JAEA-Data/Code
2011-019

放出放射性物質による緊急時線量シミュレーションシステム（SIERRA-II）の開発

SIERRA-II : Simulation System (II) for Emergency Dose by Released Radioactive Substances

竹安 正則　武石 稔
Masanori TAKEYASU and Minoru TAKEISHI

東海研究開発センター
核燃料サイクル工学研究所
放射線管理部
Radiation Protection Department
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories
Tokai Research and Development Center

February 2012
Japan Atomic Energy Agency
日本原子力研究開発機構

JAEA-Data/Code

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2012

JAEA-Data/Code 2011-019

放出放射性物質による緊急時線量シミュレーションシステム(SIERRA-II)の開発

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　放射線管理部
竹安　正則、武石　稔*

（2011 年 11 月 28 日受理）

原子力施設から放射性物質が異常放出した際の環境影響を評価するために、計算コード・システム(SIERRA-II; 放出放射性物質による緊急時線量シミュレーションシステム)を開発した。SIERRA-II は、3 次元質量保存風速場モデルと粒子拡散モデルに基づいている。施設周辺での放射性物質の大気拡散計算の空間分解能をあげるために、ネスティング機能を有している。入力データは、10 分間隔で施設の敷地で測定・観測された局地気象データと排気筒モニタのオンラインデータ、並びに大気力学モデルにより予測された1時間間隔の局地気象データである。出力データは、大気中の放射性物質濃度、内部および外部線量の等値線図並びに表である。

東海再処理施設では運転時に ^{85}Kr を放出しており、SIERRA-II の性能を、^{85}Kr 放出時の東海再処理施設周辺のモニタリングステーションおよびモニタリングポストで観測された空間線量率データを用いて検証した。観測された線量率上昇は、精度良くシミュレートできた。計算および観測された線量率の一致度は、ファクター2で 42%、ファクター5で 74%であった。

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
*現所属：日本原燃株式会社安全技術室環境管理センター

SIERRA-II : Simulation System (II) for Emergency Dose by Released Radioactive Substances

Masanori TAKEYASU and Minoru TAKEISHI*

Radiation Protection Department,
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories,
Tokai Research and Development Center,
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received November 28, 2011)

A computer code system (SIERRA-II) has been developed to estimate the environmental radiological impact of accidental releases of radionuclides from a nuclear facility in real time. The SIERRA-II is based on a three-dimensional mass-conserving wind field model and a particle dispersion model with a nesting function, in order to calculate the atmospheric dispersion of radionuclides with high spatial resolution in the vicinity of the facility. Input includes on-line local meteorological and effluent data at 10-min intervals, as observed and monitored at the site of the facility, and hourly local meteorological data as predicted by an atmospheric dynamic model. Contour maps and tables of internal and external doses are the output.

The performance of the SIERRA-II was validated using environmental monitoring data for ambient dose rate as observed at monitoring stations and monitoring posts around the Tokai Reprocessing Plant when ^{85}Kr was discharged during its operation, based on the safety regulations. The observed increase of the dose rate was simulated well. The agreement of calculated and observed dose rates was within a factor of 2 for 42 % of observations, and within a factor of 5 for 74 %.

Keywords: SIERRA-II, Environmental Radiation Dose, Computer Code System, Nuclear Accident, Nesting Function, Atmospheric Dynamic model, Performance Examination, Air Absorbed Dose Rate, ^{85}Kr, Reprocessing Plant

*Present address: Environmental Radioactivity Monitoring Center, Safety Technology Office, Japan Nuclear Fuel Limited

目 次

1. 緒言 ····· 1
2. SIERRA-II の開発 ····· 2
2.1 SIERRA-II で採用したモデル ····· 2
2.2 計算の流れ ····· 2
2.2.1 風速場計算 ····· 3
2.2.2 大気拡散計算 ····· 4
2.2.3 濃度計算 ····· 5
2.2.4 線量計算 ····· 5
2.3 計算コードのシステム化 ····· 6
3. SIERRA-II の性能評価 ····· 8
3.1 東海再処理施設運転時の ^{85}Kr 管理放出に伴う空間線量率の変動 ····· 8
3.2 SIERRA-II を用いた空間線量率変動のシミュレーション ····· 10
4. 結言 ····· 12
参考文献 ····· 13

CONTENTS

1. Introduction 1
2. Development of SIERRA-II 2
2.1 Models of SIERRA-II 2
2.2 Calculation flow 2
2.2.1 Calculation of wind field 3
2.2.2 Calculation of atmospheric dispersion 4
2.2.3 Calculation of airborne concentration 5
2.2.4 Calculation of radiation dose 5
2.3 Systematization of the calculation code 6
3. Performance test of SIERRA-II 8
3.1 Variation of ambient dose rate due to ^{85}Kr discharge during the operation of the TRP 8
3.2 Simulation of the variation of ambient dose rate using the SIERRA-II 10
4. Conclusion 12
REFERENCES 13

1. 緒言

核燃料サイクル施設で事故が起こった場合、有効な緊急時対応計画を用意し評価するために、原子力事業者は、中央および地方の官庁への事故情報を迅速に報告しなければならない [1)]。その報告の中で、予測された環境中線量は重要な情報の1つである。

環境線量を迅速に計算・評価するためには、プルームモデル、パフモデルなどの単純なモデルがよく使用される。旧核燃料サイクル開発機構東海事業所においては、1997 年に「緊急時環境影響シミュレーションシステム」(SMAP)[2)]というパフモデルに基づくコンピュータコード・システムが開発された。SMAP は 1999 年に発生した JCO 臨界事故時に放出された放射性希ガスの大気拡散の計算に使用された。旧東海事業所の敷地内および敷地外に設置されたモニタリングステーション(MS)とﾓﾆﾀﾘﾝｸﾞﾎﾟｽﾄ(MP)で観測された空気吸収線量率の時間変化を精度良くシミュレートできた。

しかしながら、プルームモデルとパフモデルは、山や谷などの複雑地形上での大気拡散計算では精度に難がある。したがって、粒子拡散モデルが複雑地形上での正確な計算のために開発された。このモデルを体系化した計算コード・システムの 1 つとして、SPEEDI ネットワークシステム [3)]が開発された。SPEEDI は、日本の原子力施設に隣接する地方自治体での緊急時対応のために使用されている。SPEEDI は地方自治体が住民避難計画を策定するために開発されている。よって、主要な計算対象地域は、施設から数 km～数十 km 離れた住宅地である。一方、施設の操業者は、施設の近傍での線量、特に、施設から数 km 内に発生する最大線量を計算することが求められている。

「放出放射性物質による緊急時線量シミュレーションシステム」(SIERRA-II)は、事業者が施設近傍の線量を正確に計算する目的で開発された。SIERRA-II は、風速場モデルと粒子拡散モデルに基づいている。SIERRA-II は、すでに旧核燃料サイクル開発機構の敦賀地区、東海・大洗地区に整備されている [4)5)]。

本報告書では、東海・大洗地区で整備された SIERRA-II の簡単な説明と、性能評価の結果について報告する。性能評価は、東海再処理施設(TRP)の運転時に ^{85}Kr が管理放出された際に得られた MS と MP での空間線量率データを使用して行った。

2. SIERRA-IIの開発

2.1 SIERRA-IIで採用したモデル

SIERRA-IIは、SPEEDIと同じく、放出された放射性物質を粒子群として取り扱い、粒子群の移流・拡散を解く粒子拡散モデルを採用した。SIERRA-II で採用したモデルは、EXPRESS (Exact Preparedness Supporting System)で使用されたモデルに基づいた [6]。EXPRESS は、計算機への負荷を下げ、ワークステーション等の計算機で、放射性物質の三次元大気拡散計算をするために開発された計算コードである。SIERRA-II では、EXPRESS のモデルに種々の改良を加え、計算コード・システム化することにより、Windows PC で動作するようにした。種々の改良により、Windows PC 上で数分以内に1回の計算を終え、10分間隔で出力が得られるようにした。主な改良点は以下の通りである。

①対象施設から数 km の範囲内での拡散計算の空間的分解能を上げつつ、計算機への負荷を軽減するために、ネステッド格子モデル [7]を採用した。このモデルは、計算格子間隔の粗い大きな計算領域の中に計算格子間隔を細かくした小さな領域を配置（ネスティング）し、対象施設周辺の計算格子間隔を小さくするものである。ネスティング格子モデルにより、計算機負荷を数十分の 1 程度まで低減することができる [7]。このようにネスティングされた格子配列とすることで、対象施設周辺での拡散計算の空間的分解能を上げつつ、計算機への負荷を軽減した。

②EXPRESS で採用されたモデルでは、Pasquill の線図 [8]から粒子の水平方向および鉛直方向の拡散係数を導出している。Pasquill の線図から導出される鉛直方向の拡散係数は、風下距離が大きくなるに従い大きくなり、風下距離数 km でほぼ一定値になる。EXPRESS では、対象施設から数 km～数十 km 離れた住民居住地域を主な計算対象領域としていることから、鉛直方向の拡散係数として Pasquill の線図から導出される風下距離数 km での一定値を風下距離に係わらず用いている。しかし、SIERRA-II は、施設から数 km の範囲内での大気拡散計算を目的としている。モニタリングステーションおよびモニタリングポストは、施設から数百m～数km 程度に設置されているため、これらの領域が SIERRA-II の計算対象である。従って、EXPRESS で用いられた鉛直拡散係数の値は過大である。SIERRA-II では、Pasquill の線図から風下距離の関数として導出される鉛直方向拡散係数の値を用いた。

SIERRA-II は、事故・トラブル等で施設から放射性物質の大気放出が予測される場合にも利用できるようにした。大気力学モデルにより予測された気象データを利用することにより、環境ガンマ線線量率分布等を放出開始前に計算できるようにした。大気力学モデルは、(財)日本気象協会が開発した大気力学モデル (ANEMOS ; Area-oriented Numerical simulation and Environmental assessment MOdeling System) [9]を採用した。このモデルは、Mellor-Yamada が開発した乱流モデル [10]に基づき、大気状態を数値的に解くモデルである。

2.2 計算の流れ

SIERRA-II での計算の流れを Fig. 1 に示す。計算は、まず、オンラインの局地気象観測データと地形デ

ータを入力データとして3次元質量保存風速場計算を行う。これらの計算結果とオンラインの排気筒モニタデータを入力データとして大気拡散計算を行い、大気中濃度・線量を算出する。以下に、計算方法を示す。

2.2.1 風速場計算

風速場計算の最初のステップは、風向・風速の観測データを以下の式で3次元の計算格子点へ内外挿することである。

$$(u,v)_{i,j,k} = \sum_{m=1}^{N}(u,v)_m W_m / \sum_{m=1}^{N} W_m \tag{1}$$

ここで、

$(u,v)_{i,j,k}$: 計算格子点(i, j, k)上の風向・風速(m s^{-1})

N : 風向・風速の観測データの数

$(u,v)_m$: m 番目の風向・風速の観測データ(m s^{-1})

W_m : m 番目の風向・風速観測データの荷重係数

である。W_m は、m 番目の観測地点と計算格子点(i,j,k)との間の水平距離および鉛直距離、並びにこれらの地点間に存在する地形障壁の高度により定義する。W_m は、EXPRESS と同様に、観測地点と格子点間の水平距離、鉛直距離および地形障壁との高度差をパラメータとした指数関数で表現した。

風速場計算の次のステップは、計算格子点上に内外挿された風向・風速を、以下の質量保存式を満足するように修正することである。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{2}$$

質量保存風速場(u,v,w)を得るために、以下の変分関数(E)を最小化する(u,v,w)を求める。

$$E = \int_v \left[\alpha_1^2 (u-u_0)^2 + \alpha_1^2 (v-v_0)^2 + \alpha_2^2 (w-w_0)^2 + \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] dv \tag{3}$$

ここで、

α_1, α_2 : 風速場の鉛直成分の修正量に対する風速場の水平成分の修正量の相対的大きさを決める係数

(u_0,v_0,w_0) : 計算格子点上に内外挿された風向・風速

λ : ラグランジアン未定乗数

である。変分方程式を解く方法は、Sherman により議論されている [11)]。

α_1 と α_2 の値は、風速場の鉛直方向の修正量に対して水平方向の修正量を調整するための係数である。

これらの値は、地形的障壁に対する山越えと迂回の割合が大気の安定度に応じて変化するように設定した。

SIERRA-II では、全体の大きな計算領域と、その領域にネスティングされた小さな計算領域の双方に対して風速場を計算する。計算は、まず、全体の大きな領域に対して行う。その結果をネスティングされた領域の境界条件とし、ネスティングされた領域の風速場を計算する。

2.2.2 大気拡散計算

大気拡散の計算は、移流拡散方程式をランダムウォーク法に基づき数値的に解くことにより行う。ある時刻 t において(x_t, y_t, z_t)の位置にある粒子は、Δt時間後に$(x_{t+\Delta t}, y_{t+\Delta t}, z_{t+\Delta t})$の位置に移動するとする。粒子群の移動は、3 次元風速場による移流項と大気乱流に依存する拡散項の和で表される。この関係は、以下の式で表される。

$$x_{t+\Delta t} = x_t + u\Delta t + (24K_x\Delta t)^{0.5}\left[-0.5,0.5\right] \tag{4}$$

$$y_{t+\Delta t} = y_t + v\Delta t + (24K_y\Delta t)^{0.5}\left[-0.5,0.5\right] \tag{5}$$

$$z_{t+\Delta t} = z_t + w\Delta t \pm \left[2K_{z0}\Delta t + (K'_{z0}\Delta t)^2\right]^{0.5} + K'_{z0}\Delta t \tag{6}$$

ここで、

(u, v, w) : 粒子位置(x_t, y_t, z_t)での風速(m s^{-1})

K_x, K_y : 水平方向の拡散係数(m^2 s^{-1})

[-0.5,0.5] : -0.5～0.5 の一様乱数

K_{z0} : 鉛直方向の位置 z_0 での鉛直方向の拡散係数(m^2 s^{-1})

K'_{z0} : 鉛直地点 z_0 で微分された鉛直方向の拡散係数の傾き(m s^{-1})

である。

K_x、K_y、K_{z0}、K'_{z0}の値は、以下の式から求める。

$$K = \frac{1}{2}\frac{dr}{dt}\frac{d\sigma^2}{dr} = u\sigma\frac{d\sigma}{dr} \tag{7}$$

ここで、

r : 排気筒の筒頂から粒子位置までの距離(m)

σ : プルームの標準偏差(m)

u : 風速(m s^{-1})

である。

σの値は、風下距離と大気安定度に従い、Pasquill の線図から読み取る。Pasquill の線図を Fig. 2 に示

す。鉛直方向拡散係数 K_{z0} の値は、風下距離の増加とともに増加し、大気安定度が中立あるいは安定の場合は、風下距離数 km で一定値になる。EXPRESS では、風下距離に係わらず、風下数 km での一定値を採用している。しかしながら、SIERRA-II で目的とする計算領域は、施設から数 km までの領域である。よって、EXPRESS で採用された鉛直方向拡散係数は、SIERRA-II で目的とする計算領域に対して過大である。よって、SIERRA-II では、σ_z の値を、大気安定度と風下距離に従い Pasquill の線図から読み取り、K_{z0} と K'_{z0} の値を決定した。

大気拡散の計算に用いる粒子の数は、計算が数分以内で終了するように最適化を行った結果、2 時間あたり 5000 個とした [4]。なお、大気拡散の計算は、風速場計算とは逆に、先に施設近傍の計算格子分解能の大きい領域に対して行い、その結果を領域全体の初期値として領域全体に対する計算を行う。

2.2.3 濃度計算

粒子の分布から大気中濃度の計算をするにあたっては、Kernel Density Estimator(KDE)法 [7]を採用した。KDE 法は、各粒子のもつ放射能の分布が粒子位置を中心としてガウス分布に従うと仮定する方法である。濃度は、すべての粒子が持つ放射能の分布を積算することにより計算する。この KDE 法の採用により、計算時間の短縮と粒子数の減少に伴う統計的誤差を低減できる。文献 [7]によると、KDE 法の採用により、粒子数を 10 分の1にしても粒子数の減少に伴う統計的誤差はあまり増加しない。

地点(x,y,z)における濃度 χ (Bq m^{-3})は以下の式により計算する。

$$\chi(x,y,z)=\sum_{i=1}^{N}Q_i\cdot(\chi/Q)_i(x,y,z) \tag{8}$$

$$(\chi/Q)_i(x,y,z)=\frac{1}{(2\pi)^{3/2}\sigma_x\sigma_y\sigma_z}\exp\left\{\frac{(x-X)^2}{2\sigma_x^2}\right\}\exp\left\{\frac{(y-Y)^2}{2\sigma_y^2}\right\}\left[\exp\left\{-\frac{(z-Z)^2}{2\sigma_z^2}\right\}+\exp\left\{-\frac{(z+Z-2z_g)^2}{2\sigma_z^2}\right\}\right] \tag{9}$$

ここで、

N : 粒子の総数

Q_i : 粒子 i に配分された放射能 (Bq)

$(\chi/Q)_i(x,y,z)$: 地点(X, Y, Z)にある粒子 i による地点(x, y, z)の濃度(m^{-3})

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$: 粒子が持つパフの標準偏差(m)

z_g : 地点(x, y, z)の下の地面の標高高さ(m)

である。

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ の値は、Pasquill の線図から読み取る。なお、$(\chi/Q)_i(x,y,z)$の値の計算にあたっては、粒子と濃度評価地点の間の距離、並びに $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ の値等をパラメータとしてあらかじめ作成したテーブルを利用する。

2.2.4 線量計算

放射性雲からの空気吸収線量率 $D_r(x,y,z)$は次式により計算する。

$$D_r(x,y,z) = K_1 E_{ef} \int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{0}^{+\infty} \frac{\mu_{en}(r)\exp(-\mu r)B(E_{av},r)}{4\pi r^2}\chi(x',y',z')dx'dy'dz' \tag{10}$$

ここで、

K_1 : 吸収線量率への換算係数 (m^3 nGy MeV^{-1} Bq^{-1} h^{-1})

E_{ef} : ガンマ線の実効エネルギー (MeV)

$\mu_{en}(r)$: 空気に対するガンマ線の線エネルギー吸収係数 (m^{-1})

r : 放射性雲中の地点(x', y', z')から線量評価地点(x, y, z)の間の距離(m)

μ : 空気に対するガンマ線の線減弱係数(m^{-1})

$B(E_{av}, r)$: 空気に対するガンマ線のビルトアップ係数

E_{av} : ガンマ線平均エネルギー(MeV)

である。

なお、放射性雲からの空気吸収線量率の計算は、EXPRESS と同様な方法で行った。KDE 法を適用し、各粒子を(9)式で与えられる濃度分布を持ったパフ雲と考えた。パフ雲からのガンマ線のエネルギー、パフ雲から線量率評価地点までの距離と角度、並びにパフ雲の σ_y, σ_z をパラメータとした線量率テーブルをあらかじめ作成した。このテーブルを使用して各パフ雲からの空気吸収線量率を積算することで、評価地点での空気吸収線量率を計算した。

モデルの座標系は直交座標系とした。風速場は、格子点上で定義される。大気中濃度および線量率は、格子メッシュセルの中心地点の値として定義した。地形の標高データは、対応する水平メッシュにおいて実際の標高に最も近い鉛直メッシュ高さに変換する。これらにより、地形は、ブロック状の地形で表現した。

2.3 計算コードのシステム化

SIERRA-II は、東海再処理施設から放出される ^{85}Kr による施設周辺の環境ガンマ線線量率を準実時間で計算できるように計算コードをシステム化した。Table 1 と Fig. 3 に、SIERRA-II の基本的機能とデータの流れをそれぞれ示す。システム化にあたっては、風速場と大気拡散、並びに濃度・線量の計算を数分以内に行って 10 分間隔で出力が得られることを要件とした。そのため、再処理施設の排気筒モニタデータと施設周辺の気象観測データのオンラインデータを利用することが必要である。これらのデータを連続的に収集・保存しているテレメータ装置と SIERRA-II をネットワークで連結し、システム化を図った。

計算対象領域は、核燃料サイクル工学研究所および大洗研究開発センター内の施設で事故・トラブルが発生した場合にも対応できるように、核燃料サイクル工学研究所と大洗研究開発センターを含んだ 40km×40km×400m の領域とした。格子セルを 32×32×20 とし、水平方向格子間隔を 1.25km、鉛直方向格子間隔を 20m とした。さらに、線量率の最大値が出現すると予想される施設近傍の 4km 四方の計算領域に対しては、ネスティングモデルを採用して水平方向格子間隔を 50m とした。

入力データは、核燃料サイクル工学研究所と大洗研究開発センターで 10 分毎に測定・観測されている排気筒モニタデータと局地気象観測データのオンラインデータである。東海再処理施設の排気筒(地上約 90m)では、排気筒からの ^{85}Kr の放出率と排気風量を測定している。排気筒高さの風向・風速データは、核

燃料サイクル工学研究所敷地内の 2 地点で観測している。1地点は、排気筒から南約 250m の地点にある気象観測塔である。もう1地点は、排気筒から西約 500m の地点にあるドップラーソーダである。地上高さの風向・風速、日射・放射収支量は、核燃料サイクル工学研究所敷地内の排気筒から西約 500m の地点で観測している。排気筒から南西方向約 3km 地点においても、地上高さの風向・風速を観測している。研究所敷地内の地上の風速および日射・放射収支量のデータから、気象指針 [12)]に基づき、大気安定度を決定している。

核燃料サイクル工学研究所の南方向約 20km に位置する大洗研究開発センターでは、高速増殖実験炉「常陽」の高さ 80m の排気筒から南西方向約 200m の地点に気象観測塔がある。その観測塔位置で、地上の風向・風速および地上 40m および 80m 高さでの風向・風速、並びに日射・放射収支量を観測している。

東海再処理施設や高速増殖実験炉「常陽」のような主要施設については、主要核種の放出率は、排気筒モニタにより測定されている。これらの施設の排気筒以外からの放射性物質の放出に対しては、放出位置、放出高さおよび放出率のような放出源情報を SIERRA-II の GUI(graphical user interface)機能により計算機のモニタ上で設定できる。核燃料サイクル工学研究所および大洗研究開発センターで事故・トラブルが発生したとき、放出される可能性がある放射性物質(希ガス 15 核種、ヨウ素 7 核種、その他の核分裂生成物 64 核種)を SIERRA-II では対象とする。これらの核種のガンマ線実効エネルギーと平均エネルギーのデータ [13) 14)]は、SIERRA-II のシステムのデータベースに保存されている。

核燃料サイクル工学研究所および大洗研究開発センターからのこれらの入力データは、テレメータシステムにより連続的に収集・保存される。SIERRA-II は、これらのデータを原子力機構内の LAN(local area network)を通じて取得する。

SIERRA-II は、気象予測データを用いて最大 48 時間先までの大気拡散・線量の予測計算ができるように設計されている。気象予測データは、前述した大気力学モデルにより計算された1時間毎の局地気象予測データである。大気力学モデルは、日本の気象庁が1日2回発信する Grid point value (GPV)を入力データとして使用する。大気力学モデルは、核燃料サイクル工学研究所から南方向約 7.5km に位置した原子力緊急時支援研修センター(NEAT)に整備されている。気象庁から発信された GPV データを取得後、数分以内に気象予測の計算を開始する。計算により得られた気象予測データは、SIERRA-II で予測計算を行う時にオフラインで SIERRA-II の計算機が取得する。これらのデータは、地上 10m, 100m, 200m, 300m および 400m の高さの風向・風速データ、大気安定度のデータ等である。これらのデータの地点は、核燃料サイクル工学研究所および大洗研究開発センターを含んだ 40km×40km 四方の領域の中で水平方向分解能 20km で区切った9地点である。

SIERRA-II の出力は、10 分毎の風速場のベクトル図および等値線図である。等値線図の対象は、地上大気中濃度、空気吸収線量率である。等値線図として、吸入摂取による内部被ばく実効線量、地表沈着放射性物質からの外部被ばく線量も出力することができる。風速場のベクトル図の出力例を Fig. 4 に、空気吸収線量率の等値線図の出力例を Fig. 5 に示す。これらの出力は、施設の事故・トラブル時の緊急時環境放射線モニタリングの環境線量評価にも利用することが可能である。

SIERRA-II システムは、Windows OS 搭載のパーソナルコンピュータ(PC)上で動作する。システムの操作は、計算条件設定、計算実行および出力設定を GUI による対話形式で迅速かつ簡単にできる。計算に必要な地形情報、放出核種の実効エネルギー等の情報は予めデータベースとして格納されており、GUI による操作を簡単にしている。システム操作で使用する主要な画面を Table 2 に示す。

3. SIERRA-II の性能評価

3.1 東海再処理施設運転時の ^{85}Kr 管理放出に伴う空間線量率の変動

再処理工場では、原子力発電所で発生した使用済み燃料をせん断および溶解するときに排気筒から ^{85}Kr を放出する。せん断は、貯蔵プールから取り出した使用済み燃料をせん断装置で 4 cm 程度の小片に切り刻む工程であり、溶解は、小片にせん断された使用済み燃料を溶解槽の中で硝酸に溶かす工程である。せん断工程時には、排気筒から ^{85}Kr がパルス的な放出率で放出される。溶解工程時の排気筒からの ^{85}Kr 放出率は、溶解開始とともに増加し、溶解継続期間中に徐々に減少していく。

東海再処理施設は、地上高 90 m（海抜 96 m）の高さの排気筒から ^{85}Kr を大気中に放出する。^{85}Kr の大気放出は、放出率と気象条件により、以下のように規制されている。^{85}Kr の排気中濃度は、再処理施設主工場内に設置された排気モニタのうちクリプトンモニタにより連続測定されている。放出率の管理基準が、1 時間平均で 2.2×10^{5} GBq h^{-1} と定められている。^{85}Kr 放出率が管理基準値を超えないように監視されている。排気筒高さの風速によっても、^{85}Kr の放出は規制されている。気象観測塔で観測された排気筒高さの平均風速が 10 分間平均で 1 m s^{-1} 以下の場合には拡散希釈効果が低下するため、排気は一時停止され、タンクに貯蔵される。なお、東海再処理施設の排気筒から放出される放射性気体廃棄物により周辺公衆が受ける年間の実効線量は、国から認可を受けた年間の最大放出量が放出されたとしても、1.3×10^{-2} mSv と評価されている [15)]。この実効線量の値は、1年間に自然放射線源から受ける線量よりも十分小さい。

再処理施設運転に伴って主排気筒から放出される ^{85}Kr の濃度は、運転状況によって大きく変化する。バックグラウンドレベルからせん断・溶解時にみられるような比較的高濃度まで広い濃度範囲にわたって計測するために、主排気筒のクリプトンモニタには放射線検出感度の異なる2種類の検出器、すなわち端窓型 GM 検出器および NaI(Tl)シンチレーション検出器を使用している。NaI(Tl)シンチレーション検出器は 2”φ×50 mm で、サンプリング容器は鉛 50mm 厚の遮蔽体で覆われている。また、機能維持のために必要な定期点検時等においても欠測する時間を極力なくすために、検出器や測定系は 2 重化している。検出下限濃度は、2.4×10^{-3} Bq cm^{-3} である。通常の排気風量(約 4×10^{5} m^{3} h^{-1})を乗じると、検出下限放出率は、約 1 GBq h^{-1} である。検出器の校正の不確かさは、10 %程度である。

東海再処理施設は、2003 年9月から 11 月まで連続運転（キャンペーン）を行い、合計 13.9 t の使用済み燃料を再処理した。このキャンペーン中の ^{85}Kr の総放出量は、2.3×10^{6} GBq であった [16)]。

東海再処理施設の周辺には、環境放射線モニタリングのために、10 基のモニタリングステーションおよびモニタリングポストが配備されている。モニタリングステーションおよびモニタリングポストの配置を、再処理施設の排気筒の位置とともに Fig. 6 に示す。モニタリングステーションおよびモニタリングポストは海抜数 m～約 30 m の地面に設置されている。排気筒からの距離は、約 200 m～約 1200 m である。モニタリングステーションおよびモニタリングポストには、地上約 2 m の高さの屋根に 2”×2”φDBM 方式エネルギー補償型 NaI(Tl) シンチレーション検出器が設置されている。これらの NaI(Tl)シンチレンーション検出器により環境ガンマ線線量率が連続測定されている。測定されたガンマ線線量率のデータは、テレメータシステムによって収集され、保存されている。自然放射線成分によるガンマ線線量率の平均的なレベルは、30～50 nGy h^{-1} である。降雨に影響された期間のデータを除き、3時間にわたってガンマ線線量率のデータを統計処理すると、10 分平均のガンマ線線量率のデータの標準偏差は 1 nGy h^{-1} 未満である。

再処理施設運転時は、モニタリングステーションおよびモニタリングポストで環境ガンマ線線量率の一時的な変動が観測される。なお、再処理施設の安全審査では、ガウスプルームモデルを用いて年間毎の運転に伴う大気放出に係る外部被ばくに係る実効線量を算出している。この方法を用いて、2003 年度の放射性物質の大気放出量と当該年の気象観測データから 2003 年度の一般公衆に対する外部被ばく実効線量を評価すると、約 2×10^{-4} mSv であった [16)]。この値は、公衆の線量限度(1 mSv y^{-1})の約 0.02%であったことから、適正に排気管理されていることが確認される。

Fig. 7 と Fig. 8 に、^{85}Kr 放出に伴いモニタリングステーションおよびモニタリングポストで観測された環境ガンマ線線量率の変動例を示す。

Fig. 7(a)は、2003 年 10 月 20 日に観測された例である。Fig. 7(a)には、排気筒からの ^{85}Kr の放出率も示している。Fig. 7(b)には、環境ガンマ線線量率変動時の風向、風速、大気安定度の気象観測データを示す。気象の観測地点は、Fig. 6 に示した研究所敷地内であり、排気筒から南方向約 250 m の気象観測塔での排気筒高さの風向・風速、西方向約 500 m のドップラーソーダでの排気筒高さおよび地上 10 m 高さの風向・風速である。風向・風速のデータは、気象の手引き [17)]に基づき 10 分で平均したデータである。地上 10 m 高さの風速と、排気筒から西方向約 500 m の地点にある日射・放射収支計のデータから、気象指針 [12)]に基づき大気安定度を求めた。Fig. 7(a)より、17 時 40 分頃、約 3×10^{4} GBq h^{-1} の ^{85}Kr の放出率のピークがあり、18 時 20 分頃、約 1.5×10^{4} GBq h^{-1} の放出率のピークがあった。Fig. 7(b)より、17 時～19 時は、排気筒高さおよび地上 10 m 高さともに、北東～東北東の風が定常的に吹いていた。風速は、排気筒の高さで 6 m s^{-1} 程度、地上 10 m 高さで 3 m s^{-1} 程度であり、あまり変化はなかった。大気安定度は E～F で、大気は比較的安定であった。Fig. 7(a)より、モニタリングステーション2(MS2)において、17 時 40 分に通常のガンマ線線量率レベルより 13 nGy h^{-1} ほど高いガンマ線線量率ピークが観測された。18 時 20 分には、通常レベルより 3 nGy h^{-1} ほど高いピークが観測された。排気筒に近いモニタリングポスト4(MP4)においても、同時刻に通常のガンマ線線量率より高いガンマ線線量率が観測された。その他のモニタリングステーションおよびモニタリングポストではガンマ線線量率の変動は観測されなかった。Fig. 7(b)より、北東系の風が定常的に吹いていたことから、排気筒の風下方位の南西にある MS2 においてガンマ線線量率の変動が観測された。

Fig. 8(a)は、2002 年 10 月 31 日に ^{85}Kr 放出に伴いモニタリングポストで環境ガンマ線線量率の変動が観測された例である。Fig. 8(b)には、風向、風速、大気安定度の気象観測データを示す。Fig. 8(a)より、10 時 40 分頃、約 1×10^{4} GBq h^{-1} の ^{85}Kr の放出率のピークがあった。Fig. 8(b)より、10 時～11 時にかけて、排気筒高さおよび地上 10 m 高さの風は北東から南東へ変化した。風速は、排気筒高さおよび地上 10 m 高さともに 2 m s^{-1} 程度であった。大気安定度は A～A-B で、大気は不安定であった。Fig. 8(a)より、モニタリングポスト5(MP5)において 10 時 40 分に通常のガンマ線線量率レベルより 15 nGy h^{-1} ほど高いガンマ線線量率のピークを観測した。他のモニタリングステーションおよびモニタリングポストでは、環境ガンマ線線量率の変動は観測されなかった。Fig. 8(b)より、10 時 40 分頃、風が東風になったことから、排気筒の風下方位の西にある MP5 において環境ガンマ線線量率の変動が観測された。なお、Fig. 7(a)と Fig. 8(a)で示した両日とも、降雨はなかった。

以上のように、^{85}Kr 放出率が数千 GBq h^{-1} を超えると、排気筒の風下方向にあるモニタリングステーションおよびモニタリングポストにおいて環境ガンマ線線量率変動が観測された。ガンマ線線量率の上昇幅は最大 20 nGy h^{-1} 程度、一回の変動継続期間は 30 分以内であった。ガンマ線線量率の上昇幅は、排気筒からの ^{85}Kr 放出率にほぼ比例しており、変動期間は、^{85}Kr の放出継続時間とほぼ対応していた。これらのことから、^{85}Kr の放出率と風向のデータに基づき、ガンマ線線量率の変動が ^{85}Kr の放出に伴う変動であることが特定できる。

3.2 SIERRA-IIを用いた空間線量率変動のシミュレーション

東海再処理施設の連続運転時に対して、開発した SIERRA-II を用いて ^{85}Kr 放出に伴う施設周辺の環境ガンマ線線量率を計算した。なお、1990 年代に東海再処理施設の沿岸が火力発電所立地のため埋め立てられた。東海再処理施設は、海岸から約2km 内陸に位置するようになった。従って、本節で解析を行うデータに対しては、沿岸地帯で発達する内部境界層の影響は小さかったと考えられる。

Fig. 5 に、2003 年 10 月 20 日 17 時 40 分における SIERRA-II により計算された環境ガンマ線線量率の等値線図を示した。Fig. 5 より、環境ガンマ線線量率は排気筒から南西方向で高く、MS2 の位置で環境ガンマ線線量率が高くなったことが明らかである。環境ガンマ線線量率の風向直角方向円弧上での拡がりは小さく、隣接する MP5 で環境ガンマ線線量率は上昇しなかった。この計算結果は、Fig. 7(a)で MP5 で環境ガンマ線線量率が上昇していない結果と一致した。

計算されたガンマ線線量率と、Fig. 7(a)と Fig. 8(a)で示したモニタリングステーションおよびモニタリングポストで観測された環境ガンマ線線量率の時系列変動の比較を、Fig. 9 と Fig. 10 に示した。これらの比較においては、計算されたガンマ線線量率は、^{85}Kr 放出の影響を受けて環境ガンマ線線量率が変動した期間の前後の通常期間のガンマ線線量率レベルの観測値に、計算された線量率を加算した。Fig. 9 より、2003 年 10 月 20 日 17 時 40 分および 18 時 20 分に MS2 で観測された環境ガンマ線線量率の変動が SIERRA-II を用いた計算により再現可能であった。17 時 40 分における観測された環境ガンマ線線量率の変動が 13 nGy h^{-1} であったのに対し、計算された変動は 4 nGy h^{-1} であった。18 時 20 分において観測された環境ガンマ線線量率の変動が 3 nGy h^{-1} であったのに対し、計算では 2 nGy h^{-1} であった。

Fig. 10 では、2002 年 10 月 31 日 10 時 40 分に MP5 で観測された環境ガンマ線線量率の変動パターンと、SIERRA-II を用いた計算結果を比較した。観測された環境ガンマ線線量率の変動は 15 nGy h^{-1} であったのに対し、計算された変動は 2 nGy h^{-1} であった。Fig. 10 では、計算された変動は、観測された変動よりも小さい値を示した。Fig. 10 で計算値と観測値を比較した時の風向の時間変化は、Fig. 9 で比較したときの風向の時間変化より大きかった。

Fig. 11 には、風向の時間変化に対する計算値と観測値の一致の度合いの関係を示した。Fig. 11 より、風向の時間変化が小さい時、計算値と観測値の一致度は高かった。SIERRA-II では、ガンマ線線量率の計算のために、10 分平均の風向データを使用している。そのため、分単位で変化するような気象状況下では、10 分平均の風向データが実際の風向変化を追い切れない。Fig. 10 で示したように、分単位で風向が変化するような場合は、実際の風向変化を計算することができず、ガンマ線線量率を正確に計算することができないと考えられる。

東海再処理施設がある茨城県東海地区では、気象の特徴として、秋に北東の定常風が多く出現する。北東風は、他の風向の風より風向継続時間が長い。一方、海陸風循環時には、短期に大きな風向変化が現れる [18]。Fig. 6 で示した 10 基のモニタリングステーションおよびモニタリングポストでの環境ガンマ線線量率変動は、これらの北東風および海陸風の特性に影響されていると考えられる。そこで、モニタリングステーションおよびモニタリングポスト別に環境ガンマ線線量率変動の計算結果および観測結果について考察した。

Table 3 に、排気筒の各方位に配置されたモニタリングステーションおよびモニタリングポスト毎に、2003 年9月～11 月に計算および観測されたガンマ線線量率を比較した。MS2 および MP5 は排気筒の南西および西に位置し、北東の風で風向変化が少ない気象状況でガンマ線線量率が変動したものである。ガンマ

線線量率の変動継続時間が長い回数が他の MS,MP のそれよりも多い。MS2 と MP5 でのファクタ2での一致度はそれぞれ 0.55, 0.56、MFB(Mean Fraction Bias)はそれぞれ 0.35, 0.04 であった。ファクタ2での一致度は、他の MS,MP よりも比較的高い値であった。MS2 と MP5 での MFB の値は、他の MS,MP のそれよりも比較的小さく、SIERRA-II での計算での過小評価の度合いは比較的小さかった。

一方、MP6 でのファクタ2での一致度は 0.19、MFB の値は 1.12 であり、他の MS,MP のそれと比較して一致度は低く、過小評価の度合いが大きかった。MP6 で環境ガンマ線線量率が変動した時は、変動継続時間が短い場合が多かった。これは、MP6 で環境ガンマ線線量率が変動した時の気象条件として、海陸風による風向変化が大きかったことが低い一致度の原因として考えられる。これらのことから、SIERRA-II での計算は、北東系の風向変化の少ない風の場合は観測結果との一致度が大きく、海陸風循環時の風向変化が大きい時は観測結果との一致度が小さいことが示唆される。なお、茨城県東海地区では、風向変化が大きい気象状況が多く発生する季節と、発生頻度が小さい季節がある [18)]。風向変化が大きい気象状況の発生頻度が小さい季節では、計算結果と観測結果の一致度が良くなると考えられる。

Fig. 12 に、計算および観測された環境ガンマ線線量率の散布図を示した。この散布図は、2003 年9月から 11 月の再処理施設の連続運転期間において Fig. 6 に示した 10 地点のモニタリングステーションおよびモニタリングポストで環境ガンマ線線量率の変動が観測あるいは計算された全ての期間に対してのものである。Fig. 12 では、有意な計算値および観測値を 1 nGy h^{-1} 以上とし、環境ガンマ線線量率の変動が有意に観測された場合に対する SIERRA-II での計算値、および SIERRA-II での計算値が有意になった場合に対する環境ガンマ線線量率の観測値の変動量を示した。観測された環境ガンマ線線量率の変動量は、^{85}Kr 放出に伴う付加線量率であり、^{85}Kr の放出開始に先立つ3時間の環境ガンマ線線量率の平均値を環境ガンマ線線量率の通常値として差し引くことにより求めた。観測された環境ガンマ線線量率に対する計算された環境ガンマ線線量率の比は R で示している。各座標軸上の点は、1 nGy h^{-1} 以下の計算値あるいは観測値である。Fig. 12 より、ファクタ2およびファクタ5での一致度は、それぞれ 42%、74%であった。MFB の値は 0.41 であり、SIERRA-II による計算は過小評価ぎみであった。

^{85}Kr 放出に伴う環境ガンマ線線量率の変動は、排気筒からの ^{85}Kr の放出状況と風向に依存する。環境ガンマ線線量率の変動継続時間は、おおむね 30 分間以内であった。この変動継続時間におけるガンマ線線量率の変動の積算値は、^{85}Kr の放出に伴う外部線量となる。2003 年9月～11 月の再処理施設運転期間において、前述したモニタリングステーションおよびモニタリングポストで観測された環境ガンマ線線量率の変動継続期間毎に線量率の変動量を積算し、SIERRA-II により計算された環境ガンマ線線量率の変動の積算値と比較した。Fig. 13 に、1回の環境ガンマ線線量率の変動継続期間毎に積算された環境ガンマ線線量の変動量について、計算および観測された積算変動線量の散布図を示す。Fig. 13 では、1回の変動継続期間内の積算変動線量について、観測された積算線量が 0.1 nGy 以上の場合に対する SIERRA-II での計算値、および SIERRA-II で計算された積算線量が 0.1 nGy 以上となった場合に対する観測された積算線量を示した。観測された環境ガンマ線積算変動線量は、^{85}Kr 放出に伴い変動した線量率の積算値であり、^{85}Kr の放出開始および放出終了時の環境ガンマ線線量率の値を環境ガンマ線線量率の通常値として差し引くことにより求めた。観測された環境ガンマ線積算変動線量に対する計算された値の比は R で示した。各座標軸上の点は、0.1 nGy 以下の計算値あるいは観測値である。ファクタ2およびファクタ5での一致度は、それぞれ 48%、75%であり、MFB は 0.43 となった。Fig. 12 で示した環境ガンマ線線量率の計算結果と観測結果との比較における結果とほぼ同じ値となった。

4.結言

再処理施設運転に伴う環境ガンマ線線量率変動を実時間で定量化するために、”放出放射性物質による緊急時線量シミュレーションコード(Simulation Code (II) for Emergency Dose by Released Radioactive Substances ; SIERRA-II)”を開発した。SIERRA-II の特徴は、以下の通りである。

(1)質量保存風速場モデルと粒子拡散モデルに基づき、施設から放出された放射性物質の3次元大気拡散を計算する。

(2)施設周辺での計算の空間的分解能を上げ、かつ計算機への負荷を下げるために、ネステッド格子モデルを採用している。

(3) SIERRA-II は、10 分間隔の施設周辺で観測された局地気象のオンラインデータおよび排気筒モニタのオンラインデータを入力データとし、風速場のベクトル図、大気中濃度、空気吸収線量率等の等値線図を出力する。

(4)SIERRA-II は、Windows OS 搭載のパーソナルコンピュータ(PC)上で、GUI(Graphical User Interface)による操作操作ができる。

再処理施設運転時に ^{85}Kr が大気中に放出された際、施設周辺で環境ガンマ線線量率の変動が観測される。変動が観測された時、再処理施設からの ^{85}Kr の放出状況および気象状況等の情報が収集され、線量率の変動の原因が ^{85}Kr 放出であるかどうか原因究明がなされる。観測された東海再処理施設からの ^{85}Kr 放出に伴う環境ガンマ線線量率の変動を、開発した SIERRA-II を用いてシミュレーションすることにより、^{85}Kr 放出に伴う環境ガンマ線線量率の変動を定量化することを試みた。結果は、以下の通りである。

(1)再処理工場からの ^{85}Kr 放出に伴う環境ガンマ線線量率の変動は、排気筒の風下方位のモニタリングステーションおよびモニタリングポストで観測された。環境ガンマ線線量率の変動期間は ^{85}Kr の放出継続期間と対応していた。これらのことから、^{85}Kr の放出率と風向の情報に基づき、^{85}Kr の放出による環境ガンマ線線量率の変動を特定した。

(2)SIERRA-II により計算された環境ガンマ線線量率の変動パターンは、施設周辺のモニタリングステーションおよびモニタリングポストで観測された環境ガンマ線線量率の変動パターンと比較的よく一致した。2003 年9月～11 月の東海再処理施設連続運転時について、SIERRA-II により環境ガンマ線線量率の変動幅と、観測された環境ガンマ線線量率の変動幅を比較した。それらの一致度は、ファクタ2で 42%、ファクタ5で 74%であった。MFB (mean fraction bias)は 0.41 であり、SIERRA-II による計算結果は過小評価ぎみであった。東海再処理施設周辺では北東の風が定常的に吹くことが多い。北東海風で風向変化の少ない時、SIERRA-II での計算結果と観測結果との一致度が大きく、海陸風循環時の風向変化が大きい時は観測結果との一致度が小さかった。

参考文献

1) 原子力安全委員会, 原子炉施設等の防災対策について, 2000 年5月一部改訂 , 1980.
2) 竹安　正則, 清水　武彦ほか, JCO 臨界事故時の放出放射性物質の評価（時間変化）, 日本原子力学会 2000 年春の年会要旨集第1分冊, 2000, p.16.
3) 茅野　政道, 石川　裕彦ほか, SPEEDI:緊急時環境線量情報予測システム, JEARI-M 84-050 , 1984.
4) 宮内和也, 山本朝男ほか, 緊急時環境モニタリング等に係る拡散予測システムの構築, JNC TJ4410 2000-001, 2000.
5) Takeyasu, M., Takeishi, M., Real-time Simulation of Environmental Dose in the Normal Operation of Tokai Reprocessing Plant by Dose Evaluation Computer Code (SIERRA-II), Proc. AOCRP-1, Soeul, Korea, Oct. 2002, OP6C-3.
6) Chino, M., Manual of a suite of computer codes, EXPRESS, JAERI-M 92-082, 1992.
7) Yamada, T., Bunker, S., Development of nested grid, second moment turbulence closure model and application to the 1982 ASCOT Brush Creek data simulation, J. Appl. Meteor., vol. 27, 1988, pp. 562-578 .
8) Turner, D. B., Workbook of atmospheric dispersion estimates, Lewis Publishers, Boca Raton, USA, 1994, pp. 2-11.
9) Nakanishi, M., Large-eddy simulation of radiation fog, Bound.-Layer Meteorol., vol. 94, 2000, pp. 461-493.
10) Mellor, G. L., Yamada, T., Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, Rev. Geophys. Space Phys., vol. 20, 1982, pp. 851-875.
11) Sherman, C. A., A mass-consistent model for wind fields over complex terrain, J. Appl. Meteorol., vol. 17, 1978, pp. 312-319.
12) 原子力安全委員会, 発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針, 平成 13 年3月一部改訂, 1983.
13) 原子力安全委員会, 発電用軽水型原子炉施設の安全審査における一般公衆の線量評価について, 平成 13 年3月一部改訂, 1989.
14) 原子力安全委員会, 被ばく計算に用いる放射線エネルギー等について, 平成 13 年3月一部改訂, 1989.
15) 日本原子力研究開発機構, 東海再処理施設事業指定申請書, 平成17年9月, 2005.
16) 武石稔, 宮河直人, 渡辺均ほか, 東海再処理施設周辺の環境放射線モニタリング結果 (2003 年度業務報告), JNC TN8440 2004-002 , 2004.
17) 気象庁, 気象観測の手引き（気象庁編）, 気象業務支援センター, 1988, p .18.
18) 茅野政道, 緊急時計画のための東海原子力サイト周辺の大気拡散特性の数値解析, 日本原子力学会誌, vol. 32, 1990, pp. 395-402.

Table 1 Functions of the SIERRA-II.

Objective facility	Facilities in the Tokai Works and the O-arai Engineering Center
Objective domain	Horizontal : 40 km with the grid interval of 1.25km, especially 4 km with the interval of 50 m Vertical : 400 m with the grid interval of 20 m
Objective period	Up to the maximum 48 h in forecast with time resolution of 1 h
Input data	Real-time local meteorological and effluent data of every 10 min in the Tokai Works and the O-arai Engineering Center, and local meteorological prediction data of every 1 h
Output data	Vector plots of wind fields, contour maps of air concentration and dose rate, and table of dose for arbitrary period
Operation	GUI(graphical user interface) operation on Windows PC

Table 2 Main GUI windows for the operation of the SIERRA-II.

Windows	Functions
System starting	Initiation of the system operation, and the selection of the objective area for calculation (Tokai or O-arai)
Facility selection	Selection of the objective stack of the facility or the set of the release point
Calculation condition setting and calculation execution	Set of radioactivity release condition(the use of effluent monitor data or the assumption of continuous release of unit radioactivity), the set of the evaluation period, and the storage of calculation conditions and the calculation execution
Graphical output	Selection of the item for the output (wind fields, air concentration, dose rate, and so on), and the graphical output of the calculation results
System exit	Storage of the calculation results, and the termination of the system operation

Table 3 Results of the agreement of the calculation results of the SIERRA-II with the observed ones for each monitoring station/post. The data was obtained during the period from Sep. to Nov., 2003.

	MS1(24)	MS2(100)	MP1(8)	MP2(18)	MP3(7)
FA5	0.79(19)	0.70(70)	1(8)	0.89(16)	1(7)
FA2	0.42(10)	0.55(55)	0.63(5)	0.28(5)	0.71(5)
MFB	0.60	0.35	0.65	0.56	0.32

( ) : number of data

	MP4(101)	MP5(34)	MP6(27)	MP7(45)	MP8(75)
FA5	0.81(82)	0.82(28)	0.56(15)	0.67(30)	0.61(46)
FA2	0.42(42)	0.56(19)	0.19(5)	0.53(24)	0.19(14)
MFB	0.14	0.04	1.12	0.45	0.72

( ) : number of data

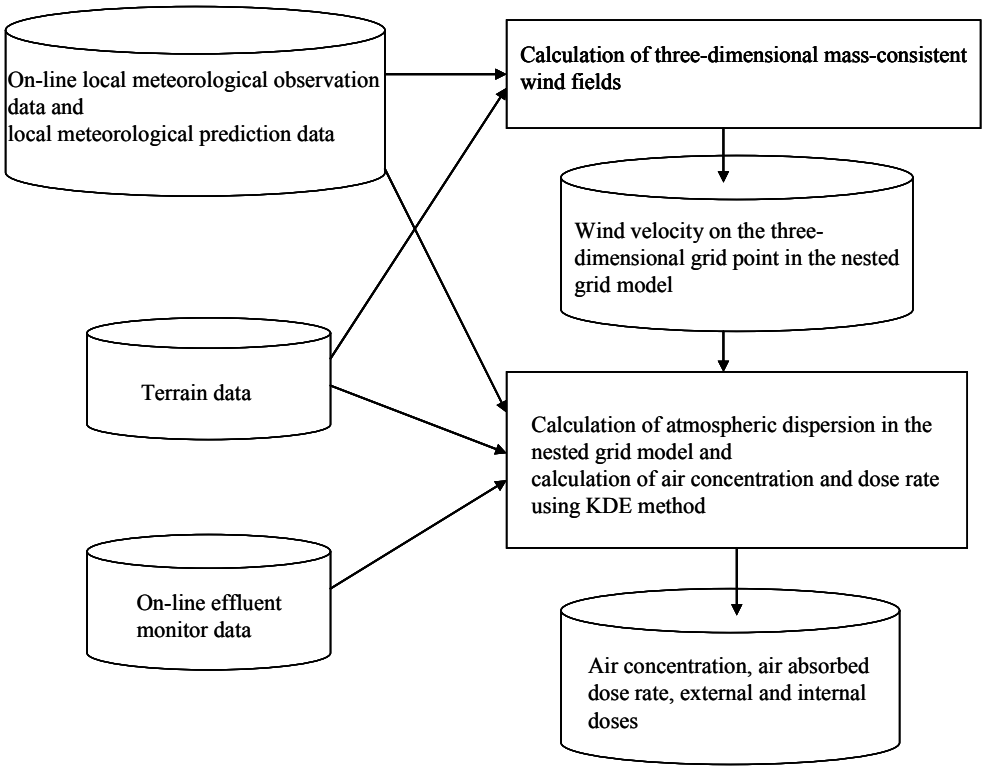

Fig. 1 Calculation procedures of the SIERRA-II.

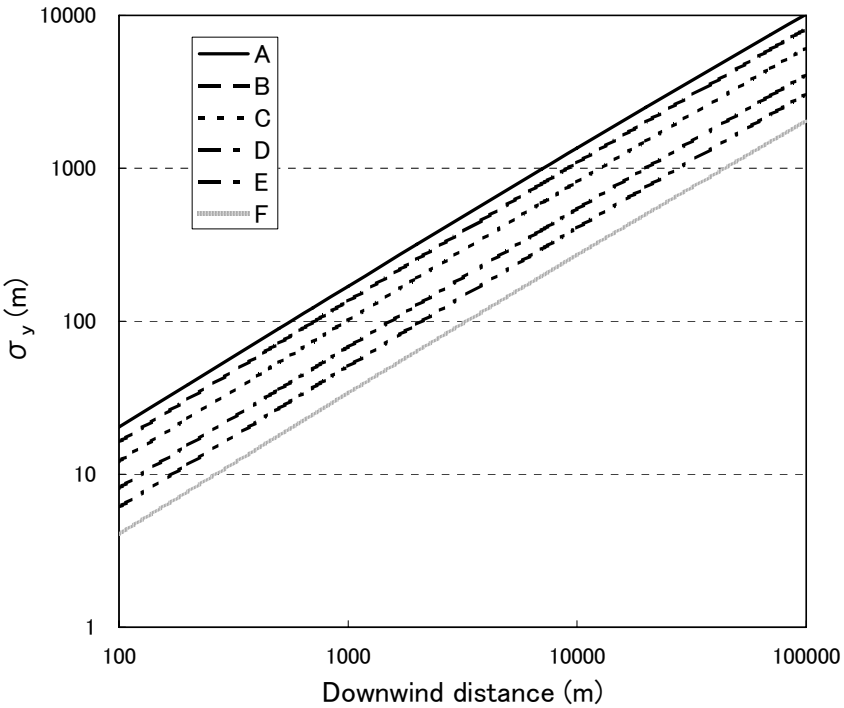

Fig. 2(a) Pasquill horizontal dispersion parameter, σ_y, as functions of the atmospheric stability and downwind distance.

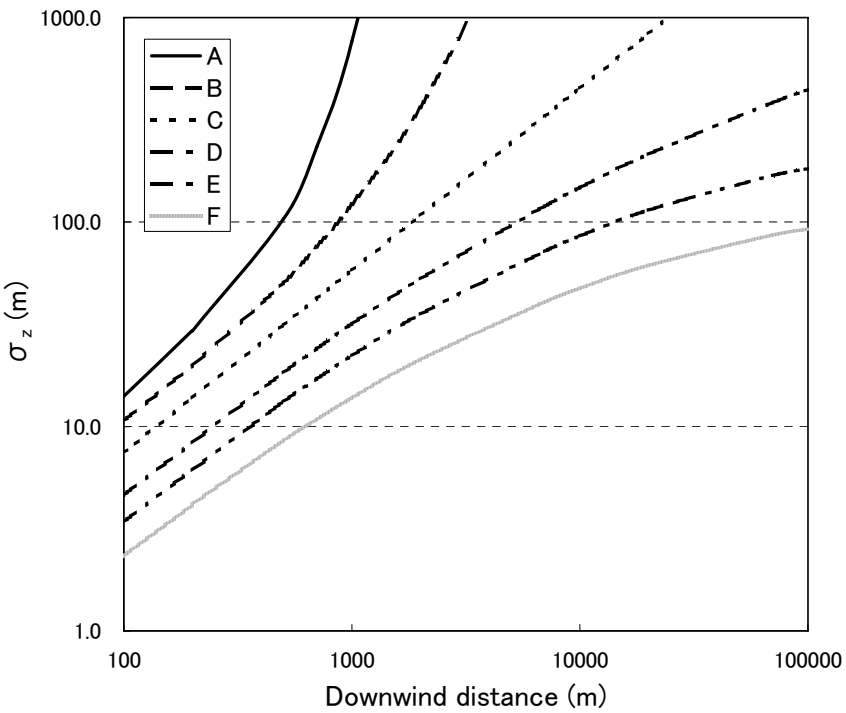

Fig. 2(b) Pasquill vertical dispersion parameter, σ_z, as functions of the atmospheric stability and downwind distance.

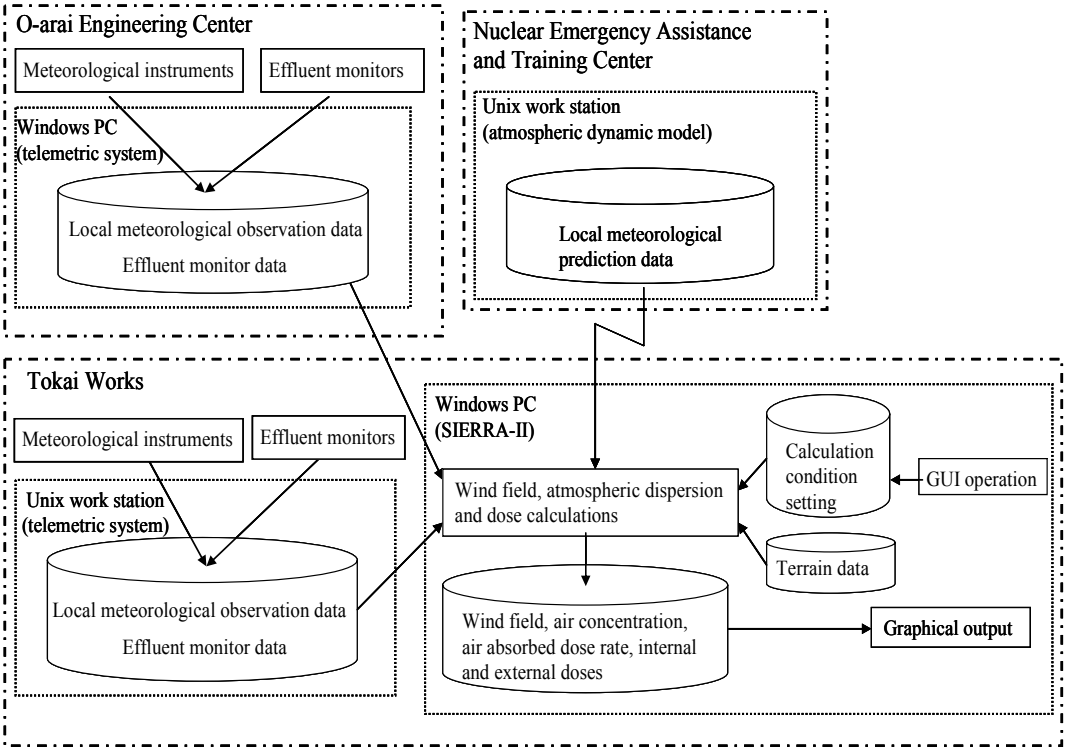

Fig. 3 Data flow of the SIERRA-II.

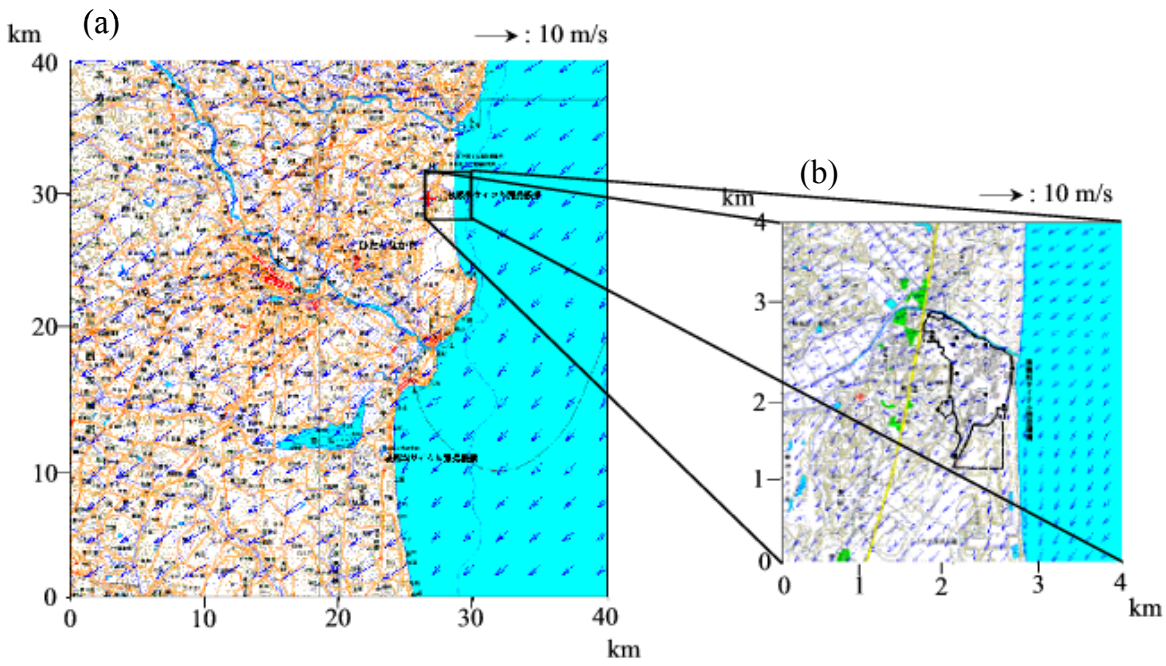

Fig. 4 Examples of the vector plots of horizontal wind fields, (a) wind in the area of 40 km×40 km, (b) wind in the area of 4 km×4 km.

MS : monitoring station, MP : monitoring post

Fig. 5 Example of the output of the contour map of air absorbed dose rate.

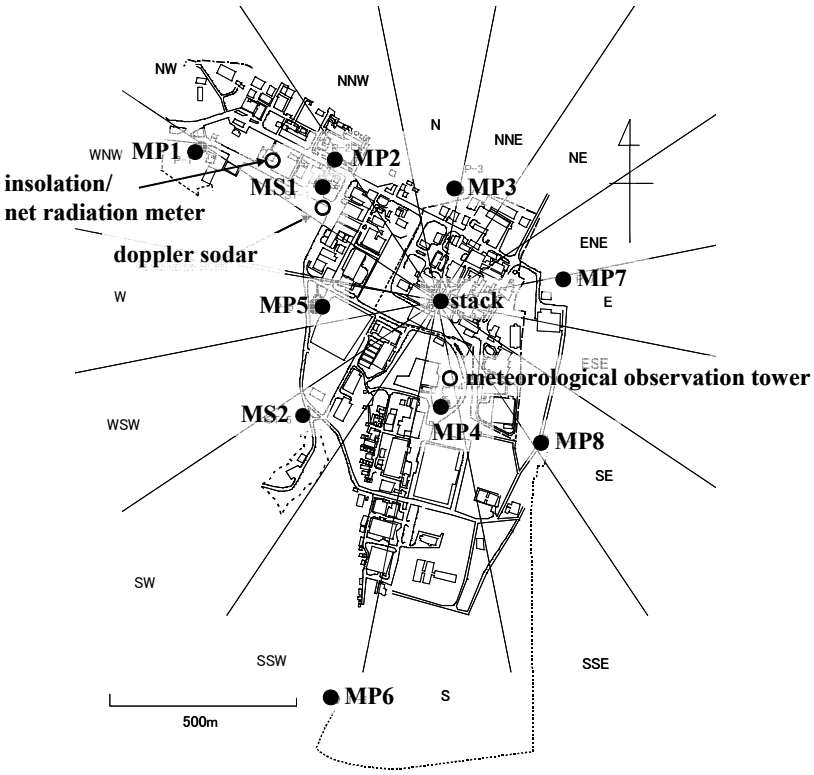

Fig. 6 Location of the stack, meteorological instruments and monitoring stations/posts inside the Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories, JAEA (MS: monitoring station, MP: monitoring post).

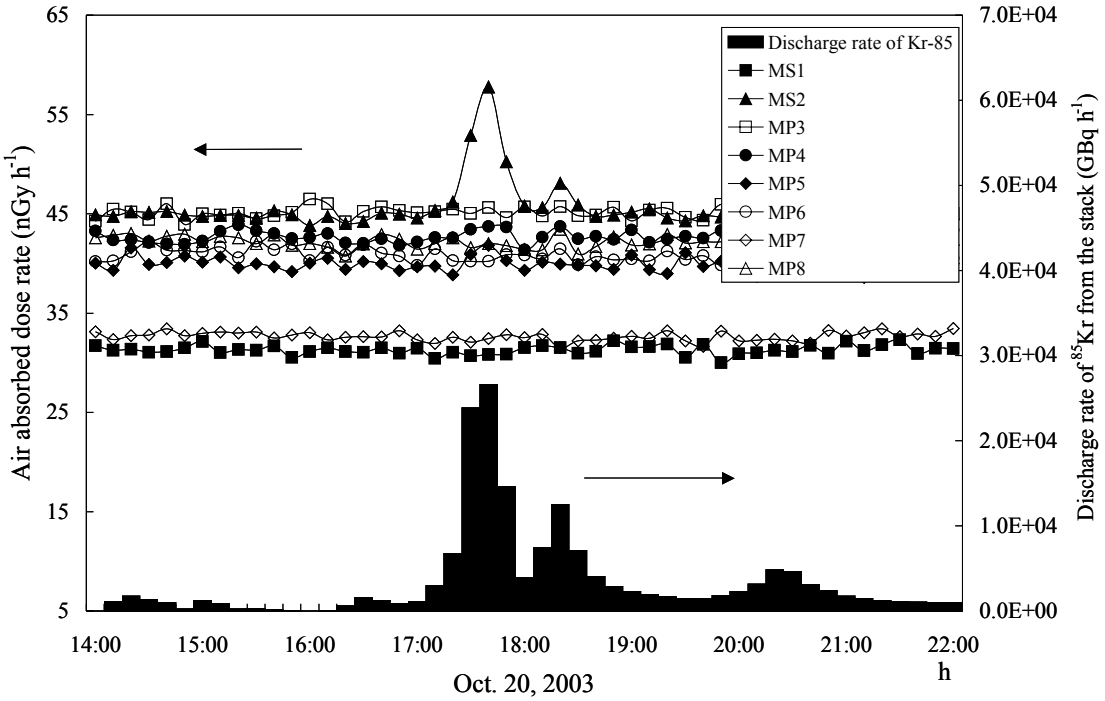

Fig. 7(a) Temporal variation of environmental gamma-ray dose rate at monitoring stations and monitoring posts on Oct. 20, 2003.

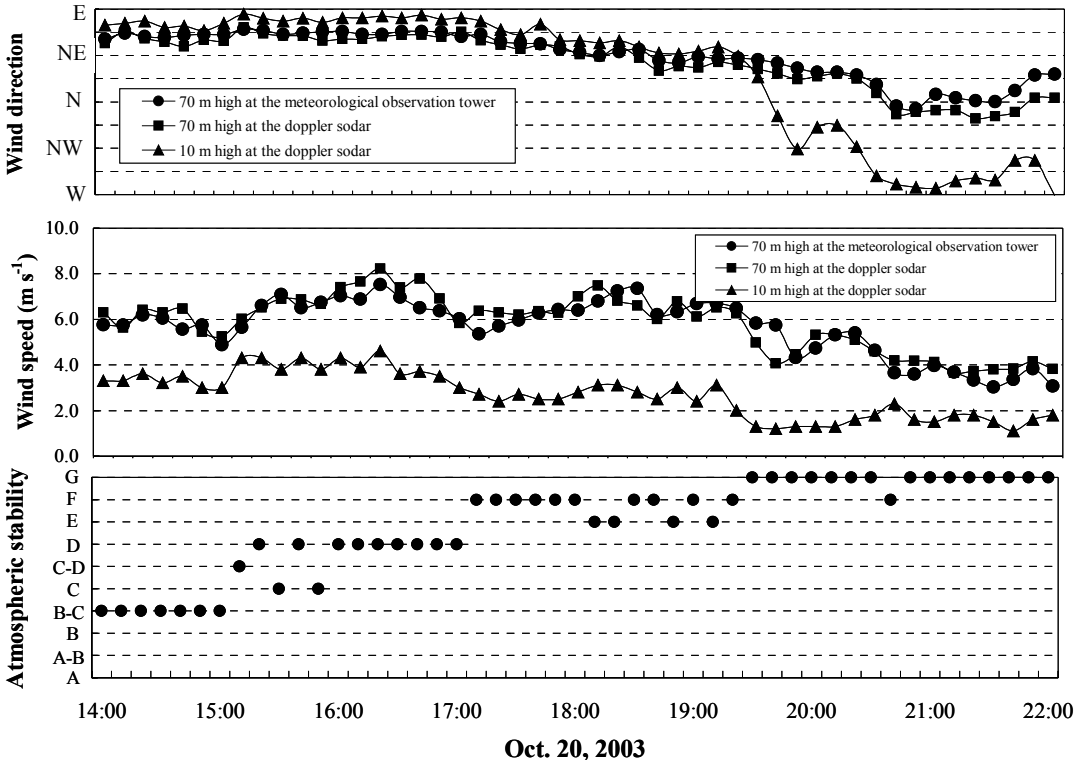

Fig. 7(b) Variations of wind direction, wind speed and atmospheric stability when the environmental gamma-ray dose rate varied as shown in Fig. 7(a).

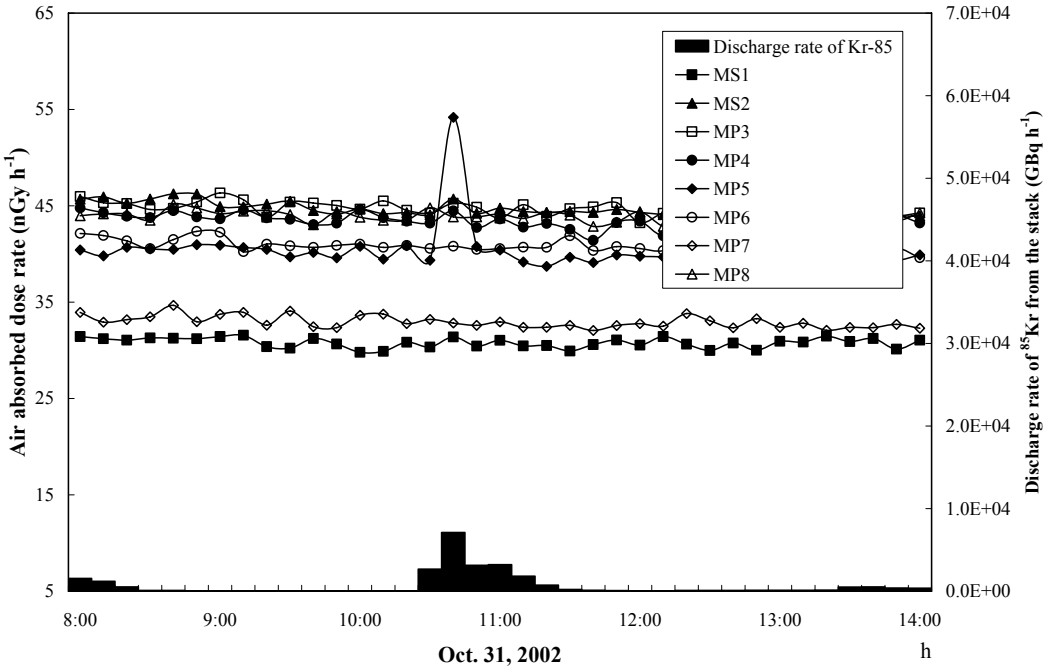

Fig. 8(a) Temporal variation of environmental gamma-ray dose rate at monitoring stations and monitoring posts on Oct. 31, 2002.

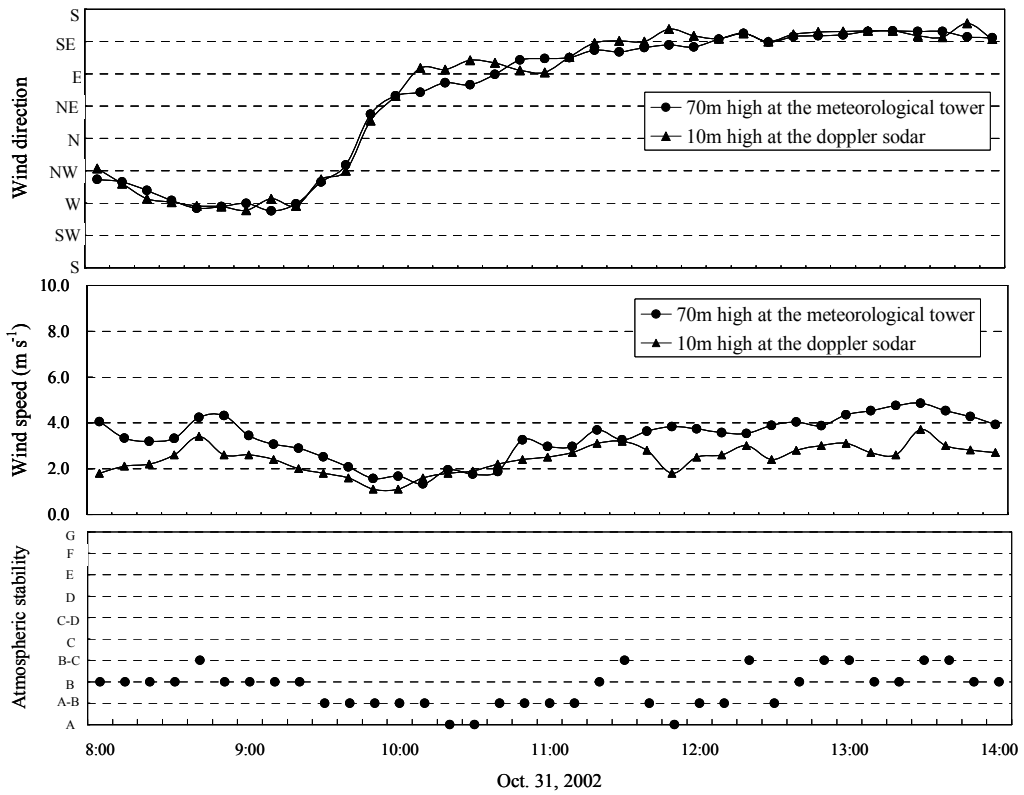

Fig. 8(b) Variations of wind direction, wind speed and atmospheric stability when the environmental gamma-ray dose rate varied as shown in Fig. 8(a).

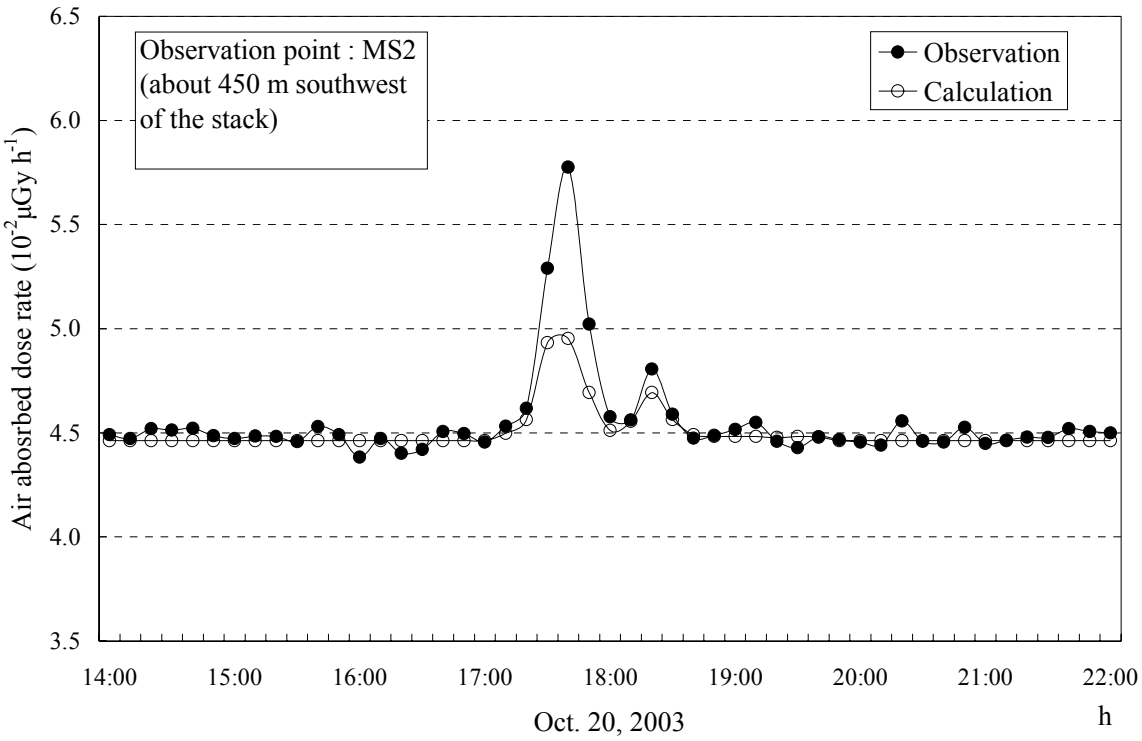

Fig. 9 Comparison of the calculated variation of environmental gamma-ray dose rate to the observed one in Oct. 20, 2003.

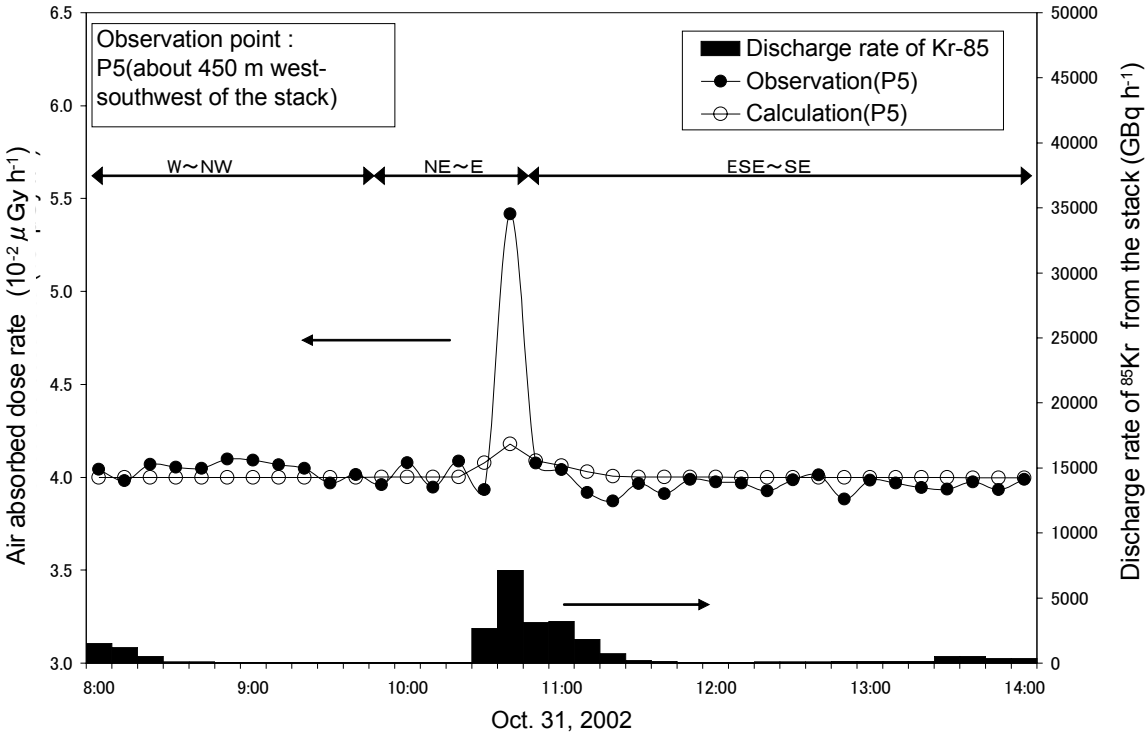

Fig. 10 Comparison of the calculated variation of environmental gamma-ray dose rate to the observed one in Oct. 31, 2002.

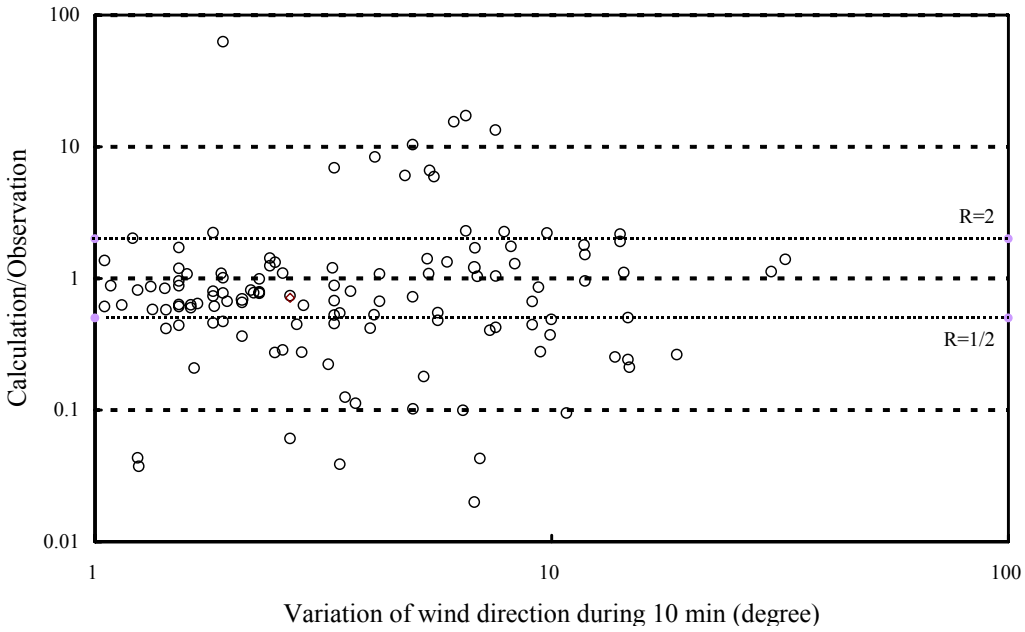

Fig. 11 Relationship between the variation of wind direction during 10 min and the ratio of calculated dose rate to the observed one.

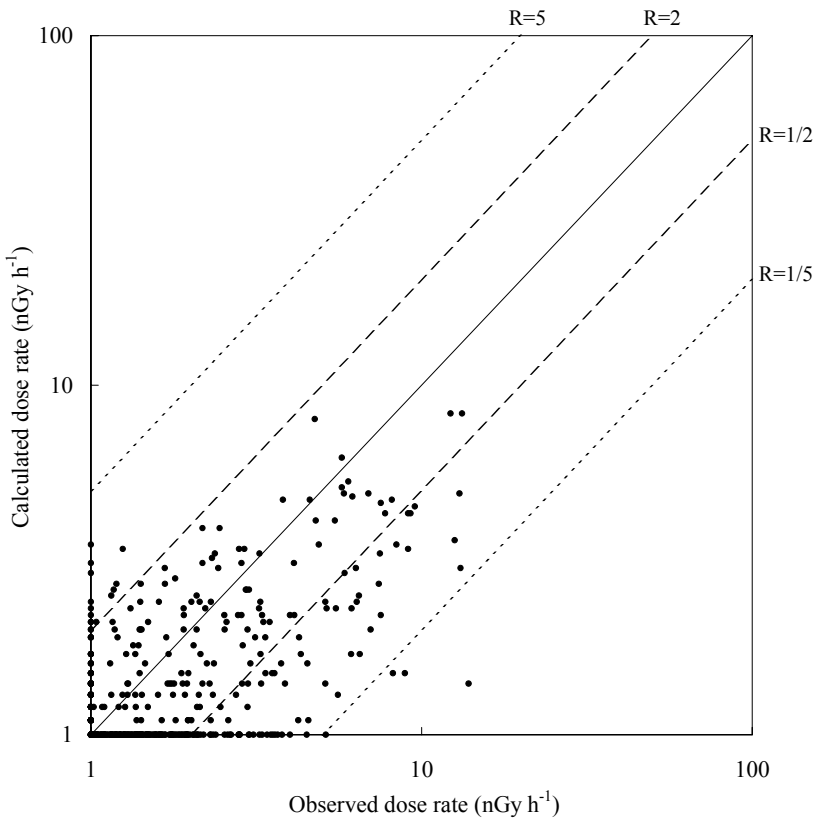

Fig. 12 Scatter plots of calculated and observed air absorbed dose rates.

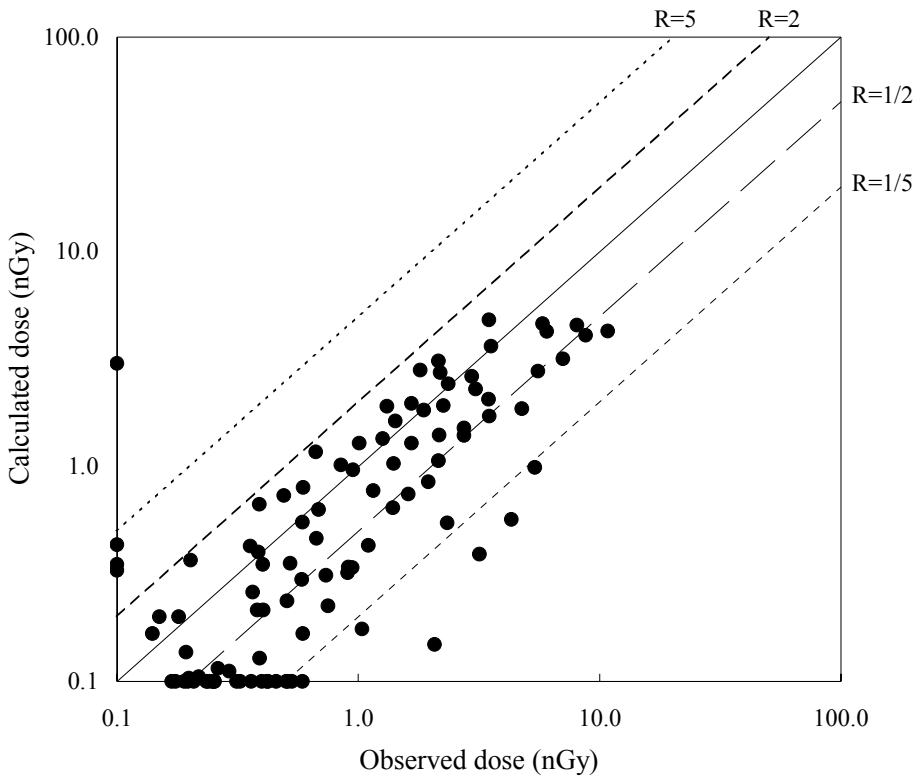

Fig. 13 Scatter plots of calculated and observed cumulative air absorbed doses during one series of the increase period.

This is a blank page.

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	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
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	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[c]	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	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
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]	℃		K
光束	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	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大きさは同一である。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
粘度	パスカル秒	Pa s	$m^{-1}\ kg\ s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
表面張力	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	ヘンリー毎メートル	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	$W/(m^2\ sr)$	$m^2\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=kg\ s^{-3}$
酵素活性濃度	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 =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
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	$1ha=1hm^2=10^4m^2$
リットル	L, l	$1L=11=1dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
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	$1eV=1.602\ 176\ 53(14)\times10^{-19}J$
ダルトン	Da	$1Da=1.660\ 538\ 86(28)\times10^{-27}kg$
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	$1ua=1.495\ 978\ 706\ 91(6)\times10^{11}m$

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	$1\ bar=0.1MPa=100kPa=10^5Pa$
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	$1\ Å=0.1nm=100pm=10^{-10}m$
海里	M	1 M=1852m
バーン	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単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	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	$1\ sb\ =1cd\ cm^{-2}=10^4cd\ m^{-2}$
フォト	ph	$1\ ph=1cd\ sr\ cm^{-2}\ 10^4lx$
ガル	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	$1\ Oe \triangleq (10^3/4\pi)A\ m^{-1}$

(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
キュリー	Ci	$1\ Ci=3.7\times10^{10}Bq$
レントゲン	R	$1\ R = 2.58\times10^{-4}C/kg$
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=10-9T
フェルミ		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
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	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）
ミクロン	μ	$1\ \mu\ =1\mu m=10^{-6}m$

（第8版，2006年改訂）

この印刷物は再生紙を使用しています