動燃アスファルト固化処理施設事故による ^{137}Cs の環境放出量の推定

茅野 政道*, 永井 晴康*

*Estimated Amount of ^{137}Cs Discharged into Environment
due to the Accident in the Bituminization Plant at
Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation*

By Masamichi CHINO and Haruyasu NAGAI

KEYWORDS: bituminization plant, accidents, solidification, waste processing bitumens, waste plants, estimation, cesium 137, environment, atmospheric dispersion, numerical models, SPEEDI, ARAC

動力炉・核燃料開発事業団(動燃)東海事業所のアスファルト固化処理施設において発生した1997年3月11日の火災・爆発事故では、時期を同じくしてCsが茨城県内の数地点の大気塵サンプルから検出された。これらが事故起因のものか、過去の核実験によるフォールアウトであるのかを明らかにするため、筆者らは米国ローレンスリバモア国立研究所の緊急時大気拡散予測システムARACと協力して、当時の大気拡散の状況の再現計算を行い、さらに、科学技術庁からの要請により、爆発に伴い環境に放出された ^{137}Cs の量を、環境中でのサンプルデータと大気拡散シミュレーション計算の比較により推定した。

本報では、科学技術庁の事故調査委員会に報告した ^{137}Cs 放出量⁽¹⁾の推定方法と不確実さについて述べる。

1. 放出量の推定方法

ここで用いた大気塵サンプルの測定データは、放出点の南約20kmの日本原子力研究所大洗研究所(原研大洗)、これに隣接する動燃大洗事業所(動燃大洗)、西南西約15kmにある茨城県公害技術センター(県公害センター)および南西約60kmの気象研究所(気象研)での ^{137}Cs の濃度測定値^{(2)~(4)}である。また、大気拡散シミュレーションには、世界版SPEEDIの大気拡散モデルを局地地域の計算用に改良した、SPEEDI高度化モデルを用いた。

大気放出量は、濃度測定値を、単位放出(1Bq)を仮定して計算した測定地点の予測濃度値で除することにより推定できる。各サンプリング地点での測定濃度は、長時間サンプリングした空気(気象研が48時間、他は168時間)の平均であるため、放出量推定に用いる予測濃度値には時間積分濃度(1時間平均濃度を放射性雲が完全に通過するまで加えた値)を各地点のサンプリング時間で除した値を用いた。

* 日本原子力研究所 (Japan At. Energy Res. Inst.)
(1997年5月26日 受理)

2. 大気拡散シミュレーション

(1) 計算条件

シミュレーションに用いた主な条件は、次の通りである。

対象領域：茨城県の東海、大洗、水戸を含む25km四方(狭域)と筑波までを含む100km四方(広域)

計算格子：水平方向：250m(狭域)と1,000m(広域)

鉛直方向：可変(地上は10m)

放出時刻：3月11日20時 放出継続時間は可変

放出核種： ^{137}Cs 1.0Bq(単位放出)

沈着速度：0.1cm/s⁽⁵⁾

放出高度：90m(主排気筒を想定)、または10m(建屋の破損箇所からの放出を想定)

計算時間：放出開始から気象研のサンプリング終了時刻(3月12日10時)まで

環境情報：対象地域の地形

気象庁の日本域数値予報データ(3時間ごと)

水平分解能：地上20km, 上空40km

鉛直分解能：地上、925hPa(約750m),
850hPa(約1,500m)

時間分解能：3時間ごと

気象庁のアメダス等の地上観測データ(1時間ごと)

(2) 計算モデル

計算には、世界版SPEEDIの大気拡散モデル⁽⁶⁾を放出点周辺の気象データを入力できるように改良したSPEEDI高度化モデルを用いた。計算手順としては、始めに対象地域の3次元風速場の空間的・時間的変動を質量保存風速場モデルで計算し、次に粒子拡散モデルにより ^{137}Cs の大気中での拡散状況を計算した。

風速場モデルでは、対象地区に設定した50×50×20の格子点における風速分布(初期値)を、地上観測データおよび数値予報データを内外挿することにより推定し、さらに変分解析により地形を考慮しながら、質量保存則を満たすように初期値に最小の修正を加えて、合理的な3次元風速場を1時間ごとに計算する。

濃度分布および沈着量の計算では、放出された放射性物質を仮想的な粒子群で扱う。個々の粒子は、上記の風速場モデルの出力である3次元風速場に基づき風下に移流しながら、大気の安定状態に依存した拡散係数に基づくランダムウォーク法により水平および鉛直方向に拡散する。また、地上付近の粒子は、沈着速度に従って地表面に沈着する。実測値と比較するための大気中濃度は、粒子密度から計算できる。

(3) 結果

放出開始時点(20時)では北西風が主体の海に吹き出す風向であったが、21時からは風向に東成分が入り、内陸に向かう風が現れはじめた。また、日没に伴う接地逆転層の形成により、地上と上空では風速分布の様子はかなり異なる。

り、地上付近では内陸寄りの非常に弱い風が支配的であり、地域によって風向の違いが大きかった。一方、上空では、夜間は一定して北寄りの風が支配的であった。このような風系から、県公害センターで検出された¹³⁷Csは地上風により、また、大洗付近の¹³⁷Csは上層の風によりもたらされていることが推察できる。大気の流れについては、晴天による放射冷却で非常に強い安定状態であったと推定される。

狭域の大気拡散計算では、主排気筒放出と建屋からの放出を仮定した。主排気筒放出の場合、主排気筒におけるスタックモニタのカウント数の時間変動データより、放出は1時間と仮定した。放射性雲は全体としては大洗方面に向かうが、地上付近に拡散した部分が水戸方面に拡散する様子が見られる。地上放出に関しては、放出の時間変化が全く不明であるため、30、60、120分間に放出される3ケースについて計算を行った。分布は、主排気筒放出の場合と似ているが、放出点付近で異なるほか、水戸方面へ流される傾向が強く見られた。

また、気象研(つくば市)での測定との比較のため、広域計算も行った。予測濃度分布によれば、低濃度ではあるが分布の端につくばが含まれており、気象研で測定された¹³⁷Csが事故起因である可能性は高い。広域計算については、米国の大気放出予測システムARAC⁽⁷⁾と共同で解析を行い、ほぼ同様の予測濃度分布になることを確認した。

以上のシミュレーション結果では、予測濃度分布範囲が、測定により¹³⁷Csが検出された原研大洗、動燃大洗、県公害センター、気象研を含み、かつ過去の実績から信頼性が高いと考えられる米国のARACとも整合性のある結果となっていることから、計算値を放出量推定に用いることに問題はないと判断できる。第1図には、原研大洗、県公害センター、気象研における予測1時間平均濃度の時間変化(大洗、水戸は狭域計算、つくばは広域計算による)を示す。これによれば、原研大洗では上層風で流された¹³⁷Csが21時から22時にかけて検出された後、一たん水戸方面に拡散した¹³⁷Csが翌朝3時から6時にかけて西よりの風により大洗に達し、検出されている。県公害センターでは、11日23時から翌朝2時まで、気象研では明け方に到達し8時頃まで存在する。これらは、各地点でのサンプリング期間内におさまっており、また、3月12日10時までの時間積分濃度を比較に用いることの合理性を示している。

3. 放出量の推定

(1) 主排気筒放出の場合

第1表に各地点でのサンプリング値と単位放出を仮定した予測値およびその比率を示す。表によれば、推定放出量(サンプリング値/予測値)は、 $9 \times 10^8 \sim 2 \times 10^9$ Bqの幅にある。これは、報道された排気筒からの¹³⁷Csの放出量⁽¹⁾⁽⁸⁾を約10倍上回る。この理由としては、爆発によりスタックモニタが正常に作動せず、モニタ値以上の放出があった可能性と、爆発による建物本体からの放出の可能性が考えられる。前者の場合、主排気筒放出が $9 \times 10^8 \sim 2 \times 10^9$ Bqで

第1図 地上からの単位放出を仮定した1時間平均予測濃度の、大気塵サンプリング地点における時間変化

第1表 サンプリング濃度(測定値)と、主排気筒からの単位放出(1 Bq)を仮定した予測濃度(予測値)の比較

地点	測定値 (Bq/m³)	予測値 (Bq/m³)	推定放出量(Bq) (測定値/予測値)
原研大洗	6.0×10^{-4}	2.8×10^{-13}	2.1×10^9
動燃大洗	4.0×10^{-4}	2.8×10^{-13}	1.4×10^9
県公害センター	4.1×10^{-5}	5.0×10^{-14}	8.2×10^8

あったと推定できる。

以下では、後者の場合における放出量推定を行う。

(2) 地上放出の場合

第2表に各地点でのサンプリング値と単位放出を仮定した予測値およびその比率を示す。表中の括弧内が推定放出量を示す。サンプリング値には主排気筒放出分が含まれるが、前述のように、寄与は小さいため無視した。狭域計算において各地点から推定した放出量は、30、60分放出ではバラツキが小さいが、120分放出では1オーダーの開きが現れる。また、30分放出では水戸の県公害センターの推定値が大洗での推定値よりも大きいのにに対し、60分放出ではその傾向が逆になる。これらの点から、主な地上放出は30～60分以内に終了したものと推定できる。放出量については、表に示すように、 $4 \times 10^8 \sim 2 \times 10^9$ Bqの幅があるが、一般に、このような推定法は濃度値が大きい地点での推定

第2表 サンプル濃度(測定値)と、地上からの単位放出(1 Bq)を仮定した予測濃度(予測値)の比較

地 点	測定値 (Bq/m ³)	予測値 (Bq/m ³)				
		狭域予測			広域予測 (60分放出)	
		30分放出	60分放出	120分放出	本研究	ARAC
原研大洗	6.0×10^{-4}	6.0×10^{-13} (1.0×10^9)	3.0×10^{-13} (2.0×10^9)	1.2×10^{-13} (5.0×10^9)	2.5×10^{-13} (2.4×10^9)	3.0×10^{-13} (2.0×10^9)
動燃大洗	4.0×10^{-4}	6.0×10^{-13} (6.7×10^9)	3.0×10^{-13} (1.3×10^9)	1.2×10^{-13} (3.3×10^9)	2.5×10^{-13} (1.6×10^9)	3.0×10^{-13} (1.3×10^9)
県公害センター	4.1×10^{-5}	3.4×10^{-14} (1.2×10^9)	1.1×10^{-13} (3.7×10^9)	8.3×10^{-14} (4.9×10^9)	1.8×10^{-13} (2.3×10^9)	1.1×10^{-11} (3.7×10^9)
気象研	8.5×10^{-5}	—	—	—	5.8×10^{-14} (1.5×10^9)	8.3×10^{-13} (1.0×10^{10})

注：()内の数値は(測定値/予測値)で、推定放出量(Bq)に相当する。

の信頼性が高いので、大洗のデータに着目して $1 \sim 2 \times 10^9$ Bq程度の放出量であったと推定する。

本研究およびARACによる広域計算からの放出量推定値も、上記の推定放出量と矛盾のない値を示している。ARACで、気象研からの推定値が 10^{10} Bqになっているが、分布の端であることや低濃度であることを考えれば、本推定法の不確実性の範囲内であり、狭域計算からの放出量推定結果を覆すものではない。

(3) 推定値の不確実性の検討

推定値の不確実性に係わる主な要因は、本研究の大気拡散モデルの精度と、放出量推定のために仮定した放出量以外のソースパラメータの不確実さが考えられる。

濃度分布予測に用いたモデルの精度については、東海村における拡散実験によるモデル検証の経験⁽⁹⁾からファクター2～5程度と考えられる。

放出量推定のために仮定した線源形状や沈着速度、放出継続時間の不確実さに伴う誤差については、各パラメータを適当に変動させ、感度解析により検討した。結果を第3表に示す。第3表(a)は、放出源形状を、点源、200×200×50 mの立方体(かなり大きな線源の仮定)とした場合の大洗における推定放出率の比較であり、前述のように、大洗で評価するかぎり放出点での形状の不確実さの影響は小さい。放出継続時間については、放出継続時間を30～60分と推定すれば、第2表に示すように、放出継続時間の不確実さはファクター2以内である。第3表(b)は、沈着速度を1/10または10倍とした時の推定放出率の変化を示したものであり、0.1 cm/s以下の場合推定値への影響は少ないが、沈着速度が1.0 cm/sを超えるような大粒径の粒子の場合、5倍近い推定値となる。

これらの感度解析から、上記推定放出量の不確実性には、沈着速度の不確実さと濃度分布の精度が大きく係わっており、推定値には全体でファクター10程度の不確実性が含まれると考えられる。

4. まとめ

動燃アスファルト固化処理施設の爆発による¹³⁷Csの環境中への放出量を推定し現段階で以下の結論を得た。

- (1) 環境中測定濃度を説明するには、スタックモニタから推定した放出量の約10倍の放出が必要である。この

第3表 放出量推定に係わる計算パラメータの感度解析

(a) 放出源形状による推定放出量の変化

点 源	水平 200 m 四方, 高さ 50 m の直方体
原研大洗	2.0×10^9 Bq 3.0×10^9 Bq

放出継続時間：60分、沈着速度：0.1 cm/s

(b) 沈着速度による推定放出量の変化

	0.01 cm/s (1 μm 以下)	0.1 cm/s (1～3 μm)	1.0 cm/s (5 μm 程度)
原研大洗	1.5×10^9 Bq	2.0×10^9 Bq	9.0×10^9 Bq

線源形状：点源、放出継続時間：60分

原因を、主排気筒からもっと大量に放出されたにもかかわらず、爆発によるモニタの故障で正確に測定されなかったためと仮定すれば、推定放出量は $8 \times 10^8 \sim 2 \times 10^9$ Bqと予想される。

- (2) 施設破損箇所からの地上放出であったと仮定すると、 $4 \times 10^8 \sim 2 \times 10^9$ Bq程度の放出量であったと推定でき(狭域30分および60分放出から推定)、主な放出は60分以内の短期であったと考えられる。

このような推定法では、濃度値が大きい地点(大洗)での推定の信頼性が高いという点を考慮すれば、推定放出量は $1 \sim 2 \times 10^9$ Bqであり、上記のようにファクター10程度の不確実さを含む。今後さらに新しい情報を得て、詳細解析を進める予定である。

今回の米国ARACによる支援は、シミュレーション計算の信頼性を確認する上で非常に有効であった。ARACのプログラムリーダーであるローレンスリバモア国立研究所のT. Sullivan博士に感謝します。

—参考文献—

- (1) いばらき新聞(1997年4月25日朝刊)、他。
- (2) 朝日新聞(1997年3月18日朝刊)、他。
- (3) 朝日新聞(1997年3月22日朝刊)、他。
- (4) 朝日新聞(1997年3月23日朝刊)、他。
- (5) Sehm, G. A. : *Atmos. Environ.*, 14, 983～1011 (1980)。
- (6) Chino, M., et al. : *JAERI-1334*, (1994)。
- (7) Sullivan, T. J., et al. : *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 74, 2343～2361 (1993)。
- (8) 毎日新聞(1977年3月16日朝刊)。
- (9) 茅野政道, 他 : 大気汚染, 20, 158～167 (1986)。