JAEA-Technology 2013-037



走行サーベイシステム KURAMA-II を用いた 測定の基盤整備と実測への適用

Construction of a Car-borne Survey System for Measurement of Dose Rates in Air : KURAMA-II, and Its Application

津田 修一	- 吉田 忠義	中原 由紙	出夫 佐藤 哲朗
関 暁之	松田 規宏 😚	安藤 真樹	武宮 博
谷垣 実	高宮 幸一 (左藤 信浩	奥村 良
小林 康浩	: 吉永 尚生	吉野 泰史	2 内堀 幸夫
石川 剛弘	、 岩岡 和輝	斎藤 公明]

Shuichi TSUDA, Tadayoshi YOSHIDA, Yukio NAKAHARA, Tetsuro SATO Akiyuki SEKI, Norihiro MATSUDA, Masaki ANDO, Hiroshi TAKEMIYA Minoru TANIGAKI, Koichi TAKAMIYA, Nobuhiro SATO, Ryo OKUMURA Yasuhiro KOBAYASHI, Hisao YOSHINAGA, Hirofumi YOSHINO, Yukio UCHIHORI Masayori ISHIKAWA, Kazuki IWAOKA and Kimiaki SAITO

> 福島技術本部 福島環境安全センター

Fukushima Environmental Safety Center Headquarters of Fukushima Partnership Operations

October 2013

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) 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

© Japan Atomic Energy Agency, 2013

走行サーベイシステム KURAMA-II を用いた測定の基盤整備と実測への適用

日本原子力研究開発機構 福島技術本部 福島環境安全センター

津田 修一,吉田 忠義,中原 由紀夫⁺¹,佐藤 哲朗^{**},関 暁之,松田 規宏,安藤 真樹, 武宮 博⁺²,谷垣 実^{*1},高宮 幸一^{*1},佐藤 信浩^{*1},奥村 良^{*1},小林 康浩^{*1},吉永 尚生^{*1}, 吉野 泰史^{*1},内堀 幸夫^{*2},石川 剛弘^{*2},岩岡 和輝^{*2},斎藤 公明 (2013 年 9 月 27 日 受理)

東京電力福島第一原子力発電所事故後における広域の詳細な空間線量率マップを作成するために、 日本原子力研究開発機構(以下,原子力機構と示す)は走行サーベイシステム KURAMA-II を用い た測定を文部科学省の委託を受けて実施している。KURAMA (Kyoto University RAdiation MApping system)は,一般乗用車に多数搭載して広範囲の空間線量率を詳細かつ短期間に把握することを目的 として京都大学原子炉実験所で開発されたシステムである。KURAMA は、エネルギー補償型 γ 線 サーベイメータで測定した線量率を GPS の測位データでタグ付けしながら記録する測定器,データ を受け取り可視化のための処理や解析を行うサーバ,測定者や関係者等のエンドユーザーがデータ を閲覧するためのクライアントから構成される。第2世代の KURAMA-II では更なる小型化,堅牢 性の向上,データ送信の完全自動化等の機能が強化されたことによって、原子力機構だけでなく福 島県及び周辺の自治体を含めた 100 台の同時測定が可能となり、広域の詳細な線量率マッピングを より短期間で実施することが可能になった。本報告では、KURAMA-II による測定データの信頼性 を確保するために実施した基盤整備と、KURAMA-II を空間線量率マッピング事業に適用した結果 について述べるとともに、多数の KURAMA-II を使用した走行サーベイの精度を保証するための効 率的な KURAMA-II の管理方法を提案する。

本研究成果は、文部科学省からの委託事業である「福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の 第二次分布状況等に関する調査研究」で得られた成果の一部を含んでいる。

原子力科学研究所(駐在):〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

- +1 原子力基礎工学研究部門
- +2 システム計算科学センター
- ※ 特定課題推進員(現所属:株式会社日立ソリューションズ東日本)
- *1 京都大学原子炉実験所 福島原子力災害対策支援グループ KURAMA 班
- *2 独立行政法人 放射線医学総合研究所

JAEA-Technology 2013-037

Construction of a Car-borne Survey System for Measurement of Dose Rates in Air: KURAMA-II, and Its Application

Shuichi TSUDA, Tadayoshi YOSHIDA, Yukio NAKAHARA⁺¹, Tetsuro SATO^{**}, Akiyuki SEKI, Norihiro MATSUDA, Masaki ANDO, Hiroshi TAKEMIYA⁺², Minoru TANIGAKI^{*1}, Koichi TAKAMIYA^{*1}, Nobuhiro SATO^{*1}, Ryo OKUMURA^{*1}, Yasuhiro KOBAYASHI^{*1}, Hisao YOSHINAGA^{*1}, Hirofumi YOSHINO^{*1}, Yukio UCHIHORI^{*2}, Masayori ISHIKAWA^{*2}, Kazuki IWAOKA^{*2} and Kimiaki SAITO

> Fukushima Environmental Safety Center, Headquarters of Fukushima Partnership Operations, Japan Atomic Energy Agency Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

> > (Received September 27, 2013)

Japan Atomic Energy Agency (JAEA) has been performing air dose rate mapping after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident using a car-borne survey system KURAMA-II, in response to a commission from the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology. The Kyoto University RAdiation MApping system (KURAMA) is a GPS-aided mobile radiation monitoring system that has been newly developed by the Kyoto University Research Reactor Institute (KURRI) in response to the nuclear disaster. The KURAMA system consists of an energy-compensated scintillation survey meter for measuring dose rates, an electric device for recording both the dose rates and the position data from a GPS module, a computer server for processing and analyzing data from KURAMA, and client PCs for providing end users with the data. The second generation of the KURAMA system, KURAMA-II, has been improved using smaller-packaging, increased durability, and automated data transmission. These improvements enable

This work partly includes the results under the auspices of the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology.

⁺¹ Nuclear Science and Engineering Directorate

⁺² Center for Computational Science & e-Systems

X Special Topic Engineer (Presently, Hitachi Solutions East Japan, Ltd.)

^{*1} Support team for Fukushima, Kyoto University Research Reactor Institute

^{* 2} National Institute of Radiological Sciences

simultaneous monitoring using 100 KURAMA-II survey systems through collaboration between JAEA and local self-governing bodies such as Fukushima and surrounding prefectures. Consequently, dose rate mapping of a wide area in shorter period of time has become possible. This report describes the construction of KURAMA-II, its application and a suggested technique to manage a large number of KURAMA-II survey systems.

Keywords: KURAMA, Car-borne Survey, Dose Rate Mapping, G(E) Function, Scintillation Counter

目 次

1. 序論	- 1
2. KURAMA-II を用いた測定の基盤整備・検証	- 3
2.1 装置の概要	- 3
2.2 <i>G(E</i>)関数の計算評価	- 5
2.3 実験による基礎特性試験	- 7
2.3.1 検出器単体の照射試験	- 7
2.3.2 KURAMA-II の照射試験	- 9
2.3.3 自動車の車体による遮へいの影響の評価	- 10
2.3.4 車種の違いによる車内外補正係数への影響	- 10
2.3.5 道路上と道路周辺における線量率の相関	- 12
2.4 結果及び考察	- 12
2.4.1 <i>G</i> (<i>E</i>)関数	- 12
2.4.2 検出器単体の照射試験	- 14
2.4.3 KURAMA-IIの照射試験	- 14
2.4.4 自動車の車体による遮へいの影響の評価	- 18
2.4.5 車種の違いによる車内外補正係数への影響	- 20
2.4.6 道路上と道路周辺における線量率の相関	- 24
3. KURAMA-II を用いた放射線線量率マッピング	- 26
3.1 マッピング事業の概要	- 26
3.2 KURAMA-II データ自動処理システムの開発	- 28
3.2.1 異常データの処理と車体による遮へいの補正	- 28
3.2.2 道路データに基づく測定値の削除・位置情報の補正	- 30
3.3 マッピング事業における測定結果	- 32
4. KURAMA-IIの管理方法の提案	- 34
4.1 運用上の課題とその対策	- 34
4.1.1 使用前点検	- 34
4.1.2 結果	- 35
4.2 今後の管理方法の提案	- 38
4.2.1 試験項目	- 39
4.2.2 導入時検査	- 40
4.2.3 使用前点検	- 40
4.2.4 定期検査・校正	- 41
4.3 まとめ	- 41
5. 結論	- 42
謝辞	- 43
参考文献	- 44

付録		45
----	--	----

Contents

1.	Introduction	1
2.	KURAMA-II : Construction and use in dose rate measurement	3
	2.1 Outline of KURAMA-II	3
	2.2 Calculation of spectrum - dose conversion operator (<i>G</i> (<i>E</i>) function)	5
	2.3 Basic characterization of KURAMA-II	7
	2.3.1 Characterization of a CsI(Tl) scintillation counter	7
	2.3.2 Characterization of KURAMA-II	9
	2.3.3 Evaluation of the shielding effect on dose rates measured inside a car by KURAMA-II	10
	2.3.4 Influence of car type on the correction factor for KURAMA-II car-borne survey	10
	2.3.5 Relationship between the dose rates on the road and the dose rates on the roadside	12
	2.4 Results and discussion	12
	2.4.1 <i>G</i> (<i>E</i>) function	12
	2.4.2 Characterization of a CsI(Tl) scintillation counter	14
	2.4.3 Characterization of KURAMA-II	14
	2.4.4 Evaluation of the shielding effect on dose rates measured inside a car by KURAMA-II	18
	2.4.5 Influence of car type on the correction factor for a KURAMA-II car-borne survey	20
	2.4.6 Relationship between the dose rates on the road and the dose rates on the roadside	24
3.	Mapping project of dose rates in air by KURAMA-II	26
	3.1 Outline of the project	26
	3.1 Outline of the project3.2 Development of an automatic data processing system	26 28
	 3.1 Outline of the project	26 28
	 3.1 Outline of the project	26 28 28
	 3.1 Outline of the project	26 28 28 30
3.3	 3.1 Outline of the project	26 28 28 30 32
3.3 4.	 3.1 Outline of the project	26 28 28 30 32 34
3.3 4.	 3.1 Outline of the project	26 28 30 32 34 34
3.3 4.	 3.1 Outline of the project	26 28 30 32 34 34 34
3.3 4.	 3.1 Outline of the project	26 28 30 32 34 34 34 34
3.3	 3.1 Outline of the project	26 28 30 32 34 34 34 35 38
3.3 4.	 3.1 Outline of the project	26 28 30 32 34 34 34 35 38 39
3.3	 3.1 Outline of the project	26 28 30 32 34 34 34 35 38 39 40
3.3	 3.1 Outline of the project	26 28 30 32 34 34 34 35 38 39 40 40
3.3	 3.1 Outline of the project	26 28 30 32 34 34 34 35 38 39 40 40 41
3.3 4.	 3.1 Outline of the project	26 28 30 32 34 34 34 35 38 39 40 40 41 41
3.3 4. 5.	 3.1 Outline of the project	26 28 30 32 34 34 34 35 38 39 40 40 41 41 41

References	44
Appendix	45

表リスト

Table 2.1	Radioactive nuclides used in the experiment	8
Table 2.2	Ratios of dose rates measured using C12137 to the evaluated values in JAEA	14
Table 2.3	Relative responses of individual instruments. Responses are normalized at the	
	dose ambient equivalent response of s/n 016A98B5 (#001)	18
Table 2.4	Correction factors of the dose rates measured inside and outside various types of cars	
	using a NaI(Tl) scintillation survey meter	20
Table 2.5	Comparison of dose rates measured by a NaI(Tl) scintillation survey meter with those	
	measured by KURAMA-II for various types of cars	21
Table 3.1	Evaluated dose rates	28
Table 4.1	List of examination tests for KURAMA-II (performed in 2012)	34

図リスト

Fig.2.1	The KURAMA system (a) KURAMA, (b) KURAMA-II 4
Fig.2.2	The KURAMA modules (a survey meter, GPS aid and a personal computer) are supplied
	at a low price 5
Fig.2.3	KURAMA-II: (a) outside view, (b) inside view, (c) CsI(Tl) scintillation counter 5
Fig.2.4	Calculation geometry for response functions of a CsI(Tl) crystal used in KURAMA-II 6
Fig.2.5	Electric circuit of the C12137 detector used in KURAMA-II 8
Fig.2.6	Photograph of experimental set-up in FRS, JAEA 8
Fig.2.7	Photograph of experimental set-up in ICF, JAEA; (a) ¹³⁷ Cs irradiation apparatus,
	(b) gamma-ray sealed source (nominal activity is 3.7 MBq) 10
Fig.2.8	Positions of KURAMA-II in a sedan 11
Fig.2.9	Examples of the measured pulse-height distributions 13
Fig.2.10	Calculated $G(E)$ function for $H^*(10)$
Fig.2.11	Dose rate linearity of KURAMA-II 16
Fig.2.12	Statistical fluctuation of dose rates of KURAMA-II 16
Fig.2.13	Direction dependence of dose rates of KURAMA-II 17
Fig.2.14	Photon energy dependence of dose rates of KURAMA-II 17
Fig.2.15	Relationship of ambient dose equivalent rates inside and outside the car 19
Fig.2.16	Relationship between the correction factors and dose rates measured inside the car 19
Fig.2.17	Comparison of the dose rates for various types of cars (sedan, station wagon
	and minivan) 21
Fig.2.18	Comparison of dose rates measured at different positions in a sedan 22

Fig.2.19	Comparison of dose rates measured by KURAMA-II with those measured in the peripheral
	of the roads 2
Fig.3.1	Data flow in KURAMA-II 2
Fig.3.2	Corrections of measured data for estimation of dose rates 2
Fig.3.3	Example of dose rates measured by KURAMA-II 3
Fig.3.4	Relationship between the number of detected noises and the parameter n 3
Fig.3.5	How to correct the measured positions based on roadmap data 3
Fig.3.6	How to select the true tracks on the map 3
Fig.3.7	Example of a dose rate distribution obtained by KURAMA-II 3
Fig.4.1	Photographs of the measurement of pulse-height distributions using a ¹³⁷ Cs source 3
Fig.4.2	Photograph of the measurement of dose rate using a standard ¹³⁷ Cs source 3
Fig.4.3	Examples of the measured pulse-height distributions 3
Fig.4.4	Deviations of the peak positions for 662 keV ¹³⁷ Cs source in pulse-height distributions
	of KURAMA-II 3
Fig.4.5	Relationship between the deviation of each peak position from 662 keV and the deviation
	of each indicated dose rate from the measured value by #62 3
Fig.4.6	Measured dose rates before/after the adjustment of peak positions 3
Fig.4.7	Measured responses of KURAMA-II using a standard ¹³⁷ Cs source 3

This is a blank page.

1. 序論

走行サーベイは広域の空間線量率分布を詳細に測定することが可能な手法で,平常時にまた事 故時においても環境放射線測定に広く用いられてきた。チェルノブイル事故の後には,国際協力 協定に基づき,旧日本原子力研究所によるチェルノブイル原子炉周辺の広域サーベイが実施され マップが作成された¹⁾。また,東京電力福島第一原子力発電所事故(以下,東電福島事故と示す) の後には,文部科学省の委託を受けて日本原子力研究開発機構(以下,原子力機構と示す)が外 部機関と協力しながら走行サーベイを行い,空間線量率マップを作成した(平成23年度放射能測 定調査委託業務「福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の第二次分布状況等に関する調査 研究」,以下,マッピング事業と示す)²⁾。かつては走行位置を簡単に計測する手段が存在しなか ったために,走行ルートを再現するのに様々な工夫が試みられたが,測定地点の緯度経度を測定 できる GPS(Global Positioning System)が広く用いられるようになってからは,空間線量率と GPS による位置データを同時に測定して記録することで,線量率の2次元的な分布を容易にマップ化 できるようになった。

KURAMA-II は京都大学原子炉実験所によって開発された走行サーベイシステム³⁾で, KURAMA (Kyoto University RAdiation MApping system)の後継のシステムとして位置づけられる。 KURAMA の最大の特徴は,測定したデータを携帯電話回線によりほぼリアルタイムで転送し, インターネットに接続されたサーバにデータを蓄積するとともにモニタ上で結果を確認できるこ とにある。同時にサーベイを実施している複数の車両によるサーベイデータをモニタで確認し, 装置の動作状態や走行コースが適切かリアルタイムで確かめられる。もし,測定に問題があるよ うであれば迅速に対応することができるため,効率の高いサーベイを実施可能である。

KURAMA システムはサーベイメータのアナログ出力を AD 変換し GPS の出力とともにパソコ ンに記録する構成となっており、その使用にはある程度の基礎知識と熟練が必要であった。一方、 KURAMA-II システムは、小型の CsI(TI)検出器を測定器として使用しデータ処理・記録部分もモジ ュール化することで、コンパクトで操作が簡単なシステムとして構成されている。KURAMA-II を車内の所定の位置に設置し、電源を自動車のシガーソケットに接続することで自動的に測定が 開始され、以後走行中に連続測定を実施することが可能である。この特徴により、現在 KURAMA-II を応用した様々な測定が始められつつある。

また KURAMA で使用されているサーベイメータは、国家標準とのトレーサビリティを有する 基準校正場において校正されているため、その測定精度が保証されているのに対し、KURAMA-II システムに関しては使用している CsI(TI)検出器の測定精度について公式の保証がない。さらに、 検出器を収納した箱等による遮へいの可能性があること等を考慮し、測定のための基礎データを 整備し、校正実験によりその特性を確認することが必要であった。

原子力機構福島環境安全センターでは,KURAMA-II を用いて信頼のおける精度の高い測定を 行うための技術的な基盤整備を行うとともに,文部科学省からの委託で進めている放射性物質の 分布状況等調査⁴⁾の一環として実施されている走行サーベイに本技術を適用し,詳細な空間線量 率マップの作成に貢献してきた。

基盤整備として、まず CsI(TI)検出器を用いた高精度測定の基礎データであるスペクトルー線量

換算演算子(以下, G(E)関数と示す)を、モンテカルロ計算を用いて取得した CsI(TI)検出器の応 答関数を基に開発した。次に、開発した G(E)関数を用いて線量換算を行う CsI(TI)検出器単体の照 射試験、さらにこの CsI(TI)検出器を組み込んだ KURAMA-II システムの照射試験を実施し、適切 な基礎特性を持つことを確認した。KURAMA-II を自動車に搭載して実測を行う際に必要な、車 内での線量率測定値を地上 1 m の空間線量率に換算するための補正係数についても検討を行い、 推奨値を提案した。また補正係数の車種による依存性について検討するとともに、KURAMA-II で測定された道路上での線量率と、道路周辺における線量率との相関について検討した。さらに、 KURAMA-II を用いた走行サーベイによって取得された不適切なデータの除外や修正を自動で行 うための処理プログラムを開発した。

文部科学省からの委託事業においては、これらの技術を活用し、原子力機構独自で広域走行サ ーベイを行うとともに、100 台の KURAMA-II を整備して地方自治体に貸与して自由に走行サー ベイを実施したことで、東日本の広域にわたる空間線量率分布マップを1ヶ月程度の期間で作成 することが可能となった。

本報告書においては、KURAMA-II システムあるいは他のシステムを用いた走行サーベイを適切に実施するための基礎情報を提供することを目的として、原子力機構で整備してきた KURAMA-II 測定の基盤技術について記載するとともに、文部科学省からの委託事業で行なった 広域空間線量率マップ作成作業に関して紹介する。さらに、これまでに KURAMA-II システムに 係わる基盤技術の整備や、実際の走行サーベイの実施等により得られた知識、経験に基づき、 KURAMA-II の管理方法の提案を行った。

2. KURAMA-IIを用いた測定の基盤整備・検証

2.1 装置の概要

東電福島事故により,我が国がこれまで経験したことのない規模の放射性物質による汚染が, 福島県をはじめ東日本一帯の広範囲に発生した。従来のモニタリング体制が震災や事故の被災に より十分に機能しない中,それを補完しつつより迅速かつ詳細,効率よく汚染状況を把握するた めのシステムとしてKURAMA及びKURAMA-IIを開発した³⁾。

KURAMAは従来の専用測定車による精密測定ではなく、多数の一般乗用車に搭載して広範囲の状況を詳細かつ短時間に把握することを目的としたシステムである。エネルギー補償型y線サーベイメータで測定した線量率をGPSの測位データでタグ付けしながら記録する測定器、データを受け取り可視化のための処理や解析を行うサーバ、測定者や関係者等のエンドユーザーがデータを閲覧するためのクライアントから構成される(Fig.2.1(a))。特徴的なのはデータをクラウドシステムで共有している点で、これにより従来の類似のシステムでは困難であった大量の測定器からのリアルタイムデータ収集や、サーバ設置に関する台数や場所に制約がなくなり従来のデータセンターに相当するものを自在に配置することが可能となった。KURAMAの車載機は市販のGPSやノートPCなどで廉価に構成され(Fig.2.2),事故直後の迅速な展開と柔軟な測定を可能にした。より長期の安定な監視体制を構築するため、このKURAMAをナショナルインスツルメンツ製の組み込み型PCであるCompactRIO⁵とCsI(TI)検出器⁶で再構成し、更なる小型化や堅牢性の向上や完全自動測定を可能にしたのがKURAMA-IIである。

KURAMA-IIモニタリング装置のシステム構成をFig.2.1(b)に、写真をFig.2.3に示す。約35 cm× 約18 cm、高さ約20 cmのアルミニウム薄板張りの木製容器に、CsI(TI)シンチレーション検出器(浜 松ホトニクス製Cl2137,詳細については2.3節参照)及びCompactRIOが搭載されている。測定さ れる波高スペクトル分布データは、データ処理を行うCompactRIOに送られ、内蔵されたG(E)関数 を用いて演算される。3秒間ごとの線量率データとGPSによる測位情報は、3G回線網を通じて10 秒程度ごとに一つの小さなテキストファイルとしてまとめられ、データ収集用ゲートウェイサー バに随時送信される。走行ルートには山間部等、通信環境の悪い状況もありうるが、その場合デ ータは一時的にCompactRIO内のメモリに蓄積され、通信環境が復帰した際にまとめてゲートウェ イサーバに送られる仕組みになっている。ゲートウェイサーバは、受信した小さなテキストファ イルを従来のKURAMAと同じ車載機ごとの一つのデータファイルへ再構成する。そのファイル は従来のKURAMAと同様にクラウドシステム上で共有され、クラウドシステムに接続したサー バでその後のデータ処理が行われる。KURAMA-IIの車載機は一般に乗用車内の後部に設置され るが、それ以外の様々な設置条件も想定されたため、状況に応じて車内での測定値から車外の地 上高さ1mでの値への補正を自動で行うことも、サーバ側で補正をかけることも可能なシステムに なっている。



Fig.2.1 KURAMAモニタリング装置のシステム構成。(a) KURAMA, (b) KURAMA-II

JAEA-Technology 2013-037



Fig 2.2 KURAMA 車載機。ポータブル型 Nal サーベイメータ, 市販の GPS やノート PC などで廉価に構成されている。



Fig.2.3 KURAMA-IIモニタリング装置: (a) 外観, (b) ケース内の検出器とデータ処理・通信用
 基盤, (c) CsI(Tl)シンチレーション検出器(C12137)

2.2 G(E)関数の計算評価

G(*E*)関数による線量評価手法を用いると、場のエネルギースペクトルの解析を行うことなく、 測定した波高スペクトルから直接的に高い評価精度で線量を導出することが可能である。以下、 線量導出の原理⁷⁻¹⁰⁾を簡単に示す。

ある単色エネルギー Eoの光子に対して、次の積分方程式を成立させるような荷重関数 G(E)が

存在するならば、単位フルエンス当りの線量換算係数 $h(E_0)$ は、検出器の応答関数 $n(E,E_0)$ を用いて以下のように表すことができる。

$$h(E_0) = \int_0^\infty n(E, E_0) \, G(E) dE$$
 (1)

よって、種々のエネルギー E_i の γ 線混在場における全線量Dは、全フルエンスに対する波高スペクトルをN(E)、光子フルエンスを $\phi(E_i)$ とすると、(1)式を用いて以下のように書ける。

$$D = \sum_{i}^{\infty} \phi(E_{i}) h(E_{i})$$

$$= \sum_{i}^{\infty} \int_{0}^{\infty} \phi(E_{i}) n(E, E_{i}) G(E) dE$$

$$= \int_{0}^{\infty} \sum_{i}^{\infty} \phi(E_{i}) n(E, E_{i}) G(E) dE$$

$$= \int_{0}^{\infty} N(E) G(E) dE \qquad (2)$$

このように全線量Dは、場のエネルギースペクトルを解析することなく、測定される波高スペクトルと *G*(*E*)関数から算出することができる。

KURAMA-IIのシンチレーション検出器に対する応答関数の計算⁷⁾には,連続エネルギーモンテ カルロシミュレーションコードMCNP5¹¹⁾を用いた。可能な限り詳細にC12137検出器の構造を模擬 した体系において,40 keV~13000 keVの24点の単一エネルギー光子に対する応答関数を計算した。 下限エネルギーは,C12137 検出器の仕様(2.3.1節参照)に基づいて決定した。上限値については, 自然界に存在する天然の放射性物質の寄与(~3MeV)を十分カバーするように選択した。

結晶に対するビームの入射方向をFig.2.4に示す。このように、平行ビームを結晶面に対して直 角に入射させる条件で計算した。環境に放出された放射能によるγ線の線量測定では、結晶に対し て等方的にγ線が入射する体系が実際の状況にもっとも近いと考えられるが、環境放射能に対する 線量測定⁸⁻¹⁰⁾でも採用されている代表的な入射条件である平行ビームを用いた体系を採用した。

線量換算係数には、国際放射線防護委員会(International Commission on Radiological Protection, ICRP)の光子フルエンスから周辺線量当量 $H^*(10)$ (1センチメートル線量当量)への換算係数を 用いた¹²⁾。 $H^*(10)$ に対する線量当量換算係数及びモンテカルロ輸送計算から求めた応答関数を用い て、離散化した(2)式の逆行列を解く手法によって、高次多項式によって表されるG(E)関数を決定 した。



Fig.2.4 検出器の応答関数シミュレーション計算におけるγ線の入射方向

2.3 実験による基礎特性試験

2.3.1 検出器単体の照射試験

計算した *G*(*E*)関数から導出される線量の妥当性を検証するために,原子力機構原子力科学研究所の校正場(放射線標準施設棟,The Facility of Radiation Standards,以下 FRS と示す)において C12137 検出器単体の照射試験を実施した。

(1) 検出器

C12137の構成を Fig.2.5 に示す⁶。13 mm×13 mm×20 mmの CsI(TI)結晶に光子が入射すると, 光信号は低電圧で高増倍率を得られる MPPC(Multi-Pixel Photon Counter,マルチピクセル半導体 光検出素子)を介して増幅される。その後,基板上の回路内で処理された波高または線量率デー タは,USB ケーブルを介して出力可能で、パソコンに直接接続すれば、付属の専用ソフトウェア を用いて線量率とともに波高スペクトルデータを取得できる。電源は USB を介して供給され、測 定対象のγ線のエネルギー範囲は、30 keV~2000 keV である。

しかし、この測定器には信号波形出力用の端子はないため、波形の確認や数え落としの影響評価を行えなかった。そこで、実際の測定時間(リアルタイム)をライブタイムとみなして評価した。また照射実験前には、¹³⁷Cs線源の662 keV 単色エネルギーピークを用いて、1%以内の精度で 波高を調整した。

(2) 照射試験

実験は、FRS 第3 照射室において実施した。実験の様子を Fig.2.6 に示す。FRS には、国家標準 とのトレーサビリティを確保した中性子、γ線、X線及びβ線の校正用照射設備が整備されており、 照射実験を行った γ線照射場には、散乱線込み及び一次線のみの線量率が距離の関数として与え られている。使用した線源の核種及び代表的なエネルギーを Table 2.1 に示す¹³⁾。

G(E)関数から導出される線量率のエネルギー特性評価には、¹³⁷Cs、²²⁶Ra 及び ⁶⁰Co 線源を用いた。線源と検出器間の距離を 200 cm または 300 cm に設定し、本試験前に行った線量率依存性の結果から、数え落としの影響が小さいことを確認した約 1~5 μ Sv/h の線量率範囲において、計算条件を再現するように、放出される γ 線が検出器の 13 mm × 13 mm の結晶面に対して直角に入射する条件において実施した。シャドーシールド法によって一次線による線量を評価するために、線源と検出器のほぼ中間に直径 10 cm、厚さ 15 cm の鉛ブロックを設置して同様に測定し、一次線のみによる波高スペクトルデータを得た。その他の密封微量線源を用いた測定では、シンチレータ表面から約 10 cm 離れた位置に線源を置いて波高スペクトルを測定した。



Fig.2.5 C12137検出器の構成



Fig.2.6 FRS における実験の様子

Table 2.1	使用した放射性同位元素と放出される	γ線のエネルギー ¹³⁾
-----------	-------------------	-------------------------

核種	γ線エネルギー [keV]
²⁴¹ Am	59.5
⁵⁷ Co	122
¹³⁹ Ce	166
¹³³ Ba	81.0, 356
¹¹³ Sn	392
⁸⁵ Sr	514
²²⁶ Ra	830*
⁶⁵ Zn	1116
⁶⁰ Co	1173, 1333
⁸⁸ Y	1836
* *	

^{*} 参考文献 14)参照。

2.3.2 KURAMA-II の照射試験

前述した C12137 検出器を含む KURAMA-II モニタリング装置全体としての基本特性を確認する ために,原子力機構核燃料サイクル工学研究所の計測機器校正施設 (Instrument Calibration Facility, 以下 ICF と示す)において,¹³⁷Cs 照射装置及び公称放射能 3.7 MBq の密封 γ 線源 (核種:²⁴¹Am, ¹³³Ba,¹³⁷Cs 及び ⁶⁰Co)を有する校正場において,以下の特性試験を行った。また,その結果につ いて, γ 線線量当量率サーベイメータの性能を規定する日本工業規格 JIS Z4333:2006¹⁵⁾の基準と比 較した。¹³⁷Cs 照射装置及び ¹³⁷Cs 密封 γ 線源による照射の様子を Fig.2.7 に示す。

(1) 線量率直線性試験

¹³⁷Cs からの γ 線による周辺線量当量率 \dot{H}^* (10)を 0.2 μ Sv/h~200 μ Sv/h で変化させたときの,指示値の直線性を確認した。0.2 μ Sv/h~6 μ Sv/h については ¹³⁷Cs 密封 γ 線源, 6 μ Sv/h~200 μ Sv/h については ¹³⁷Cs 照射装置を用いて照射を行った。指示値は 3 秒ごとに演算処理されるため,線量率 ごとに 20 回指示値を読み取り(測定時間 1 分間),その平均値を用いた。バックグラウンドを差 し引いた正味指示値を照射した線量率で除してレスポンスを求めた。

(2) 指示值変動試験

前述の線量率直線性試験において,線量率ごとに20回読み取った指示値をもとに,変動係数(指示値の標準偏差を平均値で除した値の百分率)を求めた。

(3) 方向特性試験

¹³⁷Cs からの γ 線に対する方向特性を確認した。0°における試験時の様子を Fig.2.7 に示す。¹³⁷Cs 照射装置を用いて $\dot{H}^*(10)$ で 20 μ Sv/h 照射し,装置正面(バックルが取り付けられた面)を基準の 向きとして、30°刻みに方位角(水平)方向に γ 線入射角度を変化させたときの指示値を読み取り、線量率直線性試験と同様にレスポンスを求めた。

(4) エネルギー特性試験

 γ 線エネルギー59.5 keV~1250 keV に対するエネルギー特性を確認した。²⁴¹Am (59.5 keV), ¹³³Ba(356 keV), ¹³⁷Cs(662 keV)及び⁶⁰Co(1250 keV)の核種からなる密封 γ 線源を用いて照射し、そ れぞれ指示値を読み取り、線量率直線性試験と同様にレスポンスを求めた。なお、照射した \dot{H}^* (10) の範囲は、0.2 μ Sv/h~2 μ Sv/h である。

(5) レスポンス個体差試験

本装置の個体間のレスポンスの違いを確認した。上記(1)~(4)の試験を実施した機体(1号機, シリアル番号:016A98B5)の他,シリアル番号の異なる4台の機体を選定した計5台に対して, ¹³⁷Cs 照射装置を用いてH^{*}(10)で20 µSv/h 照射し,それぞれ指示値を読み取り,線量率直線性試 験と同様にレスポンスを求めた。



Fig.2.7 ICF における実験の様子 (a)¹³⁷Cs 照射装置 (b) 密封 γ 線源(公称放射能 3.7 MBq)

2.3.3 自動車の車体による遮へいの影響の評価

KURAMA-II モニタリング装置を用いて自動車による走行サーベイを行う場合,測定すべき量 は、車外における地上1mの周辺線量当量率である。しかし、検出器を含むKURAMA-IIモニタ リング装置本体は車内に設置するため、車体による遮へいなどの影響を考慮し、測定値から地上 1mの周辺線量当量率を評価するための車内外補正係数を求める必要があった。一方、NaI(TI)サ ーベイメータを用いた KURAMA に対する車内外補正係数²⁾は、線量率の異なる多数の地点での 測定データに基づいて評価されており、これまでのマッピング事業において使用されてきた。 2.4.5節で示すように、セダンにおける KURAMAと KURAMA-II の線量率はよく一致すること が確認されており、KURAMA 及び KURAMA-II で得られるデータには一貫性が保たれている。 よって、KURAMA を用いて評価した車内外補正係数を KURAMA-II に適用することとした。本 節では、セダンに設置した KURAMA に対して実施した車内外補正係数の評価について述べる。

測定には、NaI(TI)シンチレーション式 γ 線線量当量率サーベイメータ(日立アロカメディカル 製,TCS-171)を用い、車両はセダンタイプのものを用いた。車両の右後部座席の天井取っ手部に サーベイメータ検出器部を固定し、車内における周辺線量当量率を測定した。なお、この検出器 の配置は、検出器としてサーベイメータを用いる KURAMA による走行サーベイの際の検出器配 置と同様である。次に、測定に影響を与えないように離れた位置に車両を移動した後、ほぼ同じ 位置において地上1mにサーベイメータを保ち、車外における周辺線量当量率を測定した。そし て車内外補正係数 Fを、車外における1m高さでの周辺線量当量率 $\dot{H}_{out,Im}$ の、車内における周辺 線量当量率 \dot{H}_{in} に対する比として、以下のように定義した。

$$H_{out,lm} = H_{in} \times F \tag{3}$$

測定場所は、福島県内における周辺の地勢の影響の小さい場所を選定した。車外における線量 率は 0.26~30 μSv/h の範囲であり、平成 23 年 6 月~7 月に 14 点、平成 24 年 2 月に 5 点の計 19 点において測定した。

2.3.4 車種の違いによる車内外補正係数への影響

KURAMA-II モニタリング装置を用いた走行サーベイは、原子力機構が行う他、東北・関東甲

信越の自治体に依頼して実施した。走行サーベイに用いる車両として原則セダンタイプを指定したが、実施自治体によっては車両の手配の都合により、それ以外の車種が使われた例があった。 車内外補正係数は車体の構造に依存することが予想されるため、2.3.3 節で述べた手法を用いて、 様々な車種に対する車内外補正係数を実測によって評価した。使用した車種は、セダン、ステー ションワゴン、業務用ワゴン、ミニバン、ハイブリッド車(5ドア)、コンパクトタイプの6車種 で、実際に自治体が用いた車種から選定した。測定場所は、福島県広野町及び楢葉町内で地勢の 影響をできるだけ受けないような周辺が開けた場所10点を選定した。測定を実施した平成25年 2月18日~20日において、これら測定点のサーベイメータによる空間線量率は、0.15~0.50 µSv/h であった。測定方法を以下に記す。

まず車両停車時において、車両の右後部座席ヘッドレストの後ろ・高さ1m(以下、「標準的な 位置」という。)にサーベイメータの検出器部分を保持し、車内における線量率を測定した。次に 車両を移動し、車両内の検出器の設置位置とほぼ同じ位置で地上1mの高さにTCS-171サーベイ メータを保ち、車外における線量率を測定した。なお、今回の測定に使用したセダンタイプは、 右後部座席の後ろの高さは約1.2mであったが、地表面に一様に広がった面線源であると仮定す ると、車内測定高さの違いはほとんど無視できると考えられる。

また走行サーベイ時の車種による測定値の違いを調べるために,KURAMA-II を各車両に設置 し福島県広野町及び楢葉町内の同一ルートを約15分間サーベイした。その際,KURAMA-II を車 内の5カ所に設置し測定し,100mメッシュ平均の線量率をメッシュごとに標準的な位置に置いた 場合とその他の位置について比較した。標準的な位置以外の設置位置は,後部座席(運転席側), 同(助手席側),運転席ヘッドレスト後,助手席である。なお,この測定は,3台のKURAMA-II を同時に用い,「標準的な位置,後部座席(助手席側),運転席ヘッドレスト後」及び「標準的な 位置,後部座席(運転席側),助手席」に設置して行った。前者の設置例をFig.2.8に示す。



Fig.2.8 KURAMA-II 設置例 (セダンタイプ)

2.3.5 道路上と道路周辺における線量率の相違

自動車による走行サーベイによって得られる線量率の情報は,走行ルート上,つまり車道上1mの高さにおける値である。一方,汚染地域の除染計画の立案などを行う場合は,車道上の線量率よりも,実際に住民が滞在し得る歩道や公園,住居周辺などにおける線量率情報が必要となることが多い。そこで,走行サーベイによって得られた線量率と走行ルート近辺の線量率との関係について確認した。平成23年度以降のKURAMA-IIを用いた走行サーベイ²⁾においては,測定地域を100m四方のメッシュに分割し,メッシュ内で測定された走行サーベイ結果を平均してメッシュの代表値とする処理を行なっている。また,放射性物質分布状況調査においては,経時的な状況の変化が少ないと考えられる平坦な地点を多数選び,地上1mにおける空間線量率の測定を走行サーベイとほぼ同じ時期に実施しており,走行サーベイ結果との比較が行える。次章では平成24年8月から10月の間に実施した走行サーベイと空間線量率測定の結果を比較した結果を示す。

2.4 結果及び考察

2.4.1 G(E)関数

種々の線源を用いて測定した波高スペクトルの例を Fig.2.9 に示す⁷⁾。²⁴¹Am, ¹³⁷Cs のピークと ともに, ⁶⁰Co の 2本の γ 線 (1173 及び 1333 keV) によるピークも弁別できている。単色エネルギ ーのピーク領域において算出したエネルギー分解能 (FWHM) は, ²⁴¹Am (20%), ⁵⁷Co (16%), ¹³⁹Ce (14%), ¹¹³Sn (11%), ¹³⁷Cs (9%) である。エネルギーが低いと,エネルギー分解能が低下 する傾向を確認できる。また, C12137 検出器のカタログ⁶⁰によると, ¹³⁷Cs に対するエネルギー分 解能は 8%であり,今回の測定において同程度のエネルギー分解能で測定できていることがわかっ た。



 Fig. 2.9 測定した波高スペクトルの例(図中の点線は線量導出に考慮した波高の下限(40 keV)

 を表す)

KURAMA-II用のH*(10)に対する G(E)関数をFig.2.10に示す。24のエネルギー点における近似誤 差の平均値は1%以内である。G(E)関数の値は100 keV付近で極小となり、それ以上のエネルギー 範囲において増加する傾向を示している。波高の下限値である40 keV以下の検出器の応答と線量 寄与を補填するように、100 keV以下の範囲におけるG(E)関数の値は大きくなっている。

Fig.2.10 *H**(10)に対する*G*(*E*)関数

2.4.2 検出器単体の照射試験

測定した線量率と、各線源の照射位置で与えられた基準線量率の比を Table 2.2 に示す^{η}。 "Foreground"は直接線及び散乱線の両方の寄与を含んだ結果、"Direct"はシャドーシールド法に よって Foreground から散乱線の寄与を差し引いた結果である。

計算条件をほぼ再現した Direct については,実際の検出器の形状と計算で模擬した形状とのわずかな違い等のために,測定値は基準値よりやや小さい値を示していると考えられるが,測定値は 7%以内で基準線量率と一致している。一方,Foreground における線量率の比は,3 核種について±2%以内である。以上の結果から,実用可能な *G*(*E*)関数を計算できていると考えられる。

拉话	測定した線量率/基準線量率	
以性	1) Foreground	2) Direct
¹³⁷ Cs	0.98	0.93
²²⁶ Ra	1.01	0.95
⁶⁰ Co	0.98	0.94

Table 2.2 基準線量率に対する測定した線量率の比

2.4.3 KURAMA-II の照射試験

(1) 線量率直線性試験

照射した周辺線量当量率 $\dot{H}^*(10)$ とレスポンスの関係を Fig.2.11 に示す。ここで、¹³⁷Cs 照射装置 による試験では、照射時の機器の配置条件の関係から散乱線の影響で系統的に 10%程度高い値を 示したため、散乱線の影響が無視できる密封 γ 線源の測定結果で規格化して示した。0.2 μ Sv/h~ 30 μ Sv/h の範囲では、レスポンスの変化は \pm 15%であり、JIS Z4333 の基準である \pm 15%を満足し た。一方,線量率の増加とともに数え落としによる指示値の低下が見られ,100 μSv/h で約3割,200 μSv/h で5割程度低下した。

数え落としによる影響の補正を試みるため, 0.2 μSv/h~100 μSv/h の測定結果から非まひ型モ デルを仮定して,最小二乗回帰により補正式を導いたところ,以下の式が得られた。

$$H = \frac{M}{1 - 0.0027M}$$
(4)

ここで、Hは補正後の指示値、Mは補正前の指示値である(単位はいずれも µSv/h)。

高線量率下における測定においては、本補正式を用いることで100 µSv/h 程度まで、直線性を維持できることがわかった。

(2) 指示值変動試験

指示値(平均値)と変動係数との関係を Fig.2.12 に示す。本装置に用いている C12137 検出器の メーカ公称感度(0.01 μSv/h あたり 40 cpm)⁶をもとにポアソン分布を仮定したときの変動係数の 推定値を実線であわせて示す。今回,実験的に得られた変動係数は推定値とよく一致した。線量 率の低下とともに変動係数は大きくなるが,約 0.2 μSv/h 以上の線量率では,JIS Z4333 の基準で ある 15%以下を満足することがわかった。

(3) 方向特性試験

入射角度ごとのレスポンスを Fig.2.13 に示す。ここでは、0°方向におけるレスポンスで規格化 して示した。検出器後方(180°)からデータ処理・送信用基板が配置された方向(270°)にかけ て若干のレスポンスの低下が見られるものの、入射角度によるレスポンスの変化は全方位におい て-23%~+10%の範囲であった。JIS Z4333の基準は、±90°(0~90°及び270°~360°)でレ スポンスの変化は±25%であり、それを満足している。

(4) エネルギー特性試験

γ線エネルギーとレスポンスの関係を Fig.2.14 に示す。計算によるレスポンスとして, *G*(*E*)関数 の決定に用いた 24 のエネルギー点におけるモンテカルロ計算から求めた波高スペクトルと *G*(*E*) 関数との Folding 計算から得た結果をあわせて示す。

計算上のレスポンスは6 MeV 以下の範囲においてほぼ1を示しており,最大でも数%の差である。G(E)関数の評価においては C12137 検出器以外の,KURAMA-II 筐体やデータ処理・送信用基板などを考慮していないものの,実験的に求められたレスポンスは,計算上のレスポンスに統計変動の範囲内で一致し,その変化は±15%の範囲であった。JIS Z4333 の基準は,EIII型(シンチレーション式(エネルギー補償式)相当)で 60 keV~1.5 MeV におけるレスポンスの変化は±15%であり,それを満足している。

(5) レスポンス個体差試験

本装置の個体ごとのレスポンスを Table 2.3 に示す。ここでは、シリアル番号 016A98B5 (1 号機)

のレスポンスで規格化して示した。本装置の個体間のレスポンスの違いは最大でも3%であった。

Fig.2.11 KURAMA-II の線量率直線性

Fig.2.12 KURAMA-II の指示値変動

Fig.2.13 KURAMA-IIの方向特性

Fig.2.14 KURAMA-II のエネルギー特性

シリアル番号	相対レスポンス
016A98B5 (#001)	1.00±0.02
016AC43E (#002)	0.99±0.03
016AC433 (#003)	$0.98{\pm}0.02$
016AC442 (#004)	$0.97{\pm}0.02$
016AC461 (#005)	$0.97{\pm}0.02$

Table 2.3 個体ごとの相対レスポンス (s/n: 016A98B5(#001)の相対レスポンスを基準とする。)

2.4.4 自動車の車体による遮へいの影響の評価

車内及び車外における^Ĥ*(10)の関係²⁾を Fig.2.15 に示す。車内における^Ĥ*(10)は、車外で測定 した周辺線量当量率と比べて線量率に関わらず低めの値を示した。これは車体による遮へいの影 響と考えられる。また、車内における^Ĥ*(10)と車内外補正係数の関係を Fig.2.16 に示す。これら の図は、平成 23 年 7 月 5 日に広く均一に放射性物質が沈着していると見られる地点を選び実測を 行なった結果を基に作成したものである。NaI(TI)シンチレーション式サーベイメータを用いて車 内の KURAMA の検出器設置位置での空間線量率を測定した後、車両のない状態で地上 1 m の空 間線量率を測定してその関係を調べた。この調査の詳細については Appendix に記載する。さらに、 線量率の低い地点においては、後日測定を行いデータを追加した。

Fig.2.16の各データ間にはばらつきが見られるが、1 μSv/h 以上の範囲における車内外補正係数 としておおむね1.3を適用できると判断される。一方、1 μSv/h 未満についても同様にデータにば らつきがあるものの、線量率の減少とともに補正係数が低下する傾向がみられるため、車内外補 正係数として一律に1.3 を適用すると過大評価になる可能性がある。そこで、以下の式から補正 係数を求めることとした。

> $F = 1.3 \qquad \dot{H}_{in} > 1.0$ $F = 0.06515 \times ln(\dot{H}_{in}) + 1.3 \qquad 1.0 > \dot{H}_{in} > 0.01 \qquad (5)$ $F = 1.0 \qquad 0.01 > \dot{H}_{in}$

(3)式に示すように、F は車内外補正係数、H_{in} は車内におけるH*(10)である。低線量率地域での補正係数に関しては不確かさが残っており今後の検討が必要であるが、走行サーベイの主な対象となる 0.2 µSv/h 以上の空間線量率の場合には、補正係数は 1.2~1.3 の範囲に収まっており、走行サーベイ結果に大きな影響を与えるものではないと判断される。

今回,車内外補正係数を求めるために用いたデータは,時間的制約があったため,計19地点の データから求めたが,今後より多くのデータを用いて再検証する必要がある。また,東電福島事 故によって放出された環境中の¹³⁴Cs及び¹³⁷Csの存在比は時間の経過とともに変化し,それにと もない存在する γ 線のエネルギー(¹³⁴Cs:主に 605 keV及び 796 keV,¹³⁷Cs: 662 keV)の割合も 変化することから、車体による遮へい効果も変化する可能性がある。このため、経時的に車内外 補正係数に変化がないか確認することが重要である。

Fig.2.15 車内及び車外において測定したH*(10)の関係²⁾

Fig.2.16 車内線量率と車内外補正係数との関係²⁾

2.4.5 車種の違いによる車内外補正係数への影響

(1) 停止中の結果

各車種について,停車中の測定データに基づく車内外補正係数(10点)の平均値及び測定誤差 (標準偏差1σ)をTable 2.4 に示す。車内外補正係数は、セダンタイプについて 1.25,全車種の 平均で 1.17 であった。ステーションワゴンに対する補正係数(1.09)はわずかに低いが、各車種 の車内外補正係数は測定誤差の範囲内でほぼ一致する。

KURAMA-II による線量率とサーベイメータによる線量率の比を Table 2.5 に示す。セダンタイ プについて 0.99, 全車種の 10 測定点での平均値は 1.06 であり,各車種での KURAMA-II とサー ベイメータの測定値は,測定誤差の範囲内でおおよそ一致する。

(2) 走行中の結果

セダンタイプとその他の各車種について,標準的な位置に KURAMA-II を設置した場合の線量 率の比較を Fig.2.17 に示す。各データ点について,原点を通る直線でフィッティングした式を図 中に示す。Fig.2.17(a)の結果から,ステーションワゴン内での線量率はセダン内で測定した値とよ く一致することがわかる。また Fig.2.17(b)において,ミニバンに対する結果はセダンに比べて約 5%低いが,測定誤差の範囲内で一致する。その他の車種についても同様の結果が得られた。

測定される線量率の設置位置による違いを、セダンタイプを例として Fig.2.18 に示す。各デー タ点について、原点を通る直線でフィッティングした式を図中に示す。Fig.2.18(a)~(c)に示す後部 座席及び運転席ヘッドレスト後において測定された各線量率は、標準的な位置における線量率と 5%以内で一致する。一方、助手席で測定された線量率(Fig.2.18(d)参照)は、標準的な位置にお ける線量率より約 10%低く、セダン以外の車種においても同様の傾向が見られた。助手席(前部 座席)における測定値は、他の設置位置と比較して、エンジン等による遮へいの影響を受けてい ると考えられる。よって、KURAMA-II を助手席に設置した条件で測定する場合には、過小評価 する可能性があることに注意する必要がある。

車 種	補正係数	1 σ
セダン	1.25	± 0.08
ステーションワゴン	1.09	± 0.05
業務用ワゴン	1.18	± 0.06
ミニバン	1.18	± 0.07
ハイブリッド	1.16	± 0.09
コンパクト	1.17	± 0.07
全車平均	1.17	

Table 2.4 サーベイメータによる車種別車内外補正係数の測定結果

車種	線量率比	1 σ
セダン	0.99	± 0.05
ステーションワゴン	1.12	± 0.09
業務用ワゴン	1.01	± 0.11
ミニバン	1.10	± 0.07
ハイブリッド	1.04	± 0.11
コンパクト	1.09	± 0.10
全車平均	1.06	

Table 2.5 線量率比(サーベイメータ/KURAMA-II)の測定結果

(a) ステーションワゴン Fig.2.17 KURAMA-IIを用いた車種による線量率の比較(セダンとの比較)

Fig.2.17 KURAMA-IIを用いた車種による線量率の比較(セダンとの比較)(続き)

Fig.2.18 KURAMA-IIを用いた標準的な位置と各測定位置の線量率比較(セダンタイプ)

Fig.2.18 KURAMA-IIを用いた標準的な位置と各測定位置の線量率比較(セダンタイプ)(続き)

(d) 助手席

Fig.2.18 KURAMA-IIを用いた標準的な位置と各測定位置の線量率比較(セダンタイプ)(続き)

2.4.6 道路上と道路周辺における線量率の相関

KURAMA-II による走行サーベイのモニタリング結果と、その走行ルート周辺の線量率との関係を Fig.2.19 に示す。この結果は、平成 24 年 8 月 20 日から 10 月 12 日の期間に行なった走行サーベイの結果と、ほぼ同時期の平成 24 年 8 月 14 日から 9 月 7 日の期間に行なった平坦地上 1 m における空間線量率測定の結果を比較したものである。走行サーベイの結果は、100 m 四方のメッシュで地域を分割し、1メッシュ内に含まれる走行サーベイによる測定結果を平均してそのメッシュの代表値とした。

走行サーベイの結果と周辺の地上1mの空間線量率は良い相関を持つことがわかる。このこと から、走行サーベイは道路上での空間線量率を測定したものではあるが、道路周辺の空間線量率 を反映した結果が得られていることが確認された。また、回帰直線の傾きが1.24であることから、 走行サーベイを実施した平成24年8月の結果に1.24を乗じることにより、道路周辺の線量率を おおまかに推定できると考えられる。ただし、この関係は経時的に変化するものであることに注 意する必要がある。平成24年3月の測定においては、走行サーベイ結果と地上1mの測定結果 の回帰直線の傾きは1.2であった。このことは、道路上の空間線量率は平坦地上の空間線量率よ りも早く減衰することを示している。道路に沈着した放射性セシウムはウェザリングの効果を受 けやすく、また道路を走行する車両によって放射性セシウムが移動するため、道路上の空間線量 率が早く減衰すると推定される。

Fig.2.19 走行サーベイによるモニタリング結果(100m 四方のメッシュ内の平均値)と,その走行ルート周辺の線量率との関係²⁾

3. KURAMA-II を用いた放射線線量率マッピング

3.1 マッピング事業の概要

測定の概要

平成 23 年度のマッピング事業において,原子力機構は KURAMA-II を用いた大規模な線量率測 定を実施した^{2,16}。平成 24 年 3 月 13 日~30 日の期間に,マッピング事業で整備した 100 台の KURAMA-II モニタリング装置を用いて,10 都県(福島県,宮城県,茨城県,栃木県,群馬県, 千葉県,埼玉県,東京都,神奈川県,山梨県)内の自治体と協同して測定を実施した。各都県へ の装置の提供台数は,自治体(都県または各市区町村)からの要望に基づき,文部科学省が決定 した。都県ごとの提供台数は,福島県:8台,宮城県:11台,茨城県:15台,栃木県:8台,群 馬県:7台,千葉県:13台,埼玉県:11台,東京都:11台,神奈川県:13台,山梨県:3台であ った。

測定は,道路のできるだけ中央部分で周囲の線量率を等方的に測定するため、また、測定車内 で測定された線量率から車がない状態での道路上1mでの線量率に換算するため、装置を一般的 なセダンタイプ(5人乗り)の「標準的な位置」(2.3.4節参照)に設置した。測定データの流れ及 び測定システムの運用体制をFig.3.1に示す。

Fig.3.1 KURAMA-II モニタリング装置を用いた測定におけるデータの流れ及び運用体制

(2) データ処理の概要

KURAMA-II モニタリング装置によって得られる線量率データは、測定中におけるリアルタイム性を重視した"速報値"の他、測定後に種々の補正を実施した3種類の暫定値及び公開版データの5つに分類される。データ変換サーバで実施したデータ処理の概要を Fig.3.2 に示すとともに、以下の1)~5)の補正を実施した線量率データの一覧を Table 3.1 に示す。

1)速報値

測定中の線量率を Google Earth 上で確認する際には、速報値が表示される。速報値は、測定

した波高分布から導出される線量率(Fig.3.2 の"測定値(元データ)")に対して,一律の車内 外補正係数(1.3)を乗じて道路上1mでの線量率を概算したものである。

2) 暫定值①

毎日の測定終了後,測定値(元データ)に対して,3.2 で述べる測定時刻,位置データ及び(5) 式に基づく線量率の車内外補正を自動で行い,暫定値①を算出した。

測定時刻の補正では、同一時刻のデータを削除した。位置データに関する補正では、位置デ ータが不正なデータの削除、道路データに基づく位置情報の補正、道路データのない測定値の 削除、トンネル内の測定値の削除を実施した。線量率に関する補正では、2.4.4 節で述べた車内 外補正係数に基づく補正、ノイズや検出器の統計的な揺らぎ等による急激な線量率の変化(ス パイクデータ、3.2 節参照)の削除、不正データの削除を行った。

3) 暫定値②(位置データ非補正版)

道路データに基づく補正には、国土地理院より刊行された精密な位置情報に基づく地図デー タを用いた(3.2.2 節参照)。しかしこの地図データは約8年前のデータであるため、新たに作 られた道路情報に対応していない。その結果、地図上にない道路を走行した場合、前項の自動 処理によって、測定値が削除される、あるいは実際に測定した道路と異なる位置に表示される といった事象が生じた。そのため、参考データとして、位置データに関するすべての補正を行 わない暫定値②(位置データ非補正版)を作成した。

4) 暫定値③(100m メッシュ表示)

走行地域を 100m 四方のメッシュに分割し、そのメッシュ内に含まれる暫定値①の平均値を 暫定値③とした(2.4.6節参照)。

5) 公開版データ

暫定値③に基づいて,測定した道路,線量率等について自治体と個別に協議した上で,最終 的な公開用のデータを決定した。

Fig.3.2 測定した線量率データの処理

		暫定値①	暫定値②	暫定値③	公開版データ
測定時間に関	同一時刻のデータの削除	0	0	0	0
する補正	測定開始/終了時の前後5分間の データ削除のとりやめ	0	0	0	0
	不正な位置データ((0,0), マイナ ス)の削除	0	-	0	0
位置データに	測定自治体を含む都県外のデータ の削除	0	-	0	0
関する補正	道路データに基づく位置情報の補 正・データの削除	0	-	0	0
	トンネル内のデータの削除	0	-	0	0
	低線量率の地点の線量率の補正	0	0	0	0
線量率に関す る補正	スパイクデータの削除	0	0	0	0
	不正データ(測定範囲外の線量率, 温度異常時)の削除	0	0	0	0
自治体からの要望に基づくデータの変更		-	-	-	0
データの表示方法		1データ点ごと表示		100mメッシュ内の平均値	

Table 3.1 評価した線量率データの一覧

3.2 KURAMA-II データ自動処理システムの開発

3.1 節に記した通り、マッピング事業では 100 台の KURAMA-II モニタリング装置を用いた大規 模な調査を行った。大量の測定データの中に混入した異常値を取り除くとともに、種々の補正を 行った正確な測定データを迅速に作成するために、KURAMA-II データ自動処理システムを開発 した。ここでは、KURAMA-II データ自動処理システムで行ったデータ処理について記す。

3.2.1 異常データの処理と車体による遮へいの補正

KURAMA-II モニタリング装置を構成する C12137 検出器, GPS モジュール, CompactRIO 等に

おいて,データ取得の失敗等のために異常な数値が取得される場合がある。本節では,測定デー タの中に混入した様々な異常値への対処方法と,車体による遮へいの影響を考慮したデータの補 正について示す。

(1) 検出器の測定不良による異常値の削除

KURAMA-IIモニタリング装置に搭載されたCl2l37検出器が正しく測定を行えていないと考えられる以下のデータについて、削除を行った。

検出器の測定可能なレンジを超えたデータ(空間線量率が 0.005 µSv/h 未満, または 1000 µSv/h 超過のデータ)

▶ 検出器の温度が 50℃を超過した時(測定器の使用条件外)に測定したデータ

(2) 同一時刻データの削除

1 台の KURAMA-II の測定データの中に,連続する同一時刻のデータが複数ある場合,最初の1 点を残して2点目以降のデータを削除した。

(3) 位置データが不正なデータの削除

緯度,経度が明らかに不正な値(0やマイナスの値)のデータを削除した。

(4) スパイクノイズの削除

KURAMA-II による測定データの一例を Fig. 3.3 に示す。この例のように KURAMA-II によって 測定される大量のデータには、前後の測定値と比較して変動の大きいデータ(以下、スパイクノ イズという)が含まれる場合がある。スパイクノイズは検出器の統計的な揺らぎに起因して発生 し、KURAMA-II の測定間隔(3秒)を考慮すると、異常データであると考えられる。スパイクノ イズを検出する方法としては、前後のデータと比較して急減に変化(n倍、1/n倍)しているかど うかを確認する方法があるが、しきい値 n の数値を大きくしすぎるとノイズを取りこぼす可能性 があり、逆に小さくしすぎると正常値までノイズと判定されてしまうことになる。そこで、適切 なしきい値を決定するために、しきい値の値とノイズ数の相関を調査した(Fig. 3.4 参照)。しき い値 3 付近において傾きが変化しており、3 より小さい範囲ではノイズ以外のデータもノイズと 見なされてしまう恐れがある。よってしきい値を 3 とし、前後のデータと比べて 3 倍、1/3 倍以上 変化しているデータはスパイクノイズとして削除した。

(5) 車内外補正係数に基づく補正

車内で測定した線量率を車外の線量率に換算するため, 2.4.4 節で述べた車内外補正係数に基づく補正を行った。

Fig.3.3 KURAMA-II 測定結果の例

Fig.3.4 しきい値の値と検出ノイズ数の相関

3.2.2 道路データに基づく測定値の削除と位置情報の補正

2.1節で述べたように、KURAMA-IIモニタリング装置は、GPS受信器から測定位置の情報を取得しているため、電波の受信状況等によっては、測定位置の不確かさが大きい場合がある。そこで、詳細な道路データに基づいて測定位置の情報を補正した。また、KURAMA-IIモニタリング装置を用いた測定ではトンネル内や高架の下を走行することもあるが、そのような場所は東電福島事故で飛散した放射性物質によって直接的には汚染しておらず、周辺の汚染状況を必ずしも反映していないと考えられるため、道路データを基にトンネル内や高架の下を走行したデータを抽

出し,削除した。基準の道路データには,平成14年9月から平成15年3月にかけて一般財団法 人日本地図センターから刊行された"数値地図25000(空間データ基盤)"を採用した。以下に, 実施したデータ処理の内容について示す。

(1) 正確な位置情報を取得できなかったデータの削除

使用した GPS 受信器の測定誤差は 20 m 程度であることから,道路から 20 m 以上離れた場所の 測定データについては正確な位置情報を取得できなかったデータとみなして削除した。道路から の距離の算出方法を Fig.3.5 に示す。道路の中心線と幅員の情報からなる道路データを用いて, KURAMA-II の座標と最も近い道路の中心線との距離を求め,そこから幅員の 1/2 の距離を引いた 距離を道路からの距離とした。

Fig.3.5 道路からの距離に基づく判定方法

(2) 道路データに基づく位置情報の補正

道路から 20 m 以内にある測定データについては,道路の中心線上に補正することとした。測定 地点から 20 m 以内に複数の道路データが存在する場合には,道路の接続情報と KURAMA-II の走 行方向のデータを用いて判断することとした。Fig. 3.6 に道路の選択方法を示す。

Fig.3.6 位置情報を補正する際の道路の選択方法

矢印(↔)はKURAMA-IIによる測定データの位置と、走行している方向を示す。点線の矢印は

補正前,実線の矢印は補正後の各位置を表す。直線は道路を示し,丸の部分は道路と道路の交点 を示す。

例えば③の測定データを補正する場合,最も近いのは道路1であるが,道路1は直前の測定デ ータ(②)が記録されている道路(道路2)と接続していないため,道路1ではなく道路2上へ 補正される。また④の測定データの補正を行う場合には,最も近いのは道路3であり,直前の測 定データ(③)が走っていた道路(道路2)とも接続されているが,走行している方向と道路の 方向が異なるため,道路3ではなく道路2上へ補正される。

(3) トンネル内や高架下の走行データの抽出

トンネル内や高架下は直接的には汚染していないため、得られる測定値は周囲の汚染状況を必ずしも反映しない。そのため、道路データに基づいてトンネル内及び高架下での測定値を削除した。立体交差地点に関しては、道路の接続状況や測定車の進行方向に関する情報を利用して、(2) に記した方法に基づいて判断した。

3.3 マッピング事業における測定結果

第2次マッピング事業において、10都県内で測定された結果²⁾を Fig.3.7 に示す。

平成24年3月13~30日の測定で,合計4,158,240点(3,465時間分)のデータが得られた。得られた測定データについて,測定時間に関する補正,位置データに関する補正,線量率に関する 補正を自動処理で実施した結果,東日本の広範囲において,3,544,583点(2,954時間分)の有効 データに基づく詳細な線量率(暫定値①,3.1節参照)の分布地図を得た。この線量率分布地図は, 国や地方自治体等による除染計画の作成のための基礎データとして用いることができる。

今回,大量の KURAMA-II を導入することによって,短期間のうちにマッピングのためのデー タを収集することができた。しかし,参照した地図に掲載されていない新しい道路上での測定デ ータや,異常なデータ等を削除した結果,取得したデータの約 15%を使用できなかった。今後は, 可能な限り最新の地図情報を用いるとともに,補正方法等を含めてデータ自動処理システムを改 良する必要がある。

Fig.3.7 マッピング事業の測定結果²⁾

4. KURAMA-IIの管理方法の提案

4.1 運用上の課題とその対策

KURAMA-II を用いた線量率マッピングは、3 章で述べた平成24年3月の他に、文科省の委託を受けて同年8月及び11月にも実施された。本章では、KURAMA-II モニタリング装置の健全性及び信頼性を確保するため、各回の準備に際して実施した使用前点検について述べるとともに、大量のKURAMA-IIの運用及び管理における課題とその対策について示す。

4.1.1 使用前点検

KURAMA-IIの使用前点検において実施した項目を Table 4.1 に示す。

指示値の一定性(項目①)

Fig.2.10 に示すように、*G*(*E*)関数から導出される線量は、測定される波高スペクトルに依存する ため、測定回路のゲイン変化などによって波高スペクトル全体がシフトした場合には線量率を正 確に導出できない。そこで、測定データの信頼性を簡易的に確認するために、下限数量以下の密 封微量¹³⁷Cs 線源(10 kBq)を毎回、同一の場所に設置して線量率を測定し、指示値の安定性を確 認した。測定の様子を Fig.4.1 に示す。

(2) ピークチャンネルの確認・調整(項目②)

下限数量以下の密封微量¹³⁷Cs線源を項目①と同様の場所に設置し,波高スペクトルデータを取得した。この際,専用の解析ソフトウェアを使用するために,C12137検出器をノートパソコンに 直接接続した。波高スペクトルを取得後,別途662 keVの光子に相当するピーク領域をガウス分 布を用いて最小二乗フィッティングし,全台数についてピーク位置を求めた。

(3) 総合動作確認(項目③)

取得される情報が Google Earth 上に正しく表示されることを確認した。

(4) 標準線源を用いたレスポンスの抜取試験(項目④)

項目①及び②の場合と異なり,基準線量率が校正された標準線源を用いた照射試験を原子力機 構原子力科学研究所において行い,線量率を測定した。データの取得方法は,通常の使用方法通 り,ゲートウェイサーバ経由とした。Fig.4.2 に測定の様子を示す。標準線源には,アイソトープ 協会製の照射線量率基準γ線源(型番 461,公称放射能 3.7 MBq)を使用し,シャドーシールド法 による線量率の差分から,散乱線成分を差し引いた一次線のみによる指示値を求め,基準線量率 で除してレスポンスを評価した。

項目	3月	8月	11月
 指示値の一定性 	0	0	0
② ピークチャンネルの確認・調整	0	0	0
③ 総合動作確認(LED表示, GPS, データ送信)	0	0	0
④ 標準線源を用いたレスポンスの抜取試験	-	0	-

Table 4.1 各測定時期において実施した使用前点検項目(平成 24 年)

Fig.4.1 ピークチャンネル確認用測定の様子

Fig.4.2 線量率標準線源を用いた測定の様子

4.1.2 結果

Table 4.1 に示すように, 平成 24 年 8 月の使用前点検ではすべての項目について実施した。以下, 8 月の点検時の結果を示す。

ピーク位置調整前の波高スペクトルの測定結果(2 台分)の例を Fig.4.3 に示す。(a)の分布については,662 keV のピークとほぼ一致しているが,(b)については 5.9%高めにピークがシフトしている。ずれ幅の最小及び最大の例を示したが,100 台ごとにずれの程度は異なっている。測定した線量率とピーク位置のずれの関係を,フィッティング直線とともに Fig.4.4 に示す。ばらつきはあるが,両者に正の相関があることがわかる。

次に,662 keV からのピーク位置のずれと指示値(線量率)の関係を Fig.4.5 に示す。指示値については、ピーク位置のずれが+0.5%と最も小さかった 62 号機を基準として、そこからの偏差として示した。また、ゲインの変化によって波高スペクトルのピーク位置が1~7%の範囲で変化したと仮定し、600 keV の光子に対する波高スペクトルのモンテカルロ計算結果を補正したものと*G(E)*関数との Folding 計算((2) 式参照)から求めた指示値の変化を求め、あわせて示した。実測から得られた指示値の変化と、計算から得られた指示値の変化の傾向は、非常によく一致した。

このことから、指示値の変化の主要因はピーク位置の変化によるものであることがわかった。

判明したピークのずれは、本来、C12137 検出器のゲイン調整によって対応するべきであったが、 時間的な問題のために実施できなかった。そこで、100 台の測定器から取得したピーク位置のデ ータ(項目②)を基に、全台数に対してゲインの補正係数を算出し、波高を CompactRIO 上で補 正した後に線量率を導出した。

Fig.4.4 ¹³⁷Csのピーク(662 keV)からのずれと指示値との関係

Fig.4.5 ¹³⁷Cs(662 keV)ピーク位置のずれと指示値変化の関係

ピーク位置の調整前後における 100 台の KURAMA-II の指示値の変化を Fig.4.6 に示す。●はピ ーク位置調整前, △は調整後の線量率データである。▲は,標準線源を用いた抜取試験を合わせ て実施したデータを表す。●で示した調整前の線量率と,△で示した調整後の線量率を比較する と,調整後の線量率は平均で約 8%下がっている。また各装置のばらつきも調整前と比較して小さ いことがわかる。また実線で示した標準線源に対する指示値の平均値は,他の装置の指示値(△) とよく一致している。このことは,抜き取りで選定した 6 台の装置が,100 台を適切に代表する ことを示している。

標準線源を用いて測定した装置のレスポンス(ピーク位置調整後)を Fig.4.7 に示す。基準線量率 (5.49 µSv/h) に対して,選択した 6 台の線量率の平均値は 5.02±0.13 µSv/h であり,レスポンス の平均値は 0.91±0.02 であった。なお,密封微量 ¹³⁷Cs 線源によって得られた指示値を元に,100 台のレスポンスの平均値に換算すると 0.93±0.04 となる。この結果は C12137 検出器単体の照射試験における ¹³⁷Cs 線源を用いた結果 (Table 2.2) と一致する。測定値は 7%過小評価となるが,基準線量率と 10%以内で一致するため,校正定数を用いた補正は行わなかった。今後,校正定数を 与える基準を決定した後,全 100 台について標準線源を用いた試験を実施し,機体ごとに校正定数を与える管理方法を確立する必要がある。

しかしわずか5ヶ月間(3月から8月まで)に、ピーク位置は最大+5.9%,線量率は平均で約+8% も変動していた。C12137検出器はリリースされて間もない比較的新しい測定器であるため、その 安定性については十分な知見を有していないが、この原因には製造直後の初期変動である可能性 が考えられる。今回実施した点検を行なっている限り、線量評価結果の信頼性に問題はないが測 定器の運用において大きな問題であり、使用前におけるピーク位置の確認及び調整を注意して実 施する必要がある。

Fig.4.6 KURAMA-IIのピーク位置調整前後の線量率測定結果

Fig.4.7 線量率標準線源に対する KURAMA-II のレスポンス測定結果

4.2 今後の管理方法の検討

KURAMA-II を用いた今回のマッピング事業では、時間的及び人的な制約の中、使用前点検を 行い、測定値の信頼性の確保に努めたが、今後、KURAMA-II を長期的に運用する場合や、地方 自治体や民間企業等の一般ユーザーが利用するなど様々な展開を想定した場合、これらの知見を 生かした品質管理手法を構築する必要がある。

本節では、KURAMA-II の運用にともない必要となる校正等を含めた管理方法について検討した結果について述べる。

4.2.1 試験項目

KURAMA-II の運用経験による知見や,原子力施設や放射線施設の放射線管理に用いられる一般のサーベイメータの検査及び校正の方法などを基に,実施すべきと考えられる試験項目を整理した。以下にその項目を示す。

(1) 総合動作確認

2.1 節で述べたように, KURAMA-II は, 放射線検出部(C12137 検出器⁶), 演算処理部 (CompactRIO⁵), GPS モジュール, 3G 回線接続部からなり, 更に処理された測定データはゲー トウェイサーバを経由して, クラウドシステムに転送され, Google Earth 上に表示される。これら が総合的に適切に動作していることを確認する必要がある。

KURAMA-II 本体に取り付けられた LED ランプ等が適切に点灯していること,クラウドに転送 された測定データ(測定時刻,緯度,経度,測定値など)が適切に出力され,Google Earth 上に表 示されることを確認すればよい。

(2) 簡易線源を用いた波高スペクトルのピーク位置の確認

4.1 節で示したように測定指示値の変動の主要因として,波高スペクトルのピーク位置のシフト が考えられる。そこで,比較的容易に入手ができかつ管理しやすい下限数量以下(例えば,¹³⁷Cs なら10 kBq)の密封線源(ここでは,簡易線源と表わす)を用いて,波高スペクトルの確認を行 う。現在のところ,波高スペクトルの確認を行うためには,C12137 検出器から USB ケーブルを 通じて直接パソコンに接続し,検出器メーカから供給される専用ソフトウェアを用いる必要があ る。例えば¹³⁷Csの簡易線源を用いた場合は,ピーク位置が 662 keV 近辺を示していることを確認 する。

(3) 簡易線源を用いた指示値の確認

前述した簡易線源を検出器の既定の位置に設置し、そのときの指示値を確認する。¹³⁷Cs 10 kBq の簡易線源を検出器に密着させた場合、1~3 μ Sv/h 程度の指示値が見込める。KURAMA-II の通常 の設定時間である測定時間 3 秒の場合、1 μ Sv/h の指示値における変動係数は 7%程度であること から(Fig.2.12 参照)、20 回の平均値を用いることで、統計変動を 2%以下にすることができる。

この値は、経時的に検出器の感度に変化がないことを確認するために用いることができる。

(4) 線量率標準線源を用いた校正

基準線量率が校正された標準線源を用いて校正を行い,必要に応じて装置個別に校正定数を与 える。校正の方法としては,標準線源を室内散乱線等の影響を受けない十分に広い室内に設置し て試験を行うことが望ましいが,それが困難な場合には,4.1節に示したように線源と装置の間に 鉛ブロックなどを設置し,その有無による指示値の差分によって,散乱線影響を補正する方法を 用いることもできる。

標準線源は,平成19年以前であれば放射線障害防止法の規制を受けない線源として,公称放射能 3.7 MBq の密封線源が国内で販売されていたが,現在は入手が困難である。現行法令では下限

数量の 1000 倍(例えば,¹³⁷Cs であれば 10 MBq)までの線源が,表示付認証機器として販売されており,簡単な届け出を監督官庁(原子力規制庁)に行うことで利用できる。

このような標準線源の利用が困難な場合は,校正事業者等による校正サービスを利用する方法 がある。

(5) 電気試験

予期しない機械的な故障に起因するトラブルを防止するためには、一般のサーベイメータ等と 同様に電気的な試験を実施することが望ましい。しかし、KURAMA-II で使用している C12137 検 出器は、CsI(TI)結晶、MPPC、プリアンプ、波高分析器などが一体化されたオールインワンタイプ の測定器であり、測定回路ごとの点検等は容易ではない。また、C12137 検出器からの波高スペク トル情報を受け取って演算処理を行う CompactRIO についても同様である。

したがって,具体的な点検項目については,製造したメーカに確認した上で決定する必要がある。

以上の試験項目について、これらを適切に組み合わせて検査を実施すべきであろう。検査の体 系を、実施時期に応じて以下の3つに分類して示す。

4.2.2 導入時検査

新たに KURAMA-II の運用を開始する前(装置購入時など)には、その装置の測定値が正確であり適切に作動することを確認してから使用するべきである。そのため、試験項目に掲げたうち、

(1) 総合動作確認

- (2) 簡易線源を用いた波高スペクトルのピーク位置の確認
- (3) 簡易線源を用いた指示値の確認
- (4) 線量率標準線源を用いた校正
- の項目について検査・校正を行うことが望ましい。

このうち,(3)の試験で得られる指示値は,導入時検査以降,検出器感度が経時的に変化していないことを確認するための基点になる。以降,初期指示値と呼ぶ。

4.2.3 使用前点検

KURAMA-IIの運用後、例えば測定キャンペーンを行う前に、試験項目で掲げたうち、

- (1) 総合動作確認
- (3) 簡易線源を用いた指示値の確認
- を行うことで、装置の健全性を確認することができる。

ここで、(3)については導入時検査のときに用いた同一の線源を用いて試験を行い、初期指示値 と比較し変化がないことを確認する。初期指示値との差が大きい(例えば10%以上)場合には、 (2) 簡易線源を用いた波高スペクトルのピーク位置の確認

についても実施し、ピーク位置のシフトが確認された場合には、CompactRIO上で波高スペクトル 情報をソフトウェア的にゲイン補正する。または、C12137検出器の設定を書き換えて、ゲインを 再調整する。ゲイン補正後に再び(3)を実施し、初期指示値との差が許容範囲以内であることを確 認する。

現在のところ,(2)の試験は C12137 検出器に直接パソコンを接続し,波高スペクトルを確認す る必要があるため,点検対象が多くなるとその作業は非常に煩雑となる。ただ,CompactRIO上で 波高スペクトルを解析しピーク位置を検出して適切な補正を行うことは技術的に可能であるため, 今後,そのような機能をサポートすることがよいかもしれない。

4.2.4 定期検查·校正

KURAMA-II を継続して使用する場合,故障の未然防止や測定値の信頼性を客観的に示すために、定期的な頻度(例えば1年に1回)で検査・校正を行うことが望ましい。

試験項目としては、導入時検査の際に実施する4項目に加え、

(5) 電気試験

を行うとよい。ただし、(5)については前述のとおり、各々一体化されたパッケージになっている ことから、製造メーカから望ましい点検項目を確認の上、実施する必要がある。

(2)については、実施した使用前点検においてピーク位置のシフトが確認された際には、 CompactRIO上でソフトウェア的にゲイン補正を行ったが、定期検査ではC12137検出器自体のゲ インを調整する方が適切であろう。

また,(4)の実施が困難な場合には,(3)をγ線測定器の校正方法を定める日本工業規格JIS Z4511¹⁷⁾ に定めるところの「確認校正」とみなして省略することも可能かもしれない。

4.3 まとめ

本レポートで紹介したマッピング事業の中で実施した使用前点検の内容及び知見について報告 するとともに、今後の管理方法の検討を行った。

文部科学省に委託されたマッピング事業を遂行するために,関係者が手探りの状態で実施した 使用前点検ではあったが,年に数回の測定を実施する運用体系において,本レポートに示した使 用前点検方法はおよそ妥当であったと考えられる。この方法では,校正場等,特殊な施設を必要 としないため,使用者または管理者が比較的容易に KURAMA-II の信頼性を確保した状態で運用 することが可能である。

今後,福島県等において,KURAMA-II をバス等の公共機関に常時搭載し,継続的に線量測定 を実施する計画がある。その場合には,毎日連続した測定を行うことになるため,本レポートの 管理方法を変更する必要が生じるかもしれない。例えば,使用前点検においては,試験項目(2)の 「簡易線源を用いた指示値の確認」の実施が困難となる代わりに,環境中に残存している¹³⁷Cs 及び¹³⁴Csによる波高ピークを利用して,CompactRIOを介したソフトウェア上でピーク位置の調 整を測定実施期間中に適宜行うなどの方法が考えられる。また,定期検査・校正を実施するため には,C12137検出器またはKURAMA-IIの予備機を用意しておいて,検査の際に交換することが 可能な体制を構築する必要もあるだろう。このように,運用形態によって多少管理方法は異なる が,測定値の信頼性と管理に係るコストを考慮した上で,実際の管理方法を決定することが重要 である。

5. 結論

KURAMA-II を用いて走行サーベイを適切に実施するための基盤を整備し、実際のサーベイに 適用するとともに KURAMA-II の管理方法に関して提案を行なった。基盤整備に関しては、 KURAMA-II に用いられている CsI(TI)シンチレーション検出器を用いて高精度の測定を行うため の基本となる G(E)関数を、シミュレーション計算により整備した応答関数に基づき開発し、 KURAMA-II に組み込んだ。開発した G(E)関数を組み込んだ CsI(TI)検出器自体,ならびに CsI(TI) 検出器を搭載した KURAMA-II により適切な測定が行なえることを確認するために,原子力機構 の所有する校正施設を利用した照射試験を実施した結果、線量率の測定精度、線量率直線性、方 向特性,エネルギー特性,統計変動特性等に関して良好な特性を KURAMA-II は有することが確 認された。また、車内で測定された線量率を車外の地上1mの空間線量率へ換算するための補正 係数を整備するとともに、補正係数の車種による依存性を実測により確認した結果、車種による 違いは小さいことを示した。KURAMA-IIで測定された道路上の線量率と,周囲の平坦地上1mの 空間線量率との比較を行ない、良い相関がみられること、すなわち周囲の空間線量率を反映した 測定値が走行サーベイにより得られることを示した。さらに, KURAMA-II による走行サーベイ 結果を自動で処理するためのプログラムを開発した。これにより、ノイズ等に起因する不適切な 測定値の除去,道路情報に基づく測定位置情報の補正,線量率依存性をもつ補正係数による補正 等の処理を短時間に自動で行なえるようになった。

整備された技術基盤は、文部科学省により実施されてきた放射性物質の分布状況等調査の中で 実施される走行サーベイで活用されてきた。これまでの経験に基づき、多数の KURAMA-II を使 用した走行サーベイの精度を保証するための効率的な KURAMA-II の管理方法を提案した。今後、 KURAMA-II は多様なユーザーにより様々な目的で使用されることが予想されるが、この中で、 本レポートで整備された技術基盤ならびに基盤整備の過程で蓄積された知識が活用されていくこ とが期待される。

謝 辞

本研究の KURAMA-II の開発にあたり,日本ナショナルインスツルメンツ株式会社のマンディ ップシングコラーナ氏,江越達三氏,石塚之教氏,角田大樹氏,株式会社松浦電弘社の安岡忠明 氏,ゲートウェイサーバの運用においては,株式会社日立東日本ソリューションズの神田光祥氏, 八巻成智氏,日向本子氏,測定器の整備においては浜松ホトニクス株式会社の中村重幸氏,松本 拓也氏,平柳通人氏に感謝いたします。また,KURAMA-II の基盤整備において実施した特性試 験について,株式会社 E&E テクノサービスの宮田英明氏,土子泰弘氏,原子力機構放射線管理部 放射線計測技術課の古渡意彦氏,吉富寛氏,*G*(*E*)関数の計算に関して同放射線計測技術課の堤正 博氏に感謝いたします。

参考文献

- Ueno,T. et al., Environmental Monitoring Data Around the Chernobyl Nuclear Power Plant Used in the Cooperative Research Project between JAERI and CHESCIR (Ukraine), JAERI-Data/Code 2002-024, 2003, 414p.
- 2) 日本原子力研究開発機構,平成 23 年度放射能測定調査委託事業 「福島第一原子力発電所事 故に伴う放射性物質の第二次分布状況等に関する調査研究」 成果報告書 (第1編) 放射線 量等分布マップの作成, 2013, 219p.
- 3) 京都大学原子炉実験所 福島原子力災害対策支援グループ, GPS連動型放射線自動計測システ ム KURAMAホームページ, http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/kurama/
- 4) 日本原子力研究開発機構 福島技術本部ホームページ, http://fukushima.jaea.go.jp/
- 5) 日本ナショナルインスツルメンツ, http://www.ni.com/compactrio/ja/
- 6) 浜松ホトニクス株式会社, c12137 高感度放射線検出モジュール(製品カタログ), 2011.
- 7) 津田修一,堤正博,種々の大きさのCsI(TI)シンチレーション検出器のγ線に対するスペクトル -線量変換演算子(G(E)関数)の計算と評価,保健物理,vol.47, no.4, 2012, pp. 260-265.
- 8) 森内茂, スペクトルー線量演算子による線量評価法とその演算子の決定, JAERI 1209, 1971, 35p.
- 9) 齋藤公明, 森内茂, モンテカルロ計算によるNaI(Tl)シンチレーション検出器ガンマ線応答関数 のデータカタログ, JAERI 1306, 1987, 121p.
- 10) 森内茂,長岡鋭,坂本隆一,齋藤公明,球形NaI(Tl)シンチレーション検出器のスペクトルー線量変換演算子の決定,JAERI-M 8092,1979,46p.
- X-5 Monte Carlo Team, MCNP A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, Volume I: Overview and Theory, 2003, 416p.
- 12) International Commission of Radiation Protection, Conversion coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation, ICRP Publ. 74, Annals of the ICRP Vol. 26(3/4), Elsevier, UK, 1996, 205p.
- 13) 日本アイソトープ協会,アイソトープ手帳(10版),丸善,東京, 2001,164p.
- 14) Kathren, R. L., Mean and effective photon energies of ²²⁶Ra in equilibrium with daughters, Health Phys.30, 1976, pp. 143-145.
- 15) 日本工業規格, X線及びγ線用線量当量率サーベイメータ, JIS Z 4333, 2006, 14p.
- 16) 中原由紀夫,他,日本原子力学会 2012 年秋の大会,O46,平成 24 年 9 月.
- 17) 日本工業規格,照射線量測定器,空気カーマ測定器,空気吸収線量測定器及び線量当量測定器の校正方法,JIS Z 4511,2005,25p.

付録 1

車内外補正係数の測定について

概要

KURAMA システムの車内空間線量(1cm線量当量)率を車外空間線量率に換算する補正係数の取得のために,別途,高線量地域において走行サーベイで利用した同型の車両,同型のサーベイメータにより計測を行った。

走行サーベイにおいては, KURAMA システムで計測された車内空間線量率を車外(屋外)の 空間線量率に換算するための補正係数を求めることが不可欠である。このため,平成23年6月に 実施した走行サーベイにおいては,全車両,出発前,及び,出発後には,固定された校正ポイン トにおいて,毎回,校正を行っていた。しかしながら,調査期間中に得られたデータから,線量 率の異なる環境においては校正定数が異なることが示唆され,特に高い空間線量率の場所におけ る校正定数を得る事が必要であった。そこで,線量率が異なり,かつ校正に適した広くて草木の ない,いくつかの場所を探し出し,その地点における校正定数を求めることを目的として追加的 な測定を実施した。

実験方法

平成23年7月5日に, KURAMA システムで使用されたアロカ社製の NaI(Tl)シンチレーションサーベイメータ(型番:TCS-161)を準備し,当サーベイメータの校正定数や校正日(校正定数1.05(デジタル),校正日平成23年6月28日)などを確認した。6月3日から13日まで行われていた走行サーベイ調査において高線量地域で主として使用されたトヨタ自動車社製プリウスと同じ車種を福島市内においてレンタルした。

この車両にシンチレーションサーベイメータや別に用意した NaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータ等とともに積み込み出発した。

まず,バックグランドとして,低線量地域である福島市内東部において広い場所を見つけ,そ の場所に車両を停車し,まず,車内において空間線量率を測定した。

車内空間線量率測定時には、6月の計測と同様に、車両後部右側(運転席の後方)上部の手す りにサーベイメータのプローブ部(NaI(Tl)シンチレーター部)を取り付け、計測を行った。

車内空間線量率測定終了後,車両を十分離れた(10m以上)場所に移動し,サーベイメータを 取り出し,ほぼ車内線量率を測定したプローブ部の位置とほぼ同じ場所(地面に目印を置いた。) で,高さ1mとなるようにプローブ部を手に持ち固定した。その際,人体の影響が少ないように, 体からできるだけ離した。

なお,計測は,時定数を10秒として,30秒ごとに原則5回計測(デジタル値を読み値とした。) を行い,平均値を採用した。

測定地点の位置を記載するための簡単な平面図を作成し、スマートフォンによる GPS の座標

を記録し、周辺の写真を撮った。

線量率測定を実施した地点を Fig. A1 に示す。計測地域は、福島市内から川俣町へ向かい国道 114 号線で浪江町の赤宇木地区周辺、飯館村等を走行しながら探した。約 20m 四方が平坦で、高 木などが無く、公共の場所を条件で探したが、特に浪江町、飯館村山間部の高線量域では理想的 な場所が少なく、道路わきのバス停等の広場も利用した。

実験結果

測定場所と測定結果について,以下に示す。

計測値の単位はµSv/h であり、未補正の平均値と共に、括弧内に複数回の生の計測値を示す。 測定場所の条件の目安として、上記の条件を満たす場所を◎、完璧ではないが比較的条件が良 い場所を○とし、条件を満たさない状態を△の順に示した。

測定地点 001

場所:福島市内ショッピングモール (ヨークベニマル) 座標:計測せず(当日,最後に同じ地点に戻った際の座標(10進法,37.76098,140.45331)) 車内計測値:0.70(0.72,0.70,0.71,0.70,0.69) 車外計測値:0.74(0.75,0.73,0.73) 車外/車内:1.047 特記事項:広い駐車場,車無,条件 ◎

測定地点 002 場所:小網木生活改善センター 座標:計測せず (GoogleMap より, 37.64188, 140.63413 と推定) 車内計測値: 0.78 (0.78, 0.76, 0.78, 0.80, 0.79) 車外計測値: 0.98 (0.96, 1.01, 1.00, 0.98, 0.97) 車外/車内: 1.255 特記事項:狭い,車,樹木,条件 △

測定地点 003

場所:南津島上集会場 座標:(37.55857,140.75311) 車内計測値:7.02(7.02,7.04,7.10,6.95,7.00) 車外計測値:9.63(9.76,9.50,9.86,9.55,9.50) 車外/車内:1.372 特記事項:砂利,建屋近い,土手近い,条件 △

測定地点 004
場所:郷の駅つしま
座標: (37.56074, 140.76350)
車内計測値: 7.23 (7.22, 7.22, 7.28, 7.18, 7.27)
車外計測値: 8.63 (8.79, 8.43, 8.64, 8.59, 8.60)
車外/車内: 1.193
特記事項:広い駐車場,車遠い,条件 ○

測定地点 005

場所:石井商店前 座標:(37.56731, 140.80019) 車内計測値:10.68 (10.70, 10.64, 10.66, 10.64, 10.76) 車外計測値:13.65 (13.96, 13.40, 13.41, 13.40, 14.08) 車外/車内:1.278 特記事項:道路脇のスペース,条件 〇

測定地点 006

場所:尺石バス停前 座標:(37.54829,140.84196) 車内計測値:23.2 (23.4,23.1,23.2,23.1,23.1) 車外計測値:30.3 (30.6,30.3,30.2,30.3,30.3) [電離箱:29~30] 車外/車内:1.309 特記事項:道路脇のスペース,条件 ○

測定地点 007

場所: 浪江高校津島分校 座標: (37.56260, 140.76823) 車内計測値: 11.92 (11.90, 11.82, 11.99, 11.97, 11.90) 車外計測値: 15.07 (15.22, 15.28, 14.75, 15.11, 15.00) 車外/車内: 1.264 特記事項: 校庭(土), 広い, 条件 △

JAEA-Technology 2013-037

測定地点 008
場所: 浪江町清水国道 349 分岐
座標: (37.57921, 140.75862)
車内計測値: 13.50 (13.50, 13.55, 13.41, 13.54, 13.52)
車外計測値: 15.07 (15.11, 14.83, 15.06, 15.03, 15.31)
車外/車内: 1.116
特記事項: 道路上,低木近い,条件 △

測定地点 009

場所:長泥給油所前 座標:(37.61294,140.75055) 車内計測値:6.02(5.96,6.00,6.11,6.08,5.96) 車外計測値:8.90(8.93,8.89,8.79,9.01,8.89) 車外/車内:1.478 特記事項:屋根,側溝上,条件 △

測定地点 010 場所:飯館中学校駐輪場 座標:(37.67791, 140.73871) 車内計測値:2.53 (2.58, 2.53, 2.52, 2.52, 2.50) 車外計測値:3.32 (3.40, 3.32, 3.33, 3.24, 3.30) 車外/車内:1.311 特記事項:広スペース,条件 ○

測定地点 011

場所:飯館村もりの駅まごころ 座標:(37.69570, 140.71049) 車内計測値: 3.36 (3.31, 3.33, 3.39, 3.47, 3.32) 車外計測値: 4.51 (4.52, 4.47, 4.53, 4.54, 4.50) 車外/車内: 1.341 特記事項:広い駐車場,建屋近い,条件 〇

測定地点A(6月の計測)
場所:本宮市市営体育館駐車場
座標:(37.51761111,140.39027777)
車内計測値:1.00
車外計測値:1.29
車外/車内:1.29
特記事項:広い駐車場,車無,条件 ©

測定地点 B(6月の計測)
場所:伊達市保原中央公民館横
座標:(37.82102777,140.55811111)
車内計測値:0.67
車外計測値:0.72
車外/車内:1.075
特記事項:広い駐車場,車有,条件 〇

測定地点 C(6月の計測)
場所:岳温泉校正ポイント
座標:(37.616528,140.355072)
車内計測値:0.45
車外計測値:0.46
車外/車内:1.022
特記事項:広い駐車場,車無,条件 〇

Fig. V1 補正係数を評価した測定地点

表 1. SI 基本単位					
甘大昌	SI 基本ì	単位			
盔半里	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	А			
熱力学温度	ケルビン	Κ			
物質量	モル	mol			
光度	カンデラ	cd			

表2. 基本甲位を用	いて表されるSI組立単位	立の例				
和辛雪	SI 基本単位					
和立里	名称	記号				
面 積平	方メートル	m^2				
体 積立	法メートル	m^3				
速さ,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 数每	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				
量 濃 度 ^(a) , 濃 度 モ	ル毎立方メートル	mol/m ³				
質量濃度キ	ログラム毎立法メートル	kg/m ³				
輝 度力	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 concentra	ation)は臨床化学の分野では	物質濃度				
(substance concentration)	(substance concentration) Lt. FIFT Z					

(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

			SI 租立单位	
組立量	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
亚	5.37 v (b)	red	1 (b)	m/m
	() / / / / / / (b)	(c)	1 1 (b)	2/ 2
		sr II-	1	m m
同 仮 多		пг		S .
カ	ニュートン	N		m kg s ⁻²
E 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	С		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	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 2}$
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{-2} kg^{-1} s^3 A^2$
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^1$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	$kg s^{2} A^{1}$
インダクタンス	ヘンリー	Н	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
光東	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量 比エネルギー分与				
カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ²
線量当量,周辺線量当量,方向	2 × 2 2 (g)	C	T/la a	2 -2
性線量当量,個人線量当量		SV	J/Kg	ms
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

酸素活性(カタール) kat [s¹mol]
 (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 ュ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。
 (a)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)へルツは周崩現象についてのみ、ペシレルは抜焼性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (a)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度度を表すために使用される。
 (d)やレ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。
 (d)かけ性核種の放射能(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

	S	[組立単位	
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表 面 張 九	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s ⁻³
熱容量,エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{-2} K^{-1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 s^{-2} K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^{2} s^{2}$
熱 伝 導 率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ sA
表 面 電 荷	「クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
電 束 密 度 , 電 気 変 位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
誘 電 率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透磁 率	ペンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ sA
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{3}$
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
放射輝度	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
酸素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ e ⁻¹ mol

表 5. SI 接頭語						
乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号	
10^{24}	э 9	Y	10 ⁻¹	デシ	d	
10^{21}	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	с	
10^{18}	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m	
10^{15}	ペタ	Р	10 ⁻⁶	マイクロ	μ	
10^{12}	テラ	Т	10 ⁻⁹	ナノ	n	
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	р	
10^{6}	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f	
10^{3}	+ 1	k	10 ⁻¹⁸	アト	а	
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z	
10^{1}	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	v	

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 =60 min=3600 s				
日	d	1 d=24 h=86 400 s				
度	٥	1°=(п/180) rad				
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad				
秒	"	1"=(1/60)'=(п/648000) rad				
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²				
リットル	L, 1	1L=11=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

衣される剱値が美験的に侍られるもの						
名称				記号	SI 単位で表される数値	
電	子 >	ボル	ŀ	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J	
ダ	N	ŀ	\sim	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg	
統-	一原子	質量単	单位	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	-	N	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀	柱ミリメー	トル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オン	グストロー	- 4	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海		里	М	1 M=1852m
バ	-	\sim	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm)2=10 ⁻²⁸ m ²
1	ッ	ŀ	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネ	-	パ	Np	の形法はいかおはない
ベ		N	В	31単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
デ	ジベ	N	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	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s			
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} = 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$			
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd } \text{ cm}^{\cdot 2} = 10^4 \text{ cd } \text{ m}^{\cdot 2}$			
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx			
ガル	Gal	$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm s}^{-2} = 10^{-2} \text{ ms}^{-2}$			
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{ G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$			
ガウス	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{-2} = 10^{-4} \text{T}$			
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≙ (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「 ≦ 」					

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	ユ	IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq	
$\scriptstyle u$	ン	トゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$	
ラ			K	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy	
$\scriptstyle u$			ム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv	
ガ		\sim	7	γ	1 γ =1 nT=10-9T	
フ	I.	N	"		1フェルミ=1 fm=10-15m	
メー	-トル	系カラ	ット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg	
ŀ			ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa	
標	進	大気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa	
力	П	IJ	ļ	cal	1cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー) 4.184J(「熱化学」カロリー)	
3	カ	17	~		$1 = 1 = 10^{-6}$ m	

この印刷物は再生紙を使用しています