

令和 6 年度原子力施設等防災対策等委託費（電子飛跡検出型コンプ
トンカメラを使用した放射性プルームの可視化手法の検討）事業
調査報告書

令和 7 年 3 月

日本原子力研究開発機構

本報告書は、原子力規制庁による令和6年度原子力施設等防災対策等委託費
（電子飛跡検出型コンプトンカメラを使用した放射性プルームの可視化手法の
検討）事業の成果をとりまとめたものである。

目 次

1. はじめに	1
2. 環境モニタリング用電子飛跡型コンプトンカメラ(ETCC)の改造	4
2.1 今年度の実施計画	4
2.1.1 これまでの経緯	4
2.1.2 実施計画	5
2.2 環境モニタリング用 ETCC の TPC 部の改造	5
2.2.1 改造部品の試作	5
2.2.2 改造 TPC 部の組み立て	12
2.2.3 動作試験	17
2.3 ソフトウェア等の導入	24
3. ETCC の最適な配置検討	28
3.1 今年度の実施計画	28
3.1.1 これまでの経緯	28
3.1.2 実施計画	29
3.2 プルーフ分布の作成	29
3.3 ETCC 画像の作成	31
3.4 放出量に対する画像取得可能性の検討	33
3.5 適切な配置検討(放出地点特定試験)	39
4. まとめ	44
参考文献	46
付録-A 改造 TPC 部の組上	47
付録-B ETCC ガンマ線カウント数 (本文、図 3-6～3-9 の補足)	65
付録-C プルーフ放出地点特定試験結果 (本文、図 3-10～3-12 の補足)	91

1. はじめに

原子力規制委員会(規制委員会)では、原子力災害対策特別措置法(原災法)に基づき、原子力事業者、指定行政機関の長及び指定地方行政機関の長、地方公共団体、指定公共機関及び指定地方公共機関その他の者が原子力災害対策を円滑に実施するため、原子力災害対策指針〔1〕を定めている。現行の原子力災害対策指針では、原子力施設における異常事象の発生またはそのおそれがある段階(緊急事態)において、緊急時モニタリングや予防的防護措置の準備を開始するとしている。その後、原子力施設外における放射性物質又は放射線の放出が一定の水準を超える事態(原災法の原子力緊急事態に該当)に至った場合、緊急時モニタリングを進め、その結果を国際原子力機関(IAEA)が与える運用上の介入レベル(Operation Intervention Level, OIL)〔2〕と照らして、避難や屋内退避などの必要な防護措置の実施を判断することとなる。具体的には、原子力施設の周辺に配置されている固定観測局(モニタリングポスト)や可搬型モニタリングポスト等を活用した連続測定により、OILに基づく防護措置の実施の判断材料となる空間放射線量率の情報が提供される〔3〕。また、これらの連続測定に加えて、必要に応じて走行サーベイや航空機モニタリング等のモニタリング手法が投入される。この中で、航空機モニタリングは地震などに起因する複合災害で道路が寸断された状況でも、広範囲における放射性物質の状況を迅速に調査するという優位性を持つ。そのため、原子力規制庁(規制庁)では、原子力災害の発生に備えて有人の航空機モニタリングシステムを維持管理してきた。一方、無人飛行機、ドローン等の開発が進められ、規制庁では有人の航空機に加えて無人航空機等による緊急時モニタリングを進めるための要素技術の開発を進めてきた。これら技術に関しては、令和5年度の原子力総合防災訓練におけるデモフライトなどを通じて、その信頼性や効果が検証された。このような経緯を経て、「緊急時モニタリングについて(原子力災害対策指針補足参考資料)」〔3〕が令和6年3月に改訂され、「検出器を搭載した無人の固定翼機又は回転翼機を用いて、地表面に沈着した放射性物質からのガンマ線を上空から測定し、迅速に広範囲の空間放射線量率の分布を把握すること」が新たに追記された。

無人航空機を活用した場合、原子炉施設からの放射性プルームの観測等も可能となる。プルームの放出や停止に関する情報は、走行サーベイや環境試料の採取・分析等の人力を必要とするモニタリングの遂行、避難や一時移転等の判断等で有益な情報となり、無人機モニタリングの投入は緊急時モニタリングの実効性を向上することが期待される。ただし、ドローンをはじめとする無人航空機については、現在のところ飛行条件の制限等もあり、モニタリングポストのような連続稼働は困難な状況にある。

他、近年の放射線計測技術に関する動向として、空間中のガンマ線のフルエンスや線量変化を画像として捉えてイメージングする可視化技術の開発が進められてきた。その中で、ガンマ線によるコンプトン散乱を利用したコンプトンカメラが有用な技術として、東京電力福島第一原子力発電所(東京電力1F)の廃炉作業や環境中の放射性セシウムの分布状況調査等でも活用されてきた。さらに、これらのコンプトンカメラ

でも計測されていたガンマ線方向仰角とエネルギーに加えて、ガンマ線方向方位角、反跳電子の散乱角及び電子飛跡を捉えて画像を取得する電子飛跡型コンプトンカメラ(ETCC)の開発が京都大学で進められてきた(図1-1) [4,5]。このETCCを利用することで、太陽系外の宇宙からのガンマ線の直接観測 [6]、東京電力1Fのサイトで一度の撮影により100か所のガンマ線スペクトルの取得に成功するという成果も創出されている[7]。さらに、京都大学複合原子力科学研究所(京大複合研)の原子炉建屋内において、1台のETCCを4か所に移動して順次原子炉を撮影し、時間変動が小さい放射性ガス(アルゴンガス)からのガンマ線の3次元画像を取得して動画を撮影し、日本原子力研究開発機構(原子力機構)の開発した解析手法により、取得画像から放射線源の3次元分布の情報を取得に成功した [8]。

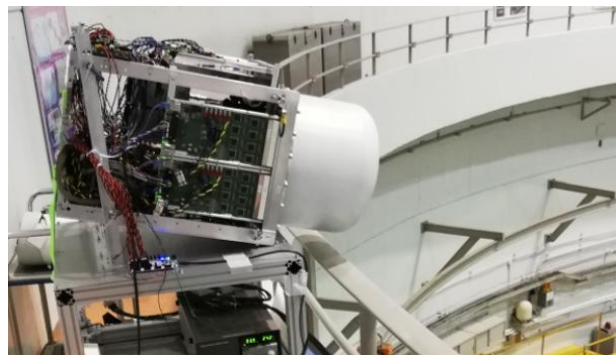


図1-1 既存ETCCによる原子炉撮影

ガンマ線の可視化に実績のあるETCCを原子力施設の周辺環境に複数配置することで、万が一の放射性プルームの放出時にガンマ線画像を取得し、予め構築した大気中の核種分布からガンマ線の画像データを計算する応答関数を用いた逆解析により、プルームの情報(3次元分布、濃度)を可視的に復元することが期待できる。そこで、規制庁では「令和5年度原子力施設等防災対策等委託費（電子飛跡検出型コンプトンカメラを使用した放射性プルームの可視化手法の検討）事業」 [9] を実施し、これを受託した原子力機構で関係する研究開発を進めた。当該事業では、ETCCを用いた放射性プルームの可視化手法について検討し、緊急時モニタリングへの適用性を検証することを目的とした。具体的な実施内容として、宇宙線計測等を目的として開発される他に原子炉内でのガンマ線可視化等でも成果を上げてきたETCC(既存ETCC)について、環境モニタリングにおける連続測定で適用するために必要な仕様を検討するとともに、その結果に基づいてETCC試作機の全体設計及び製作費の概算を検討した。また、プルーム可視化においては、適切なシステムの構成として、特に複数のETCCの配置が重要となるため、その検討に必要なプログラムやデータベースなどの基盤技術の整備を進めた。

以上の成果を受けて、規制庁では「令和6年度原子力施設等防災対策等委託費（電子

飛跡検出型コンプトンカメラを使用した放射性プルームの可視化手法の検討) 事業」を引き続き行うこととし、原子力機構がこれを受託した。本事業では、ETCCを用いた放射性プルームの可視化手法に用いるシステムの構成を検討し、最終的に緊急時モニタリングへETCCによる放射性プルーム可視化手法を適用することの可否を検証することを目的とした。本報告書は、同事業で進めた研究開発成果を取りまとめたもので、第2章及び第3章では環境放射線モニタリング用ETCCの改造及びETCCの最適な配置検討に関する成果を報告し、最後に第4章で本事業の全体成果、今後の課題等を報告する。

2. 環境モニタリング用電子飛跡型コンプトンカメラ(ETCC)の改造

2.1. 今年度の実施計画

2.1.1 これまでの経緯

宇宙線計測等実績のある ETCC(既存 ETCC)は、コンプトン散乱の反跳粒子飛跡を 3 次元計測することで事象毎にコンプトン散乱現象を再現し、ガンマ線の全単射画像測定を実現できる。これまでは、測定毎に既存 ETCC、周辺機器等のシステムを設置してきたが、環境モニタリングへ適用する場合には屋外での連続測定を可能とする改良が必要となる。令和 5 年度の事業では、既存 ETCC の特徴を最大限活用し、環境モニタリングへ適用するための仕様を検討した[9]。ここで、電子飛跡計測を行うガス Time Projection Chamber 部(TPC 部)に関して、既存 ETCC は図 2-1 に示すように、重要な部位となる 2 次元ガス増幅位置検出装置マイクロピクセルチェンバー(μ PIC)等は圧力容器(TPC 容器)内に封入されている一方、 μ PIC の信号処理回路や制御回路等は外気に触れる構造となっている。そのため、検出信号の処理などについて、屋外での連続運転では気象条件の影響を受けることが想定された。そこで、耐候性向上、連続稼働時間の延長等を図るため、図 2-2 のイメージに示すように μ PIC、信号処理回路、制御回路等を格納できる圧力容器(改造 TPC 容器)を設計した。また、電子飛跡計測を行うガスを充填した検出部となる μ PIC の改造品及び中継基板を製作し、検出部内のガス純化に必要な装置及び小型高压電源の動作試験を行った。他に、検出器の重要な周辺技術に関して、長期安定作動を可能とするため、信号解析用 LSI 回路を設計し、データ取得と解析に必要なソフトウェアを整理し、環境モニタリングへの実用化に向けて自動化及びネットワークの必要性を検討した。その後、図 2-2 に示す圧力容器内に改造した μ PIC、中継基板を封入するための全体設計を進めた。



図 2-1 既存 ETCC の TPC 部

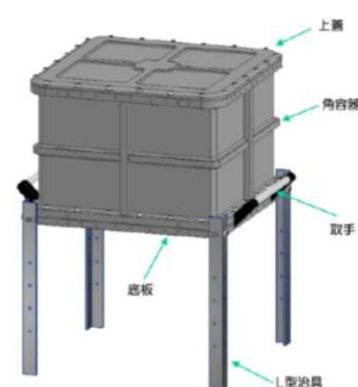


図 2-2 改良 TPC 部

2.1.2 実施計画

本事業では、令和 5 年度までの成果を踏まえて、以下を実施することとした。

既存 ETCC を基本とする機器を環境放射線モニタリングで使用するにあたり、必要となる以下の事項について検討し改造及び試験を行う。

- ・ 屋外での長期安定作動を目的とした耐候性獲得及び連続稼働時間の延長
- ・ データ解析、結果出力等の自動実行機能や計測システムの操作インターフェイスなどのソフトウェア導入

具体的には、令和 5 年度に設計した改造 TPC 容器を作成し、ここに含まれる部品の製作を進めた。その後、改造 TPC 容器へ昨年度に作成済の μ PIC を含めて、全部品を封入して、組み上げ作業を行うこととした。また、昨年度の検討結果に基づいて、データ取得と解析に必要なソフトウェアについて、インターフェイスを作成し、一連の解析を円滑に進めるための構成を検討し、プログラムを作成した。

2.2. 環境モニタリング用 ETCC の TPC 部の改造

今年度は、 μ PIC を含む電子飛跡計測を行う TPC 部を環境モニタリング用に改造するため、構成部品となるガス圧力容器、容器内配線基板、ドリフトケージ及びガス電子増幅器 GEM(支える枠を含む)を試作、製作した。

2.2.1. 改造部品の試作

(1) 改造 TPC(ガス圧力)容器

既存 ETCC の電子飛跡計測を行うガス TPC 部では、 μ PIC からの信号を圧力容器外に取り出して処理しているが、信号処理回路が湿度に弱いという欠点がある。令和 5 年度の事業においては、この課題を克服するために容器外部の環境変化に影響されないよう、以下の仕様で回路を含めた主要部品を封入できる改造 TPC(ガス圧力)容器を設計した[9]。

- ・ 圧力容器の耐性に関して、1気圧の真空から1気圧で健全性を保つ（構造解析シミュレーションにより、設計した容器が満たすことを検証）。
- ・ ガス循環のために配管の接続が必要となるため、ガス交換及び気圧モニタ用のガス配管接続口を設置する。
- ・ 内部へ回路やイーサネットへ導入するため、HV導入用口を3か所以上、 $\pm 3V$ 、 $\pm 5V$ の電源及びイーサネット2系統を圧力容器外から導入可能な基盤導入機構を設置する。
- ・ μ PIC（素子、中継基板）、ドリフトケージ、信号処理回路基板、GEM(取付枠)等を内部に封入できるよう、約45cm×約45cmの平面寸法を持たせて、約40cm×約40cm×約30cmの内部空間を確保した。図2-3に内部への封入イメージを示す。

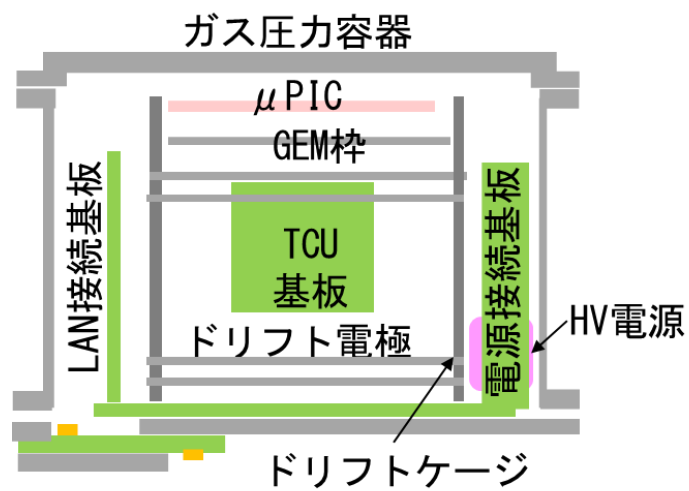


図 2-3 改良した TPC) 容器中のイメージ断面図

製作した圧力容器の外観を図2-4に示す。ここでは、 μ PICを搭載した中継基板、ドリフト電極、信号処理回路基板、制御回路基板およびHV生成基板を格納するため、容器の内部空間を当初の設計通り(約40cm×約40cm×約30cm)に確保した。なお、圧力容器の耐性に関しては、TPC部の組み上げ後に実施した試験の方法、結果を2.2.3にて報告する。

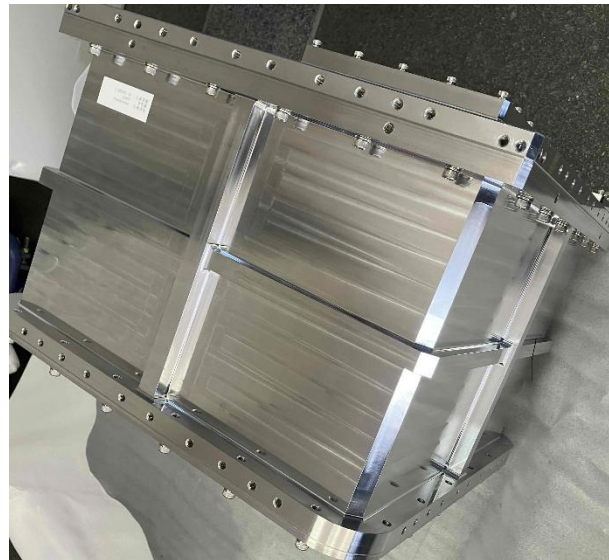


図 2-4 改造 TPC 容器の外観

容器内部のガス交換及び気圧モニタ用のガス配管接続口については、図2-5のように底面に2か所設置した。また、同じく容器底板には電源の接続、イーサネットを内部に導入可能とするため、基盤導入機構を設置した（図2-6）。



図 2-5 改造 TPC 容器の底面(ガス配管接続口、基盤導入機構を設置)



図 2-6 基板導入機構の拡大図

環境モニタリング用に改造した圧力容器については、 μ PICや回路等を封入するために多くの部品で構成される。また、容器に最大耐圧以上の圧力がかからないようガス導入配管にリリーフバルブを設けた。他、図2-2のようなイメージで組み立てて使用するため、支柱なども製作した。

以上のように、 μ PICを封入した容器内へのガス循環、及び電源の接続、イーサネットの導入が可能となり、TPC部の設置に必要な機材を揃えることで、環境中での連続稼働時間を従来よりも大幅に長期間とし、耐候性を持たせることが可能となった。

(2) 容器内配線基板

(1)で製作した改造TPC容器の内部にて既存ETCCと同様の信号処理を行うため、従来の配線基板の改造を進めた。特に、容器内の限られたスペースで、真空の下で動作するように基本仕様を以下のとおりに定めた。

- ・ 電源に接続する基板及びイーサネットに接続する基板を各1個製作する。
- ・ 表面(表裏面)は真空条件下に耐えうる形成とする。
- ・ 容器内での基板の動作に問題のない構造を持たせる。

電源に接続する基盤は、Dsub9コネクタを実装して、9個のピン間を基板の配線で接続する構造とした。図2-7に基盤の外観及びコネクタ部(拡大)を示す。イーサネットに接続する基盤類は、コネクタを基板の表と裏に6個ずつ合計12個設置する構造とさせた(図2-8)。また、両基盤の配線構造は、ともにGND層を含む多層の構造とした。

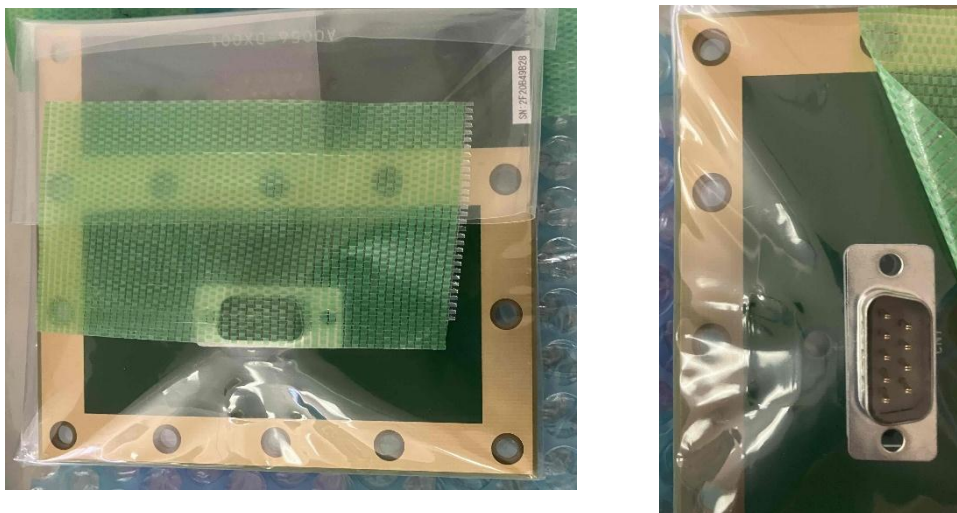


図2-7 電源接続基板



図 2-8 イーサネット接続基板

(3) ドリフトケージ

既存 ETCC の TPC 部では、等間隔にリング電極を配置したドリフトケージを抵抗に接続することで、内部で垂直方向に一様な電場を生成させていた。環境モニタリング用に改造する TPC 部についても、既存 ETCC の部品を改良してドリフトケージを製作した。

ここで、昨年度の全体設計に基づく場合、図 2-3 に示すイメージのように、改良型 TPC 部のドリフトケージでは、底板、連結スパーサー、ドリフト電極、GEM の取り付け枠等を支える必要があった。そこで、容器の底板に固定したアルミ製の柱 4 本の上に中継基板をねじ固定し、その中継基板とドリフトケージをねじ固定することで固定の強度を確保させた。また、ドリフト電極に印加する高圧を鑑みて、ドリフト電極と容器間に絶縁対策や放電対策を施した。他、TPC 部を構成する圧力容器の改造に応じて、ドリフトケージのサイズを調整する必要があったが、(1)の改造 TPC 容器に封入できる直径及び全高とした。このうち、全高に関しては、内蔵する部品の増加により、既存 ETCC のドリフトケージよりも高くなっている。

以上の仕様で製作したドリフトケージの外観を図 2-9 に示す。



図 2-9 ドリフトケージ

(4) ガス電子増幅器(GEM)

既存ETCCでは、サイエナジー社が特許を有するガス電子増幅器(GEM、20cm-GEM ver1.8a)により、放射線源の放出方向を決定するために必要な電子飛跡を検出していた。このGEMを使用することで、東京電力1Fサイト周辺や京大複合研の原子炉施設におけるガンマ線画像の取得等の実績を上げていた。そこで、本事業においては、環境モニタリング用ETCCの電子飛跡の検出でも、GEM(20cm-GEM ver1.8a)を採用することとした。

また、図2-3に示すように、環境モニタリング用ETCCに改良したTBC部で、GEMはドリフトケージの中に設置する設計としたため、これを取り付けるための枠の製作も進めた(図2-10)。ここでは、GEMが一定の方向に反らないよう、絶縁対策を施したうえで、ドリフトケージ内に設置する仕様が必要となる。そこで、反りへの対策としては、GEM取り付け枠1枚をGEMに貼る構造とし、もう1枚の枠は抵抗チップ保護用として添付した。絶縁への対策に関しては、ドリフトケージへの取り付けは樹脂ねじを用いることで対応した。



図 2-10 GEM の取付枠
(ドリフトケージ上に設置)

令和5年度事業で製作した部品を含め、表2-1に改造TPC部を構成する主要部品を取りまとめた。

表 2-1 改造 TPC 部の主要部品

部品名	数量
μ PIC 基板	1
改造 TPC(ガス圧力)容器	1
電源接続基板、イーサネット接続基板	各 1
ドリフトケージ	1
GEM (ガス増幅器)	1
GEM 取付枠	1
小型高圧電源モジュール	2
ダイヤフラムポンプ	1

2.2.2. 改造 TPC 部の組み立て

続いて、図 2-2 及び図 2-3 のイメージに示すように、改造 TPC 容器へドリフトケー
ジなどの主要部品を封入して、改造 TPC 部の組み立てを進めた。

(1) 電源供給、信号伝達用の部品

図 2-1 と図 2-3 の比較からも明らかなように、既存 ETCC の TPC 部と比較した場
合、新しい改造 TPC 部では容器内で各部品へ電源を共有し、検出信号を適切に伝達す
ることが要求される。そこで、電源の共有等に必要な部品を製作した。このうち、直
流(DC)電源の分配のため、図 2-11 に示す電源分配基板を製作した。

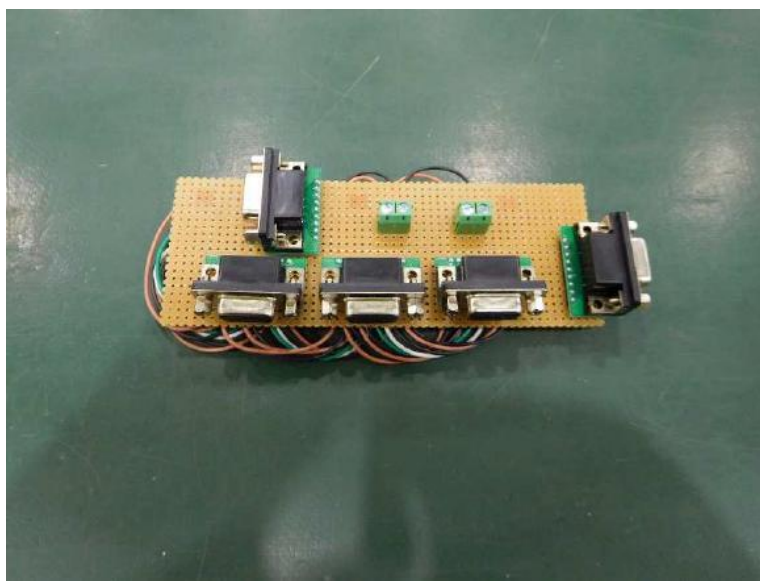


図 2-11 電源分配基板

この電源分配基板は、ユニバーサル基板へ信号処理基板の電源コネクタ(SB 電源コ
ネクタ)を 4 個、高電圧(HV)用の 12V 端子を取り付けて製作した。また、Dsub-9 コネ
クタを取り付けることにより、改造 TPC 容器の壁への接続、容器内での電源を分配可
能とした。他に、電源や各部品、その動作に必要な制御機構の接続に必要な専用ハー
ネスも製作するとともに、信号処理基板 (SB) を 4 枚用意し、改造 TPC 容器内部の
壁面近くに置く支柱に取り付けることとした。信号伝達に関しても、電源供給と同様
に、 μ PIC と高圧電源間のケーブル、イーサネットを介した信号伝達に必要なケーブ
ルも準備した。

以上により、改造 TPC 部内の各部品への電源の供給、信号伝達に必要な部品を整備、
準備し、(2)に示す改造 TPC 部の組み上げ(部品の封入等)を進めた。

(2) 改造 TPC 部の組み上げ

改造 TPC 部の組み上げは、以下に示す工程で進めた。

① 改造 TPC 容器の骨格組み上げ

- ② イーサネット接続部及び電源接続部の導入機構の取り付け
- ③ 信号中継基板 (SB) の取り付け、イーサネット接続
- ④ 高圧電源、アルディーノ、TCU の取り付け、信号中継基板(SB)との接続
- ⑤ 電源分配基板の取り付け、各部品への接続
- ⑥ アルディーノ、TCU のイーサネット系の接続
- ⑦ ドリフト電極取り付け
- ⑧ アルミ角容器、上蓋取り付け、取手取り付け

以下、主な工程の内容を報告する。なお、(1)の電源分配基板の製作を含めて、各工程の詳細は図(写真)を添えて、付録-A にまとめた。

最初に、改造 TPC 容器内でドリフトケージなどの部品を配置する容器底板、後述するように電源供給や信号制御に必要な部品を設置する支柱、及びこれらを支える(大型 L 型治具)等を取り付け、図 2-2 に示すイメージで改造 TPC 部を立てるための骨格部位を組み立てた(図 2-12)。



図 2-12 改造 TPC 容器の骨格部

図 2-6 に示すように容器底板には電源の接続、イーサネットを内部に導入可能とする基盤導入機構を設置した。そこで、これらの導入機構に、図 2-8 及び図 2-9 に示すイーサネット接続及び電源接続に用いる基盤を取り付けた。このうち、電源接続基板の取り付けを図 2-13 に示す。

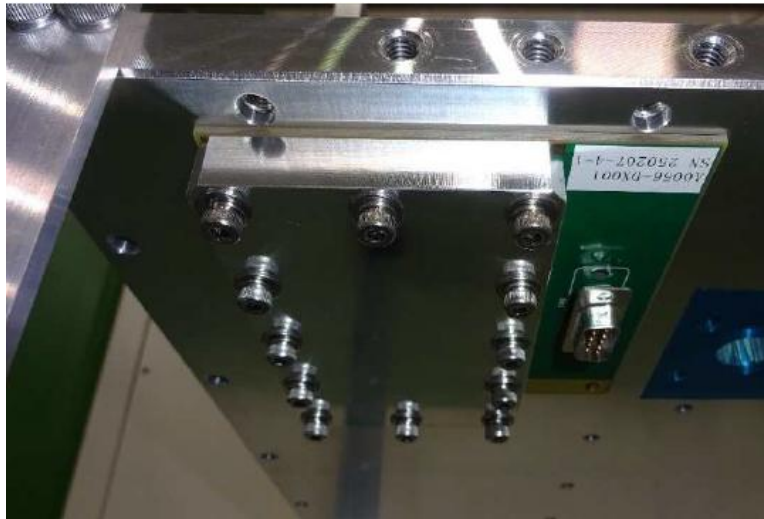


図 2-13 電源接続基盤の取付

続いて、信号の中継(処理)に必要な部品を取り付け、各部位の接続を進めた。このうち、既存 ETCC と同様に信号を中継 (処理)するため、図 2-11 の電源分配基板と接続可能な信号中継基板 4 枚は支柱に取り付けた(図 2-14)。また、イーサネット接続機構をはじめ、信号伝達に必要なイーサネットケーブルも取り付けた (図 2-15)。



図 2-14 信号中継基板の取付



図 2-15 信号中継基板からイーサネット基盤への接続

その後、高圧電源、その制御に必要なマイクロ PC（アルディーノ）を支柱へ取り付けました。信号通信制御に必要な TCU についても、図 2-16 及び図 2-17 に示すとおり、信号中継基板と同様に支柱へ取り付け、(1)に記した専用ハーネスを使用することで、信号中継基板（SB）との接続や電源供給を可能とさせた。



図 2-16 HV の取付



図 2-17 TCU の取付

各部品への電源供給を可能とするため、図 2-11 に示す電源分配基板を図 2-18 に示すように、支柱へ容器内壁との間のスペースに取り付けた。この電源分配基板と各信号中継基板、高圧電源の接続にも、(1)で製作した専用ハーネスを使用した。他、高圧電源及信号通信の制御を可能とするため、これらの機能を有するアルディーノ及びTCUにケーブルを介して、インサートネット系へ接続した。

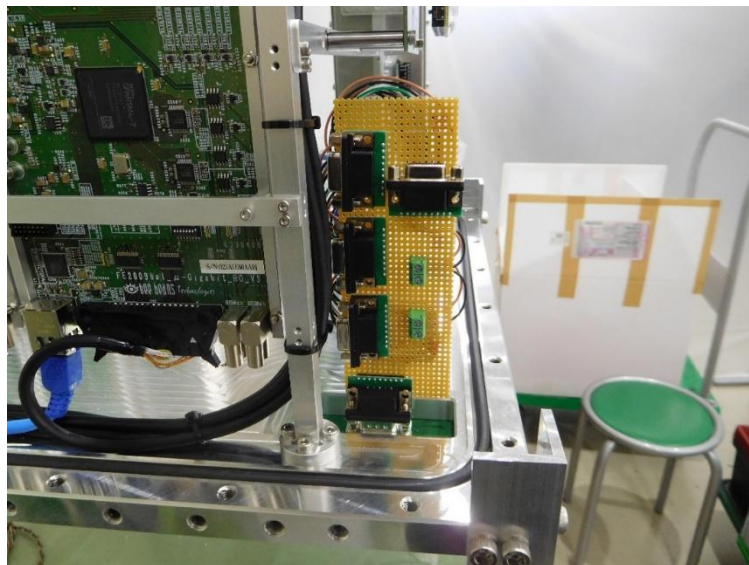


図 2-18 電源分配基板の取付

以上の工程により、改造 TPC 容器の骨格を組み立てるとともに、各部品を配置及び接続した容器内にドリフトケージを取り付けた (図 2-19)。その後、容器骨格へ外側壁となるアルミ角容器及び上蓋を取り付け、当初の設計イメージのとおり、必要な接続をしたうえで各部品を容器内へ正しく封入し、改造 TPC 部を組み上げられることを確認した (図 2-20)。

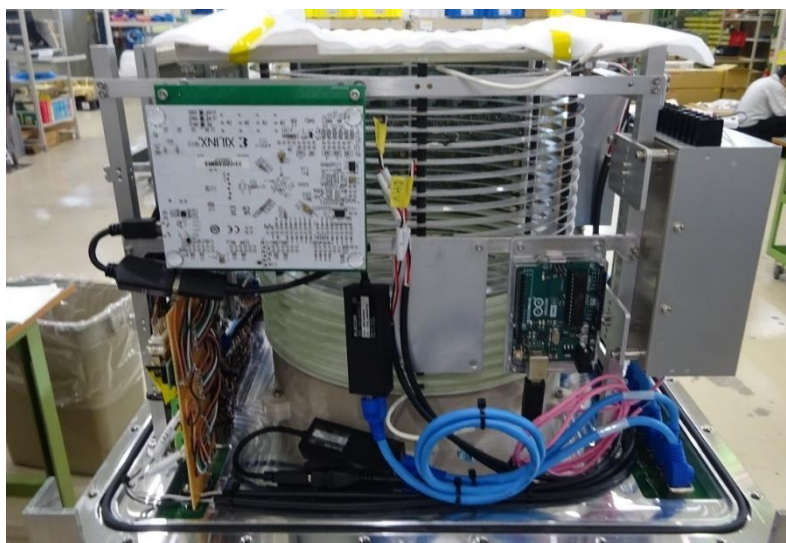


図 2-19 ドリフトケージの取付

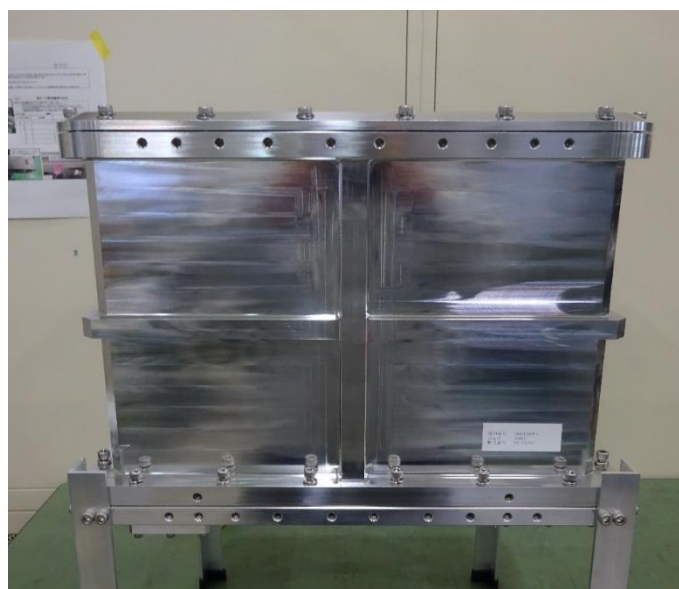


図 2-20 外壁壁の取付

2.2.3. 動作試験

組み立てた改造 TPC について、高圧電源が印加され、各部品へ必要な電源が供給されることを確認するための試験を進めた。また、改造 TPC 容器が設計通りの圧力性能を有し、連続してガスを循環する機構を取り付け、これが動作することも検証した。なお、これらの電源供給・高圧印加及び真空・ガス循環の確認については、安全を確保するとともに、精密に製作された専用部品で故障や破損等が生じないように動作試験を進めた。

(1) 電源供給・高圧印加試験

各部品への電源供給を確認できるよう、側蓋及び上蓋は取り付けずに、空気中で印加試験を進めた。ここでは、改造 TPC の構成する物品の破損や故障を避けることを基本方針として、以下の手順で電源供給・高圧印加試験を進めることとした。

- ① μ PIC 中継基板に高圧端子ケーブルの取り付け、GEM 枠の上に μ PIC 中継基板の取り付け
- ② 中継基板の高圧端子を取り付け、HV からのケーブル接続、 μ PIC に印加
- ③ HV に 12V 電源と出力電圧を調整する DC 電源を取り付け
- ④ DC 電源の電圧を変えて高圧を変更する (500V まで印加)
- ⑤ ドリフト電極対応の HV から配線接続、接地して印加 (5kV まで)
- ⑥ μ PIC およびドリフト電極に高電圧印加後に HV の電源を電源分配基板と接続、HV からのコントロール端子とモニタ端子からアルディーノまで接続
- ⑦ DC 電源から改造 TPC 容器内の回路へ電源供給 (電圧確認)

以下、主要な工程及び試験で確認した結果を報告する。

TPC 部でも重要な部品となる μ PIC の中継基板へは、図 2-21 に示すように専用の高圧端子を両端に取り付けた高圧ケーブルを高圧端子及び GD 端子に取り付けた。また、 μ PIC 中継基板は、図 2-2 のイメージに示すように、GEM 枠の上に取り付けた (図 2-22)。図 2-22 に示すように、図 2-1 に示す既存 ETCC の TPC 部とは異なり、信号処理システムの回路への湿度の影響を低減させた耐候性を持たせた改造 TPC 部が、当初の設計イメージ (図 2-3) のように組み立てられることを確認した。

その後、中継基板の高圧端子を取り付け、HV からケーブルを接続して、 μ PIC に電圧を印加した。なお、新しい GEM は破損の恐れがあるため、代替品となる GEM 枠を取り付けて組上げることとし、ドリフトタワーから GEM を飛ばしてグラウンドに接地することとした。

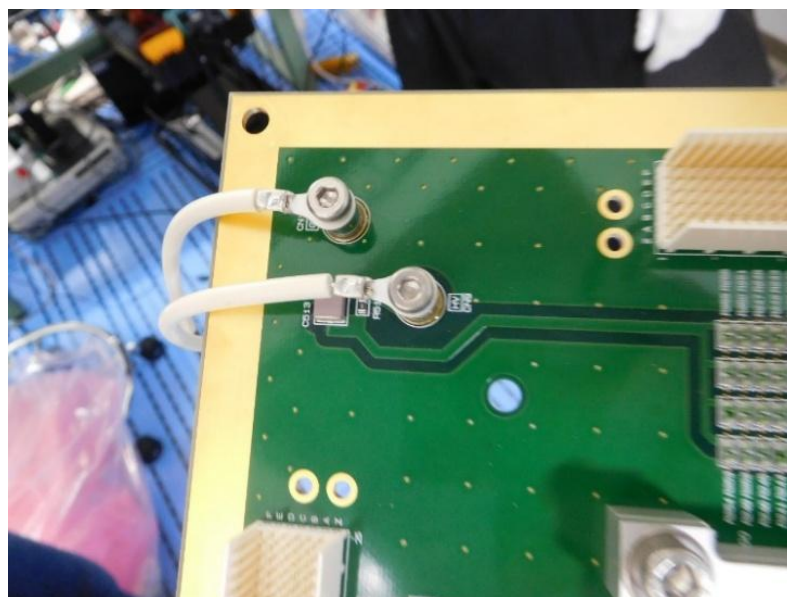


図 2-21 μ PIC 中継基板への配線

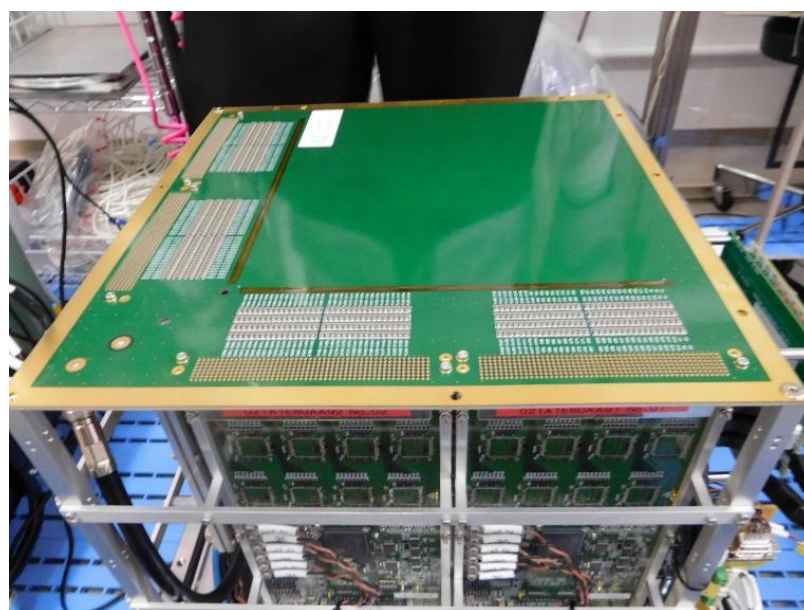


図 2-22 μ PIC の取付

電源(12V)と出力電圧を調整する DC 電源を HV に取り付け、電圧を変えて μ PIC へ印加する高圧を 500V まで変化させた。一方、ドリフト電極へ対応する HV から配線を接続、接地して 5kV まで印加した。ここで、HV 電源のコントロールは μ PIC と同様とした。さらに、 μ PIC およびドリフト電極に高電圧印加後に HV の電源を電源分配基板と接続し (図 2-23)、HV からのコントロール端子とモニタ端子からアルディーノまで接続した (図 2-24)。

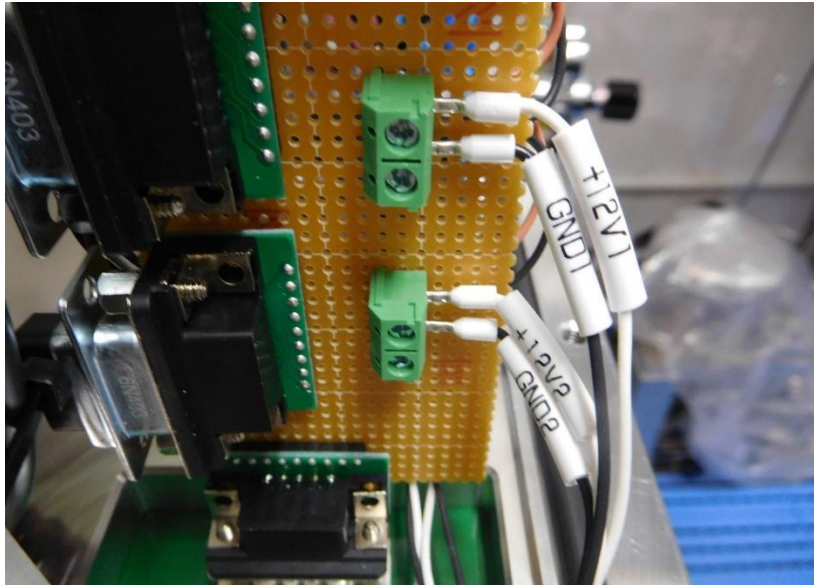


図 2-23 HV への電源分配基板(12V 端子)の接続

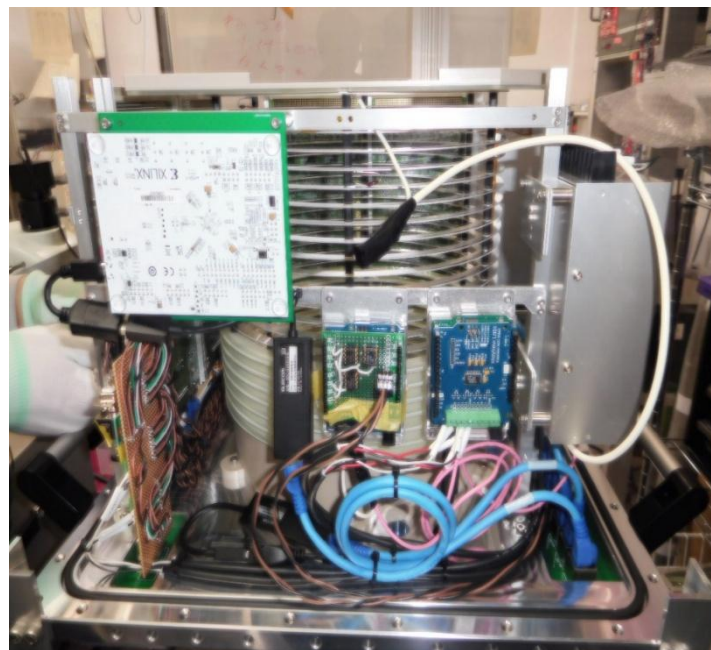


図 2-24 ドリフト電極への配線

必要な配線をした後、DC 電源から改造 TPC 容器内の回路へ電源供給しその電圧を確認した。その結果、HV 端子では 12V、信号中継基板(SB)では-2.5V、+2.5V 及び +3.3V を確認し (図 2-25)、既存 ETCC を参考として想定していた電圧が供給されることを確認した。

以上のように、 μ PIC 及びドリフトタワー（電極）へ 5kV の高圧を印加したうえで、改造 TPC 容器内回路へ容器外から直流電源を繋ぐことで、改造 TPC 部の回路部品に電源が供給されていることを確認した。



(a) 2.5V の確認



(b) 3.3V の確認

図 2-25 改造 TPC 容器内の回路へ電源供給(信号中継基板)

(2) 真空・ガス循環加試験

改造 TPC 部の改良は屋外での長期安定作動を目的として進めており、湿度などの影響を低減化させて耐候性を持たせる他、連続稼働時間の延長を図る必要もあった。ここでは、 μ PIC、GEM 等の主要な部品、電気系統などを封入する改造 TPC 容器の健全性を確認することが必要となる。令和 5 年度の事業では、改造 TPC 容器の耐性に関しては、1 気圧の真空から 1 気圧で、健全性を保つように設計したことを構造解析シミュレーションにより検証していた[9]。また、改造 TPC 容器内のガスを純化することで TPC ガス内の水分を取り除き、内部に設置されている μ PIC の利得低減を抑えるため、必要な技術要素の一つとして小型ガス循環ポンプを選定し、既存 ETCC の TPC 容器に取り付けて安定に動作することを確認していた[9]。

そこで、製作した改造 TPC 容器について、設計通りの耐性を有することを真空試験により検証した。ここで、昨年度に製作した HV に用いたコンデンサについて、真空条件下で破損する可能性があったため、これを取り除いたうえで容器を密封した（図 2-26）。密封した底板面には、SMC 高真空 L 型バルブ、NW16 センターリング、NW16 ティー、ウオールクランプ、IBS ディフレクターキャップ型リリーフバルブ、ウオールクランプ等を取り付けた（図 2-27）。

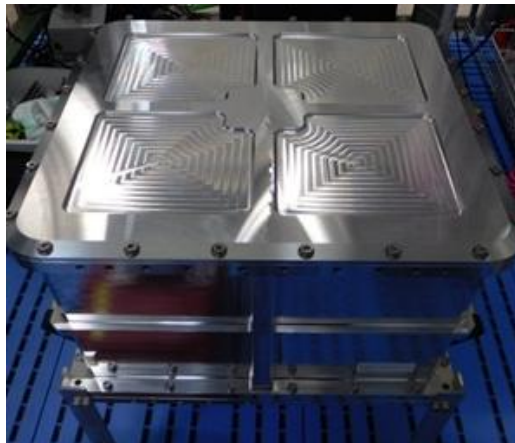


図 2-26 真空試験のための容器密封



図 2-27 真空試験のための装置取付(容器底面)

上記のセッティングを行い、真空を引き 1Pa 以下になることを確認した後で、真空ポンプと改造 TPC を遮断して 20 分間の変化を確認したが、顕著な変化は確認されなかった（図 2-28）。また、Ar ガスを充填、2 気圧まで加圧を行い、同様に 20 分間の変化を確認したが、顕著な変化は確認されなかった（図 2-29）。真空維持の確認後に循環装置を取り付け(図 2-30)、正常に動作することを確認した。

本試験により、改造 TPC 容器が設計通りの性能を有するとともに、取り付けた循環装置が正常に動作することを確認した。そのため、改造 TPC 部については従来よりも運転時間を延長させ、環境モニタリング用 ETCC で求められる長時間の運転が可能な基本機能を有していることを確認できた。



(a) 真空引き時



(b) 遮断後 20 分間

図 2-28 真空試験の結果



(a) 加圧直後



(b) 加圧 20 分後

図 2-29 Ar ガス充填（加圧）後の圧力変化

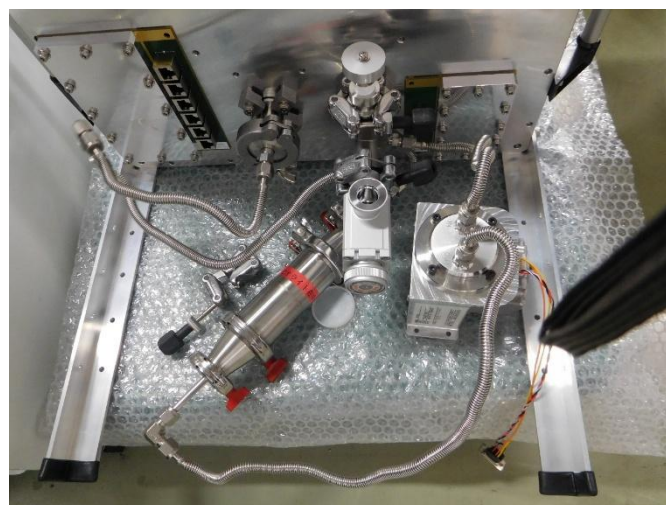


図 2-30 循環装置の改造 TPC 部への取付

2.3. ソフトウェアの導入

昨年度検討したように、ETCC で取得したデータ解析や結果出力などに関して、下記の技術が必要となり、関連するソフトウェアなどが整備、確保されている。

- ・ TPC/シンチレータデータ転送プログラム：TPC とシンチレータの計測データを制御用ノート PC へ転送
- ・ ガンマ線事象構築プログラム：TPC とシンチレータのデータを合わせる
- ・ ガンマ線方向再構成プログラム：電子飛跡の方向を求め、シンチレータ情報と合わせてコンプトン方程式を解き、ガンマ線方向を決定
- ・ ETCC 解析結果表示プログラム：上記再構成プログラムから得られたガンマ線方向分布、エネルギー分布を算出し画像化
- ・ ETCC 動作環境計測プログラム：ETCC の動作環境情報を取得
- ・ ETCC データ収集制御プログラム：ETCC のデータ収集を制御

現状は、ETCC と LAN ケーブルで接続された制御用ノート PC 上でこれらのプログラムの処理を一部手動で行っている。長期間連続の環境モニタリングにおいては、ETCC にシングルボードコンピュータ等を搭載し、データ取得から解析結果の出力・転送までの処理（図 2-31）を自動実行するシステムが不可欠であり、その操作に必要なインターフェイスの構築が要求される。

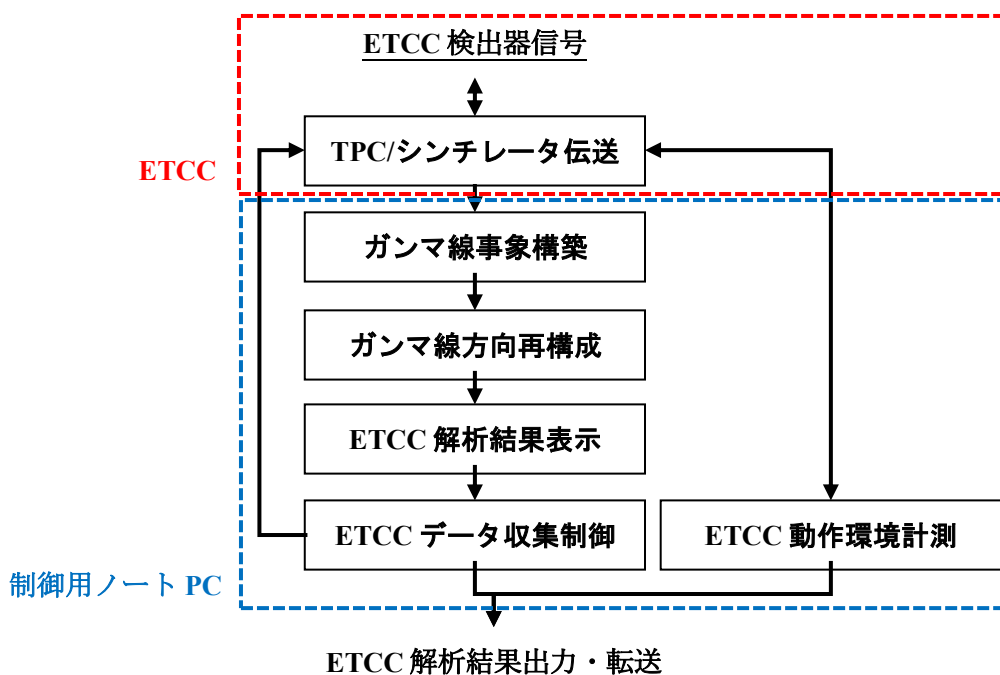


図 2-31 ETCC のデータ取得から解析結果の出力・転送までの処理フロー[]

本年度は、ETCC に搭載するシングルボードコンピュータへの解析プログラムとインターフェースの導入に向けて、ノート PC 上に ETCC の制御や全ての解析プログラムを実行するためのグラフィカルユーザーインターフェース（GUI）を整備した。GUI の制御画面及び ETCC の計測データや解析結果の出力画面の例を図 2-32 から図 2-34 に示す。

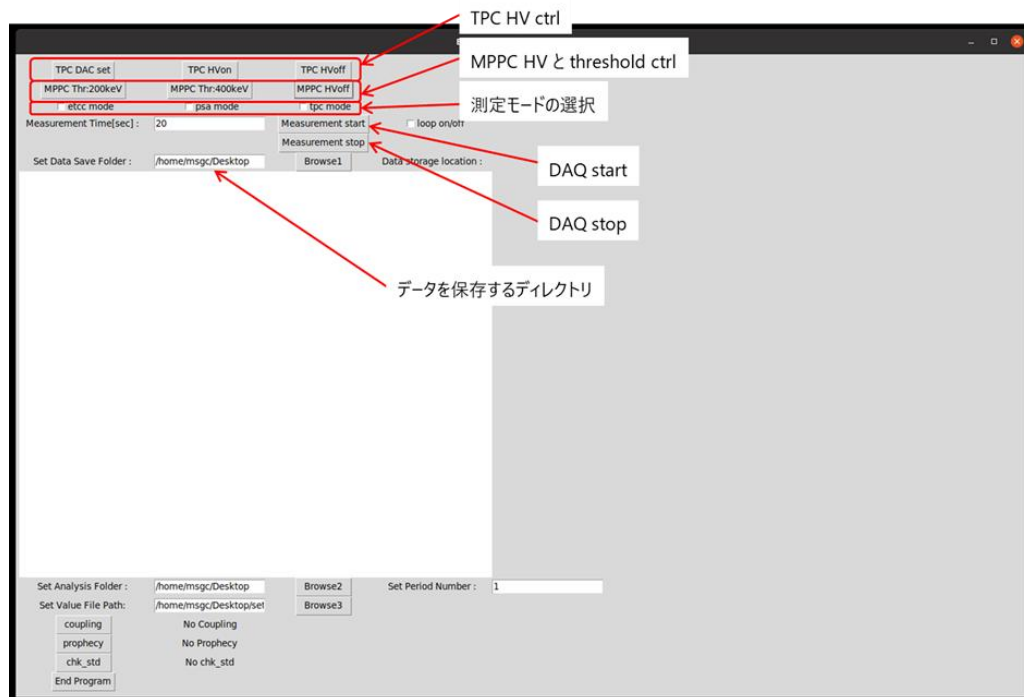


図 2-32 ETCC 初期化及びオペレーション用の GUI

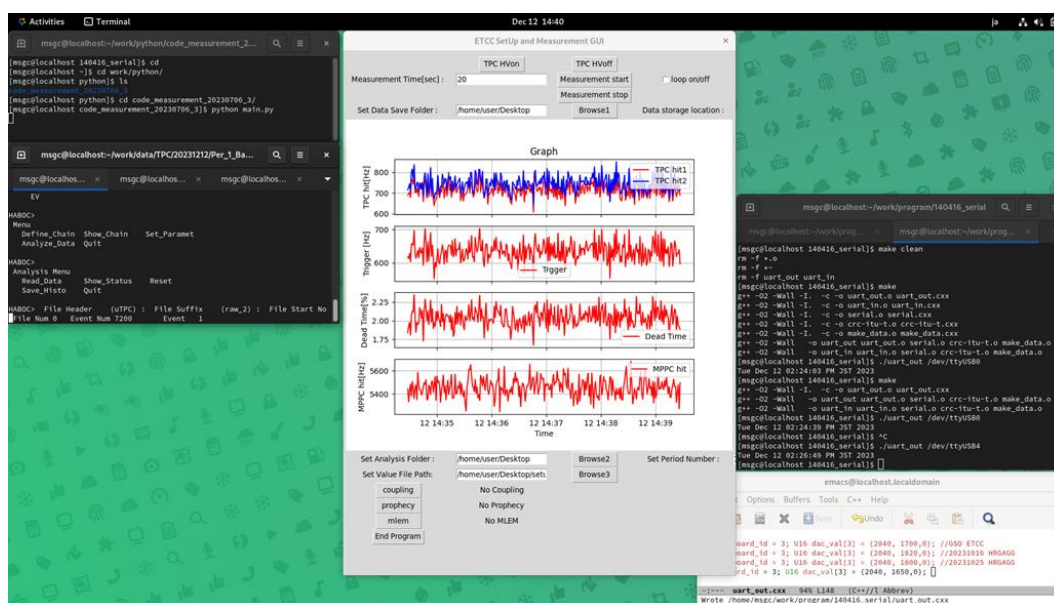


図 2-33 ETCC 測定時の TPC，シンチレータ部の計数率等の動作確認 GUI

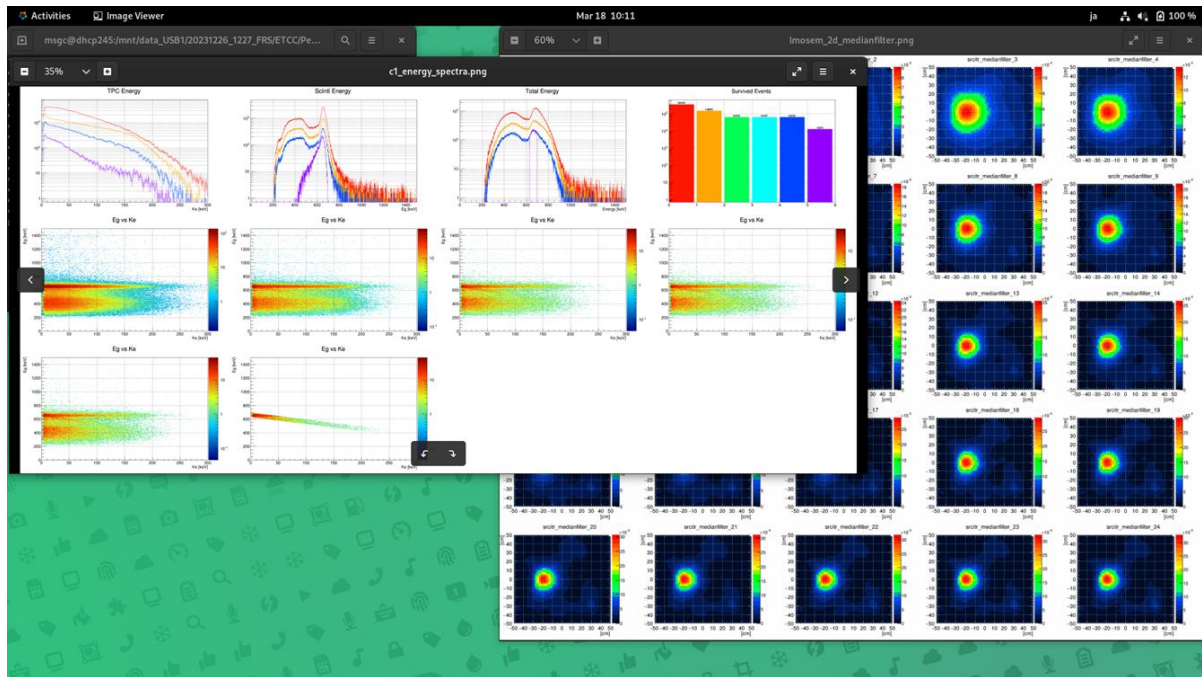


図 2-34 データ解析プログラムの解析結果表示 GUI

一方、ETCC で取得したガンマ線画像データを用いて、大気中への放射性物質の放出に対して、放出地点を特定し、放出量の時間変化を推定する解析については、昨年度以下のプログラムを整備した。

○逆解析用気流場生成プログラム

- ・解析用気流場データベース：逆解析で用いる濃度分布先験情報を作成する拡散計算をリアルタイムで実行するための3次元気流場を生成可能な気流場データセット
- ・解析用気流場生成プログラム：気流場測定値と解析用気流場データベースの融合により、仮想実況気流場に対応する解析用気流場を生成

○逆解析プログラム

- ・応答関数行列生成プログラム：解析領域内の任意の放射性プルーム分布に対してETCC配置地点のガンマ線画像を即座に計算できる応答関数行列を作成
- ・放出地点特定プログラム：スパースモデリングの手法に基づき、ETCC画像だけを用いて放出点を探索する手法
- ・濃度分布先験情報作成プログラム：放出地点特定プログラムで特定した放出地点からの粒子拡散計算を解析時間ステップごとに実行し、濃度分布先験情報を作成
- ・逆解析プログラム：ETCC計測画像と濃度分布先験情報に対してベイズ推計に基づく逆解析を適用し、解析時間ステップごとに放射性プルームの濃度分布と放射性物質の放出量を推定

本年度は、上記プログラムによる一連の解析を図 2-35 に示す処理フローに基づき円滑に行うために、ディレクトリ・ファイル構成を検討し、各処理の入力パラメータの

整理とプログラム改修を実施した。本解析プログラムでは、気流場生成から大気拡散計算までを FORTRAN、ガンマ線画像データを用いるための応答関数行列生成から逆解析までを CERN-ROOT を用いており、異なるプラットフォームの実行環境となっている。これらのプラットフォームを意識することなく、パラメータを的確に設定して解析計算を実行可能なシェルスクリプトを整備した。これらのシェルスクリプトは、Linux のトリガー設定（今後整備予定の現地気象データ取得機能や別途整備している ETCC 計測データ転送によるデータファイルの存在を検知して起動）による自動実行とターミナルでのコマンドベースのユーザーインターフェイスまで整備した。今後、さらなるプログラム改良を経て仕様を確定した後に Web ベースの GUI を整備する予定である。

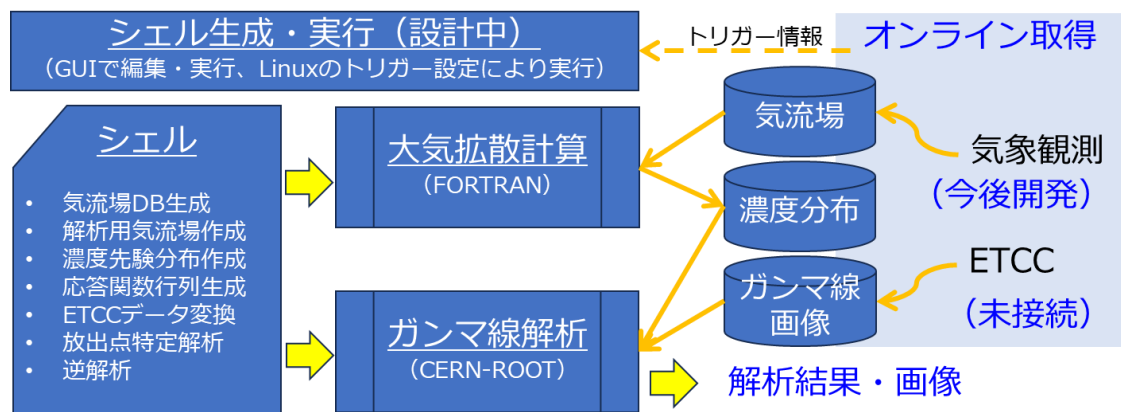


図 2-35 ETCC ガンマ線画像データから放射性物質の大気放出に対する放出地点の特定と放出量の推定を行うための解析の処理フロー

今後の課題として、原子力施設等の事故により放出された放射性プルームを環境用モニタリング ETCC でとらえ、これを可視化する場合、複数個所に設置した ETCC の出力データを解析計算機に集約し、画像情報を事故の対応に関係する各所にオンラインで共有するためのネットワークの整備が必要になる。オンラインへの送信にあたっては、画像解析の高速化、画像の圧縮技術が不可欠となる。これらに関係する技術に関しては、ハード、ソフト両面で実績のある国内の企業等とも協力し、導入を検討していく必要がある。

3. ETCC の最適な配置検討

3.1. 今年度の実施計画

3.1.1 これまでの経緯

京大複合研の原子炉建屋内においては、アルゴンガスの時間変動が少ないため、1 台の ETCC を 4 か所に移動して順次撮影を進め、その計測結果からアルゴンガスの 3 次元画像の取得に成功した。一方、原子力施設から漏えいする放射性プルームの変容を ETCC で計測して、ガンマ線源の 3 次元分布を定量的に再構成する場合、施設周辺に複数台の ETCC を適切に配置することが要求される。放射性プルームの挙動や様態に関しては、気象条件や放出状況により、大きく変化することが想定される。

そこで、令和 5 年度の事業において、様々な気象条件や放出状況を想定した放射性プルーム分布を再現し、それに対する ETCC ガンマ線画像データをシミュレーションにより解析する機能として、気流場データベース及び解析プログラム（パッケージ）の構築を進めた[9]。このうち、気流場データベースは、原子力機構の LOHDIM-LES コード[10]を用いて、東京電力 1F を対象とした解析領域（2km 四方、2.5m 分解能）で風向 36 パターン（10 度ごとの 36 方位）×安定度 3 パターン（不安定、中立、安定）の 108 ケースの気流場計算を実行し、1 分間の平均気流・乱流データを抽出してデータベース（1 ケース約 1.5G バイト）を構築した。さらに、解析プログラム（パッケージ）として、以下の①応答関数行列生成プログラム、②仮想実況データ（答え）生成用プログラム、③逆解析用気流場生成プログラム、及び④逆解析プログラムを整備した。

- ① 応答関数行列生成プログラム：ETCC 配置地点候補に対して、高分解能気流場データベースの計算領域の分解能及び逆解析用の計算領域の分解能で応答関数行列を作成
- ② 仮想実況データ（答え）生成用プログラム：高分解能気流場データベースを入力として、様々な気象条件や放出条件の試験データ（逆解析の答えとなる仮想実況データ）を生成
- ③ 逆解析用気流場生成プログラム：仮想実況データに基づき仮想的な気流場測定データを生成するための気流場測定値を抽出、仮想的な気流場測定データを用いてリアルタイムで簡易的な拡散計算を実行するための解析用の気流場データベース及び気流場を生成
- ④ 逆解析プログラム：ETCC 画像から放射性プルームの濃度分布と放射性物質の放出量を推定するベイズ推計に基づく逆解析手法の解析（本試験の解析用に新たに整備）

これらのデータベースとプログラム群については、様々な気象条件や放出条件の試験データを生成し解析を効率的に実施するため、専用の解析用計算機に解析実行環境を整備した。

3.1.2 実施計画

本事業では、令和 5 年度までに整備したデータベースやプログラムを活用し、放射性プルームを観測するために最適な ETCC の台数及び配置を検討することとした。ここでは、以下に示す様々な気象条件や放出状況を想定して、気流場やプルーム分布のパターンを生成し、ETCC 計測による画像を生成することで、放射性物質放出の検出感度や逆解析による放出量推定の性能検証を行い、ETCC 最適配置の検討を進めた。

- ・ 大気安定度：安定、中立及び不安定の 3 パターン
- ・ 放出状況：スタック放出、建屋放出及び爆発による放出の 3 パターン

3.2. プルーム分布の作成

仮想実況データ（答え）生成用プログラムを用いて、まず、東京電力 1F を対象とした気流場データベース（36 風向×3 安定度の 108 ケース）を基に、風速 3 ケース（1、3、5 m/s）を適用し 324 ケースの気流場を生成した。次に、スタック放出（1 号機 2 号機供用スタック及び 3 号機 4 号機供用スタックの 2 ケース）、建屋放出（1~4 号機それぞれの上面及び側面の 5 面についての 20 ケース）、爆発ケース（各建屋上空の 4 ケース：建屋上面に接する 100m×100m×100m の立方体の初期分布を仮定）からなる計 26 ケースの放出形態について、放射性核種として ^{134}Cs を 1 Bq/s の放出率で放出する条件を設定し、それぞれ上記気流場条件に適用することで、8,424 ケースの初期プルーム分布（放出 1 分後までの分布）を生成した。作成した初期プルーム分布の例として、大気安定度中立、北風 1、3、及び 5m/s の気流条件における 1 号機 2 号機供用スタック、1 号機爆発、及び 1 号機建屋上面からの 1 分間放出による初期プルームの放出高度での濃度水平分布を図 3-1 に示す。

また、上記気流場の風向を 30 度ごとに間引いた 108 ケースに上記 26 ケースの放出条件を適用して、2,808 ケースの 10 分間放出プルーム分布を生成した。例として、図 3-1 と同じ条件による 10 分間放出プルームの放出高度での濃度水平分布を図 3-2 に示す。どの放出形態でも、風速 3 及び 5 m/s では、プルーム分布の先端が解析領域外に到達している。

放出高度の濃度水平分布

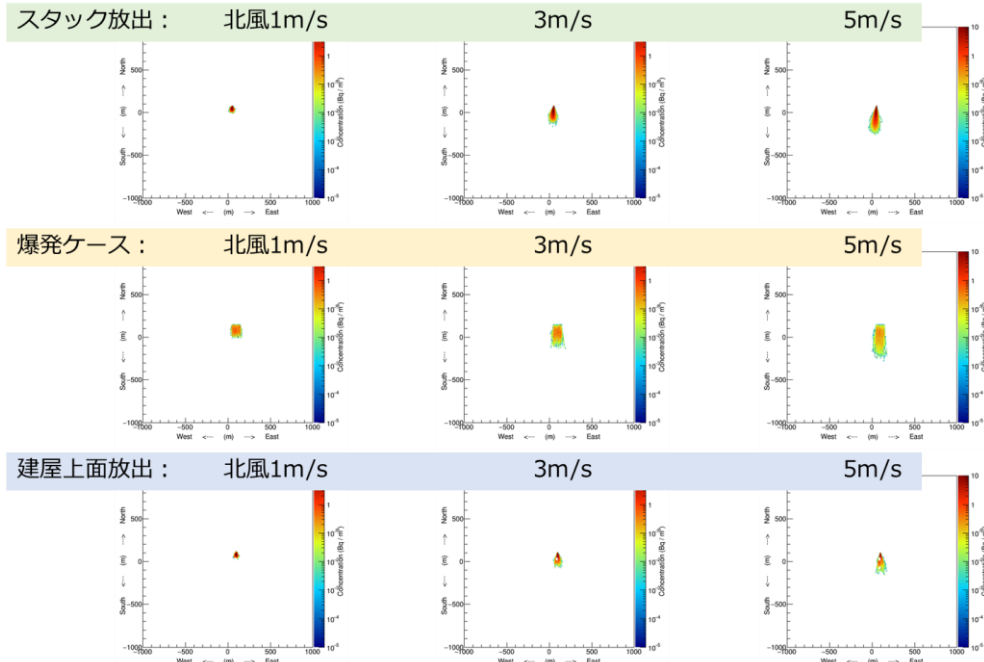


図 3-1 大気安定度中立、北風 1、3、及び 5 m/s の気流条件における 1 号機 2 号機供用スタック、1 号機爆発、及び 1 号機建屋上面からの 1 分間放出による初期プルームの放出高度での濃度水平分布

放出高度の濃度水平分布

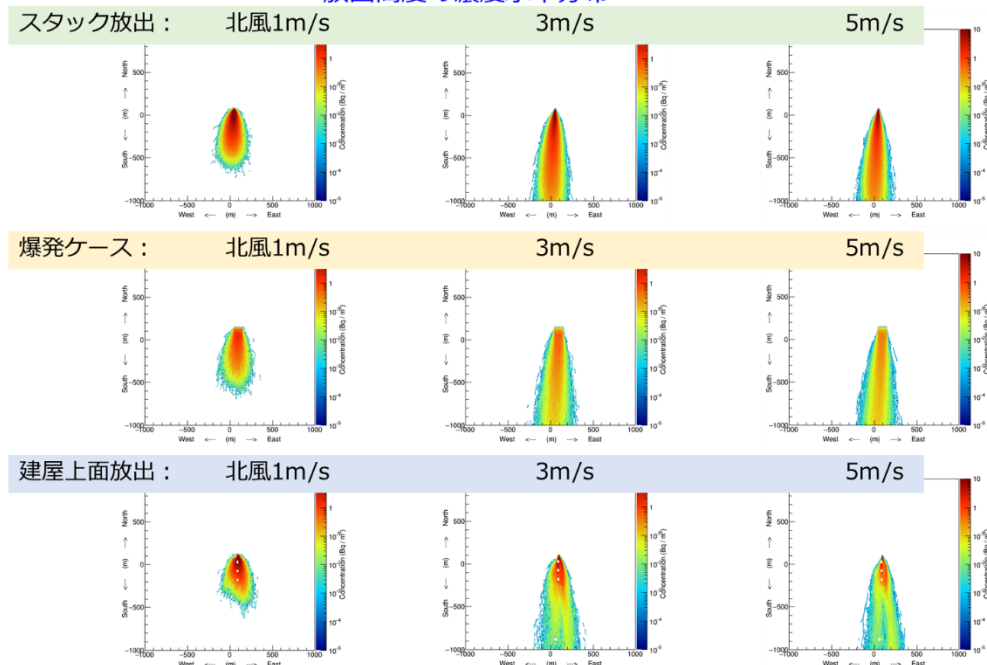


図 3-2 大気安定度中立、北風 1、3、及び 5 m/s の気流条件における 1 号機 2 号機供用スタック、1 号機爆発、及び 1 号機建屋上面からの 10 分間放出によるプルームの放出高度での濃度水平分布

3.3. ETCC 画像の作成

まず、応答関数行列生成プログラムを用いて、 ^{134}Cs の 796 KeV ガンマ線に対する ETCC 設置位置ごとの応答関数行列を生成した。 ^{134}Cs は原子力発電所事故時の主要な放出核種であり、東京電力 1F 事故時の放出期間を通して最も測定されていた。また、 ^{134}Cs の 796 keV ガンマ線は発生頻度が高く (85.5 %)、ガンマ線エネルギースペクトルの中でピークを弁別しやすいため、ETCC 画像から核種存在量を逆推定するのに適している。ETCC を配置する条件としては、東京電力 1F の 1 から 4 号機が中心付近に配置されるような矩形領域を考え、その 4 隅に ETCC を配置することとした。ETCC は水平角 100 度、仰角 100 度の視野を持つことから、矩形領域の 4 隅に配置した ETCC の視野中心を対角線方向及び仰角 40 度に向けることで、矩形領域内を 4 つの ETCC の視野が重なる範囲内に含めることができる。図 3-3 に示すように矩形領域として 600 m 及び 1000 m 四方領域の 2 ケースを設定し、上記 8,424 ケースの初期ブルームの ETCC 画像 (600 m、1,000 m それぞれ 33,696 画像) を生成した。

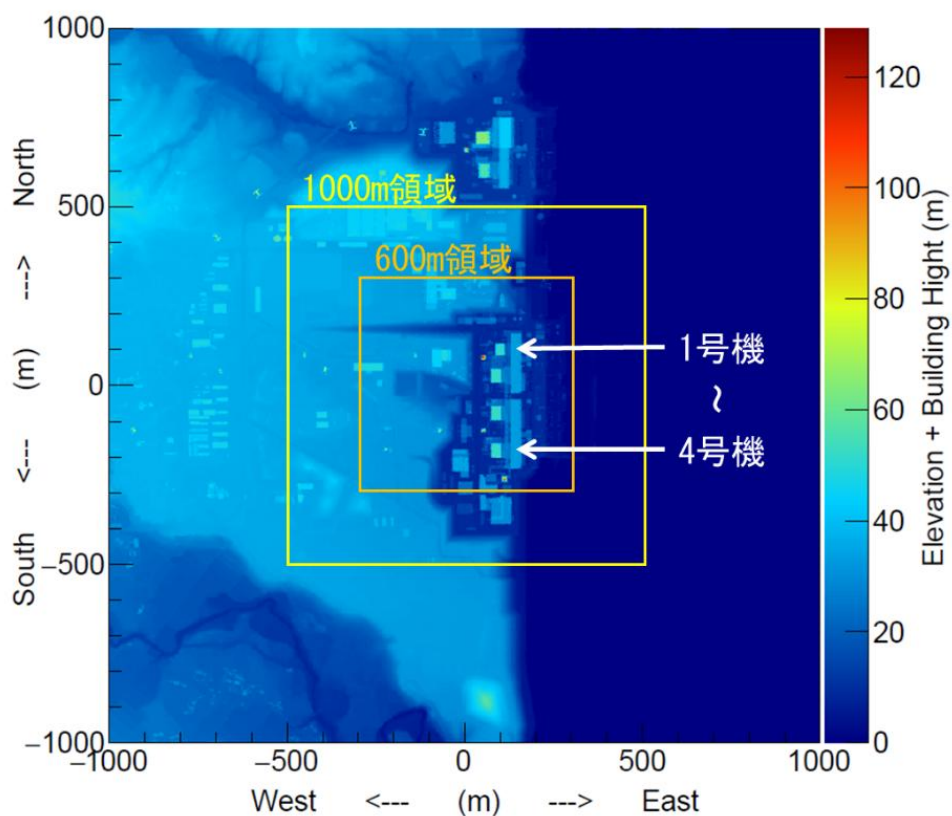


図 3-3 ETCC を 4 隅に設置する 600 m 及び 1000 m 四方領域

この ETCC 画像生成において、各領域東側 2 点（北東隅、南東隅）の地上からの計測した場合、建屋放出の放出地点が原子炉建屋の東側に付属するタービン建屋にさえぎられて見えないため、その改善策を検討した。東側 2 点の ETCC 位置をタービン建屋にさえぎられなくなる位置まで西側に移動するとともに、地形及び建屋にさえぎられないように南北方向にも移動させた。補正地点の領域中心からの距離座標は、600 m 四方領域では北東（160 m, 300 m）、南東（130 m, -320 m）、1000 m 四方領域では北東（150 m, 490 m）、南東（130 m, -460 m）とした。これらの位置に対して、風向を 30 度ごとに間引いた 2,808 ケースの初期プルームについて ETCC 画像（各 5,616 画像）を生成した。また、ETCC の計測時間を上記の 1 分間から 10 分間に変更した場合として、10 分間放出プルーム分布により 600 m 及び 1000 m 四方領域 4 隅の ETCC 画像（各 11,232 画像）を生成した。作成した ETCC 画像の例として、図 3-1 の初期プルーム分布及び図 3-2 の 10 分間放出プルーム分布に対して、ETCC を 600 m 四方領域の北東地点に設置した場合の ETCC 画像をそれぞれ図 3-4 及び図 3-5 に示す。

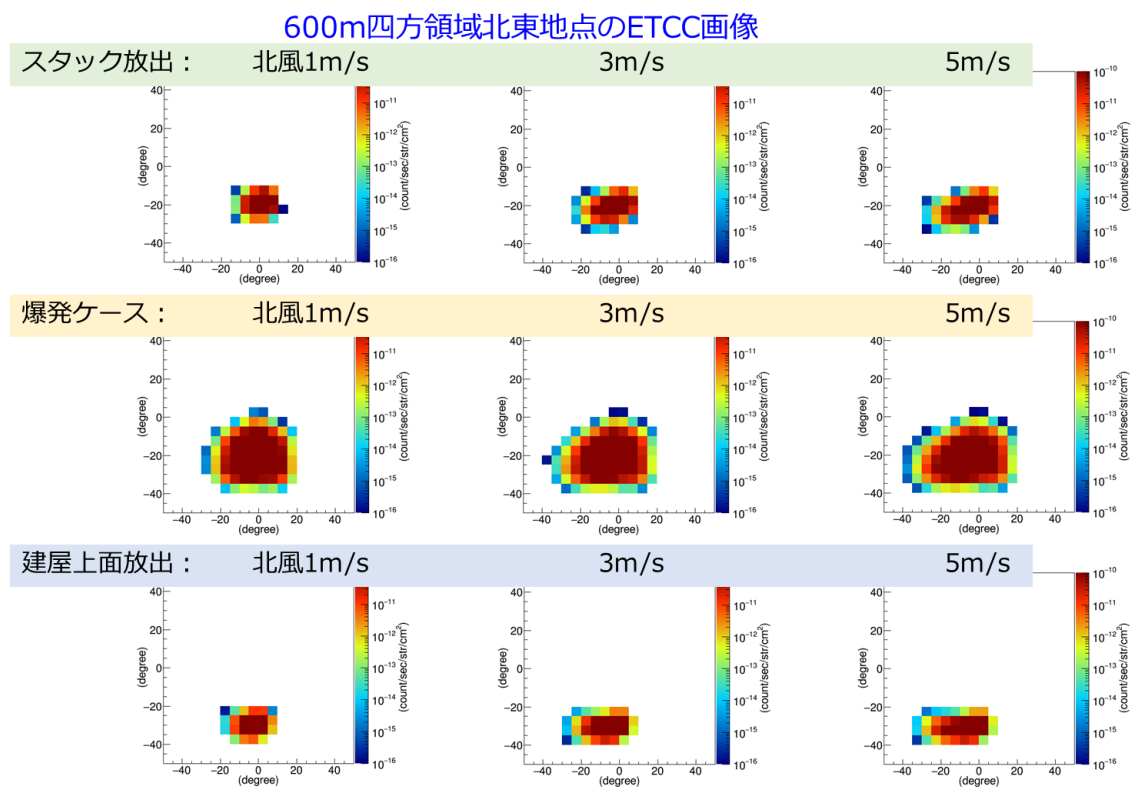


図 3-4 大気安定度中立、北風 1、3、及び 5 m/s の気流条件における 1 号機 2 号機供用スタック、1 号機爆発、及び 1 号機建屋上面からの 1 分間放出による初期プルームに対して、ETCC を 600 m 四方領域の北東地点に設置した場合の ETCC 画像

600m四方領域北東地点のETCC画像

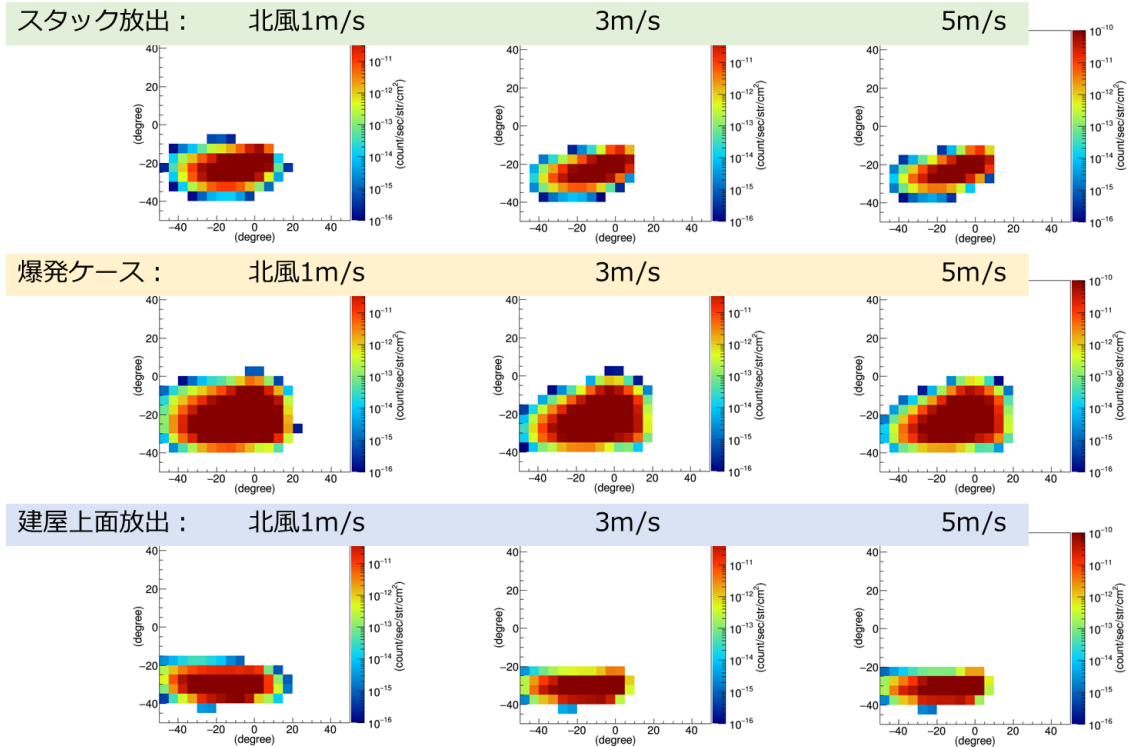


図 3-5 大気安定度中立、北風 1、3、及び 5 m/s の気流条件における 1 号機 2 号機供用スタック、1 号機爆発、及び 1 号機建屋上面からの 10 分間放出によるプルームに対して、ETCC を 600 m 四方領域の北東地点に設置した場合の ETCC 画像

3.4. 放出量に対する画像取得可能性の検討

3.3 で作成した ETCC 画像は、 ^{134}Cs の単位放出 (1 Bq/s) によるプルーム分布に対して、ETCC の単位検出面積 (1 cm²) に入射する 796 keV ガンマ線強度の角度分布を、単位時間 (1 sec)、単位立体角 (1 str) あたりのカウント数 (count/sec/str/cm²) として定義している。そのため、任意の放出率及び計測時間に対して実際に ETCC で検出するガンマ線のカウント数は、作成したガンマ線画像データに放出率と計測時間を乗じるとともに、ETCC の有効検出面積と TPC の検出効率を適用し、単位立体角から角度分解能の立体角への換算を行うことで得ることができる。現状の ETCC のスペックとしては、有効検出面積 : 300 cm²、検出効率 : 1.5×10^{-4} 、角度分解能 (5 度×5 度) の立体角 : $25 \times (2\pi/360)^2 \div 0.0076$ str であり、1 分間計測する場合の ETCC の角度分解能ごとのガンマ線カウント数は、ガンマ線画像データの強度 1 count/sec/str/cm² に対して 0.02 count/min となる[8]。放出率として東京電力 1F 事故の際に大気中に放出された ^{137}Cs の推定放出率 (^{134}Cs と同じと推定されている) の 3 月 12 日から 15 日の期間の平均的な値として 1.0×10^{10} Bq/s[8]を用いて、ETCC で検出されるガンマ線カウント数を求め、角度分解能ごとの最大値と全体の積算値を整理した。スタック放出 (2 ケース) についての 600 m 及び 1000 m 四方領域の 4 隅の ETCC のガンマ線カウント

数の全積算値と最大値について、気象条件 108 ケースでの値の箱ひげ図をそれぞれ図 3-6 及び図 3-7 に示す。

1.0×10¹⁰Bq/s放出に対する600m四方領域 4隅のETCCのガンマ線カウント数

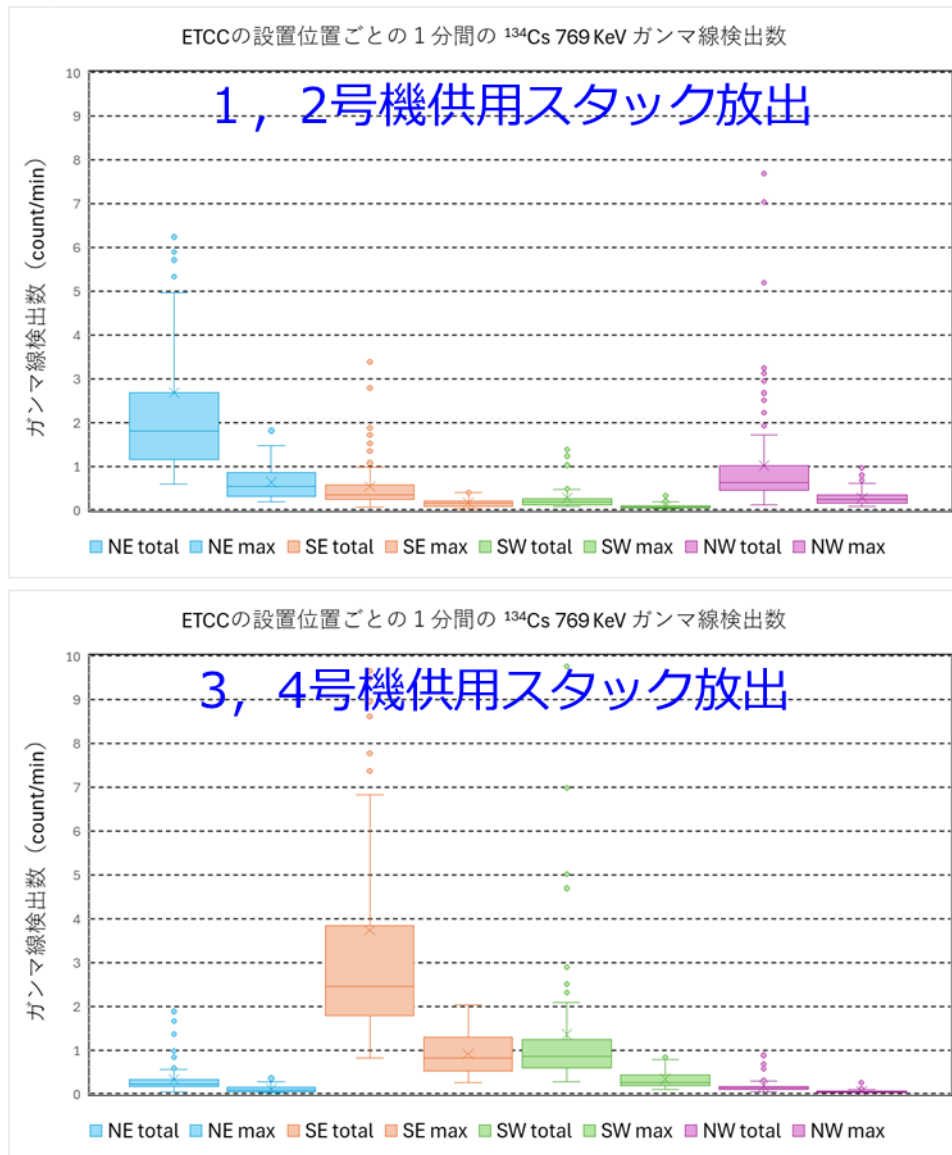


図 3-6 ¹³⁴Cs の放出率 1.0×10¹⁰ Bq/s の 1 分間放出に対して 600 m 四方領域の 4 隅に設置した ETCC の 1 分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件 108 ケースでの値の箱ひげ図

1.0×10¹⁰Bq/s放出に対する1000m四方領域 4隅のETCCのガンマ線カウント数

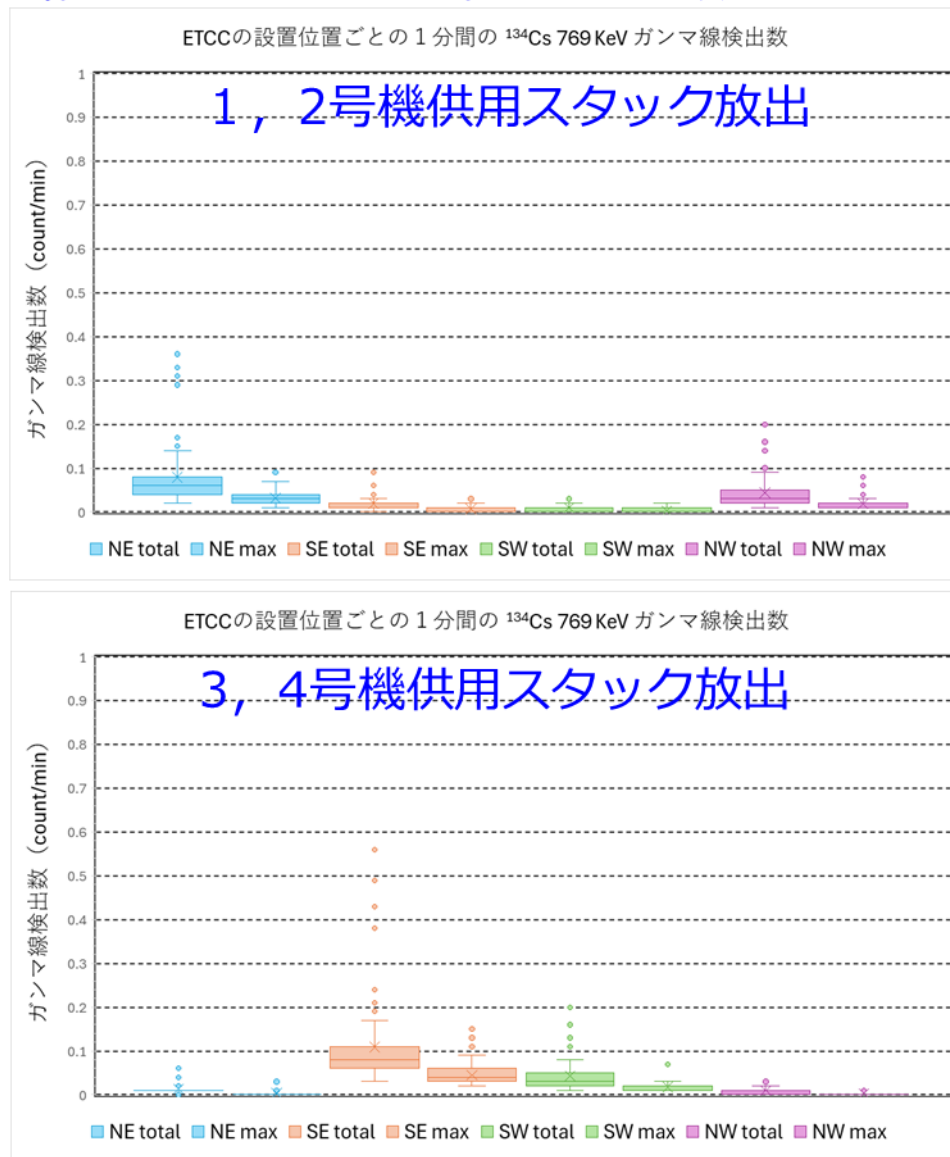


図 3-7 ¹³⁴Cs の放出率 1.0×10¹⁰ Bq/s の 1 分間放出に対して 1000 m 四方領域の 4 隅に設置した ETCC の 1 分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件 108 ケースでの値の箱ひげ図

各スタック放出に対して最も近い地点の ETCC のガンマ線カウント数が大きくなっているが、600 m 四方領域で全積算値でも 10 カウント以下で検出は難しいレベルであり、1000 m 四方領域では 600 m 四方領域の 1/20 程度まで減衰していて検出不可能である。600 m 四方領域東側の補正地点の ETCC 画像データを用いた場合、ガンマ線カウント数は元の地点に対して 4 倍程度大きくなり、検出可能なレベルとなっている。1.0×10¹⁰ Bq/s 程度の放出率に対して 1 分間の ETCC 計測で入射ガンマ線分布を検出す

るには、補正地点より近距離から計測する必要がある。先行研究[8]でも指摘されたように、600 m 四方領域の 1 分間計測で検出するには、10 倍以上の放出率（東京電力 1F 事故の水素爆発時の推定放出率レベル）が必要となるため、計測時間を長く（例えば 10 分間隔）することや、ETCC の検出部（TPC）を大きくすることで有効検出面積（TPC の体積に比例）を拡大する、TPC 内でコンプトン散乱を引き起こす気体を散乱断面積の大きい気体（例えば CF_4 は現状の Ar の 2.3 倍）に変更して検出効率を引き上げる改善策が検討されている。ここでは、10 分間放出プルームのガンマ線画像データを用いて、計測時間を 10 分間にした場合のガンマ線カウント数についても調べた。スタック放出（2 ケース）についての 600 m 及び 1000 m 四方領域の 4 隅の ETCC のガンマ線カウント数の全積算値と最大値について、気象条件 108 ケースでの値の箱ひげ図をそれぞれ図 3-8 及び図 3-9 に示す。600 m 四方領域では、ETCC 設置地点によりガンマ線カウント数が 50～100 倍程度になり、1 桁低い放出率でも検出可能なレベルとなっている。1000 m 四方領域では、ガンマ線カウント数が 100～200 倍程度と 600 m 四方領域より大きく増加し、検出可能なレベルまで改善されている。

以上の結果は他の放出ケースについても同等となっており、上記結果は ETCC の計測位置と計測時間間隔を決定する目安となる。

付録 B に図 3-6 から図 3-9 を補足する図一覧を掲載した。

1.0×10¹⁰Bq/s10分間放出に対する600m 四方領域4隅のETCCのガンマ線カウント数

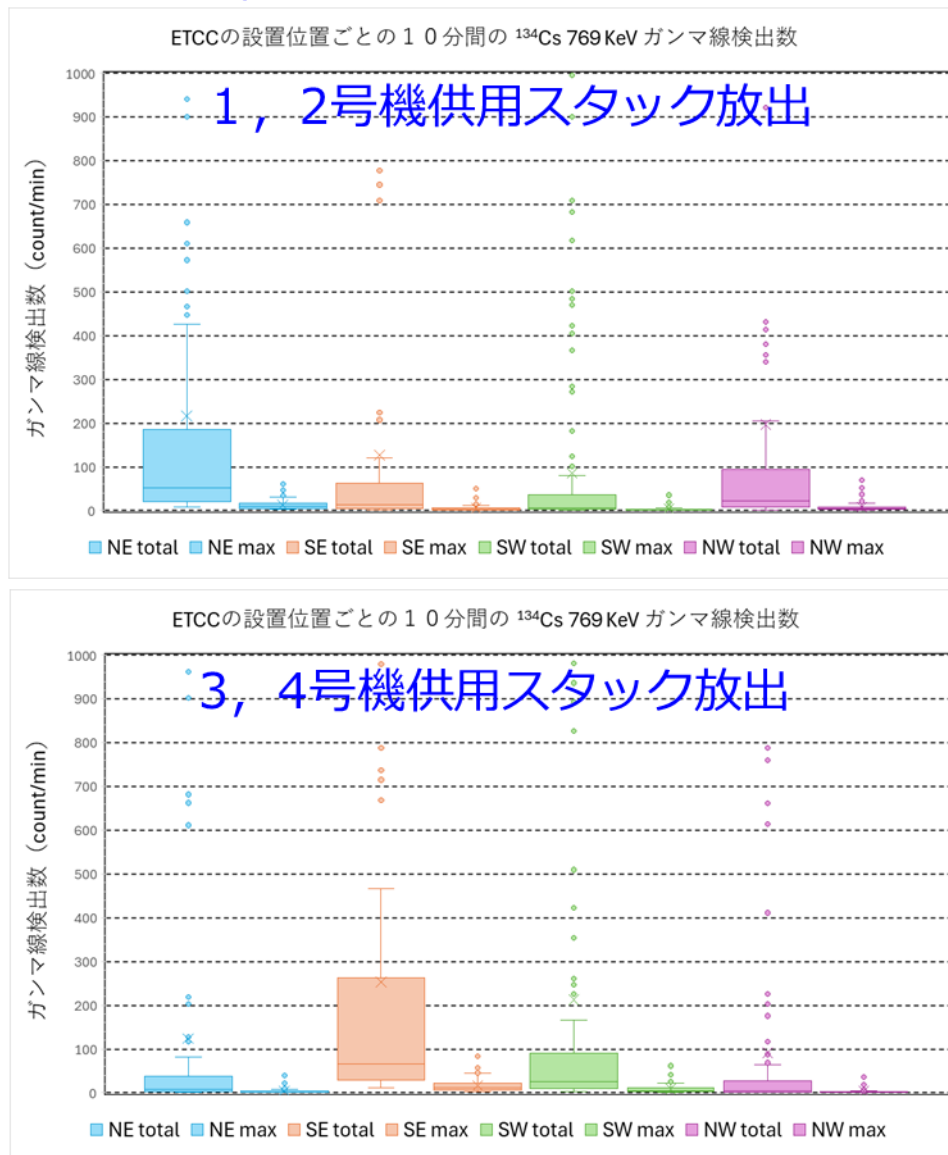


図 3-8 ¹³⁴Cs の放出率 1.0×10¹⁰ Bq/s の 10 分間放出に対して 600 m 四方領域の 4 隅に設置した ETCC の 10 分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件 108 ケースでの値の箱ひげ図

1.0×10¹⁰Bq/s10分間放出に対する1000m 四方領域4隅のETCCのガンマ線カウント数

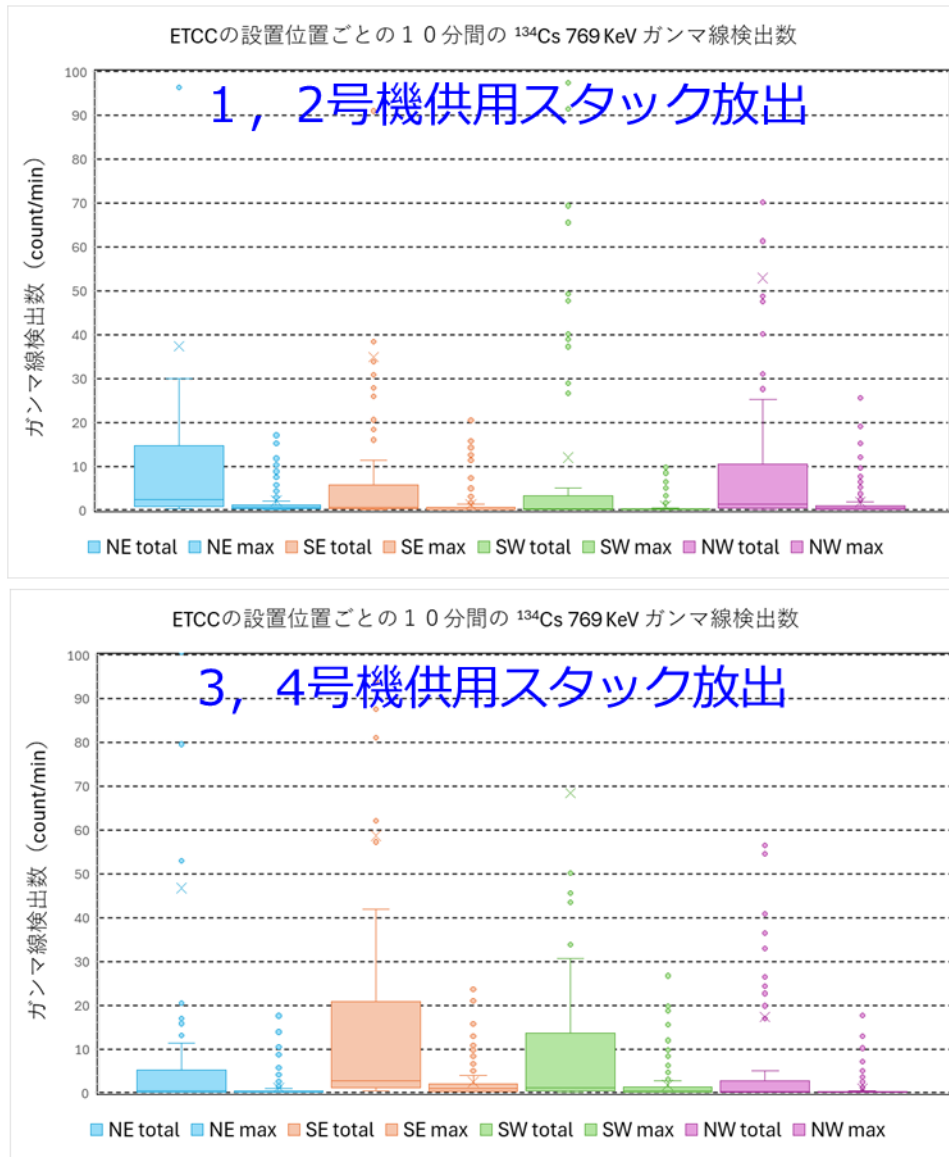


図 3-9 ¹³⁴Cs の放出率 1.0×10¹⁰ Bq/s の 10 分間放出に対して 1000 m 四方領域の 4 隅に設置した ETCC の 10 分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件 108 ケースでの値の箱ひげ図

3.5. 適切な配置検討（放出地点特定試験）

令和 5 年度に整備した放出地点特定プログラムにより ETCC 画像を解析し、放出地点を特定し、その性能を評価することで最適配置を検討した。

放出地点特定プログラムは、スパースモデリングの手法に基づき、放出直後の ETCC 計測画像だけから放出地点を特定するためのものである。ETCC で得られるガンマ線画像データの全ピクセルの計数値を縦ベクトル $\mathbf{y}$ （1 画像あたりのピクセル数×画像枚数だけの要素をもつ）として、同様に逆解析領域の全セルの大気中核種濃度を縦ベクトル $\mathbf{x}$ （逆解析領域の全セル数の要素をもつ）として表す。逆解析用の応答関数行列を $\mathbf{R}$ （行数： $\mathbf{y}$ の要素数、列数： $\mathbf{x}$ の要素数）とすると、 $\mathbf{y} = \mathbf{R}\mathbf{x}$ で関係付けられる。ここで、 $\mathbf{x}$ の1つの要素 x_i （1つのセルの核種濃度）だけが値を持つと仮定した場合のガンマ線画像（ $\mathbf{R}\mathbf{x}$ ）と ETCC で測定されたガンマ線画像（ $\mathbf{y}$ ）の差異（ $\mathbf{R}\mathbf{x} - \mathbf{y}$ ）の各成分の2乗和を最小にする x_i の値は次式で求められる。

$$x_i = (\mathbf{R}_i^T \mathbf{R}_i)^{-1} \mathbf{M}_i^T \mathbf{y} \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{R}_i$ は $\mathbf{R}$ から i 列目だけを抜き出した縦ベクトル、上付きの T は転置を表す。 x_i を逆解析領域内の各セルについて求める。この値は、逆解析領域内の各セルに放射性核種が存在する可能性と存在量の大きき目安となる。放出の可能性のある建屋の側面及び上面に接するセルを放出点候補として、その中で x_i 値が最大となるセルを放出地点として特定する。

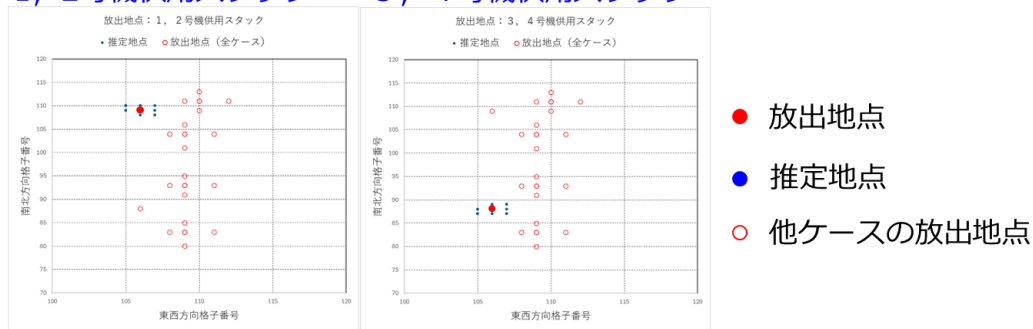
放出地点特定試験は、600 m 及び 1000 m 四方領域、それぞれの東側 2 地点を補正した領域（600 m 及び 1000 m 四方補正領域）において、爆発ケースを除くスタック放出 2 ケースと建屋放出 20 ケースの放出形態風向に対して、30 度ごとに間引いた 108 ケースの気象場での 1 分間放出の初期プルームの ETCC 画像データ（計 9,504 ケース、38,016 画像）に対して実施した。また、参考として 10 分間放出プルームの ETCC 画像についても 600 m 及び 1000 m 四方領域で試験を実施した（計 4,752 ケース、19,008 画像）。解析結果の例として、600 m 四方領域及びその補正領域の 4 隅に設置した ETCC の 1 分間計測によるガンマ線画像データを用いて、スタック放出 2 ケースと 1 号機建屋上面、北側面、及び東側面からの放出についての気象条件 108 ケースに対するプルームの放出点推定結果をそれぞれ図 3-10 及び図 3-11 に示す。また、600 m 四方領域について ETCC の 10 分間計測のガンマ線画像データを用いた結果を図 3-12 に示す。全体的にスタック放出はほぼ推定できている。建屋放出は、上面からの放出は概ね推定できているが、側面からの放出に対する推定誤差が大きく、隣接する建屋と区別できないケースも見られた。特に各号機建屋の間にある北側面と南側面、東側のタービン建屋により東側からの計測がさえぎられていた東側面からの放出に対する推定精度が悪かった。東側面放出については、補正領域のデータを用いることで推定結果が改善されたが、その他の放出地点の推定結果には改善が見られず、かえって悪く

なっているケースも見られた。これは、放出地点が ETCC を配置する矩形領域の中心付近に位置するように ETCC を配置する必要があることを示唆している。また、1000 m 四方領域の推定結果は、600 m 四方領域より大きく精度が低下していた。ガンマ線強度に依存しない解析であることから、放出地点からの距離の増加により ETCC 画像の角度分解能に対する空間解像度が低下したことが原因である。そのため、放出地点からできる限り近い地点に ETCC を配置することが、ガンマ線の検出だけでなく放出地点の特定でも重要となる。東京電力 1F のような 4 つの原子炉建屋が 1 列に並ぶの配置では、全ての原子炉建屋を一度に解析するには 600 m 四方領域より小さい領域の設定は難しい。このため、今回の試験では補正なしの 600 m 四方領域の 4 隅に ETCC を配置する設定が最も効果的な配置であったが、1 号機と 2 号機及びその供用スタック、3 号機と 4 号機及びその供用スタックに分けて、それぞれが矩形領域の中心に位置するように 2 つの領域を設けて、それぞれの 4 隅に ETCC を配置すれば距離を半分程度まで短くできるため、ガンマ線検出率及び空間分解能の向上に有効と考えられる。1 分間計測データと 10 分間計測データの相違については、スタック放出における 10 分間計測データでは 10 分間放出プルームの分布が大きくなり他のスタックと重なる風向ケースで誤推定する場合があった。この誤差は建屋放出に対してさらに大きく表れており、本手法を放出率が小さいケースに適用する場合の課題として今後検討が必要である。また、今回作成したガンマ線画像データは理想的な状態での解析結果であり、実際の計測には放射線輸送のばらつきや環境ガンマ線のノイズが含まれることも考えると、ランダムな誤差を与えたデータを用いた解析の性能評価も必要である。さらに、各 ETCC 画像データに対してランダム誤差を与えたデータを多数生成することで、膨大な数の画像データベースを構築できる。このデータベースを教師データとした機械学習による推定手法を開発すれば、より高精度かつ高速な放出地点推定が可能になると考えられる。

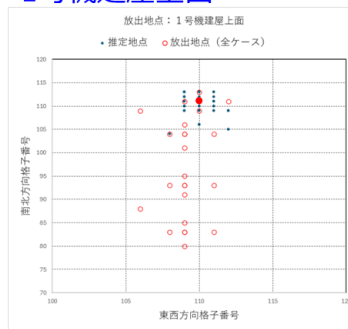
付録 C に図 3-10 から図 3-12 を補足する図一覧を掲載した。

600m四方領域の1分間計測のETCC画像を用いた放出点特定試験結果

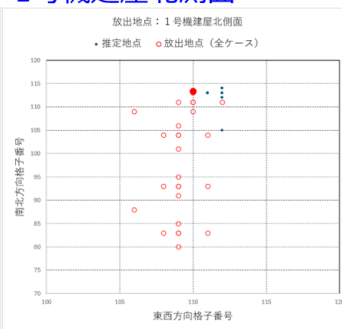
1, 2号機供用スタック 3, 4号機供用スタック



1号機建屋上面



1号機建屋北側面



1号機建屋東側面

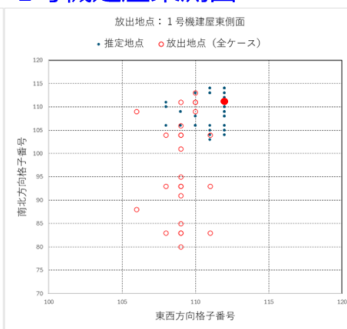


図 3-10 600 m 四方領域の 4 隅に設置した ETCC の 1 分間計測によるガンマ線画像データを用いて、スタック放出 2 ケースと 1 号機建屋上面、北側面、及び東側面からの放出についての気象条件 108 ケースに対するプルームの放出点推定結果

600m四方補正領域の1分間計測のETCC画像を用いた放出点特定試験結果 1, 2号機供用スタック 3, 4号機供用スタック

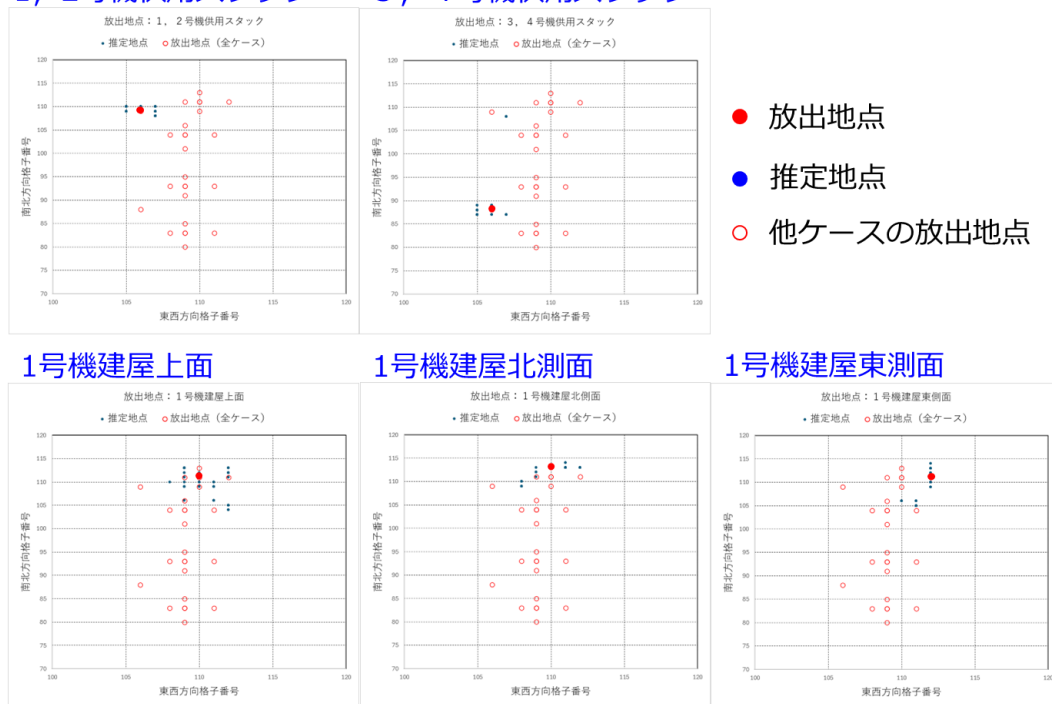
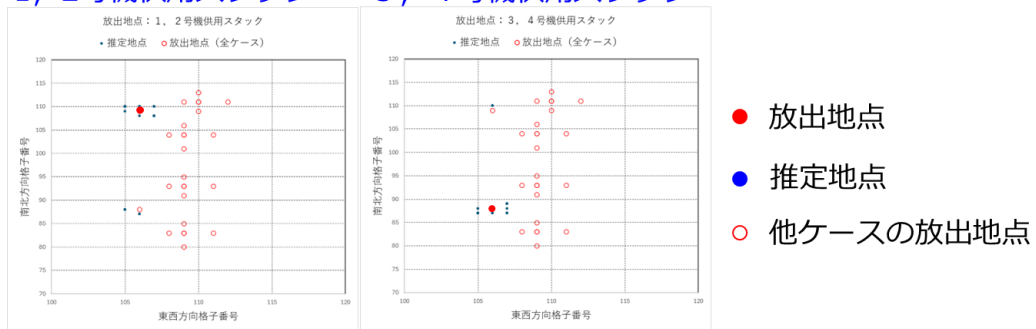


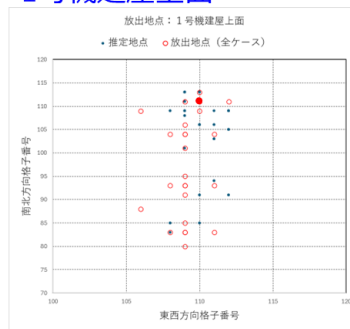
図 3-11 600 m 四方補正領域の 4 隅に設置した ETCC の 1 分間計測によるガンマ線画像データを用いて、スタック放出 2 ケースと 1 号機建屋上面、北側面、及び東側面からの放出についての気象条件 108 ケースに対するプルームの放出点推定結果

600m四方領域の10分間計測のETCC画像を用いた放出点特定試験結果

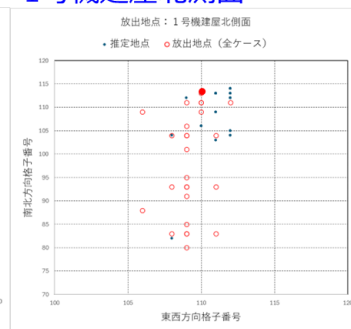
1, 2号機供用スタック 3, 4号機供用スタック



1号機建屋上面



1号機建屋北側面



1号機建屋東側面

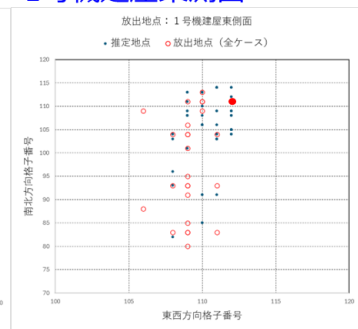


図 3-12 600 m 四方領域の 4 隅に設置した ETCC の 10 分間計測によるガンマ線画像データを用いて、スタック放出 2 ケースと 1 号機建屋上面、北側面、及び東側面からの放出についての気象条件 108 ケースに対するプルームの放出点推定結果

4. まとめ

「令和6年度原子力施設等防災対策等委託費（電子飛跡検出型コンプトンカメラを使用した放射性プルームの可視化手法の検討）事業」では、緊急時モニタリングの実効性向上のため、ETCCを用いた放射性プルームの可視化手法についてシステムの構成を検討し、ETCCによる放射性プルームの可視化手法の適用性を検証した。具体的には、環境放射線モニタリング用ETCCの改造、及びETCCの最適な配置検討の大きく2つの実施内容を遂行した。

このうち、環境放射線モニタリング用ETCCの改造については、令和5年度の事業で検討した仕様に基づいて、環境中での温度や湿度変動の影響を低減し、連続運転が可能な機能を有するよう、電子飛跡計測を行うガスを充填した検出部となる μ PIC等を含むTPC部の改造を進めた。本改造では、R5年度の設計に基づいて、改造TPC部を構成する部品を封入する改造TPC(ガス圧力)容器を製作した。この容器は、従来のTPC部では封入されていなかった回路系統などを含めるように空間を確保するとともに、ガスの循環、電源供給や検出信号の通信を可能とする機構等を導入した。電源接続やインサートネット接続、電源分配に必要な基板も製作し、改造TPC容器へ取り付けた。検出に必要な電場を生成するドリフトケージについても、改造したTPC部で動作できるように製作した。放射線源の放出方向を決定するため、必要な電子飛跡を検出するGEMは既存ETCCで実績のある型式の者を採用し、これをドリフトケージで取り付けるように枠を製作した。製作した改造TPC部を構成する部品については、必要な接続や配線をしたうえで、R5年度に設計した仕様を有する改造TPC容器へ封入できることを確認した。これにより温度・湿度変動の影響を低減化し、連続運転にも対応可能となった。さらに、組み上げた改造TPC部は、高圧の印加、部品への電源供給とともに、設計仕様の圧力耐性を有し、取り付けた装置によるガス循環が可能なことを確認し、長時間の連続運転に必要な基本機能を確保したことを確認した。また、ETCCの制御や解析プログラムを実行するためのグラフィカルユーザーインターフェイス（GUI）、異なるプラットフォームを意識することなく、解析計算を実行可能なシェルスクリプトを整備した。ここでは、Linuxのトリガー設定による自動実行とターミナルでのコマンドベースのユーザーインターフェイスまでを整備した。

ETCCの最適な配置の検討にあたっては、最初に令和5年度の事業で整備したデータベース及び解析パッケージを活用して、検討に必要な気流場、プルームパターン及びETCC画像を整備した。このうち、気流場は36風向×3安定度×風速3ケースを適用した324ケース、プルーム生成はスタック放出（2ケース）、建屋放出（20ケース）、爆発ケース（4ケース）の放出条件を上記気流場条件に適用し、初期及び10分間放出プルーム分布を生成した。また、ETCC画像については、上記プルーム分布に対し、矩形領域（600m及び1000m四方領域）の4隅。四方領域の東側2点の配置を変更したETCC画像を取得し、トータルで約50,000画像を取得した。これらの要素を活用し、放出量に対する画像取得の可能性を検討した。ここでは、ETCCのスペックに基づいて、設定

した放出率を用いて、ETCCで検出されるガンマ線カウント数を求め、角度分解能ごとの最大値と全体の積算値を整理した。その結果、 ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/sの1分間放出に対して600m四方領域では検出可能、1000m四方領域は不可、10分間放出の10分間計測であれば1000m四方領域も可、600m四方領域では1桁低い放出率でも検出可能であることを確認した。その後、スパースモデリングの手法に基づき、放出直後のETCC計測画像だけから放出地点を特定する放出地点特定プログラムにより、ETCC画像の解析を実施し、放出地点特定性能を評価することで最適配置の検討を進めた。放出地点特定試験は、600 m及び1000 m四方領域、それぞれの東側2地点を補正した領域（600 m及び1000 m四方補正領域）において、爆発ケースを除くスタック放出2ケースと建屋放出20ケースの放出形態風向に対して、30度ごとに間引いた108ケースの気象場での1分間放出の初期プルームのETCC画像データ（計9,504ケース、38,016画像）に対して実施した。その結果、600 m四方領域の4隅にETCCを配置する設定が最も効果的な配置であり、さらにサイト内で複数のプラントが存在する場合、各領域のプラント毎に計測するようにETCCを配置すれば、プルームの可視化をさらに有効化できることを確認した。

今後、製作した改造 TPC 部について、より厳しい環境となる高温・多湿の条件下で連続運転の試験を実施することで、信頼性を確保することが期待される。このような試験で、連続運転に課題が見いだされた場合、必要に応じて更なる改造等を行うことで、信頼性を高めていくことになる。また、TPC 部と同様に ETCC で重要な構成要素となるシンチレータ部についても、環境モニタリング用に最適なスペックの検討を行い、試作することも重要となる。これらの試験や試作を通じて、環境モニタリング用 ETCC の試作機を整備し、環境下での連続運転、放射線照射試験により信頼性を検証することで、放射性プルームを可視化する ETCC の実現が加速されることが期待できる。さらに、緊急時モニタリングの実効性向上を図ることを鑑みた場合、ETCC で取得した画像の共有等も大きな課題となる。具体的には、画像取得に必要なデータ転送等で必要な周辺技術について、最新の動向等を踏まえ、最適な ETCC の運用を検討することも必要不可欠となる。

参考文献

- [1] 原子力規制委員会、「原子力災害対策指針」、平成 24 年 10 月 31 日制定、令和 5 年 11 月 1 日最新改正
- [2] IAEA : ” Criteria for Use in Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency” , IAEA Safety Standards Series No. GS-G-2 (2011).
- [3] 原子力規制庁監視情報課「緊急時モニタリングについて（原子力災害対策指針補足参考資料）」、平成26年1月29日制定、令和6年3月21日最新改正
- [4] T. Tanimori et al, “MeV γ -ray imaging detector with micro-TPC”, New AR, Vol. 48 (1-4), p. 263-268 (2004).
- [5] T.Tanimori et al, “Establishment of imaging spectroscopy of nuclear gamma-rays based on geometrical optics”, Sci. Rep., 7:41511, 11pages, (2017).
- [6] A. Takada et al, “First observation of the MeV gamma-ray universe with bijective imaging spectroscopy using the electron-tracking Compton telescope on board SMILE-2+”, ApJ, 930:6 (13pp), 2022.
- [7] 日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門 福島研究開発拠点 廃炉環境国際共同研究センター,京都大学,「ガンマ線画像スペクトル分光法による高放射線場環境の画像化による 定量的放射能分布解析法（委託研究）－令和元年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業－」、JAEA-Review 2020-044、(2020).
- [8] H.Nagai et al, “Quantitative visualization of a radioactive plume with harmonizing gamma-ray imaging spectrometry and real-time atmospheric dispersion simulation based on 3D wind observation”, J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 60 (11), P.1345-1360 (2023).
- [9] 日本原子力研究開発機構、「令和 5 年度原子力施設等防災対策等委託費（電子飛跡検出型コンプトンカメラを使用した放射性プルームの可視化手法の検討）事業」調査報告書、(2024).
- [10] H. Nakayama et al, “Local-scale High-resolution Atmospheric Dispersion Model using Large-Eddy Simulation: LOHDIM-LES”, JAEA-Data/Code 2015-026, 37pages, (2016).

付録 A 改造 TPC 部の組み上げ

(1) ハーネスの製作



図 A-1 信号伝達用(信号中継基板－TCU)



図 A-2 信号中継基板への電源供給用

(2) 電源分配基板の製作

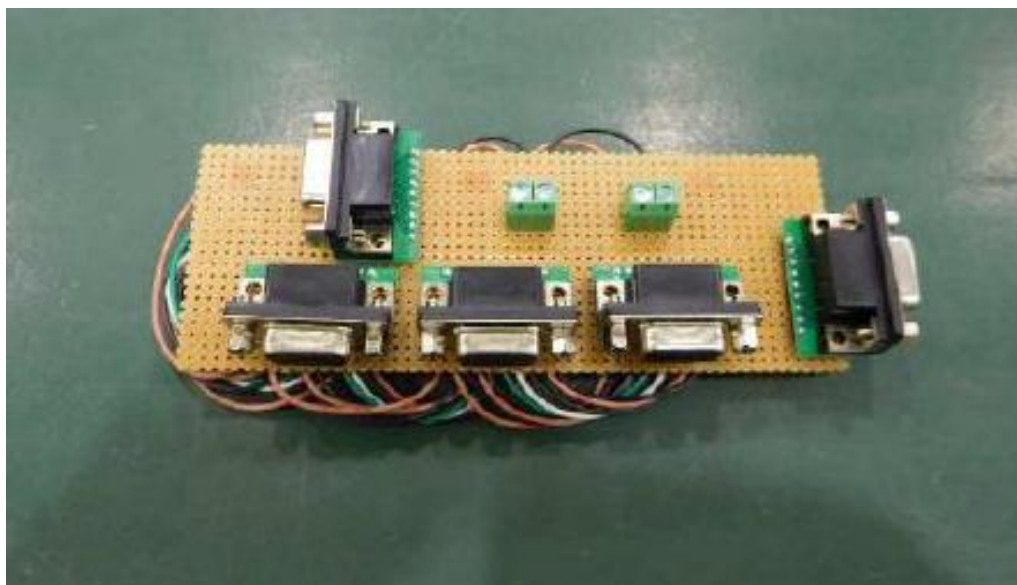


図 A-3 電源分配基板

(3) 改造 TPC(ガス圧力)容器の骨格部の組み立て



図 A-4 底板と大 L 字治具（脚部）の取付



図 A-5 底板へ支柱を取付

(4) 電源接続基板及びインサートネット接続基板の取付



図 A-6 電源接続基板の取付（底板の導入機構）



図 A-7 インサートネット接続基板の取付（底板の導入機構）

(5) 信号中継基板の取り付け



図 A-8 信号中継基板の取付

(6) 信号中継基板のインサートネット接続



図 A-9 信号中継基板のインサートネット接続
(信号中継基板側)



図 A-10 信号中継基板のインサートネット接続
(接続基板側)

(7) 高圧電源系の取付



図 A-11 高圧電源(HV)の取付



図 A-12 アルディーノ(HV 制御用マイクロ PC)の取付

(8) TCU(信号通信制御)の取付



図 A-13 TCU の取付

(9) TCU と信号中継基板の接続



図 A-14 TCU 側のハーネス接続



図 A-15 信号中継基板側のハーネス接続

(10) 電源分配基板の取付



図 A-16 電源分配基板の取付

(11) 電源分配基板と信号中継基板の接続



図 A-17 電源分配基板側のハーネス接続



図 A-18 信号中継基板側のハーネス接続

(12) 電源中継基板と HV 系の接続

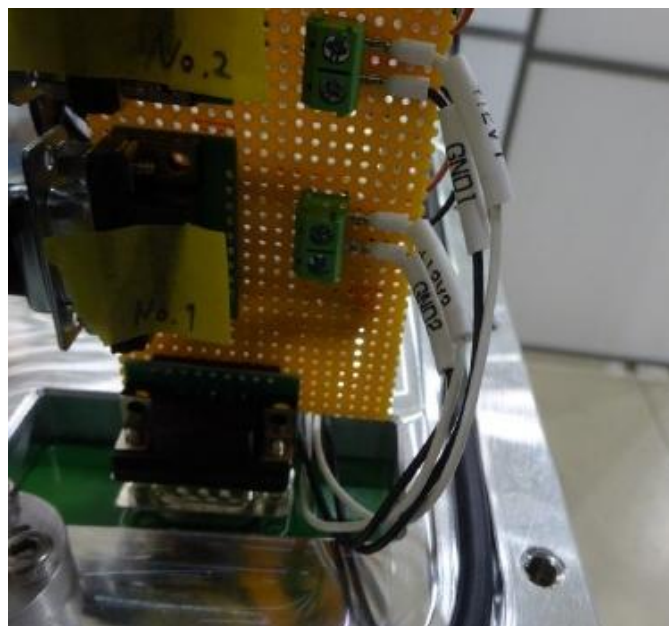


図 A-19 電源分配基板側の接続



図 A-20 HV 系側の接続

(13) アルディーノのインサernet系への接続



図 A-21 アルディーノ側の接続



図 A-22 インサernet接続基板側の接続

(14) TCU のインサートネット系への接続

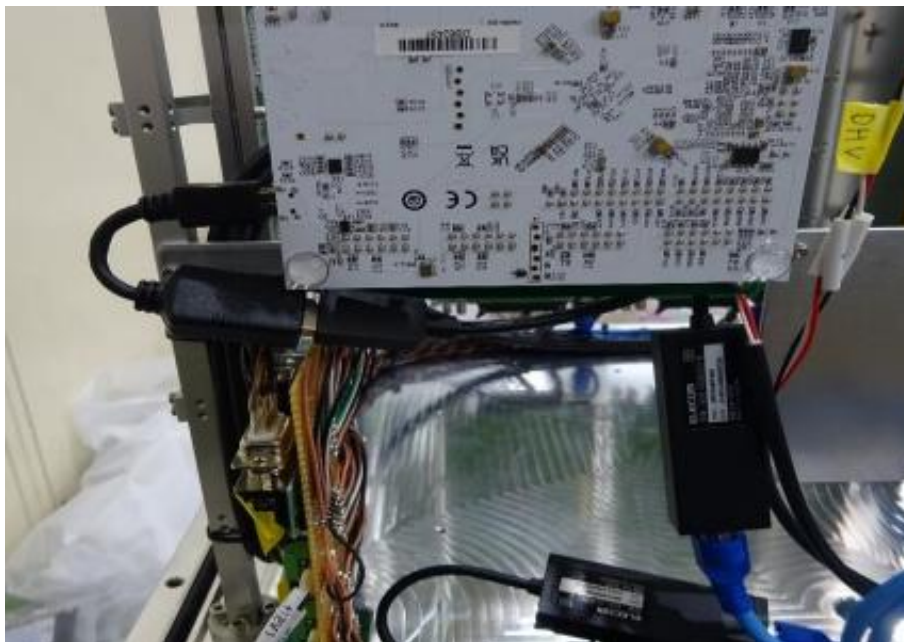


図 A-23 TCU 側の接続

(15) ドリフトケージの取付



図 A-24 ドリフトケージの取付

(16) GEM 枠及び μ PIC の取付



図 A-25 GEM 枠の取付
(ドリフトケージ上部)



図 A-26 μ PIC の取付
(GEM 枠の上部)

(17) 蓋及び取手（運搬用）の取付

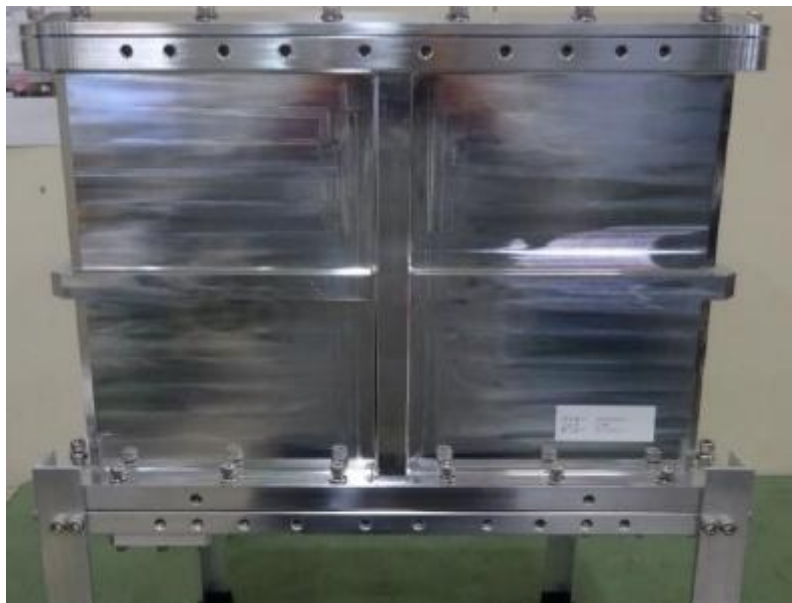


図 A-27 蓋の取付



図 A-28 取手(運搬用)の取付

付録 B ETCC ガンマ線カウント数（本文、図 3-6～3-9 の補足）

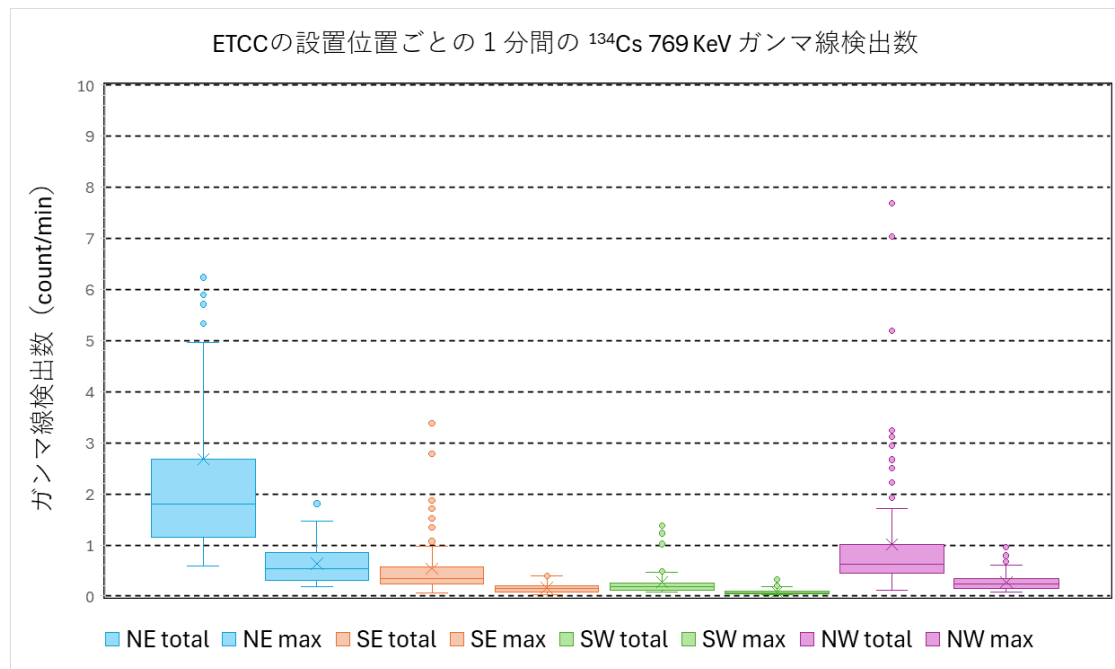


図 B-1 1, 2号機供用スタックからの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/sの1分間放出に対して600 m四方領域の4隅に設置したETCCの1分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件108ケースでの値の箱ひげ図

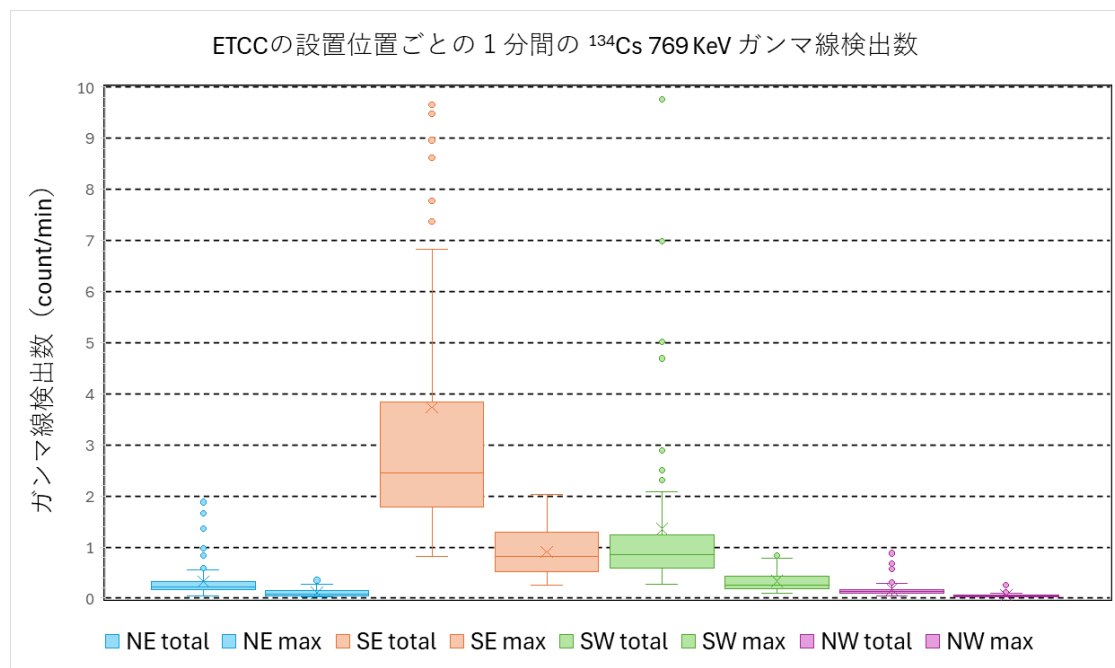


図 B-2 3, 4号機供用スタックからの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/sの1分間放出に対して600 m四方領域の4隅に設置したETCCの1分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件108ケースでの値の箱ひげ図

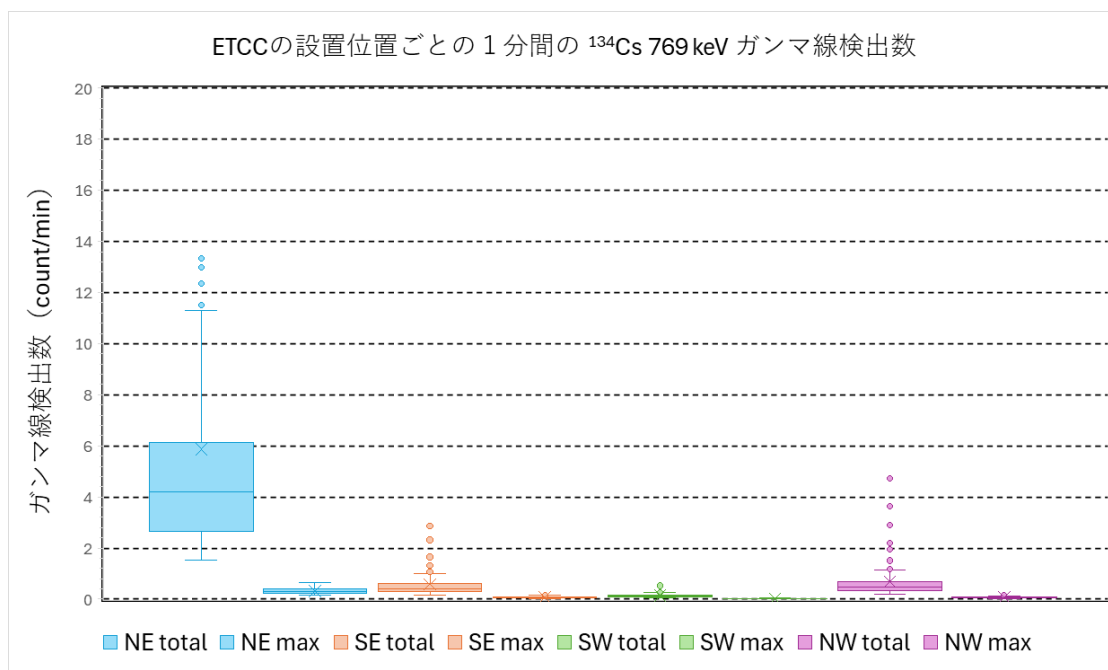


図 B-3 1号機爆発による¹³⁴Csの放出率 1.0×10^{10} Bq/sの1分間放出に対して600 m四方領域の4隅に設置したETCCの1分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件108ケースでの値の箱ひげ図

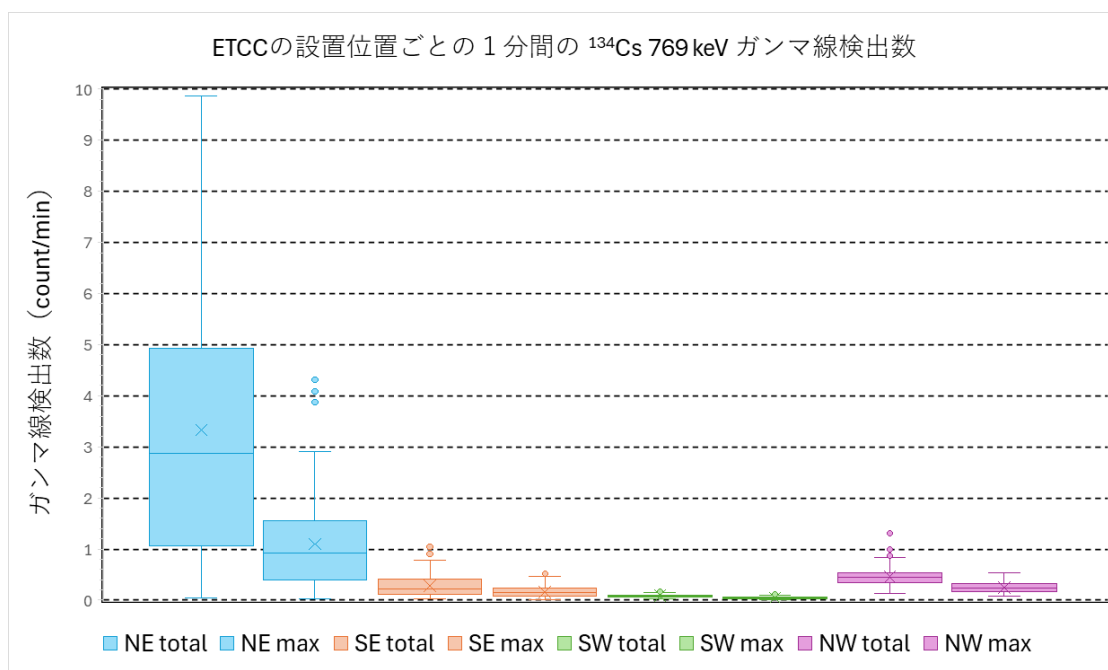


図 B-4 1号機建屋上面からの¹³⁴Csの放出率 1.0×10^{10} Bq/sの1分間放出に対して600 m四方領域の4隅に設置したETCCの1分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件108ケースでの値の箱ひげ図

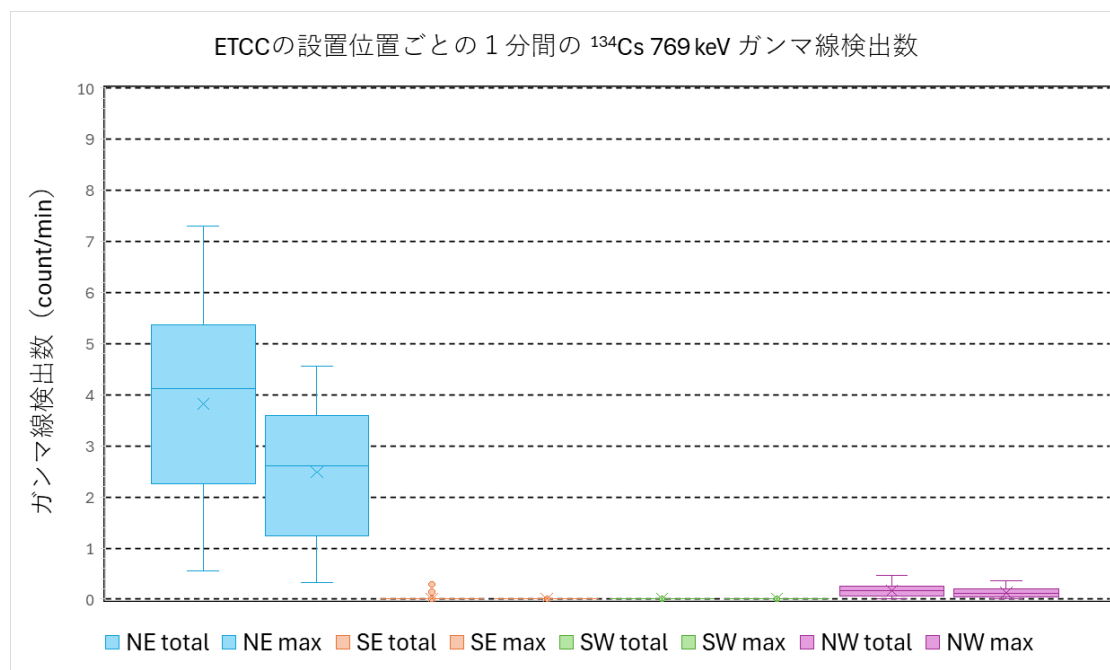


図 B-5 1号機建屋北面からの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/sの1分間放出に対して600 m四方領域の4隅に設置したETCCの1分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件108ケースでの値の箱ひげ図

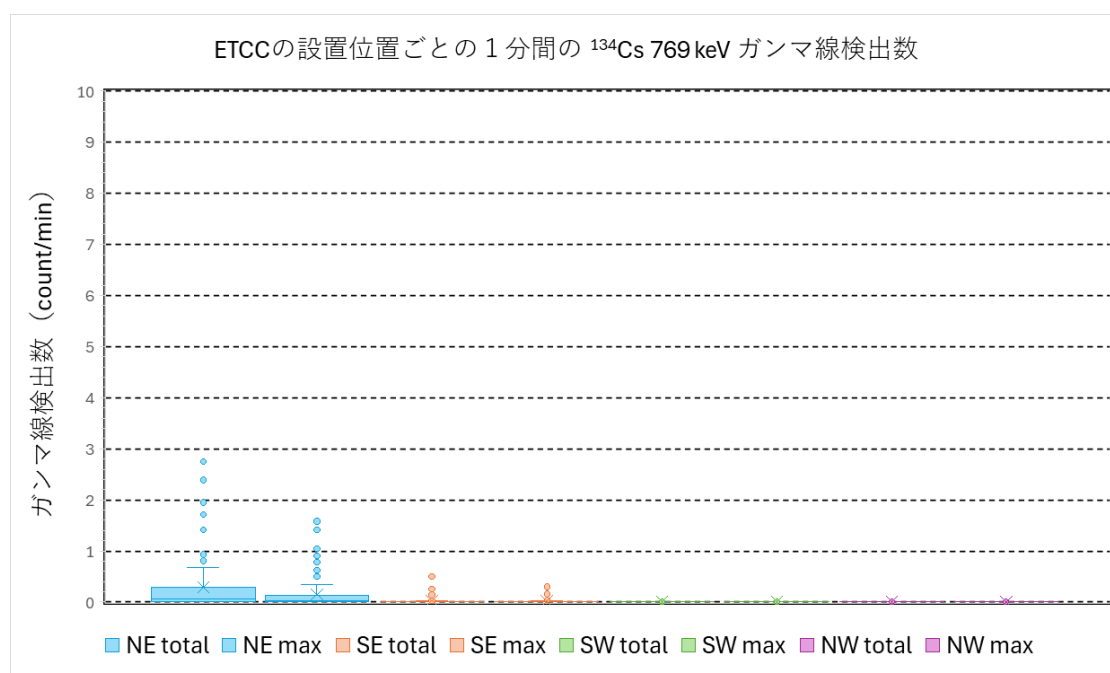


図 B-6 1号機建屋東面からの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/sの1分間放出に対して600 m四方領域の4隅に設置したETCCの1分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件108ケースでの値の箱ひげ図

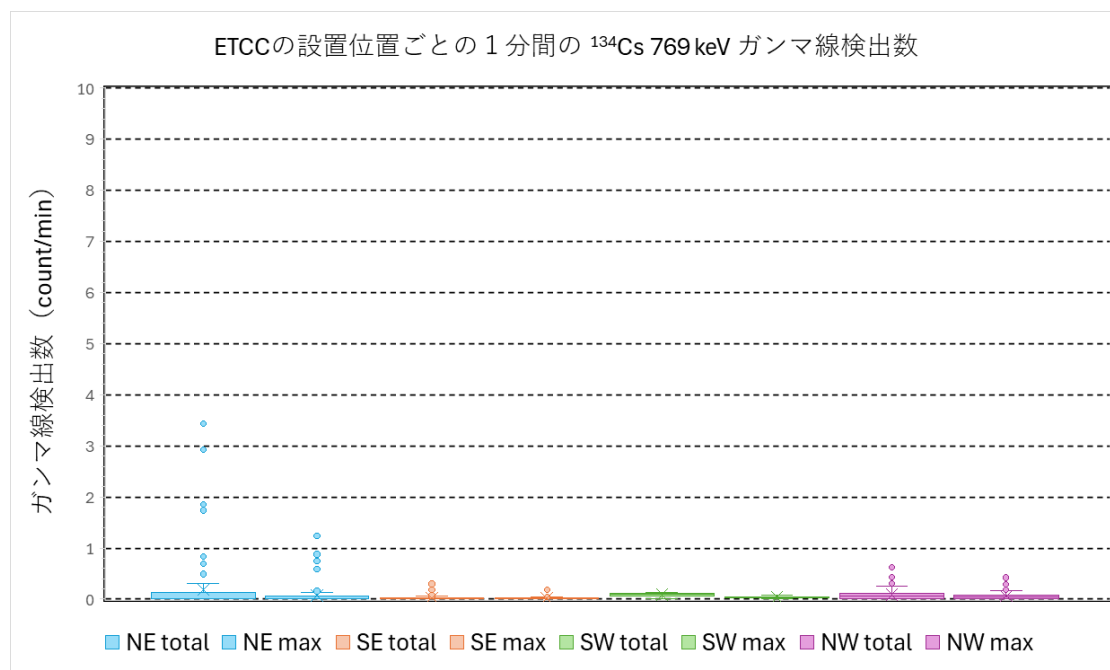


図 B-7 1号機建屋南面からの¹³⁴Csの放出率 1.0×10^{10} Bq/sの1分間放出に対して600 m四方領域の4隅に設置したETCCの1分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件108ケースでの値の箱ひげ図

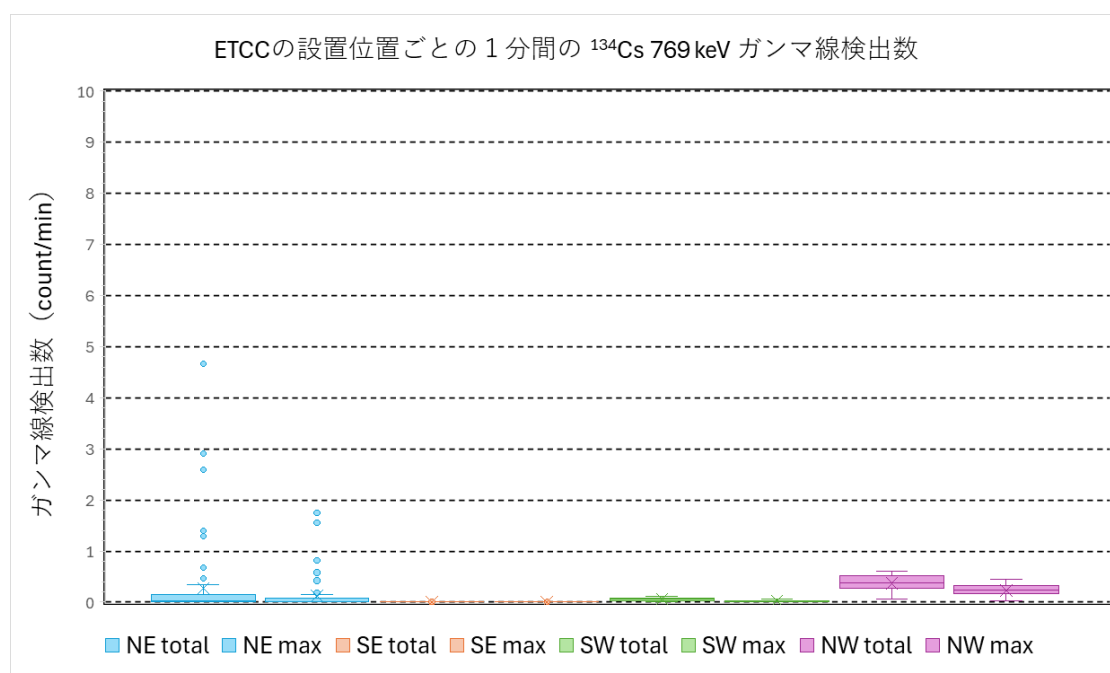


図 B-8 1号機建屋西面からの¹³⁴Csの放出率 1.0×10^{10} Bq/sの1分間放出に対して600 m四方領域の4隅に設置したETCCの1分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件108ケースでの値の箱ひげ図

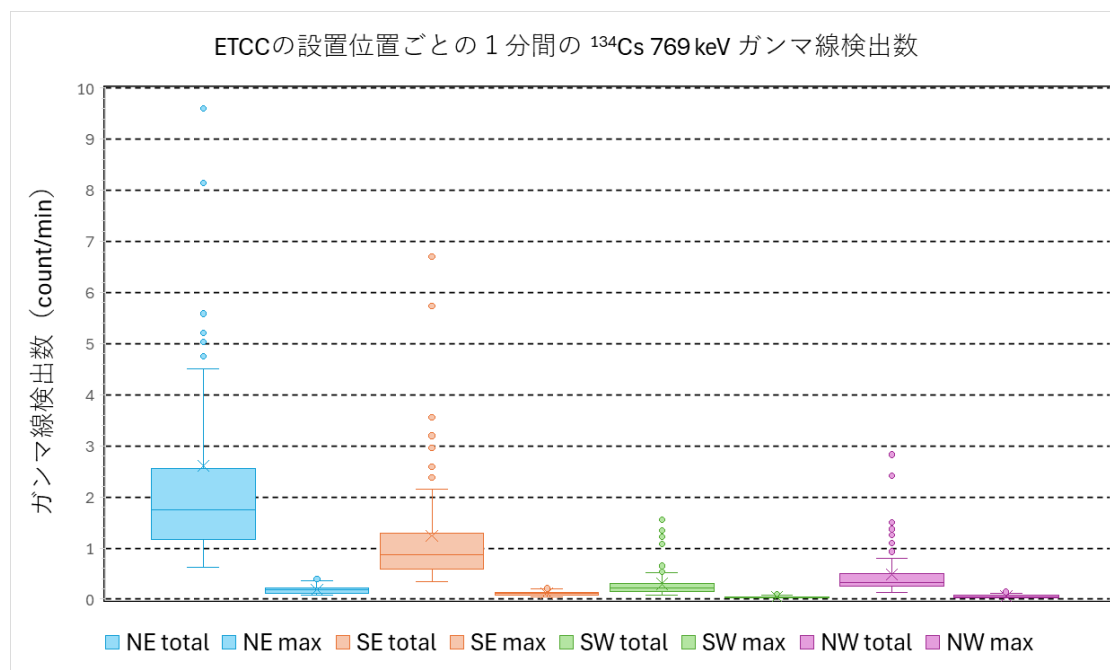


図 B-9 2号機爆発による¹³⁴Csの放出率 1.0×10^{10} Bq/sの1分間放出に対して600 m四方領域の4隅に設置したETCCの1分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件108ケースでの値の箱ひげ図

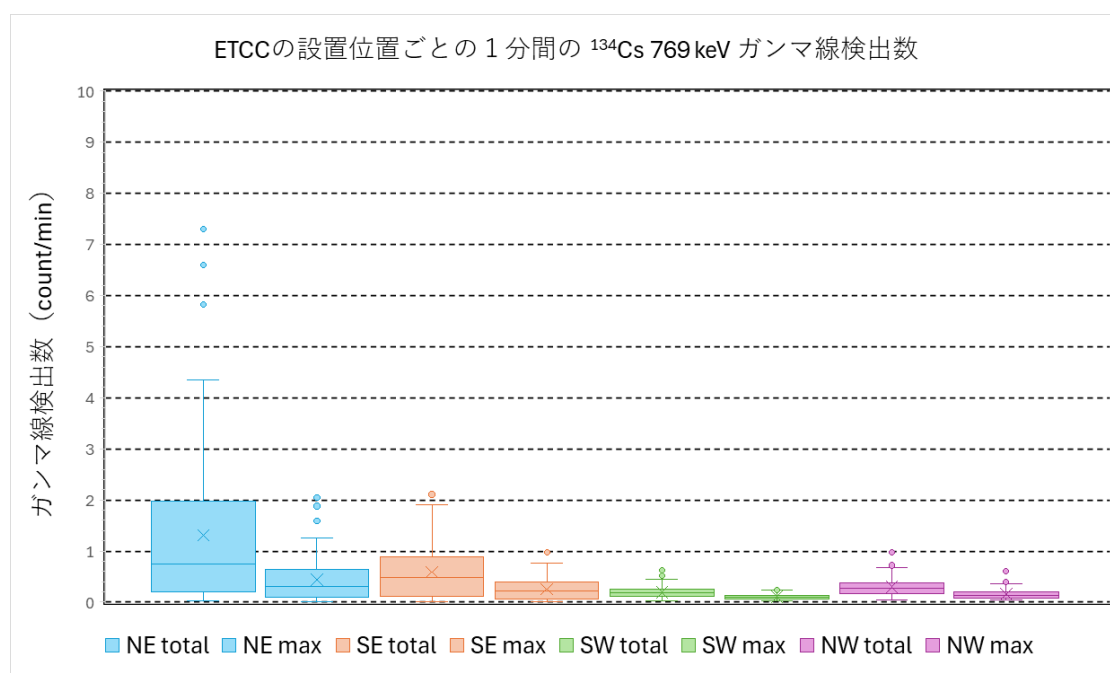


図 B-10 2号機建屋上面からの¹³⁴Csの放出率 1.0×10^{10} Bq/sの1分間放出に対して600 m四方領域の4隅に設置したETCCの1分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件108ケースでの値の箱ひげ図

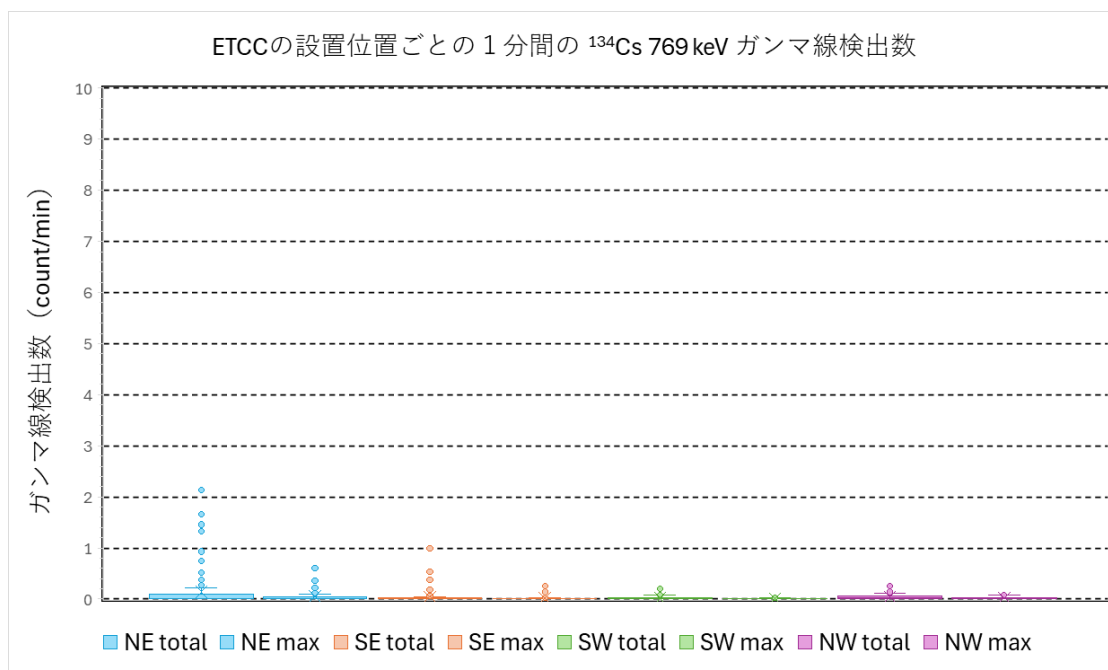


図 B-11 2号機建屋北面からの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/sの1分間放出に対して600 m 四方領域の4隅に設置したETCCの1分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件108ケースでの値の箱ひげ図

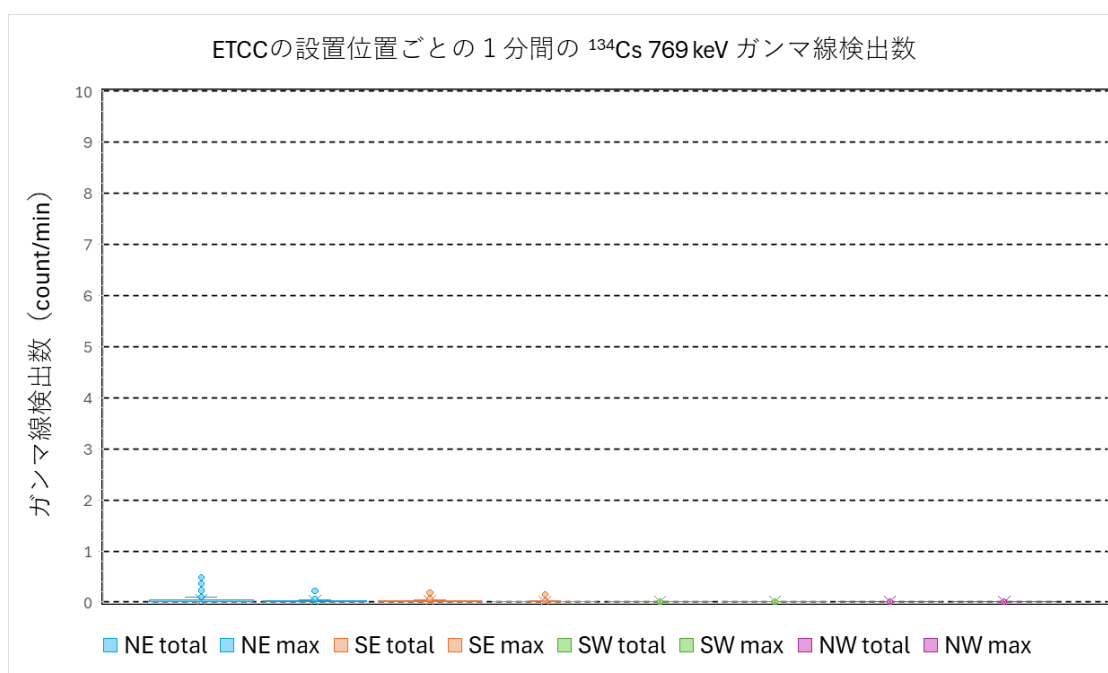


図 B-12 2号機建屋東面からの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/sの1分間放出に対して600 m 四方領域の4隅に設置したETCCの1分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件108ケースでの値の箱ひげ図

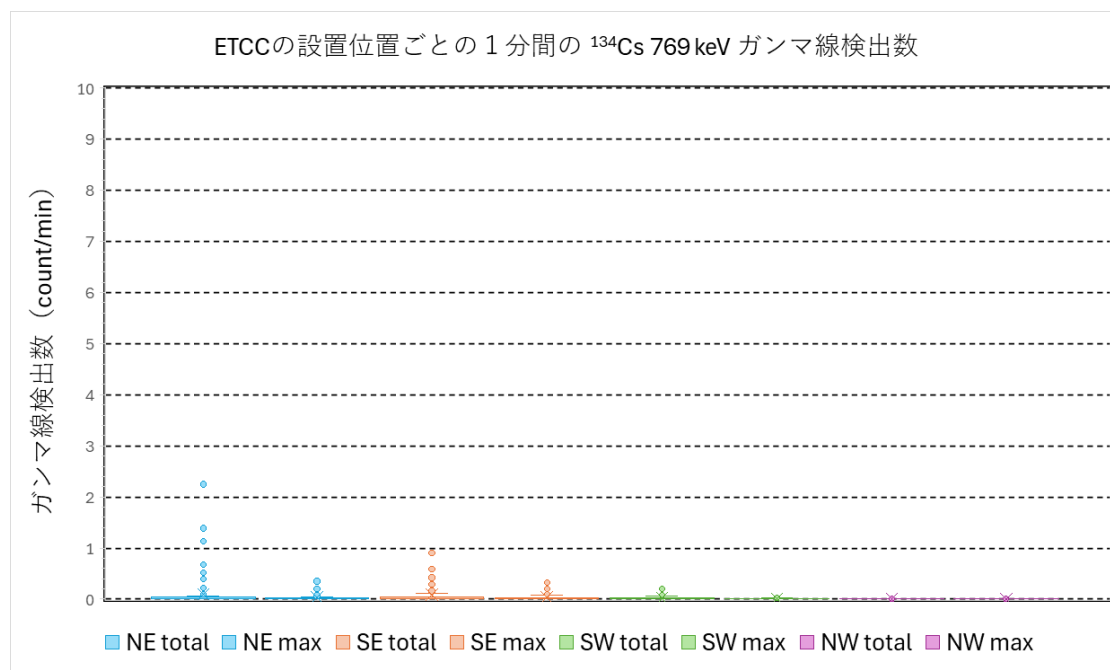


図 B-13 2号機建屋南面からの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/sの1分間放出に対して600 m 四方領域の4隅に設置したETCCの1分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件108ケースでの値の箱ひげ図

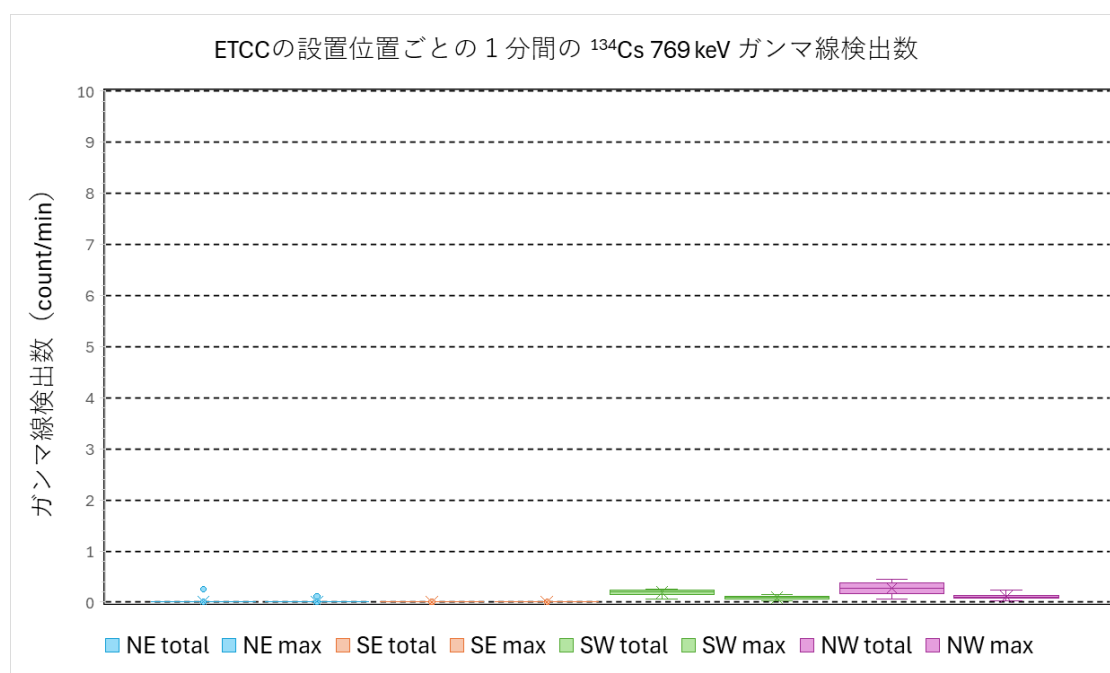


図 B-14 2号機建屋西面からの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/sの1分間放出に対して600 m 四方領域の4隅に設置したETCCの1分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件108ケースでの値の箱ひげ図

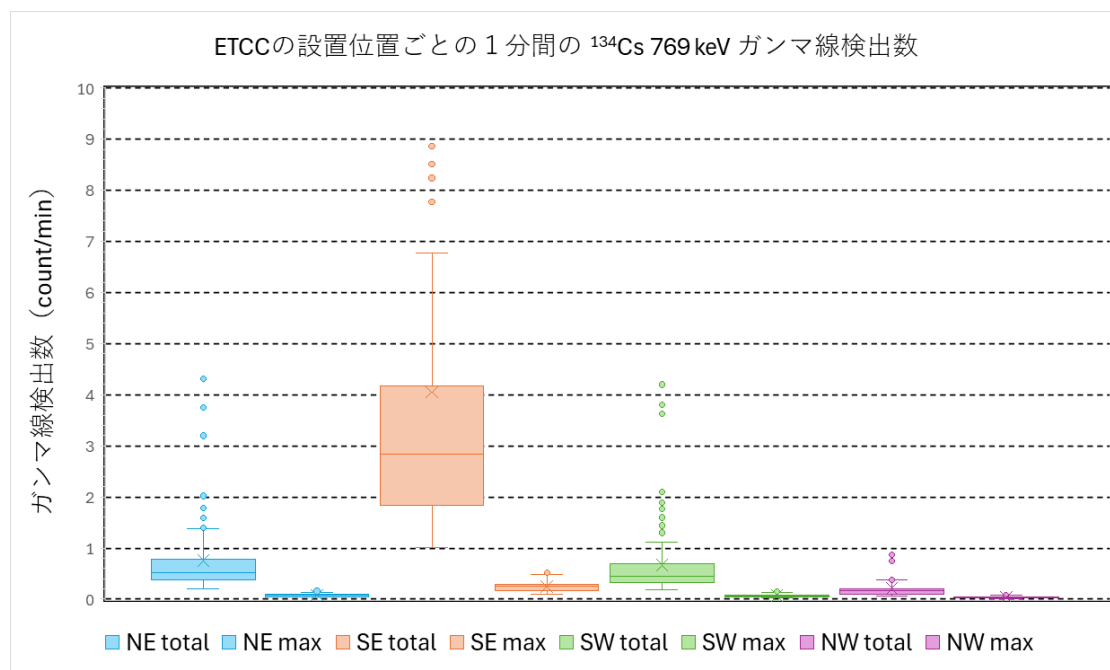


図 B-15 3号機爆発による¹³⁴Csの放出率 1.0×10^{10} Bq/sの1分間放出に対して600 m四方領域の4隅に設置したETCCの1分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件108ケースでの値の箱ひげ図

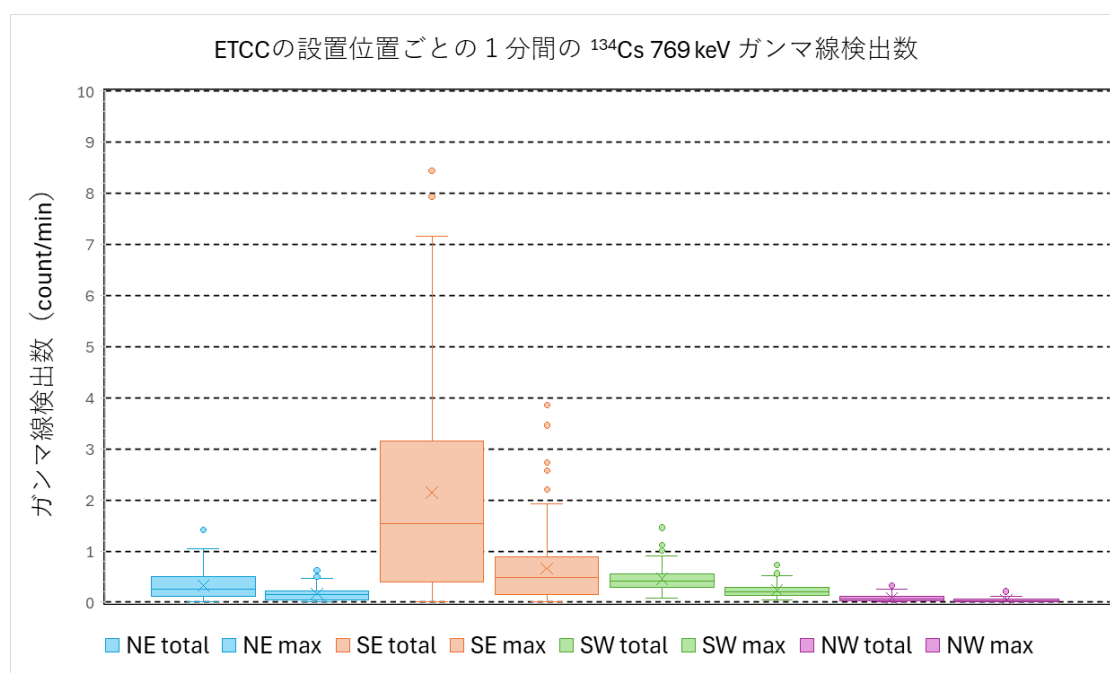


図 B-16 3号機建屋上面からの¹³⁴Csの放出率 1.0×10^{10} Bq/sの1分間放出に対して600 m四方領域の4隅に設置したETCCの1分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件108ケースでの値の箱ひげ図

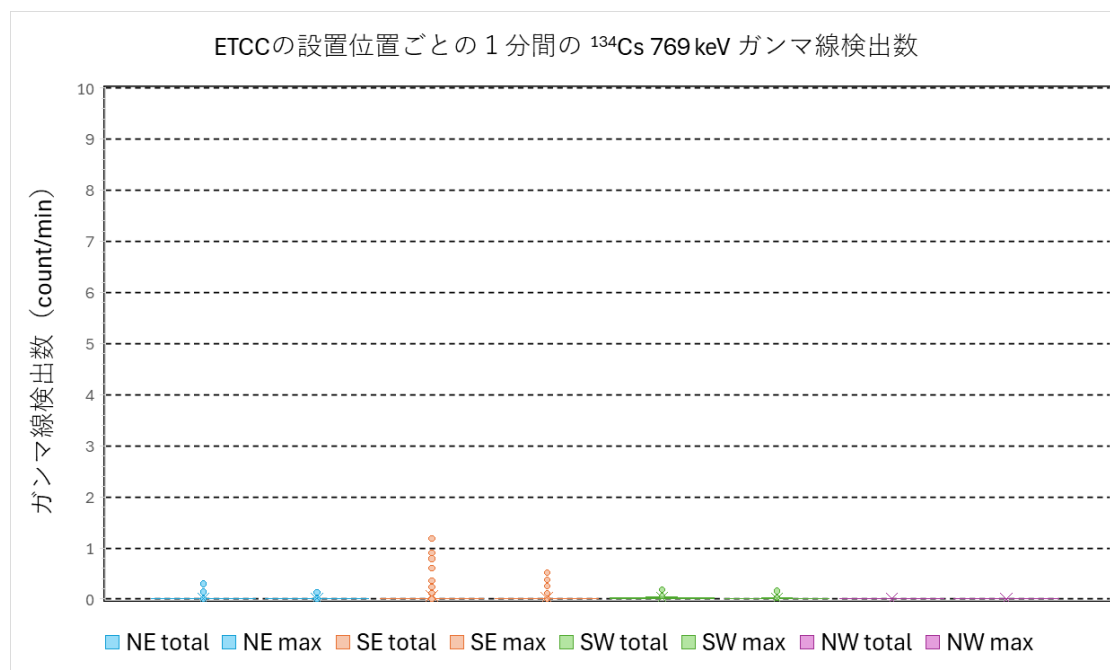


図 B-17 3号機建屋北面からの¹³⁴Csの放出率 1.0×10^{10} Bq/sの1分間放出に対して600 m四方領域の4隅に設置したETCCの1分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件108ケースでの値の箱ひげ図

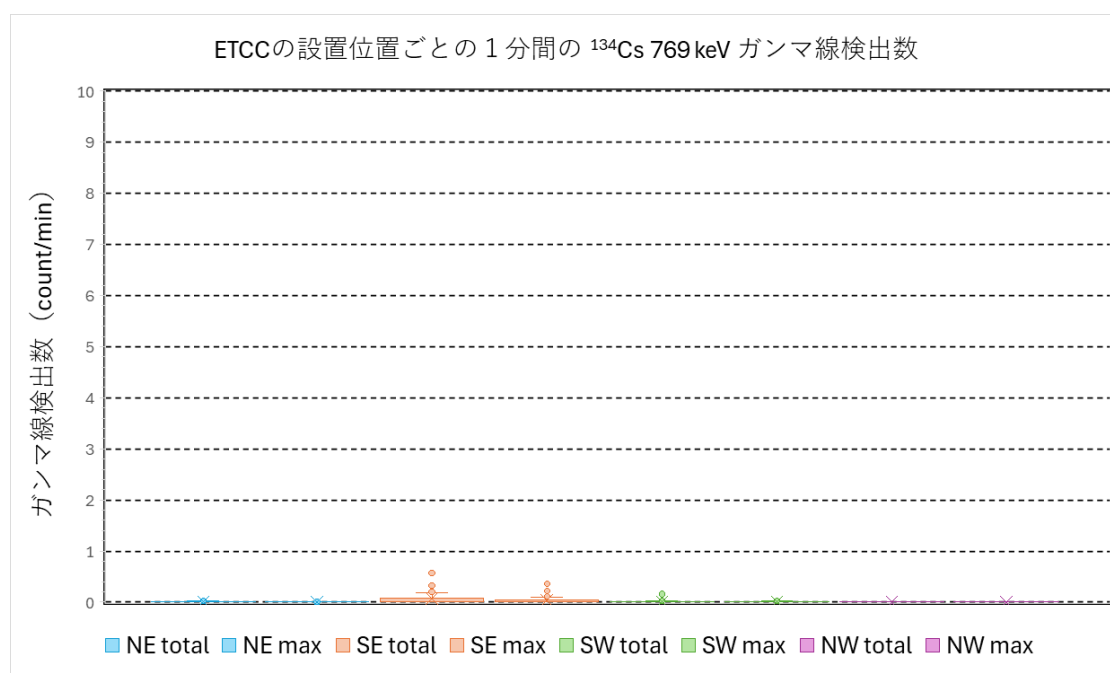


図 B-18 3号機建屋東面からの¹³⁴Csの放出率 1.0×10^{10} Bq/sの1分間放出に対して600 m四方領域の4隅に設置したETCCの1分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件108ケースでの値の箱ひげ図

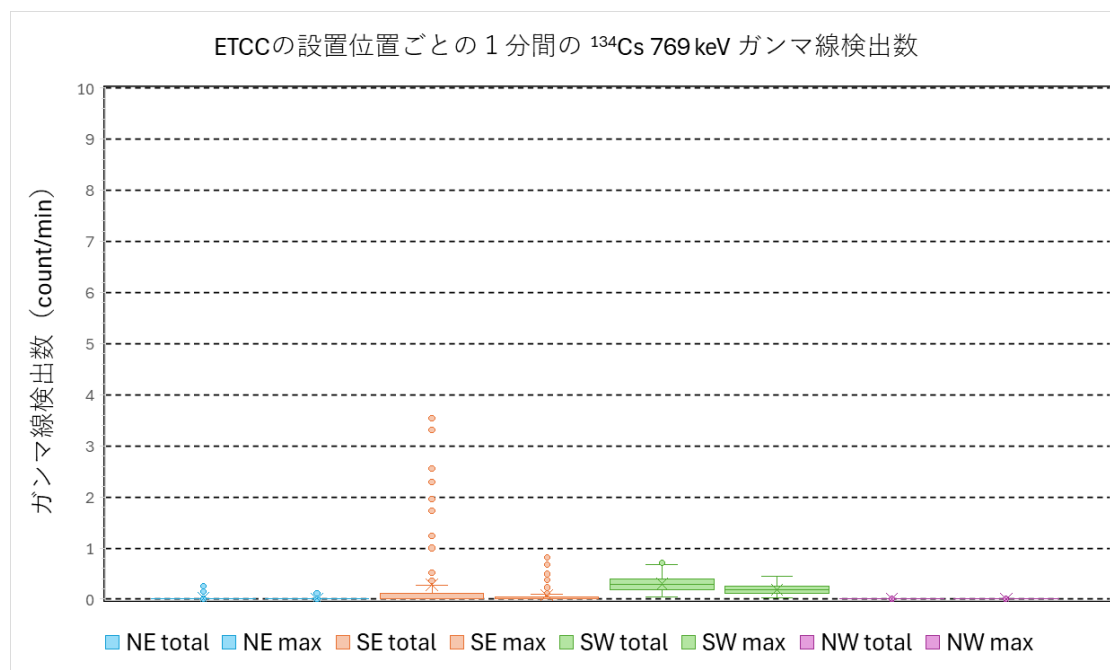


図 B-19 3号機建屋南面からの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/s の 1 分間放出に対して 600 m 四方領域の 4 隅に設置した ETCC の 1 分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件 108 ケースでの値の箱ひげ図

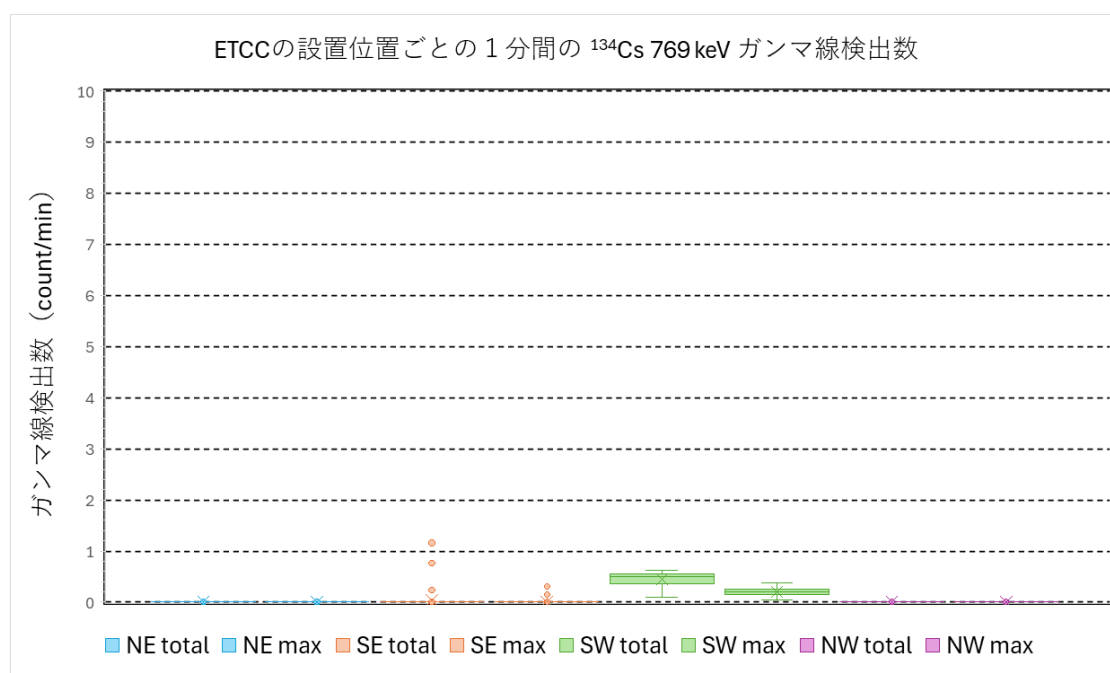


図 B-20 3号機建屋西面からの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/s の 1 分間放出に対して 600 m 四方領域の 4 隅に設置した ETCC の 1 分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件 108 ケースでの値の箱ひげ図

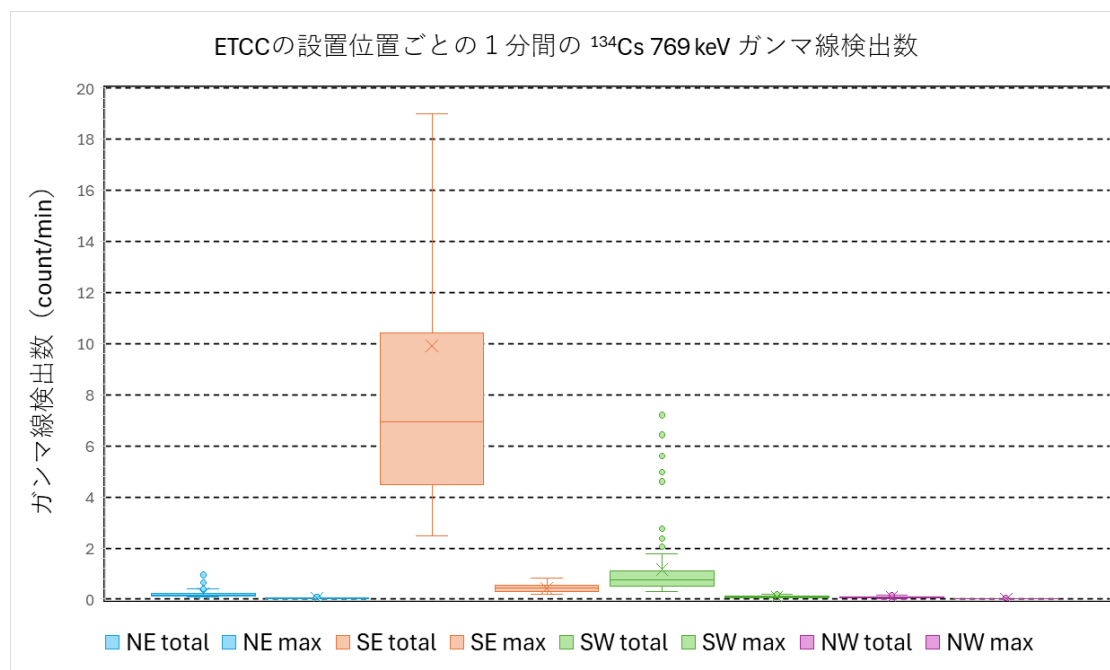


図 B-21 4号機爆発による¹³⁴Csの放出率 1.0×10^{10} Bq/sの1分間放出に対して600 m四方領域の4隅に設置したETCCの1分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件108ケースでの値の箱ひげ図

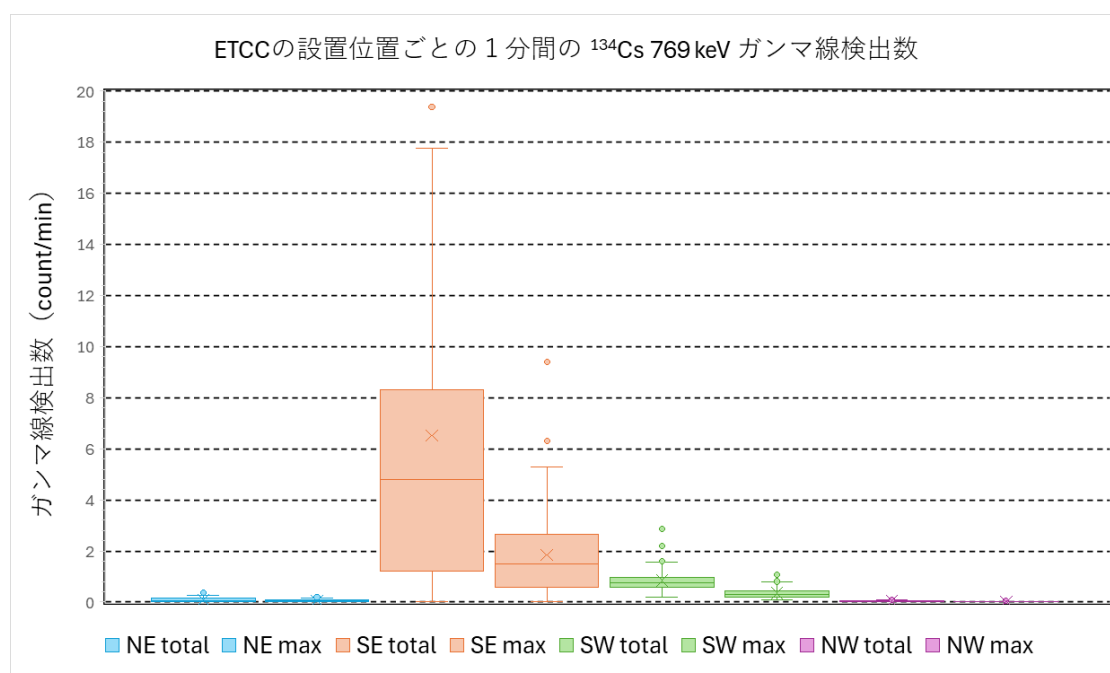


図 B-22 4号機建屋上面からの¹³⁴Csの放出率 1.0×10^{10} Bq/sの1分間放出に対して600 m四方領域の4隅に設置したETCCの1分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件108ケースでの値の箱ひげ図

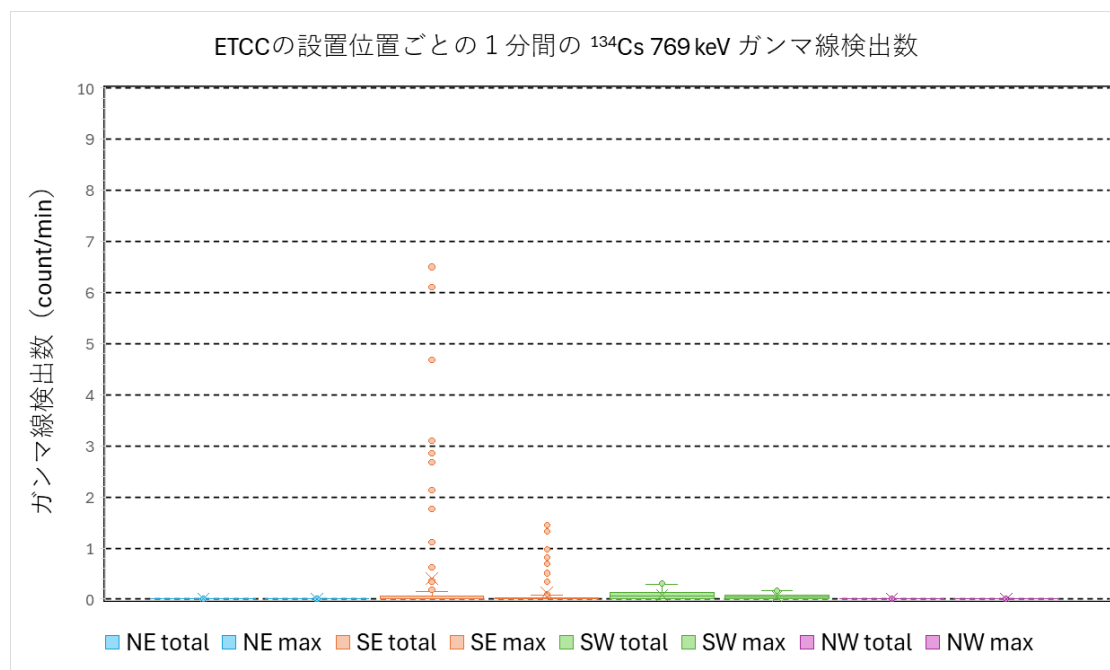


図 B-23 4号機建屋北面からの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/s の 1 分間放出に対して 600 m 四方領域の 4 隅に設置した ETCC の 1 分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件 108 ケースでの値の箱ひげ図

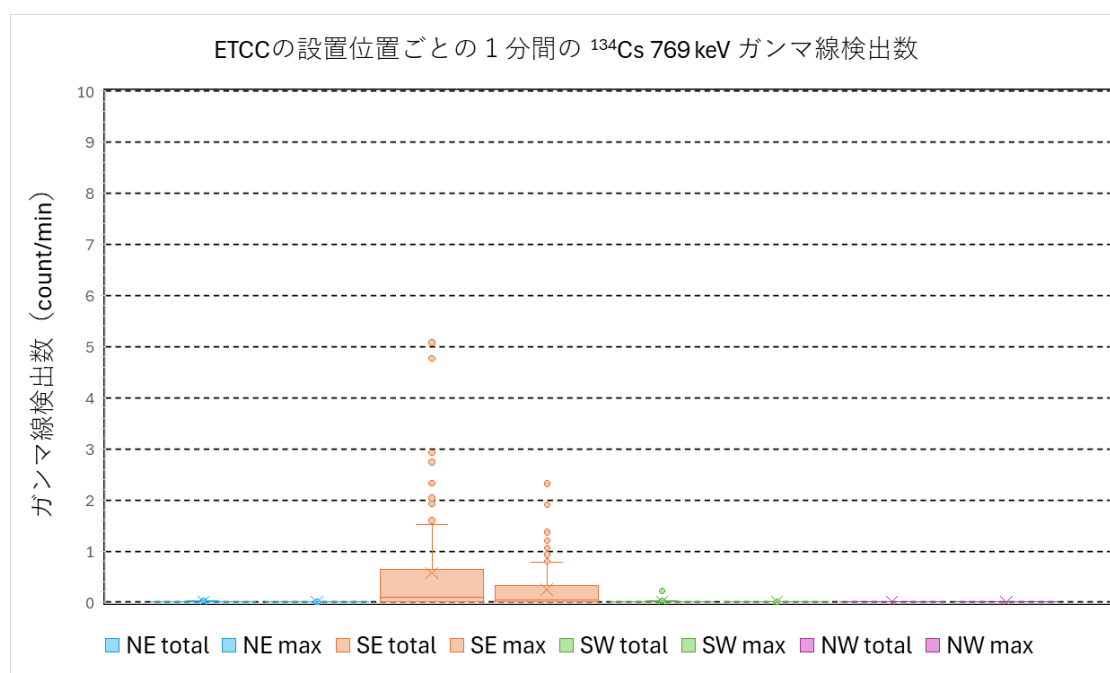


図 B-24 4号機建屋東面からの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/s の 1 分間放出に対して 600 m 四方領域の 4 隅に設置した ETCC の 1 分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件 108 ケースでの値の箱ひげ図

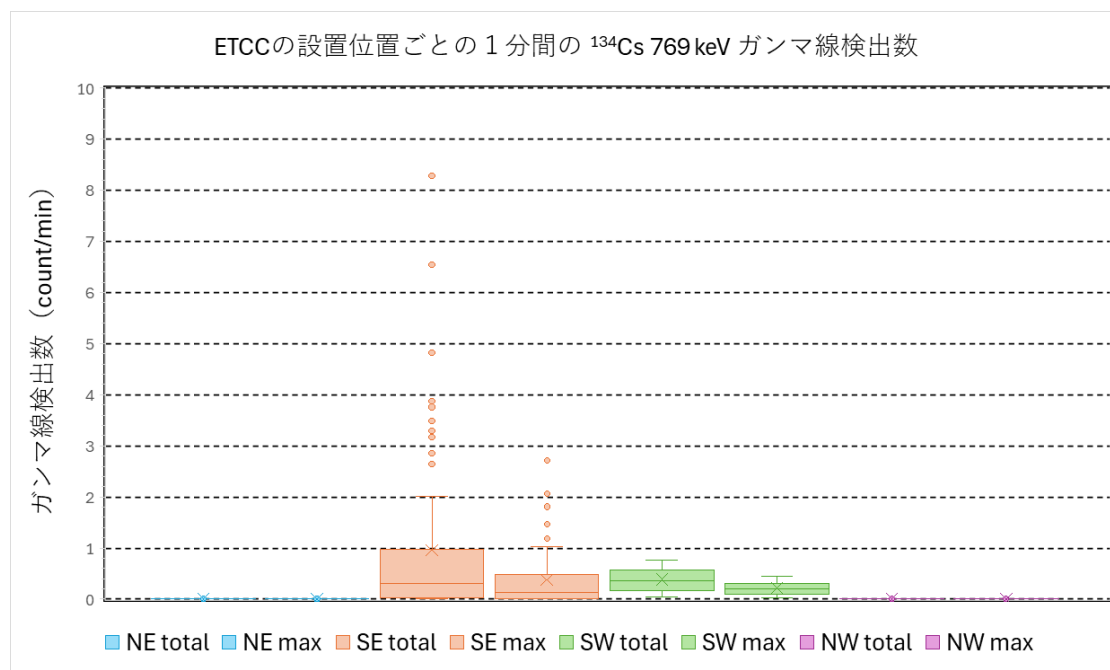


図 B-25 4号機建屋南面からの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/s の 1 分間放出に対して 600 m 四方領域の 4 隅に設置した ETCC の 1 分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件 108 ケースでの値の箱ひげ図

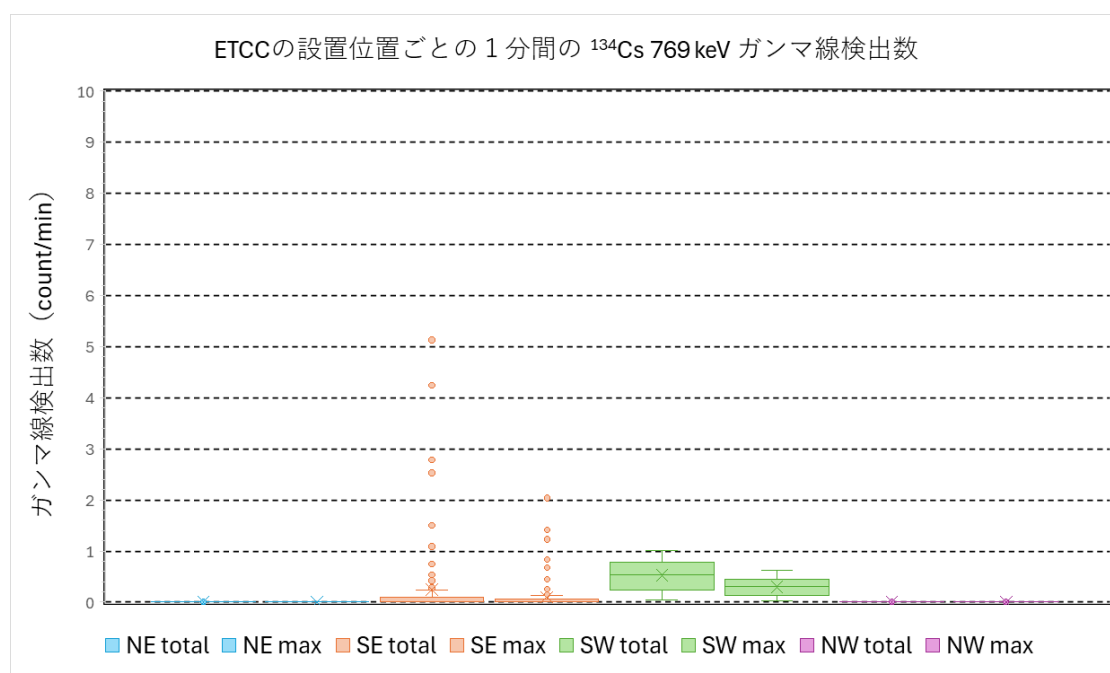


図 B-26 4号機建屋西面からの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/s の 1 分間放出に対して 600 m 四方領域の 4 隅に設置した ETCC の 1 分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件 108 ケースでの値の箱ひげ図

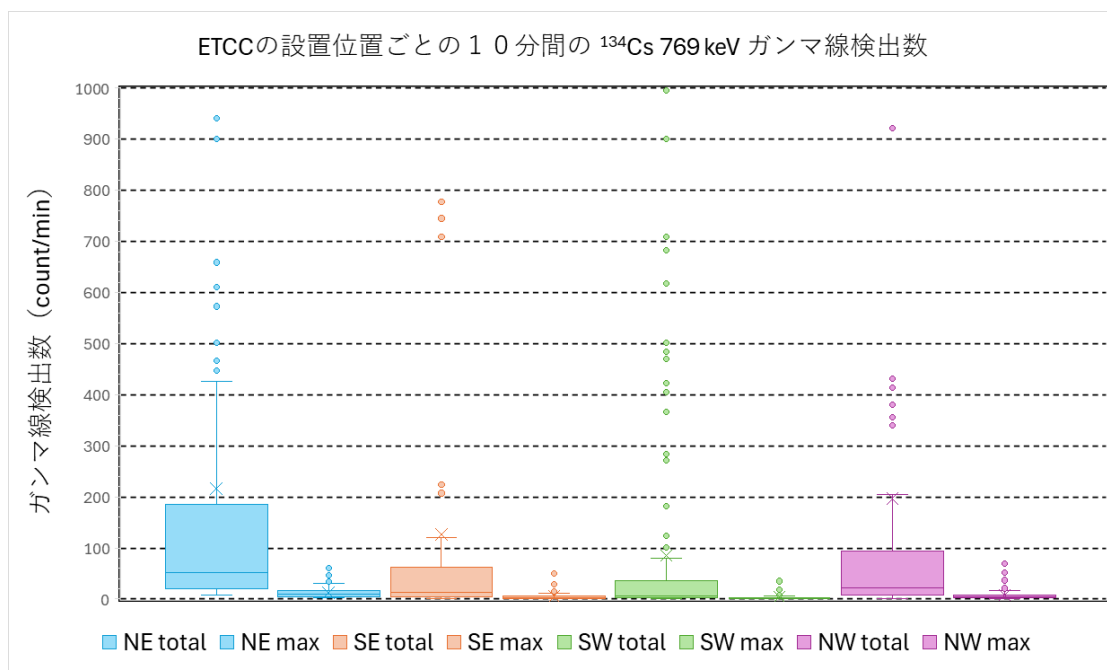


図 B-27 1, 2号機供用スタックからの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/sの10分間放出に対して600 m四方領域の4隅に設置したETCCの10分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件108ケースでの値の箱ひげ図

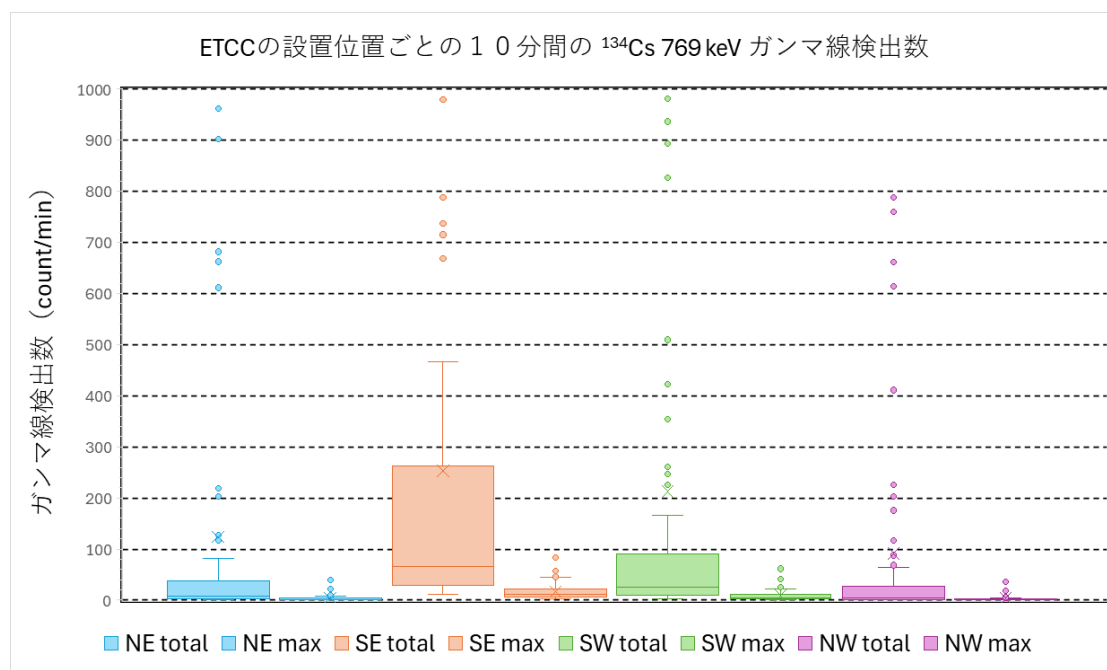


図 B-28 3, 4号機供用スタックからの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/sの10分間放出に対して600 m四方領域の4隅に設置したETCCの10分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件108ケースでの値の箱ひげ図

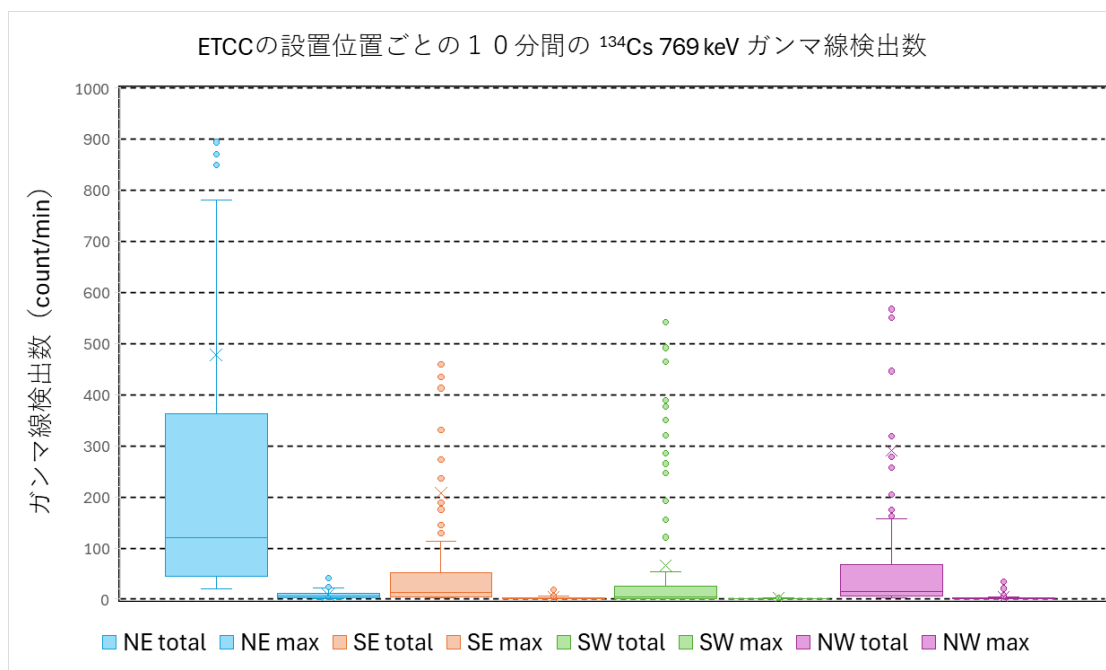


図 B-29 1号機爆発による ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/sの10分間放出に対して600 m四方領域の4隅に設置したETCCの10分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件108ケースでの値の箱ひげ図

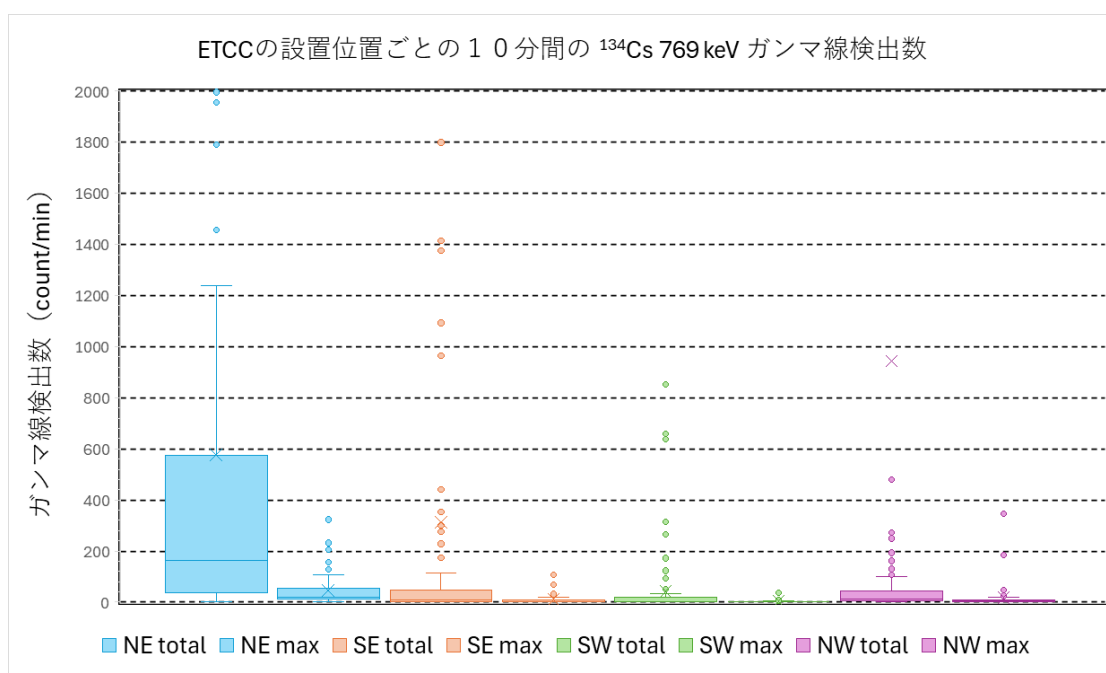


図 B-30 1号機建屋上面からの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/sの10分間放出に対して600 m四方領域の4隅に設置したETCCの10分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件108ケースでの値の箱ひげ図

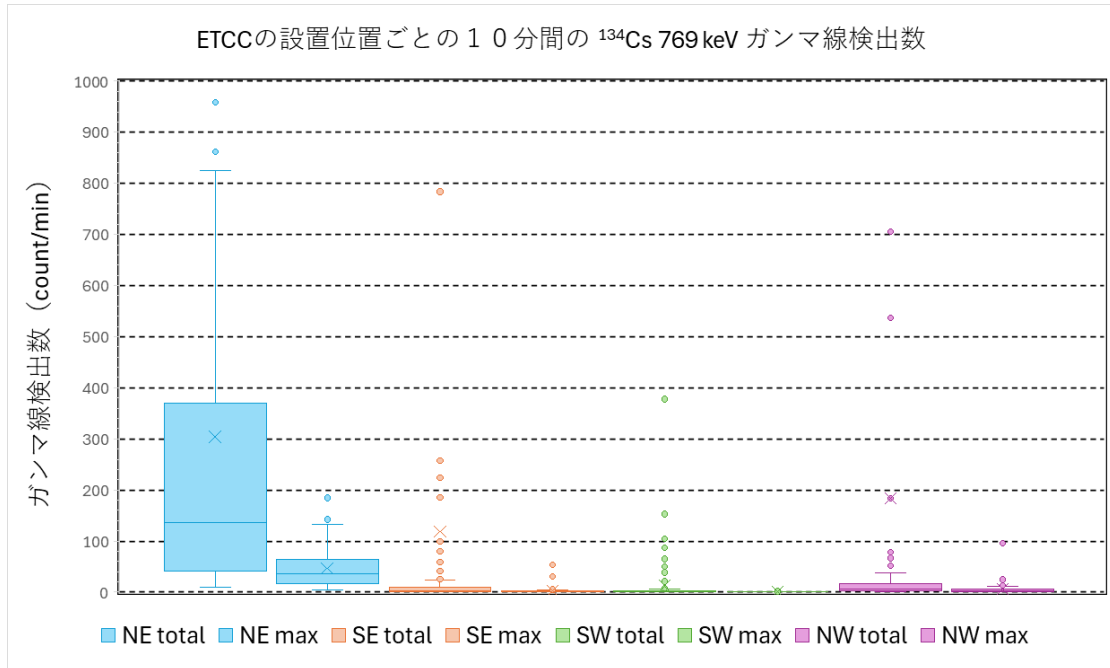


図 B-31 1号機建屋北面からの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/sの10分間放出に対して600 m四方領域の4隅に設置したETCCの10分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件108ケースでの値の箱ひげ図

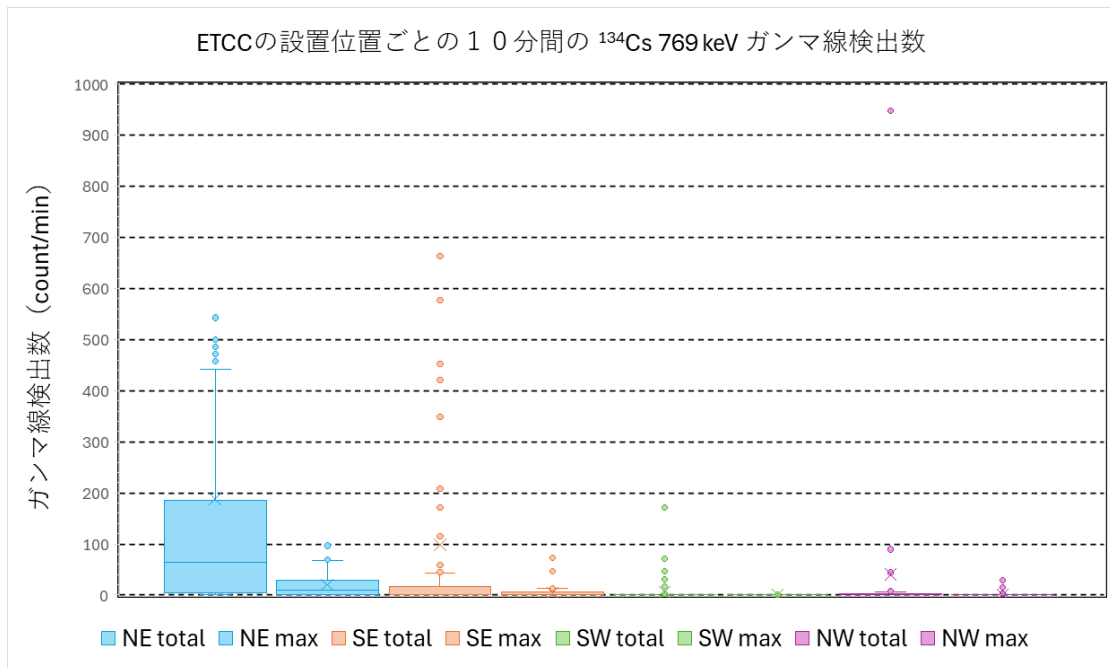


図 B-32 1号機建屋東面からの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/sの10分間放出に対して600 m四方領域の4隅に設置したETCCの10分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件108ケースでの値の箱ひげ図

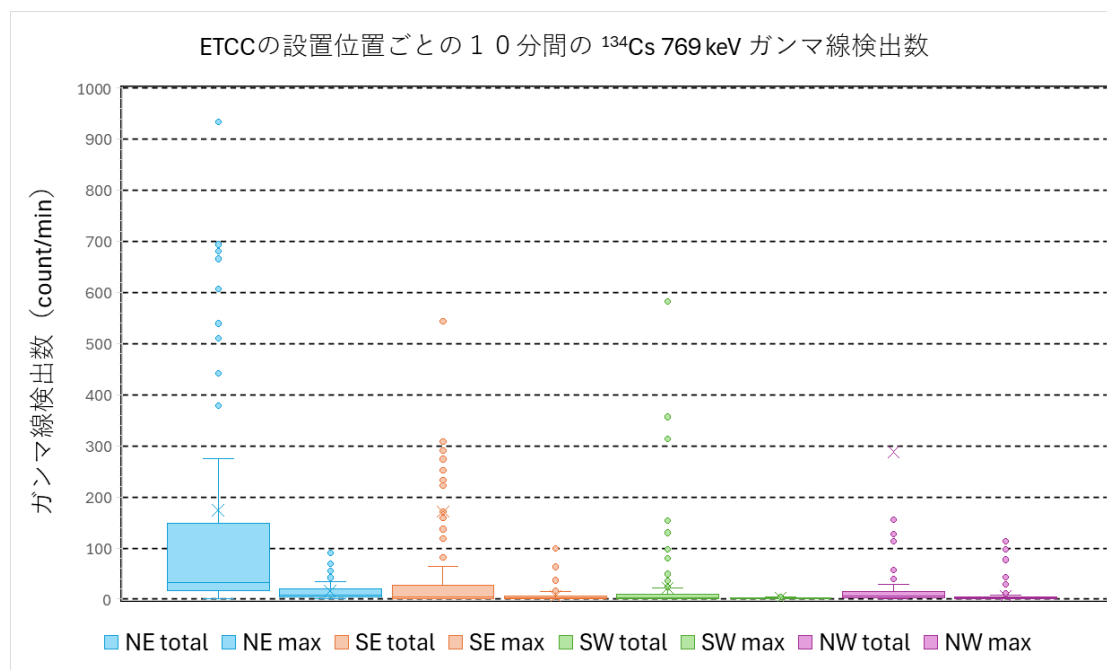


図 B-33 1号機建屋南面からの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/sの10分間放出に対して600 m四方領域の4隅に設置したETCCの10分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件108ケースでの値の箱ひげ図

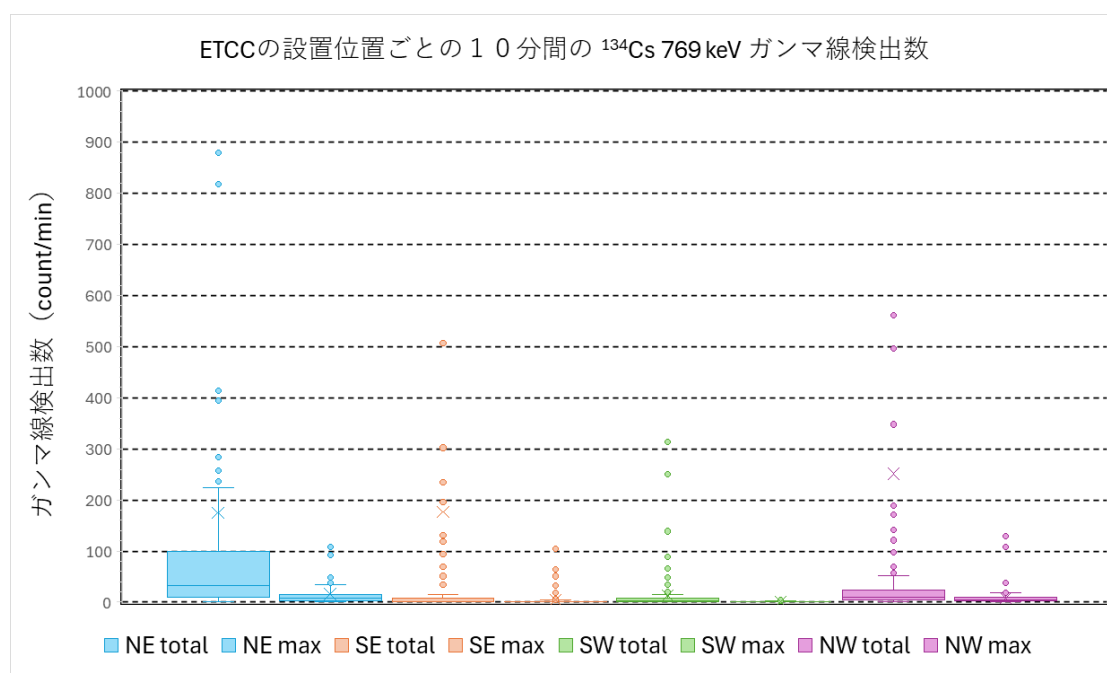


図 B-34 1号機建屋西面からの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/sの10分間放出に対して600 m四方領域の4隅に設置したETCCの10分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件108ケースでの値の箱ひげ図

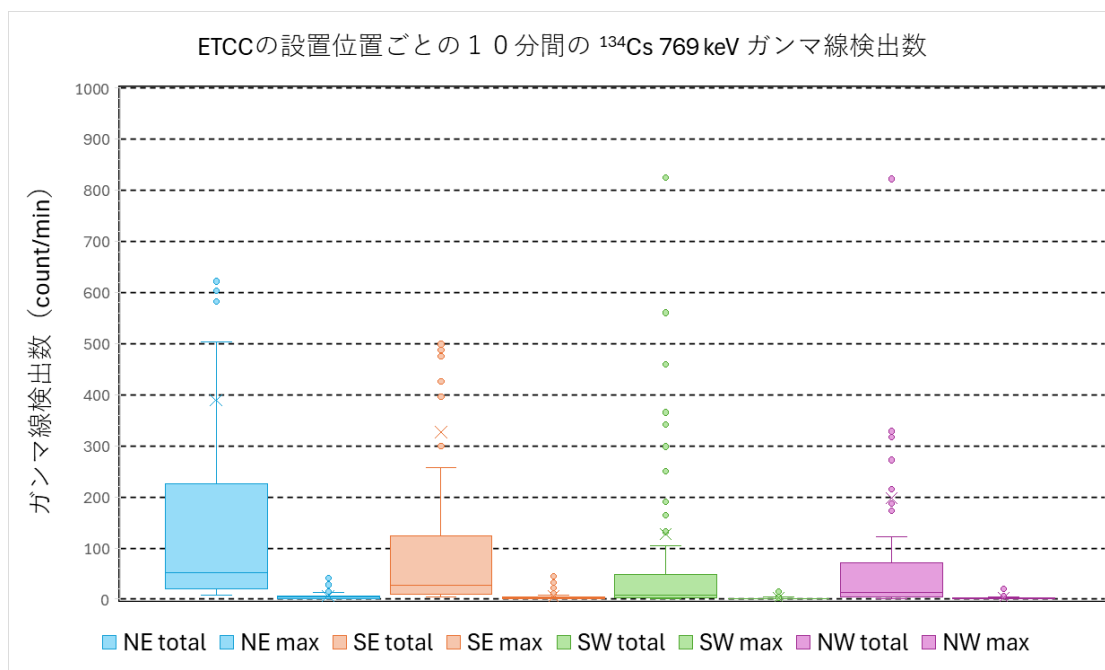


図 B-35 2号機爆発による ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/sの10分間放出に対して600 m四方領域の4隅に設置したETCCの10分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件108ケースでの値の箱ひげ図

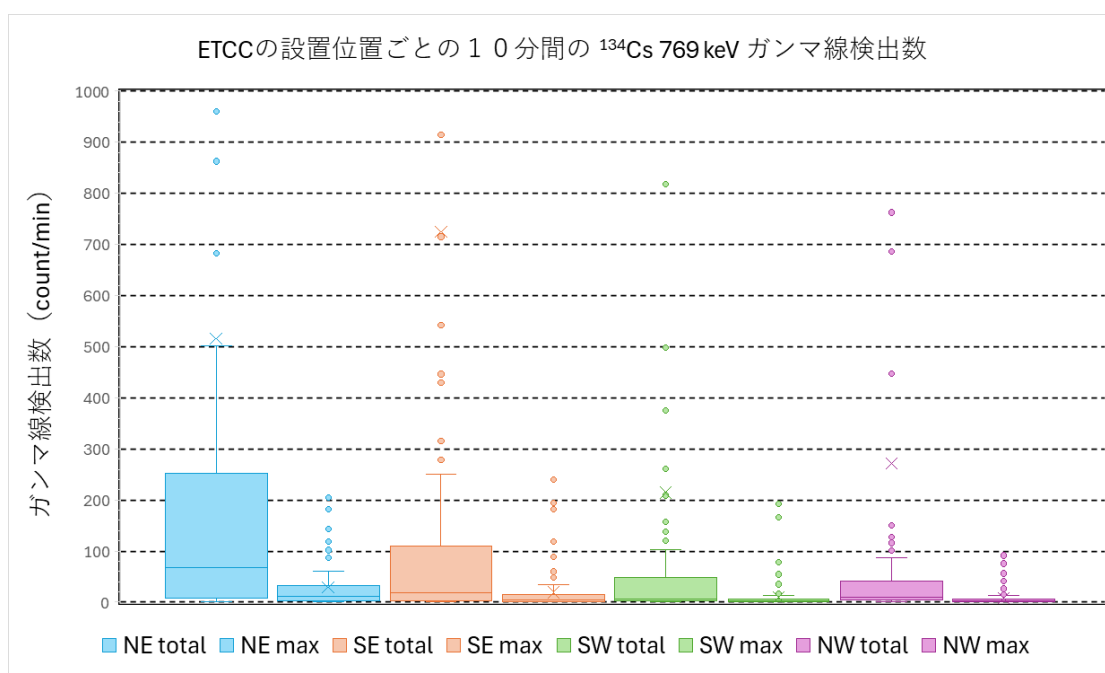


図 B-36 2号機建屋上面からの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/sの10分間放出に対して600 m四方領域の4隅に設置したETCCの10分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件108ケースでの値の箱ひげ図

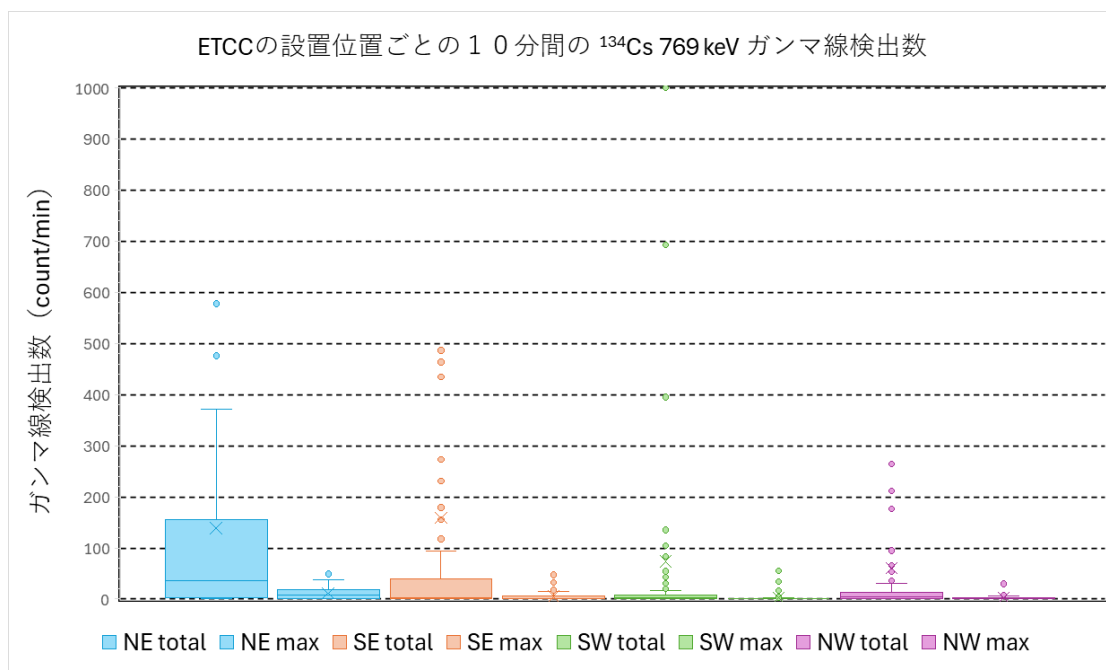


図 B-37 2号機建屋北面からの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/sの10分間放出に対して600 m 四方領域の4隅に設置したETCCの10分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件108ケースでの値の箱ひげ図

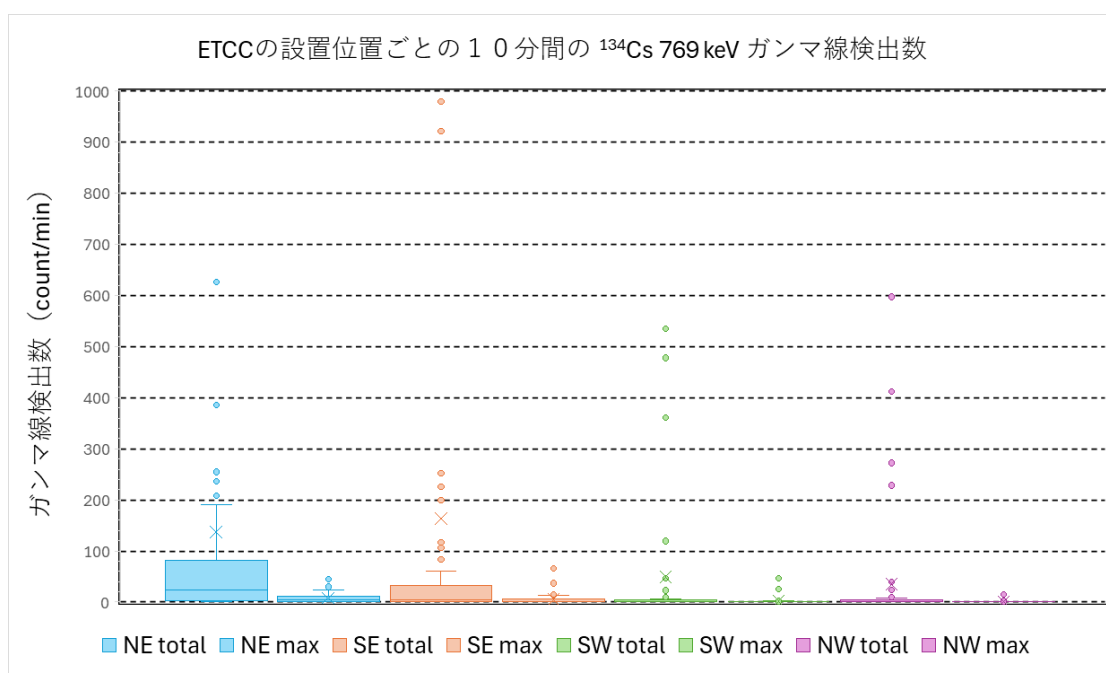


図 B-38 2号機建屋東面からの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/sの10分間放出に対して600 m 四方領域の4隅に設置したETCCの10分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件108ケースでの値の箱ひげ図

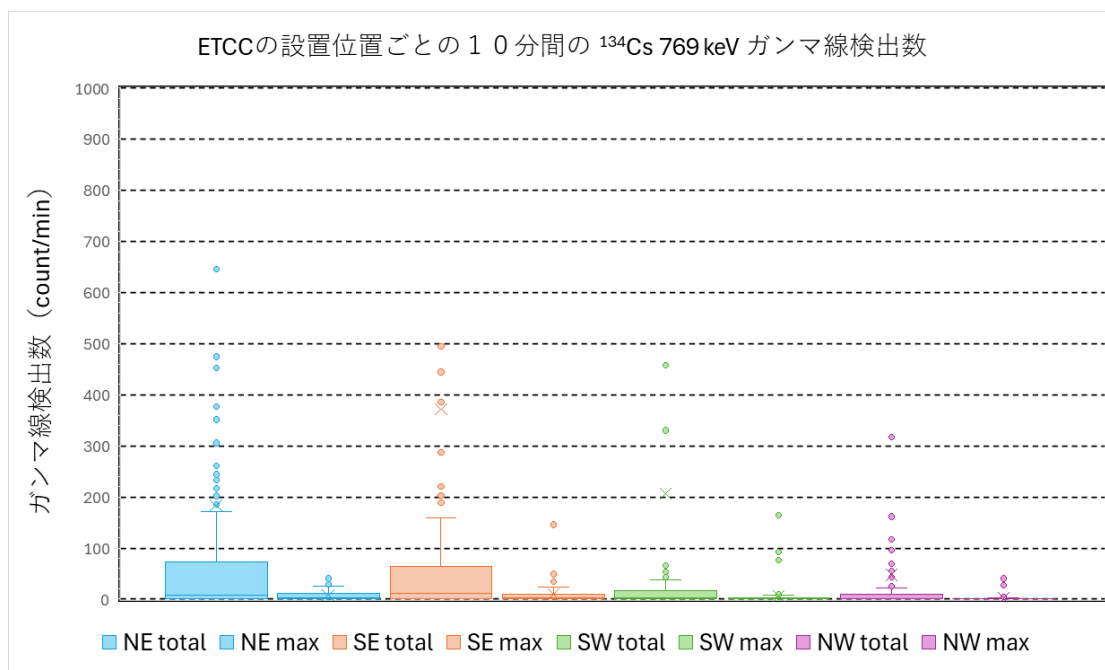


図 B-39 2号機建屋南面からの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/sの10分間放出に対して600 m四方領域の4隅に設置したETCCの10分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件108ケースでの値の箱ひげ図

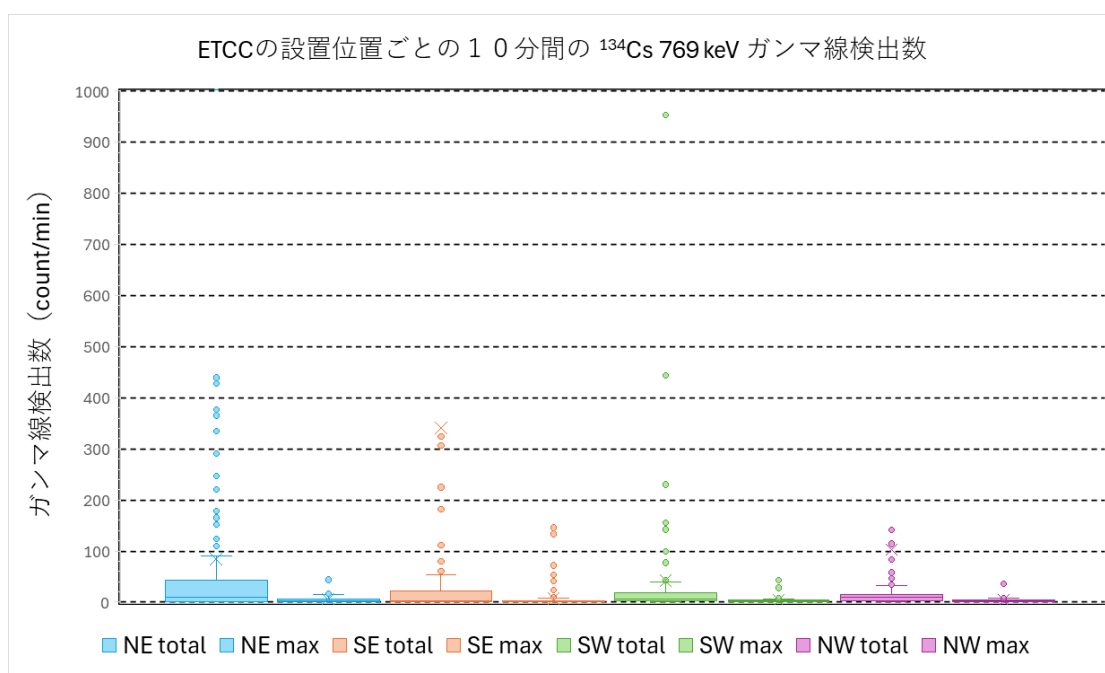


図 B-40 2号機建屋西面からの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/sの10分間放出に対して600 m四方領域の4隅に設置したETCCの10分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件108ケースでの値の箱ひげ図

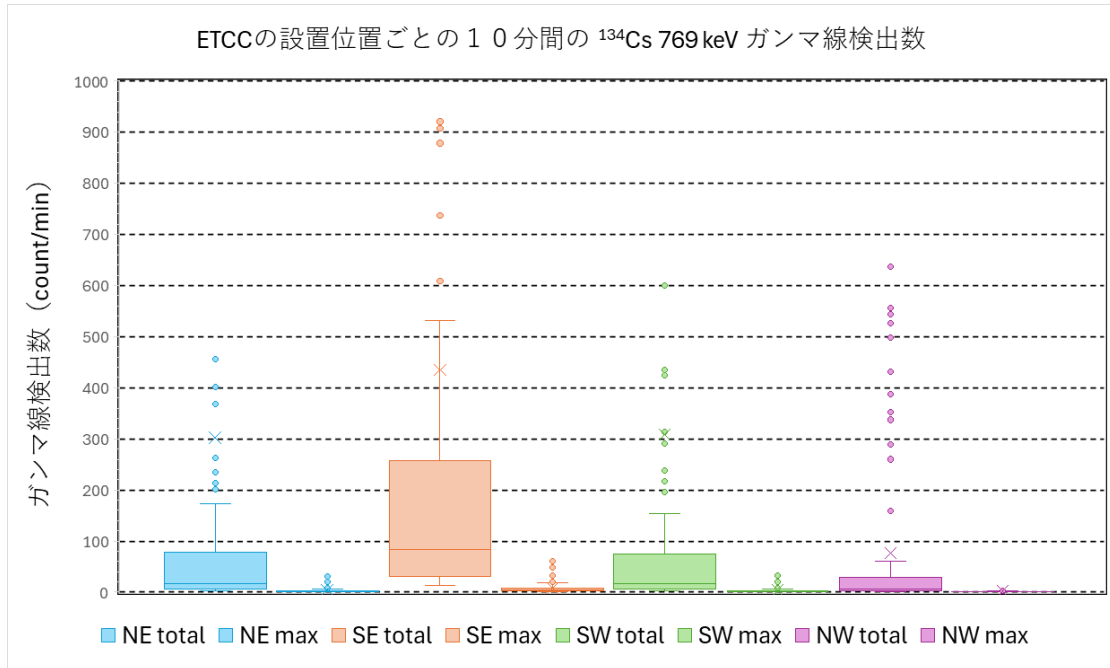


図 B-41 3号機爆発による ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/sの10分間放出に対して600 m四方領域の4隅に設置したETCCの10分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件108ケースでの値の箱ひげ図

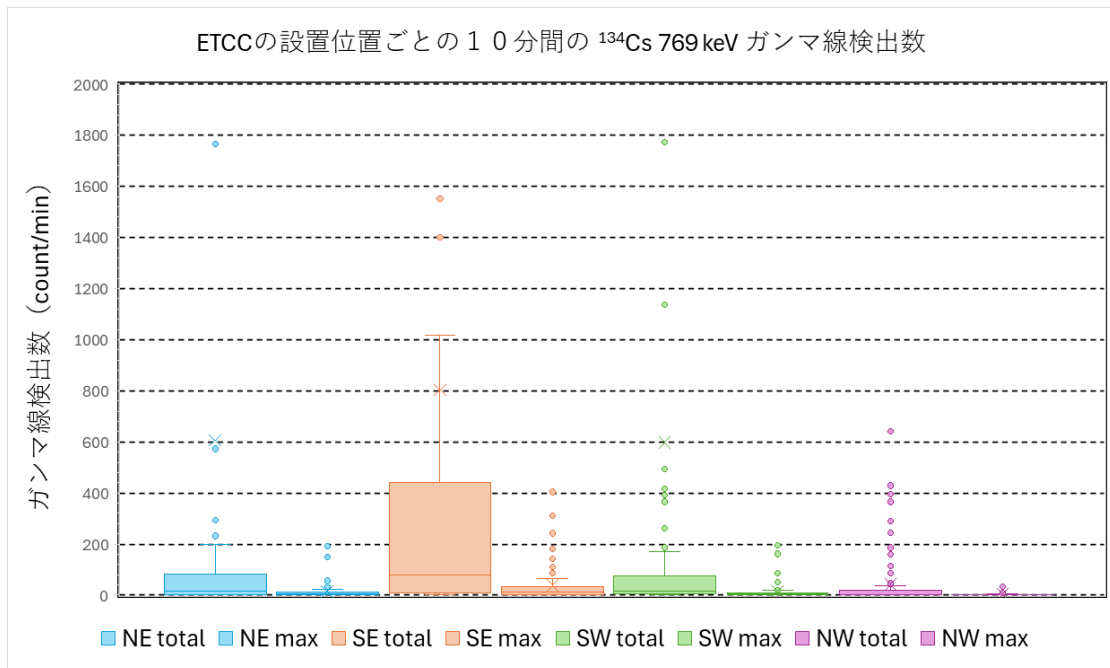


図 B-42 3号機建屋上面からの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/sの10分間放出に対して600 m四方領域の4隅に設置したETCCの10分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件108ケースでの値の箱ひげ図

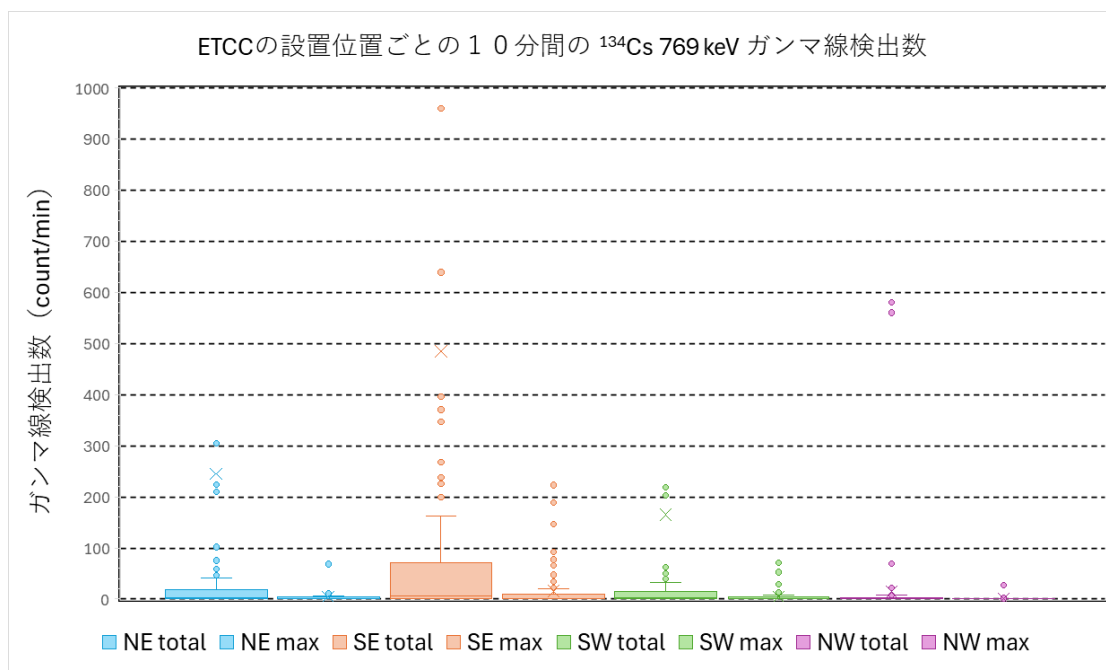


図 B-43 3号機建屋北面からの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/sの10分間放出に対して600 m四方領域の4隅に設置したETCCの10分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件108ケースでの値の箱ひげ図

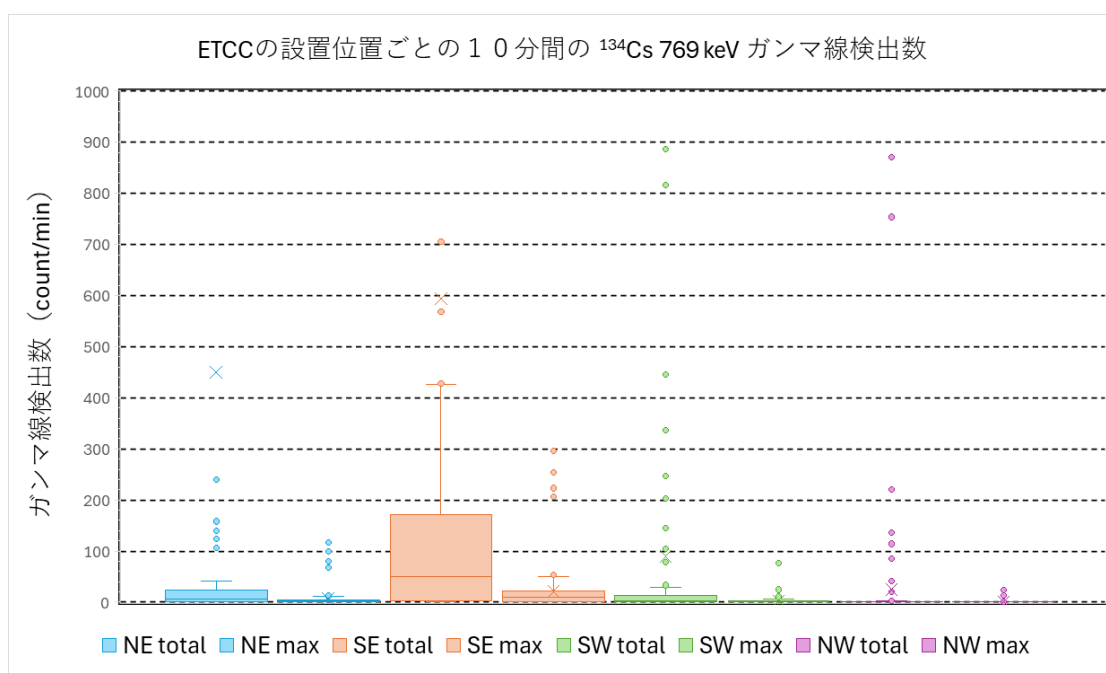


図 B-44 3号機建屋東面からの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/sの10分間放出に対して600 m四方領域の4隅に設置したETCCの10分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件108ケースでの値の箱ひげ図

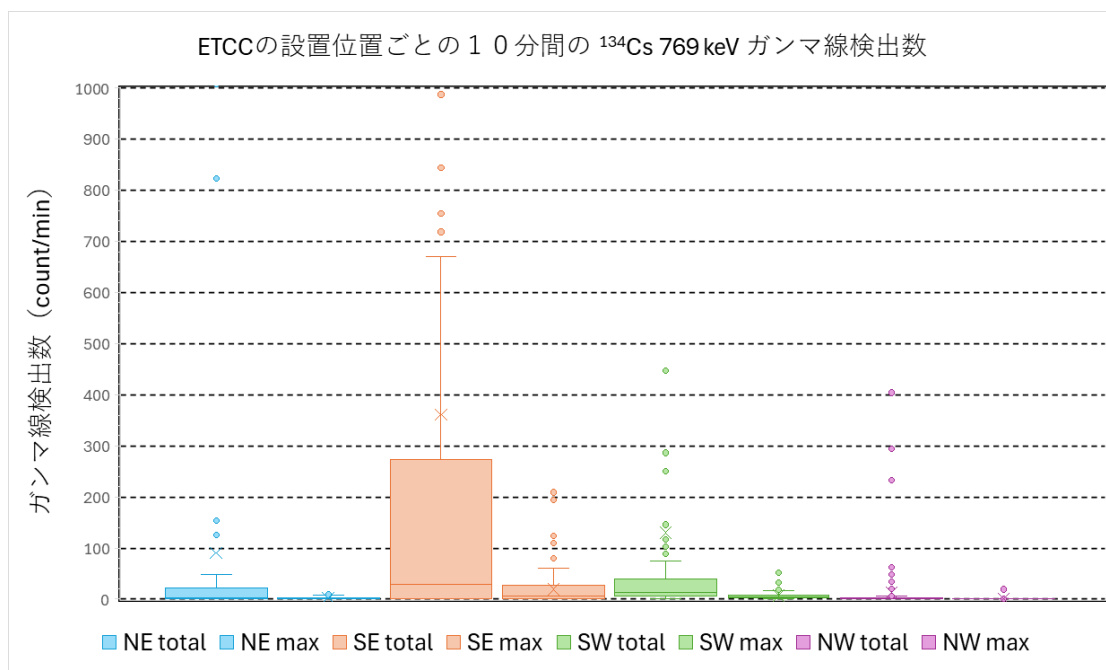


図 B-45 3号機建屋南面からの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/sの10分間放出に対して600 m四方領域の4隅に設置したETCCの10分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件108ケースでの値の箱ひげ図

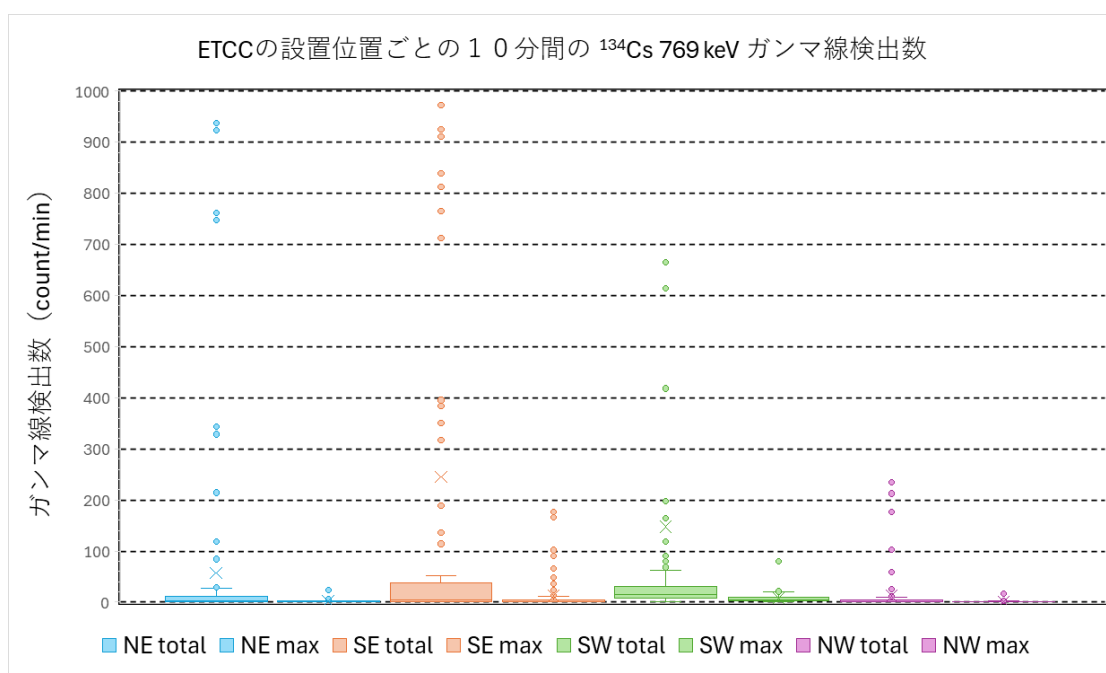


図 B-46 3号機建屋西面からの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/sの10分間放出に対して600 m四方領域の4隅に設置したETCCの10分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件108ケースでの値の箱ひげ図

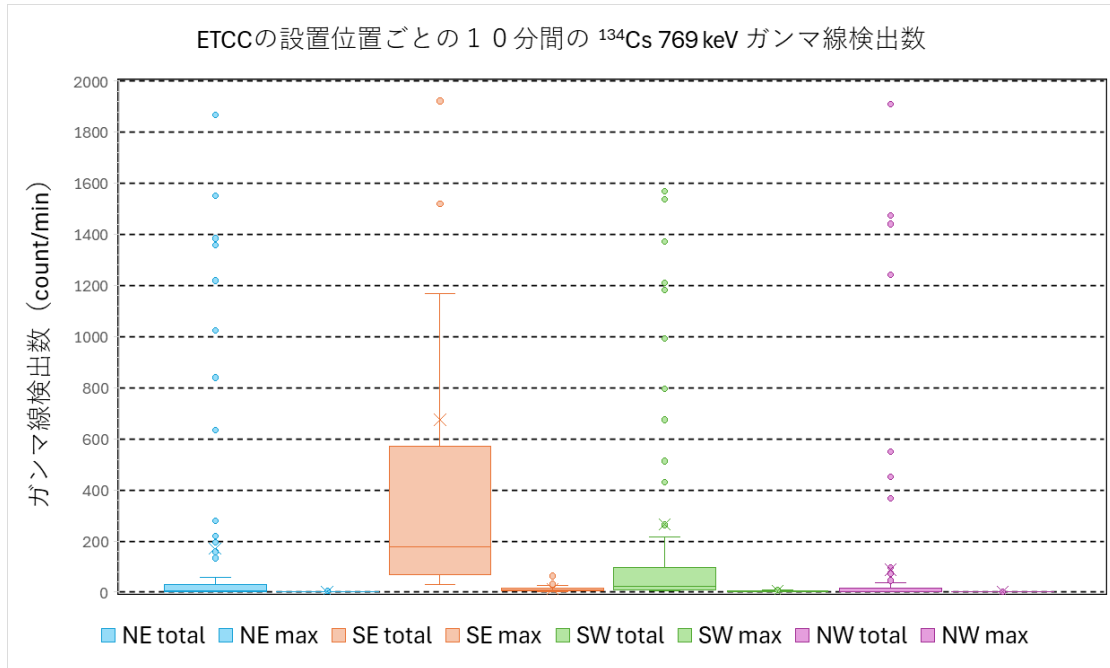


図 B-47 4号機爆発による¹³⁴Csの放出率 1.0×10^{10} Bq/sの10分間放出に対して600 m四方領域の4隅に設置したETCCの10分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件108ケースでの値の箱ひげ図

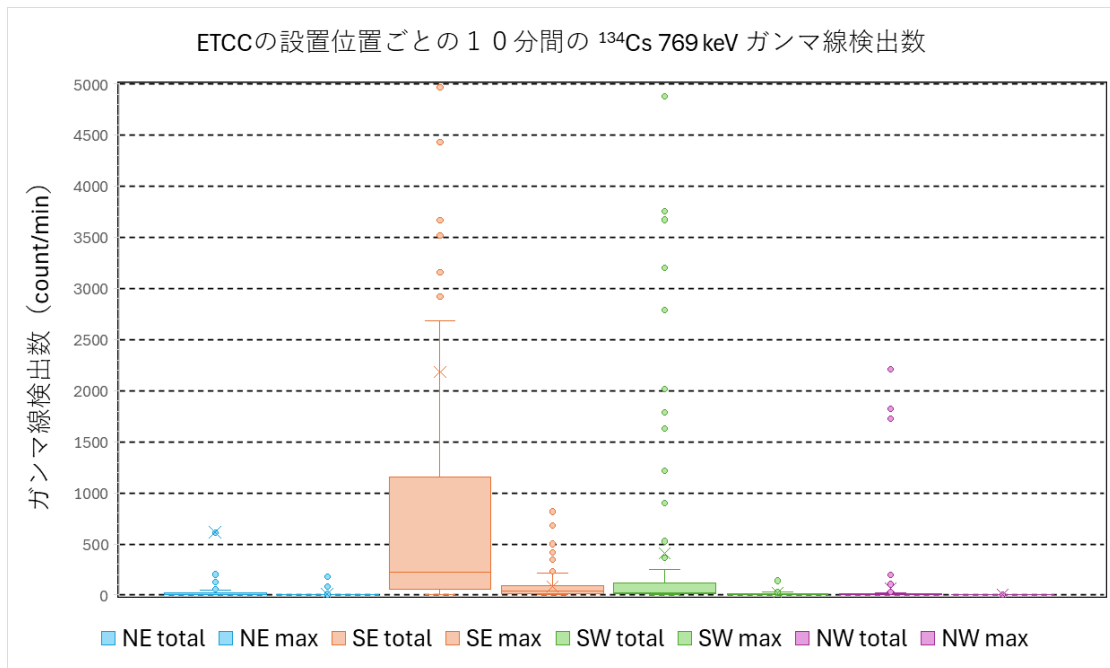


図 B-48 4号機建屋上面からの¹³⁴Csの放出率 1.0×10^{10} Bq/sの10分間放出に対して600 m四方領域の4隅に設置したETCCの10分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件108ケースでの値の箱ひげ図

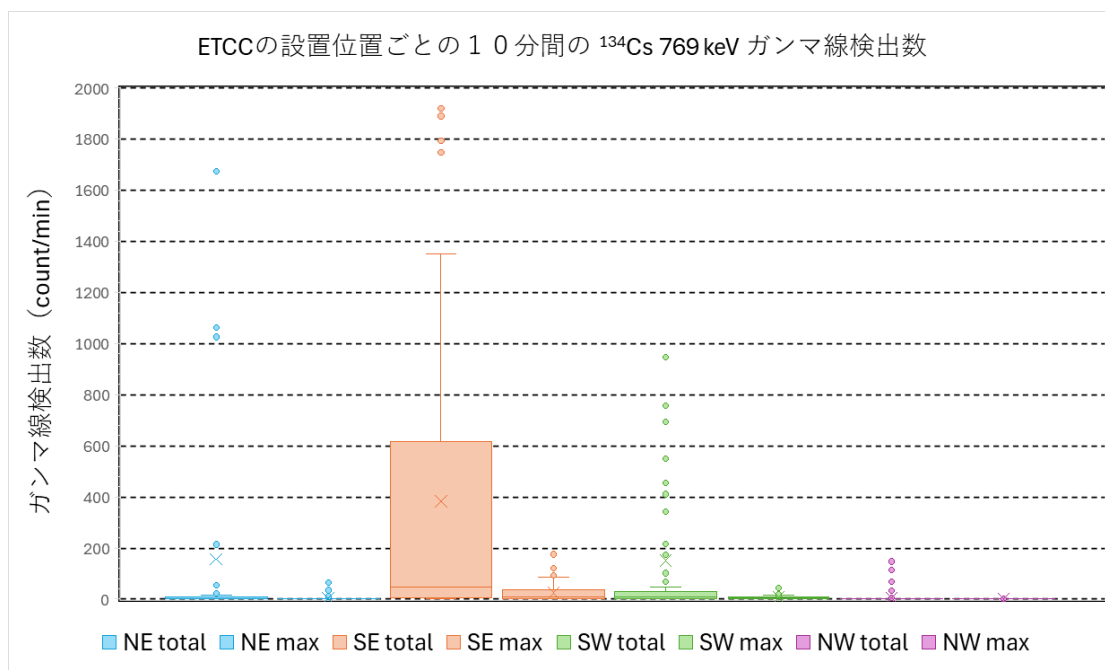


図 B-49 4号機建屋北面からの¹³⁴Csの放出率 1.0×10^{10} Bq/sの10分間放出に対して600 m四方領域の4隅に設置したETCCの10分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件108ケースでの値の箱ひげ図

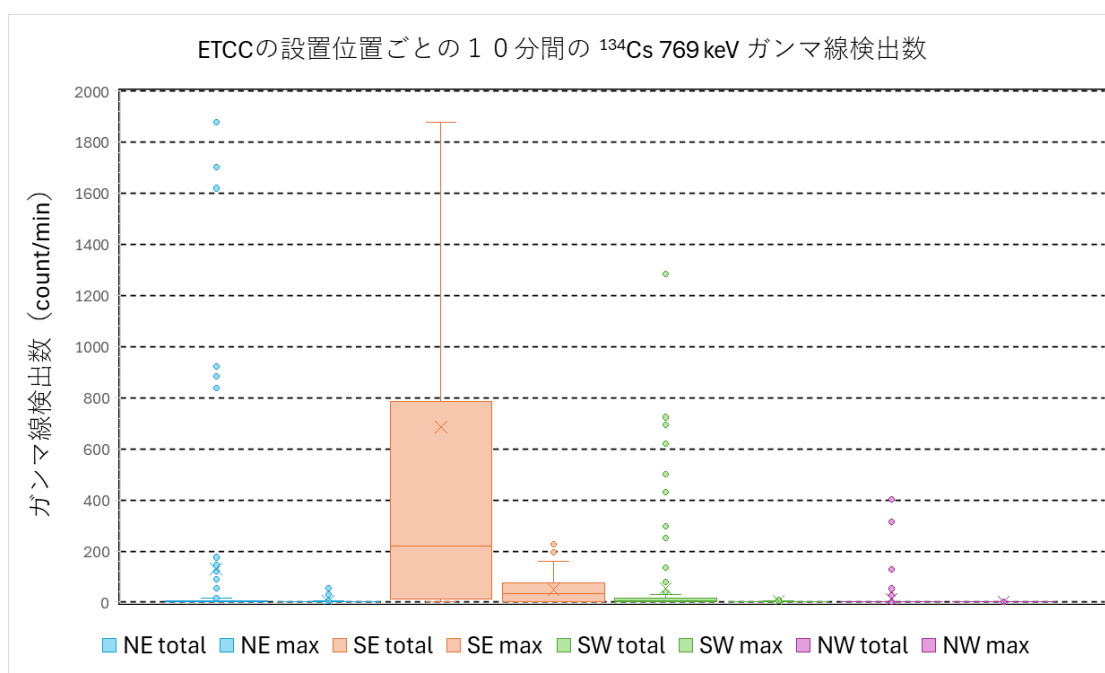


図 B-50 4号機建屋東面からの¹³⁴Csの放出率 1.0×10^{10} Bq/sの10分間放出に対して600 m四方領域の4隅に設置したETCCの10分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件108ケースでの値の箱ひげ図

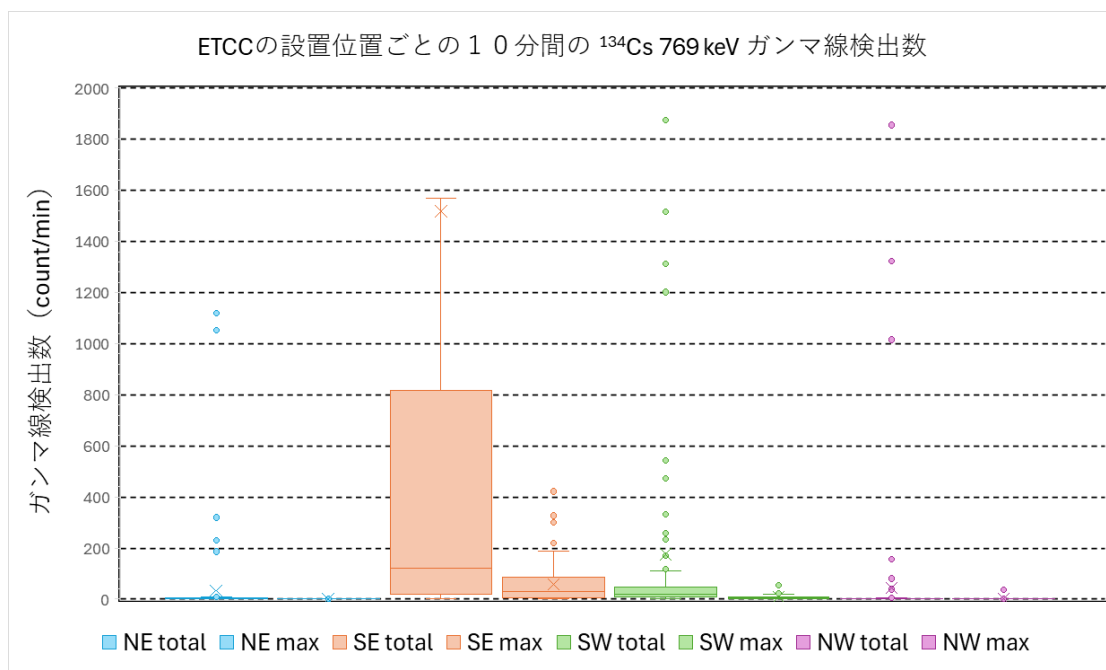


図 B-51 4号機建屋南面からの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/sの10分間放出に対して600 m四方領域の4隅に設置したETCCの10分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件108ケースでの値の箱ひげ図

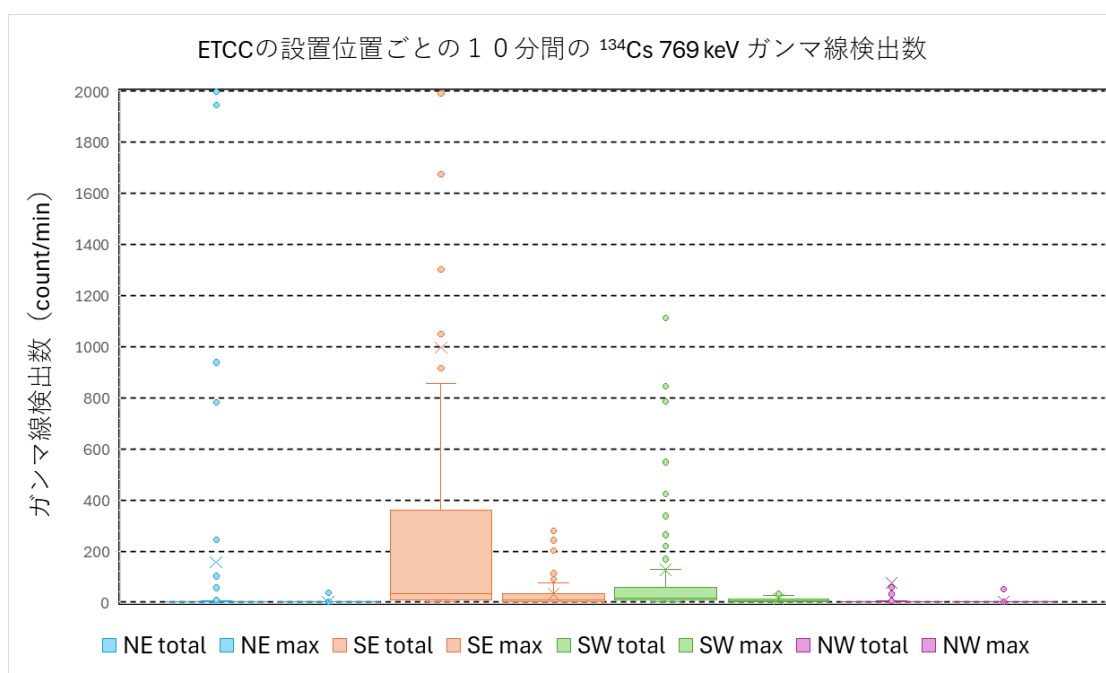


図 B-52 4号機建屋西面からの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/sの10分間放出に対して600 m四方領域の4隅に設置したETCCの10分間計測により検出されるガンマ線カウント数の全積算値と最大値についての気象条件108ケースでの値の箱ひげ図

付録 C プルーム放出地点特定試験結果（本文、図 3-10～3-12 の補足）

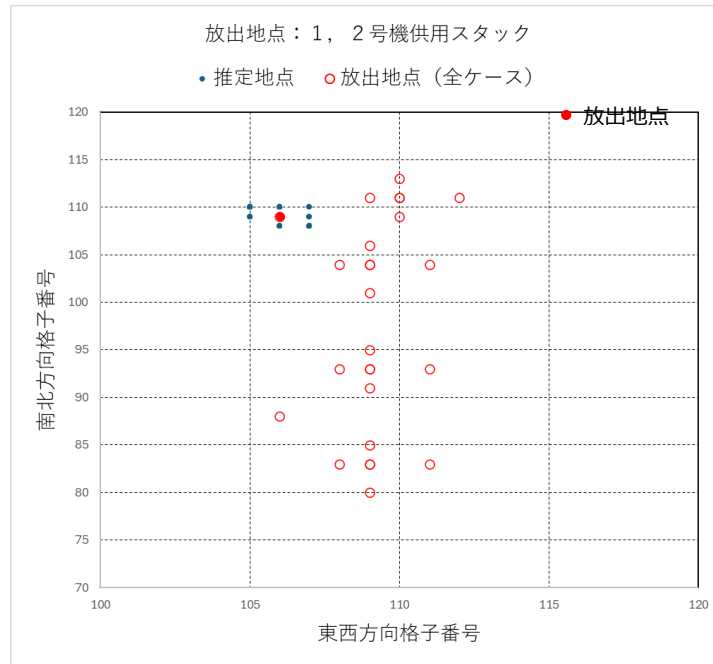


図 C-1 1，2号機供用スタックからの ^{134}Cs の放出率 $1.0 \times 10^{10} \text{ Bq/s}$ の1分間放出に対して 600 m 四方領域の4隅に設置した ETCC の1分間計測によるガンマ線画像データを用いて気象条件 108 ケースに対するプルームの放出点推定結果

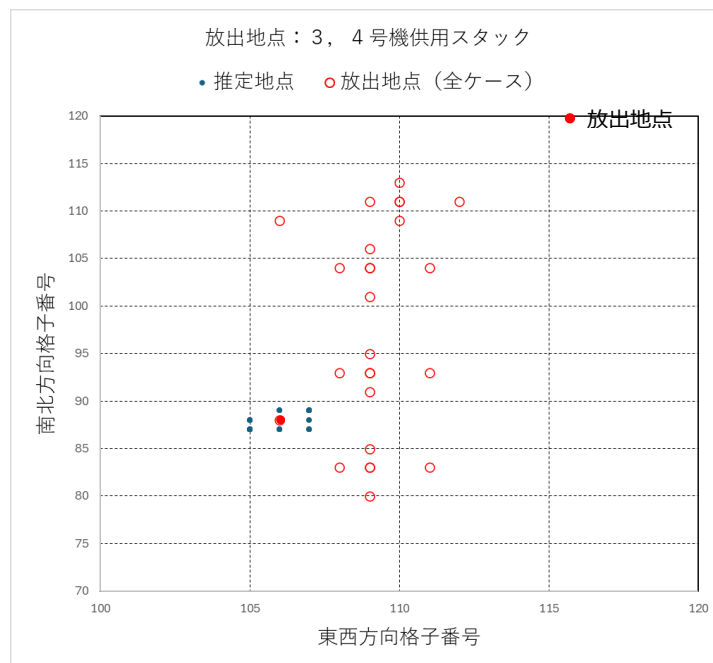


図 C-2 3，4号機供用スタックからの ^{134}Cs の放出率 $1.0 \times 10^{10} \text{ Bq/s}$ の1分間放出に対して 600 m 四方領域の4隅に設置した ETCC の1分間計測によるガンマ線画像データを用いて気象条件 108 ケースに対するプルームの放出点推定結果

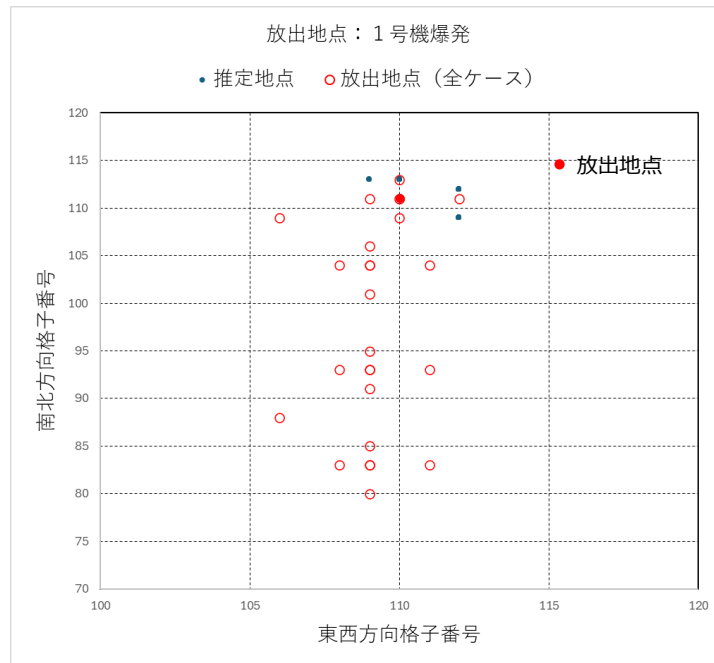


図 C-3 1号機爆発による ^{134}Cs の放出率 $1.0 \times 10^{10} \text{ Bq/s}$ の1分間放出に対して 600 m 四方領域の4隅に設置した ETCC の1分間計測によるガンマ線画像データを用いて気象条件 108 ケースに対するプルームの放出点推定結果（参考）

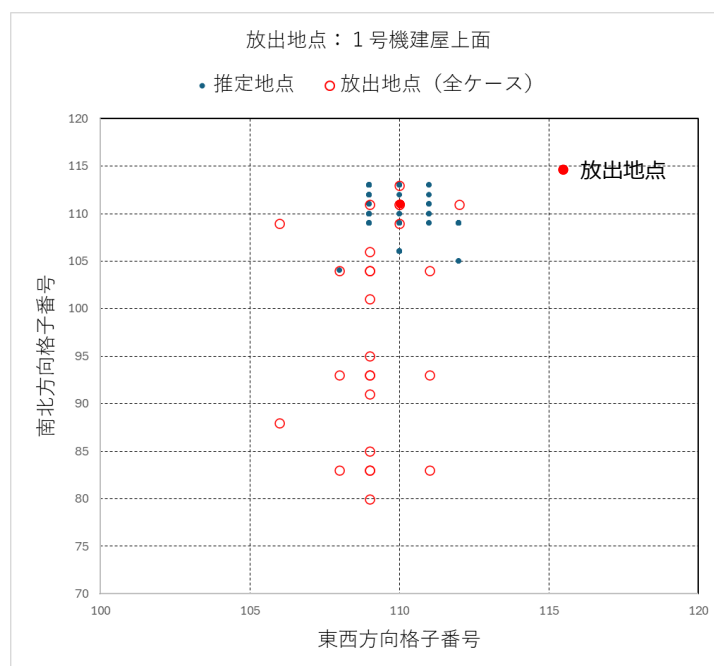


図 C-4 1号機建屋上面からの ^{134}Cs の放出率 $1.0 \times 10^{10} \text{ Bq/s}$ の1分間放出に対して 600 m 四方領域の4隅に設置した ETCC の1分間計測によるガンマ線画像データを用いて気象条件 108 ケースに対するプルームの放出点推定結果

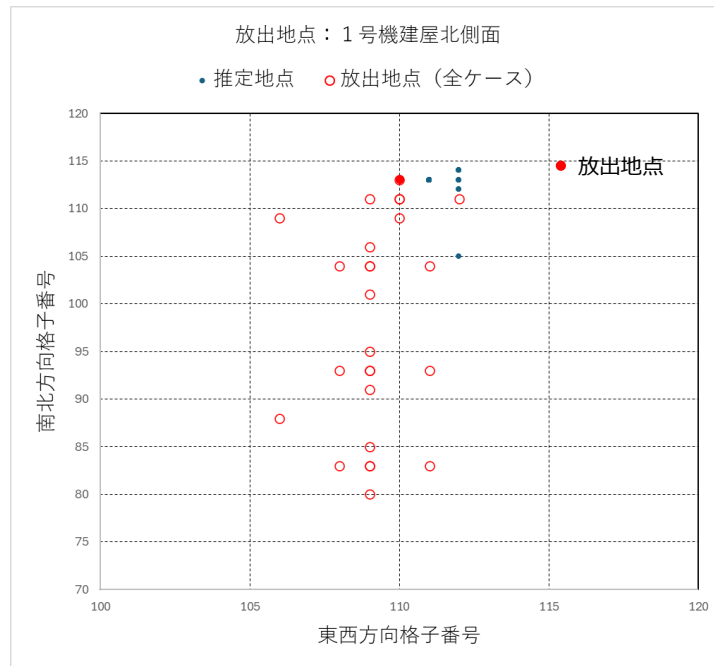


図 C-5 1号機建屋北面からの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/sの1分間放出に対して600 m 四方領域の4隅に設置したETCCの1分間計測によるガンマ線画像データを用いて気象条件108ケースに対するプルームの放出点推定結果

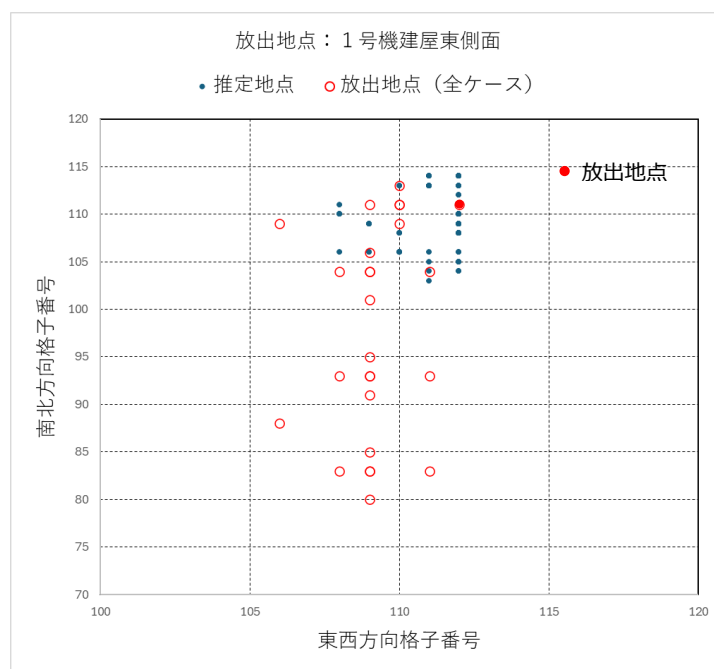


図 C-6 1号機建屋東面からの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/sの1分間放出に対して600 m 四方領域の4隅に設置したETCCの1分間計測によるガンマ線画像データを用いて気象条件108ケースに対するプルームの放出点推定結果

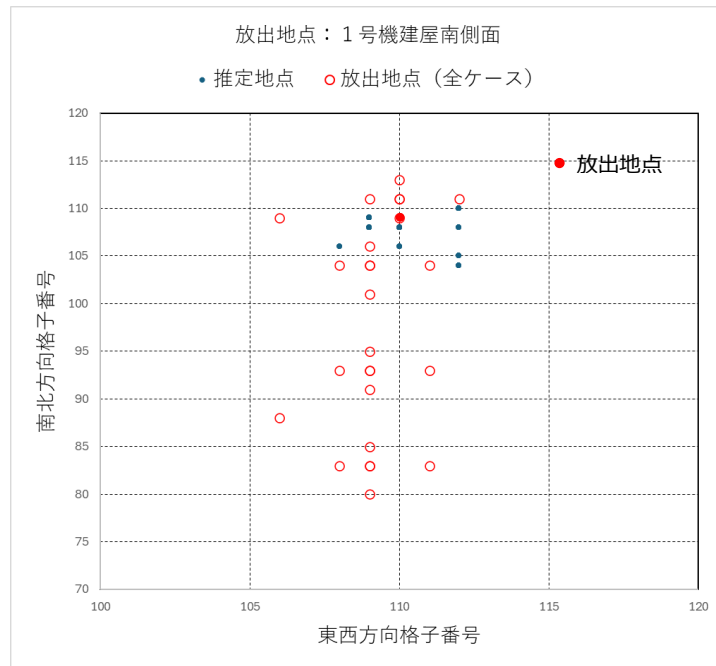


図 C-7 1号機建屋南面からの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/sの1分間放出に対して600 m 四方領域の4隅に設置したETCCの1分間計測によるガンマ線画像データを用いて気象条件108ケースに対するプルームの放出点推定結果

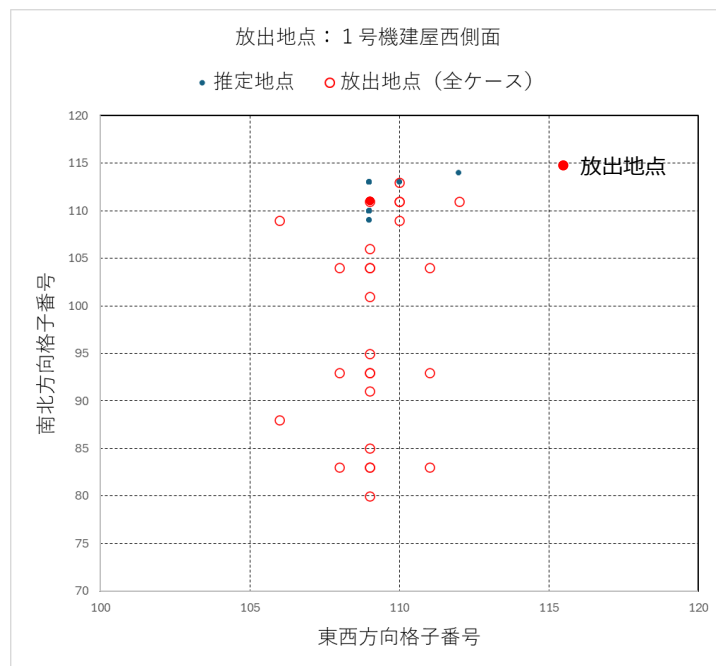


図 C-8 1号機建屋西面からの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/sの1分間放出に対して600 m 四方領域の4隅に設置したETCCの1分間計測によるガンマ線画像データを用いて気象条件108ケースに対するプルームの放出点推定結果

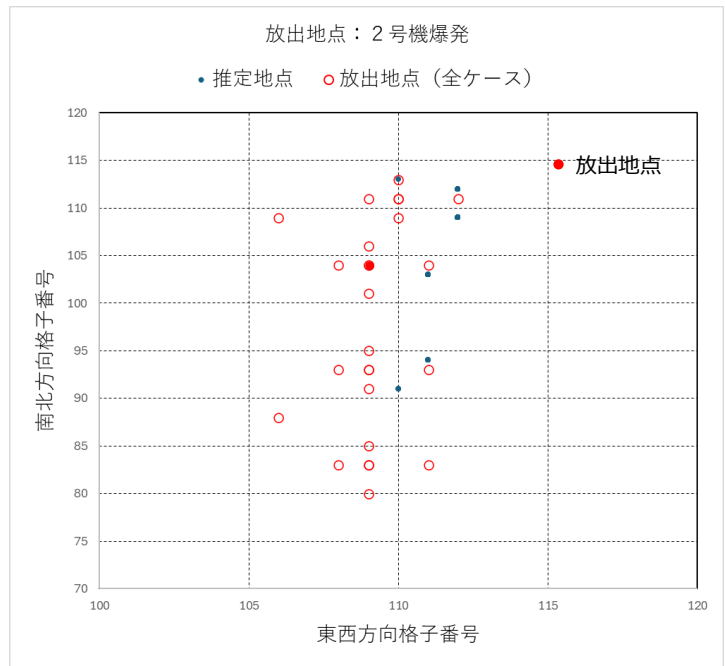


図 C-9 2号機爆発による ^{134}Cs の放出率 $1.0 \times 10^{10} \text{ Bq/s}$ の1分間放出に対して600 m四方領域の4隅に設置したETCCの1分間計測によるガンマ線画像データを用いて気象条件108ケースに対するプルームの放出点推定結果（参考）

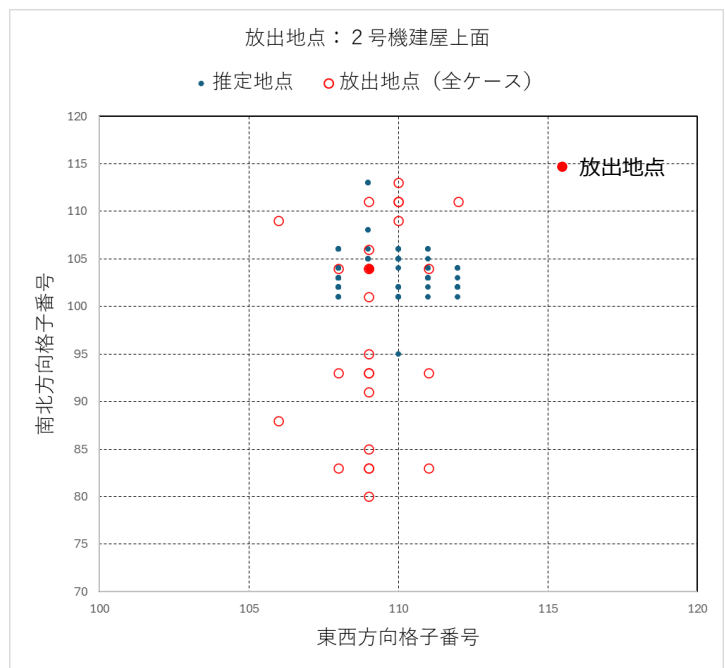


図 C-10 2号機建屋上面からの ^{134}Cs の放出率 $1.0 \times 10^{10} \text{ Bq/s}$ の1分間放出に対して600 m四方領域の4隅に設置したETCCの1分間計測によるガンマ線画像データを用いて気象条件108ケースに対するプルームの放出点推定結果

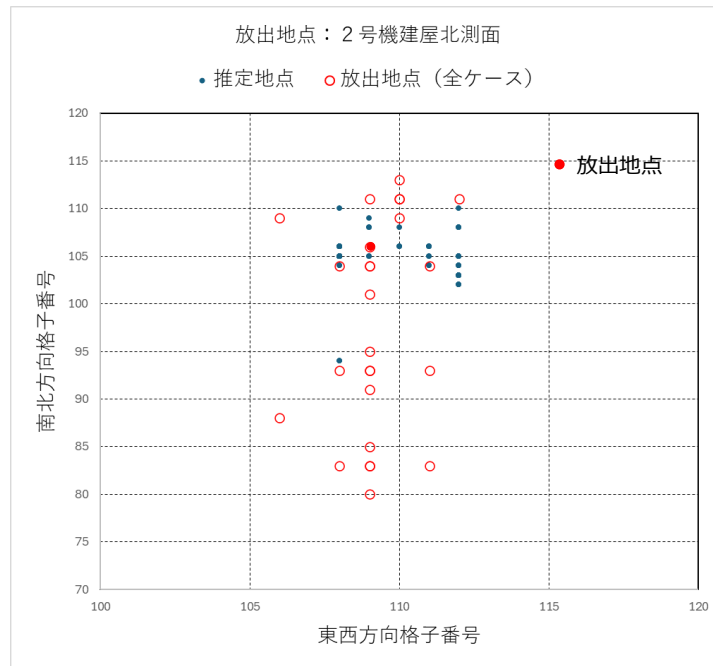


図 C-11 2号機建屋北面からの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/sの1分間放出に対して600 m 四方領域の4隅に設置したETCCの1分間計測によるガンマ線画像データを用いて気象条件108ケースに対するプルームの放出点推定結果

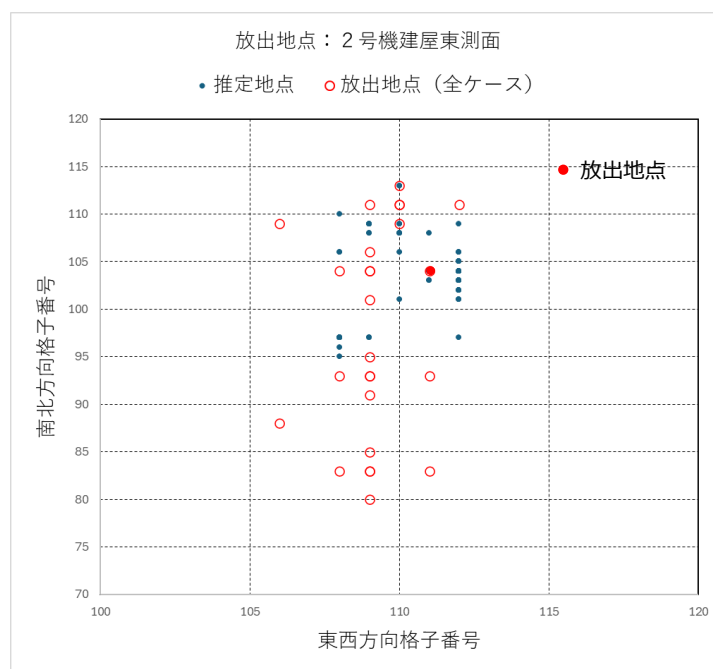


図 C-12 2号機建屋東面からの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/sの1分間放出に対して600 m 四方領域の4隅に設置したETCCの1分間計測によるガンマ線画像データを用いて気象条件108ケースに対するプルームの放出点推定結果

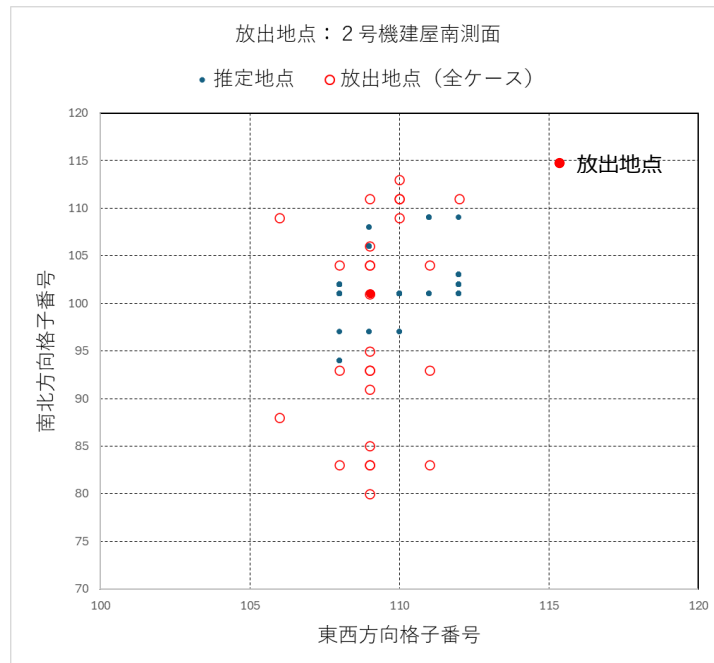


図 C-13 2号機建屋南面からの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/sの1分間放出に対して600 m 四方領域の4隅に設置したETCCの1分間計測によるガンマ線画像データを用いて気象条件108ケースに対するプルームの放出点推定結果

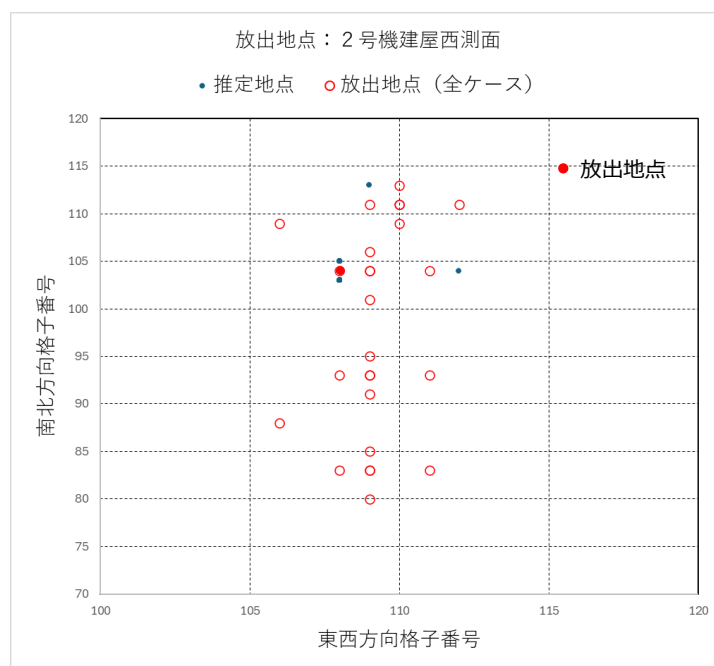


図 C-14 2号機建屋西面からの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/sの1分間放出に対して600 m 四方領域の4隅に設置したETCCの1分間計測によるガンマ線画像データを用いて気象条件108ケースに対するプルームの放出点推定結果

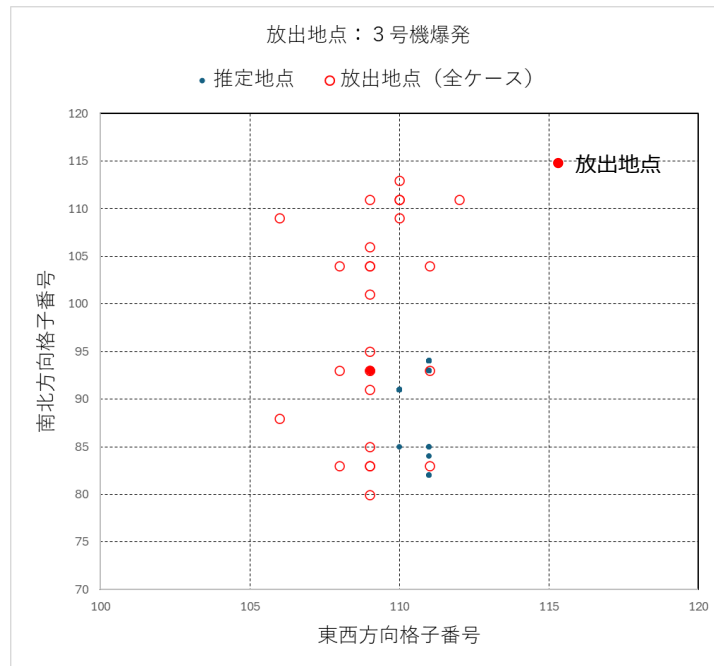


図 C-15 3号機爆発による ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/s の 1 分間放出に対して 600 m 四方領域の 4 隅に設置した ETCC の 1 分間計測によるガンマ線画像データを用いて気象条件 108 ケースに対するプルームの放出点推定結果（参考）

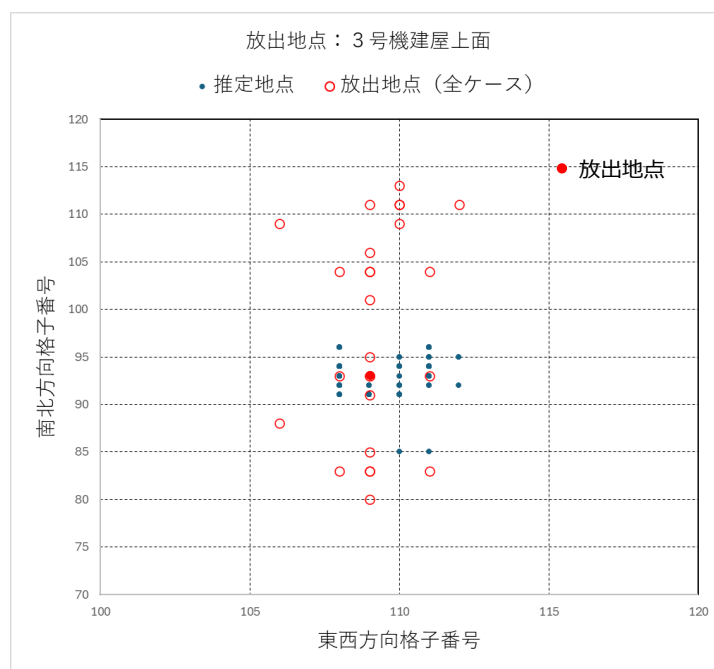


図 C-16 3号機建屋上面からの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/s の 1 分間放出に対して 600 m 四方領域の 4 隅に設置した ETCC の 1 分間計測によるガンマ線画像データを用いて気象条件 108 ケースに対するプルームの放出点推定結果

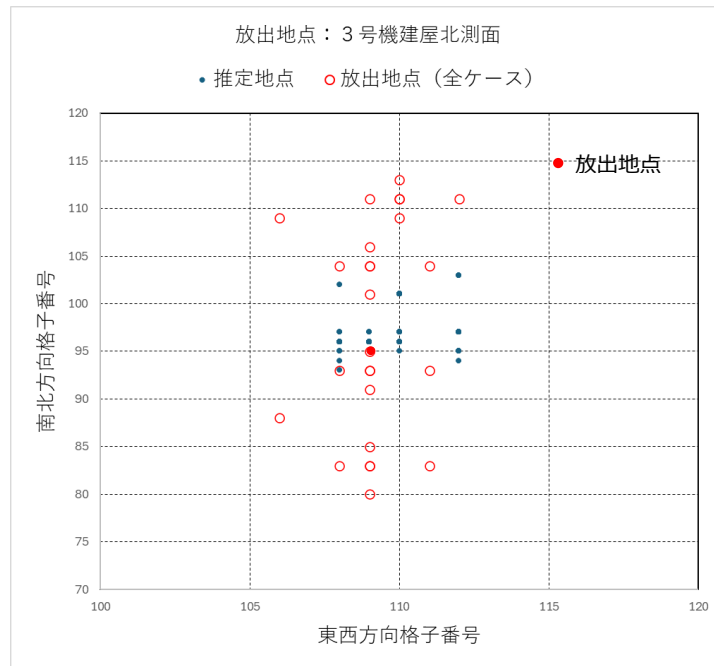


図 C-17 3号機建屋北面からの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/s の1分間放出に対して600 m 四方領域の4隅に設置したETCCの1分間計測によるガンマ線画像データを用いて気象条件108ケースに対するプルームの放出点推定結果

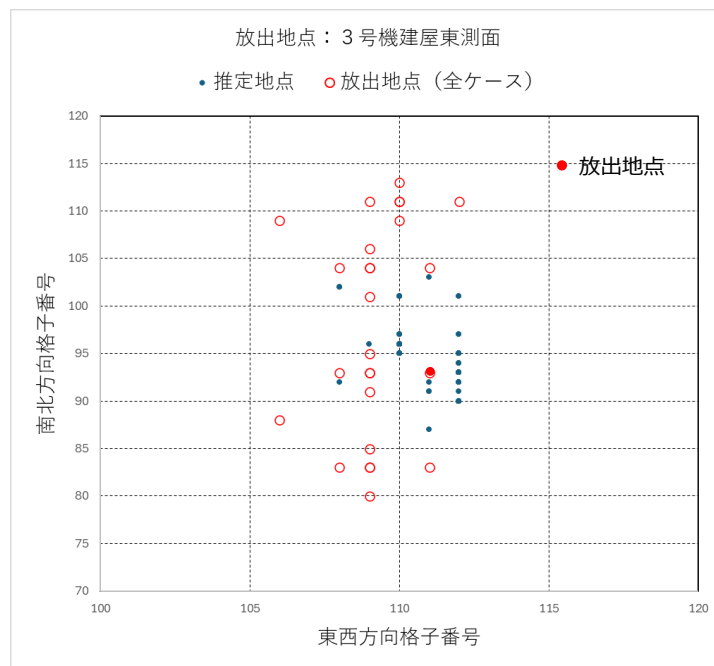


図 C-18 3号機建屋東面からの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/s の1分間放出に対して600 m 四方領域の4隅に設置したETCCの1分間計測によるガンマ線画像データを用いて気象条件108ケースに対するプルームの放出点推定結果

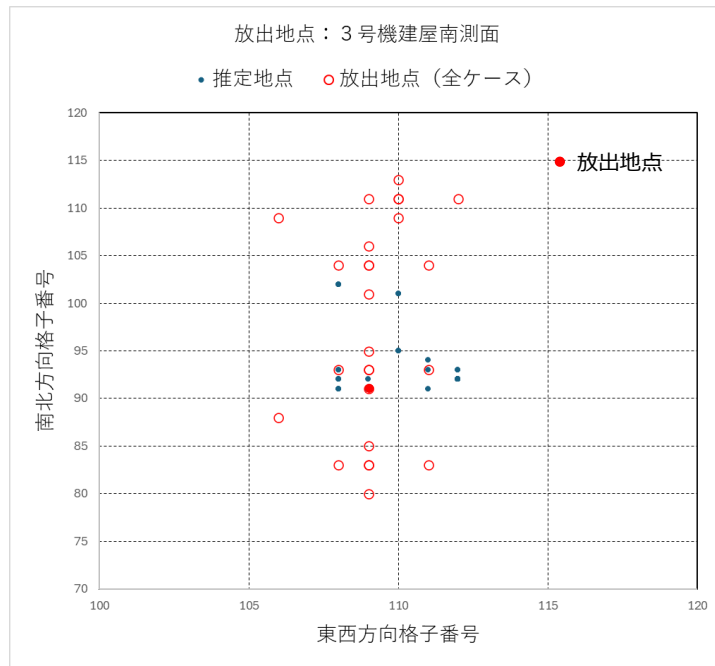


図 C-19 3号機建屋南面からの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/sの1分間放出に対して600 m 四方領域の4隅に設置したETCCの1分間計測によるガンマ線画像データを用いて気象条件108ケースに対するプルームの放出点推定結果

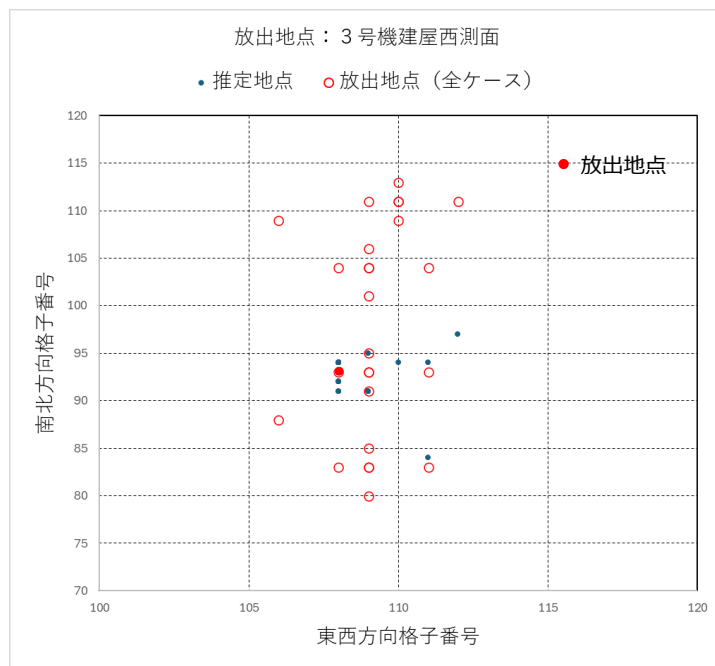


図 C-20 3号機建屋西面からの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/sの1分間放出に対して600 m 四方領域の4隅に設置したETCCの1分間計測によるガンマ線画像データを用いて気象条件108ケースに対するプルームの放出点推定結果

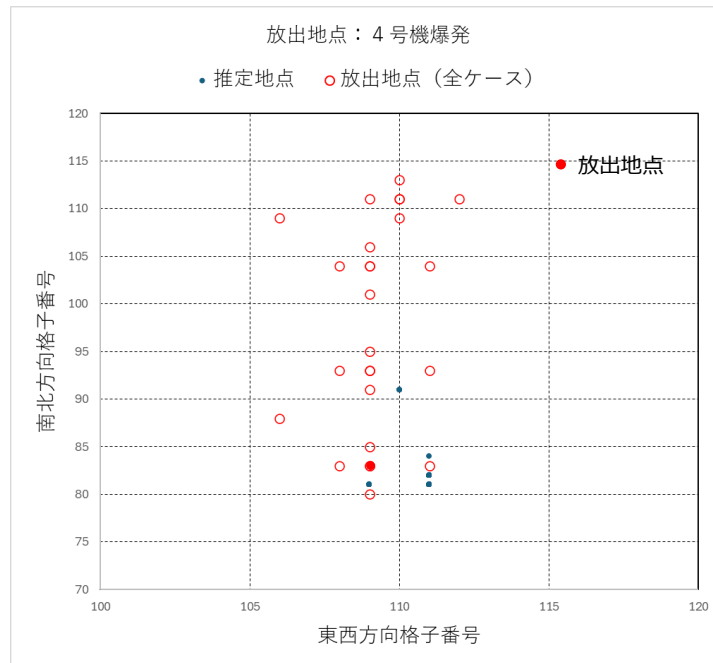


図 C-21 4号機爆発による ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/s の1分間放出に対して 600 m 四方領域の4隅に設置した ETCC の1分間計測によるガンマ線画像データを用いて気象条件 108 ケースに対するプルームの放出点推定結果（参考）

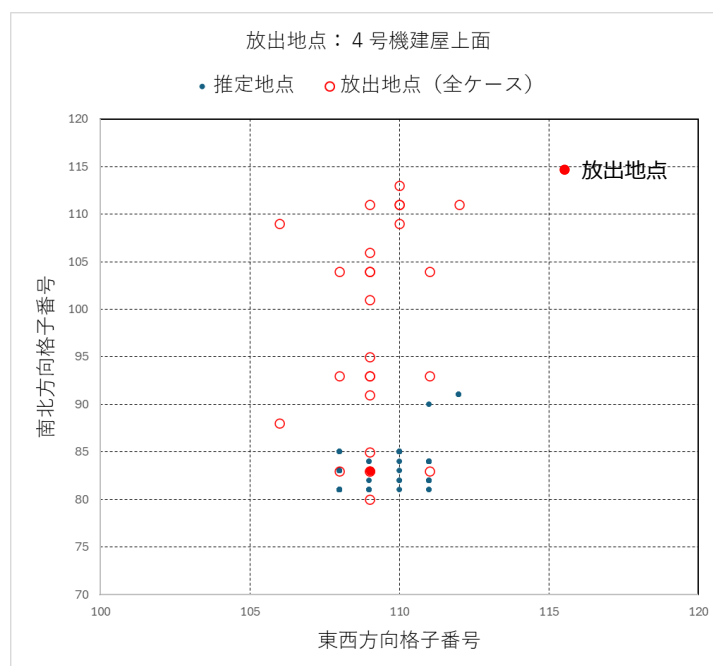


図 C-22 4号機建屋上面からの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/s の1分間放出に対して 600 m 四方領域の4隅に設置した ETCC の1分間計測によるガンマ線画像データを用いて気象条件 108 ケースに対するプルームの放出点推定結果

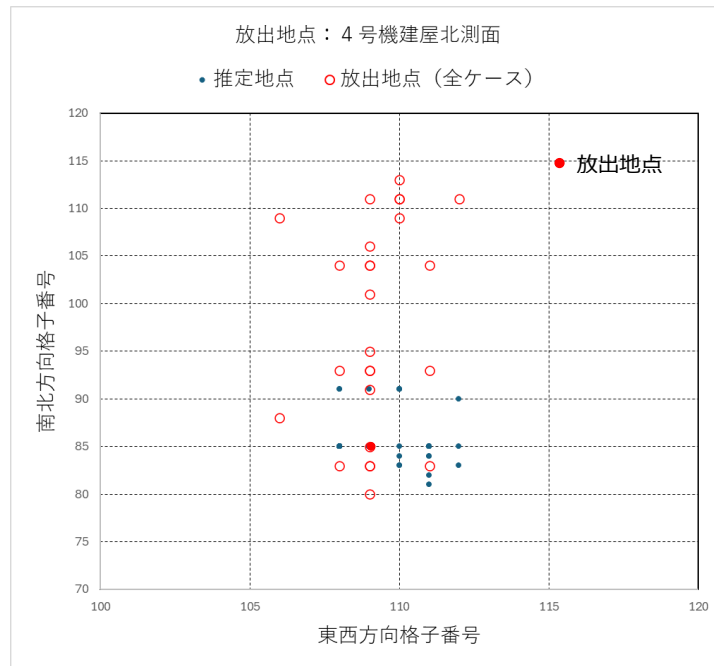


図 C-23 4号機建屋北面からの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/sの1分間放出に対して600 m四方領域の4隅に設置したETCCの1分間計測によるガンマ線画像データを用いて気象条件108ケースに対するプルームの放出点推定結果

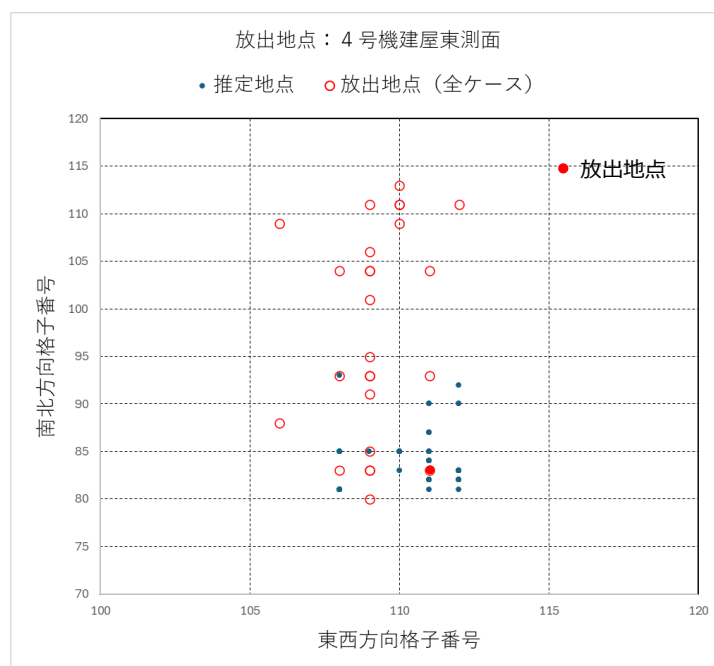


図 C-24 4号機建屋東面からの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/sの1分間放出に対して600 m四方領域の4隅に設置したETCCの1分間計測によるガンマ線画像データを用いて気象条件108ケースに対するプルームの放出点推定結果

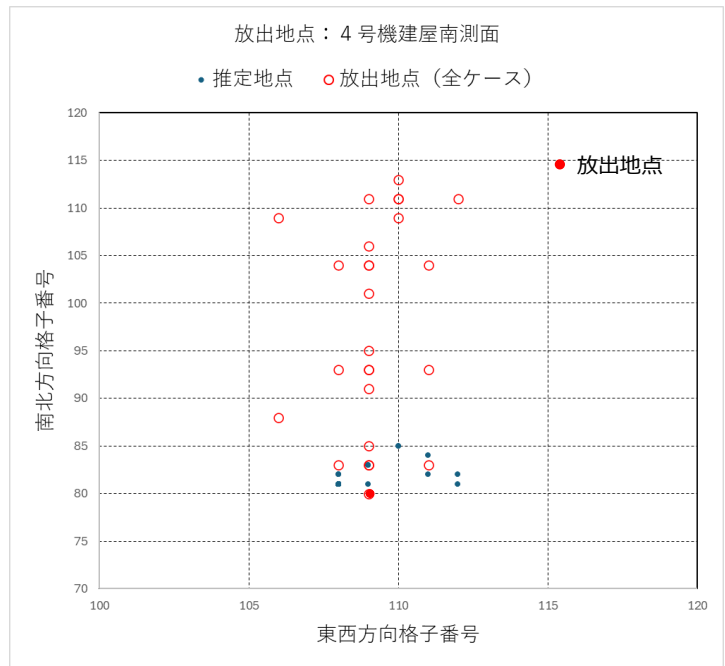


図 C-25 4号機建屋南面からの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/sの1分間放出に対して600 m 四方領域の4隅に設置したETCCの1分間計測によるガンマ線画像データを用いて気象条件108ケースに対するプルームの放出点推定結果

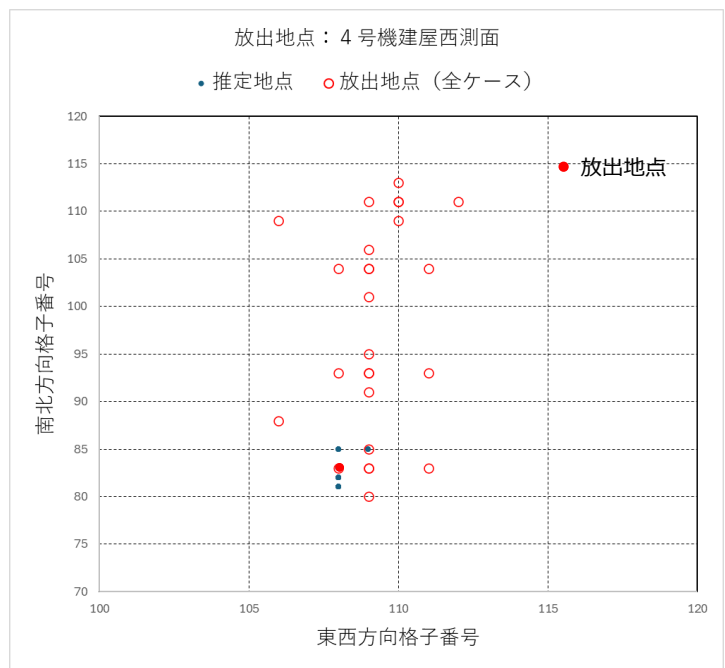


図 C-26 4号機建屋西面からの ^{134}Cs の放出率 1.0×10^{10} Bq/sの1分間放出に対して600 m 四方領域の4隅に設置したETCCの1分間計測によるガンマ線画像データを用いて気象条件108ケースに対するプルームの放出点推定結果