

講演予稿集

第56回

安全工学 研究発表会

日 に ち 2023年11月30日(木)・12月1日(金)

場 所 アクリエひめじ ハイブリッド開催
[姫路市文化コンベンションセンター] 2F、4F
〒670-0836 兵庫県姫路市神屋町143-2



特定非営利活動法人
主 催 JISSE
安全工学会

Session XI (第1会場) 10:40 ~ 12:00

- 34 溶剤除去性染色浸透探傷試験の除去工程における静電気帯電による着火危険性の評価 遠藤 雄大 (労働安全衛生総合研究所) …93
35 蒸気雲に対する風向と風速の変化の影響 大塚 輝人 (労働安全衛生総合研究所) …97
36 液化アンモニアの水への溶解・気液平衡を考慮した蒸発モデルの検討 木村 新太 (海上技術安全研究所) …99
37 ニューラルネットワークを用いた可燃性ガス・蒸気の爆発範囲の推算 安井 克簡 (三井化学株式会社) …103

Session XII (第1会場) 13:00 ~ 14:00

特別招待講演 II

- 38 石油コンビナートにおける安全への取り組み 林 秀樹 (姫路市消防局 予防課 危険物担当係長) …107

Session XIII (第1会場) 14:10 ~ 15:10

- 39 ドローン衝突時の電池の安全性評価に関する検討 斎藤 喜康 (産業技術総合研究所) …109
40 リチウムイオン電池の打撃や切断における発火に関する予備実験 八島 正明 (労働安全衛生総合研究所) …113
41 グレーバ炉による等温条件での自己発熱性試験とガス流速の影響評価 西脇 洋佑 (労働安全衛生総合研究所) …115

Session XIV (第1会場) 15:20 ~ 16:20

- 42 密封DSC法を用いたアジド化合物の安全性評価における酸素影響の定量的評価 折戸 裕哉 (第一三共株式会社) …117
43 過酸化クミルの発熱挙動における分解生成物の濃度変化に関する研究 岩田 雄策 (消防研究センター) …119
44 鉄粉の粒径が最小着火エネルギーに及ぼす影響 佐伯 琳々 (広島大学) …121

Session XV (第2会場) 9:10 ~ 10:30

- 45 外部電界により発生する模擬ブラン放電を用いた灯油ミスト着火実験 遠藤 雄大 (労働安全衛生総合研究所) …123
46 浅層モデルに基づく高密度ガス大気拡散予測モデルの改良とその評価 石川 真菜美 (横浜国立大学) …127
47 流動する水素 / 空気予混合気の消炎距離 山川 将葵 (公立諒訪東京理科大学) …129
48 プロパン / 空気予混合気の熱線着火臨界条件のパラメータ依存性 伊藤 有希人 (公立諒訪東京理科大学) …133

Session XVI (第2会場) 10:40 ~ 12:00

- 49 化学物質のリスク見積りに係るGHS分類と安衛則に規定する危険性との関係の明確化 角田 博代 (労働安全衛生総合研究所) …135
51 物質の性状や事象ごとの危険性のリスクアセスメントにおける爆発・発火特性の位置づけの整理
—可燃性物質を用いた開放系作業を対象として— 佐藤 嘉彦 (労働安全衛生総合研究所) …139
52 福島第一原子力発電所事故によって放出されたテルル 129m の崩壊に伴い生成される
ヨウ素 129 の環境への影響解析 佐藤 治夫 (岡山大学) …141

福島第一原子力発電所事故によって放出されたテルル ^{129}m の崩壊に伴い
生成されるヨウ素 129 の環境への影響解析

岡山大学

○佐藤治夫

Effect Analysis to the Environment of $I-129$ Generated due to the Decay of $\text{Te}-129\text{m}$ Discharged by the Fukushima Daiichi NPS Accident

Haruo Sato

Okayama University

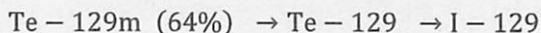
キーワード: 福島第一原子力発電所事故, テルル ^{129}m , ヨウ素 129 , 放射性崩壊, 環境動態

Keywords : Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident, $\text{Te}-129\text{m}$, $I-129$, Radioactive decay, Environmental dynamics

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災により東京電力福島第一原子力発電所事故(1F事故)が発生し、揮発性の放射性物質が環境中に放出され、福島県を中心に、周辺エリアを含めて広範囲の地域の土壤、森林、住宅地などを汚染した。外部に放出された放射性核種の放射能は、環境省によれば、 $I-131$ で 160PBq ($1\text{PBq}=1\times 10^{15}\text{Bq}$)、 $Cs-134$ で 18PBq 、 $Cs-137$ で 15PBq 、 $Sr-90$ で 0.14PBq と報告されている¹⁾。Chinoらは、2011年4月5日までに放出された $I-131$ と $Cs-137$ は、それぞれ約 150PBq と 13PBq であると推定している²⁾。事故直後から、空間線量率のモニタリングのほか、土壤や植物などの放射性核種の分析が広範囲に実施され、 $I-131$ 、 $Cs-134$ 、 $Cs-137$ 、 $Te-129\text{m}$ 、 $Ag-110\text{m}$ などの揮発性の放射性核種が1Fから60km以上離れたエリアにおいても検出された³⁾。 $I-131$ は1週間程度の短半減期(半減期 8.021d)⁴⁾であることから、数ヶ月後にはほぼ消滅した。 $I-131$ の崩壊後、放射性セシウム($Cs-134$ と $Cs-137$)が空間線量率を支配していたが、事故発生から約12年が経過した現在では、 $Cs-134$ (半減期 2.065y)⁴⁾は当初の放射能の約1.5%、空間線量率は約4%にまで減少している。

一方、事故当初、 $Te-129\text{m}$ (半減期 33.6d)⁴⁾は、土壤中で両放射性セシウムと同程度のレベルで検出されている。 $Te-129\text{m}$ の崩壊により、半減期の極めて長い $I-129$ (半減期 $1.57\times 10^7\text{y}$)⁴⁾が生成される。ヨウ素は人体に吸収されると甲状腺に集まりやすく、甲状腺癌の原因となる可能性があることから、 $Te-129\text{m}$ の崩壊により環境中の $I-129$ の蓄積が懸念される。 $Te-129\text{m}$ は、主に次の2つの崩壊経路によって $I-129$ が生成される。



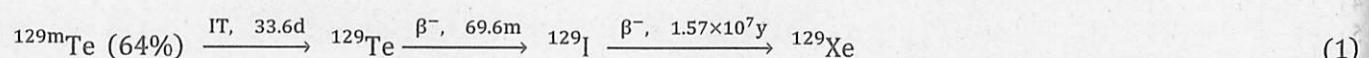
最初の崩壊系列について、 $Te-129\text{m}$ と $I-129$ の半減期は、それぞれ33.6dと69.6mであることから、両核種間で放射平衡が成立するが、 $Te-129$ と $I-129$ の間には放射平衡が成立しない。このことは、2つ目の崩壊系列においても同じことが成立する。よって、 $I-129$ の存在量は $Te-129\text{m}$ の崩壊に伴い増加するが、その存在量には理論的に最大値も存在する。

本研究では、土壤中の $Te-129\text{m}$ の調査データ(沈着量)に基づいて、1F事故に伴って放出された $Te-129\text{m}$ の崩壊により発生する環境中の $I-129$ の存在量を推定すると共に、環境中のバックグラウンドとして存在する $I-129$ の放射能濃度と比較検討した。

2. フィールド調査データと放射性崩壊の解析

2.1 $Te-129\text{m}$ の崩壊に伴って発生する $I-129$ の存在量の解析

$Te-129\text{m}$ は、次の2つの異なる崩壊経路により $I-129$ へ転移する。





(1)と(2)の崩壊について、それぞれ以下の関係を考える。



ここで、 N_1 は、Te-129mの原子核数、 N_2 、 N_3 、 N_4 は、それぞれ(1)の崩壊におけるTe-129、I-129、Xe-129の原子核数、 N'_3 と N'_4 は、それぞれ(2)の崩壊におけるI-129とXe-129の原子核数、 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 は、それぞれTe-129m、Te-129、I-129の崩壊定数である。

これらの崩壊について放射性崩壊の式を適用し、それらの連立微分方程式を解くことで、最終的には次式から Te-129m、Te-129、I-129の放射能を計算した。

$$A_1 = \lambda_1 N_0 e^{-\lambda_1 t} \quad (5)$$

$$A_2 = \lambda_2 X_2 = \frac{aN_0 \lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (6)$$

$$A_3 = \lambda_3 N_3 = aN_0 \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \left\{ \frac{e^{-\lambda_1 t}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)} + \frac{e^{-\lambda_2 t}}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)} + \frac{e^{-\lambda_3 t}}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)} \right\} \quad (7)$$

$$A'_3 = \lambda_3 N'_3 = \frac{bN_0 \lambda_1 \lambda_3}{\lambda_3 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_3 t}) \quad (8)$$

ここで、 A_1 、 A_2 、 A_3 は、それぞれ(1)の崩壊におけるTe-129m、Te-129、I-129の放射能濃度、 A'_3 は、(2)の崩壊におけるI-129の放射能濃度、 N_0 は、Te-129mの初期の原子核数、 a と b は、それぞれ(1)と(2)の崩壊における崩壊の割合(ここで、 $a=64\%$ 、 $b=36\%$)、 t は、時間である。

よって、I-129の放射能濃度は、(7)と(8)式の合計から計算することができる。

2.2 解析条件とインプットデータ

解析は、福島県とその周辺地域における約2,200地点で得られた土壌の分析データ(2011年6月14日時点に換算)³⁾の内、3調査地点でのTe-129mのデータ(高濃度汚染エリア(高線量率のエリア)、中濃度汚染エリア(中程度の線量率のエリア)、低濃度汚染エリア(低線量率のエリア))に基づいて実施した。表1に3調査地点でのTe-129mのインプットデータを示す。フィールド調査で得られた土壌中のTe-129mのデータ(Bq/m²)について、半減期に基づいて2011年3月15日時点に換算し、これを起点(t=0)に計算した。2011年3月15日は、1Fから多くの放射性核種が放出され、福島市では空間線量率の最大値が観測された日である。

表1 3調査地点でのTe-129mのインプットデータ

調査地点	WGS84 座標軸系	沈着量 (2011年6/14日) (Bq/m ²)	沈着量 (2011年3/15日 への換算)(Bq/m ²)	備考
大熊町	N37, 25, 30.9 E140, 00, 18.7	2.70×10^6	1.76×10^7	高濃度汚染エリア (1Fから約2.7km地点)
楓葉町	N37, 15, 29.4 E140, 58, 09.0	4.70×10^4	3.07×10^5	中程度汚染エリア (1Fから約19km地点)
福島市	N37, 46, 21.0 E140, 30, 54.0	6.40×10^4	4.18×10^5	低濃度汚染エリア (1Fから約60km地点)

3. 結果及び考察

3.1 Te-129m, Te-129, I-129の放射能濃度の経時変化

図1~3にそれぞれ調査地点1(大熊町)、調査地点2(楓葉町)、調査地点3(福島市)におけるTe-129m、Te-129、I-129の放射能濃度(Bq/m²)の経時変化の計算結果を示す。また、図4~6にそれぞれ調査地点1~3におけるI-129の放射能濃度の経時変化のみを拡大した図を示す。3地点におけるTe-129m、Te-129、I-129の放射能濃度の経

時変化について、Te-129m と Te-129 の放射能濃度が時間経過に伴い急激に減少する一方、I-129 の放射能濃度は時間経過に伴い増加し、一定の値に漸近した。娘核の I-129 の方が親核よりも半減期が長いことから、Te-129 と I-129、Te-129m と I-129 の間には放射平衡が成立しないが、I-129 の放射能濃度は理論的には最大値を取る。解析の結果、I-129 の放射能濃度は、約 1,000d 後まで増加した後、緩やかに減少に転じた。よって、I-129 の放射能濃度は約 1,000d 後で最大値となる。

I-129 の放射能濃度の最大値は、初期の Te-129m の沈着量に依存し、Te-129m の沈着量が最も高かった大熊町（2011 年 6 月 14 日換算で $2.7\text{MBq}/\text{m}^2$ ）で $1.03 \times 10^{-1}\text{Bq}/\text{m}^2$ であった。表 2 に 3 調査地点での I-129 の放射能濃度の最大値の計算結果を示す。Te-129m の初期沈着量とその崩壊に伴って発生する I-129 の放射能濃度の最大値を

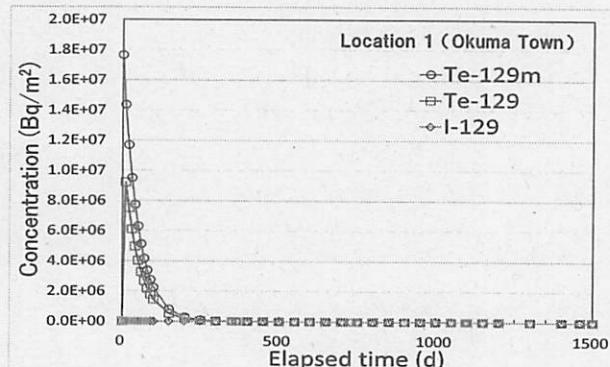


図1 調査地点1での Te-129m, Te-129, I-129 の放射能濃度の経時変化の計算結果(大熊町:1F から約 2.7km)

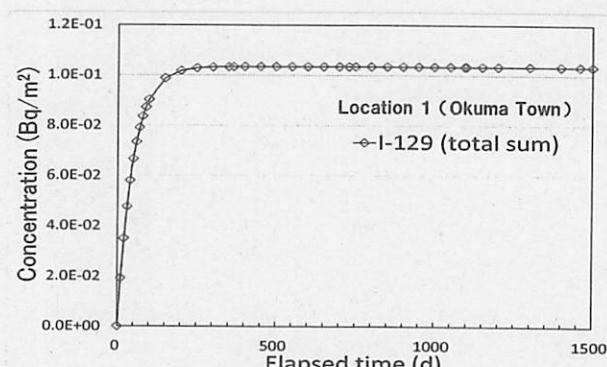


図4 調査地点1での I-129 の放射能濃度の経時変化の拡大図(大熊町:1F から約 2.7km)

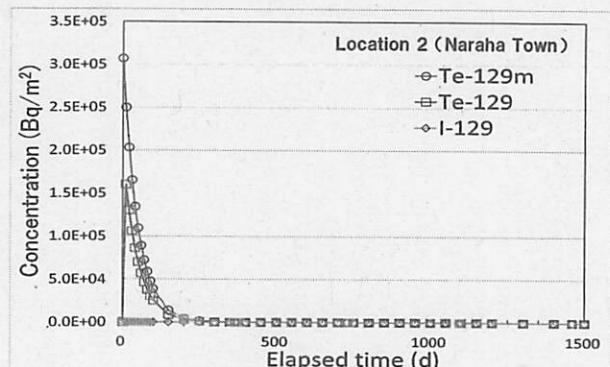


図2 調査地点2での Te-129m, Te-129, I-129 の放射能濃度の経時変化の計算結果(楓葉町:1F から約 19km)

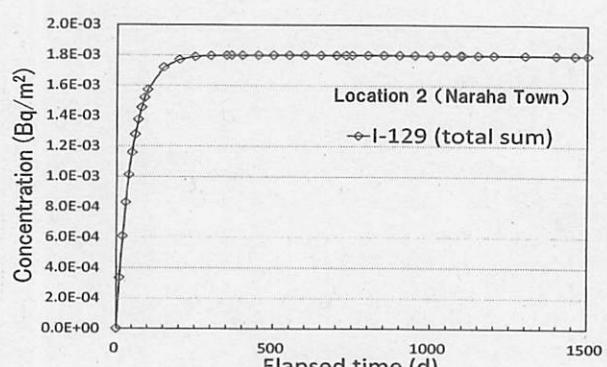


図5 調査地点2での I-129 の放射能濃度の経時変化の拡大図(楓葉町:1F から約 19km)

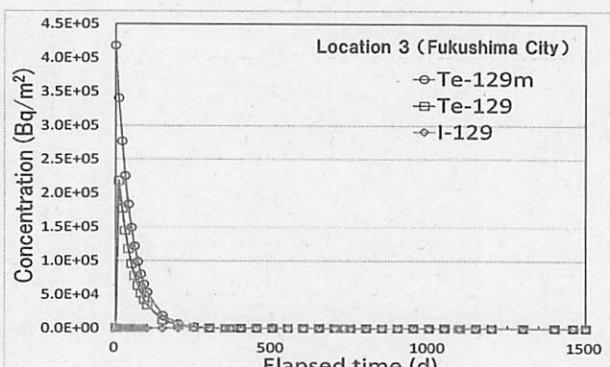


図3 調査地点3での Te-129m, Te-129, I-129 の放射能濃度の経時変化の計算結果(福島市:1F から約 60km)

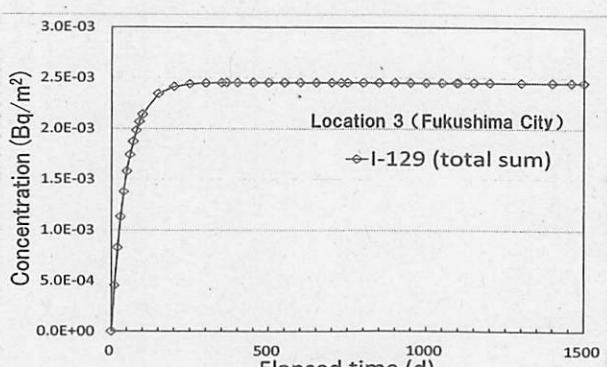


図6 調査地点3での I-129 の放射能濃度の経時変化の拡大図(福島市:1F から約 60km)

比較した結果、I-129 の最大値は、初期の Te-129m の沈着量の約 2 億分の 1 であることが分かった。よって、初期の Te-129m の沈着量が分かれれば、I-129 の最大放射能濃度を簡便に推定することが可能となる。

3.2 環境中の I-129 の存在量との比較

環境中に存在する I-129 の放射能濃度（バックグラウンド）⁵⁾と Te-129m の崩壊に伴い生成した環境中の I-129 の放射能濃度の計算結果を比較した。表 3 に我が国における環境（土壤）中の I-129 の放射能濃度（バックグラウンド）を示す。表 3 に示すように、I-129 のバックグラウンドは、 $5.75 \times 10^{-3} \sim 2.96 \times 10^{-1}$ Bq/m² の範囲であり、Te-129m の崩壊に伴い生成した I-129 の最大濃度（ 1.03×10^{-1} Bq/m²）と同程度であることが分かる。Honda は、1F 事故による土壤中の I-129 の降下量は、11 地点で実施した深さ方向の調査結果から $1.02 \times 10^{-2} \sim 7.20 \times 10^{-1}$ Bq/m² であると報告しており⁶⁾、環境中の濃度と同程度であることを報告している。これらのことと総合すると、1F 事故により放出された Te-129m の崩壊に伴い生成した I-129 の影響は無視できる程度と考えられる。

4. 結論

本研究では、福島県とその周辺地域において約 2,200 地点で得られた土壤中の Te-129m のフィールド調査データに基づいて、1F 事故に伴い放出された Te-129m の崩壊により生成される環境中の I-129 の存在量を推定すると共に、環境中に存在する I-129 の存在量（バックグラウンド）と比較検討した。

I-129 の放射能濃度の最大値は、Te-129m の沈着量が最も高い大熊町の調査地点（2011 年 6 月 14 日換算で $2.7 \text{MBq}/\text{m}^2$ ）でも、約 1,000d 後で 1.03×10^{-1} Bq/m² であり、その時の I-129 の放射能濃度の最大値は、初期の Te-129m の放射能濃度の約 2 億分の 1 であることが分かった。これは、我が国環境中の I-129 の放射能濃度（ $5.75 \times 10^{-3} \sim 2.96 \times 10^{-1}$ Bq/m²）と同程度あり、よって、1F 事故により放出された Te-129m の崩壊に伴い生成する I-129 の影響は無視できる程度と言える。

参考文献

- [1] 環境省：<https://www.env.go.jp/chemi/rhm/h29kisoshiryo/h29kiso-02-02-05.html>、アクセス日：12/1 (2018).
- [2] M. Chino, H. Nakayama, H. Nagai, H. Terada, G. Katata, and H. Yamazawa : J. Nucl. Sci. Technol., Vol.48, No.7, pp.1129-1134 (2011).
- [3] Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (METI) : <https://emdb.jaea.go.jp/en/portals/1020101001/>、アクセス日：12/7 (2018).
- [4] 日本アイソトープ協会：アイソトープ手帳、改定 9 版、丸善(2000).
- [5] 武石稔、並木篤、片桐裕美、石田順一郎、野村保：PNC ZN843 85-39 (1985).
- [6] M. Honda : Doctoral Thesis, University of Tsukuba (2018).
- [7] Y. Miyake, H. Matsuzaki, T. Fujiwara, T. Saito, T. Yamagata, M. Honda, and Y. Muramatsu : Geochemica Journal, Vol.46, pp.327-333 (2012).

表2 3調査地点での I-129 の放射能濃度の最大値の計算結果

調査地点	WGS84 座標軸系	I-129の放射能濃度 の最大値(Bq/m ²)
大熊町	N37, 25, 30.9 E140, 00, 18.7	1.03×10^{-1}
楓葉町	N37, 15, 29.4 E140, 58, 09.0	1.80×10^{-3}
福島市	N37, 46, 21.0 E140, 30, 54.0	2.45×10^{-3}

表3 我が国の環境中の I-129 の放射能濃度

採取場所	I-129 (Bq/m ²)
北海道新得	1.46×10^{-1}
秋田県西木	4.81×10^{-2}
茨城県水戸	1.24×10^{-1}
茨城県岩間	2.96×10^{-1}
群馬県伊勢崎	1.78×10^{-2}
石川県金沢	5.90×10^{-2}
福井県冠山	1.48×10^{-1}
福井県奥越高原	8.50×10^{-2}
大阪府東大阪	7.05×10^{-3}
岡山県人形峠	1.56×10^{-2}
愛媛県宇和島	5.75×10^{-3}
長崎県西山	1.61×10^{-2}
熊本県城南	1.85×10^{-2}