

汚染部位調査用ガンマカメラの開発

—福島第一原子力発電所 2 号機オペレーティングフロア汚染調査を通じた
 γ -eyell の性能実証—

Development of Gamma Camera for Survey of Contamination Distribution
-Performance Demonstration of Gamma Camera Based on Survey of Contamination
on Operating Floor of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Unit
2 Reactor Building by γ -eyell-

金山 文彦 岡田 尚 福島 峰夫 吉元 勝起
羽生 敏紀 川野邊 崇之

Fumihiko KANAYAMA, Takashi OKADA, Mineo FUKUSHIMA, Katsunobu YOSHIMOTO
Toshinori HANYU and Takayuki KAWANOBE

東海研究開発センター
核燃料サイクル工学研究所
核サ研福島技術開発特別チーム

Fukushima Project Team
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories
Tokai Research and Development Center

March 2014

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

汚染部位調査用ガンマカメラの開発
—福島第一原子力発電所 2号機オペレーティングフロア汚染調査を通じた
γ-eye II の性能実証—

日本原子力研究開発機構 東海研究開発センター
核燃料サイクル工学研究所 核サ研福島技術開発特別チーム
金山 文彦、岡田 尚、福島 峰夫、吉元 勝起*、羽生 敏紀^{※1}、川野邊 崇之^{※1}

(2013年12月27日受理)

「東京電力(株)福島第一原子力発電所 1~4号機の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」は、平成25年6月27日に燃料デブリ取り出しなどのスケジュール前倒しを考慮した改訂が行われた。この改訂では、使用済燃料プールからの燃料の取り出し、燃料デブリ取り出しに当たり複数のプランを用意し、プランの絞り込みや修正・変更を行う可能性が想定される時期的なポイントをホールドポイントとして設定している。

2号機からの燃料取り出し計画、燃料デブリ取り出し計画については、オペレーティングフロア除染の成立性がホールドポイントの一つになっている。すでに東京電力は、2号機原子炉建屋5階のオペレーティングフロアからの燃料取り出し準備として遮へい・除染計画を立案するため、当該フロアの状況調査を行ってきており、空間線量率が数十 mSv/h から数百 mSv/h であることをロボットで確認している。さらに東京電力は、詳細な汚染分布や汚染密度の情報収集を行うため、ガンマカメラによる汚染部位計測に関する協力を原子力機構に依頼してきた。

原子力機構は自ら開発したガンマカメラである γ-eye II の汚染部位計測への適用性を事前に確認したうえで、当該フロアの詳細な汚染分布や汚染密度の情報収集を実施した。事前確認の結果、γ-eye II が比較的高い空間線量率環境下にあっても、当該フロアに想定された高い汚染部位を計測可能であることを確認した。そして当該フロアの汚染部位計測の結果、調査範囲の主たる汚染源は原子炉ウェル上部であり、推定表面汚染密度は $1 \times 10^6 \sim 1 \times 10^7 \text{MBq/cm}^2$ であること、またブローアウトパネル開口部近辺の床面にも原子炉ウェル上部と同程度の汚染があると推定されること、さらに当該フロアの西側床面の推定表面汚染密度は 10MBq/cm^2 未満であることが評価できた。以上の調査を通し、γ-eye II の性能を実証するとともに、ガンマカメラ開発に係る種々の知見を得ることができた。

核燃料サイクル工学研究所：〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33

※1 技術開発協力員

* 日本原燃分析株式会社

Development of Gamma Camera for Survey of Contamination Distribution

- Performance Demonstration of Gamma Camera Based on Survey of Contamination on Operating Floor
of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Unit 2 Reactor Building by γ -eye II -

Fumihiko KANAYAMA, Takashi OKADA, Mineo FUKUSHIMA, Katsunobu YOSHIMOTO*,
Toshinori HANYU^{※1} and Takayuki KAWANOBE^{※1}

Fukushima Project Team, Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories,
Tokai Research and Development Center
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 27, 2013)

“Mid-and-Long-Term Roadmap towards the Decommissioning of TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units 1-4” was revised on June 27, 2013, in order to consider acceleration of the schedule for removing fuel debris and other measures. In this revised roadmap, some plans were prepared for removing the spent fuel from fuel pool and fuel debris from reactor cores. And “Hold Points” were set on the schedule of the roadmap to modify and/or revise those plans as the need arises.

For the schedule of removing fuels & debris from the Unit 2 reactor building, realization of decontamination of operating floor is provided as a “Hold Point”. TEPCO has already started to measure dose rate over the floor by remotely operated vehicle for planning decontamination. Because the measured data were widely distributed in the range of several decade to one thousand mSv/h, it is necessary for TEPCO to survey of contamination distribution on operation floor of the Unit 2 for more detail planning will be required for decontamination. Therefore TEPCO requested JAEA to co-operate to survey of contamination distribution using gamma camera system developed by JAEA.

JAEA estimated sensitivity of developed gamma camera system named “ γ -eye II” in consistency with actual radiation condition, and carried a demonstration experiment near the main stack of unit 1 and 2 at Fukushima Daiichi N.P.S. to confirm a strength of jamming by back ground dose. Then, JAEA surveyed contamination distribution of operating floor of unit 2 reactor building using γ -eye II. At the result of survey, it was found that, - main radiation source in survey area was located on upper reactor well, - western floor in survey area was lower the margin of capacity of γ -eye II, -there was a highly contaminated spot on the floor near the opened Blow Out Panel.

Keywords: Gamma Camera, Fukushima Daiichi, Operating Floor, QAD, Surface Contamination

※1 Collaborating Engineer

* Japan Nuclear Fuel Chemical Analysis CO. LTD.

目次

1.	はじめに.....	1
2.	計測装置.....	3
2.1	γ-eye II の概要.....	3
2.2	γ-eye II の校正.....	3
2.2.1	不感時間及び線量率換算係数.....	3
2.2.2	バックグラウンド線量率感度.....	4
2.3	オペフロ計測用装置のシステム化.....	5
3.	事前検討.....	6
3.1	概要.....	6
3.2	汚染密度の事前検討.....	6
3.2.1	原子炉ウェル上部の汚染密度推定.....	6
3.2.2	西側床面の汚染密度推定.....	6
3.3	オペレーティングフロア計測の可否.....	7
3.4	汚染密度算出手法の検討.....	7
3.4.1	距離影響評価.....	7
3.4.2	角度影響評価.....	7
3.4.3	汚染密度算出方法.....	8
3.4.4	点線源計測と面線源計測の比較.....	8
3.5	事前検討結果.....	8
4.	事前確認試験.....	9
4.1	概要.....	9
4.2	試験状況.....	9
4.3	事前確認試験の結果.....	9
4.3.1	事前確認試験時の検出下限値.....	9
4.3.2	計測結果.....	10
4.3.3	正面放射線の寄与.....	10
4.4	オペレーティングフロア調査へのγ-eye II の適用性の確認.....	11
4.4.1	オペフロ調査へのγ-eye II の適用性.....	11
4.4.2	オペフロ調査時のBG計数率及び検出下限値の推定.....	12
4.5	事前確認試験結果.....	12
5.	オペレーティングフロア調査.....	13
5.1	調査状況.....	13
5.2	調査結果.....	13

6. オペレーティングフロアの汚染分布推定	14
6.1 オペフロ平面汚染分布の推定	14
6.2 オペフロ内機器の影響評価	14
7. γ -eye IIによるオペレーティングフロア汚染部位計測結果の検証	16
7.1 γ -eye II計測結果に基づく線源モデル及びオペフロ線源体系	16
7.2 オペフロ空間線量率の推定値と実測値の比較、及び汚染分布推定の検証	17
7.3 オペフロ汚染分布	18
8. 得られた知見	19
8.1 ハード	19
8.2 ソフト	19
9. まとめ	21
謝辞	22
参考文献	22

Contents

1. Introduction	1
2. Measuring device.....	3
2.1 Summary of γ -eyeII.....	3
2.2 Proofreading of γ -eyeII.....	3
2.2.1 Dead time and conversion factor.....	3
2.2.2 Background dose rate sensitivity.....	4
2.3 Systematization for 1F.....	5
3. Pre-study.....	6
3.1 Summary.....	6
3.2 Pre-study of radiation density	6
3.2.1 Radiation source of upper reactor well.....	6
3.2.2 Radiation source of western floor.....	6
3.3 Evaluation of potential of measurement of operating floor.....	7
3.4 Study of contamination density calculation method	7
3.4.1 Evaluation of distance effect.....	7
3.4.2 Evaluation of angle effect.....	7
3.4.3 Contamination density calculation method.....	8
3.4.4 Evaluation of distance correction.....	8
3.5 Result of pre-study.....	8
4. Prior confirmation test.....	9
4.1 Summary.....	9
4.2 Test condition.....	9
4.3 Result of prior confirmation test.....	9
4.3.1 Detection limit at prior confirmation test	9
4.3.2 Result of survey.....	10
4.3.3 Contribution of radiation from front.....	10
4.4 Confirmation of applicability of γ -eyeII to operating floor survey.....	11
4.4.1 Application to operating floor survey.....	11
4.4.2 Evaluation of back ground figures and detection limit at operating floor survey.....	12
4.5 Result of prior confirmation test.....	12
5. Operating floor survey.....	13
5.1 Survey condition.....	13
5.2 Result of survey.....	13

6. Evaluation of surface contamination density of operating floor	14
6.1 Evaluation of contamination density on operating floor	14
6.2 Evaluation of obstacle effect	14
7. Validation of result of survey on operating floor by γ -eyeII	16
7.1 Radiation source model based on result of survey by γ -eyeII	16
7.2 Comparison of the measured value and the estimated value of dose rate on operating floor, and verification of radiation distribution estimation	17
7.3 Contamination distribution of operating floor	18
8. Lessons and learns	19
8.1 Hard	19
8.2 Soft	19
9. Conclusion	21
Acknowledgment	22
References	22

図表リスト

表1	1F での実施スケジュール	23
表2	γ-eye II 仕様	23
表3	放射線計測表	24
表4	PD7 との感度比及び線量率換算係数	27
表5	オペレーティングフロア計測可否評価計算モデル	27
表6	距離影響評価計算モデル	28
表7	角度影響評価計算モデル	29
表8	γ-eye II 設置位置での原子炉ウエルからの線量率寄与計算モデル	30
表9	オペフロ調査時の検出下限値予想	30
表10	評価結果	31
図1	東京電力ロボットによる計測で得られた 2 号機オペフロの床面高さ 1m の空間線量率マップ	33
図2	γ-eye II 外観写真	33
図3	γ-eye II 水平断面概略図	34
図4	照射線量率と放射線計測率の関係	34
図5	照射角度と全 PD の計数率の最大値	35
図6	オペフロ計測用装置	36
図7	線源想定	37
図8	原子炉ウエル上部線源モデル	37
図9	西側床面線源モデル	38
図10	西側床面線源放射線量推定モデル	38
図11	オペレーティングフロア計測可否評価計算結果	39
図12	距離影響評価計算結果	40
図13	角度影響評価計算結果	41
図14	距離補正評価比較結果	42
図15	事前確認試験配置図	42
図16	事前確認試験イメージ図	42
図17	事前確認試験計測結果	43
図18	オペレーティングフロア調査イメージ図	43
図19	オペレーティングフロア調査装置の設置状況	44
図20	オペレーティングフロア調査計測結果	45
図21	オペレーティングフロア調査計測結果(平均)	48
図22	オペレーティングフロア表面密度分布	49

図23	再評価後のオペレーティングフロア表面密度分布	52
図24	線源体系イメージ	53
図25	オペレーティングフロア評価点	54
図26	オペレーティングフロア線源体系(条件Ⅰ、Ⅱ)	55
図27	オペレーティングフロア線源体系(条件Ⅲ)	56
図28	計測結果の妥当性確認評価結果	58

1. はじめに

東京電力(株)福島第一原子力発電所（以下、「1F」という。）事故発生後、政府及び東京電力(株)（以下、「東京電力」という。）は、「東京電力(株)福島第一原子力発電所・事故の収束に向けた筋道 当面の取り組みロードマップ」をとりまとめ、事故の収束に向けた取り組みを進めてきた。その後、2011年7月にロードマップにおけるステップ1（「放射線量が着実に減少傾向にある」状況）を達成、同年12月にはステップ2（「放射性物質の状況が管理され、放射線量が大幅に抑えられている」状況）を達成した。平成25年6月27日の改訂では、スケジュールの前倒しが検討され、使用済燃料プールからの燃料の取り出し、燃料デブリ取り出しについて、現実的な時期がホールドポイントとして設定された。この検討では、号機別の状況の違いに関する詳細な分析に基づき、使用済燃料プールからの燃料の取り出し、燃料デブリ取り出しに当たって複数のプランが用意され、それらのプランの絞り込みや修正・変更を交えた検討がなされた。特に、2号機原子炉建屋は、水素爆発による損傷はないが、建屋内の線量が非常に高い状況であるため、複数のプランの絞り込みを行うための最初のホールドポイントとして、オペレーティングフロアの汚染状況の詳細調査を行い、線量低減の成立性を評価する事が挙げられている。

東京電力では、2号機原子炉建屋のオペレーティングフロア（以下、「オペフロ」という。）からの燃料取り出し準備として、遮へい・除染計画を立案するため、オペフロの状況を調査してきた¹⁾。東京電力ロボットによる計測で得られた2号機オペフロ床面高さ1mの空間線量率マップを図1に示す。図1より、図中Aの原子炉ウェル上部で最大880mSv/h、その他の床上部で数百から数十mSv/hの状況である。東京電力ではさらに詳細な汚染分布や汚染密度の情報をガンマカメラ等で調査する計画であった。

一方、日本原子力研究開発機構（以下、「JAEA」という。）では、事故直後から政府と東京電力の福島原発事故対策統合本部リモートコントロール化プロジェクトチームに参画するとともに、上記ロードマップの中の様々な研究開発プロジェクトに参画し、事故収束とその後の廃炉に向けた協力を進めている。特にリモートコントロール化プロジェクトに対しては、保有する原子力災害対応ロボット（RESQ-A）等の改造・整備、及びこれを運用するためのロボット操作車の整備、並びにガンマカメラ（ γ -eye I）等の開発及び提供を行い、それぞれ事故収束対応に活用されてきた²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾。

このような状況の中、東京電力はJAEAが開発したガンマカメラに着目し、このガンマカメラによるオペフロの汚染部位計測の協力をJAEAに依頼してきた。なお2号機原子炉建屋は、事故の際、地上約30mのところにあるオペフロのブローアウトパネル（以下、「BOP」という。）が開口しており、東京電力では24年度内にBOP開口部を閉鎖する計画のため、閉鎖作業で設置する構台からガンマ・カメラによる汚染部位計測を行いたいとの要望であった。

JAEAは、開発したガンマカメラ（ γ -eye II）がオペフロの汚染分布や汚染密度の評価に

適応可能かどうか、事前に解析評価に関する検討を行い、原子炉ウェルより γ -eye II の計測下限値を上回る強度の放射線量が出ていることを確認するとともに、汚染密度算出手法の検討を行った。また、高線量環境下での γ -eye II が周囲から受ける放射線の影響を確認するため事前確認試験を行い、オペフロ調査が可能であることを確認し、本結果を参考に計測条件を検討した。これら事前確認の後、オペフロ汚染部位計測を実施した。表 1 に 1F での作業スケジュールを示す。本報告書では、 γ -eye II の性能実証結果及びこれから得られたオペフロの汚染分布や汚染密度の評価並びにガンマカメラに関する知見を報告する。

2. 計測装置

2.1 γ -eye II の概要

γ -eye II は、遮へい材として鉛 20mm を使用したピンホール・コリメータ型のガンマカメラである。 γ -eye II の外観写真を図 2、断面概略図を図 3、主な仕様を表 2 に示す。

γ -eye II は、放射線検出素子として浜松ホトニクス製フォトダイオード S6775-01（以下、「PD」という。）を使用して、14 個の PD を縦 1 列に並べ任意の速度で横方向に走査(105mm)させ、計測値を縦 14×横 14 のセルに分割し放射線計測表を作成する。同時にピンホール同軸上にセットしたカメラで放射線計測範囲と同じ範囲の画像を撮影し、この画像と放射線強度分布図を重ね合わせて γ 線可視化イメージ画像を作成する。なおピンホール(9.5mm×9.5mm)から入射した放射線は上下左右が反転するので、放射線強度分布図は反転を考慮した放射線計測表から作成した。すなわち最上部に配置した PD の 1 番目 (PD 1) の計測値は最下部のセルに、最下部に配置した PD14 の計測値は最上部のセルに配列し、同様に左右反転させた計測値を配列して放射線計測表を作成する。

γ -eye II は、ピンホール前面に鉛(20mm)シャッターがあり、シャッターが閉じているときにバックグラウンド(以下、「BG」という。)放射線の計数率を計測することができる。従って、シャッター開時の計数率からシャッター閉時の計測率(BG 計数率)を差し引いた値が、計測対象からの放射線の正味の計数率である。

また装置上部に設置したレーザ測域計により、各セル中心の被写体までの距離を計測し、放射線強度の距離補正を可能とした。

2.2 γ -eye II の校正

γ -eye II は、Cs-137 のコリメータ・ビーム線源(1m 先で直径 180mm (均一性 5%以内)の照射野)による照射試験で、不感時間及び線量率換算係数、並びにバックグラウンド線量率感度をもとめた。

γ -eye II の放射線入射角は縦 50°、横 42°であり、分解能は 10m 先の平面で 1セルあたり約 55cm×67cm であるが、 γ -eye II の放射線計数値は、ピンホール入射以外の放射線を鉛遮へいで完全にカットできるものではないことから、ビーム中心をピークとしたいくつかのセルに分散される。このため照射試験はできるだけ 1つのセル内に放射線計数のピークが入るように、 γ -eye II の設置位置を調整した。

なお照射試験室のマシントイムを有効に使用するため、試験は効率的に実施した。

2.2.1 不感時間及び線量率換算係数

γ -eye II の検出面で 0.1mSv/h、1mSv/h、10mSv/h の線量率を受けるようにビーム線源の Cs-137 の線源強度と線源からの照射距離を調整し、それぞれの放射線計測値(正味値)を計測した。これらの放射線計測表を表 3 に、また放射線計数のピークであるセル番号 105

の照射線量率と放射線計測率の関係を図 4 に示す。なおセル番号 105 の検出素子は PD7 に相当する。

不感時間による数え落とし補正 (n_n) は、以下のように算出した。

まず PD7 の不感時間 (t_d) は、数え落としの影響が最も小さい 0.1mSv/h 照射時の計数率と、最も影響の大きい 10mSv/h 照射時の計数率より、454 μ s を算出した。

$$t_d = \left(\frac{1}{n_{10}} - \frac{1}{n_{0.1} \times 100} \right) \times 1000000$$

ここで、

t_d : 不感時間 (μ sec)

n_{10} : 10mSv/h 照射時の計数率 (cps)

$n_{0.1}$: 0.1mSv/h 照射時の計数率 (cps)

次に、計測率の数え落としは、以下の式で補正した。

$$n_n = \frac{n_m}{1 - n_m \times t_d \times 0.000001}$$

ここで、

n_n : 計数率 (数え落とし補正後) (cps)

n_m : 計数率(測定値) (cps)

t_d : 不感時間 (μ s) = 454 μ s

PD7 の線量率換算係数は、数え落としの影響の最も小さい 0.1mSv/h 照射時の計数率から算出した。PD7 以外の 13 個の PD については、同メーカー同機種のものを使用していることから PD7 と同じ不感時間とし、線量率換算係数は PD7 の線量率換算係数を基準にそれぞれの PD7 との計数感度比を乗じた値とした。PD7 との計数感度比は、1mSv/h 照射時の計数率をそれぞれ測定してもとめた。表 4 に PD7 との計数感度比及び線量率換算係数を示す。

2.2.2 バックグラウンド線量率感度

現実の放射能汚染現場では、いろいろな方向から γ -eye II に放射線が入射する。 γ -eye II の遮へい体は 20mm の鉛板を使用しているが、本体形状が台形であるため、種々の方向から入射する放射線 (以下、「BG 放射線」という。) に対する遮へい厚は均一ではなく、鉛遮へいで減衰した放射線に対する各 PD の感度は、BG 放射線の入射角度により異なる。また γ -eye II は鉛シャッタの開閉時の放射線量の差分により正面方向 (水平 42°、垂直 50°) からの正味の放射線を計測しており、正面以外の方向からの BG 放射線の影響を強く受けた場合は、正しい計測ができなくなる可能性がある。このため γ -eye II の性能確認試験の 1 つとして、BG 放射線の入射角度に対する各 PD の感度を照射試験で予め確認した。

本試験は鉛シャッタを閉じて 10mSv/h の照射を行い、Cs-137 ビーム線源のビーム線上で

γ -eye II を水平 0° から 180° 回転 (30° 毎) させ、また垂直 -10° から 40° 上下 (10° 毎) させて、各角度における PD の計数率を求めて BG 放射線に対する各 PD の感度を測定した。照射角度に対する各 PD の最大感度を図 5-1、5-2 に示す。これらの結果より、正面 (水平 0°、垂直 0°) からの放射線では PD 感度が 7 cps/(mSv/h) であるが、垂直 0° で水平 60° 及び 180° からの BG 放射線には感度が高いことを確認した (42 cps/(mSv/h))。 γ -eye II は装置構造上、水平 60° の位置は遮へい体端面近くのため放射線の減衰効果が低く、また水平 180° の位置は PD と共に走査させるために遮へい体を軽量化させているため他部位に比べ遮へい厚が薄くなっている。これらのことより、 γ -eye II は減衰効果が低い水平 60° 及び 180° からの BG 放射線の影響を強く受けたものと思われる。よって本計測器は、BG 放射線の角度依存性を考慮した取扱いが必要であることがわかった。

2.3 オペフロ計測用装置のシステム化

γ -eye II によるオペフロ調査は、地上約 30m の高さにある BOP 開口部脇の構台上から行われることとなっており、 γ -eye II 本体は、汚染防止用養生箱の中に設置し、内部に熱が籠るのを避けるため、吸気フィルタとフィルタ付きの送風機で換気した。またオペフロ床面を広範囲に測定できるように BOP 開口部の比較的高い位置に γ -eye II を設置するため、 γ -eye II を内蔵した汚染防止養生箱は、高さ 2.1m の設置台上に設置した。 γ -eye II の操作は、既設ネットワークを介して免震重要棟から遠隔操作することとなっており、 γ -eye II に無線子機を付設した。なお無線親機は 2 号機タービン建屋屋上に設置した。BOP 開口部脇の構台上は既設電気系統からの電源供給が不可能なため、設置台に発電機を設置するとともに、発電機停止の不測事態を考慮し、補助電源として無停電電源装置を設置した。また、オペフロ内は照明が機能していないため、計測時の照明として LED ライトを設置台に設置した。図 6 にオペフロ計測用装置を示す。

オペフロ調査は本装置をクレーンで吊り上げ構台に設置した。なお構台設置時のクレーン操作の監視用として、監視カメラを設置台下部に設置した。また発電機停止時の警告用として、監視カメラは無停電電源装置を介さず、発電機から直接電源を供給した。

3. 事前検討

3.1 概要

東京電力がロボットで計測した 2 号機オペフロの空間線量率マップ（図 1）より、オペフロ平面は広範囲に汚染されていると想定されるが、BOP 開口部（図 7）から γ -eye II で計測した際に、検出下限値以上の放射線が得られるかどうかを検討した。また、得られた放射線計測値より汚染密度を評価する解析手法の検討を行った。

以下、点減衰核積分計算コード QAD-CGGP2⁸⁾（以下、「QAD」という。）による計算には、線源モデルの汚染核種は組成比 2 : 3（1F の汚染水の分析結果⁹⁾より）の Cs-134 と Cs-137 が均一に汚染している面線源と仮定し、線源と評価点の間の遮へい物は空気とし、床等による散乱は無視した。また計算コードへの入力上、体積線源モデルとして厚さ 1cm を入力したが線源の自己遮へいは空気とした。

3.2 汚染密度の事前検討

2 号機オペフロの空間線量率マップをもとに、BOP 開口部から γ -eye II の計測範囲にある、原子炉ウェル上部と西側床面の 2 つの線源モデルを想定し、それぞれの汚染密度を推定した。線源想定を図 7 に示す。

3.2.1 原子炉ウェル上部の汚染密度推定

原子炉ウェル上部の汚染は、直径 6m、厚さ 1cm の円盤状の線源モデルで模擬し、角度方向、径方向にそれぞれ 100 等分（計 1 万）の線源分割した計算モデルとした。なお、線源毎の放射線量については、全ての線源について放射能密度が同様になるように調整した。次に線源モデルの中央高さ 1m の線量率が、東京電力の実測値 880mSv/h になるように、QAD 計算を行い、原子炉ウェル上部の放射線量 6.22×10^{13} Bq、及び汚染密度 5.50×10^7 Bq/cm² を推定した。原子炉ウェル上部の線源モデルを図 8 に示す。

3.2.2 西側床面の汚染密度推定

西側床面の汚染は、縦 30m、横 15m、厚さ 1cm の直方体の線源モデルで模擬し、縦、横ともに 100 等分（計 1 万）の線源分割した計算モデルとした。西側床面の線源モデルを図 9 に示す。なお高レベルに汚染した原子炉ウェル上部に近接した西側床面上の空間線量率は、原子炉ウェル上部からの放射線の影響が無視できないものと思われるため、西側床面上の空間線量率は、西側床面の汚染と原子炉ウェル上部の汚染によるものと仮定した。このため 3.2.1 で推定した原子炉ウェル上部の放射線量より、西側床面の中央高さ 1m での線量率を算出し（45mSv/h）、同付近の東京電力の実測 78mSv/h から差し引いた 33mSv/h を、西側床面線源モデルに相当する線量率と仮定した。次に 33mSv/h になるように QAD 計算を行い、西側床面の放射線量 6.96×10^{12} Bq、及び汚染密度 1.55×10^6 Bq/cm² を推定した。西側床面線源

放射エネルギーの推定モデルを図 10 に示す。

3.3 オペレーティングフロア計測の可否

オペフロ調査時の γ -eye II による計測可否を評価するため、BOP 開口部からの計測条件での、原子炉ウェル上部線源及び西側床面線源からの放射線強度を推定した。QAD 計算には、 γ -eye II で計測した際の 1 セルに相当する面積で厚さ 1cm の直方体線源モデルを仮定し、縦、横ともに 100 等分（計 1 万）の線源分割した計算モデルを使用した。線源の汚染密度は、3.2 で推定した原子炉ウェル上部と西側床面のそれぞれの推定値を用いた。なお東京電力からの情報をもとに、 γ -eye II の設置高さは、オペフロ平面より高さ 4m、計測距離は、原子炉ウェル上部中央までを 20m、西側床面中央までを 30m として計算した。計算モデルを表 5 に、計算結果を図 11 に示す。

計算結果より、原子炉ウェル上部からの放射線による線量率は 1 セルあたり 1.7mSv/h、西側床面からは 1 セルあたり 0.071mSv/h であると推測できた。 γ -eye II の検出下限値は 0.1 mSv/h であるため、原子炉ウェル上部の計測は可能であるが、西側床面は検出下限値未満であるため計測困難であることが予測できた。

3.4 汚染密度算出手法の検討

ガンマカメラは線源からの放射線強度を計測するものであり、線源までの距離や線源の状態（表面汚染なのか、内部汚染なのか、あるいは被写体を透過した放射線なのか）が分からない場合、汚染密度を正しく評価することはできない。また空間分解能の 1 つのセル内に投影される被写体表面までの距離は、一般に様でないことから、特に面線源を測定する場合、汚染密度を正しく評価することはできない。このため、種々の仮定をもとにオペフロの汚染分布及び汚染密度を推定する解析手法の検討を行った。はじめに γ -eye II で面線源を測定する際の特徴を検討した。本検討は 3.3 と同様の計算モデルで計算した。

3.4.1 距離影響評価

原子炉ウェル上部の直上より 5m、10m、20m 離れた地点における γ -eye II 計測で得られる 1 セルあたりの線量率を推定した。なお原子炉ウェル上部の放射エネルギーは 3.2.1 の推定値とし、BG 放射線の影響は無視した。計算モデルを表 6 に、計算結果を図 12 に示す。

計算結果が示す通り、線量率は計測対象からの距離に係わらず一定である。点線源であれば、計測対象からの距離の二乗に反比例して線量率が減少するが、面線源の場合は、計測対象からの距離の二乗に比例して計測する面積も増加するため、計測対象の放射エネルギーも距離の二乗に比例して増加し、線量率は計測対象からの距離に係わらず一定である。

3.4.2 角度影響評価

原子炉ウェル上部に対して 10m 離れた同心円上の 30°、45°、60°の地点の γ -eye II 計測

で得られる1セルあたりの線量率を推定した。なお3.4.1と同様に原子炉ウェル上部の放射エネルギーは3.2.1の推定値とし、BG放射線の影響は無視した。計算モデルを表7に、計算結果を図13に示す。

計算結果より、線量率は計測対象面に対する角度が鋭角になるにつれ増加することがわかった。これは角度が鋭角になるにつれ、計測対象の面積が増加し、それに伴い計測対象の放射エネルギーが増加するためである。

3.4.3 汚染密度算出方法

オペフロは平滑な平面で、 γ -eye IIで計測された放射線は、全てオペフロ平面の表面汚染からの寄与であると仮定した。汚染密度は、検出面1セルあたりの計測値を測定対象面中心までの距離で距離補正し、Cs-137の1cm線量当量係数を用いて放射エネルギーを算出し、これを検出面1セルに投影されるオペフロ平面の面積で除して、表面汚染密度とした。

また各セルの表面汚染密度を汚染レベル毎に表記し、オペフロ平面の汚染分布とした

3.4.4 点線源計測と面線源計測の比較

3.4.3で示した、1cm線量当量係数を用いた距離補正は、本来点線源に対して行われる補正手法である。そこで、オペフロの様な面線源を点線源とみなして距離補正が可能であることを確認した。

ガンマカメラの空間分解能の1つのセル内に投影される被写体表面までの距離は、被写体に対する計測角度が鋭角になるにつれ、手前と奥では大きく異なる。 γ -eye II計測のセル内に、同量の放射エネルギーがそれぞれ存在する点線源と面線源からの線量率の比較を計算した結果を図14に示す。なお3.4.1と同様に、放射エネルギーは3.2.1の推定値、BG放射線の影響は無視し、線源から10m離れた同心円上の各地点での計算を実施した。

この結果、20°以上の角度では面線源を点線源とみなして評価できることが分かった。またこれよりも鋭角になる場合は、面線源評価の影響が大きくなることがわかった。

以上のことより、大半の計測角度で点線源とみなして計測値の距離補正を行い、線源を表面汚染と仮定して放射エネルギーの評価が可能であること、また計測角度が鋭角な場合でも、放射エネルギーを過小評価しないことが分かった。

3.5 事前検討結果

2号機オペフロの空間線量マップを基に作成した線源モデルを用いたQAD計算により、原子炉ウェル上部計測時には検出下限値以上の放射線が得られ、西側床面計測時には検出下限値以上の放射線が得られないことがわかった。

また、 γ -eye IIで計測した放射線を用いたオペフロの表面汚染密度を解析する手法を検討し、大半の計測角度で測定対象を点線源とみなして計測値の距離補正が行え、20°未満の鋭角についても過小評価とならないことがわかった。

4. 事前確認試験

4.1 概要

γ -eye II の校正は Cs-137 のコリメータ・ビーム線源で実施され、この点線源以外、顕著な放射線が入射しない条件で行った。しかしオペフロ汚染部位計測では、高い BG 環境で計測を行うため、BG 放射線の影響は無視できない。このため、1F の高 BG 環境下での性能確認を行う事前確認試験を実施した（平成 24 年 12 月 5 日）。またその際、オペフロ調査を模擬した免震重要棟からの無線遠隔操作の確認も合わせて行った。

4.2 試験状況

事前確認試験では、平成 23 年 8 月に東京電力が検出した高線量汚染個所である 1・2 号機主排気筒（以下、「スタック」という。）とこれに接続する非常用ガス処理系配管（以下、「SGTS 配管」という。）¹⁰を計測対象とした。事前確認試験の配置図を図 15 に示す。 γ -eye II は汚染防止用養生箱内に収納した状態でトラックの荷台に積み、2 カ所の設置位置（図 15①と②）よりそれぞれスタック及び SGTS 配管の計測を行った。事前確認試験イメージを図 16 に示す。

この SGTS 配管の高線量汚染個所については、東京電力の測定で表面付近の線量率が 10Sv/h を超えていた。このことから SGTS 配管の高線量汚染個所を点線源（10cm 位置での 10Sv/h となる）と仮定すると、ここから 10～20m 離れた地点（図 15）でも γ -eye II の検出下限値である 0.1mSv/h を十分に超える放射線が得られることから、この周辺で試験を行うこととした。SGTS 配管周辺の空間線量率は 5.5mSv/h と高く、ここから離れた 1、2 号機周辺でも 1～2mSv/h の空間線量率であった。以上より、SGTS 配管周辺での γ -eye II 計測状況は、計測対象である高線量汚染個所以外にも BG 放射線の影響を受ける高線量環境下での試験であり、オペフロ調査の事前確認試験として妥当であると判断した。

なお、スタックや SGTS 配管の高線量汚染部の方向に γ -eye II の向き合わせる調整は、トラックの停車位置の調整と、トラック荷台上で作業員の手動による汚染防止用養生箱の向きの調整で行った。これら γ -eye II の設置作業は高線量環境下での作業のため、限られた時間の中で効率よく作業を実施しなければならなかったため、計測は各対象 1 方向のみで行った。

4.3 事前確認試験の結果

4.3.1 事前確認試験時の検出下限値

設置位置 I の空間線量率は 3.42mSv/h、BG 計数率の最大値は 26cps であった。また設置位置 II の空間線量率は 3.48mSv/h、BG 計数率の最大値は 40cps であった。これらのことから事前確認試験の検出下限値は、以下の 3σ 法の式で求められ、

$$n_d = \frac{k}{2} \left[\frac{k}{t_s} + \sqrt{\left(\frac{k}{t_s}\right)^2 + 4n_b \left(\frac{1}{t_s} + \frac{1}{t_b}\right)} \right]$$

ここで、

n_d : 検出下限値 (cps)

n_b : バックグラウンド計数率 (cps)

t_s : 計測時間 (sec)

t_b : バックグラウンド計測時間 (s)

k : 標準誤差の倍数 = 3

設置位置 I では、5.9cps、設置位置 II では、7.1cps であることが分かった。

4.3.2 計測結果

計測の結果、東京電力が検出したほぼ同位置に強い放射線を発する箇所が複数確認できた。計測結果を図 17 に示す。これらは SGTS 配管に沿って検出されており、確認された線源位置に高濃度の汚染源が存在している可能性が高いことが分かった。

なお設置位置①の計測結果において検出下限値以上を検出した複数のセルが SGTS 配管からずれているが、これは被写体を撮影する際にトラック荷台が上下に震動したため、被写体のスナップ映像と放射線計測分布が上下にずれたものと考えられる。今後、線源位置を詳細に特定するには、多方向からの計測を行うことで可能となる。

設置位置①の計測結果について、各高線量部位の線源を Cs-137 の点線源と仮定し、線源までの距離約 14m で距離補正を行い、線源から 10cm 位置での線量率を評価し、総和を求めた。その結果、線量率の総和は 16Sv/h となり、東京電力の実測値 (10Sv/h 超) と比べ妥当な値あることが分かった。

4.3.3 正面放射線の寄与

正面とそれ以外からの放射線の影響を確認するために、事前確認試験の設置位置における空間線量率に占める正面からの放射線の寄与率をまとめた。

先述「2.2.2 バックグラウンド線量率感度」の通り γ -eye II の BG 線量率感度は、シャッターを閉じた状態で正面からの放射線に対する PD の感度は 7 cps/(mSv/h)、正面以外からの放射線に対する PD の感度は最大で 42 cps/(mSv/h)であり、 γ -eye II の BG 計数率の関係は以下の通りであると仮定した。

$$d_t = d_f + d_a$$

$$n_b = 7d_f + 42d_a$$

ここで、

d_t : 空間線量率 (mSv/h)

- d_f : 正面からの線量率 (mSv/h)
 d_a : 正面以外からの線量率 (mSv/h)
 n_b : BG 計数率 (cps)

上式より正面からの放射線による線量率は以下の式で表される。

$$d_f = \frac{42d_t - n_b}{35}$$

以上のことから空間線量率に占める正面放射線の寄与率は、設置位置①では 98%、設置位置②では 88%であった。

4.4 オペレーティングフロア調査への γ -eye II の適用性の確認

高線量 BG 環境下での γ -eye II 計測は、BG 放射線の影響が大きく、低線量 BG 環境下と比べ、検出下限値が高くなるので、これを低く抑えるためには、計測時間を長くすることや、追加遮へいを施すことが必要となる。また、オペフロ調査の環境は、東京電力によるオペフロの空間線量率の計測結果 (図 1) より、BOP 開口部周辺 (図 7) は 154mSv/h と確認されているため、 γ -eye II 設置位置の空間線量率は事前確認試験の環境に比べ高いことが予想された。そこで事前確認試験の結果から、オペフロ調査に γ -eye II が適用できるかどうか、また BG 放射線による γ -eye II の BG 計数率を推定し、オペフロ調査に適した計測条件を検討した。

4.4.1 オペフロ調査への γ -eye II の適用性

事前確認試験とオペフロ調査における正面放射線の寄与の割合を比較することにより、オペフロ調査への γ -eye II の適用性を評価した。

3.2.1 で作成した原子炉ウェル線源モデルを使用し、 γ -eye II 設置予定位置での原子炉ウェルからの線量率寄与を計算した。 γ -eye II 設置位置は、原子炉ウェル中心より平面で 14m 離れ、高さ 3.65m に設置とした。計算体系を表 8 に示す。計算結果より、 γ -eye II 設置位置では正面からの放射線は 45mSv/h の寄与があるとした。また正面以外からの放射線については、1F の建屋周辺サーベイマップ¹¹⁾の 2 号機周辺の線量率 2.1mSv/h と同等の影響を受けると仮定した。

これらのことからオペフロ調査では空間線量率に占める正面放射線の寄与の割合は 96% であると推定した。これは事前確認試験の設置位置②の 88% よりも BG 影響が小さく好条件であることから、オペフロ調査に γ -eye II が適用可能であり、追加遮へいは不要であると評価した。

4.4.2 オペフロ調査時の BG 計数率及び検出下限値の推定

正面以外の BG 放射線の寄与は、PD 感度が最大となる 42cps/(mSv/h)として、BOP 開口部付近における γ -eye II 計測の BG 計数率を以下の通り推定した。

$$45\text{mSv/h} \times 7\text{cps}/(\text{mSv/h}) + 2.1\text{mSv/h} \times 42\text{cps}/(\text{mSv/h}) = 403\text{cps}$$

推定した BG 計数率を用い、計測時間を変数として、 3σ 法により検出下限値の変動を算出した結果を表 9 に示す。この結果をもとに、オペフロ調査時の計測時間は、1セル当たり 105s とした。

4.5 事前確認試験結果

これらのことから、数 mSv/h の空間線量率環境においても γ -eye II は放射線計測の空間分解能を有していること、定量的な計測が可能であることを確認した。また、オペフロ調査を想定した BG 環境においても、適当な計測時間をつけることで有意な計測が可能であることを確認した。さらに、無線遠隔操作が可能であることを確認した。

5. オペレーティングフロア調査

5.1 調査状況

γ -eye II によるオペフロ調査は、装置をクレーンで吊り上げ、BOP 開口部脇の構台上に設置して行った。オペフロ調査イメージを図 18 に、装置の設置状況の写真を図 19 に示す。 γ -eye II 計測は、オペフロ平面から高さ 3.65m の位置から床面を見下ろすように、チルト角度を水平面より -20° 下げて実施した。計測は 3 方向についてそれぞれ 7 回行った。計測時間は、1 セル当たり 105s とした。

5.2 調査結果

計測結果を図 20 に示す。各方向とも 7 回の計測結果を平均化した結果を図 21 に示す。これらの結果より、原子炉ウェル上部からの放射線が強く、また BOP 近傍の床にも強く放射線を発する線源が検出できた。原子炉ウェル上部より奥の西側床面は検出下限値未満であることがわかった。

なお計測 III については、測定 I、II と違い、7 回の各計測において、高線量箇所も一定せず、傾向が大きく異なった。そのため、測定 III は全般的にデータの信頼性が低いと判断し以下の解析においては除外することとした。計測 III では、原子炉ウェル上部が γ -eye II の斜め 60° の方向となり、 γ -eye II の正面（被写体方向）に比べ原子炉ウェル上部からの BG 放射線の影響を強く受けたため、正しい計測ができなかったものと思われる。

6. オペレーティングフロアの汚染分布推定

6.1 オペフロ平面汚染分布の推定

3.4.3 汚染密度算出方法によりオペフロ計測結果をオペフロ平面の表面密度に計算し、オペフロの汚染分布を推定した。測定 I 及び II のオペフロ平面の表面密度分布を図 22 に示す。

これらの推定結果より測定範囲における主たる汚染源は原子炉ウェル上部であり、これらの汚染は一律でなく、 $1 \times 10^2 \text{MBq/cm}^2$ から $1 \times 10 \text{MBq/cm}^2$ の分布があり、特に中心部南側が高いことが確認された。

また原子炉ウェル上部の他に、BOP 開口部付近の床面にも原子炉ウェル上部と同程度の密度の汚染箇所があることが確認できた。

6.2 オペフロ内機器の影響評価

オペフロ平面汚染分布の推定は、オペフロを平滑な平面として仮定しているため、オペフロ上にある新燃料検査台支柱、新燃料検査台下部、チャンネル着脱器操作架台、新燃料点検架台等（図 21 参照）の存在は無視している。しかし、実際にこれらの表面にも汚染が付着して線源となり、また、これらが遮へい体となり背後の放射線を遮へいするので、 γ -eye II 計測への影響を考慮しなければならない。このためこれらの機器毎に以下の評価を行った。なお機器の材質等の情報は東京電力より入手した。

(1) 新燃料検査台支柱

新燃料検査台支柱は炭素鋼で合計約 2cm の厚みとし、Cs-137 に対する鉄の半価層より、当該機器の背後からの放射線を 6 割遮へいすると仮定した。図 21 計測 I の結果より、当該機器の影響範囲である計測セルは、セル内全てに当該機器が映っているため、6 割遮へいの減衰分を補正し背後のオペフロ平面の表面汚染密度を再評価した。

(2) 新燃料検査台下部

新燃料検査台下部に関する情報は入手できなかったため、再評価の対象外とした。

(3) チャンネル着脱器操作架台

チャンネル着脱器操作架台は、遮へい能力が十分高く、背後の放射線を完全に遮へいできると仮定した。図 21 計測 I の結果より、当該機器の影響範囲である計測はセル内の被写体の面積比より 22% が完全に遮へいされ、同様に計測 II の結果よりセル内の 45% が完全に遮へいされると仮定して、背後のオペフロ平面の表面汚染密度を再評価した。

(4) 新燃料点検架台

新燃料点検架台に相当するセルの有意値は、図 21 計測 II の結果の通り当該機器に沿って分布している。また写真より当該機器はシートに覆われ、内部の充填具合は不明である。このため新燃料点検架台に相当するセルの計測値は、当該機器を覆ったシート状の汚染による放射線と、当該機器の背後の線源からの 2 つの放射線またはこれらの合算であると考えられるが、以下の再評価では、当該機器を覆ったシートの表面汚染が線源と仮定し、背

後のオペフロ平面の汚染は評価から除外した。

(5) 原子炉建屋外壁

原子炉建屋外壁は遮へい能力が十分高く、背後の放射線を完全に遮へいできると仮定した。そのため、図 20 計測 I の結果より建屋外壁の影響範囲である計測セルの有意値は、建屋外壁の表面汚染と仮定し、背後のオペフロ平面の汚染は評価から除外した。

再評価後のオペフロ平面の表面密度分布を図 23 に示す。新燃料検査台支柱、チャンネル着脱器操作架台による影響を考慮したことにより、原子炉ウェル中央部の表面汚染密度は増加する結果となった。新燃料点検架台に相当するセルの有意値は、北西階段まで帯状に伸びていたが、当該機器の設置位置に相当するセルに集約した。

7. γ -eye II によるオペレーティングフロア汚染部位計測結果の検証

7.1 γ -eye II 計測結果に基づく線源モデル及びオペフロ線源体系

前章までの γ -eye II 計測によるオペフロの表面汚染密度分布の推定結果をもとに、3 つの条件でオペフロの空間線量率の推定値をもとめる QAD 計算を行い、東京電力が測定した地点の空間線量率の実測値（図 1）と比較して、 γ -eye II によるオペフロ汚染部位計測結果の検証を行った。

計算モデルの汚染核種は、3 章と同様に Cs-134 と Cs-137 の均一汚染（組成比 4 : 6）とし、遮へい物は空気、線源の自己遮へい及び床等による散乱は無視した。

オペフロ線源体系は、6 章で推定した汚染分布図をもとに計測 I と計測 II を重ね合わせた線源体系とした。なお汚染分布図は台形であるが、計算を簡便化するため、 γ -eye II 設置位置近傍を中心とする厚さ 1cm の扇形状の線源体系とした。このため各線源モデルは、汚染分布の個々のセルを厚さ 1cm の扇形状のモデルとし、角度方向、径方向にそれぞれ 100 等分（計 1 万）に線源分割した。放射エネルギーは各セルの推定汚染密度からもとめ、各セル内の分割した線源については、線源毎の放射エネルギーが全ての線源について放射能密度が同様になるように調整した。線源体系イメージを図 24 に示す。計測 I と計測 II の線源モデルが重なる箇所については、放射エネルギーが多く推定されている計測 II を優先させることとした。また壁面と床面の両方を測定しているセルについては、壁面と床面は均一に汚染していると仮定し、壁面と床面の面積比に応じて放射エネルギーを分割させ、床面の放射エネルギーのみを線源モデルに付与した。

線源分割は、線源モデル毎に、径方向及び角度方向をそれぞれ 100 等分の計 1 万分割とした（図 24 参照）。評価点は、オペフロ平面高さ 1m とし、東京電力の実測値に相当する地点とした。評価点を図 25 に示す。

(1) 条件 I

オペフロ上の機器による遮へい及び表面汚染による影響は考慮せず、また有意な計測値が得られなかった（検出下限値未満）セルには、検出下限値に相当する放射エネルギーを代入し、線源モデルを作成した。線源体系を図 26 に示す。

(2) 条件 II

オペフロ上の機器による遮へい及び表面汚染による影響を考慮せず、有意値が得られなかった（検出下限値未満）セルの放射エネルギーはゼロとして、線源モデルを作成した。線源体系は条件 I と同様とした。

(3) 条件 III

オペフロ上の機器による遮へい及び表面汚染による影響を考慮し、有意値が得られな

った（検出下限値未満）セルの放射エネルギーはゼロとして、線源モデルを作成した。

なお新燃料点検架台を覆ったシートの表面汚染による空間線量の影響については、 γ -eye II 設置位置近傍を中心とする厚さ 1cm の薄い円筒を径方向に切断した図形により模擬し、セルに合わせ角度方向及び高さ方向に分割した各々の線源モデルとした。線源分割は角度方向、高さ方向にそれぞれ 100 等分の計 1 万分割した。線源体系を図 27 に示す。

7.2 オペフロ空間線量率の推定値と実測値の比較、及び汚染分布推定の検証

各条件より計算したオペフロ空間線量率の推定値を、東京電力が測定した実測値と比較評価した。各評価点の推定値と実測値の比が、2 を上回る場合を過大評価、0.5 を下回る場合を過小評価、0.5 以上 2 以下を妥当評価とした。評価結果を表 10 及び図 28 に示す。

条件 I の結果より、 γ -eye II 計測で有意値が得られた原子炉ウェル上部付近では妥当評価が多く、検出下限値未満のセルに検出下限値相当の値を代入して算出したセル付近の評価点では過大評価が多くなった。実測値を上回る空間線量率となることは、推定のもととなる汚染密度の推定が過大と言うことであり、 γ -eye II 計測結果で検出下限値未満のセルに検出下限値に相当する汚染密度を代入したことは妥当ではないことが分かった。また、計測範囲外の評価点については、過小評価が多くなった。このことより、計測範囲外にも何らかの汚染が存在すると思われる。

条件 II の結果より、 γ -eye II 計測結果が検出下限値未満のセル付近における空間線量率の推定値の過大評価は無くなったが、過小評価の評価点が発生した。このことは検出下限値未満のセルにおいても、汚染密度がゼロではなく、検出下限値未満の汚染が存在しており、汚染密度としては 10MBq/cm² 未満であると推定される。

条件 III の結果より、いくつかのことが考察できる。まず 1 つは、条件 I 及び II において過大評価となっていた、新燃料点検架台の影響範囲である北西階段付近の評価点 1 が過小評価となった。このことは新燃料点検架台背後の汚染ではなく、新燃料点検架台表面あるいは当該機器を覆うシート上の汚染が線源になったことを示しているものと考えられる。ただし評価点 1 は過小評価であることから北西階段付近の汚染もゼロではないと思われる。

また 1 つは、条件 II で過小評価であった新燃料検査台支柱の影響範囲である評価点 36 を含む周辺の多くの評価点が妥当評価になったことである。これは機器の遮へい影響等の推定が妥当であったためと思われる。

最後に、BOP 開口部付近北側の評価点 43 については、条件 I、II、III の全てにおいて過大評価であった。この評価点付近のセルは評価上密になっており、局所汚染の場合、実測値と推定値の評価位置の違いが大きく影響する。このためこの付近に高線量汚染が存在するものと思われるが、推定値の評価地点が実測地点と異なったため、過大評価になったものと思われる。なお実測値は東京電力の空間線量率マップ(図 1)より読み取っており、目測誤差が影響したものと思われる。

以上のことより、条件 II と条件 III の検証結果を比較すると、条件 II では過大評価となっ

た北西の評価点が条件Ⅲでは過大評価でなくなったこと及び条件Ⅱでは過小評価であった有意値が得られた周辺の評価点が条件Ⅲでは妥当評価になったことから、条件Ⅲが最適な線源モデルであることがわかった。

7.3 オペフロ汚染分布

前項の検証結果より、 γ -eyeⅡ計測で検出下限値以上の有意値が得られた範囲については、オペフロ上の機器の影響を考慮して空間線量率を推定すると実測値とほぼ合致しており、線源モデルの元となった図 23 の表面密度分布が γ -eyeⅡで計測した範囲のオペフロの汚染分布であると思われる。

8. 得られた知見

1F2号機原子炉建屋オペフロ調査に γ -eye IIを適用することによって、ハード・ソフト共にさまざまな知見を得ることができた。内容を以下に示す。

8.1 ハード

(1) Cs-137を使った校正試験により、 γ -eye IIのBG影響は照射角度に大きく依存し、BG放射線に対するPDの感度が最大で6倍の差異があることがわかった。事前に計測可否の評価を行うためには、検出下限値の評価が非常に重要であり、BG計数率より検出下限値を求めるためにもBG影響の評価が必要である。しかし、複数の線源が存在する環境下で計測を行う際は、これら全ての照射角度を基にPDの感度を考慮しBG計数率を評価しないと検出下限値の正確な評価ができないため、計測の可否を評価することが非常に困難である。そのため、 γ -eye IIのBG影響の照射角度依存性を遮へい厚等により解消することにより、照射線量率が一定であれば、照射角度によらずBG計数率の換算係数が一定となり、検出下限値の評価が容易となり、角度依存性を考慮することなくガンマカメラを取り扱うことができる。以上の事より、BG影響の角度依存性を小さくすることで、どのような線源配置環境下でも、容易に計測可否評価を行い計測が可能となる。

(2) γ -eye IIによるオペフロ調査では、高線量環境下での計測であったため、検出下限値は検出素子の範囲0.1mSv/h以上より上昇した0.2~0.28mSv/h以上となった。BG放射線が増加することにより、検出下限値が上昇する。そのため、鉛等の遮へいを増加によりBG放射線を減衰させることは、BGの影響を小さくし検出下限値を下げることに有効である。しかし、検出器重量の増加は、雲台等の強大化等に繋がるため、装置全体の構成・重量等の考慮が必要となる。

(3) 今後の設備機器の解体撤去においては、Csだけでなく種々の放射性物質により汚染されていると考えられることより、放射線エネルギースペクトル分析が可能な検出素子を採用し、核種同定を考慮する必要がある。

8.2 ソフト

(1) 事前に計測可否を評価することは非常に重要である。計測可否を評価するためには計測範囲の最小単位である1セルに映る範囲から照射される線量率を評価する必要がある。しかし、線源が広く分布した対象を計測する際に計測される線量は、この一部である1セルに映る範囲から入射する線量のみであるため、計測機設置位置の空間線量率と大きく異なる。そこで本調査では、1セルで計測できる範囲を面線源とみなせる薄い体積線源と仮定したQAD計算により1セル当たりの線量率を計算することにより、計測可否を評価した。QAD計算により得た1セル当たりの線量率は、実測値とよく合っていたため、この手法は有効であった。

(2) 本調査では、計測により得られた線量率は、全て面線源からの寄与であるとして表面

汚染密度の評価を行った。表面密度の評価に使用した計測範囲の面積は、計測装置の設置高さ及び計測角度より算出した。設置高さについては設置台の高さより、計測角度についてはジャイロセンサーを使用することにより取得した。本調査ではこれらの結果を基に三角法で計測範囲の面積を算出した。しかし、レーザースキャナ等により撮影範囲の 3 次元情報を即時取得することにより、ガンマカメラより得られた線量率情報を元に計測対象の表面密度を即時評価し、視覚化できる可能性がある。ただし、計測範囲に存在する障害物等については、6.2 の様に別途評価する必要がある。

(3) 本調査では、調査により得られた表面汚染密度分布を基に、QAD 計算により計測値の妥当性を評価した。撮影範囲のセルを、それぞれ一様に汚染された面線源であると仮定し、撮影範囲の線源は、薄い扇型の体積線源の集合体に模擬し QAD 計算を行ったところ、東京電力が測定した空間線量率の実測値と良く合っていた。そのため、ガンマカメラにより表面汚染密度を計測した際の計測値の検証手法として、それぞれの線源を一様に汚染された面線源と仮定し、薄い扇型の体積線源の集合体に模擬した QAD 計算による空間線量率の比較は有効であった。

9. まとめ

JAEAが開発したガンマカメラ（ γ -eye II）が1F2号機のオペフロの汚染分布や汚染密度の推定の適応可能かどうか、事前に汚染密度算出方法を検討し、また高線量環境下での γ -eye IIの測定条件等の確認する事前確認試験を行い、オペフロ調査を実施した。その結果、 γ -eye IIの性能を実証するとともに、オペフロ内機器の影響を考慮した、1F2号機オペフロの表面密度分布を作成した。これにより以下のことがわかった。

- γ -eye II計測範囲における主たる汚染源が原子炉ウェル上部にあること。
- 原子炉ウェル上部の汚染は $1 \times 10^2 \text{MBq/cm}^2$ から $1 \times 10 \text{MBq/cm}^2$ の分布があり、中心部南側が最も高いこと。
- BOP 開口部付近の床面にも原子炉ウェル上部と同程度の汚染密度の局所汚染があること。
- γ -eye II計測範囲内の原子炉ウェル上部の奥のオペフロ西側床面の汚染の大部分については、 10MBq/cm^2 未満であること。
- 推定した汚染密度をもとに空間線量率の簡易評価を行った結果、東京電力が測定した実測値と概ね合致していたため、 γ -eye II計測と汚染密度算出方法はオペフロ汚染部位計測に適していたこと。
- γ -eye II計測範囲外についてもなんらかの汚染があること。

また、 γ -eye IIによる1F2号機のオペフロ汚染調査の実証を通じて、以下に示す汚染部位調査用ガンマカメラ開発に関する種々の知見が得られた。

- 検出素子の感度に関するBG放射線の角度依存性を小さくする工夫が必要。
- 高線量環境下での計測には、BG放射線を減衰させる鉛遮へいの増加が有効であるが、検出部重量の増加は雲台の強大化等に繋がり、装置全体の構成・重量等の考慮も必要。
- 汚染部位調査の簡易法としてフォトダイオード検出素子も有効であるが、種々の汚染調査への対応のため、放射線エネルギースペクトル分析による核種同定の考慮も必要。
- QAD計算により1セルから入射する線量率を計算することで、計測可否の評価が可能。
- レーザースキャナ等との併用により計測範囲の面積を即時取得し、計測対象の表面密度を容易に評価できる可能性あり。ただし、障害物の影響評価は別途必要。
- 計測結果を基にしたQAD計算により、計測結果の妥当性確認が可能。

謝辞

オペフロ調査に当たり、東京電力及び核サ研放射線管理部の諸氏に種々な助言や援助をいただき、ここに深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 東京電力、福島第一原子力発電所2号機原子炉建屋内調査結果(3階～5階)(平成24年6月13日実施)、記者会見配布資料(2012-6-12)、(online) available from <http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/images/handouts_120614_02-j.pdf> (accessed 2012-9-4).
- 2) 川妻伸二、岡田尚、福島峰夫、中井宏二、三村竜二、金山文彦、遠隔操作技術に係る福島第一原子力発電所事故対応(1)原子力機構における遠隔操作技術支援の概要、日本原子力学会「2012年春の年会」、(2012)。
- 3) 岡田尚、中井宏二、五十嵐幸、川妻伸二、遠隔操作技術に係る福島第一原子力発電所事故対応(2)ロボットコントロール車の開発、日本原子力学会「2012年春の年会」、(2012)。
- 4) 三村竜二、金山文彦、岡田尚、川妻伸二、遠隔操作技術に係る福島第一原子力発電所事故対応(3)ガンマ線可視化計測装置搭載偵察プラットフォームの開発、日本原子力学会「2012年春の年会」、(2012)。
- 5) 川妻伸二、日本原子力研究開発機構の原子力災害ロボット；福島第一原子力発電所事故への緊急対応とその教訓、Science Academy of Tsukuba、20、pp.15-18(2011)。
- 6) 小林忠義、宮島和俊、柳原敏、情報遠隔収集ロボットの開発、月刊消防、6月号、262号、pp.22-26、(2001)。
- 7) 小林忠義、宮島和俊、柳原敏、原研における事故対応ロボットの開発(その1)情報遠隔収集ロボットの開発、日本ロボット学会誌、Vol.19 No.6、pp.706-709、(2001)。
- 8) Y. Sakamoto and Shun-ichi Tanaka, "QAD-CGGP2 and G33-GP2: Revised Versions of QAD-CGGP and G33-GP", JAERI-M 90-110 (1990)。
- 9) 東京電力、水処理設備の放射能濃度測定結果、記者会見配布資料(2012-8-3)、(online) available from <http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/images/handouts_120803_01-j.pdf> (accessed 2012-9-4).
- 10) 東京電力、10Sv/h超の高線量線源の現場写真・γカメラ画像、記者会見配布資料(2011-8-2)、(online) available from http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/images/handouts_110802_01-j.pdf (accessed 2013-6-25).
- 11) 東京電力、建屋周辺サーベイマップ【10月22日現在】、福島第一原子力発電所サーベイマップ(2012-11-12)、(online) available from <<http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/fl/images/fl-sv-20121112-j.pdf>>(accessed 2013-6-25).

表 1 1F での実施スケジュール

H24 年 11 月	12 月	H25 年 1 月	2 月
▲ 11/20 現地調査	▲ 12/5 事前確認試験	▲ 1/8 オペフロ調査 1 回目	▲ 2/21 オペフロ調査 2 回目

表 2 γ -eye II 仕様

測定原理	ピンホール型コリメータ
測定項目	γ 線強度 (Cs-137 線源校正)
測定範囲	0.1mSv/h~10mSv/h (検出面にて)
測定画角	水平 42°、垂直 50°
分解能	14 行×14 列 (196 セル) 1 セル : 55cm×67cm (10m 先)
検出素子	フォトダイオード 縦 14 個(1 列)を横 (14 列/1 回) に走査
測定時間	走査速度 (0.1 s/列、0.6s/列、1s/列) 任意回数測定可能 (1 回~99 回)
距離補正	レーザ測域計により全セル測定
チルト角度	+40° ~-20° (角度センサにより読み取り)
BG 補正	シャッタの開閉により BG 補正

表 3-1 放射線計測表 (0.1mSv/h)

		列													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
行	PD 14	0.4 (14)	0.0 (28)	0.0 (42)	0.0 (56)	0.0 (70)	0.3 (84)	0.4 (98)	0.1 (112)	0.0 (126)	0.0 (140)	0.0 (154)	0.0 (168)	0.2 (182)	0.0 (196)
	PD 13	0.2 (13)	0.0 (27)	0.0 (41)	0.0 (55)	0.0 (69)	0.3 (83)	0.0 (97)	0.4 (111)	0.0 (125)	0.0 (139)	0.0 (153)	0.1 (167)	0.2 (181)	0.0 (195)
	PD 12	0.0 (12)	0.0 (26)	0.0 (40)	0.0 (54)	0.0 (68)	0.0 (82)	0.1 (96)	0.0 (110)	0.0 (124)	0.0 (138)	0.0 (152)	0.0 (166)	0.1 (180)	0.0 (194)
	PD 11	0.3 (11)	0.0 (25)	0.1 (39)	0.1 (53)	0.0 (67)	0.0 (81)	0.1 (95)	0.1 (109)	0.2 (123)	0.0 (137)	0.0 (151)	0.0 (165)	0.0 (179)	0.0 (193)
	PD 10	0.0 (10)	0.1 (24)	0.0 (38)	0.0 (52)	0.1 (66)	0.1 (80)	0.2 (94)	0.1 (108)	0.0 (122)	0.0 (136)	0.0 (150)	0.0 (164)	0.3 (178)	0.0 (192)
	PD 9	0.0 (9)	0.1 (23)	0.0 (37)	0.1 (51)	0.2 (65)	0.0 (79)	0.2 (93)	0.1 (107)	0.0 (121)	0.0 (135)	0.2 (149)	0.1 (163)	0.0 (177)	0.0 (191)
	PD 8	0.1 (8)	0.0 (22)	0.0 (36)	0.0 (50)	0.1 (64)	0.4 (78)	0.7 (92)	1.1 (106)	0.3 (120)	0.0 (134)	0.0 (148)	0.0 (162)	0.0 (176)	0.0 (190)
	PD 7	0.0 (7)	0.0 (21)	0.0 (35)	0.1 (49)	0.0 (63)	0.0 (77)	1.9 (91)	5.8 (105)	1.3 (119)	0.0 (133)	0.0 (147)	0.0 (161)	0.0 (175)	0.1 (189)
	PD 6	0.0 (6)	0.0 (20)	0.1 (34)	0.1 (48)	0.0 (62)	0.5 (76)	0.9 (90)	0.7 (104)	0.1 (118)	0.2 (132)	0.1 (146)	0.0 (160)	0.0 (174)	0.0 (188)
	PD 5	0.0 (5)	0.0 (19)	0.2 (33)	0.0 (47)	0.0 (61)	0.1 (75)	0.1 (89)	0.0 (103)	0.0 (117)	0.0 (131)	0.0 (145)	0.1 (159)	0.0 (173)	0.0 (187)
	PD 4	0.0 (4)	0.1 (18)	0.0 (32)	0.0 (46)	0.2 (60)	0.1 (74)	0.0 (88)	0.0 (102)	0.0 (116)	0.3 (130)	0.0 (144)	0.0 (158)	0.0 (172)	0.0 (186)
	PD 3	0.0 (3)	0.0 (17)	0.1 (31)	0.3 (45)	0.1 (59)	0.1 (73)	0.0 (87)	0.1 (101)	0.0 (115)	0.1 (129)	0.1 (143)	0.0 (157)	0.0 (171)	0.0 (185)
	PD 2	0.0 (2)	0.0 (16)	0.1 (30)	0.0 (44)	0.0 (58)	0.1 (72)	0.0 (86)	0.0 (100)	0.0 (114)	0.1 (128)	0.0 (142)	0.0 (156)	0.0 (170)	0.3 (184)
	PD 1	0.0 (1)	0.2 (15)	0.0 (29)	0.1 (43)	0.0 (57)	0.0 (71)	0.1 (85)	0.1 (99)	0.0 (113)	0.0 (127)	0.1 (141)	0.0 (155)	0.0 (169)	0.4 (183)

単位 : cps

※ () 内はセル番号

表 3-2 放射線計測表 (1mSv/h)

		列													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
行	PD 14	0.0 (14)	1.3 (28)	0.0 (42)	0.0 (56)	0.0 (70)	0.0 (84)	0.0 (98)	0.0 (112)	0.3 (126)	0.0 (140)	0.0 (154)	1.2 (168)	0.0 (182)	0.0 (196)
	PD 13	0.7 (13)	1.8 (27)	0.0 (41)	0.0 (55)	0.0 (69)	0.8 (83)	0.0 (97)	0.3 (111)	0.8 (125)	0.5 (139)	0.8 (153)	0.6 (167)	0.0 (181)	0.3 (195)
	PD 12	0.9 (12)	0.0 (26)	0.5 (40)	0.0 (54)	0.0 (68)	0.0 (82)	0.5 (96)	1.2 (110)	0.0 (124)	0.0 (138)	0.0 (152)	0.0 (166)	2.3 (180)	0.0 (194)
	PD 11	0.0 (11)	0.0 (25)	0.0 (39)	0.0 (53)	0.5 (67)	0.2 (81)	0.2 (95)	0.0 (109)	0.0 (123)	0.0 (137)	0.0 (151)	0.5 (165)	0.3 (179)	0.0 (193)
	PD 10	0.6 (10)	0.0 (24)	1.0 (38)	0.7 (52)	0.7 (66)	0.0 (80)	0.0 (94)	0.0 (108)	0.6 (122)	0.0 (136)	0.9 (150)	0.0 (164)	0.0 (178)	0.8 (192)
	PD 9	0.0 (9)	2.3 (23)	0.0 (37)	0.2 (51)	1.1 (65)	0.4 (79)	1.0 (93)	0.0 (107)	0.6 (121)	0.4 (135)	1.8 (149)	0.0 (163)	0.3 (177)	0.0 (191)
	PD 8	0.5 (8)	0.0 (22)	1.4 (36)	1.3 (50)	0.2 (64)	0.6 (78)	4.0 (92)	6.4 (106)	5.3 (120)	1.5 (134)	0.4 (148)	0.5 (162)	0.3 (176)	0.0 (190)
	PD 7	0.0 (7)	0.5 (21)	0.0 (35)	0.2 (49)	0.4 (63)	0.0 (77)	19.4 (91)	48.6 (105)	8.9 (119)	1.5 (133)	0.4 (147)	0.0 (161)	0.0 (175)	0.0 (189)
	PD 6	1.1 (6)	0.0 (20)	0.5 (34)	0.4 (48)	0.4 (62)	2.5 (76)	6.1 (90)	6.5 (104)	4.3 (118)	0.4 (132)	0.7 (146)	0.7 (160)	0.0 (174)	0.0 (188)
	PD 5	0.0 (5)	0.3 (19)	0.0 (33)	0.0 (47)	0.0 (61)	0.0 (75)	0.8 (89)	1.3 (103)	0.0 (117)	0.0 (131)	1.1 (145)	0.0 (159)	0.3 (173)	0.0 (187)
	PD 4	0.0 (4)	0.3 (18)	0.3 (32)	0.2 (46)	0.2 (60)	0.2 (74)	1.3 (88)	0.4 (102)	1.1 (116)	0.9 (130)	0.0 (144)	0.3 (158)	0.5 (172)	0.0 (186)
	PD 3	0.6 (3)	0.0 (17)	0.8 (31)	0.8 (45)	0.5 (59)	0.9 (73)	0.0 (87)	0.0 (101)	0.0 (115)	1.0 (129)	0.8 (143)	1.6 (157)	0.0 (171)	0.0 (185)
	PD 2	0.0 (2)	0.0 (16)	0.3 (30)	0.0 (44)	0.3 (58)	0.0 (72)	0.0 (86)	0.8 (100)	0.0 (114)	0.0 (128)	0.0 (142)	0.0 (156)	0.3 (170)	1.6 (184)
	PD 1	0.0 (1)	0.0 (15)	0.0 (29)	1.5 (43)	0.0 (57)	1.9 (71)	0.5 (85)	0.3 (99)	0.0 (113)	0.0 (127)	0.3 (141)	0.3 (155)	0.3 (169)	1.8 (183)

単位 : cps

※ () 内はセル番号

表 3-3 放射線計測表 (10mSv/h)

		列													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
行	PD 14	0.7 (14)	2.0 (28)	0.0 (42)	0.0 (56)	4.8 (70)	0.8 (84)	0.0 (98)	0.0 (112)	1.1 (126)	4.8 (140)	0.0 (154)	0.0 (168)	0.0 (182)	3.5 (196)
	PD 13	5.9 (13)	0.0 (27)	0.0 (41)	3.8 (55)	0.0 (69)	0.8 (83)	2.8 (97)	0.0 (111)	0.8 (125)	0.0 (139)	0.5 (153)	0.0 (167)	0.0 (181)	0.0 (195)
	PD 12	0.0 (12)	0.0 (26)	0.0 (40)	4.6 (54)	0.2 (68)	0.0 (82)	2.6 (96)	1.4 (110)	2.4 (124)	0.0 (138)	0.0 (152)	0.8 (166)	0.0 (180)	0.3 (194)
	PD 11	2.6 (11)	0.3 (25)	0.0 (39)	0.0 (53)	6.7 (67)	0.0 (81)	0.0 (95)	0.0 (109)	7.8 (123)	0.0 (137)	0.0 (151)	1.0 (165)	0.5 (179)	0.0 (193)
	PD 10	3.1 (10)	1.3 (24)	1.7 (38)	5.3 (52)	7.3 (66)	3.6 (80)	3.1 (94)	0.0 (108)	10.0 (122)	0.2 (136)	0.0 (150)	0.0 (164)	0.0 (178)	0.0 (192)
	PD 9	0.6 (9)	4.3 (23)	0.0 (37)	2.9 (51)	0.0 (65)	0.0 (79)	3.3 (93)	1.4 (107)	1.4 (121)	2.1 (135)	0.0 (149)	2.8 (163)	0.0 (177)	0.6 (191)
	PD 8	0.0 (8)	0.0 (22)	0.7 (36)	2.9 (50)	1.7 (64)	4.5 (78)	47.2 (92)	106.2 (106)	52.6 (120)	2.5 (134)	2.2 (148)	0.0 (162)	0.0 (176)	0.0 (190)
	PD 7	0.3 (7)	0.0 (21)	3.5 (35)	2.2 (49)	2.3 (63)	0.0 (77)	202.0 (91)	459.2 (105)	105.7 (119)	1.3 (133)	2.4 (147)	0.0 (161)	0.0 (175)	0.0 (189)
	PD 6	3.9 (6)	1.3 (20)	1.7 (34)	2.0 (48)	1.7 (62)	9.1 (76)	40.2 (90)	56.3 (104)	46.7 (118)	10.2 (132)	2.7 (146)	1.2 (160)	0.0 (174)	4.1 (188)
	PD 5	0.6 (5)	2.3 (19)	0.0 (33)	0.0 (47)	4.6 (61)	0.0 (75)	1.9 (89)	0.0 (103)	7.5 (117)	8.1 (131)	0.0 (145)	0.7 (159)	0.0 (173)	0.6 (187)
	PD 4	0.0 (4)	2.2 (18)	0.0 (32)	4.3 (46)	0.0 (60)	4.5 (74)	0.9 (88)	0.0 (102)	0.9 (116)	3.0 (130)	1.9 (144)	0.8 (158)	0.5 (172)	0.6 (186)
	PD 3	0.0 (3)	2.9 (17)	0.0 (31)	0.0 (45)	0.0 (59)	3.6 (73)	0.5 (87)	0.0 (101)	0.2 (115)	2.2 (129)	0.0 (143)	0.0 (157)	0.9 (171)	5.5 (185)
	PD 2	4.6 (2)	2.4 (16)	0.0 (30)	2.2 (44)	4.4 (58)	1.3 (72)	1.5 (86)	0.3 (100)	1.3 (114)	0.0 (128)	2.2 (142)	3.7 (156)	0.0 (170)	0.0 (184)
	PD 1	1.8 (1)	0.0 (15)	2.8 (29)	1.5 (43)	0.8 (57)	0.0 (71)	3.3 (85)	0.0 (99)	0.0 (113)	0.0 (127)	0.0 (141)	0.0 (155)	0.0 (169)	4.2 (183)

単位 : cps

※ () 内はセル番号

表 4 PD7 との感度比及び線量率換算係数

PD No.	PD7との比 (%)	換算係数 (mSv/h/cps)
1	116	0.020064
2	84	0.014530
3	112	0.019253
4	95	0.016419
5	94	0.016169
6	81	0.014022
7	100	0.017241
8	104	0.017987
9	94	0.016291
10	94	0.016213
11	87	0.014989
12	105	0.018021
13	105	0.018124
14	95	0.016351

表 5 オペレーティングフロア計測可否評価計算モデル

BOP 外側より 原子炉ウェル上部を測定	線源形状	直方体
	線源サイズ(x×y×z)	130cm×650cm×1cm
	線源分割数(x×y)	100×100
	線源中心(x, y, z)cm	(0, 0, 0)
	放射エネルギー	Cs-137 : 2.79×10 ¹² Bq Cs-134 : 1.86×10 ¹² Bq
	評価点(x, y, z)cm	1960, 0, 400
	遮へい物	空気のみ
BOP 外側より 西側床面を測定	線源形状	直方体
	線源サイズ(x×y×z)	195cm×1477cm×1cm
	線源分割数(x×y)	100×100
	線源中心(x, y, z)cm	(0, 0, 0)
	放射エネルギー	Cs-137 : 2.67×10 ¹¹ Bq Cs-134 : 1.78×10 ¹¹ Bq
	評価点(x, y, z)cm	3000, 0, 400
	遮へい物	空気のみ

表 6 距離影響評価計算モデル

測定距離 5m	線源形状	直方体
	線源サイズ(x×y×z)	32.5cm×32.5cm×1cm
	線源分割数(x×y)	100×100
	線源中心(x, y, z) cm	(0, 0, 0)
	放射エネルギー	Cs-137 : 3.49×10 ¹⁰ Bq Cs-134 : 2.32×10 ¹⁰ Bq
	評価点(x, y, z) cm	0, 0, 500
	遮へい物	空気のみ
測定距離 10m	線源形状	直方体
	線源サイズ	65cm×65cm×1cm
	線源分割数	100×100
	線源中心(x, y, z) cm	(0, 0, 0)
	放射エネルギー	Cs-137 : 1.39×10 ¹¹ Bq Cs-134 : 9.29×10 ¹⁰ Bq
	評価点(x, y, z) cm	0, 0, 1000
	遮へい物	空気のみ
測定距離 20m	線源形状	直方体
	線源サイズ	130cm×130cm×1cm
	線源分割数	100×100
	線源中心(x, y, z) cm	(0, 0, 0)
	放射エネルギー	Cs-137 : 5.58×10 ¹¹ Bq Cs-134 : 3.72×10 ¹¹ Bq
	評価点(x, y, z) cm	0, 0, 2000
	遮へい物	空気のみ

表 7 角度影響評価計算モデル

測定角度 30°	線源形状	直方体
	線源サイズ(x×y×z)	65cm×130cm×1cm
	線源分割数(x×y)	100×100
	線源中心(x, y, z) cm	(0, 0, 0)
	放射エネルギー	Cs-137 : 2.79×10 ¹¹ Bq Cs-134 : 1.86×10 ¹¹ Bq
	評価点(x, y, z) cm	866, 0, 500
	遮へい物	空気のみ
測定角度 45°	線源形状	直方体
	線源サイズ	65cm×92cm×高さ 1cm
	線源分割数	100×100
	線源中心(x, y, z) cm	(0, 0, 0)
	放射エネルギー	Cs-137 : 1.97×10 ¹¹ Bq Cs-134 : 1.31×10 ¹¹ Bq
	評価点(x, y, z) cm	707, 0, 707
	遮へい物	空気のみ
測定角度 60°	線源形状	直方体
	線源サイズ	65cm×75cm×高さ 1cm
	線源分割数	100×100
	線源中心(x, y, z) cm	(0, 0, 0)
	放射エネルギー	Cs-137 : 1.61×10 ¹¹ Bq Cs-134 : 1.07×10 ¹¹ Bq
	評価点(x, y, z) cm	500, 0, 866
	遮へい物	空気のみ

表 8 γ -eye II 設置位置での原子炉ウェルからの線量率寄与計算モデル

	線源形状	円柱
	線源サイズ (r × ϕ × h)	600cm × 360° × 1cm
	線源分割数 (r × ϕ)	100 × 100
	線源中心 (r、 ϕ 、h) cm	(0、0、0)
	放射エネルギー	Cs-137 : 3.73×10^{13} Bq Cs-134 : 2.49×10^{13} Bq
	評価点 (r、 ϕ 、h) cm	1400、0、365
	遮へい物	空気のみ

表 9 オペフロ調査時の検出下限値予想

測定回数	測定時間 (sec)	BG 計数率 (cps)	検出下限値 (mSv/h)
1	15	6,048	0.38
2	30	12,096	0.27
3	45	18,144	0.22
4	60	24,192	0.19
5	75	30,240	0.17
6	90	36,288	0.15
7	105	42,336	0.14
8	120	48,384	0.13
9	135	54,432	0.13
10	150	60,480	0.12

注 1 : PD7 の換算係数より検出下限値を計算

表 10-1 評価結果(1/2)

評価点	東京電力 実測値 mSv/h	計算条件 1		計算条件 2		計算条件 3	
		評価値 mSv/h	評価値 /実測値	評価値 mSv/h	評価値 /実測値	評価値 mSv/h	評価値 /実測値
1	57	213	3.74	156	2.73	12	0.21
2	52	154	2.96	49	0.93	12	0.23
3	47	168	3.57	59	1.26	13	0.27
4	44	179	4.07	36	0.81	17	0.40
5	45	169	3.76	29	0.64	16	0.36
6	40	173	4.33	27	0.68	17	0.43
7	67	214	3.19	46	0.68	31	0.47
8	111	260	2.34	84	0.76	64	0.57
9	44	169	3.84	25	0.57	18	0.41
10	85	219	2.57	44	0.52	33	0.39
11	146	249	1.70	72	0.50	59	0.40
12	59	167	2.82	25	0.42	20	0.33
13	128	216	1.69	36	0.28	30	0.23
14	153	307	2.01	169	1.10	174	1.14
15	55	161	2.92	25	0.45	21	0.38
16	78	245	3.14	50	0.64	47	0.60
17	220	269	1.22	131	0.59	145	0.66
18	230	332	1.44	246	1.07	281	1.22
19	48	164	3.42	25	0.51	22	0.46
20	60	188	3.14	34	0.57	31	0.52
21	99	245	2.48	103	1.04	105	1.06
22	356	409	1.15	338	0.95	340	0.96
23	376	403	1.07	344	0.91	337	0.90
24	77	182	2.36	45	0.58	42	0.55
25	127	231	1.82	116	0.91	112	0.88
26	173	236	1.36	153	0.89	141	0.81
27	81	163	2.01	55	0.68	52	0.64
28	133	164	1.23	79	0.60	69	0.52
29	78	93	1.20	16	0.20	14	0.18
30	80	99	1.24	32	0.40	29	0.37

表 10-2 評価結果(2/2)

評価点	東京電力 実測値 mSv/h	計算条件 1		計算条件 2		計算条件 3	
		評価値 mSv/h	評価値 /実測値	評価値 mSv/h	評価値 /実測値	評価値 mSv/h	評価値 /実測値
31	84	104	1.24	32	0.38	29	0.35
32	80	86	1.07	44	0.55	40	0.50
33	83	69	0.84	26	0.32	24	0.29
34	139	56	0.40	30	0.22	27	0.20
35	783	682	0.87	610	0.78	656	0.84
36	506	341	0.67	251	0.50	290	0.57
37	880	944	1.07	888	1.01	986	1.12
38	829	934	1.13	881	1.06	937	1.13
39	401	488	1.22	438	1.09	437	1.09
40	415	418	1.01	377	0.91	354	0.85
41	530	394	0.74	300	0.57	290	0.55
42	250	542	2.17	377	1.51	334	1.34
43	154	605	3.93	494	3.21	729	4.73
44	207	99	0.48	65	0.31	55	0.27
45	190	72	0.38	47	0.25	39	0.20
46	114	54	0.48	35	0.31	30	0.26

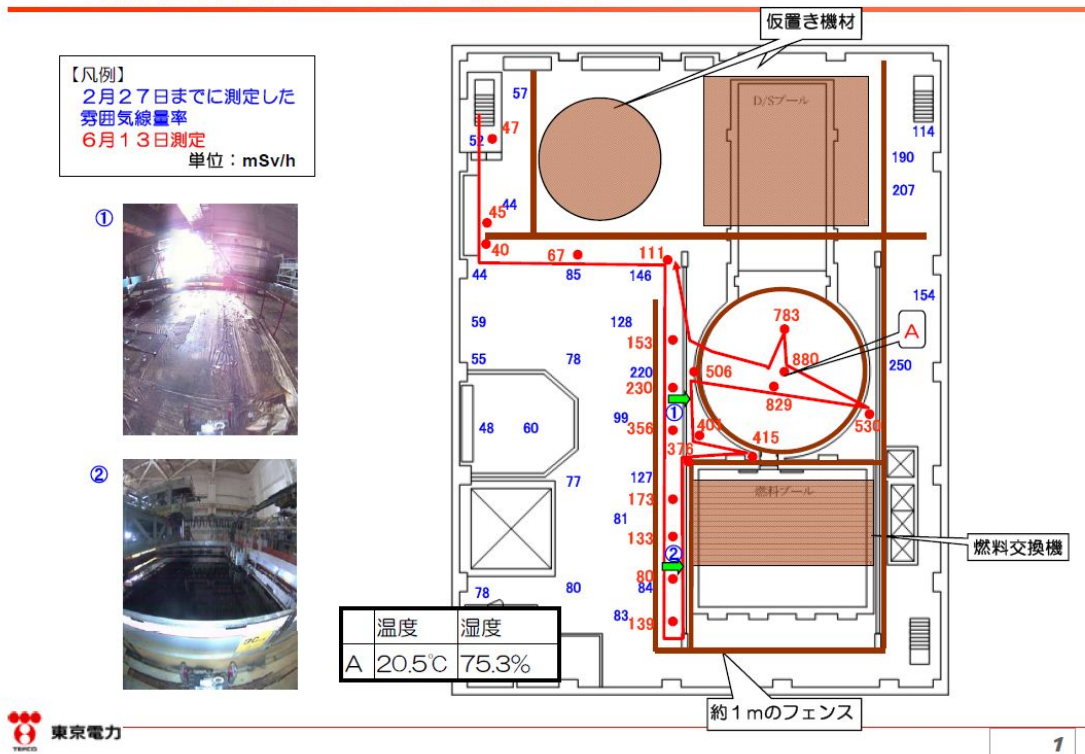
注 1: 計算条件 1 は障害物の影響を考慮せず、 γ -eye II 計測で検出下限値未満のセルの放射量を検出下限値で求めた放射エネルギーを代入

注 2: 計算条件 2 は障害物の影響を考慮せず、検出下限値未満のセルの放射エネルギーは 0 を代入

注 3: 計算条件 3 は障害物の影響を考慮し、検出下限値未満のセルの放射エネルギーは 0 を代入

注 4: 赤く塗られた欄は評価値と実測値の比が 2 を上回る場合を、黄色く塗られた欄は評価値と実測値の比が 0.5 以上 2 以下も場合を、青く塗られた欄は評価値と実測値の比が 0.5 を下回る場合を示す。

2号機原子炉建屋 5階 調査結果



(東京電力 HP より抜粋)

図1 東京電力ロボットによる計測で得られた
2号機オペフロの床面高さ1mの空間線量率マップ

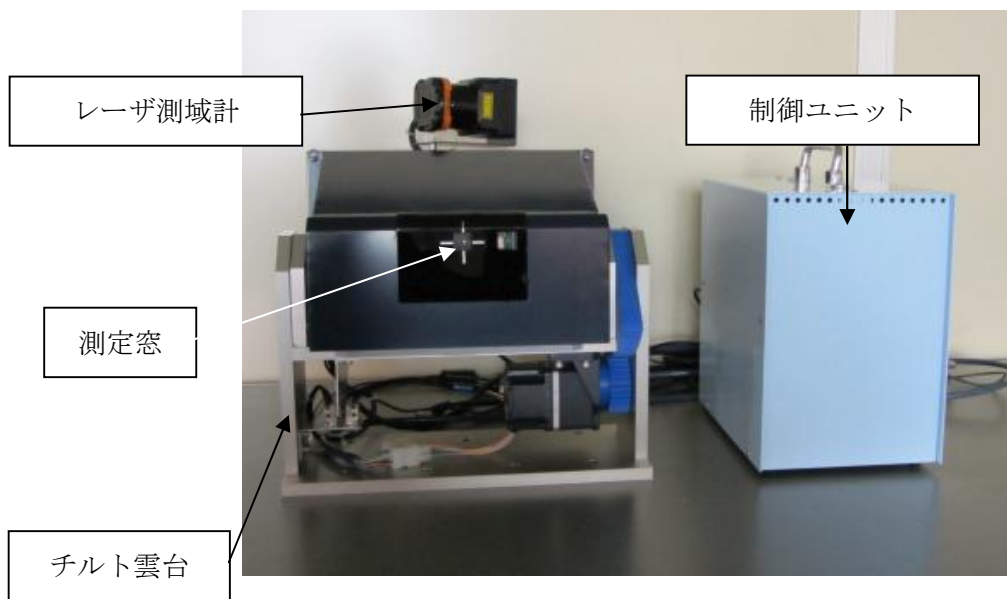


図2 γ-eye II 外観写真

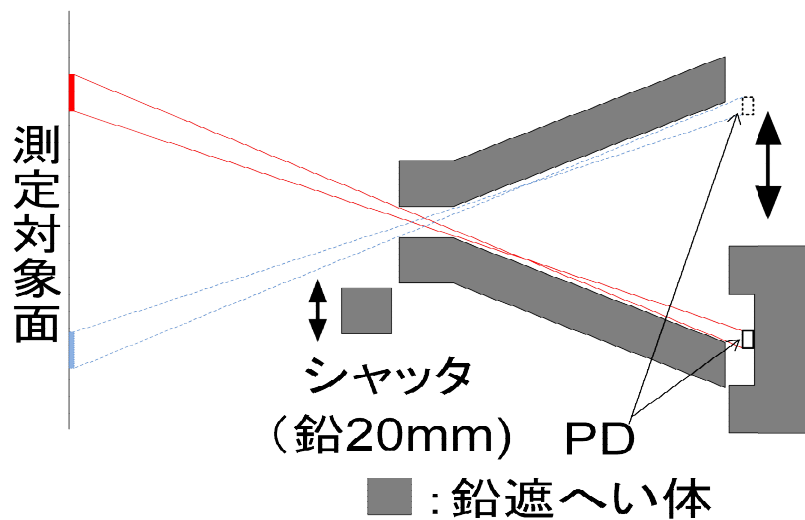


図3 γ -eye II 水平断面概略図

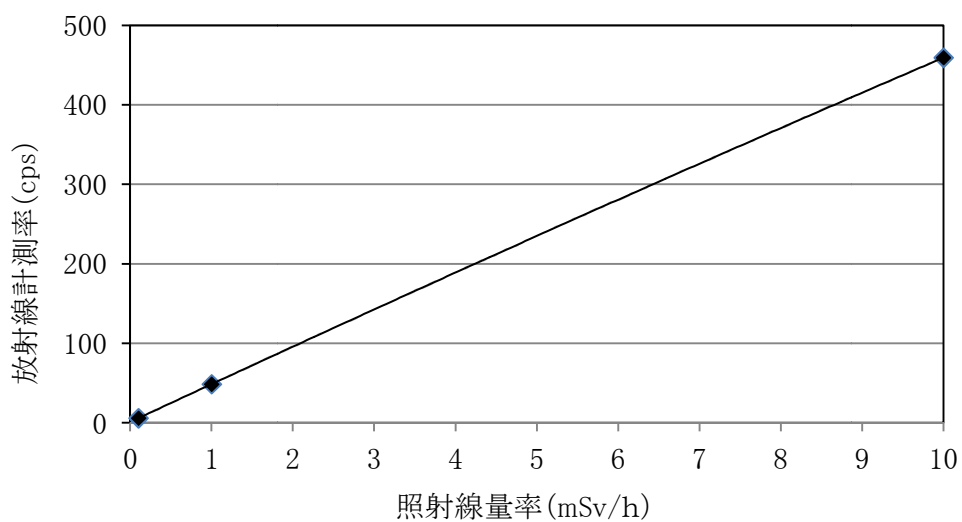


図4 照射線量率と放射線計測率の関係

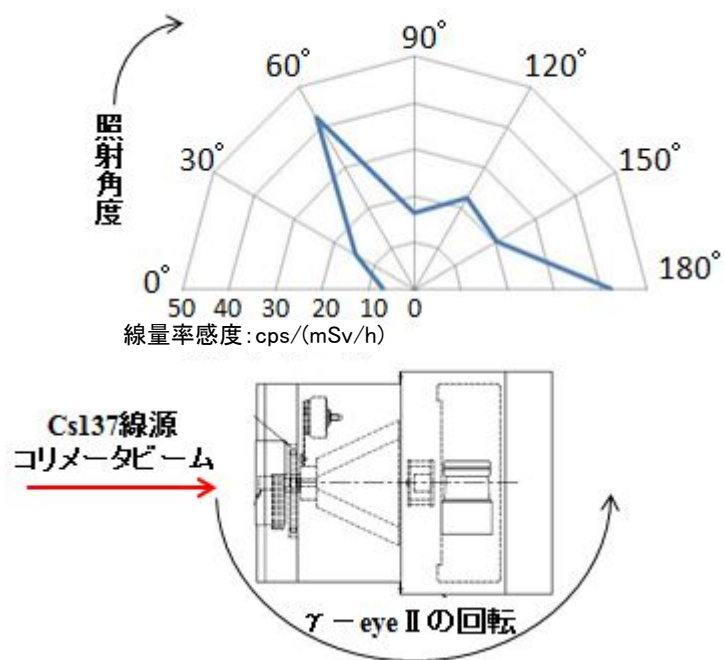


図 5-1 照射角度と全 PD の計数率の最大値（水平方向）

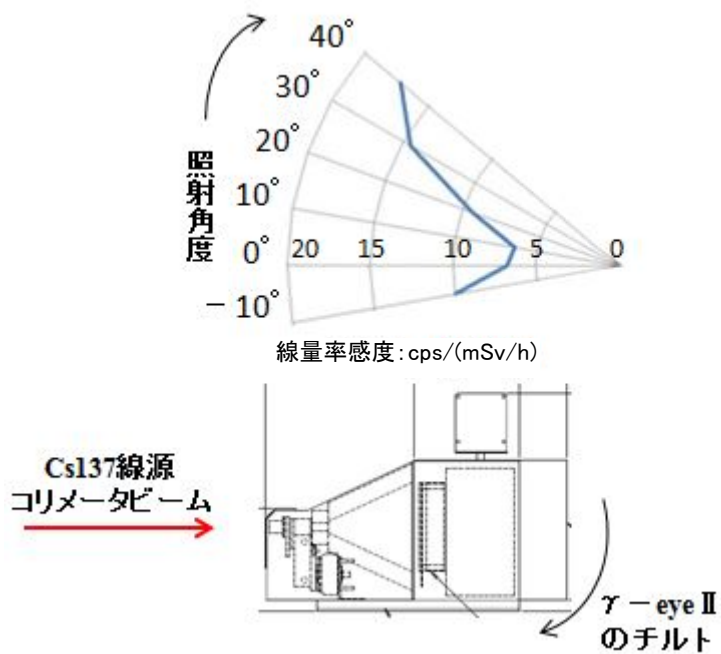


図 5-2 照射角度と全 PD の計数率の最大値（垂直方向）

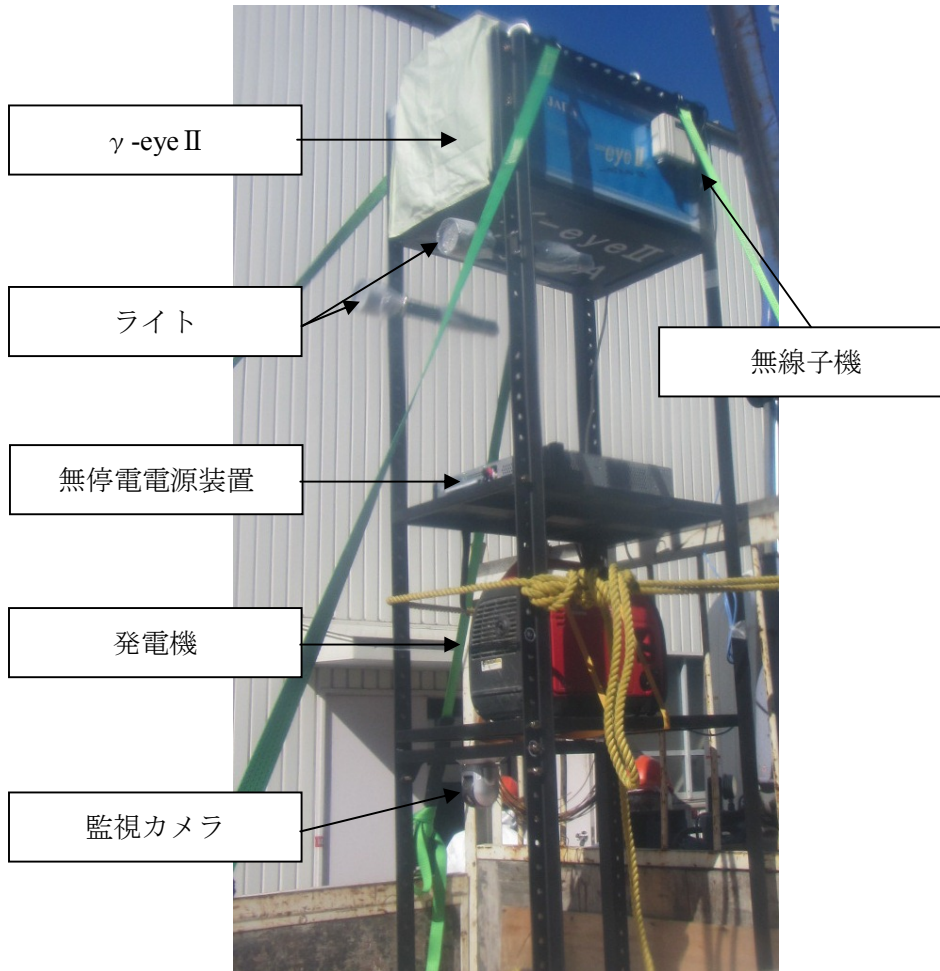


図6 オペフロ計測用装置

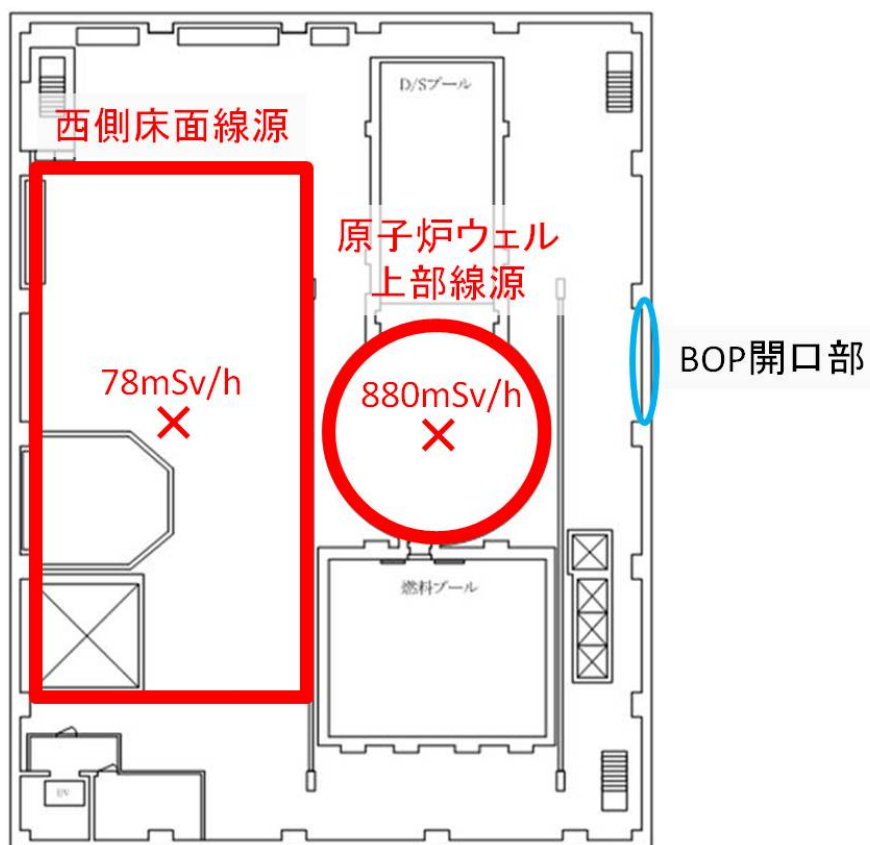
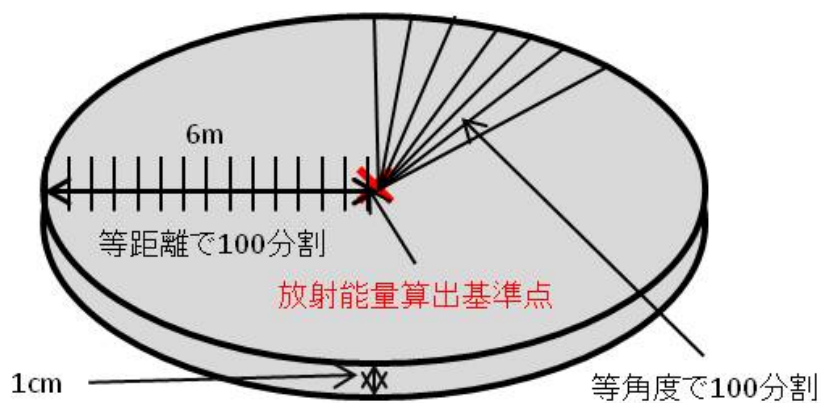
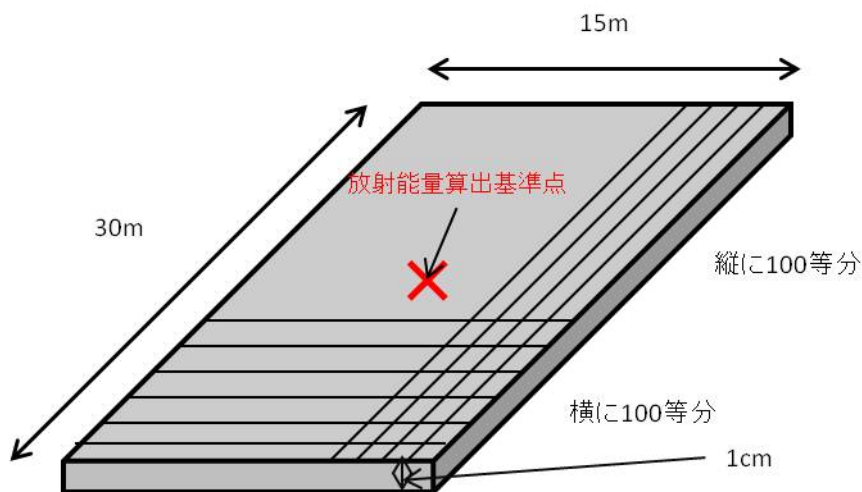


図7 線源想定



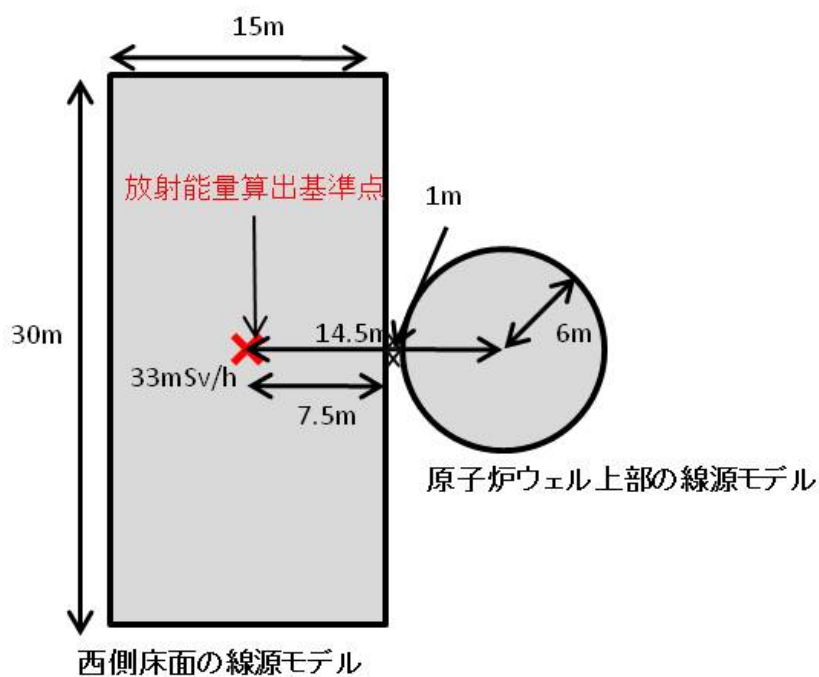
- ※1 原子炉ウェル上部を一様に汚染した面線源と仮定
- ※2 薄い体積線源(1万個の線源の集合体で模擬)で、面線源を模擬
- ※3 線源中央高さ1mの点(放射能量算出基準点)で 880mSv/h (原子炉ウェル中心部の実測値)になるように放射能量を設定($5.5 \times 10^7\text{Bq/cm}^3$)

図8 原子炉ウェル上部線源モデル



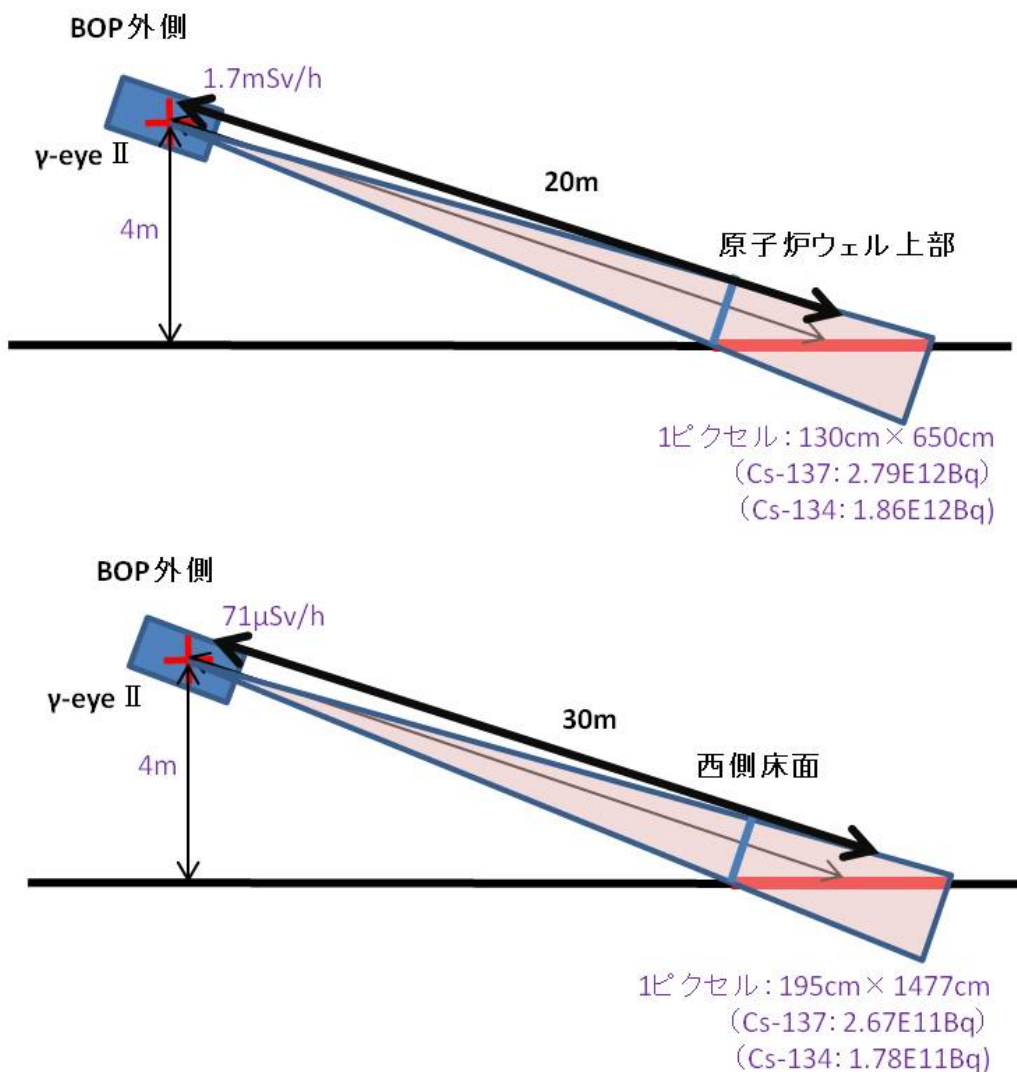
- ※1 西側床面を一様に汚染した面線源と仮定
- ※2 薄い体積線源(1万個の線源の集合体で模擬で、面線源を模擬)

図9 西側床面線源モデル



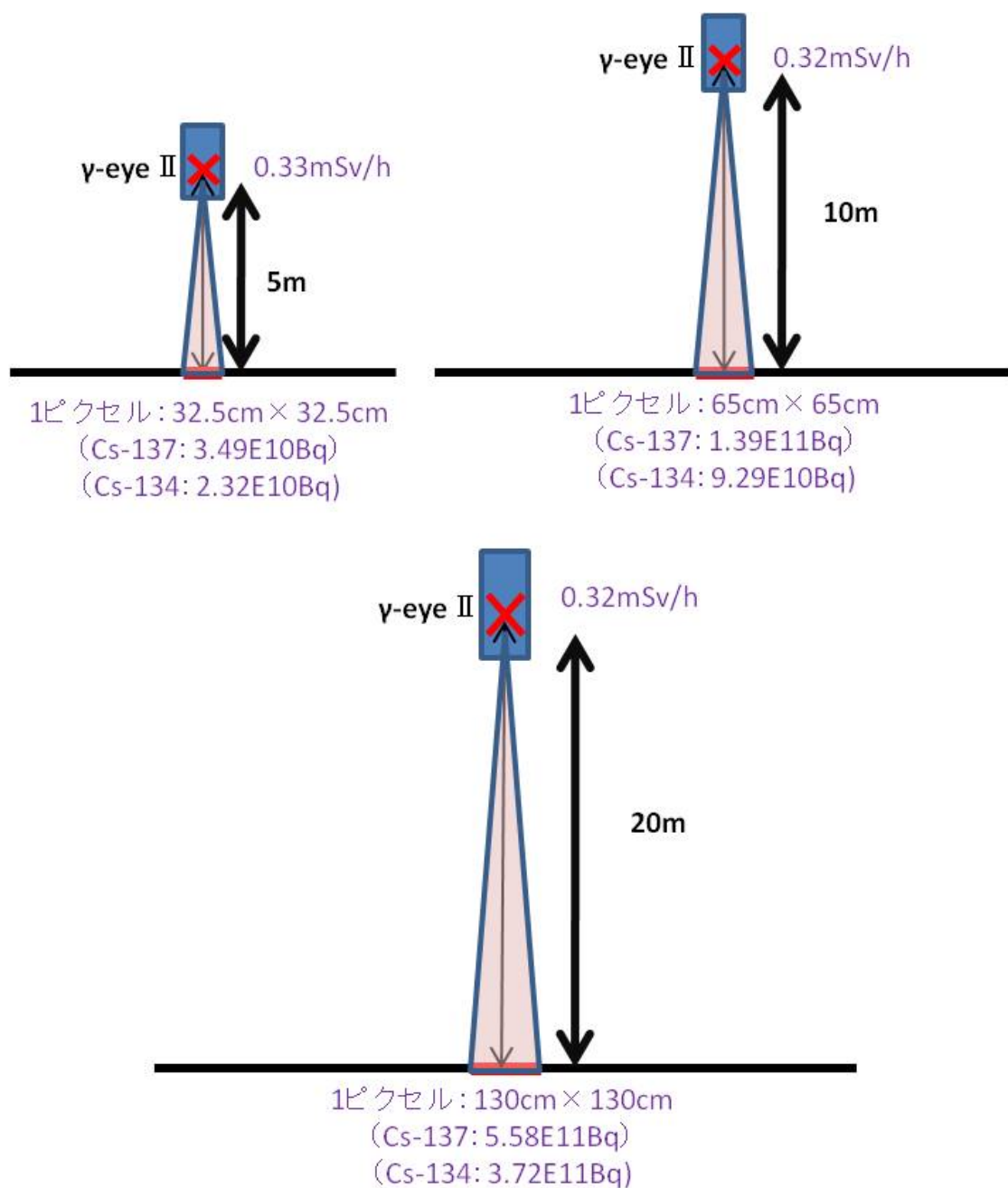
- ※1 西側床面を一様に汚染した面線源と仮定
- ※2 薄い体積線源(1万個の線源の集合体で模擬)で、面線源を模擬
- ※3 線源中央高さ1mの点(放射能量算出基準点)で33mSv/hになるように放射エネルギーを設定($1.5 \times 10^6 \text{Bq/cm}^3$)
- 78mSv/h(原子炉ウェル上部中心から14.5mの点でのQuinceによる測定値(H24/2/27以前))
- 45mSv/h(原子炉ウェル上部中心から14.5mの点での原子炉ウェル上部からの線量率計算値)

図10 西側床面線源放射能量推定モデル



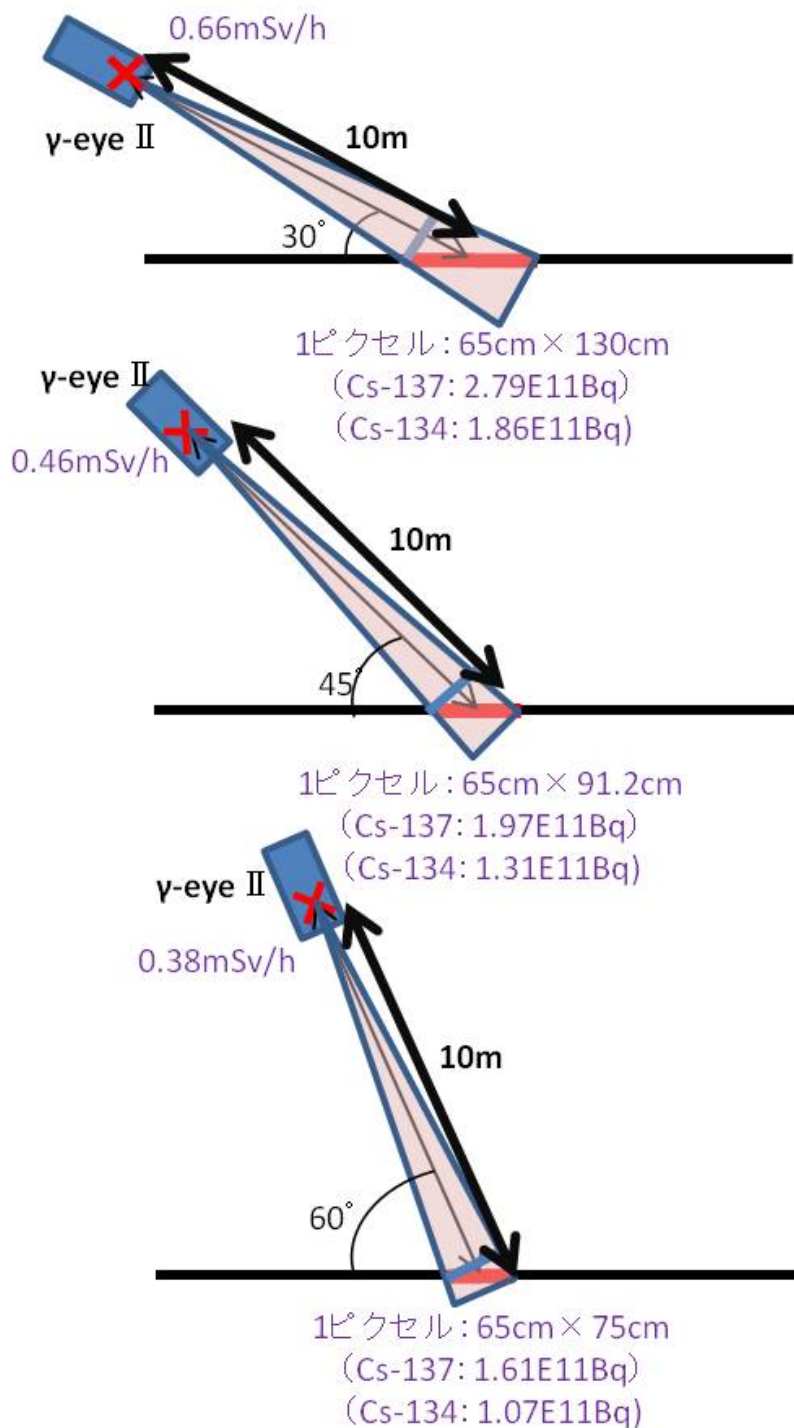
※線源モデルは原子炉ウェル上部線源、西側床面線源の一部(1ピクセル分)を100×100分割した線源

図 11 オペレーティングフロア計測可否評価計算結果



※線源モデルは原子炉ウェル上部線源の一部(1ピクセル分)を100×100分割した線源

図 12 距離影響評価計算結果



※ 線源モデルは原子炉ウェル上部線源の一部(1ピクセル分)を
100×100分割した線源

図 13 角度影響評価計算結果

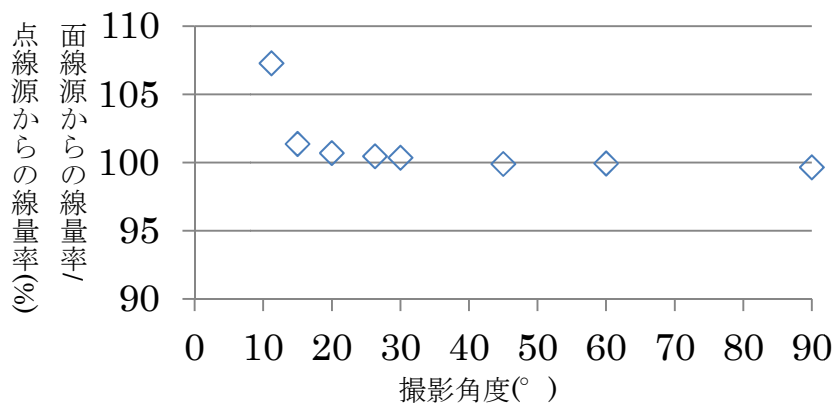


図 14 距離補正評価比較結果

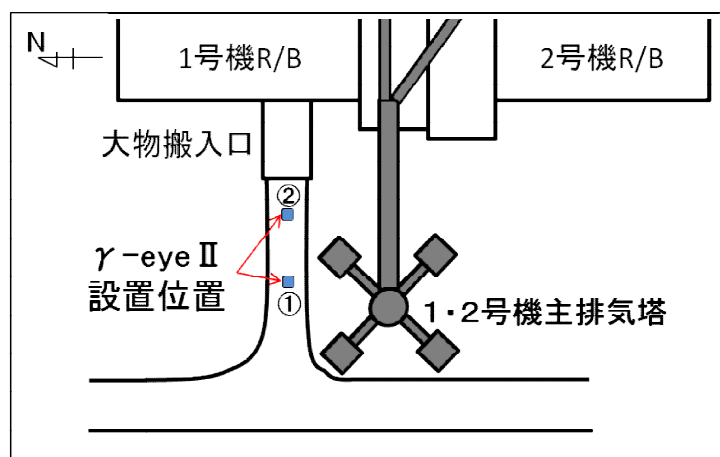


図 15 事前確認試験配置図

1.2号機主排気塔

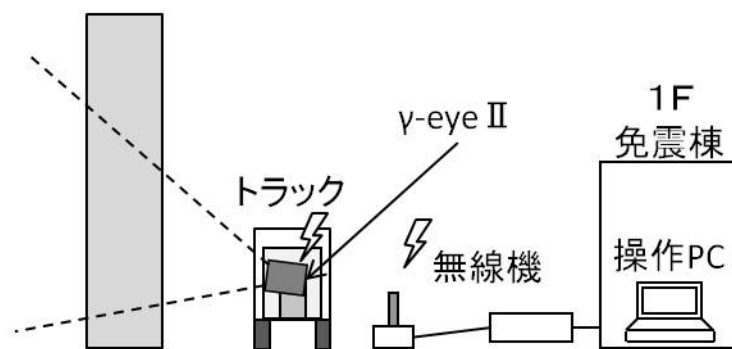


図 16 事前確認試験イメージ図

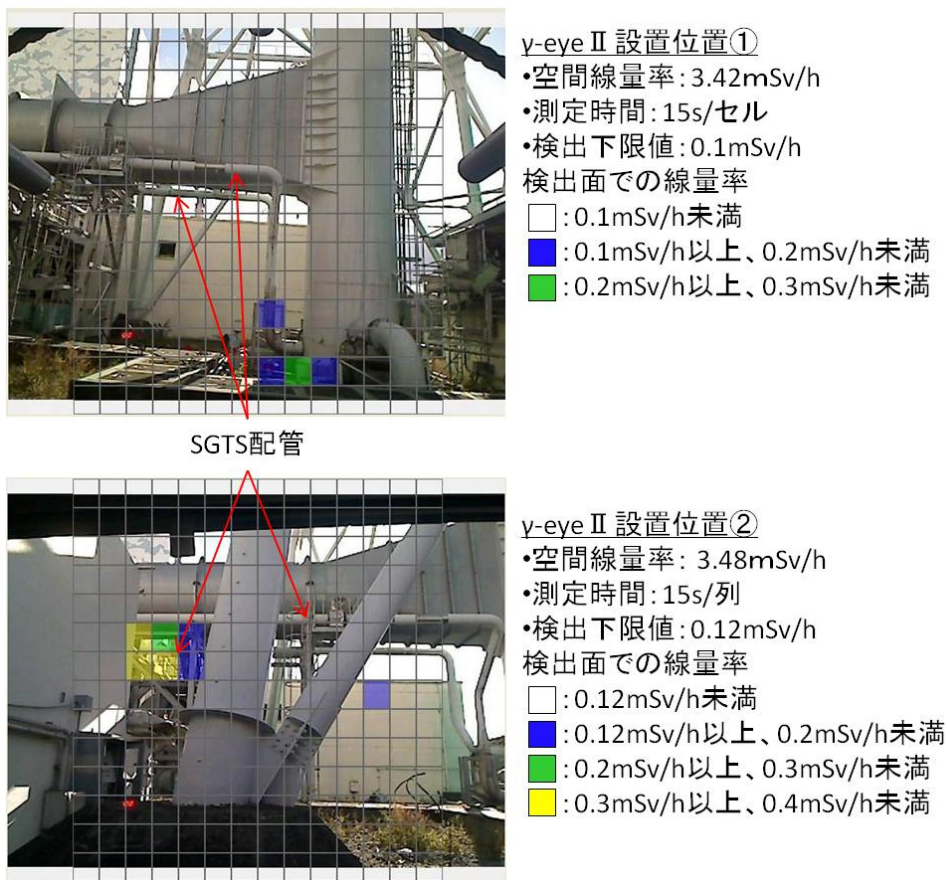


図 17 事前確認試験計測結果

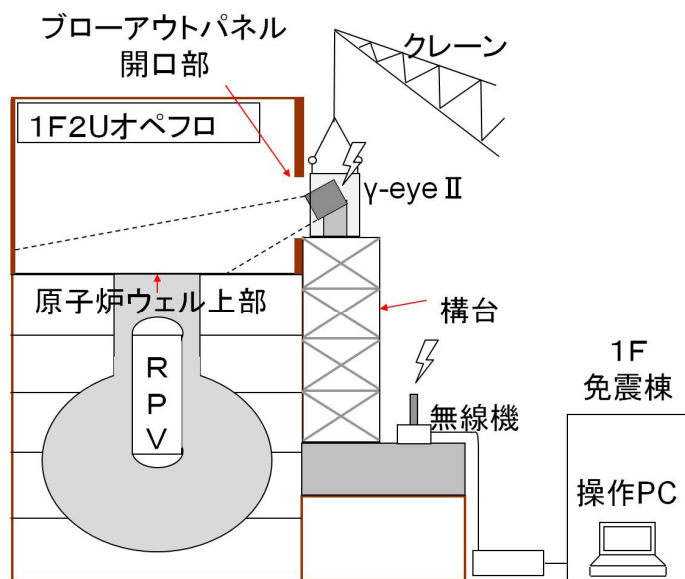


図 18 オペレーティングフロア調査イメージ図

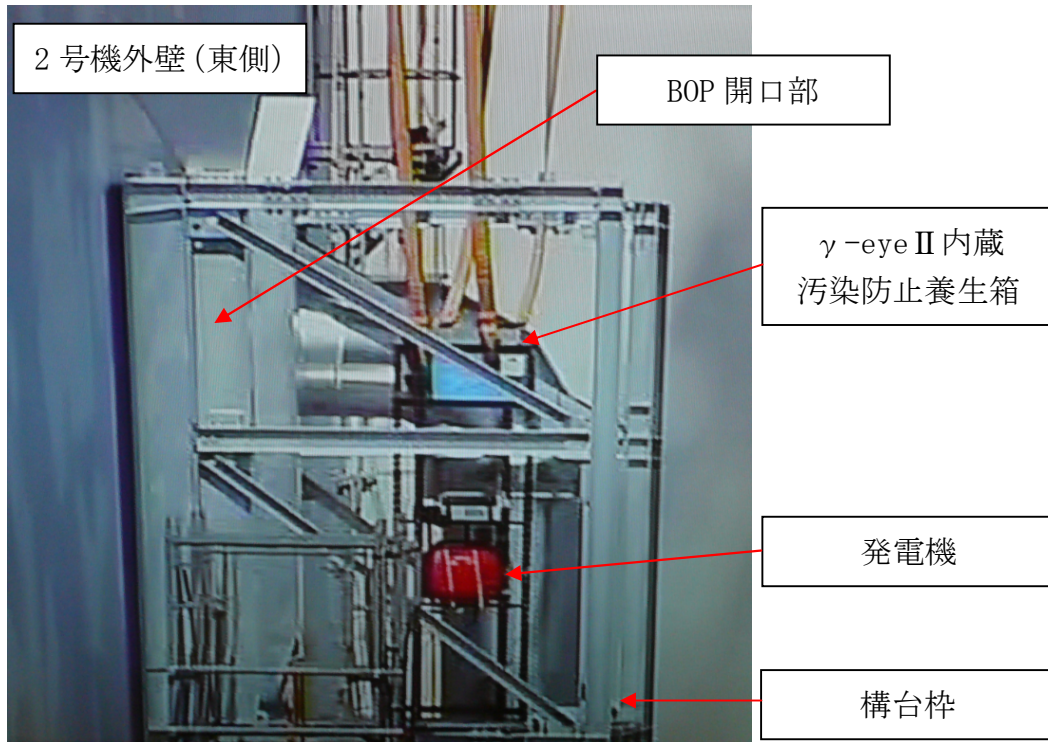
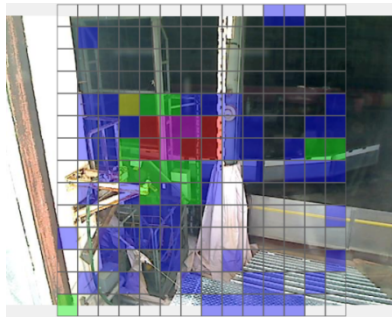
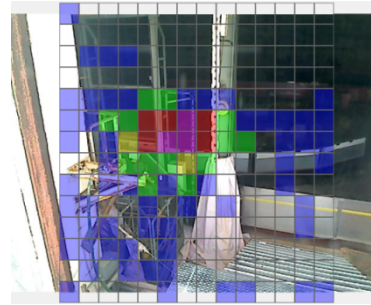


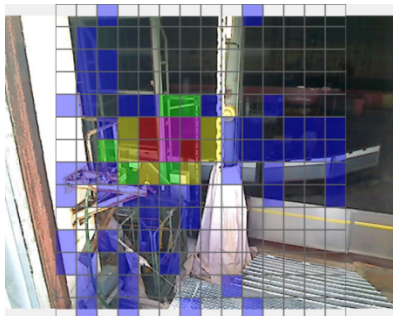
図 19 オペレーティングフロア調査装置の設置状況



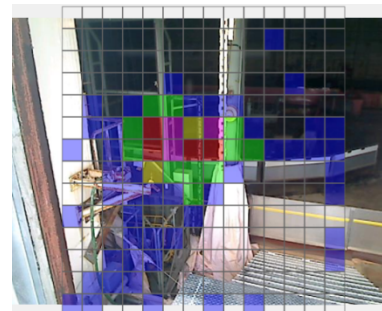
計測 I 1 回目測定



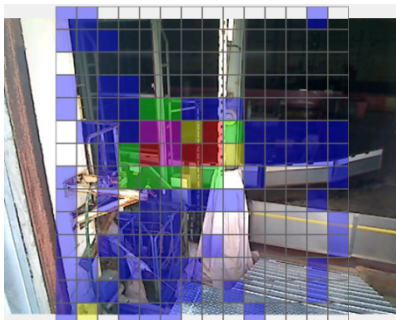
計測 I 2 回目測定



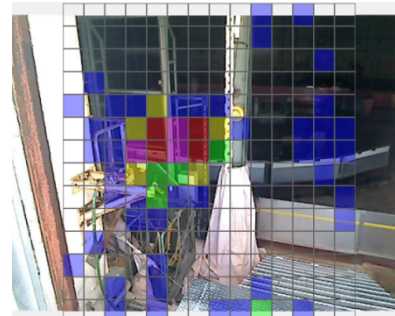
計測 I 3 回目測定



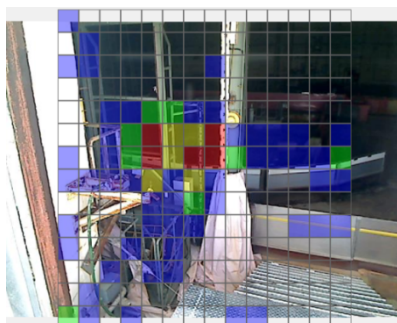
計測 I 4 回目測定



計測 I 5 回目測定



計測 I 6 回目測定

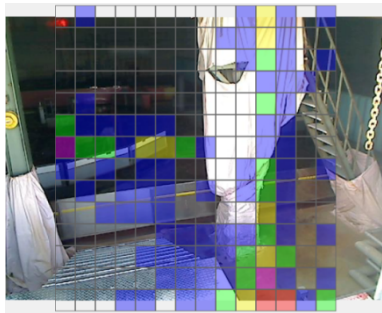


計測 I 7 回目測定

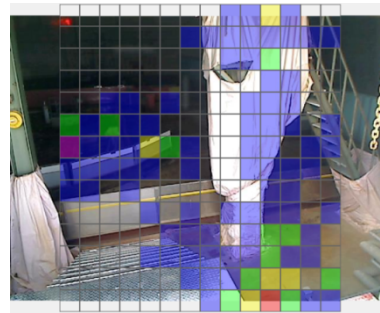
計測時間 : 15s/セル

- : 0.2mSv/h 以上、0.6mSv/h 未満
- : 0.6mSv/h 以上、0.9mSv/h 未満
- : 0.9mSv/h 以上、1.2mSv/h 未満
- : 1.2mSv/h 以上、1.5mSv/h 未満
- : 1.5mSv/h 以上

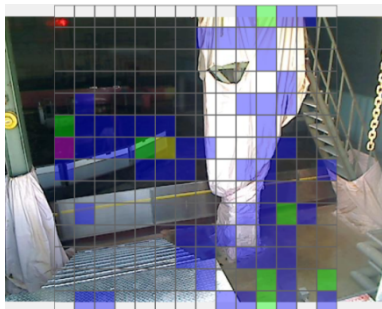
図 20-1 オペレーティングフロア調査計測結果 (計測 I)



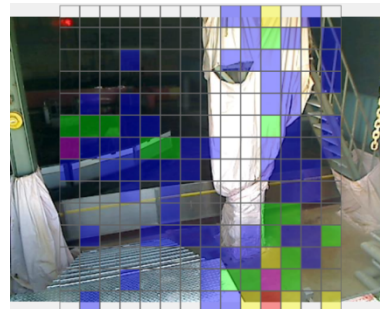
計測Ⅱ 1 回目測定



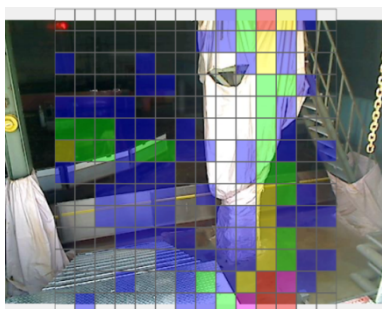
計測Ⅱ 2 回目測定



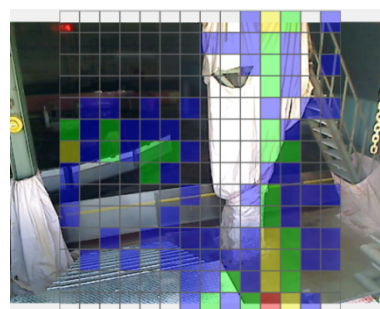
計測Ⅱ 3 回目測定



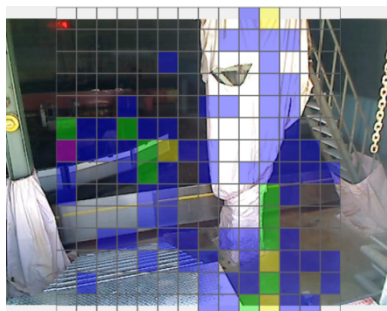
計測Ⅱ 4 回目測定



計測Ⅱ 5 回目測定



計測Ⅱ 6 回目測定

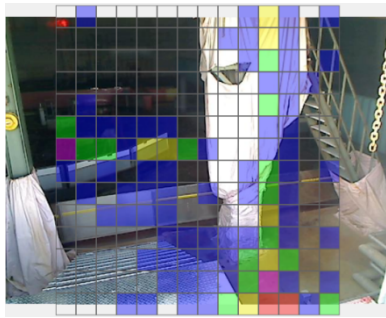


計測Ⅱ 7 回目測定

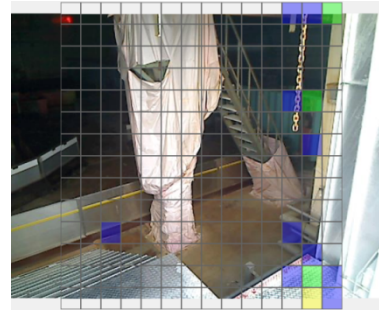
計測時間：15s/セル

- : 0.21mSv/h 以上、0.6mSv/h 未満
- : 0.6mSv/h 以上、0.9mSv/h 未満
- : 0.9mSv/h 以上、1.2mSv/h 未満
- : 1.2mSv/h 以上、1.5mSv/h 未満
- : 1.5mSv/h 以上

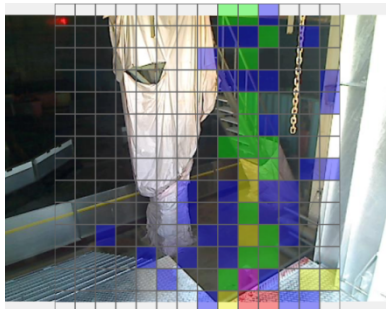
図 20-2 オペレーティングフロア調査計測結果（計測Ⅱ）



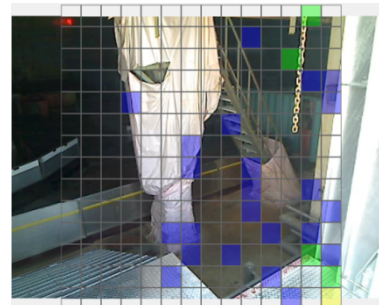
計測Ⅲ1回目測定



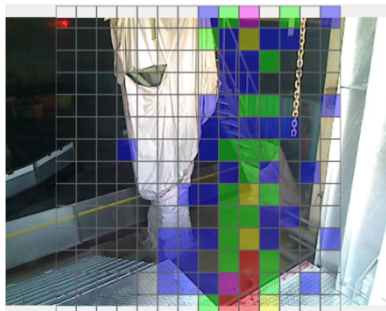
計測Ⅲ2回目測定



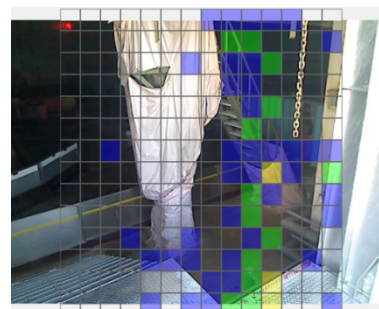
計測Ⅲ3回目測定



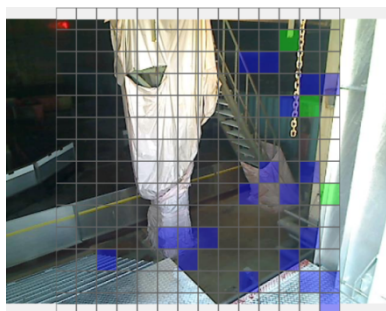
計測Ⅲ4回目測定



計測Ⅲ5回目測定



計測Ⅲ6回目測定



計測Ⅲ7回目測定

計測時間：15s/セル

- : 0.28mSv/h 以上、0.6mSv/h 未満
- : 0.6mSv/h 以上、0.9mSv/h 未満
- : 0.9mSv/h 以上、1.2mSv/h 未満
- : 1.2mSv/h 以上、1.5mSv/h 未満
- : 1.5mSv/h 以上

図 20-3 オペレーティングフロア調査計測結果 (計測Ⅲ)

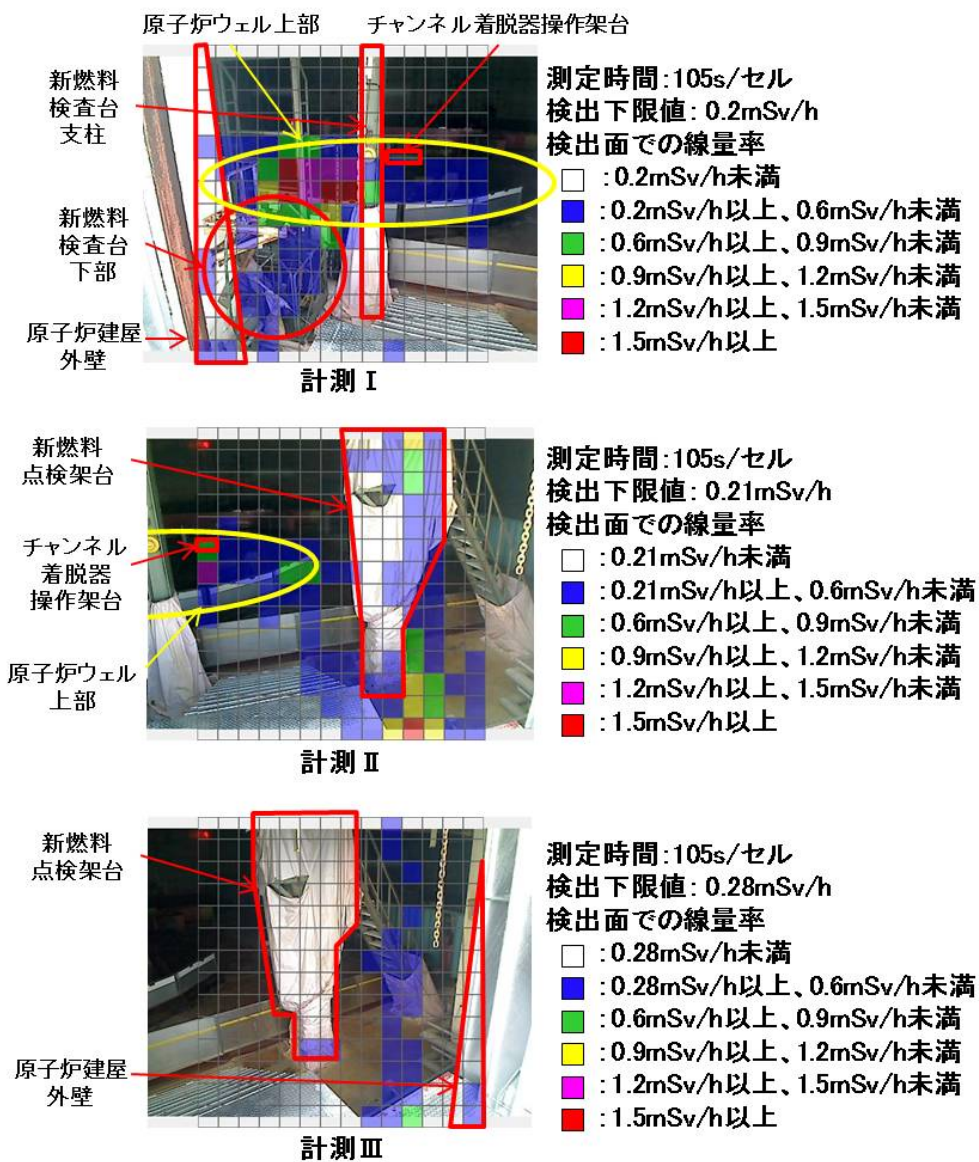
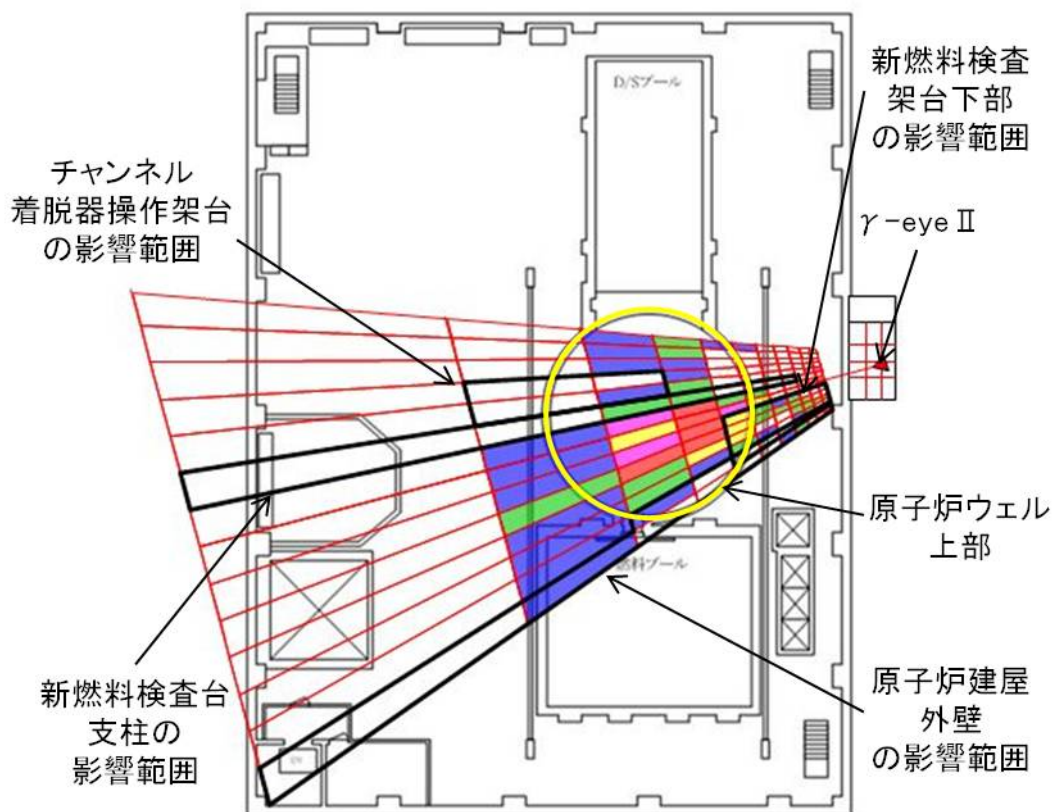
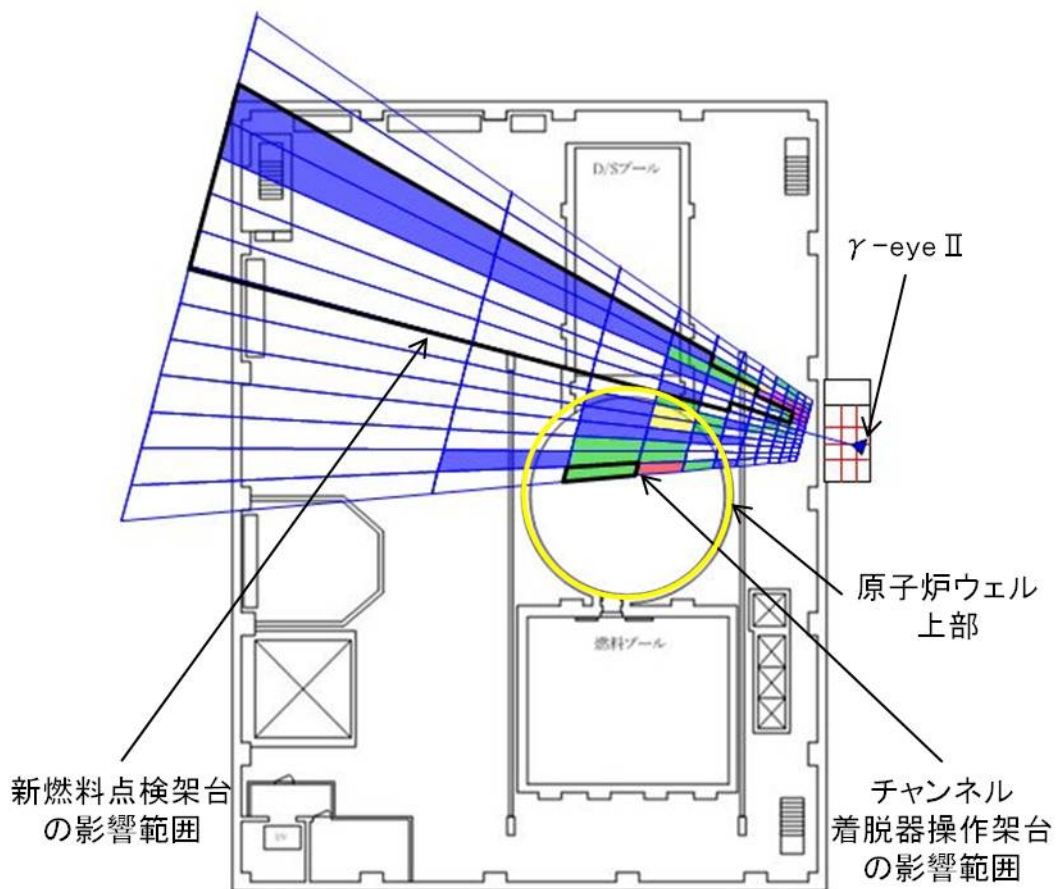


図 21 オペレーティングフロア調査計測結果 (平均)



- : 検出下限値未満
- (Blue) : $1 \times 10^7 \text{Bq/cm}^2$ 以上、 $3 \times 10^7 \text{Bq/cm}^2$ 未満
- (Green) : $3 \times 10^7 \text{Bq/cm}^2$ 以上、 $5 \times 10^7 \text{Bq/cm}^2$ 未満
- (Yellow) : $5 \times 10^7 \text{Bq/cm}^2$ 以上、 $7 \times 10^7 \text{Bq/cm}^2$ 未満
- (Pink) : $7 \times 10^7 \text{Bq/cm}^2$ 以上、 $9 \times 10^7 \text{Bq/cm}^2$ 未満
- (Red) : $9 \times 10^7 \text{Bq/cm}^2$ 以上

図 22-1 オペレーティングフロア表面密度分布 (計測 I)



- : 検出下限値未満
- (Blue): $1 \times 10^7 \text{Bq/cm}^2$ 以上、 $3 \times 10^7 \text{Bq/cm}^2$ 未満
- (Green): $3 \times 10^7 \text{Bq/cm}^2$ 以上、 $5 \times 10^7 \text{Bq/cm}^2$ 未満
- (Yellow): $5 \times 10^7 \text{Bq/cm}^2$ 以上、 $7 \times 10^7 \text{Bq/cm}^2$ 未満
- (Pink): $7 \times 10^7 \text{Bq/cm}^2$ 以上、 $9 \times 10^7 \text{Bq/cm}^2$ 未満
- (Red): $9 \times 10^7 \text{Bq/cm}^2$ 以上

図 22-2 オペレーティングフロア表面密度分布 (計測Ⅱ)

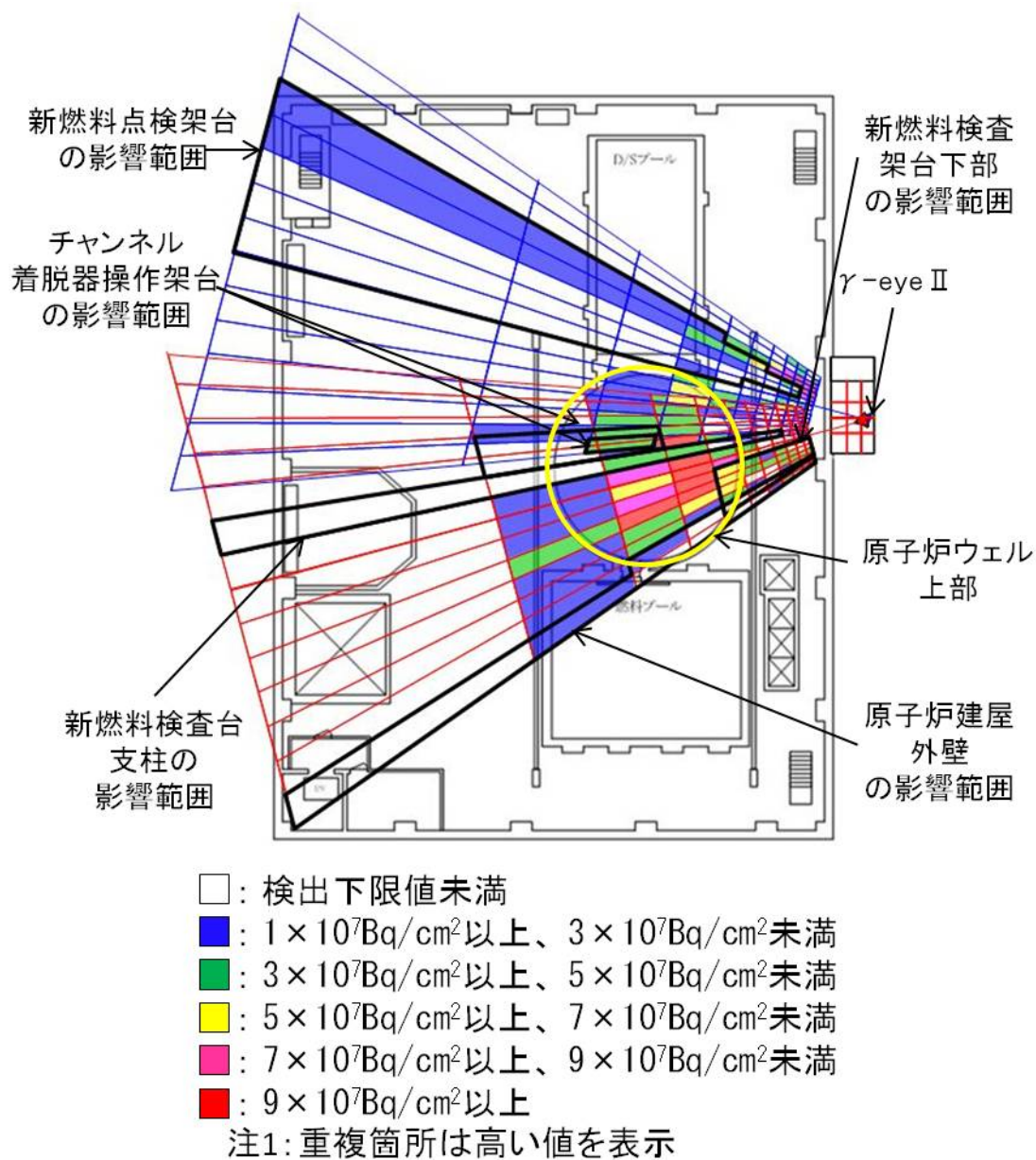
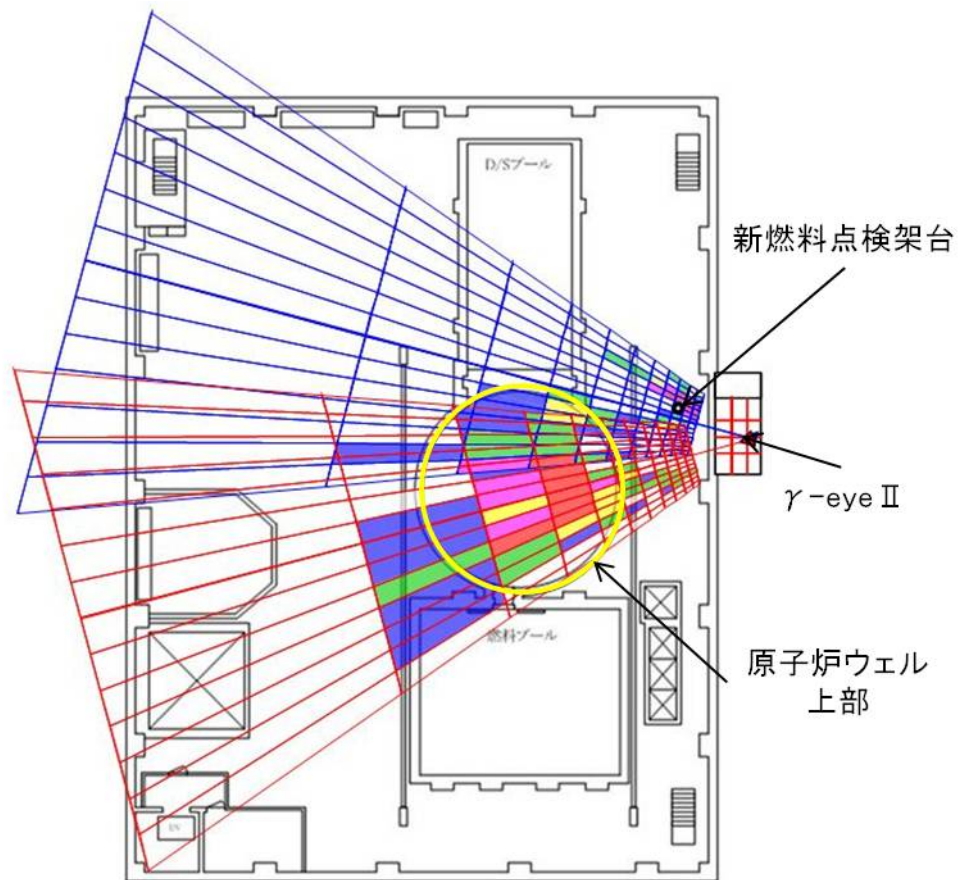


図 22-3 オペレーティングフロア表面密度分布 (計測 I + II)



- : 検出下限値未満
- (Blue) : $1 \times 10^7 \text{Bq/cm}^2$ 以上、 $3 \times 10^7 \text{Bq/cm}^2$ 未満
- (Green) : $3 \times 10^7 \text{Bq/cm}^2$ 以上、 $5 \times 10^7 \text{Bq/cm}^2$ 未満
- (Yellow) : $5 \times 10^7 \text{Bq/cm}^2$ 以上、 $7 \times 10^7 \text{Bq/cm}^2$ 未満
- (Pink) : $7 \times 10^7 \text{Bq/cm}^2$ 以上、 $9 \times 10^7 \text{Bq/cm}^2$ 未満
- (Red) : $9 \times 10^7 \text{Bq/cm}^2$ 以上

注1: 重複箇所は高い値を表示

図 23 再評価後のオペレーティングフロア表面密度分布

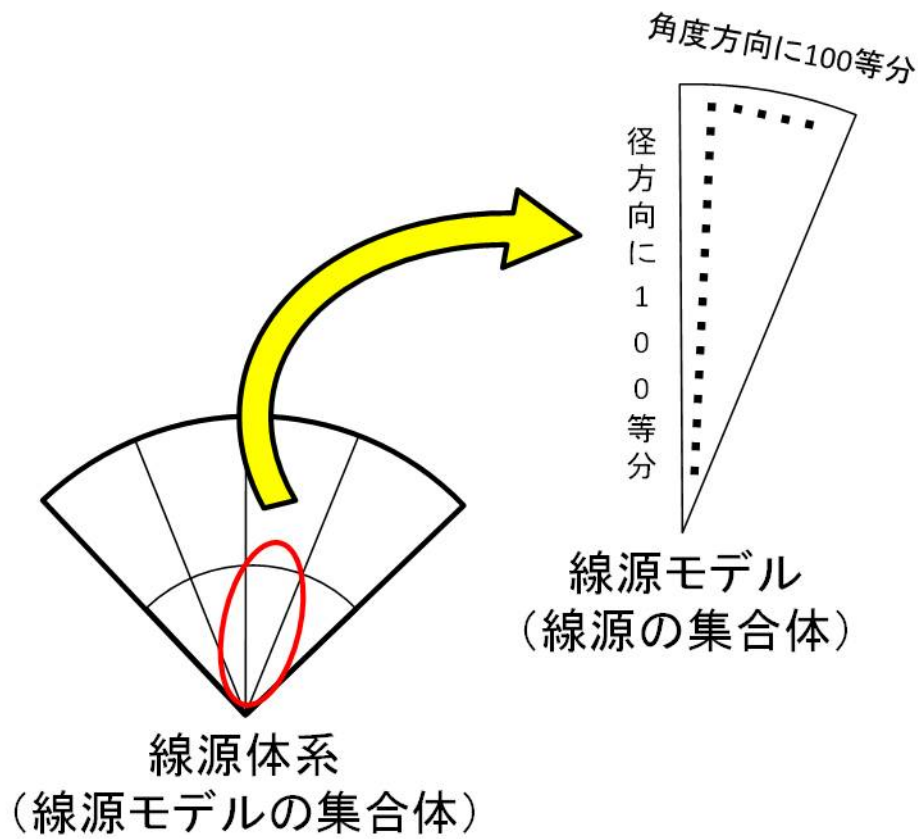


図 24 線源体系イメージ

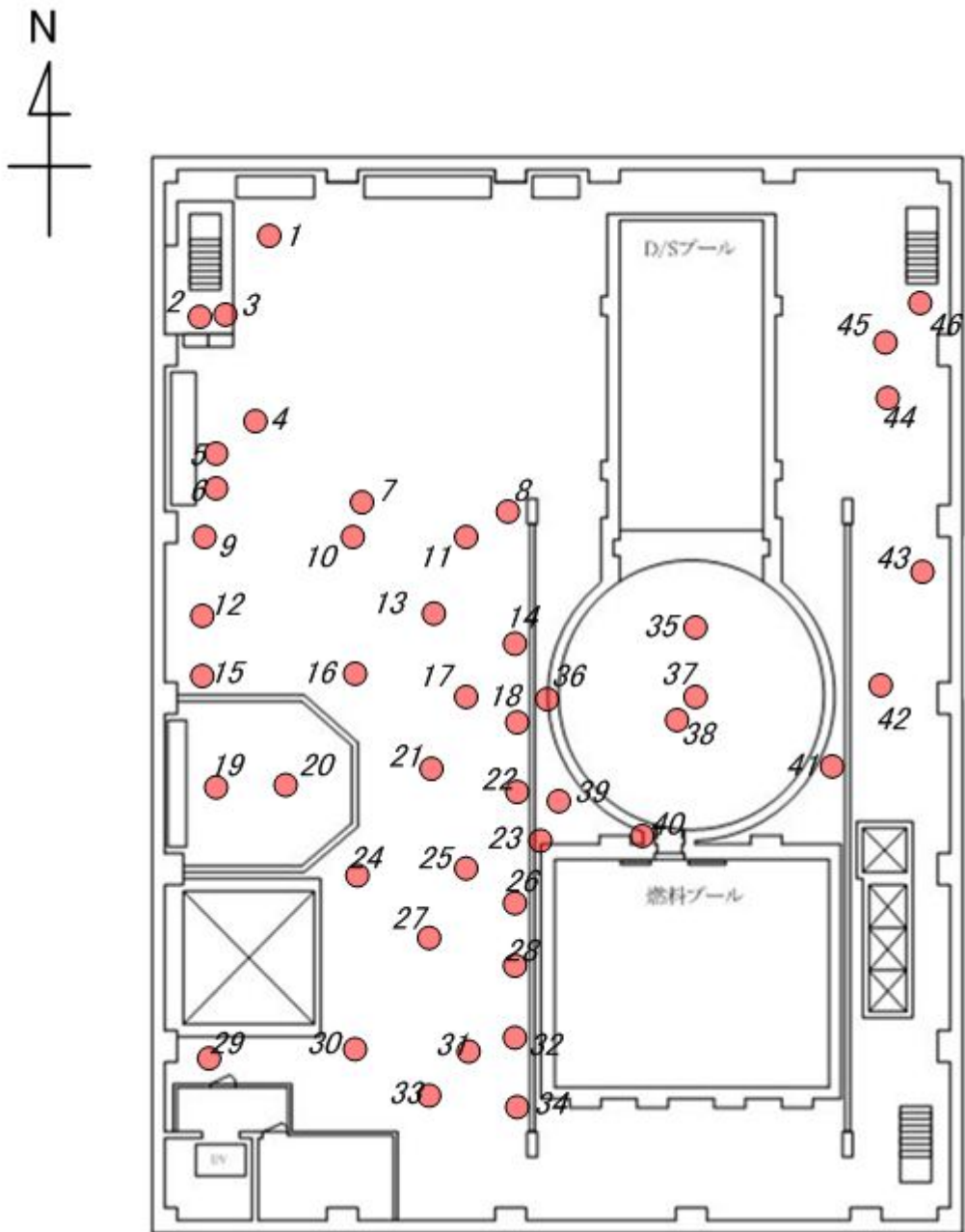


図 25 オペレーティングフロア評価点

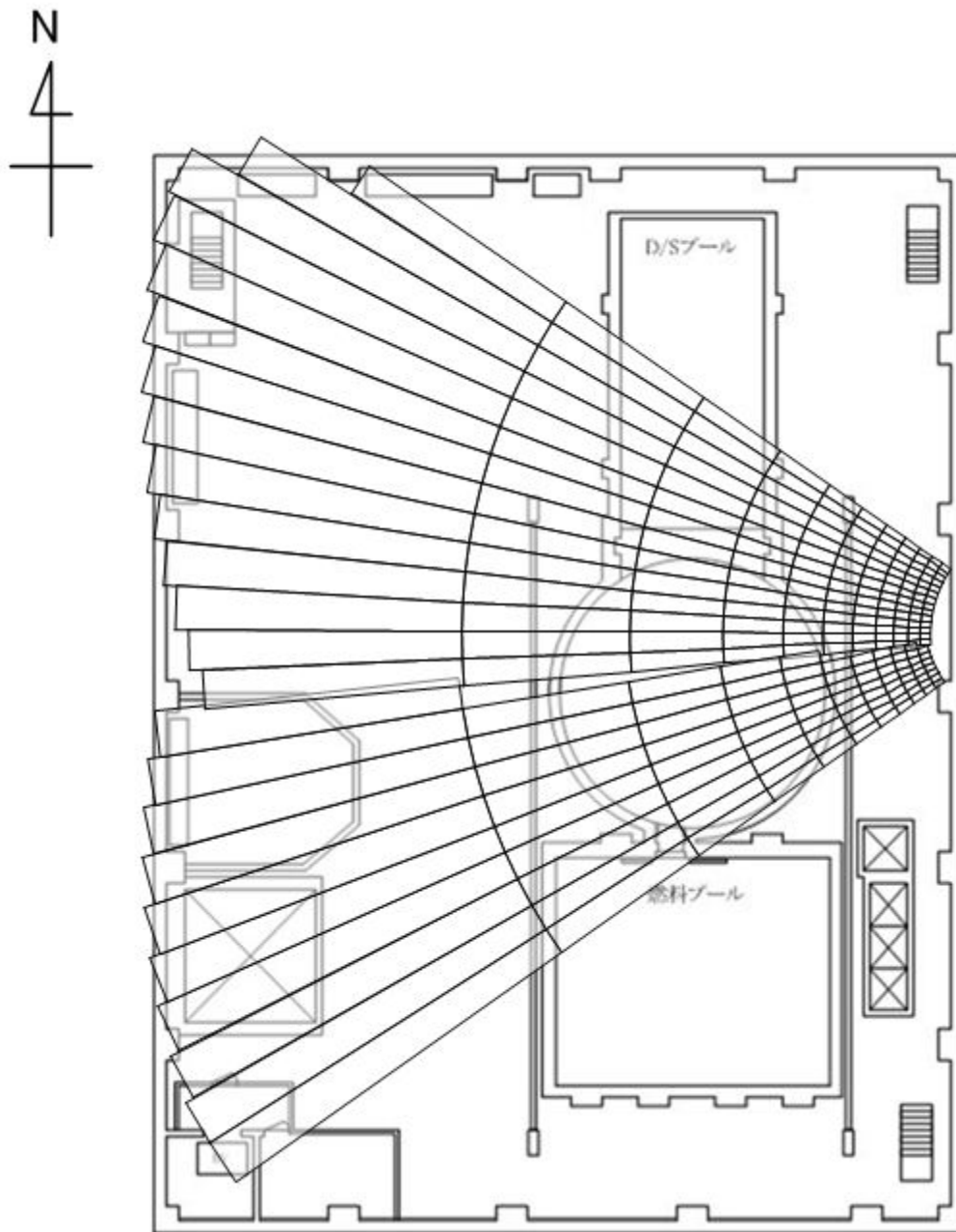


図 26 オペレーティングフロア線源体系（条件 I、II）

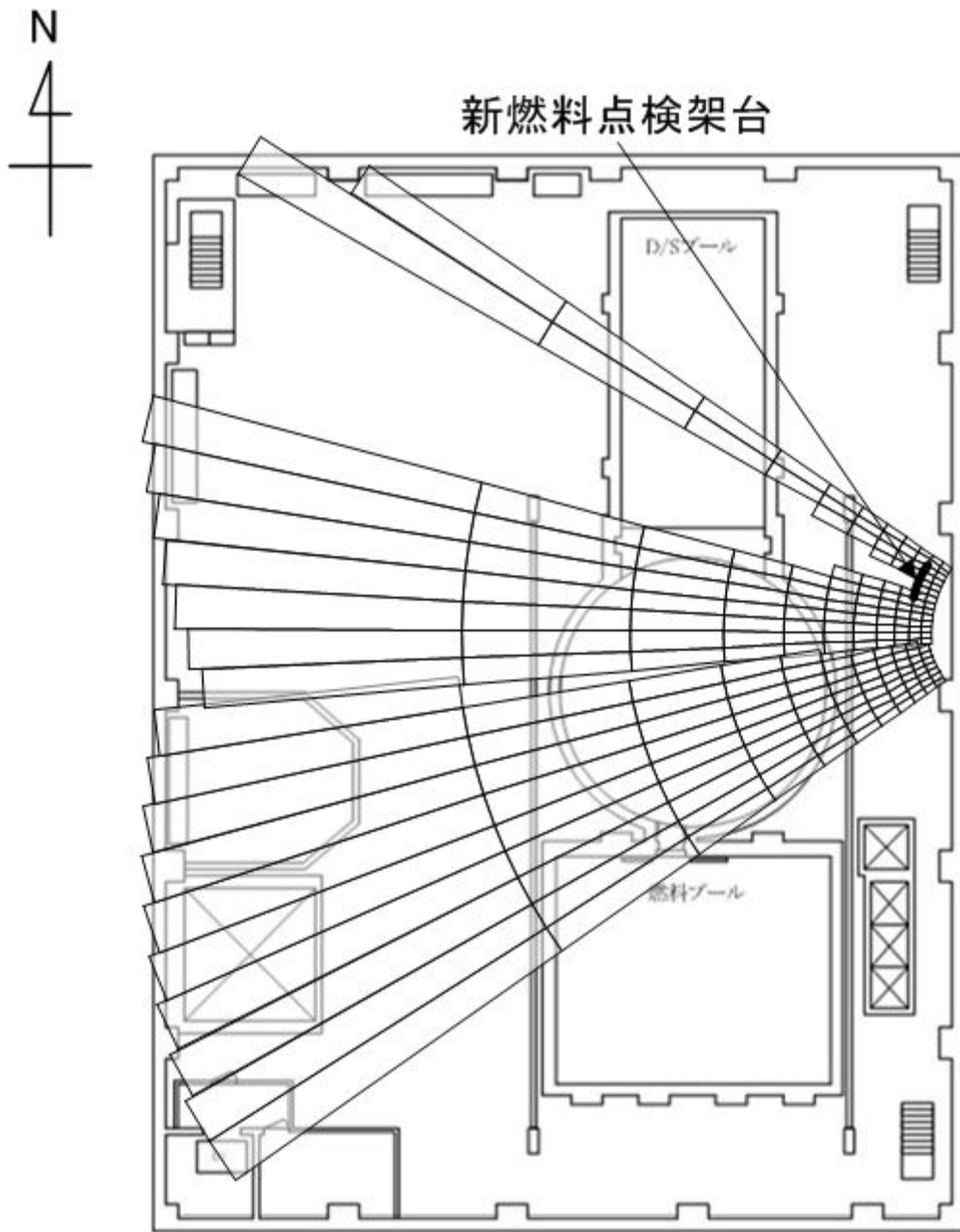


図 27-1 オペレーティングフロア線源体系 (条件Ⅲ (オペフロ平面))

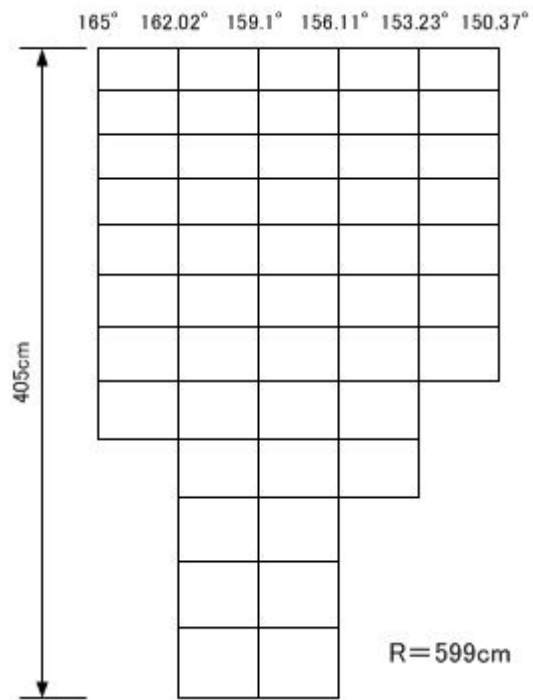
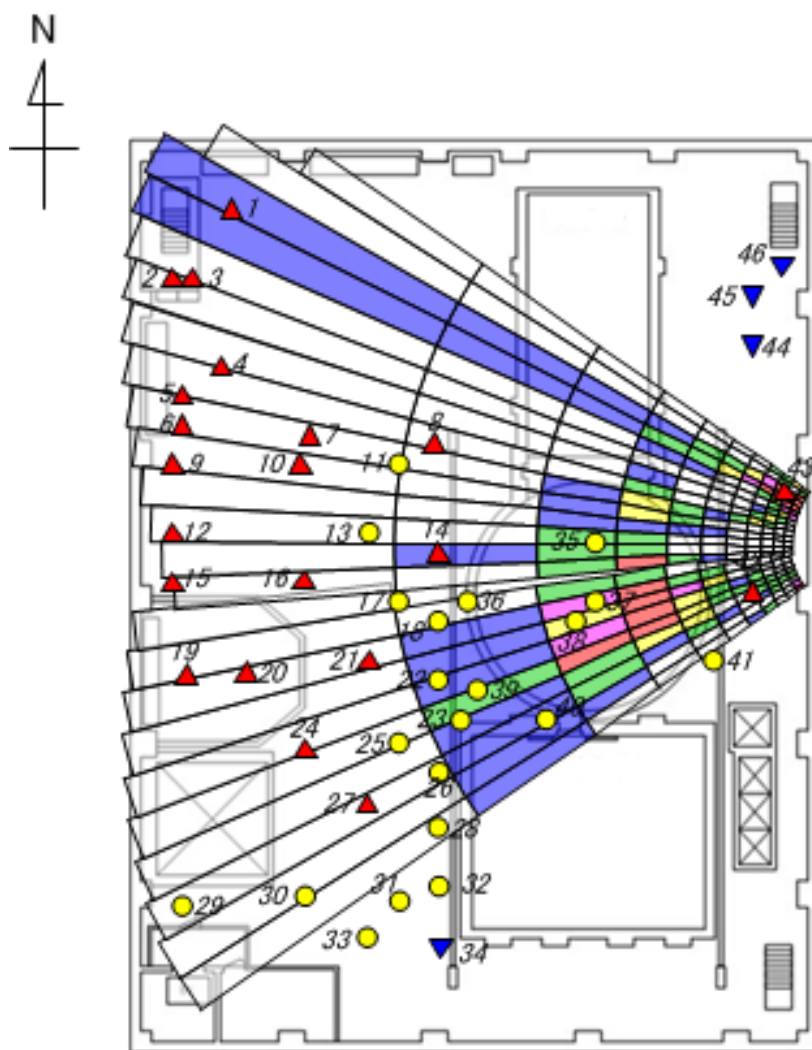


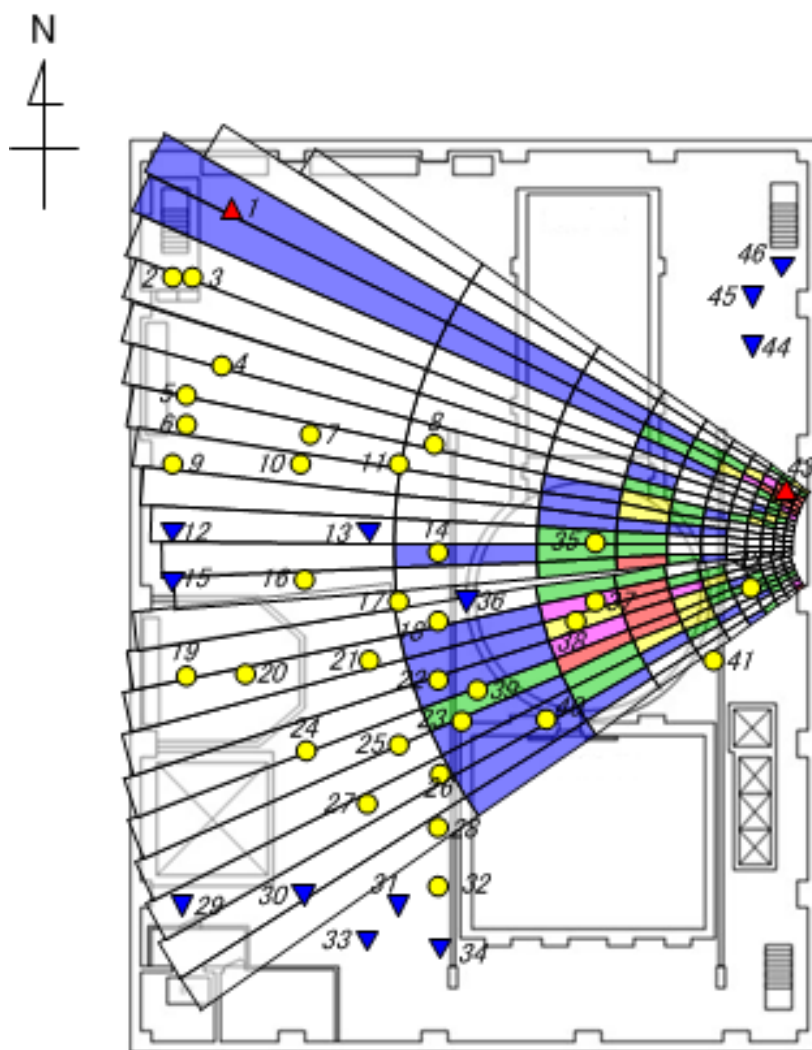
図 27-2 オペレーティングフロア線源体系（条件Ⅲ（新燃料点検架台））



- ▲ : 評価値/実測値 > 2
- : $2 \geq$ 評価値/実測値 ≥ 0.5
- ▼ : 評価値/実測値 < 0.5

注1: 評価値とは γ -eye II による
測定結果を基にした評価値
注2: 実測値とは東京電力による測定値
注3: 数字は評価点の番号を示す

図 28-1 計測結果の妥当性確認評価結果 (条件 I)



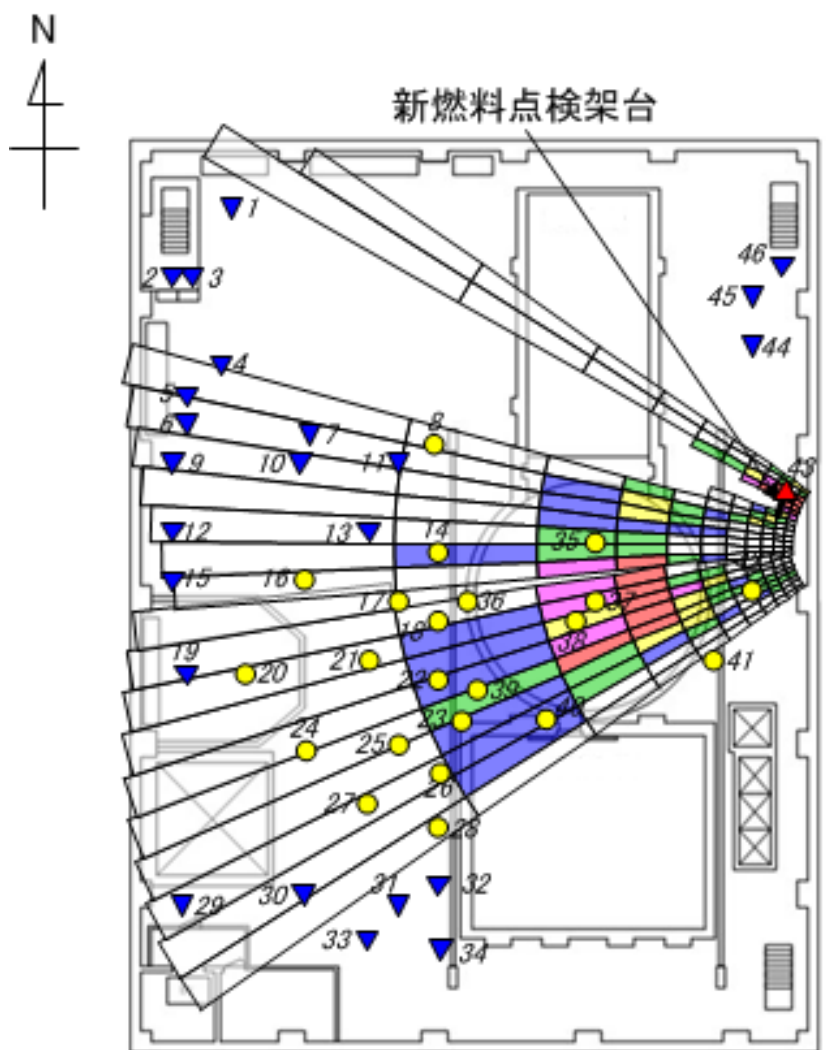
- ▲ : 評価値/実測値 > 2
- : $2 \geq$ 評価値/実測値 ≥ 0.5
- ▼ : 評価値/実測値 < 0.5

注1: 評価値とは γ -eye II による
測定結果を基にした評価値

注2: 実測値とは東京電力による測定値

注3: 数字は評価点の番号を示す

図 28-2 計測結果の妥当性確認評価結果 (条件 II)



- ▲ : 評価値/実測値 > 2
- : $2 \geq$ 評価値/実測値 ≥ 0.5
- ▼ : 評価値/実測値 < 0.5

注1: 評価値とは γ -eye II による
測定結果を基にした評価値

注2: 実測値とは東京電力による測定値

注3: 数字は評価点の番号を示す

図 28-3 計測結果の妥当性確認評価結果 (条件Ⅲ)

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立法メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度、質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
質量濃度 ^(a) 、濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の) 1	1
比透磁率 ^(b)	(数字の) 1	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元 1 をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の 1 は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(e)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率、工率、放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷、電気量	クーロン	C		s A
電位差(電圧)、起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウエーバ	Wb	V s	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光照射量	ルーメン	lm	cd sr ^(e)	cd
放射線量の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq	lm/m ²	m ⁻² cd
吸収線量、比エネルギー分与、カーマ	グレイ	Gy	J/kg	s ⁻¹
線量当量、周辺線量当量、方向性線量当量、個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の 1 に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の 1 は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の間は同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で "radioactivity" と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV.2002.70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角加速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加減速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹
熱流密度、放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻²
熱容量、エントロピー	ジュール毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量、比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電表面積密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電束密度、電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー、モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射線輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ = kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ³ s ⁻¹ mol

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h=60min=3600s
日	d	1d=24h=86400s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1L=1l=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オンGSTローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベール	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ² =10 ⁻⁴ cd m ²
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ² =10 ⁻⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 OeΔ (10 ³ /4π) A m ⁻¹

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「Δ」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1cal=4.1858J (「15°C」カロリー) , 4.1868J (「IT」カロリー) 4.184J (「熱化学」カロリー)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

