

被ばく線量評価の実際 (簡易計算からSPEEDIまで)

吉岡 逸夫*

Assessment of Doses due to Accidental Releases of Radioactive Materials (Quick Assessment ~ SPEEDI)

Itsuo Yoshioka*

原子力の安全性の問題は、つきつめるところ放射線（およびそれに起因する被ばく）に対する安全性の問題と言える。歴史を遡ると、原子力発電所が実現する以前、わが国は広島・長崎への原爆投下、第五福竜丸の事件を経験し、最近では 1999 年の JCO 臨界事故、今年 3 月の福島第一原子力発電所の事故を経験した。いずれの場合にもあてはまるが、放射線の脅威となる理由はそれが目に見えないこと、放射性核種によっては影響が長く継続することである。

本稿では、放射線による被ばくに焦点をあて、わが国における原子力安全に関する取組みを紹介するとともに、被ばく線量の予測法について、簡易的な方法から、最近マスコミに頻繁に登場する緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム（SPEEDI : **S**ystem for **P**rediction of **E**nvironmental **E**mergency **D**ose **I**nformation）を含む、数種類の計算コードについて概説する。

Key word: 安全審査指針、ALARA、オフサイトセンター、EPZ、ガウスプルームモデル、ARAC、SPEEDI、放射性希ガス、放射性ヨウ素、パスキル・ギフォード法、外部被ばく、実効線量、甲状腺、AIRGAMMA、EEDCDQ、MACCS2、OSCAAR、EXPRESS、カーネル濃度計算法(KDE)、GPV、AMeDAS、ERSS

1. 原子力安全の基本原則

原子力安全の基本的な考え方として

- ① 原子力の利用により得られる便益が放射線被ばくの悪影響を十分に上回る場合に限ること
- ② 線量限度を設けること
- ③ 放射線被ばくを可能な限り低減する対策をとること

が求められる。さらに、以下のような安全原則が提言されている。

- ① 原子力施設の設置・運転や放射性廃棄物の処分に関して、政府による安全規制の法的枠組みを確立し、利用推進組織と独立した機関が規制すること。

- ② 事業者は安全確保を最優先とし、立地から設計、建設、運転、廃止にいたる施設利用の全期間にわたって品質保証計画を確立、実施すること
- ③ 放射性物質の放出を防ぐための多重防護と障壁を設けた深層防護の思想による設計とし、実証された技術、手法により高信頼度の設計、建設、運転を実施すること
- ④ 万一の事故への緊急対策を確立すること
- ⑤ 放射性廃棄物は将来世代への過度の負担を与えないよう管理すること

原子力の利用においては、放射線影響を防止する観点から、以上のような基本的な安全原則に基づいて安全確保が図られている。

*アドバンスソフト株式会社 技術第 4 部

4th Technical Division, AdvanceSoft Corporation

2. 安全審査指針

発電用原子炉施設、試験研究用原子炉施設、核燃料サイクル施設などの原子力施設の設置、変更などにあたっては、安全性を確保するための安全審査が各所管行政庁および原子力安全委員会によって行われる。この安全審査を客観的、合理的な観点に基づいて行うため、原子力施設の立地、安全評価、線量目標値などに関する判断基準が各種の「安全審査指針」として原子力安全委員会により策定・整備されている。

原子力の安全確保、特に実用発電用原子炉の安全性を確保するための立地・設計上の基本的考え方は、

- ① 異常や事故を起こさないように対策を講じること、またこの対策が破られても異常の拡大および事故および事故への発展を防止すること、さらに万一事故が発生した場合においても周辺公衆に放射線障害および災害を及ぼすことのないよう十分な安全対策を講じること（多重防護あるいは深層防護）
- ② 通常運転時において周辺環境に与える放射線の量を合理的に達成可能なレベルまで十分低く抑えること（ALARA¹の原則）
- ③ 万一の大きな事故を想定しても公衆の安全が確保されるような十分な隔離をとること（基本的立地条件）

である。この基本的な考えを踏まえて、安全審査を客観的かつ合理的なものとするため、目的に応じて指針類が策定されている。

以下に挙げたものが基本となる指針である。

○原子炉立地審査指針（原子炉立地審査指針およびその適用に関する判断のめやすについて） [1]

この指針は、国が陸上に設置する原子炉施設の安全審査を行うにあたって、原子炉施設の立地条件の適否を判断するために用いられるものである。

○安全設計審査指針（発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針） [2]

この指針では、原子炉施設全般および安全確保に関わる構成機器、要素について安全設計の基本的な要求を 59 項目に分けて示している。

○安全評価審査指針（発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針） [3]

発電用軽水型原子炉の安全審査において、原子炉施設の安全性評価の妥当性を判断する際の基礎を示す目的で定められたものである。

○線量目標値指針（発電用軽水型原子炉施設周辺の線量目標値に関する指針） [4]

発電用軽水炉が通常運転時に環境に放出する放射性物質によって、周辺の公衆が受ける線量を合理的に達成できる限り低く保つための努力目標として定めた線量目標値およびその適用について説明している。

原子力防災に関する主な安全審査指針としては、次に挙げる 3 つの指針がある。

○原子力施設等の防災対策について（防災指針） [5]

防災指針は、防災対策一般（放射性物質の放出の態様、異常事態の把握、情報提供、教育訓練、オフサイトセンターの整備、諸設備・防災資機材整備など）、防災対策を重点的に充実すべき地域の範囲（EPZ）、緊急時環境放射線モニタリング、災害応急対策実施指針、緊急時医療などの防災対策について実効性のある内容を示したものである。

○緊急時環境放射線モニタリング指針 [6]

原子力施設に異常状態が生じ、放射性物質または放射線の異常な放出あるいはそのおそれがある場合には、「災害対策基本法」および「原子力災害対策特別措置法」に基づき、国、地方公共団体および原子力事業者はそれぞれの防災計画に従い、所要の防災対策を講ずることとなっている。この防災対策の一環として、周辺環境の放射性物質または放射線に関する情報を得るため、緊急時における環境放射線モニタリングが実施される。この指針は、緊急時の環境放射線モニタリングに関するものである。

¹ As Low As Reasonably Achievable（合理的に達成可能な限り低く）

○発電用軽水型原子炉施設周辺の線量目標値に対する評価指針[7]

この指針は、原子炉施設の基本的設計において、平常運転時の施設周辺の線量を評価するため、放射性物質の放出量とそれによる線量の評価に使用する標準的な計算モデルとパラメータなどを定めたものである。

また、必要に応じてこれら基本指針を補完する指針類が策定されてきた。次に挙げる「気象指針」は、被ばく線量計算の基になる核分裂生成物の大気中濃度を計算する際に用いられる重要な指針である。

○発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針(気象指針) [8]

発電用原子炉施設の安全評価にあたって、当該原子炉施設の平常運転時および想定事故時における被ばく線量評価に際し、大気中における放射性物質の拡散状態を推定するために必要な気象観測方法、観測値の統計処理方法および大気拡散の解析方法を定めたものが、「発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針」である。これによれば、大気拡散評価にはガウスプルームモデルを適用している。世界各国の立地審査の方法を比較すると、基本的にはガウスプルームモデルを使用しているが、日本の審査方式の最大の特徴は、日本のような複雑地形にも適用できるように、サイト周辺の地形モデルを入れた風洞実験により実効放出高と呼ばれる地形を考慮したモデル用の放出高度を求め、これをガウスプルーム式に入力して濃度計算を行っている点にある。

安全解析で行われている事故を想定した拡散評価は、放出および気象条件を厳しく設定し最悪の被ばく線量値に着目する安全側評価を目的としており、拡散の扱いは定常状態を仮定している。しかし、現実の事故に対する防災対策上からは、サイト特有の非定常状態、すなわち複雑地形上での大気拡散の特徴の把握が重要であり、地形の効果や時間的空間的気象変化を大気拡散に考慮できる数値モデルを用いた評価が必要である。このような観点に立ち、米国の ARAC (Atmospheric Release Advisory

Capability) システムや、日本の SPEEDI などでは、3次元風速場計算のための質量保存則モデルと空間濃度および沈着量計算のための粒子拡散モデルを、事故時の放射能拡散予測に用いている。数千 km スケールの大規模事故に対する拡散予測については、チェルノブイリ事故以降各国で研究が進められ、国際的な広域モデル比較研究が行われている。

3. 簡易計算法による予測線量の推定

緊急時において、適切な防護対策を時宜にかなって実施するためには、予測線量を迅速に得ることが必要となる。

予測線量は被ばく継続時間と単位時間当たりの空間放射線量率あるいは大気中の放射性物質の濃度の関数となる。被ばく継続時間は、放射性物質が現場に到達した時から始まり、風向の大幅な変動、放出の停止などにより放射性物質の影響がなくなることによって終了する。従って、放出源の情報とともに事故期間中の風向の継続時間を知ることが重要である。

空間放射線量率および大気中の放射性物質の濃度は、モニタリングの結果として得られるが、濃度分布式などを用いて計算により求めることもできる。

ここでは、例として以下に放射性希ガスの放出に伴う外部被ばくによる実効ガンマ線量および放射性ヨウ素の吸入摂取による甲状腺の等価線量を、参考文献[9]に記載されている「ガンマ線量分布図」および「放射性物質濃度分布図」を用いて推定する方法を示す[10]。

3.1. 地図および分布図などの準備

- ① 重点地域の様相が明瞭にわかる地図（例えば縮尺1/25,000 もしくは1/50,000）
- ② 放射性希ガスの放出に伴う地表における風下軸上空放射線量率を推定するための、種々の地上放出高さに対応する各大気安定度ごとの風下軸上空カーマ率図（基準ガンマ線エネルギー

E0=1MeV で作成)²

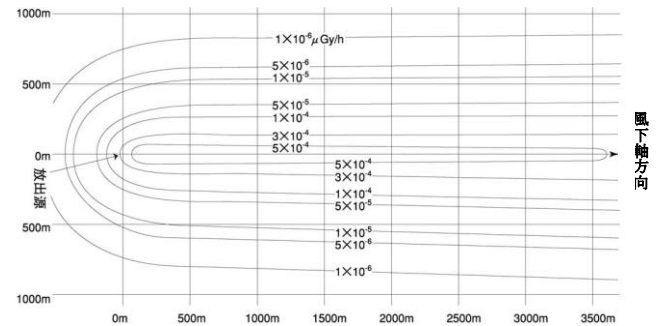
- ③ 風下地表の空間放射線量率分布を推定するための、種々の地上放出高さに対応する各大気安定度における空気カーマ率分布図（基準ガンマ線エネルギーE0=1MeVで作成）³
- ④ 放射性ヨウ素の放出に伴う地表における風下軸上の最大放射性ヨウ素濃度およびその出現地点を推定するための、種々の地上放出高さに対応する各大気安定度ごとの風下軸上地表濃度図⁴
- ⑤ 風下地表の大気中の放射性ヨウ素濃度分布を推定するための、種々の地上放出高さに対応する各大気安定度ごとの地表濃度分布図⁵
- ⑥ 上記③の空間放射線量率分布図および⑤の地表濃度分布図を①の地図の縮尺に一致させた透明チャート（分布図を透明プラスチックシートに図示（コピー）したもの）

わが国の原子力施設の安全評価では、大気安定度はパスキル・ギフォード法により、不安定から安定に向かってAからFまでの6段階分類する方式が採用されている。

放射性プルームのガンマ線による空間放射線量率を求める基本式から算出された空間放射線量率分布図の例を示す[5]。図3.1は、放射性プルームが最も拡散しにくく遠くまで到達する大気安定度F型の場合の100m放出高さの場合、図3.2は、逆の傾向を示す大気安定度A型の100m放出高さの場合である。

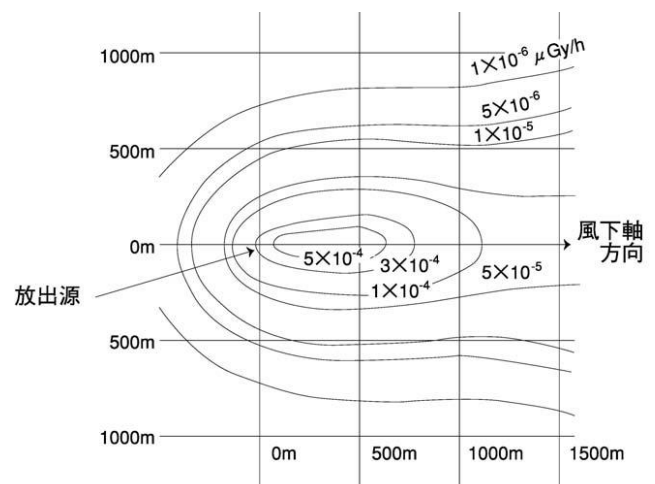
3.2. 必要な放出源情報

- ① 放射性物質の放出地上高さ(m)
- ② 異常状態発生施設付近の放出地上高さにおける風向、平均風速および大気安定度
- ③ 放出核種とその放射能放出率、放出開始時刻および放出継続時間または放射能放出総量（予測を含む）



大気安定度：F 型
放出高：100m
風速：1m/s
放出率：1GBq/h
実効エネルギー：1MeV

図 3.1 空間放射線量率分布図[5]
(大気安定度 F 型)



大気安定度：A 型
放出高：100m
風速：1m/s
放出率：1GBq/h
実効エネルギー：1MeV

図 3.2 空間放射線量率分布図[5]
(大気安定度 A 型)

² [9] に記載されている風下軸上空気カーマ率

³ [9] に記載されている風下直角方向空気カーマ率

⁴ [9] に記載されている風下軸上放射能濃度

⁵ [9] に記載されている風下直角方向放射能濃度

3.3. 放射性希ガスからの外部被ばくによる予測ガンマ線量地図の作成

3.1の③に示されている風下直角方向空気カーマ率を用いて、風下地表面における空気カーマ率および外部全身ガンマ線量を推定する方法を記す。

3.3.1. 地表面(x,y,0)における空気カーマ率の簡易推定

$$D(x,y,0) = D_0(x,y,0) \times \left(\frac{Q}{Q_0} \right) \times \left(\frac{E}{E_0} \right) \times \left(\frac{u_0}{u} \right) \quad (1)$$

$D(x,y,0)$: 地表面(x,y,0)における空気カーマ率
[nGy/h]

$D_0(x,y,0)$: 地上放出高さ(m)および大気安定度が該当する図より読み取った地表面(x,y,0)における空気カーマ率[nGy/h]

Q : 実際の条件下での放出率[GBq/h]
基準放出率 $Q_0=1$ [GBq/h] で基準化しているため補正が必要。

E : 実際の条件下での基準ガンマ線エネルギー[MeV/dis]
図を求める計算では、実効ガンマ線エネルギーを $E_0=1$ [MeV]と規準化しているため補正が必要。

u : 地上放出高さにおける実際の風速[m/s]
図を求める計算では、風速を $u_0=1$ [m/s]と規準化しているため補正が必要。

3.3.2. 緊急時における予測外部被ばくによる実効線量の簡易推定

$$H(x,y,0) = k \times f_h \times f_0 \times D(x,y,0) \times T \quad (2)$$

$H(x,y,0)$: 地表面(x,y,0)における予測外部被ばくによる実効線量[nSv]

k : 空気カーマから実効線量への換算係数1[Sv/Gy]

f_h : 建屋の遮へい係数 (通常1.0)

f_0 : 住居係数 (通常1.0)

T : 予測放出時間[h]

これらの地表面(x,y,0)における空気カーマ率および実効線量の簡易推定法を用いて、予測実効ガンマ線量地図を作成する方法を以下に記す。

(1) 放出源情報が収集できる場合

空間放射線量率予測地図を以下の手順で作成し、全身の外部被ばくによる予測線量を求める。

- (a) 放出地上高さおよび大気安定度を知り、これに該当する空気カーマ率分布図を既に準備されている透明チャートの中から選び出す。
- (b) 風向を知り、(a)の透明チャートを縮尺が同じ地図の上にのせ、同図の原点と風下軸をそれぞれ地図上の放出点と風下方位に重ね合わせ固定する。
- (c) 放射性希ガス放出率 Q 、ガンマ線の実効エネルギー E および平均風速 u を知り、透明チャートに示された線量率 $D_0(x,y,0)$ に $(Q/Q_0) \times (E/E_0) \times (u_0/u)$ を乗じた $D(x,y,0)$ (式(1)) を地図上に書き込み、空気カーマ率予測地図を作成する。
- (d) 予測放出時間 T を知り、これに(c)で作成した空気カーマ率予測地図に記載される空気カーマ率 $D(x,y,0)$ を乗じ、積算した予測ガンマ線量 $H(x,y,0)$ (式(2)) を求める。
- (e) また、排気筒からの予測放射性物質放出総量 Q_T [GBq] が得られる場合には、(a)の透明チャートの分布図に記載された単位放出量当たりの線量率 $D_0(x,y,0)$ に $k \times Q_T / Q_0 \times E / E_0 \times u_0 / u$ を乗じ、積算した予測ガンマ線量 $H(x,y,0)$ を直接的に得ることができる。
- (f) なお、(d)、(e)において求められた積算した予測実効ガンマ線量 $H(x,y,0)$ (μGy)は、そのまま全身の外部被ばくによる予測実効線量(μSv)に読み替えるものとする。

(2) 放出源情報が十分収集できない場合

放出源情報が放出源側から十分得られない場合は、全身の外部被ばくによる予測実効線量を以下の手順で求める。

- (a) 放出点より風下の地表面モニタリング地点 $(x,y,0)$ の空気カーマ率 $D_M(x,y,0)$ を実測する。モニタリングポストの実測値が利用可能ならばこれを用いてもよい。

- (b) 放射性希ガス放出率 Q を式(1)から導いた次式により求める。ただし、式中の4は安全係数である。

$$Q = \frac{4 \times Q_0 \times D_M(x, y, 0) \times (u/u_0)}{D_0(x, y, 0) \times (E/E_0)} \quad (3)$$

ここで

- $D_0(x, y, 0)$: 風下の空気カーマ率図 (3.1の③)に示されている風下直角方向空気カーマ率)のうち地上放出高さおよび大気安定度が該当する図から読み取った地表地点 $(x, y, 0)$ における空気カーマ率 $[\mu\text{Gy/h}]$
 $D_M(x, y, 0)$: 風下 地表地点 $(x, y, 0)$ で実測された空気カーマ率 $[\mu\text{Gy/h}]$
 u : 放出地上高さにおける平均風速 $[\text{m/s}]$
 E : ガンマ線実効エネルギー $[\text{MeV/dis}]$
 原子炉停止後の経過時間から決める。

以上の説明では、任意の風下地表面地点 $(x, y, 0)$ において空気カーマ率 $D_M(x, y, 0)$ を実測しているが、風下軸上の実測値が得られれば、放出率 Q の信頼性が高まるので、風下軸上地表地点 $(x, 0, 0)$ での実測値 $D_M(x, 0, 0)$ を用いるのが望ましい。

- (c) (1)の手順により全身の外部被ばくによる予測線量を求める。

3.4. 放射性ヨウ素による甲状腺の予測等価線量（預託線量）分布図の作成

3.1⑤に示されている風下直角方向放射能濃度を用いて、風下地表面における放射性ヨウ素濃度分布を求め、それをもとに吸入摂取による甲状腺等価線量を推定する方法を記す。

3.4.1. (x, y, z) 空間の地表面 $(x, y, 0)$ における放射性ヨウ素濃度の簡易推定

$$\chi_i(x, y, 0) = \chi_{i0}(x, y, 0) \times (Q_i/Q_{i0}) \times (u_0/u) \quad (4)$$

ここで

- $\chi_i(x, y, 0)$: 地表面 $(x, y, 0)$ における推定大気中放射性ヨウ素濃度 $[\text{Bq/m}^3]$
 $\chi_{i0}(x, y, 0)$: 地上高さおよび大気安定度が該当する

図から読み取った地表面 $(x, y, 0)$ における大気中放射性ヨウ素濃度 $[\text{Bq/m}^3]$

Q_i : 実際の条件下での放出率 $[\text{GBq/h}]$

図を求める計算では、放出率を

$Q_{i0}=1[\text{GBq/h}]$ と規準化しているため、補正が必要。

u : 実際の条件下での風速 $[\text{m/s}]$

図を求める計算では、風速を $u_0=1[\text{m/s}]$ と規準化しているため、補正が必要。

(添え字 i : 放射性ヨウ素の各同位体を表す)

を用いて推定する。

3.4.2. 緊急時における予測内部被ばくによる実効線量（または等価線量）の簡易推定

$$H_{\text{thy}}(x, y, 0) = \sum (k_i \times \chi_i(x, y, 0) \times M \times T) \quad (5)$$

$H(x, y, 0)$: 予測内部被ばくによる実効線量（または等価線量） $[\text{nSv}]$

k_i : 放射性ヨウ素を吸入摂取する場合の甲状腺等価線量に係る線量係数 $[\text{mSv/Bq}]$ 。

M : 呼吸率 $[\text{m}^3/\text{h}]$ 。

T : 予測放出時間 $[\text{h}]$

これらの地表面 $(x, y, 0)$ における放射性ヨウ素濃度および内部被ばくによる実効線量（または等価線量）の簡易推定法を用いて、予測地図の作成方法を以下に記す。

- (1) 放出源情報が収集できる場合

大気中の放射性ヨウ素濃度予測地図を以下の手順で作成し、甲状腺の予測等価線量を求める。

- (a) 放出地上高さおよび大気安定度を知り、3.1⑤に示されている風下直角方向放射能濃度の中から、これに該当する地表濃度分布図の透明チャートを選び出す。
 (b) 風向を知り、透明チャートを縮尺が同じ地図の上にのせ、同図の原点と風下軸を地図上の放出点と風下方位に重ね合わせ固定する。
 (c) 放射性ヨウ素各同位体の放出率 Q_i および平均

風速 u を知り、透明チャートに示された濃度 $\chi_{i0}(x, y, 0)$ に $(Q_i / Q_{i0}) \times (u_0 / u)$ を乗じた値 $\chi_i(x, y, 0)$ を $\text{Bq/m}^3 (= \mu\text{Bq/cm}^3)$ の単位で地図上に書き込み、地表の大気中の放射性ヨウ素濃度予測地図とする (添え字 i は放射性ヨウ素の各同位体を表す。以下、同様。)。

- (d) 予測放出時間 T [h] を知り、これと、(c) で作成した予測地図に記載される大気中の放射性ヨウ素濃度 $\chi_i(x, y, 0)$ から吸入摂取による甲状腺の予測等価線量 H_{thy} [mSv] を(5)式により求め、甲状腺の予測等価線量地図とする。

(2) 放出源情報が十分収集できない場合

放射性ヨウ素放出率の情報が放出源側から十分得られない場合は甲状腺の予測等価線量を以下の手順で求める。

- (a) 放出地点より風下の地表面モニタリング地点 $(x, y, 0)$ にて、ヨウ素の捕集を行い、大気中の放射性ヨウ素濃度 $\chi_{im}(x, y, 0)$ [Bq/m^3] を実測する。
- (b) 各放射性ヨウ素同位体の放出率 Q_i [GBq/h] を式(4)から導いた次式により求める。

ただし、式中の4は安全係数である。

$$Q_i = 4 \times \chi_{im}(x, y, 0) \times (u / u_0) / \chi_{i0}(x, y, 0) \quad (6)$$

ここで

$\chi_{i0}(x, y, 0)$: 3.1⑤に示されている風下直角方向放射

能濃度から求められる放出率1[GBq/h]の

ときの地表面 $(x, y, 0)$ 地点における放射性

ヨウ素濃度 [Bq/m^3]

$\chi_{im}(x, y, 0)$: 地表面 $(x, y, 0)$ 地点で実測された大気

中の放射性ヨウ素濃度 [Bq/m^3]

u : 放出地上高さにおける平均風速[m/s]

以上の説明では、任意の風下地表面地点 $(x, y, 0)$ において大気中の放射性ヨウ素濃度 $\chi_{im}(x, y, 0)$ を実測しているが、風下軸上の実測値が得られれば、放出率 Q の信頼性が高まるので、風下軸上地表地点 $(x, 0, 0)$ での実測値 $\chi_{im}(x, 0, 0)$ を用いるのが望ましい。

- (c) ①の手順により甲状腺の予測等価線量を求め

る。この場合、原子炉停止後2時間までに放出される全放射性ヨウ素に対しては約40%過少評価され、その後時間の経過とともに過少評価の程度は減少し、1週間以上経過するとすべてがヨウ素131であるとして評価できる。

上記の方法においては、風向、風速、大気安定度および風向の継続時間などの気象に関する情報が必要となる。従って、これらの気象情報を収集できるように、あらかじめ体制を整えておく必要がある。

なお、ウランまたはプルトニウムについては、フィルタを通して放出された場合または粒径が1ミクロン程度以下の粒子が放出された場合には、通常の拡散として取り扱えろとし、放射性ヨウ素と同様な方法を用いて予測線量を推定する。

4. 被ばく線量評価コード

ここでは、被ばく線量計算に用いられる計算コードについて、過去に筆者が利用したものを中心に紹介する。

4.1. AIRGAMMA コード[11]

AIRGAMMA (A computer Code for Quick Assessment of the Cloudshine Doses due to Accidental Releases of Radioactive Materials) コードは、旧日本原子力研究所 (現日本原子力研究開発機構、以下旧原研) で開発された、事故時に放出される放射性雲からの外部被ばく線量迅速計算コードである。

AIRGAMMA はガウス分布型ブルームモデルを用いてあらかじめ計算された規格化線量を内外挿することにより、外部全身被ばく線量を短時間に計算するコードである。規格化線量は、風速 1[m/s]、放出量 1[Ci]または、放出率 1[Ci/h]で、放射性崩壊と沈着による減少を無視した場合の線量であり、種々のガンマ線エネルギー、放出高、被ばく地点、大気安定度に対して計算されたテーブルを用意している。このコードは3章の簡易計算法をツール化したものと言える。

4.2. EEDCDQ コード[12]

EEDCDQ コードは、軽水型原子炉施設の想定事故時における放出放射能およびこれに伴う線量の評価を行うため、旧原研で開発された EEDAR（事故時放出量計算コード）および CQDQ（相対濃度・相対線量計算コード）を、わが国の安全審査に資することを目的として財団法人原子力安全基盤機構が整備したものである。EEDCDQ は、安全評価審査指針に定められた事故、重大事故および仮想事故のすべての事象に対して、原子力安全委員会が定めた関連指針に則り、核分裂生成物の炉心内蓄積量評価から環境中での線量評価までを一貫して行うことができる。

4.3. MACCS2 コード[13][14]

MACCS2 コードは、米国 NRC が開発した確率論的リスク評価コードで、格納容器破損により大気へ放出された放射性核種の輸送、拡散、沈着の計算が可能である。一般公衆の放射線被ばくによる健康リスク、被ばく低減を目的とした緊急時対策活動や汚染土壌の除染や土地利用禁止、農作物廃棄などによる経済損失について評価することができる。

4.4. OSCAAR コード[14]

OSCAAR (Off-Site Consequence Analysis Code for Atmospheric Release in Reactor Accident) コードは、旧原研で開発された確率論的環境影響評価コードで、MACCS および COSYMA コードとの国際比較計算で機能の検証が行われた。

安全目標案の検討のため、早期大規模放出となる事故シーケンスのソースタームに対する、65 のパラメータの不確実さを考慮した急性死亡およびがん死亡の条件付き発生確率が算出できる。

4.5. EXPRESS コード[15][16]

EXPRESS (EXact PREparedness Supporting System) コードは、原子炉事故などの緊急時において、詳細な 3 次元大気拡散モデルに基づく被ばく線量評価を、小型計算機での実時間処理に対応させることを目的に旧原研で開発されたコードである。

このコードは、3 次元質量保存風速場モデル、移流拡散方程式のモデル化には粒子拡散モデルを用いている。また、被ばく線量評価に用いる濃度分布計算は公衆への影響が大きい地上についてのみ行うようにしたことや、カーネル濃度計算法 (Kernel Density Estimator : KDE) を採用することで計算量を削減する工夫をしている。

4.6. SPEEDI ネットワークシステム[17][18]

緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム（以下、SPEEDI）は、1979 年の米国スリーマイル島原発事故を契機に、旧原研においてシステムの設計が開始され、現在は文部科学省の委託業務として財団法人原子力安全技術センター（以下、原安センター）により運用および機能向上などの整備が進められている。SPEEDI は、防護対策の策定に当たり、環境に放出される放射性物質の拡散予測（大気中濃度の推移）や被ばく線量分布などを迅速に計算し、予測結果を国・地方公共団体へ提供する役割をもつ、わが国の原子力防災の根幹をなすシステムである。

4.6.1. SPEEDI の構成

SPEEDI は、原子力関連施設周辺の気象条件、原子力関連施設から放出が予想される放出源情報、およびあらかじめ設定された地形データを基に「放射能拡散モデル計算」を行い、放射性物質の拡散、大気中濃度、人体への被ばく線量などを予測する。予測結果は原子力関連施設周辺の地図上に等値線データなどで表現され、ネットワーク経由で提供される。SPEEDI の処理概念図を図 4.1 に示す。

原子力関連施設周辺の気象条件は、各地方公共団体および日本気象協会から、原安センターの中央計算機群に自動収集され、常時、予測計算の実施に備えている。

文部科学省から予測計算実施の指示を受けると、原安センターは、収集されている気象条件を基に予測計算を実施し、予測結果を図形データとして地方公共団体および国の防災関係機関に送信する。

4.6.2. SPEEDI の計算の仕組み

SPEEDI は、3 つの計算モデルを用いて、局地気象予測計算、風速場計算および濃度・線量計算を行い、線量などの予測値を算出する。これらの予測値について、計算開始時点から指定した予測時間までの間を 1 時間刻みに図形出力することができる。

SPEEDI における計算の流れを図 4.2 に示す。

以下に、SPEEDI の主な機能を示す。PHYSIC、WIND21、PRWDA21 は、計算モデルの名称である。

(1) データ収集・監視・登録

放射性物質の拡散を予測する計算に必要な気象データを常時収集し蓄積している。気象データは、日本気象協会から提供される数値予報データ GPV (Grid Point Value) データとアメダス (AMeDAS : Automated Meteorological Data Acquisition System) 観測データ、および原子力関連施設がある道府県から提供されるモニタリングデータを収集・蓄積している。

道府県からは、気象データとともに、環境放射線の観測データも収集されており、環境放射線の観測値が一定レベルを超えていないかの監視も常時行っている。一定レベルを超えた場合は、自動的に原安センター内および文部科学省の関係者に携帯電話の音声と E-mail で通報される。

(2) 局地気象予測計算 (PHYSIC)

GPV データを基に、原子力施設が設置されている地域の風向・風速、気温などの予測データを取り出し、大気力学方程式に基づき、風向・風速について局地の地形を反映した計算格子上の予測値を計算するとともに鉛直拡散係数、大気安定度の予測データを作成する。

(3) 質量保存則風速場計算 (WIND21)

局地気象予測計算からの予測値を内挿により、より高い分解能の計算格子上に設定する。風速場については、より高い分解能の標高データを入力し、風速場の変分解析により質量保存則が満たされるよ

うに内挿値に修正を加え、風向・風速を予測する。

(4) 濃度・線量計算 (PRWDA21)

風速場の計算結果、放出源情報、地形データなどを基に、以下の濃度・線量計算を行う。

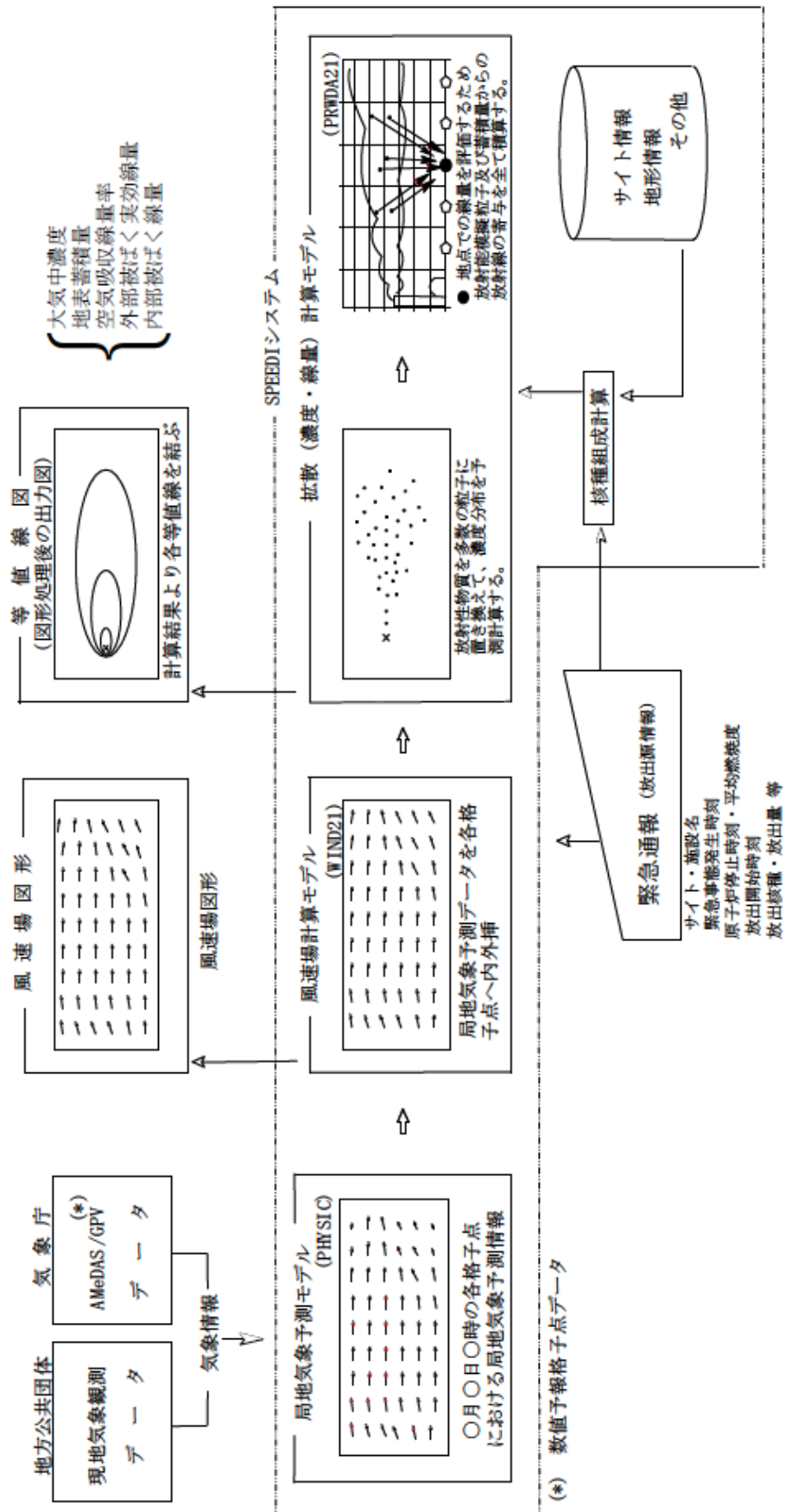
- 降雨および乾燥沈着ならびに放射能の減衰を考慮し、放射性物質の大気中濃度および地表蓄積量の予測計算を行う。
- 放射性物質の大気中濃度および地表蓄積量の計算結果から、空気吸収線量率を計算する。空気吸収線量率は、各核種からの複数の Y 線による寄与を個別に計算して合計する詳細な手法により計算される。
- 空気吸収線量率の計算結果から外部被ばく実効線量を計算する。
- 放射性物質の大気中濃度の計算結果から、吸入による臓器等価線量や内部被ばく実効線量などを計算する。

(5) 予測図形作成

拡散予測の計算結果を地図上に表示するための図形 (予測図形) を作成する。作成される図形は等値線で表現される。予測図形には放射性物質の分布を表す大気中濃度図形、放射性物質からの放射線の量を表す空間線量率図形、地表に降下した放射性物質の量を表す地表蓄積量図形、人体への影響を表す外部被ばく図形・内部被ばく図形などがある。気象予測計算の結果も風速場図形として作成される。

(6) 予測図形配信

予測図形作成で作成された図形を、ネットワークを経由して国や地方公共団体の災害対策本部、自治体に配信する。災害対策本部、自治体には専用端末が設置され、予測図形を表示することができる。



[出典]「環境放射線モニタリング指針」原子力安全委員会[10]

図 4.1 SPEEDI の処理概念図

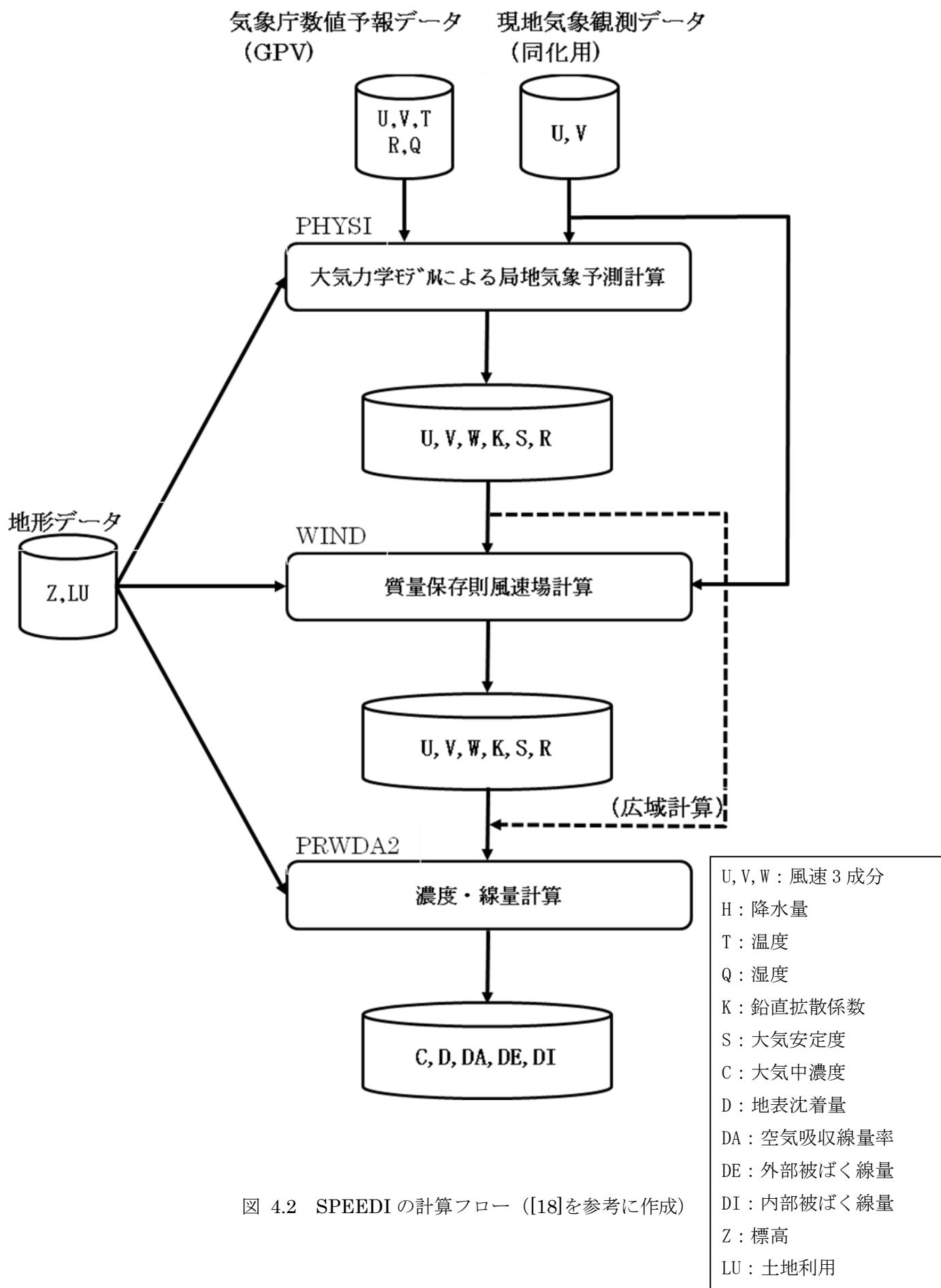


図 4.2 SPEEDI の計算フロー ([18]を参考に作成)

4.6.3. SPEEDI の出力図形の種類と内容

SPEEDI から配信される図形情報の種類と内容を表 4.1 に示す。

表 4.1 SPEEDI の出力図形 ([18]を参考に作成)

	図形の名称	表示方法	単位	内 容
予 測 結 果	風速場（地上高）	水平断面風速場ベクトル表示	m/s	各時刻における風向・風速の水平成分をベクトル表示。放射性プルームの流れる方向の予測に利用。
	大気中濃度（地上高） （希ガス） （ヨウ素） （上記以外の FP 核種など）	水平分布等値線 および最大濃度地点	Bq/m ³	各時刻における平均的空气中濃度。 （希ガス、ヨウ素、FP 核種など）を表示。
	地表蓄積量 （ヨウ素） （上記以外の FP 核種など）		Bq/m ²	地上に蓄積するヨウ素および FP 核種などの積算量を表示。
	空気吸収線量率	水平分布等値線 および最大線量地点	μGy/h	各時刻における平均空気吸収線量率を表示。 緊急時環境放射線モニタリング結果との比較に利用。
	外部被ばくによる 実効線量		mSv	希ガス、ヨウ素、FP 核種などから受ける外部被ばく実効線量を表示。住民の予測実効線量の推定に利用。
	吸入による 甲状腺等価線量			ヨウ素の吸入による甲状腺の等価線量を表示。 住民の甲状腺予測等価線量の推定に利用。
	内部被ばくによる 臓器の等価線量			FP 核種などの吸入による肺、骨表面など臓器の等価線量を表示。
	内部被ばくによる 実効線量			ヨウ素以外の FP 核種などの吸入による実効線量を表示。
観 測 結 果	気象観測値 （風向・風速） （降水量）	地上観測点における矢印表示	m/s	気象観測データの風向・風速値を矢印により表示。
		地上観測点における記号表示	mm/h	降水量を下記の記号により表示。 記号 1：20mm/h 以上 記号 2：10～20mm/h 記号 3：10mm/h 未満 記号 4：欠測
	放射線観測値			環境放射線観測値を記号により表示。
	低線量率 高線量率	地上観測点における記号表示	μGy/h	記号 1：10μGy/h 以上 記号 2：2～10μGy/h 記号 3：0.2～2μGy/h 記号 4：0.2μGy/h 未満 記号 5：欠測
	中性子線量率	地上観測点における記号表示	μSv/h	記号 1：10μSv/h 以上 記号 2：2～10μSv/h 記号 3：0.2～2μSv/h 記号 4：0.2μSv/h 未満 記号 5：欠測

5. むすび

本稿では、広く知られている被ばく線量評価法および計算コードを取り上げた。特に、SPEEDI について、3 月の福島第一原子力発電所の事故時にどのように活用されたか振り返ってみる。

SPEEDI の試算結果が原子力安全委員会から公表されたのは、事故後 10 日以上経った 3 月 23 日のことであった[19]。試算が遅れた理由は、放出源情報が得られなかったためとされている。放出源情報のソースとして期待されていた緊急時対策支援システム (ERSS : **E**mergency **R**esponse **S**upport **S**ystem) は、残念ながら停電で機能が停止していた。それでも、原発周辺の放射性核種の濃度の測定値が得られれば、その情報からソースタームを推定することができる。この点についても、運悪く事故後の数日間は強い西風でほとんどの放射性核種は太平洋側に流されており、洋上に定点測定点を置かない限り測定できなかった。結果として、陸向きの風向となった 3 月 20 日になってやっと計算できたということらしい。この事態を振り返ってみるに、SPEEDI が有効に活用されたとは言えないだろう。未曾有の地震と津波の重畳という不運に起因することを差し引いてもなお、運用方法を含めて大きな課題が残ったといえる。

被ばくの被害を軽減するためには、災害の発災後の初動期が重要となる。福島第一原子力発電所の例では、北西の方向に空間線量率の高い地域が現れている。すなわち、この地域の住民は少なからず被ばくしたと考えられる。仮に、発災を直ちに認識し、継続的に風向・風速のデータをモニタしていれば、簡易計算法によっても、風下側の特定地域に放射性物質による影響が現れるであろうことは予測できたはずである。現実には、種々の制約から、全住民を避難させ被ばくを回避することは不可能だったかも知れないが、改善策を講じる契機とすべきだろう。

参考文献

[1] 原子力安全委員会：“原子炉立地審査指針およびその適用に関する判断のめやすについて”，

(1964)

- [2] 原子力安全委員会：“発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針”，(1990)
- [3] 原子力安全委員会：“発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針”，(1990)
- [4] 原子力安全委員会：“発電用軽水型原子炉施設周辺の線量目標値に関する指針”，(1975)
- [5] 原子力安全委員会：“原子力施設等の防災対策について”，(1980)
- [6] 原子力安全委員会：“緊急時環境放射線モニタリング指針”，(1984)
- [7] 原子力安全委員会：“発電用軽水型原子炉施設周辺の線量目標値に対する評価指針”，(1975)
- [8] 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”，(1982)
- [9] 橘晴夫,他：“排気筒から放出される放射性雲の等濃度分布図および放射性雲からの等空気カーマ率分布図 (Ⅲ)”，日本原子力研究所,JAERI-Data/Code 2004-010, (2004)
- [10] 原子力安全委員会,“環境放射線モニタリング指針”，(2008)
- [11] 日高昭秀,飯島敏哲,“AIRGAMMA：事故時に放出される放射性雲からの外部被曝線量迅速計算コード”，保健物理,20, (1985), p.33-42.
- [12] 独立行政法人原子力安全基盤機構：“大間原子力発電所原子炉の仮想事故（原子炉冷却材喪失）時の被ばく評価”，JNES/SAE05-001, (2005)
- [13] D.Chanin,M.L.Young,J.Randall,K.Jamali : “Code Manual for MACCS2 : Volume 1,User’s Guide”,NUREG/CR-6613 SAND97-0594 Vol.1, (1997)
- [14] 谷口武俊：“原子力発電所の事故リスクコスト試算の考え方”,第 2 回 原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会, (2011)
- [15] 財団法人高度情報科学技術研究機構,原子力コードセンター, <<http://www.rist.or.jp/nucis/>> (2011/10/31 アクセス)
- [16] 茅野政道：“EXPRESS User’s Manual”，日本

原子力研究所, (1992)

- [17] 文部科学省原子力安全課原子力防災ネットワーク：“環境防災 N ネット”，
< <http://www.bousai.ne.jp/vis/index.php> >
(2011/10/31 アクセス)
- [18] 文部科学省，“緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム SPEEDI パンフレット”，
<<http://www.bousai.ne.jp/vis/torikumi/030103.html>> (2011/10/31 アクセス)
- [19] 内閣府プレス発表：“緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム(SPEEDI)の試算について”，
<http://www.nsc.go.jp/info/110323_top_siryo.pdf> (2011/10/31 アクセス)