (1)

の⑧及び⑨にて評価したスロープ b 及び ρ_0 を用いて INCC の Verification 測定モードにより 10 分間の測定を行う。

- ⑦ ③及び⑥にて測定された ^{240}Pu 実効質量 (g/cm) 及び誤差 (2σ) を比較し、再評価したスロープ b 及び ρ_0 の妥当性を評価する。また、式 (2.11) を用いて各 ^{240}Pu 実効質量 (g/cm) の相対誤差 (%RSD) を求め、測定精度を確認する。
- ⑧ 対象のアンプについて、④～⑦を実施する。

$$\%RSD = \frac{\sigma m_{240e}}{m_{240e}} \times 100 \quad \dots \quad (2.11)$$

ただし、 m_{240e} : 単位長さあたりの ^{240}Pu 実効質量 (g/cm)

2.4.3 結果

(1) AFAS の故障時の測定パラメータの再評価

AFAS-P の Collar 検出器が正常な状態における燃料集合体 (A 及び B) の測定結果を表 2.4.3-1 に、検出器のアンプ 1 個の機能を停止した状態における測定結果を表 2.4.3-2 に示す。また、アンプ 1 個の機能を停止した状態において適用するスロープ b 及び ρ_0 の再評価結果を表 2.4.3-3 に示す。

表 2.4.3-1 検出器が正常な状態における燃料集合体測定結果

集合体 No.	S (cps)	σS	D (cps)	σD	α	M	Dc (cps)	σDc	$^{240}\text{Pu}_{\text{eff}}$ (g/cm)
A	72923.006	9.803	3593.531	39.374	1.054	1.016	3240.645	6.829	3.764
B	63256.015	15.842	3009.412	23.884	1.065	1.011	2812.950	4.283	3.267

表 2.4.3-2 検出器のアンプ 1 個の機能を停止した状態における燃料集合体測定結果

集合体 No.	計数機能を停止したアンプ	S (cps)	σS	D (cps)	σD	再計算後の Dc (cps)	σDc
A	アンプ B	66987.806	13.121	3015.680	24.921	2727.307	4.364
	アンプ G	66941.462	14.003	3040.992	34.837	2750.198	6.075
B	アンプ B	58171.100	10.095	2541.815	23.644	2370.189	4.181
	アンプ G	57984.087	19.985	2531.354	16.256	2360.435	3.014

表 2.4.3-3 アンプ 1 個の機能を停止した状態において適用する
スロープ b 及び ρ_0 の再評価結果

計数機能を 停止したアンプ	Slope b	σ Slope b	ρ_0
アンプ B	724.990	0.456	0.0850
アンプ G	724.516	3.511	0.0854

(2) 再測定した測定パラメータの妥当性確認及び AFAS の故障時の測定性能の評価
正常な状態及びアンプ 1 個の機能を停止した状態の AFAS-P の Collar 検出器により測定した燃料集合体 (C) の ^{240}Pu 実効質量 (g/cm) を比較した結果を図 2.4.3-1 に示す。
また、各 ^{240}Pu 実効質量 (g/cm) の相対誤差 (%RSD) を表 2.4.3-4 に示す。

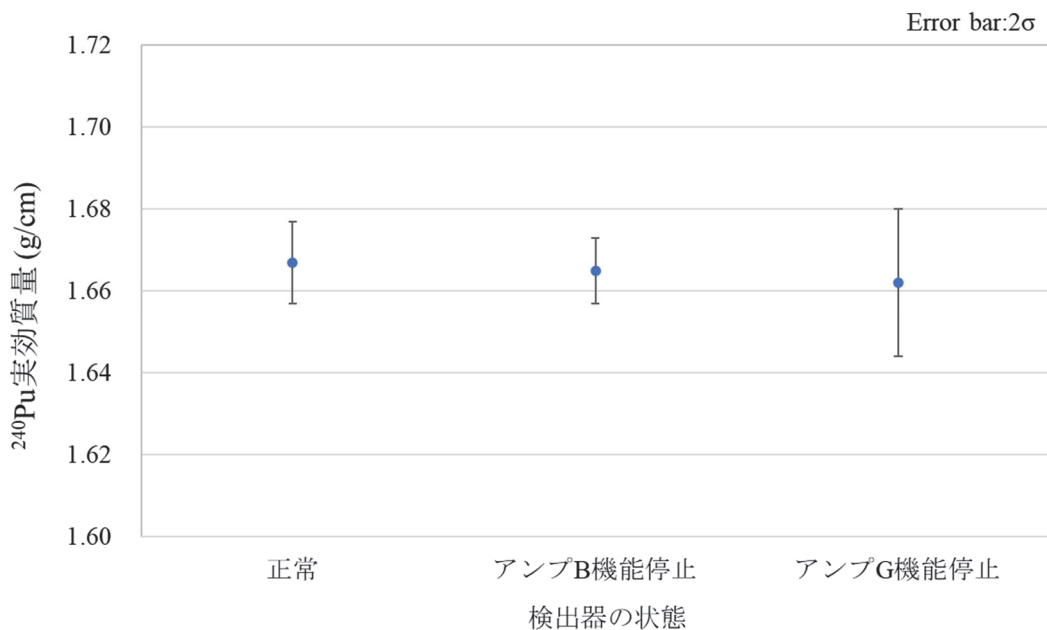


図 2.4.3-1 ^{240}Pu 実効質量 (g/cm) 及び誤差 (2σ) の比較

表 2.4.3-4 検出器が正常な状態及びアンプ 1 個の機能を停止した状態において
得られた ^{240}Pu 実効質量 (g/cm) の相対誤差 (%RSD)

検出器の状態	^{240}Pu 実効質量 (g/cm)	2σ	%RSD
正常	1.667	0.010	0.300
アンプ B 機能停止	1.665	0.008	0.240
アンプ G 機能停止	1.662	0.018	0.542

2.4.4 考察

Collar 検出器のアンプ 1 個の機能を停止した状態において燃料集合体を測定し、再評価した測定パラメータ（スロープ b 及び ρ_0 ）を用いて得られた ^{240}Pu 実効質量（g/cm）は、検出器が正常な状態において得られた ^{240}Pu 実効質量（g/cm）と誤差（ 2σ ）の範囲で一致した。このことから、再評価した測定パラメータは妥当であり、測定パラメータを再評価するために燃料集合体を用いることは可能であると考えられる。また、再評価した測定パラメータを用いて得られた ^{240}Pu 実効質量（g/cm）の相対誤差（約 0.24% 及び 0.54%）は、IAEA が AFAS 要求仕様書^(参考文献 4)で示している要求精度（測定時間 10 分において相対誤差 2.0%以下）を満たすものであった。

したがって、本年度検討を行った「J-MOX において AFAS が故障した場合、燃料集合体を用いて再評価した測定パラメータを適用する」という方法は、将来、査察側にとって現実的かつ有効な方法になり得ると考えられる。

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 中性子線源を測定し、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、本評価結果と前年度 (令和 2 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 31 年度及び令和 2 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、本評価で使用する ^{252}Cf 中性子線源 (T1-349) を 1.6 項の表 1.6-1 に示す。

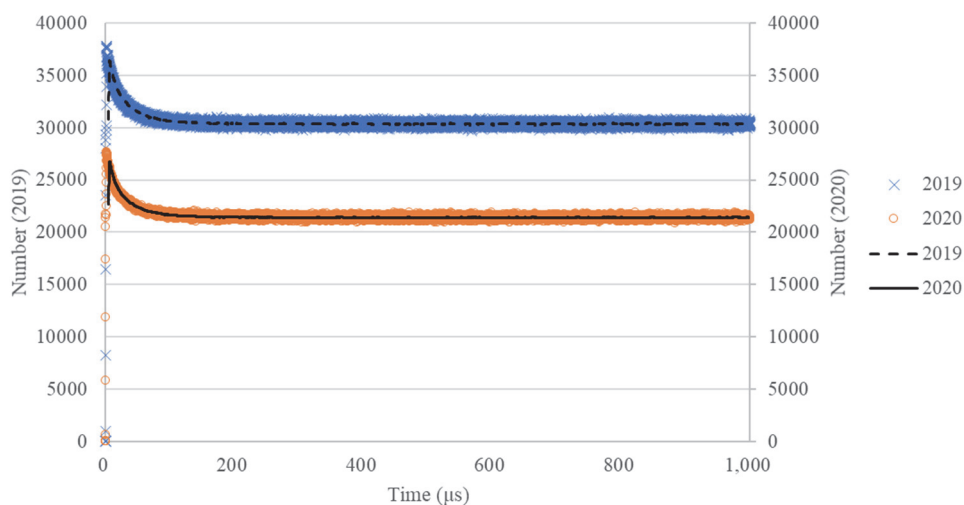


図 3.1.2-1 AVIS の中性子検出器 アンプ A のパルス間隔分布の例

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

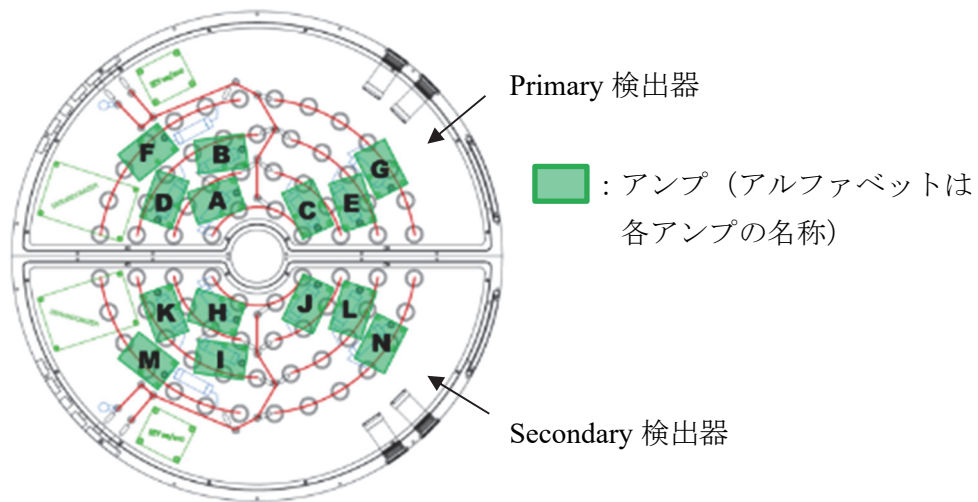


図 3.1.2-2 AVIS のアンプ配置図

詳細な試験手順を以下に示す。

- ① 線源固定治具を用いて、 ^{252}Cf 中性子線源 (T1-349^(*20)) 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。

*20: 前年度 (令和 2 年度) 以前の同評価に用いていた ^{252}Cf 中性子線源 (Q2-334) は、減衰により線源強度が低下したことから、本年度の検討では、線源強度が高い新たな線源 (T1-349) を使用する。

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。本評価結果と令和2年度(2020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×印及び破線は令和2年度(2020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、○印及び実線は令和3年度(2021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。

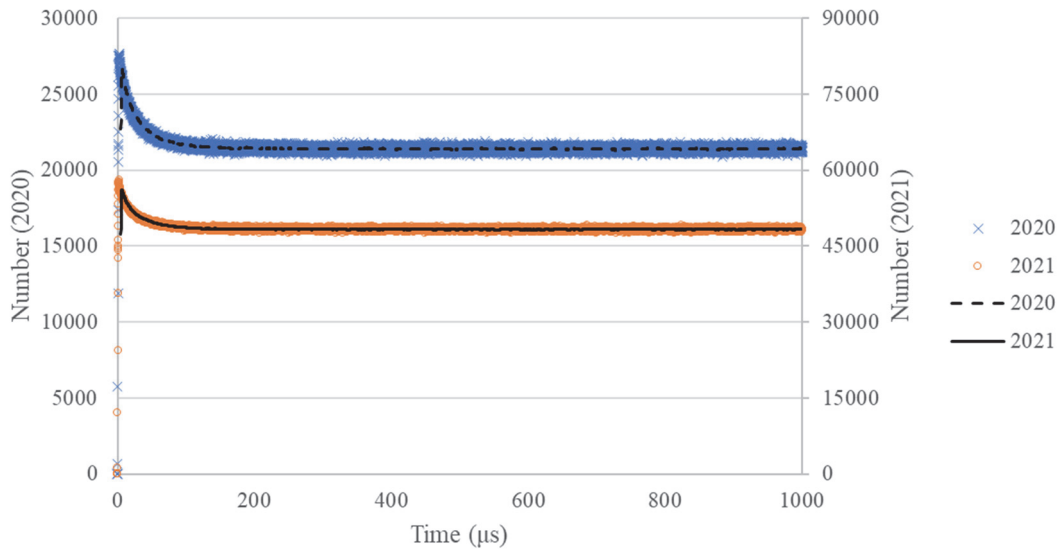


図 3.1.3-1 アンプ A のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

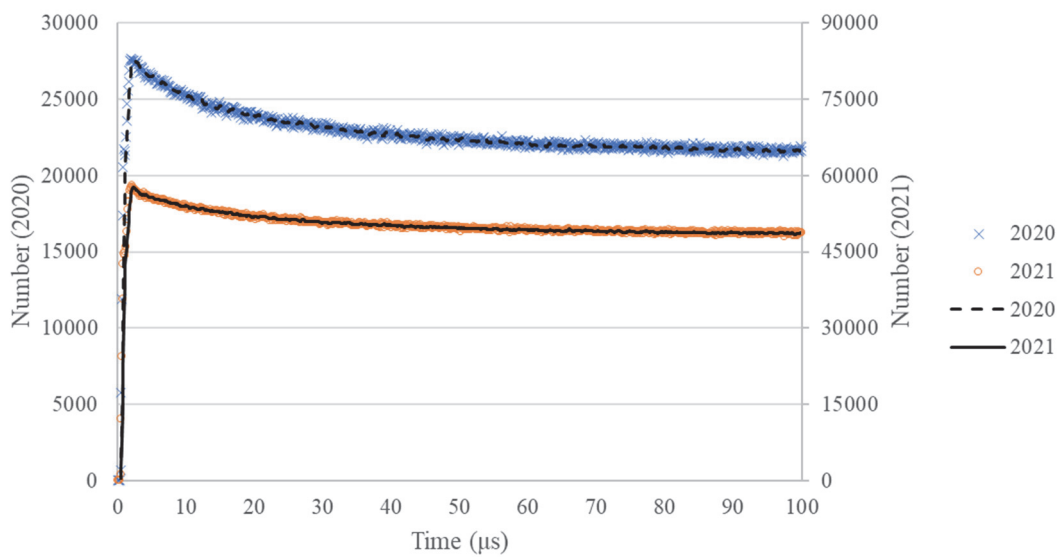


図 3.1.3-2 アンプ A のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

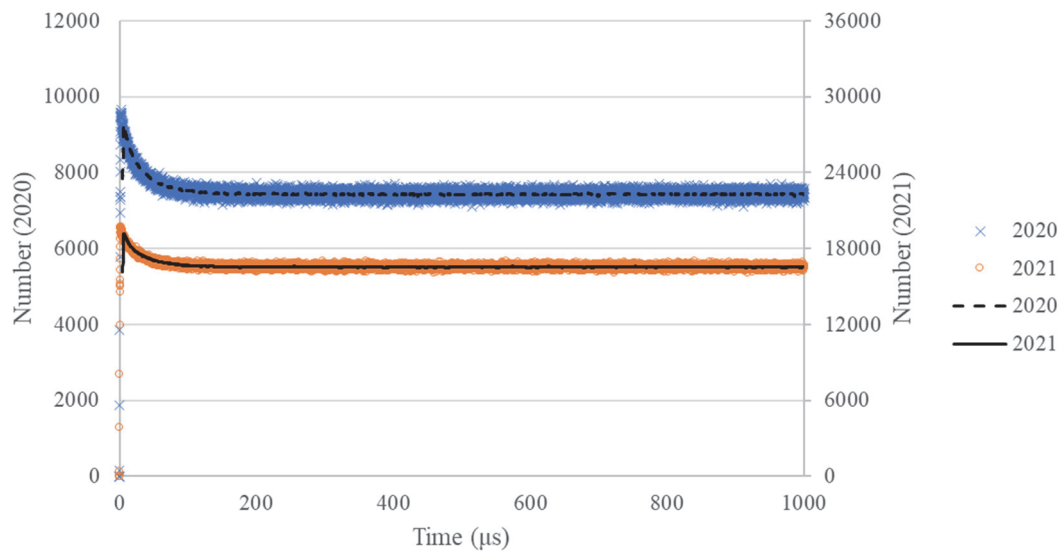


図 3.1.3-3 アンプ B のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

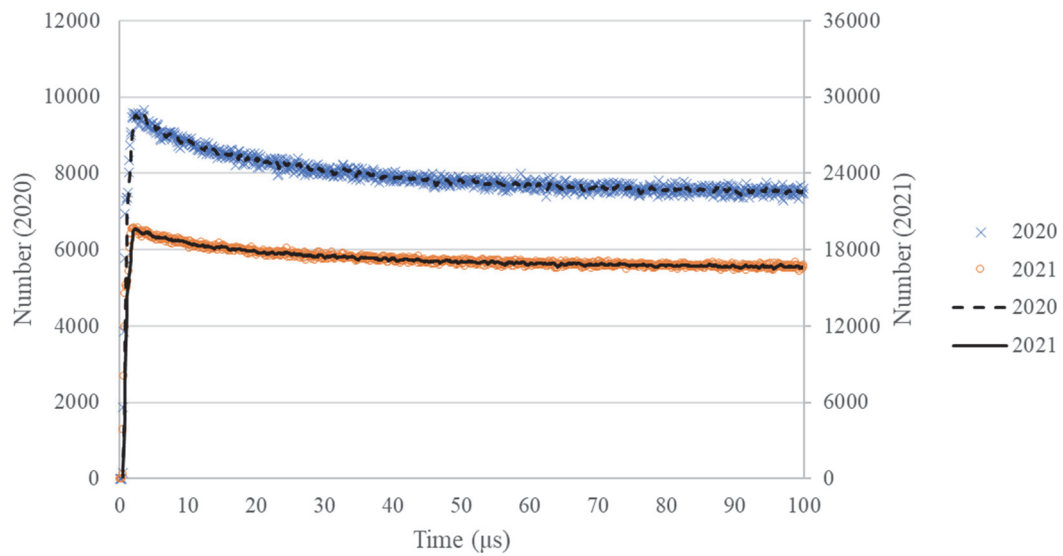


図 3.1.3-4 アンプ B のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

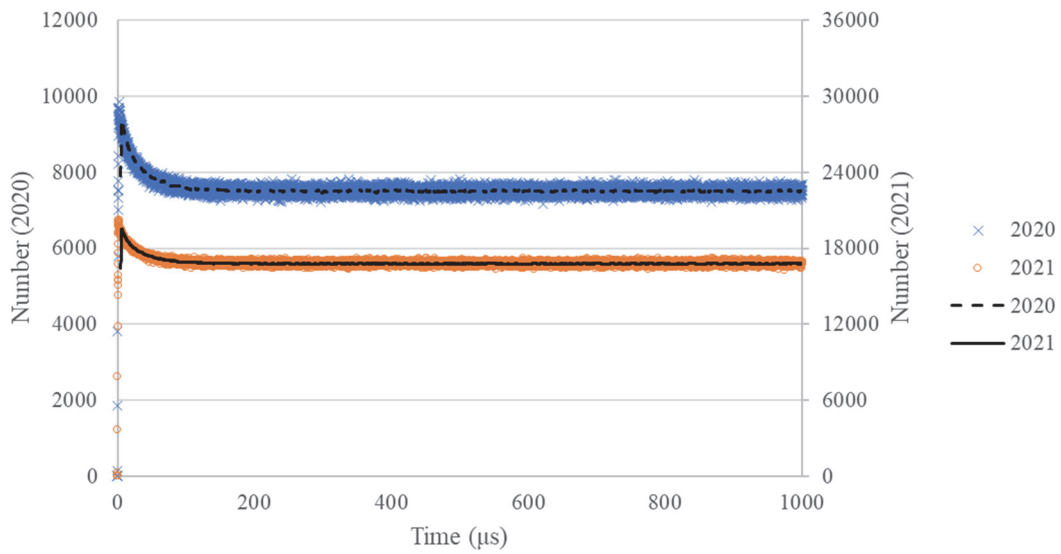


図 3.1.3-5 アンプ C のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

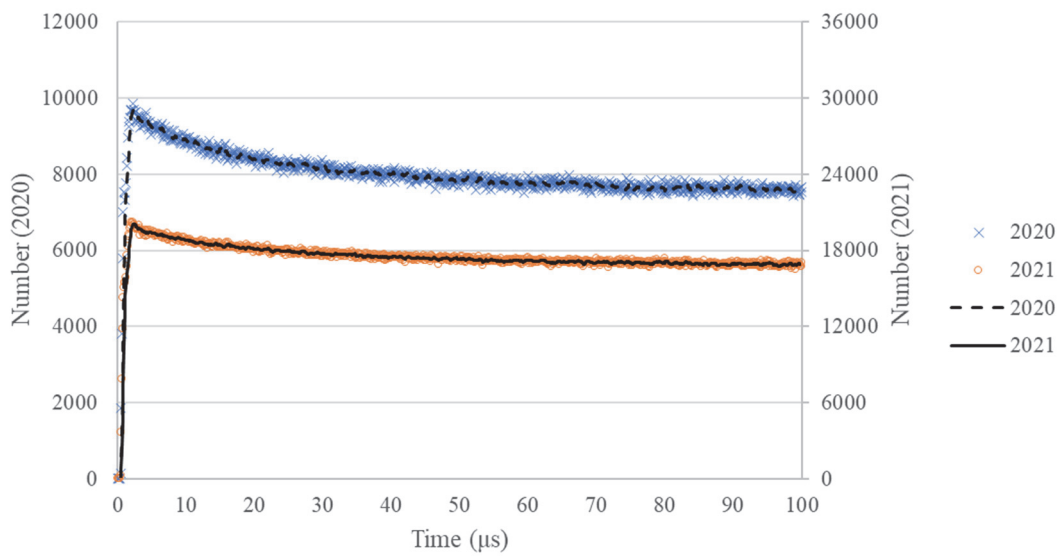


図 3.1.3-6 アンプ C のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

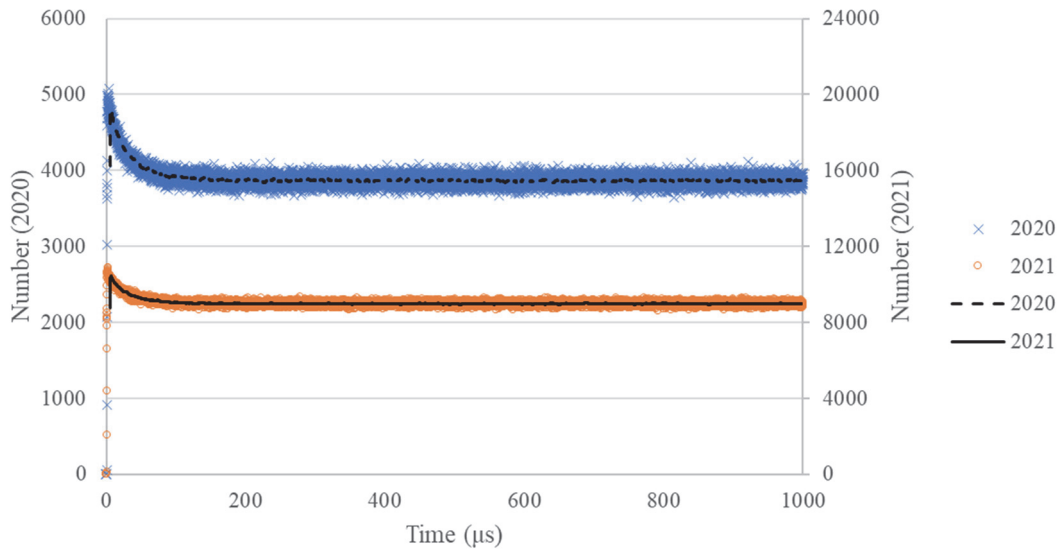


図 3.1.3-7 アンプ D のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

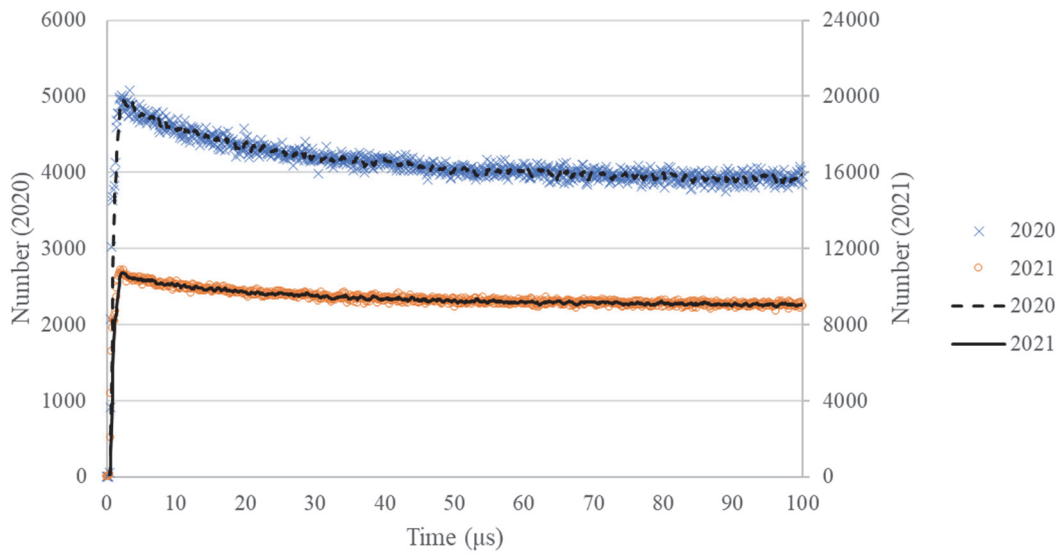


図 3.1.3-8 アンプ D のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

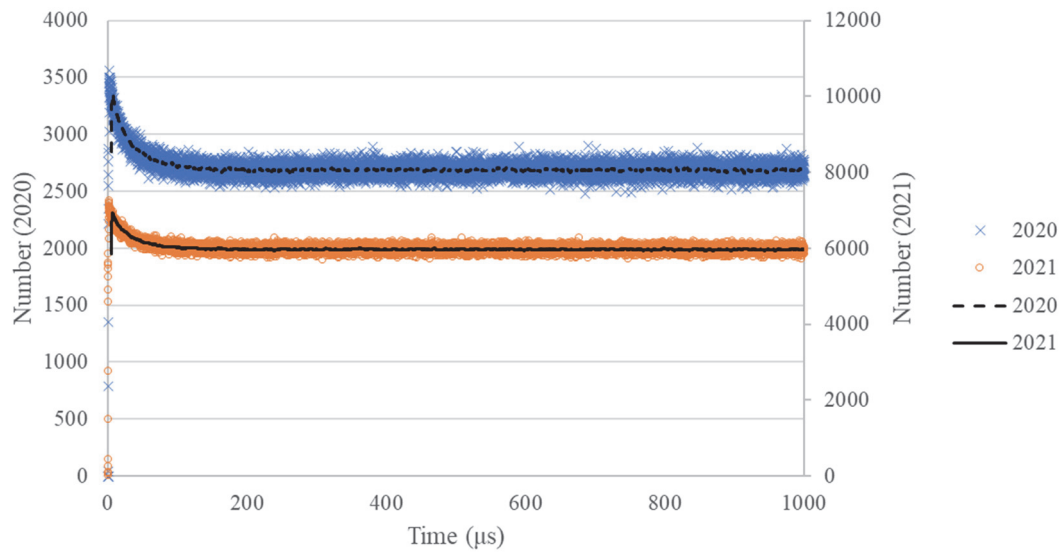


図 3.1.3-9 アンプ E のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

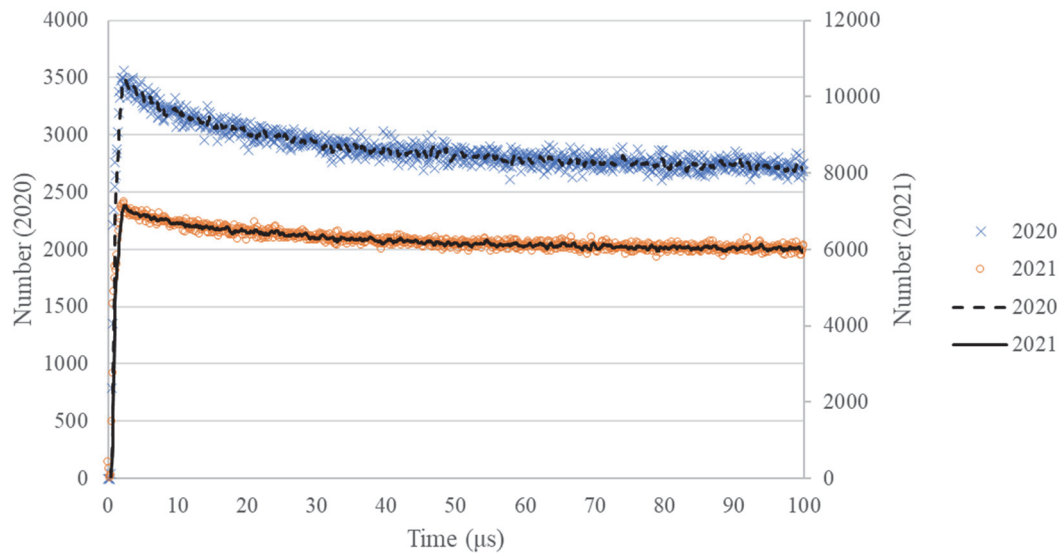


図 3.1.3-10 アンプ E のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

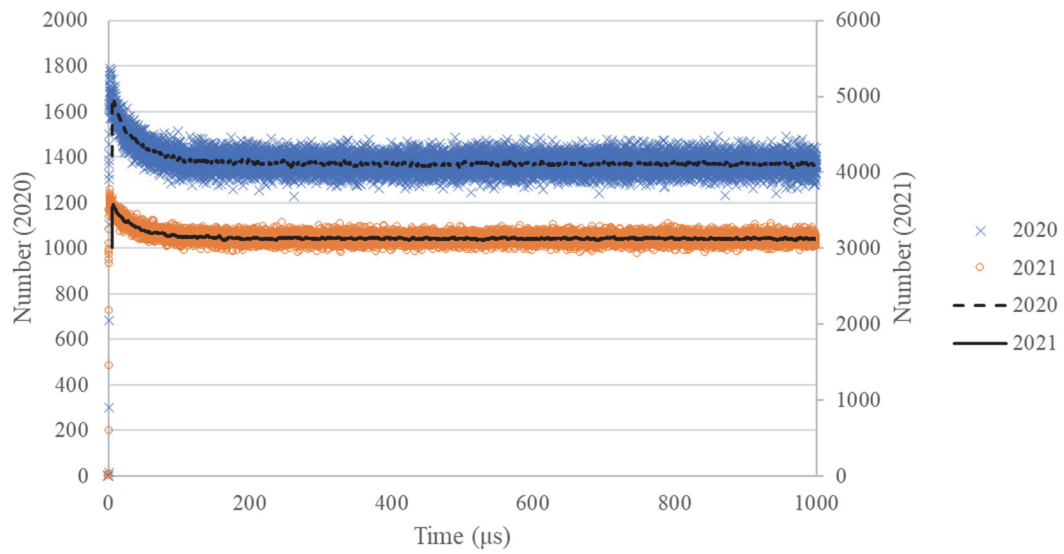


図 3.1.3-11 アンプ F のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

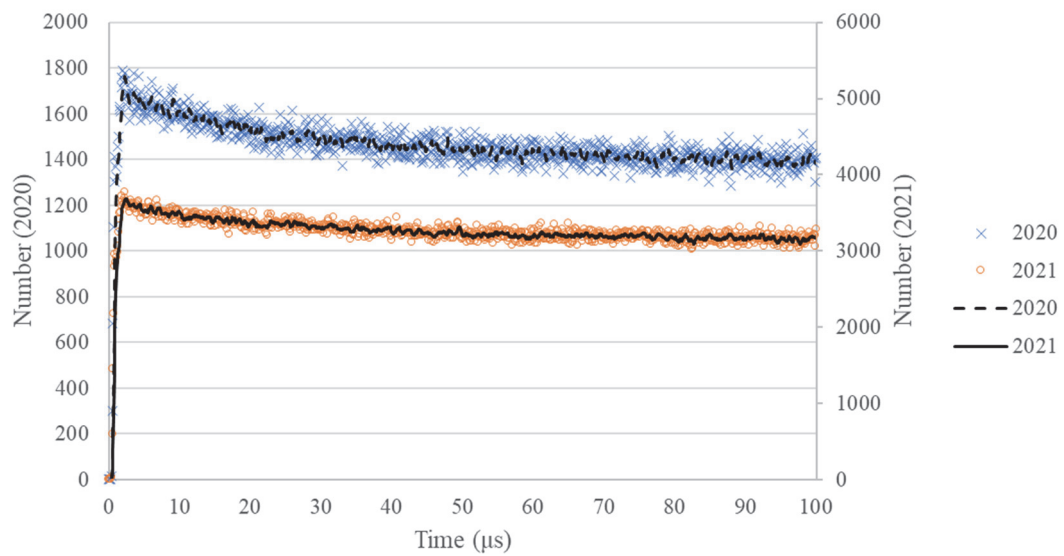


図 3.1.3-12 アンプ F のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

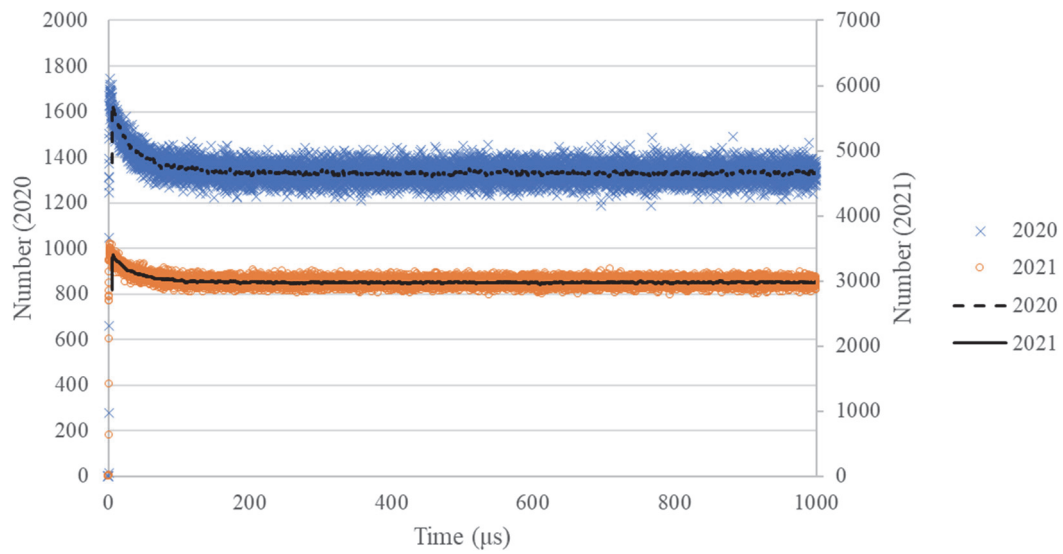


図 3.1.3-13 アンプ G のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

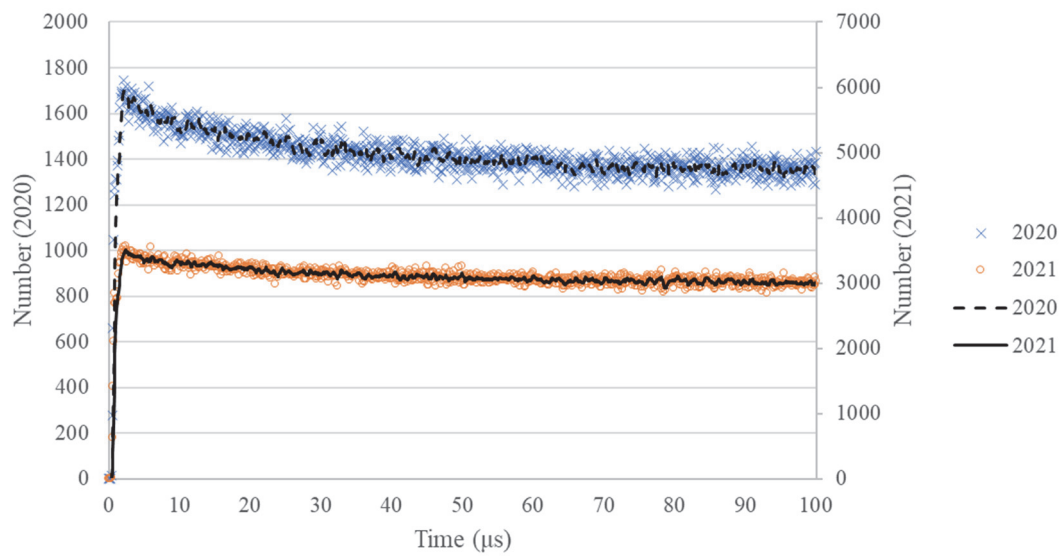


図 3.1.3-14 アンプ G のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

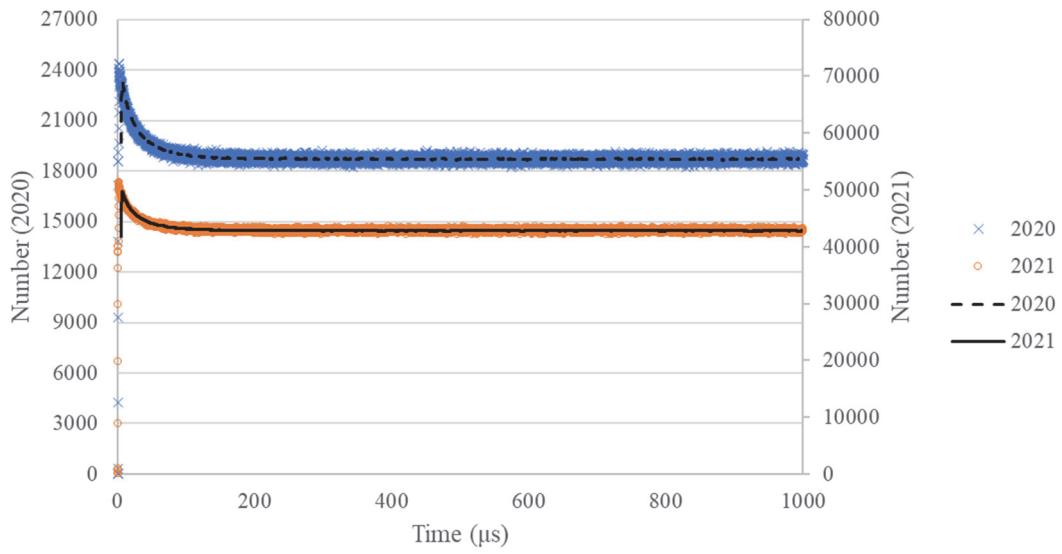


図 3.1.3-15 アンプ H のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

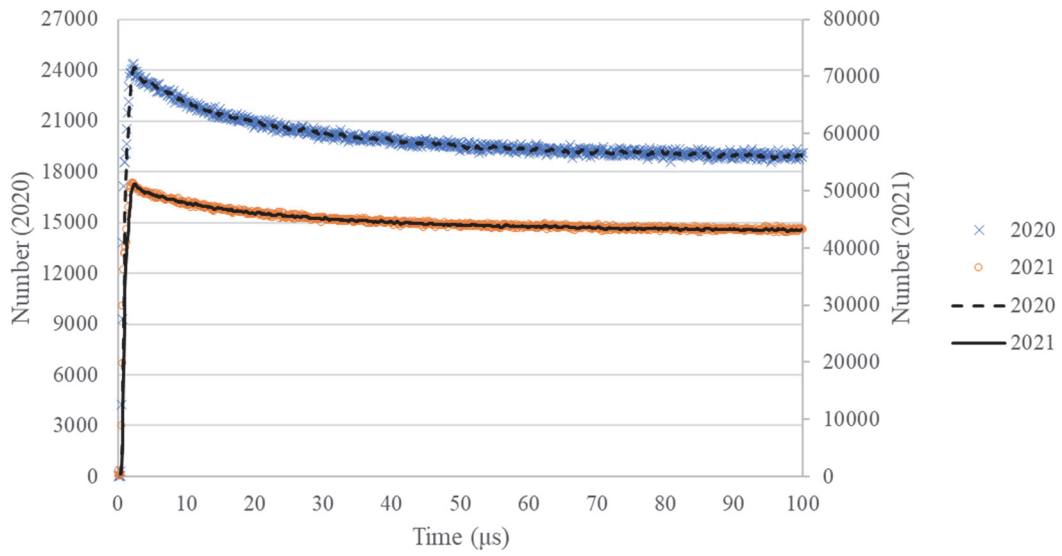


図 3.1.3-16 アンプ H のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

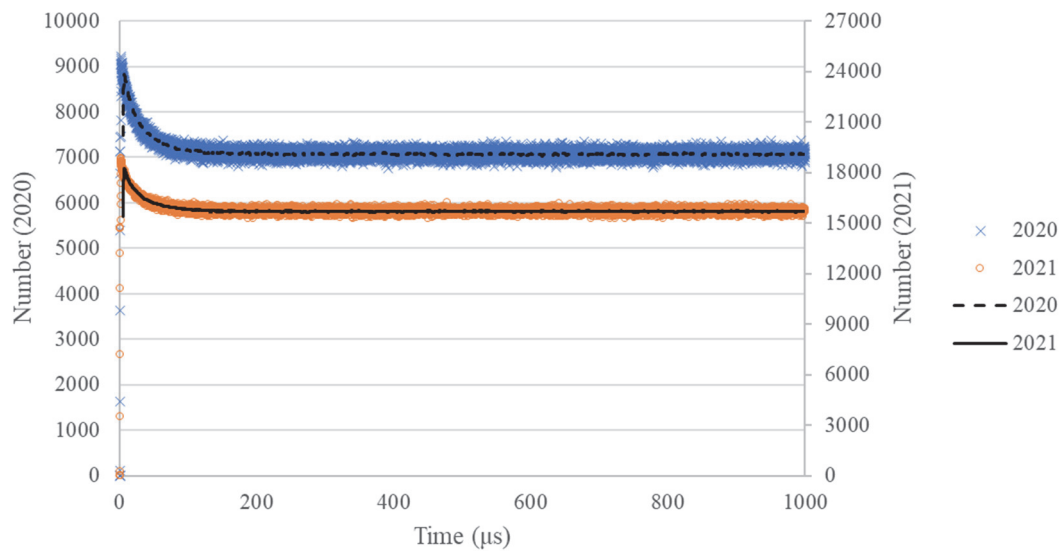


図 3.1.3-17 アンプ I のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

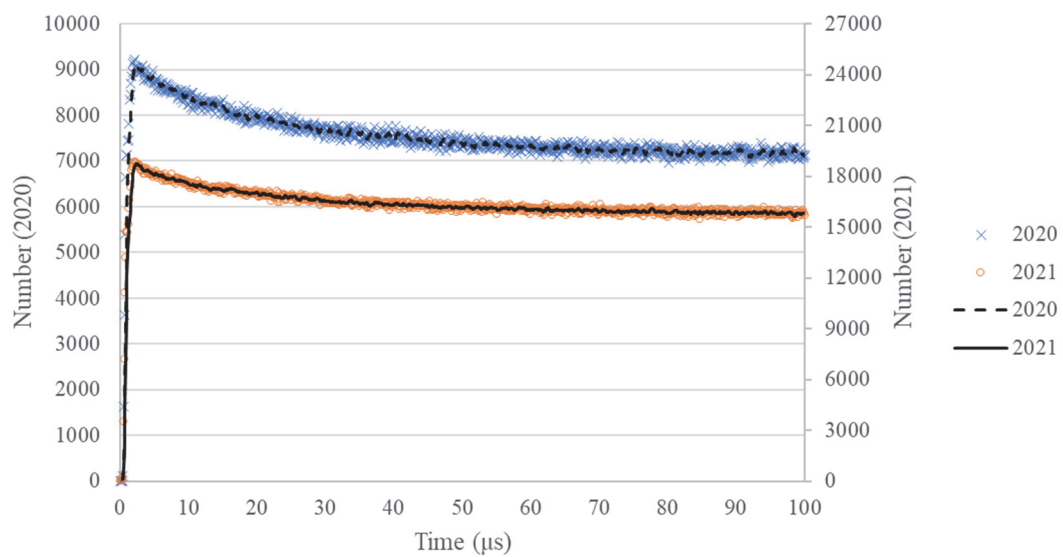


図 3.1.3-18 アンプ I のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

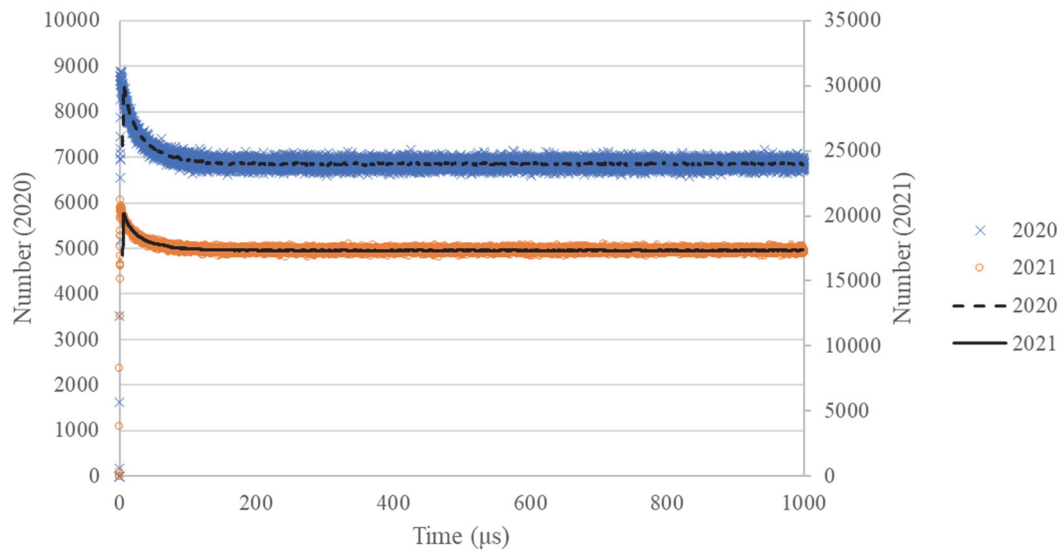


図 3.1.3-19 アンプ J のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

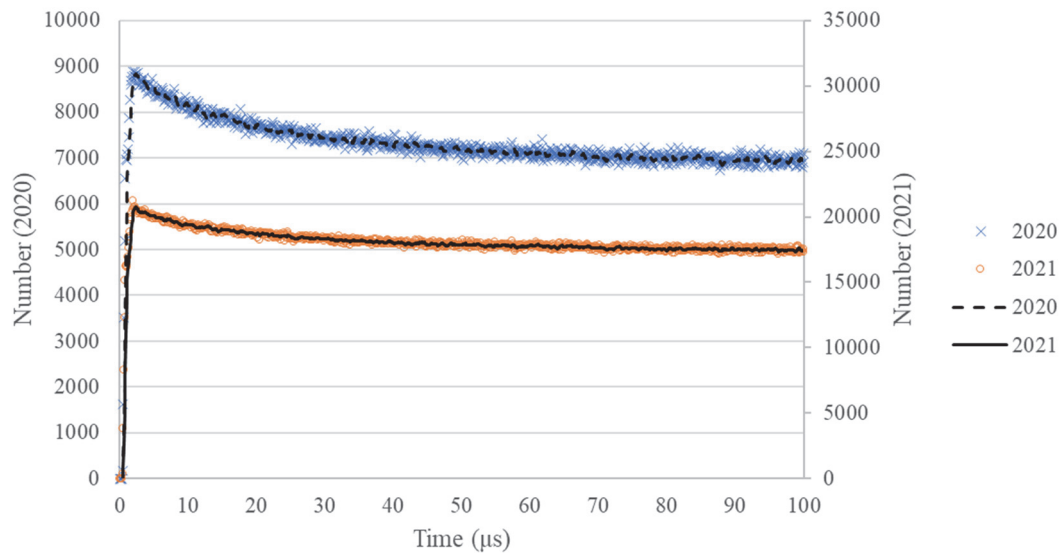


図 3.1.3-20 アンプ J のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

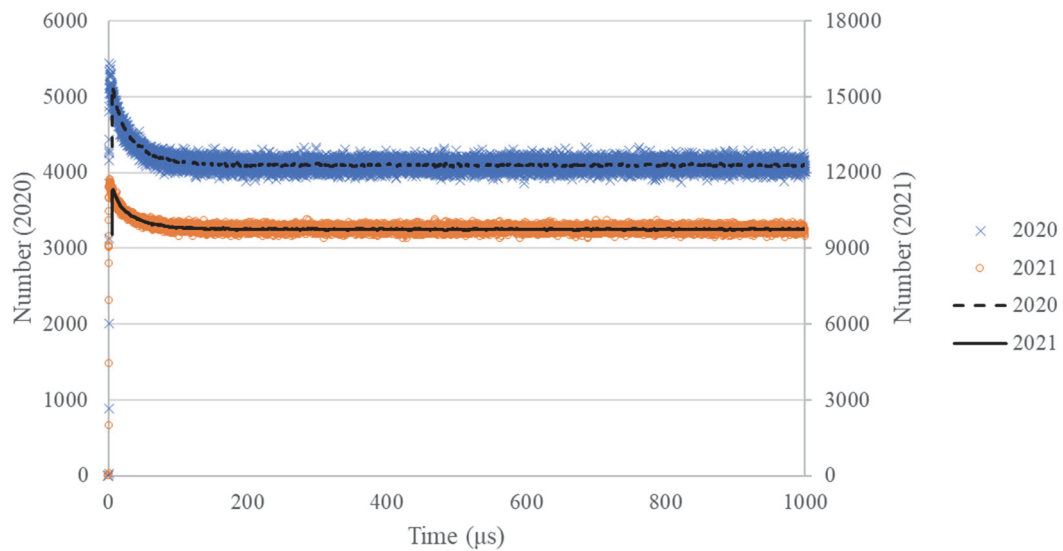


図 3.1.3-21 アンプ K のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

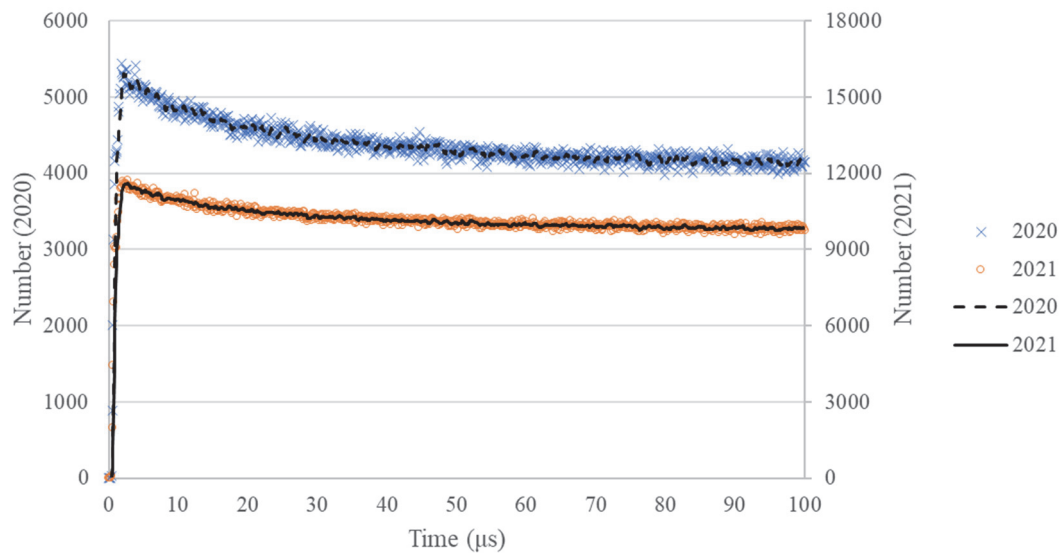


図 3.1.3-22 アンプ K のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

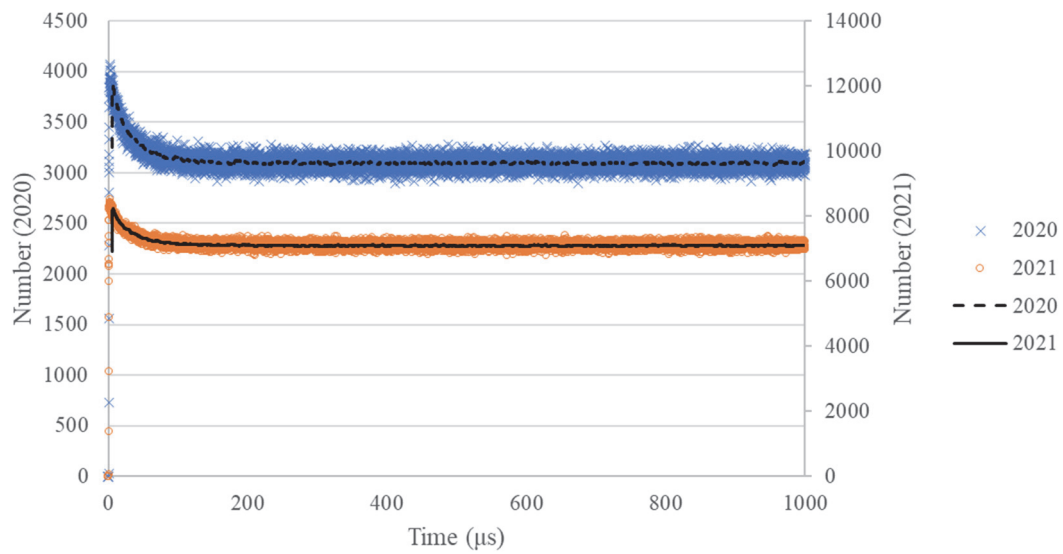


図 3.1.3-23 アンプ L のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

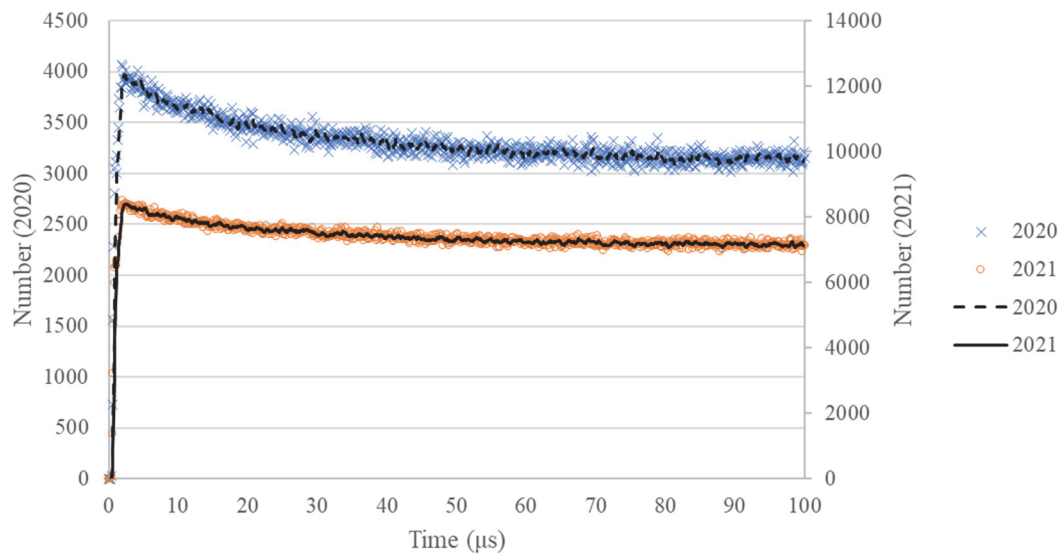


図 3.1.3-24 アンプ L のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

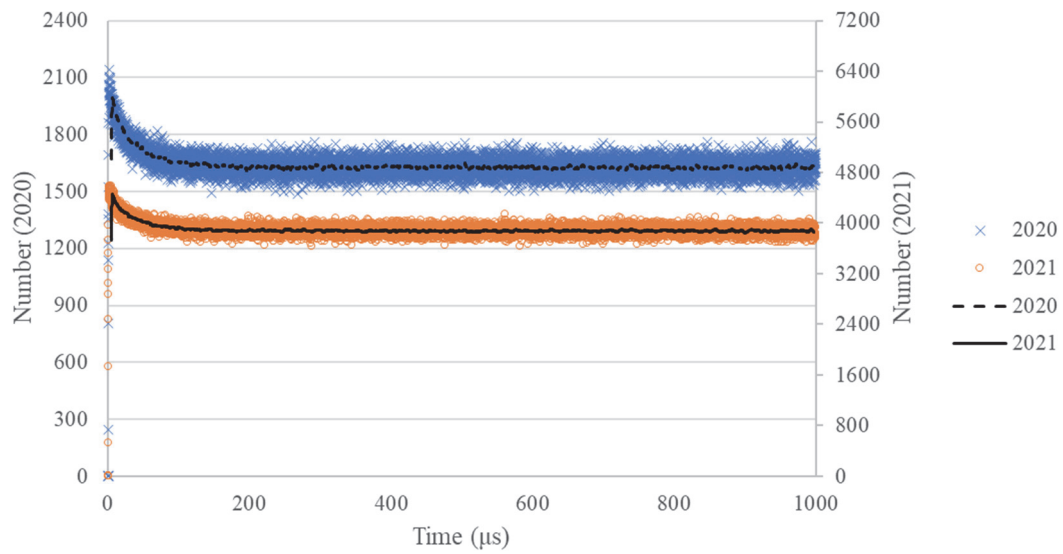


図 3.1.3-25 アンプ M のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

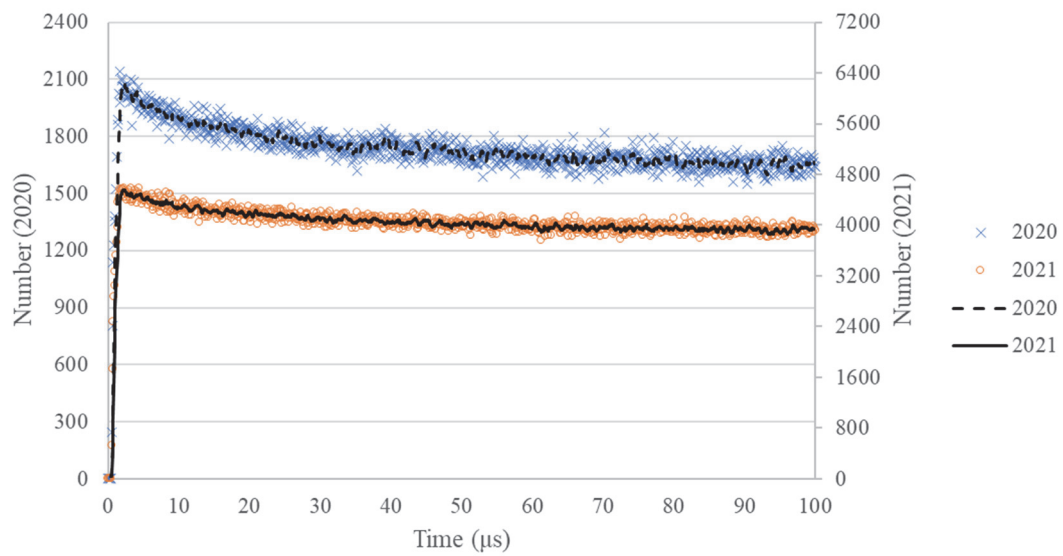


図 3.1.3-26 アンプ M のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

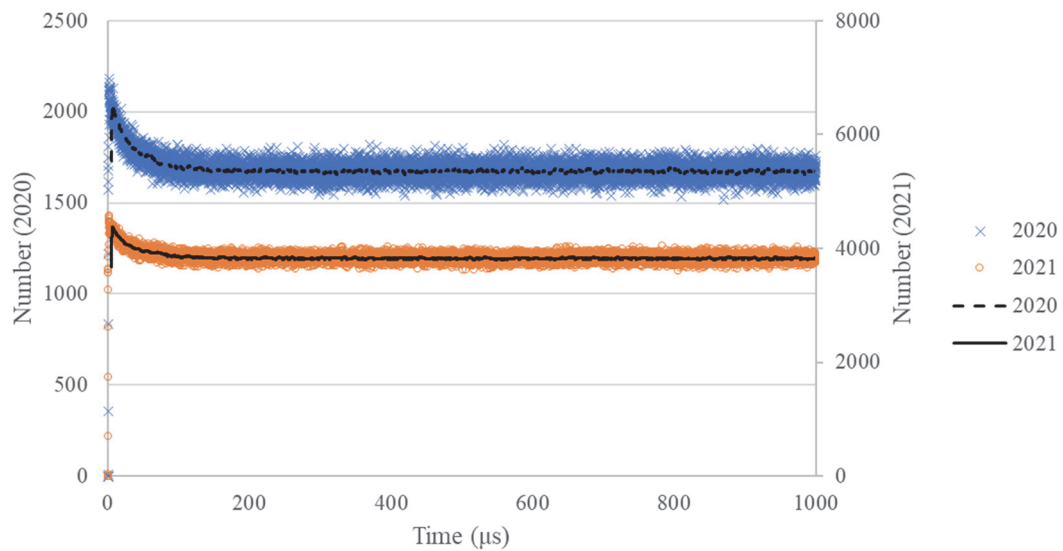


図 3.1.3-27 アンプ N のパルス間隔分布の比較 (0~1000 μ s)

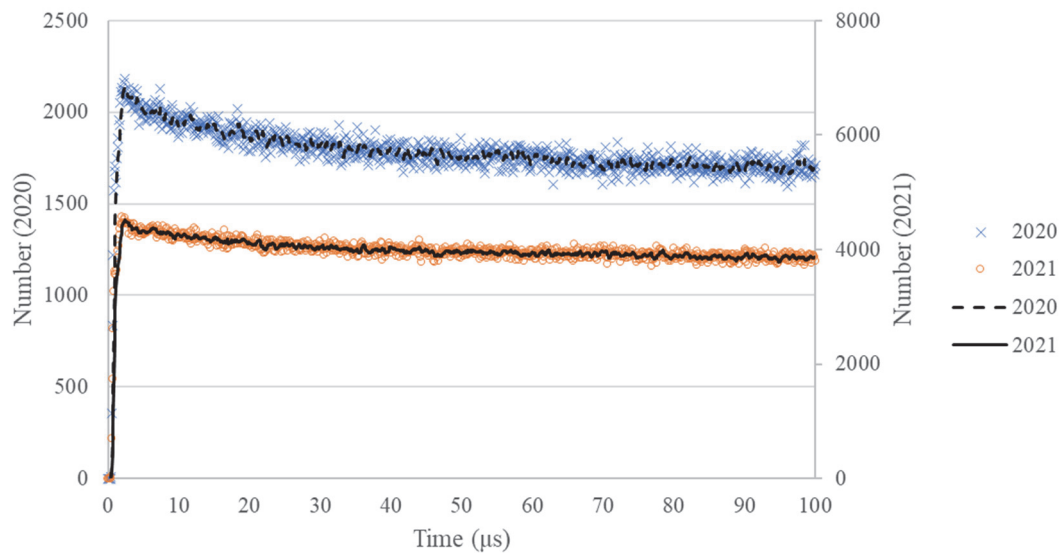


図 3.1.3-28 アンプ N のパルス間隔分布の比較 (0~100 μ s)

3.1.4 考察

2.2 項の AFAS における評価と同様に、本年度の試験では、前年度（令和 2 年度）の評価に用いた ^{252}Cf 中性子線源（Q2-334）ではなく、線源強度の高い新たな ^{252}Cf 中性子線源（T1-349）を用いたため、得られた計数値に違いはあったが、評価したパルス間隔分布は前年度に評価したパルス間隔分布と同様の傾向を示した。したがって、本年度の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変動が、中性子検出器による測定に与える影響を評価する。

平成 31 年度の性能確認試験(参考文献³⁾)では、ガンマ線検出器のデュワ瓶内の液体窒素量を 10 リットルずつ変動させ (0~50 リットル)、中性子検出器を用いて性状及び Pu 量の異なる 4 種類の MOX サンプルを測定し、得られた計数値 (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 量と液体窒素量の相関の有無を確認した。その結果、いずれの MOX サンプルにおいても各計数値及び Pu 量は誤差 (2σ) の範囲で一致したことから、液体窒素の量の変動が中性子測定に与える影響はないとの結論を得た。

しかしながら、本評価における Pu 量の測定結果には、図 3.2.1-1 に示すように、誤差 (2σ) を含む最大値と最小値で約 4%の差が生じていた。この差の原因は主に、MOX サンプルを 15 分間測定した際の計数誤差とサンプルの配置誤差であると考えられるが、液体窒素量の変動が一因となっている可能性もある。そこで、本年度の試験では、液体窒素量を変動させながら ^{252}Cf 中性子線源を長時間測定することにより、計数誤差及び配置誤差を低減させた状態で液体窒素量の変動が中性子検出器による測定に与える影響を評価する。

なお、J-MOX における実際の運用では、液体窒素はデュワ瓶に定期的に補充されると想定されるため、デュワ瓶内の液体窒素量は 25~50 リットルの範囲で増減すると考えられる。したがって、本評価はこの範囲を対象に行う。

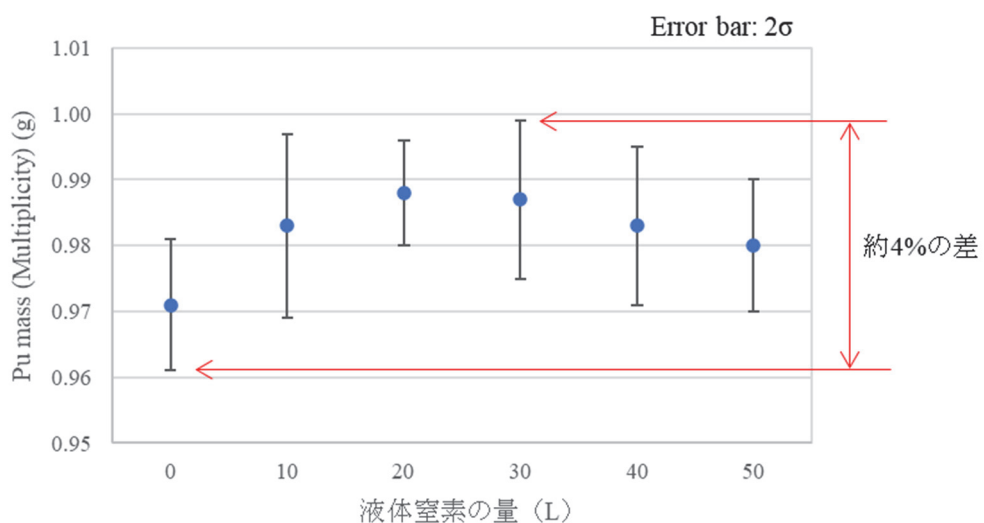


図 3.2.1-1 Multiplicity 法により解析した Pu 量の比較
(平成 31 年度の性能確認試験結果)

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）に液体窒素を満充填してから、液体窒素量が自然蒸発によって約 25 リットルになるまでの間、連続的に ^{252}Cf 中性子線源を測定し、液体窒素量が 1 リットル減少するごとにシングル値及びダブル値（以下、「各計数値」という）を評価する。また、評価した各計数値とその期待値の相対差（以下、「%Difference」という）を求め、液体窒素量との相関の有無を確認する。ガンマ線検出器の概要図を図 3.2.2-1 に示す。本評価で使用する ^{252}Cf 中性子線源（Q2-334）を 1.6 項の表 1.6-1 に示す。本測定は、MIC ソフトウェア及び INCC ソフトウェアを用いて実施する。

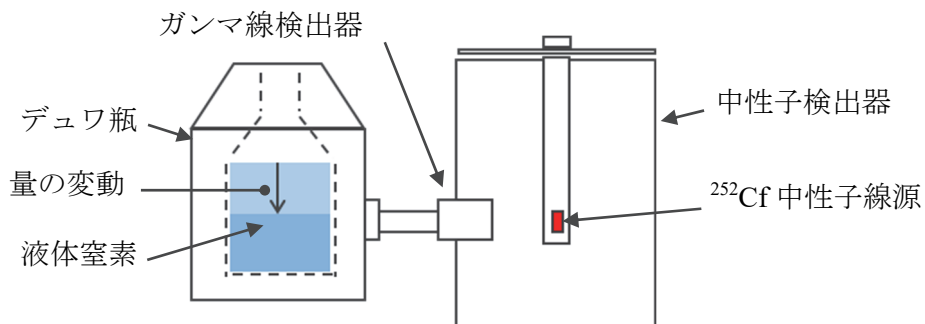


図 3.2.2-1 ガンマ線検出器の配置（概要図）

詳細な試験手順を以下に示す。

- ① 線源固定治具を用いて、中性子検出器にて ^{252}Cf 中性子線源（Q2-334）を 12 時間測定し、各計数値の初期値を取得する。
- ② ガンマ線検出器のデュワ瓶に液体窒素を満充填（約 50 リットル）する。
- ③ デュワ瓶を秤量し、測定開始前の液体窒素量を算出する。
- ④ MIC ソフトウェアを用いて、14 日間（液体窒素量が自然蒸発により約 25 リットルになると予想される日数）、連続的に ^{252}Cf 中性子線源を測定する。^(*21)
- ⑤ デュワ瓶を秤量し、測定終了後の液体窒素量を算出する。
- ⑥ ②及び⑤にて取得した液体窒素量から、時間経過による液体窒素の正確な減少量を求める。
- ⑦ 液体窒素量が 1 リットル減少した時間（約 12 時間）ごとの各計数値を INCC ソフトウェアにより評価する。また、①にて得られた初期値から同様の時間ごとの各計数値の期待値を算出する。
- ⑧ ⑦にて評価した各計数値とその期待値の %Difference を求め、液体窒素量との相関を評価する。

*21: 本試験は、プルトニウム燃料技術開発センターの就業時間外となる休日及び施設の電源が使用不可となる施設保守期間等には実施しない。

3.2.3 結果

各計数値とその期待値の%Difference と液体窒素量の相関を評価した結果を図 3.2.3-1 及び図 3.2.3-2 に示す。なお、液体窒素量が 41～34 リットル及び 26～25 リットルに減少するまでの期間は、就業時間外となる休日であったため、測定は実施しなかった。

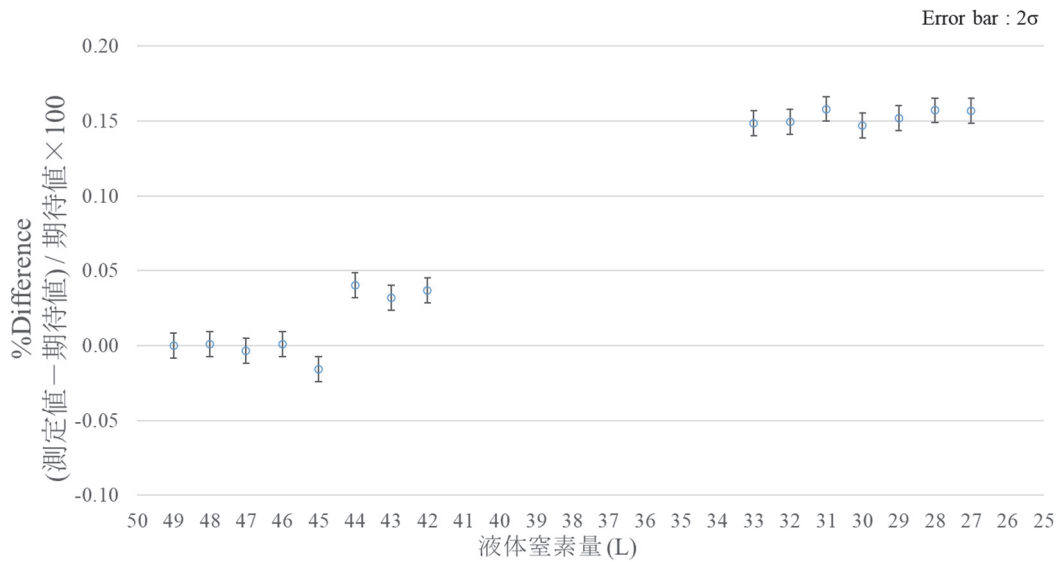


図 3.2.3-1 シングル値と期待値の%Difference と液体窒素量の相関

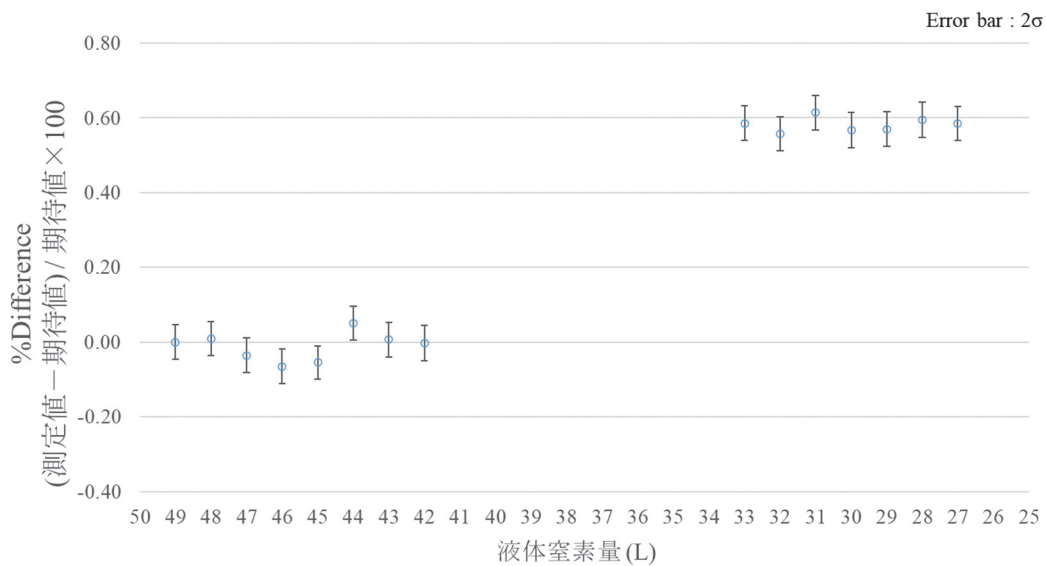


図 3.2.3-2 ダブル値と期待値の%Difference と液体窒素量の相関

3.2.4 考察

ガンマ線検出器のデュワ瓶に液体窒素を満充填（約 50 リットル）してから、液体窒素量が自然蒸発によって約 25 リットルになるまでの期間中、液体窒素量が 1 リットル減少するごとに評価した各計数値とその期待値から%Difference を求め、液体窒素量との相関の有無を調査した。その結果、図 3.2.4-1 及び図 3.2.4-2 に示すとおり、強い相関が確認され、液体窒素量が減少するにつれてその%Difference は大きくなる傾向を示した。この%Difference の変動が液体窒素量の減少にのみ起因するものか確認するため、試験期間中における測定環境の変化の有無について調査したところ、図 3.2.4-3～3.2.4-7 に示すとおり、検出器周辺の温湿度が変動していることがわかった。さらに、その検出器周辺の温湿度と前述の%Difference の間に強い相関が確認された。以上のことから、試験期間中の各計数値とその期待値の%Difference の変動は、液体窒素量の減少、温湿度の変動またはそれら両方に起因するものと考えられる。

一方、本試験期間中の各計数値とその期待値の%Difference は、最大でシングル値で約 0.16%、ダブル値で約 0.61%であり、一般的に用いられている非破壊測定装置の健全性の判定基準（測定値と期待値の%Difference が±3%以内）と比較して小さい。また、参考として、各計数値とその期待値の%Difference の変動が MOX サンプルの測定に与える影響について評価したところ、Pu 量が 3g のペレットの MOX サンプルを測定した場合に最大で Pu 量を 0.006g 過大評価するものの、Pu 量の測定値と期待値の%Difference は約 0.19%と小さい。

したがって、仮に各計数値とその期待値の%Difference の変動が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変動にのみ起因する場合でも、その変動が中性子検出器による測定に与える影響は小さいと考えられる。なお、各計数値とその期待値の%Difference が温湿度の変動に起因する場合には、検出器周辺の温湿度を一定に保つことにより、その%Difference の変動を低減することが可能になると考えられる。

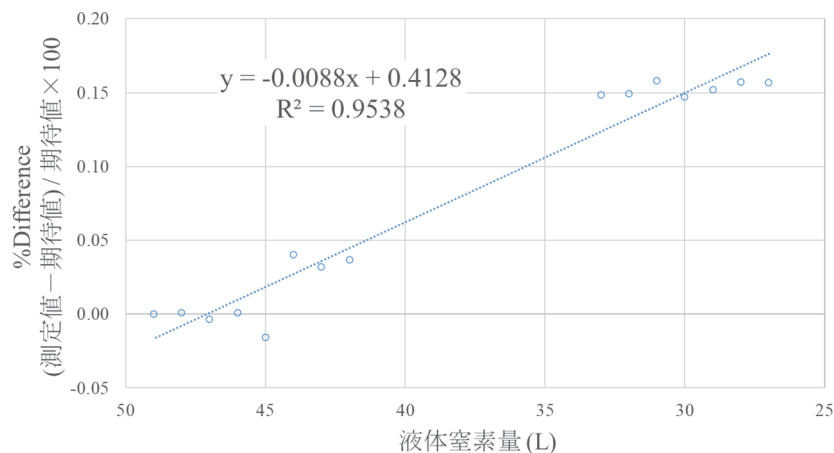


図 3.2.4-1 シングル値と期待値の%Difference と液体窒素量の相関

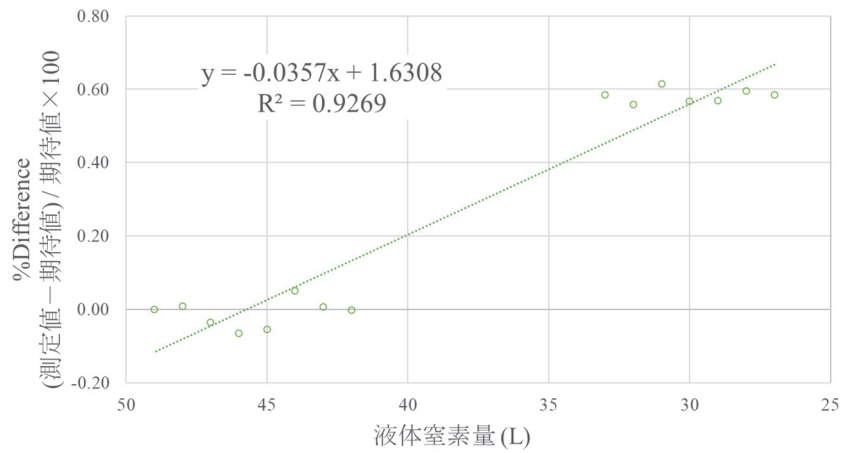


図 3.2.4-2 ダブル値と期待値の%Difference と液体室素量の相関

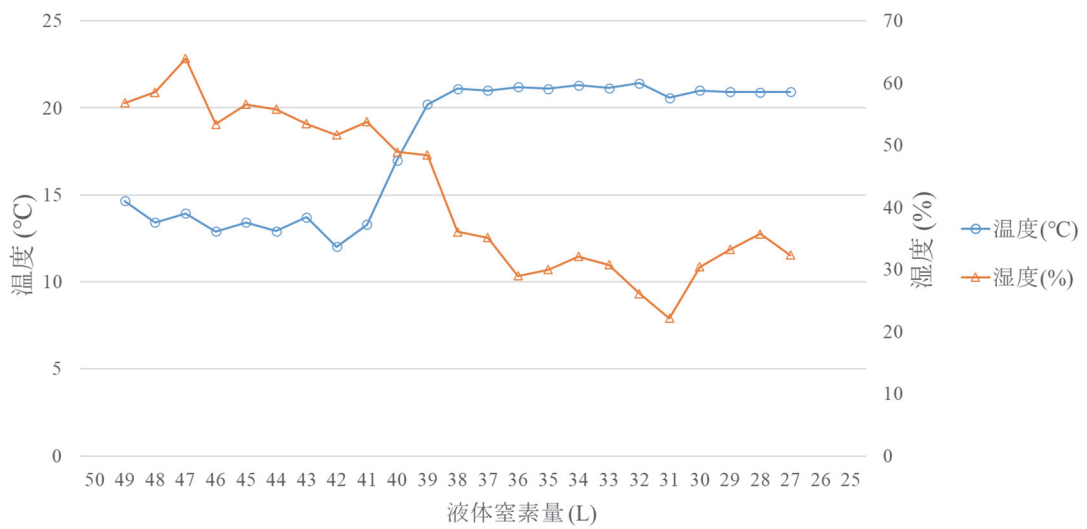


図 3.2.4-3 検出器周辺の温湿度の変動と液体室素量の比較

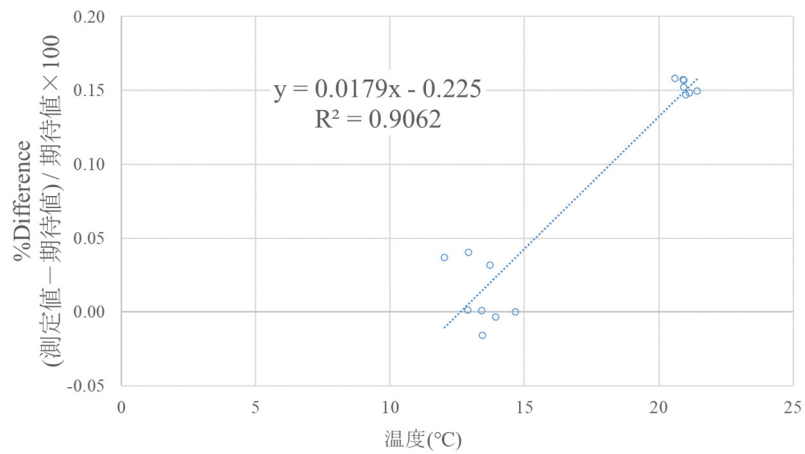


図 3.2.4-4 シングル値と期待値の%Difference と温度の相関

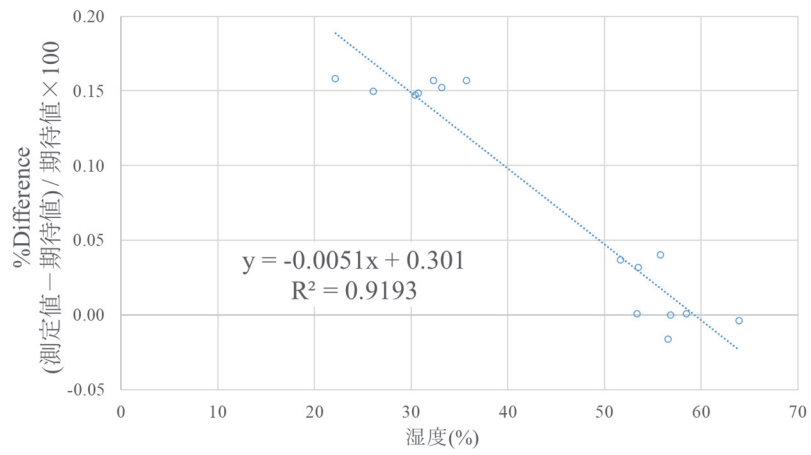


図 3.2.4-5 シングル値と期待値の%Difference と湿度の相関

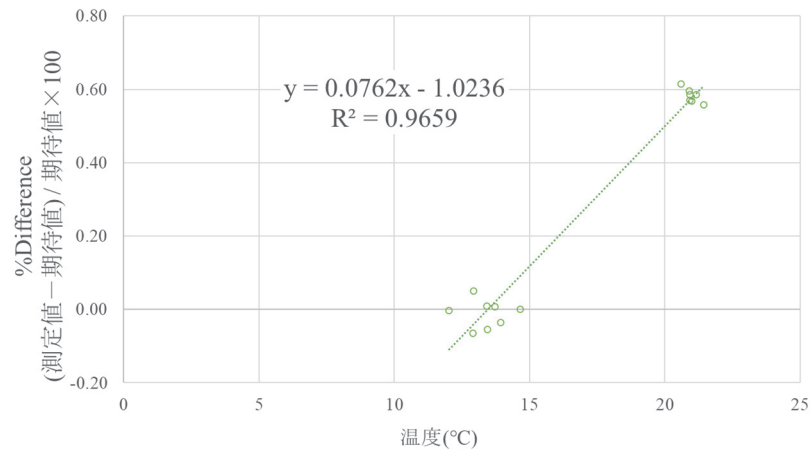


図 3.2.4-6 ダブル値と期待値の%Difference と温度の相関

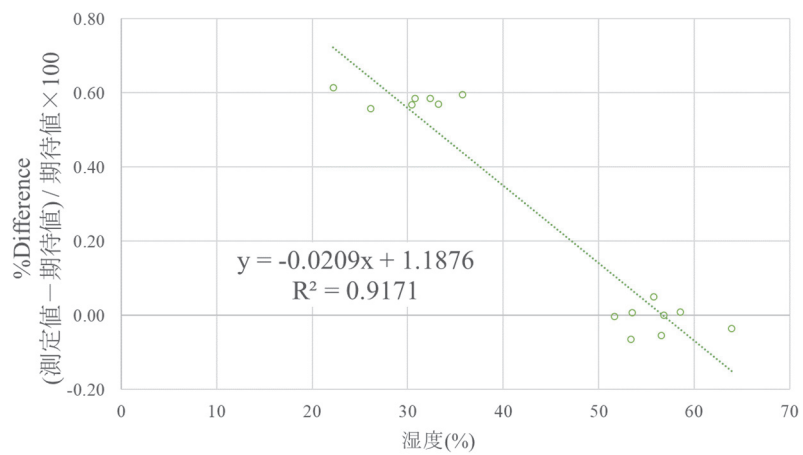


図 3.2.4-7 ダブル値と期待値の%Difference と湿度の相関

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

2021 年 4 月から 2022 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 の機器の異常検知方法の検討」及び「AFAS の故障時の測定パラメータの再評価方法の検討及び故障時の測定性能の評価」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、令和 3 年 4 月から令和 4 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、装置の不具合の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 中性子線源を測定した。その結果、得られたパルス間隔分布は、令和 2 年度に得られたパルス間隔分布と同様の傾向を示したことから、本評価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 の機器の異常検知方法の検討」では、平成 31 年度に評価した異常検知方法を J-MOX における燃料集合体の測定に適用可能か確認するため、設計仕様の範囲で有効長が変化する J-MOX の燃料集合体を測定した際の有効長が当該異常検知方法に与える影響の有無をモンテカルロシミュレーションにより評価した。その結果、当該異常検知方法は、燃料集合体の有効長の影響を受けてしまうため、J-MOX における AFAS の異常検知に用いることができないことを確認した。そこで、他の異常検知方法について検討したところ、一方の AFAS で燃料集合体を測定中に、他方の AFAS の検出器の異常をその AFAS の検出器のシングル値の比を用いて検知することが可能であるとの見通しを得た。

「AFAS の故障時の測定パラメータの再評価方法の検討及び故障時の測定性能の評価」では、J-MOX において、AFAS 故障時にシステムを停止することなく燃料集合体測定の継続を可能とする方法を検討するため、実際の燃料集合体を用いて故障を模擬した AFAS の測定パラメータを再評価し、その測定パラメータを適用した AFAS を用いて燃料集合体の測定が可能か確認した。その結果、J-MOX において AFAS 故障時には、本方法を適用することによりシステムを停止することなく燃料集合体測定の継続が可能であることを確認した。また、本方法では、Collar 検出器のアンプ 1 個の機能を停止させることにより AFAS の故障を模擬しており、その状態の AFAS で燃料集合体を測定したときの ^{240}Pu 実効質量 (g/cm) の相対誤差は IAEA が AFAS 要求仕様書で示している要求制度を満たすことを確認した。

AVIS の性能確認試験では、「パルス間隔分布の評価」及び「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」を実施した。

「パルス間隔分布の評価」では、AFAS における評価と同様に、リストモジュールを用いて ^{252}Cf 中性子線源を測定した。その結果、得られたパルス間隔分布は、令和 2 年度に得られたパルス間隔分布と同様の傾向を示したことから、本評価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、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変動が、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（液体窒素を自然蒸発）させながら、連続的な ^{252}Cf 中性子線源測定を行った。その結果、中性子検出器にて測定された各計数値とその期待値の %Difference と液体窒素量の間には強い相関があることを確認し、液体窒素量が減少するにつれてその %Difference は大きくなる傾向を示した。一方で、その %Difference と検出器周辺の温湿度の間にも強い相関が確認されたため、各計数値とその期待値の %Difference は、液体窒素量、温湿度またはそれら両方に起因して変動することがわかった。しかしながら、試験期間中に観測された各計数値とその期待値の %Difference の変動は、一般的に用いられている非破壊測定装置の健全性の判定基準（測定値と期待値の %Difference が $\pm 3\%$ 以内）と比較して小さく、また、その変動が MOX サンプルの測定に与える影響も小さいため、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変動が中性子検出器による測定に与える影響は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、令和 3 年 4 月から令和 4 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 : 大型混合酸化物燃料加工施設保障措置機器性能確認試験報告書 (令和 2 年度)
- 参考文献 3 : 大型混合酸化物燃料加工施設保障措置機器性能確認試験報告書 (平成 31 年度)
- 参考文献 4 : User Requirements AFAS Version No.1, IAEA (2007) (SG-TE-GNRL-ZZ-1010)
- 参考文献 5 : M. T. Swinhoe, “Simulation of BWR MOX Fuel in AFAS” (2015) (LA-CP-15-20176)
- 参考文献 6 : M. T. Swinhoe, H.O. Menlove, C.D. Rael and J. B. Marlow, “Factory Acceptance Test Report for the Advanced Fuel Assembly Assay System (AFAS) PWR” (2008) (LA-CP-08-0730)