



## 福島第一原子力発電所内の土壌への 放射性核種の移行

Transfer of Radionuclides to Soil at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station

駒 義和

Yoshikazu KOMA

福島研究開発部門

福島廃止措置技術開発センター

Fukushima Decommissioning Technology Center  
Sector of Fukushima Research and Development

September 2014

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

福島第一原子力発電所内の土壌への放射性核種の移行

日本原子力研究開発機構  
福島研究開発部門 福島廃止措置技術開発センター  
駒 義和

(2014年7月10日受理)

東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故において放射性核種が環境に放出された。東京電力は発電所内の原子炉周辺の土壌を採取し、分析した結果を公表している。この分析値と原子炉内に存在した燃料の組成を用いて、Cs137を基準とした輸送比を計算した。

Transfer of Radionuclides to Soil at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station

Yoshikazu KOMA

Fukushima Decommissioning Technology Center, Sector of Fukushima Research and Development

Japan Atomic Energy Agency

Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received July 10, 2014)

Due to the accident of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Tokyo Electric Power Company, Incorporated (TEPCO), radionuclides were released to the environment. TEPCO sampled soil around the reactors and analyzed. Transport ratios normalized to Cs137 were calculated using the measurement of soil and calculated fuel composition in the reactors.

Keywords: Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Accident, Radionuclides, Release, Soil, Transfer

目次

1. はじめに.....	1
2. 輸送比.....	1
3. 輸送比の計算.....	2
3.1 計算の方法.....	2
3.2 計算した輸送比.....	2
3.2.1 各定点にて定量された核種の輸送比.....	2
3.2.2 ウラン同位体の輸送比.....	15
3.2.3 元素の輸送比.....	15
4. おわりに.....	19
参考文献.....	19

Contents

1. Introduction .....	1
2. Transport ratio .....	1
3. Calculation of transport ratio .....	2
3.1 Calculation .....	2
3.2 Calculated transport ratio .....	2
3.2.1 Transport ratio for nuclides detected at fixed points .....	2
3.2.2 Transport ratio for uranium isotopes .....	15
3.2.3 Transport ratio for chemical elements .....	15
4. Conclusion .....	19
References .....	19

## 表リスト

表 1	定点 1 試料に観測された核種の輸送比 .....	3
表 2	定点 2 試料に観測された核種の輸送比 .....	6
表 3	定点 3 試料に観測された核種の輸送比 .....	9
表 4	3 月 28 日に採取された試料に観測されたウラン核種の濃度比と輸送比 .....	15
表 5	検出された核種と拡散した元素 .....	16
表 6	$^{137}\text{Cs}$ に対する輸送比 .....	17

## 図リスト

図 1	定点 1 試料に観測された $\gamma$ 線放出核種及び Sr 核種の輸送比 .....	12
図 2	定点 1 試料に観測された $\alpha$ 線放出核種の輸送比 .....	12
図 3	定点 2 試料に観測された $\gamma$ 線放出核種及び Sr 核種の輸送比 .....	13
図 4	定点 2 試料に観測された $\alpha$ 線放出核種の輸送比 .....	13
図 5	定点 3 試料に観測された $\gamma$ 線放出核種及び Sr 核種の輸送比 .....	14
図 6	定点 3 試料に観測された $\alpha$ 線放出核種の輸送比 .....	14
図 7	$^{137}\text{Cs}$ に対する輸送比 .....	18

## 1. はじめに

東京電力株式会社福島第一原子力発電所の 1、3 及び 4 号機において水素爆発事故が発生し、放射性核種が環境へ放出された。東京電力株式会社（以下、東京電力）は、発電所敷地内の土壌を採取し、その分析値を公表している。2011 年の末まで敷地の 3 箇所を定めて土壌の試料を得、放射性核種の濃度が測定され、得られた順に公開された<sup>1)~46)</sup>。このデータは、爆発事故に伴う核種の移行挙動の解析や、汚染土壌の処理や処分の検討に有用と考えられる。分析値は、採取した試料の不均一さなどによると思われるばらつきが見られ、放射性核種の濃度からその移行ふるまいを議論することは難しい。そこで、放射性核種の濃度に関し、<sup>137</sup>Cs に対する相対的な値を、爆発が発生した時点の燃料組成を基準として計算した。本報告ではこの値を輸送比と呼び、東京電力が公開した分析値のそれぞれについて求めた値をまとめた。

## 2. 輸送比

損傷した核燃料の成分が原子炉建家から放出された後、土壌への移行は、化学的、物理的な過程を経る。土壌に含まれる放射性核種の濃度から、中間の過程を推定することは困難であり、ここでは、核燃料から土壌へと移行した割合を示す指標を考える。核燃料に含まれる標準とする核種の比として定義し、式 (1) の様に表す。本報告ではこれを輸送比  $T$  と呼ぶ。

$$T_X = \frac{N_{X,soil}/N_{X,fuel}}{N_{std,soil}/N_{std,fuel}} \quad (1)$$

ここで、 $N$  は原子数、添字の  $X$  は対象とする核種、 $std$  は標準の核種、 $soil$  は土壌、 $fuel$  は核燃料をそれぞれ示す。 $T$  は原子数の比であるから、放射性核種の減衰を考慮し、ある時点を経験した時点として求める。輸送比は、西原らが求めた炉心から滞留水への放出率と同様である<sup>47)</sup>。

放射性核種の量は、分析により比放射能 (Bq/kg 乾土) として求められた。また、核燃料中の量は計算による値を用いることとなる。これら、利用できる量を考慮すると、輸送比は式 (2) により求めると良い。

$$T_X = \frac{c_{X,soil}/A_{X,fuel}}{c_{std,soil}/A_{std,fuel}} \quad (2)$$

ここで、 $c_{soil}$  は土壌の比放射能 (Bq/kg)、 $A_{fuel}$  は燃料の放射能 (Bq) である。

### 3. 輸送比の計算

#### 3.1 計算の方法

東京電力は 2011 年に 3 箇所の定点を定めて土壌の試料を採取、分析した。東京電力が公開したデータを対象として輸送比を求めた。ここで、定点は下記の通りであり<sup>1)</sup>、括弧内の距離は 1 及び 2 号機スタックからの距離を示す。

定点 1     グラウンド（西北西約 500 m）

定点 2     野鳥の森（西約 500 m）

定点 3     管理型産廃処分場近傍（南南西約 500 m）

46 にわたる報告には<sup>1)-46)</sup>、 $^7\text{Be}$ 、 $^{89,90}\text{Sr}$ 、 $^{95}\text{Nb}$ 、 $^{99}\text{Mo}$ 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 $^{106}\text{Ru}$ 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 、 $^{129\text{m},132}\text{Te}$ 、 $^{131},^{132}\text{I}$ 、 $^{134},^{136},^{137}\text{Cs}$ 、 $^{140}\text{Ba}$ 、 $^{140}\text{La}$ 、 $^{234,235,238}\text{U}$ 、 $^{238,239,240}\text{Pu}$ 、 $^{241}\text{Am}$ 、 $^{242,243,244}\text{Cm}$  の濃度が示されている。

輸送比の計算に当たって基準とする放射性核種には、いずれの試料にも検出されており、半減期が長い $^{137}\text{Cs}$ を選んだ。

核燃料の組成は、西原らの計算値によった<sup>48)</sup>。ただし、 $^{129\text{m}}\text{Te}$ については西原らによって更新された値を用いた<sup>a</sup>。1 から 3 号機の炉心燃料の値を合計し、半減期の影響を除くため減衰を補正した。水素爆発は複数回発生しており、半減期を補正する基準の日時を一意には決めにくい。ここでは、3 月 12 日に最初の水素爆発が 1 号機で発生したことから、同日を基準として検討した。

#### 3.2 計算した輸送比

##### 3.2.1 各定点にて定量された核種の輸送比

計算した値を定点ごとに表 1 から表 3 に示す。試料を採取した日はいずれも 2011 年の日付である。定点ごとに値を図 1 から図 6 にプロットした。

<sup>a</sup> 1 から 3 号機のそれぞれについて  $9.46 \times 10^7$ 、 $1.50 \times 10^8$ 、 $1.61 \times 10^8$  GBq/炉心（2011 年 3 月 11 日時点）。



表 1 定点 1 試料に観測された核種の輸送比 (1/4)

採取日	<sup>95</sup> Nb	<sup>99</sup> Mo	<sup>99m</sup> Tc	<sup>106</sup> Ru	<sup>110m</sup> Ag	<sup>125</sup> Sb	<sup>129m</sup> Te	<sup>131</sup> I	<sup>132</sup> Te	<sup>132</sup> I	<sup>134</sup> Cs	<sup>136</sup> Cs
3月21日	4.3×10 <sup>-4</sup>	0.037	0.042	0.049	0.14		1.5	4.1	1.0		0.98	1.1
3月25日	4.3×10 <sup>-4</sup>		0.071		0.24		1.4	4.1	0.95		1.0	0.81
3月28日							4.0	3.3	1.5	1.1	1.0	0.48
3月31日				0.014	0.29		1.7	3.0	1.2		1.0	0.82
4月4日							2.9	1.7	1.1	0.8	0.99	0.57
4月7日	3.1×10 <sup>-4</sup>				0.43		2.7	2.3	1.7		1.0	0.85
4月11日							1.5	3.2	0.53	0.40	1.0	0.63
4月14日	1.9×10 <sup>-4</sup>				0.26		1.5	3.2	0.98		0.98	0.82
4月18日												
4月21日	1.8×10 <sup>-4</sup>				0.24		2.0	3.0			0.99	0.68
4月25日							1.2	2.3			1.0	0.56
4月28日	1.7×10 <sup>-4</sup>				0.24		1.4	3.1			1.0	0.77
5月2日								3.6			1.1	0.64
5月5日	2.8×10 <sup>-4</sup>				0.27		1.5	3.6			0.98	0.74
5月9日							1.4	3.1			1.0	0.72
5月12日	2.7×10 <sup>-4</sup>						1.5	3.9			0.99	0.82
5月16日							1.9	1.6			1.0	0.44
5月19日	2.8×10 <sup>-4</sup>						1.7	4.4			0.97	0.81
5月23日							1.4	3.3			1.0	0.64
5月26日	1.1×10 <sup>-4</sup>				0.25		1.9	3.7			1.0	0.85
5月30日							0.97	3.6			1.0	0.55
6月2日	1.5×10 <sup>-4</sup>				0.25		1.1	3.4			0.99	0.91
6月6日							1.9	2.9			1.0	0.90
6月9日	1.4×10 <sup>-4</sup>				0.22		0.99	4.0			0.98	0.88
6月13日							2.0	2.5			1.0	
6月16日	1.8×10 <sup>-4</sup>						2.0	3.0			0.98	1.2
6月20日							1.8	3.8			1.0	1.3
6月23日	2.5×10 <sup>-4</sup>						2.5	2.3			0.98	1.0
6月27日											1.0	
7月4日											1.0	
7月11日					0.26						1.0	
7月18日					0.28	0.32	16				1.0	
7月25日					0.17		3.9				1.0	
8月1日					6.9						0.93	
8月8日											0.95	
8月15日											1.0	
8月22日											1.0	
8月29日											1.0	
9月5日											1.0	
9月12日											1.0	
9月19日											1.0	
9月26日											1.0	

表 1 定点 1 試料に観測された核種の輸送比 (2/4)

採取日	<sup>95</sup> Nb	<sup>99</sup> Mo	<sup>99m</sup> Tc	<sup>106</sup> Ru	<sup>110m</sup> Ag	<sup>125</sup> Sb	<sup>129m</sup> Te	<sup>131</sup> I	<sup>132</sup> Te	<sup>132</sup> I	<sup>134</sup> Cs	<sup>136</sup> Cs
10月3日											0.98	
10月10日					0.30						1.1	
10月17日											1.0	
10月24日											1.0	
10月31日					0.32						1.0	
11月7日											1.0	
11月14日											1.1	
11月21日											1.1	
11月28日											1.0	
12月5日											1.1	

表 1 定点 1 試料に観測された核種の輸送比 (3/4)

採取日	<sup>140</sup> Ba	<sup>140</sup> La	<sup>89</sup> Sr	<sup>90</sup> Sr	<sup>238</sup> Pu	<sup>239, 240</sup> Pu	<sup>241</sup> Am	<sup>242</sup> Cm	<sup>243, 244</sup> Cm
3月21日	0.0039	0.0086			$7.5 \times 10^{-5}$	$9.3 \times 10^{-5}$			
3月25日	0.0039	0.0085			$1.4 \times 10^{-5}$	$2.1 \times 10^{-5}$			
3月28日					$2.4 \times 10^{-5}$	$2.8 \times 10^{-5}$	$2.8 \times 10^{-5}$	$2.1 \times 10^{-5}$	$3.1 \times 10^{-5}$
3月31日	0.0036	0.0040			$8.3 \times 10^{-5}$				
4月4日					$2.6 \times 10^{-5}$	$1.9 \times 10^{-5}$	$3.0 \times 10^{-5}$	$1.7 \times 10^{-5}$	$4.0 \times 10^{-5}$
4月7日	0.0023				$1.8 \times 10^{-5}$				
4月11日					$4.0 \times 10^{-5}$	$5.0 \times 10^{-5}$		$2.8 \times 10^{-5}$	$4.3 \times 10^{-5}$
4月14日					$1.8 \times 10^{-5}$				
4月18日									
4月21日									
4月25日					$1.3 \times 10^{-5}$	$1.4 \times 10^{-5}$	$1.3 \times 10^{-5}$	$7.6 \times 10^{-6}$	$1.1 \times 10^{-5}$
4月28日					$1.5 \times 10^{-5}$				
5月2日					$1.4 \times 10^{-5}$	$2.3 \times 10^{-5}$		$1.2 \times 10^{-5}$	
5月5日					$3.4 \times 10^{-5}$	$3.2 \times 10^{-5}$			
5月9日			0.0015	0.0013	$1.0 \times 10^{-5}$	$9.6 \times 10^{-6}$	$1.2 \times 10^{-5}$	$8.2 \times 10^{-6}$	$1.3 \times 10^{-5}$
5月12日					$9.7 \times 10^{-6}$				
5月16日					$1.2 \times 10^{-5}$	$1.6 \times 10^{-5}$			
5月19日									
5月23日					$1.2 \times 10^{-5}$	$1.2 \times 10^{-5}$			
5月26日									
5月30日					$2.4 \times 10^{-5}$	$2.1 \times 10^{-5}$	$3.6 \times 10^{-5}$	$2.5 \times 10^{-5}$	$2.4 \times 10^{-5}$
6月2日									
6月6日					$1.7 \times 10^{-5}$	$1.7 \times 10^{-5}$	$2.8 \times 10^{-5}$	$1.3 \times 10^{-5}$	$1.9 \times 10^{-5}$
6月9日					$1.5 \times 10^{-5}$				
6月13日			0.0010	$8.5 \times 10^{-4}$	$1.2 \times 10^{-5}$	$1.7 \times 10^{-5}$		$1.0 \times 10^{-5}$	$1.2 \times 10^{-5}$
6月16日					$9.9 \times 10^{-6}$				
6月20日					$1.1 \times 10^{-5}$	$1.4 \times 10^{-5}$	$1.5 \times 10^{-5}$	$1.1 \times 10^{-5}$	$1.6 \times 10^{-5}$
6月23日					$2.7 \times 10^{-5}$				
6月27日					$8.4 \times 10^{-6}$	$1.1 \times 10^{-5}$			

表 1 定点 1 試料に観測された核種の輸送比 (4/4)

採取日	$^{140}\text{Ba}$	$^{140}\text{La}$	$^{89}\text{Sr}$	$^{90}\text{Sr}$	$^{238}\text{Pu}$	$^{239, 240}\text{Pu}$	$^{241}\text{Am}$	$^{242}\text{Cm}$	$^{243, 244}\text{Cm}$
7月4日					$1.8 \times 10^{-5}$	$1.8 \times 10^{-5}$			
7月11日			0.0011	0.0010	$1.7 \times 10^{-5}$	$1.8 \times 10^{-5}$			
7月18日					$6.3 \times 10^{-6}$	$7.6 \times 10^{-6}$			
7月25日					$8.1 \times 10^{-6}$	$1.2 \times 10^{-5}$			
8月1日					$1.4 \times 10^{-4}$	$1.3 \times 10^{-4}$			
8月8日					$1.2 \times 10^{-4}$	$1.6 \times 10^{-4}$			
8月15日			0.0012	0.0011	$1.1 \times 10^{-5}$	$1.5 \times 10^{-5}$			
8月22日					$1.2 \times 10^{-5}$	$1.5 \times 10^{-5}$			
8月29日					$3.9 \times 10^{-5}$	$4.8 \times 10^{-5}$			
9月5日					$1.3 \times 10^{-5}$	$1.2 \times 10^{-5}$			
9月12日			0.0014	0.0012	$3.4 \times 10^{-5}$	$3.6 \times 10^{-5}$			
9月19日					$7.5 \times 10^{-6}$	$1.8 \times 10^{-5}$			
9月26日					$9.1 \times 10^{-6}$	$1.2 \times 10^{-5}$			
10月3日					$1.9 \times 10^{-5}$				
10月10日			$7.6 \times 10^{-4}$	$6.6 \times 10^{-4}$	$9.6 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-5}$			
10月17日					$2.9 \times 10^{-5}$	$2.7 \times 10^{-5}$			
10月24日					$1.1 \times 10^{-5}$	$1.3 \times 10^{-5}$			
10月31日					$2.3 \times 10^{-5}$	$2.5 \times 10^{-5}$			
11月7日					$1.1 \times 10^{-5}$	$1.3 \times 10^{-5}$			
11月14日			$6.6 \times 10^{-4}$	$6.2 \times 10^{-4}$	$2.5 \times 10^{-5}$	$2.9 \times 10^{-5}$			
11月21日					$1.3 \times 10^{-5}$	$2.2 \times 10^{-5}$			
11月28日					$1.3 \times 10^{-5}$	$1.5 \times 10^{-5}$			
12月5日					$1.4 \times 10^{-5}$	$2.0 \times 10^{-5}$			

表 2 定点 2 試料に観測された核種の輸送比 (1/4)

採取日	<sup>95</sup> Nb	<sup>99</sup> Mo	<sup>99m</sup> Tc	<sup>106</sup> Ru	<sup>110m</sup> Ag	<sup>125</sup> Sb	<sup>129m</sup> Te	<sup>131</sup> I	<sup>132</sup> Te	<sup>132</sup> I	<sup>134</sup> Cs	<sup>136</sup> Cs
3月21日												
3月25日				0.027			1.6	14	1.1		1.0	0.84
3月28日								54	1.1	1.0	0.99	0.65
3月31日								4.5	1.1		0.99	0.87
4月4日							1.7	17	0.56	0.49	0.99	0.59
4月7日								23			1.0	1.2
4月11日							1.6	26			0.96	0.57
4月14日								4.8			1.1	
4月18日												
4月21日								26			0.88	
4月25日							1.2	11			0.97	0.56
4月28日								9			1.0	0.93
5月2日							2.7	55			1.0	
5月5日							1.9	29			0.95	0.90
5月9日							9.9	8.3			0.97	1.0
5月12日							1.6	14			0.96	1.0
5月16日							0.98	7.2			0.95	
5月19日								22			0.96	
5月23日							2.0	11			0.94	
5月26日								27			1.0	
5月30日								34			0.90	
6月2日								18			0.96	
6月6日								19			1.0	
6月9日								29			1.0	
6月13日								6.5			0.98	
6月16日											1.0	
6月20日											0.96	
6月23日											0.94	
6月27日											0.97	
7月4日								45			0.95	
7月11日											1.1	
7月18日											0.78	
7月25日											1.0	
8月1日											1.0	
8月8日											1.0	
8月15日											0.97	
8月22日											0.96	
8月29日											1.0	
9月5日											0.97	
9月12日											1.0	
9月19日											0.98	
9月26日											0.98	

表 2 定点 2 試料に観測された核種の輸送比 (2/4)

採取日	<sup>95</sup> Nb	<sup>99</sup> Mo	<sup>99m</sup> Tc	<sup>106</sup> Ru	<sup>110m</sup> Ag	<sup>125</sup> Sb	<sup>129m</sup> Te	<sup>131</sup> I	<sup>132</sup> Te	<sup>132</sup> I	<sup>134</sup> Cs	<sup>136</sup> Cs
10月10日											0.93	
10月17日											1.0	
10月24日											0.97	
10月31日											0.96	
11月7日											0.99	
11月14日											0.95	
11月21日											0.98	
11月28日											0.99	
12月5日											0.97	

表 2 定点 2 試料に観測された核種の輸送比 (3/4)

採取日	<sup>140</sup> Ba	<sup>140</sup> La	<sup>89</sup> Sr	<sup>90</sup> Sr	<sup>238</sup> Pu	<sup>239, 240</sup> Pu	<sup>241</sup> Am	<sup>242</sup> Cm	<sup>243, 244</sup> Cm
3月21日									
3月25日	0.0042	0.0033							
3月28日									
3月31日									
4月4日									
4月7日									
4月11日						0.0021			
4月14日									
4月18日									
4月21日									
4月25日									
4月28日									
5月2日									
5月5日									
5月9日			0.013	0.011				1.3×10 <sup>-6</sup>	
5月12日									
5月16日									
5月19日									
5月23日									
5月26日									
5月30日									
6月2日									
6月6日									
6月9日									
6月13日			0.0016	0.0023		5.4×10 <sup>-4</sup>		2.8×10 <sup>-5</sup>	
6月16日									
6月20日						0.0031			
6月23日									
6月27日						1.9×10 <sup>-4</sup>			

表 2 定点 2 試料に観測された核種の輸送比 (4/4)

採取日	$^{140}\text{Ba}$	$^{140}\text{La}$	$^{89}\text{Sr}$	$^{90}\text{Sr}$	$^{238}\text{Pu}$	$^{239,240}\text{Pu}$	$^{241}\text{Am}$	$^{242}\text{Cm}$	$^{243,244}\text{Cm}$
7月4日									
7月11日			0.0058	0.0034					
7月18日									
7月25日									
8月1日					$2.0 \times 10^{-4}$	0.013			
8月8日						0.0014			
8月15日			0.0017	0.0023					
8月22日						$1.1 \times 10^{-4}$			
8月29日									
9月5日						$2.7 \times 10^{-4}$			
9月12日			0.0055	0.0043		$8.8 \times 10^{-4}$			
9月19日						$4.8 \times 10^{-4}$			
9月26日									
10月3日									
10月10日						$3.5 \times 10^{-4}$			
10月17日						$4.4 \times 10^{-4}$			
10月24日						$5.2 \times 10^{-5}$			
10月31日						$5.3 \times 10^{-5}$			
11月7日						$4.5 \times 10^{-5}$			
11月14日			$7.1 \times 10^{-4}$	$6.3 \times 10^{-4}$		$6.1 \times 10^{-5}$			
11月21日									
11月28日									
12月5日						0.0010			

表 3 定点3 試料に観測された核種の輸送比 (1/4)

採取日	<sup>95</sup> Nb	<sup>99</sup> Mo	<sup>99m</sup> Tc	<sup>106</sup> Ru	<sup>110m</sup> Ag	<sup>125</sup> Sb	<sup>129m</sup> Te	<sup>131</sup> I	<sup>132</sup> Te	<sup>132</sup> I	<sup>134</sup> Cs	<sup>136</sup> Cs
3月21日												
3月25日	1.3×10 <sup>-4</sup>	0.031	0.022	0.025			1.7	1.2	1.2		0.98	0.84
3月28日							1.5	1.2	0.55	0.40	1.0	0.55
3月31日			0.022	0.0052			1.5	0.89	1.1		0.99	0.85
4月4日							2.4	1.6	1.0	0.74	1.0	0.59
4月7日	1.9×10 <sup>-4</sup>						1.8	1.2	1.2		0.95	0.90
4月11日							1.6	0.74	0.55	0.23	1.0	0.56
4月14日	1.4×10 <sup>-4</sup>				0.069		1.6	1.2	1.1		1.0	0.80
4月18日												
4月21日	1.4×10 <sup>-4</sup>				0.083		2.4	1.4			1.0	0.80
4月25日							2.3	3.6			1.0	0.54
4月28日	1.8×10 <sup>-4</sup>						1.8	2.2			0.98	0.83
5月2日							2.0	2.8			1.0	0.59
5月5日	1.3×10 <sup>-4</sup>						1.7	1.4			0.98	0.84
5月9日							1.4	1.4			0.10	0.53
5月12日	9.1×10 <sup>-5</sup>				0.12		1.8	1.7			1.0	0.85
5月16日							1.6	1.2			1.0	0.40
5月19日	1.4×10 <sup>-4</sup>						2.1	1.6			0.99	0.87
5月23日							2.0	1.4			1.0	0.57
5月26日	1.2×10 <sup>-4</sup>						1.4	1.6			0.96	0.93
5月30日							2.4	1.9			0.99	0.40
6月2日	9.3×10 <sup>-5</sup>				0.074		1.6	1.5			0.99	0.81
6月6日							2.6	1.8			1.0	0.80
6月9日					0.067		1.7	1.6			0.97	0.93
6月13日							1.7	2.2			1.0	
6月16日					0.096		1.7	1.5			1.0	0.76
6月20日							2.3				1.0	0.76
6月23日					0.089		1.9				0.98	1.0
6月27日							3.8				1.0	
7月4日											1.1	
7月11日					1.5		3.2				1.0	
7月18日											1.0	
7月25日							5.8				1.0	
8月1日											1.0	
8月8日							2.8				1.0	
8月15日											1.0	
8月22日											1.0	
8月29日											1.0	
9月5日											1.0	
9月12日											1.0	
9月19日											1.1	
9月26日											1.0	

表 3 定点3 試料に観測された核種の輸送比 (2/4)

採取日	<sup>95</sup> Nb	<sup>99</sup> Mo	<sup>99m</sup> Tc	<sup>106</sup> Ru	<sup>110m</sup> Ag	<sup>125</sup> Sb	<sup>129m</sup> Te	<sup>131</sup> I	<sup>132</sup> Te	<sup>132</sup> I	<sup>134</sup> Cs	<sup>136</sup> Cs
10月3日											0.96	
10月10日											1.0	
10月17日											1.0	
10月24日											1.0	
10月31日											0.99	
11月7日											1.0	
11月14日											1.0	
11月21日											0.98	
11月28日											1.0	
12月5日											1.0	

表 3 定点3 試料に観測された核種の輸送比 (3/4)

採取日	<sup>140</sup> Ba	<sup>140</sup> La	<sup>89</sup> Sr	<sup>90</sup> Sr	<sup>238</sup> Pu	<sup>239, 240</sup> Pu	<sup>241</sup> Am	<sup>242</sup> Cm	<sup>243, 244</sup> Cm
3月21日									
3月25日		0.0030			$8.8 \times 10^{-7}$				
3月28日					$2.6 \times 10^{-6}$	$3.3 \times 10^{-6}$	$8.4 \times 10^{-6}$	$4.0 \times 10^{-6}$	$3.5 \times 10^{-6}$
3月31日	0.0015	0.0019			$3.9 \times 10^{-6}$				
4月4日									
4月7日									
4月11日					$1.8 \times 10^{-6}$	$1.7 \times 10^{-6}$	$4.0 \times 10^{-6}$	$1.8 \times 10^{-6}$	$2.2 \times 10^{-6}$
4月14日					$3.9 \times 10^{-6}$				
4月18日									
4月21日					$2.5 \times 10^{-6}$				
4月25日									
4月28日									
5月2日									
5月5日					$3.0 \times 10^{-6}$	$5.1 \times 10^{-6}$			
5月9日			$4.1 \times 10^{-4}$	$3.7 \times 10^{-4}$	$2.7 \times 10^{-6}$	$3.2 \times 10^{-6}$	$8.6 \times 10^{-6}$	$2.8 \times 10^{-6}$	$3.3 \times 10^{-6}$
5月12日									
5月16日					$2.2 \times 10^{-6}$	$2.7 \times 10^{-6}$			
5月19日									
5月23日					$3.3 \times 10^{-6}$	$3.4 \times 10^{-6}$			
5月26日					$6.0 \times 10^{-6}$				
5月30日					$2.7 \times 10^{-6}$	$3.0 \times 10^{-6}$		$2.9 \times 10^{-6}$	$3.2 \times 10^{-6}$
6月2日					$8.1 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-5}$			
6月6日					$4.4 \times 10^{-6}$	$4.3 \times 10^{-6}$	$1.2 \times 10^{-5}$	$5.6 \times 10^{-6}$	$4.7 \times 10^{-6}$
6月9日									
6月13日			$9.4 \times 10^{-4}$	$8.6 \times 10^{-4}$	$9.1 \times 10^{-6}$	$1.1 \times 10^{-5}$		$9.5 \times 10^{-6}$	$6.1 \times 10^{-6}$
6月16日									
6月20日					$3.5 \times 10^{-6}$	$3.2 \times 10^{-6}$	$8.7 \times 10^{-6}$	$3.6 \times 10^{-6}$	$3.7 \times 10^{-6}$
6月23日									
6月27日						$1.4 \times 10^{-5}$			



表 3 定点 3 試料に観測された核種の輸送比 (4/4)

採取日	<sup>140</sup> Ba	<sup>140</sup> La	<sup>89</sup> Sr	<sup>90</sup> Sr	<sup>238</sup> Pu	<sup>239, 240</sup> Pu	<sup>241</sup> Am	<sup>242</sup> Cm	<sup>243, 244</sup> Cm
7月4日					$1.1 \times 10^{-5}$	$3.7 \times 10^{-5}$			
7月11日			$2.2 \times 10^{-4}$	$2.1 \times 10^{-4}$		$1.8 \times 10^{-5}$			
7月18日									
7月25日					$1.8 \times 10^{-6}$	$3.1 \times 10^{-6}$			
8月1日					$4.1 \times 10^{-6}$	$1.7 \times 10^{-5}$			
8月8日					$2.1 \times 10^{-6}$	$2.8 \times 10^{-6}$			
8月15日			$5.2 \times 10^{-4}$	$4.4 \times 10^{-4}$	$7.5 \times 10^{-6}$	$2.3 \times 10^{-5}$			
8月22日					$3.4 \times 10^{-5}$	$7.7 \times 10^{-5}$			
8月29日					$1.5 \times 10^{-6}$	$8.0 \times 10^{-6}$			
9月5日					$1.2 \times 10^{-5}$	$2.5 \times 10^{-5}$			
9月12日			$2.9 \times 10^{-4}$	$2.7 \times 10^{-4}$	$1.5 \times 10^{-6}$	$3.1 \times 10^{-6}$			
9月19日					$2.3 \times 10^{-6}$	$4.9 \times 10^{-6}$			
9月26日					$5.0 \times 10^{-6}$	$7.8 \times 10^{-6}$			
10月3日						$9.3 \times 10^{-5}$			
10月10日			$2.9 \times 10^{-4}$	$2.9 \times 10^{-4}$	$5.3 \times 10^{-7}$	$2.2 \times 10^{-6}$			
10月17日					$2.6 \times 10^{-6}$	$2.6 \times 10^{-6}$			
10月24日					$2.1 \times 10^{-6}$	$5.6 \times 10^{-6}$			
10月31日					$1.8 \times 10^{-6}$	$4.5 \times 10^{-6}$			
11月7日					$1.2 \times 10^{-6}$	$2.4 \times 10^{-6}$			
11月14日			$5.6 \times 10^{-4}$	$4.2 \times 10^{-4}$	$1.6 \times 10^{-6}$	$4.3 \times 10^{-6}$			
11月21日					$1.7 \times 10^{-6}$	$4.5 \times 10^{-6}$			
11月28日					$3.0 \times 10^{-6}$	$4.5 \times 10^{-6}$			
12月5日					$3.4 \times 10^{-6}$	$4.5 \times 10^{-6}$			

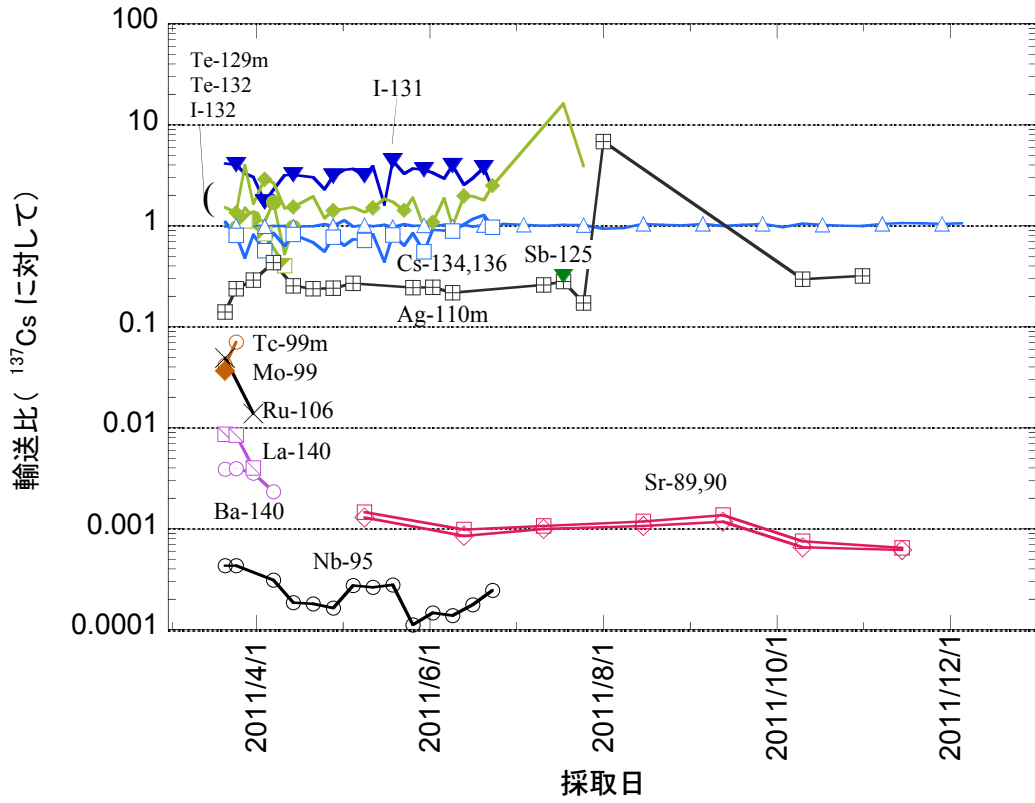


図 1 定点 1 試料に観測された  $\gamma$  線放出核種及び Sr 核種の輸送比

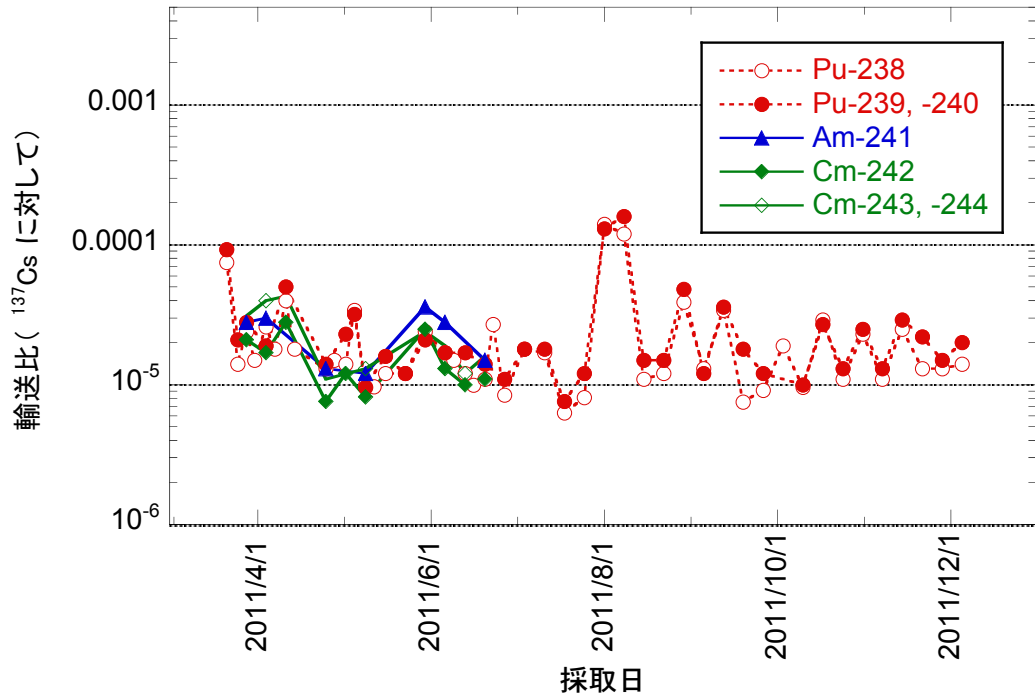


図 2 定点 1 試料に観測された  $\alpha$  線放出核種の輸送比

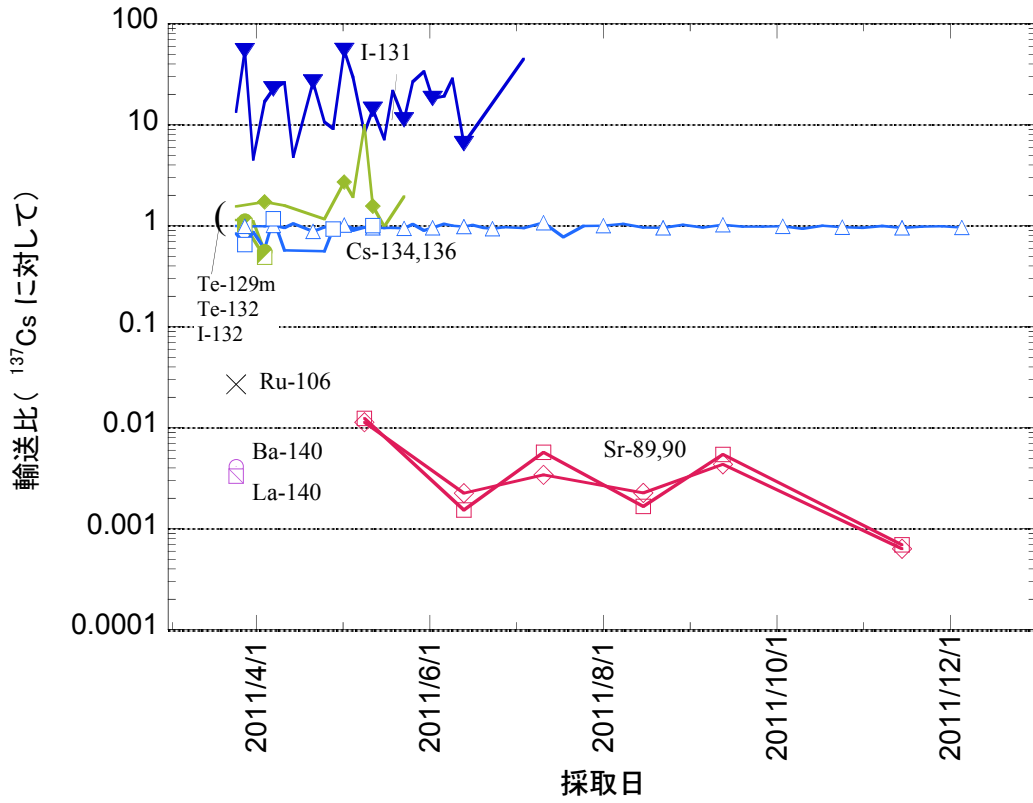


図 3 定点 2 試料に観測された  $\gamma$  線放出核種及び Sr 核種の輸送比

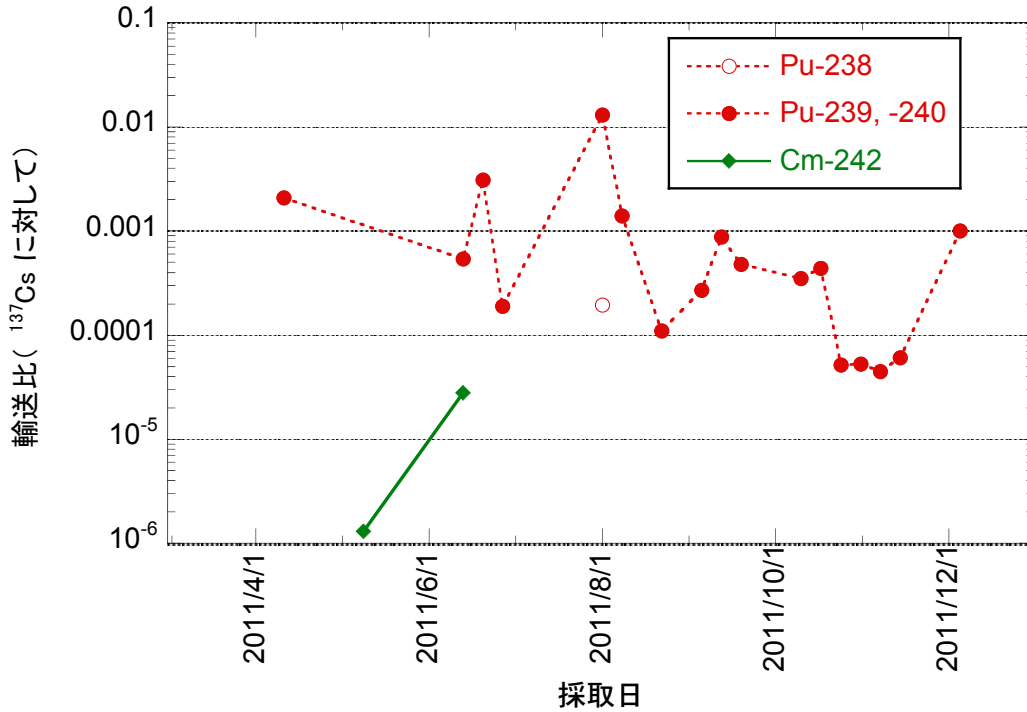


図 4 定点 2 試料に観測された  $\alpha$  線放出核種の輸送比

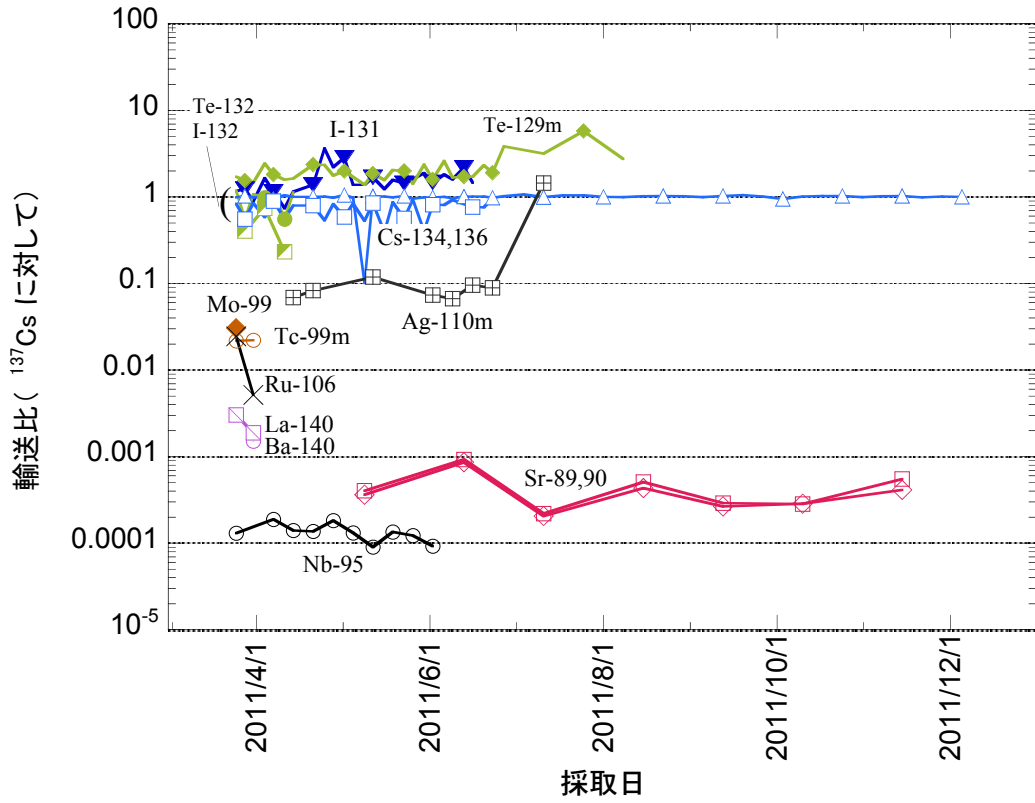


図 5 定点 3 試料に観測された  $\gamma$  線放出核種及び Sr 核種の輸送比

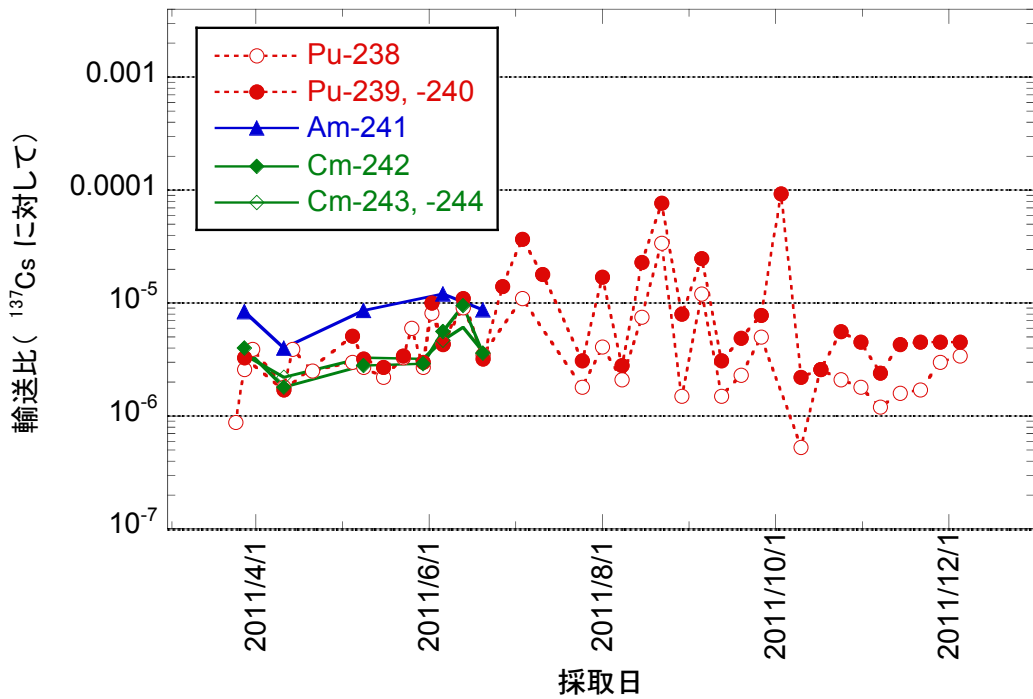


図 6 定点 3 試料に観測された  $\alpha$  線放出核種の輸送比

## 3.2.2 ウラン同位体の輸送比

事故後初めに採取された試料のウラン核種濃度と輸送比を表 4 に示す。ウラン 234、235 と 238 の濃度は、相対的に天然ウランに合致しており、原子燃料の組成<sup>48)</sup>とは異なる。福島第一原子力発電所土壌に検出されたウランは天然のものであると考えられる。

表 4 3月28日に採取された試料に観測されたウラン核種の濃度比と輸送比

核種	濃度 <sup>3)</sup> (Bq/kg)		濃度比 (Bq/Bq)				輸送比		
	定点 1	定点 3	定点 1	定点 3	天然ウラン	燃料*	定点 1	定点 3	平均値
U-234	12	4.4	1.0	1.0	1.0	0.38	15	2.8	8.9
U-235	0.50	0.23	0.042	0.052	0.048	0.12	2.0	0.48	1.2
U-238	12	4.3	1.0	1.0	1.0	1.0	5.8	1.1	3.4

\* 1 から 3 号機燃料の合計から算出<sup>48)</sup>。

## 3.2.3 元素の輸送比

事故から間もなくは短半減期の核種が観測されている。放射平衡の娘核種には、原子炉から放出された後に生成する物があり、そのような場合には、拡散とは異なる状態で土壌に含まれている可能性がある。分析値が報告されている核種について放射平衡を考慮して爆発時の拡散に係る化学元素との関係を表 5 に整理して示す。

表 1 から表 3 に示した輸送比を核種ごとに平均した値を表 6 に示す。また、核種ごとにプロットしたものを図 7 に示す。

表 5 検出された核種と拡散した元素

	核種	拡散した元素
FP	$^7\text{Be}$	–
	$^{89}\text{Sr}, ^{90}\text{Sr}$	Sr
	$^{95}\text{Nb}$	Nb
	$^{99}\text{Mo}, ^{99\text{m}}\text{Tc}$	Mo
	$^{99}\text{Tc}^*$	Tc
	$^{106}\text{Ru}$	Ru
	$^{110\text{m}}\text{Ag}$	Ag
	$^{129\text{m}}\text{Te}, ^{132}\text{Te}, ^{132}\text{I}$	Te
	$^{129}\text{I}^*$	I
	$^{131}\text{I}$	I ( $^{131}\text{Te}$ からの流れこみは小さい。)
	$^{134}\text{Cs}, ^{136}\text{Cs}, ^{137}\text{Cs}$	Cs
$^{140}\text{Ba}, ^{140}\text{La}$	Ba	
アクチニド	$^{234,235,238}\text{U}$	– (天然の寄与が支配的である。)
	$^{238,239,240}\text{Pu}$	Pu
	$^{241}\text{Am}$	Am
	$^{242,243,244}\text{Cm}$	Cm

\*  $^{99}\text{Tc}$  と  $^{129}\text{I}$  はこの検討において対象とする分析データには含まれていない。

表 6  $^{137}\text{Cs}$  に対する輸送比

拡散した 元素	核種	輸送比			溶出率 (Cs に対する比 <sup>*</sup> )
		定点 1	定点 2	定点 3	
Nb	Nb-95	$2.4 \times 10^{-4}$		$1.4 \times 10^{-4}$	
Mo	Mo-99	0.037		0.031	0.42
	Tc-99m	0.056		0.022	
Ru	Ru-106	0.032	0.027	0.015	0.03
Ag	Ag-110m	0.65		0.26	
Sb	Sb-125	0.32			
Te	Te-129m	2.4	2.5	2.1	
	Te-132	1.1	0.98	0.95	
	I-132	0.79	0.75	0.46	
I	I-131	3.2	21	1.6	
Cs	Cs-134	1.0	0.98	0.99	1.0
	Cs-136	0.78	0.82	0.73	
	Cs-137	1.0	1.0	1.0	
Ba	Ba-140	0.0034	0.0042	0.0015	
	La-140	0.0070	0.0033	0.0025	
Sr	Sr-89	0.0011	0.0046	$4.6 \times 10^{-4}$	0.35
	Sr-90	$9.5 \times 10^{-4}$	0.0041	$4.0 \times 10^{-4}$	
Pu	Pu-238	$2.3 \times 10^{-5}$	$2.0 \times 10^{-4}$	$4.5 \times 10^{-6}$	
	Pu-239, -240	$2.8 \times 10^{-5}$	0.0014	$1.2 \times 10^{-5}$	
Am	Am-241	$2.3 \times 10^{-5}$		$8.3 \times 10^{-6}$	
Cm	Cm-242	$1.5 \times 10^{-5}$	$1.4 \times 10^{-5}$	$4.3 \times 10^{-6}$	
	Cm-243, -244	$2.3 \times 10^{-5}$		$3.8 \times 10^{-6}$	

\* 照射核燃料から炭酸水素ナトリウム溶液への溶出率。論文の値<sup>49)</sup>を換算したものの。

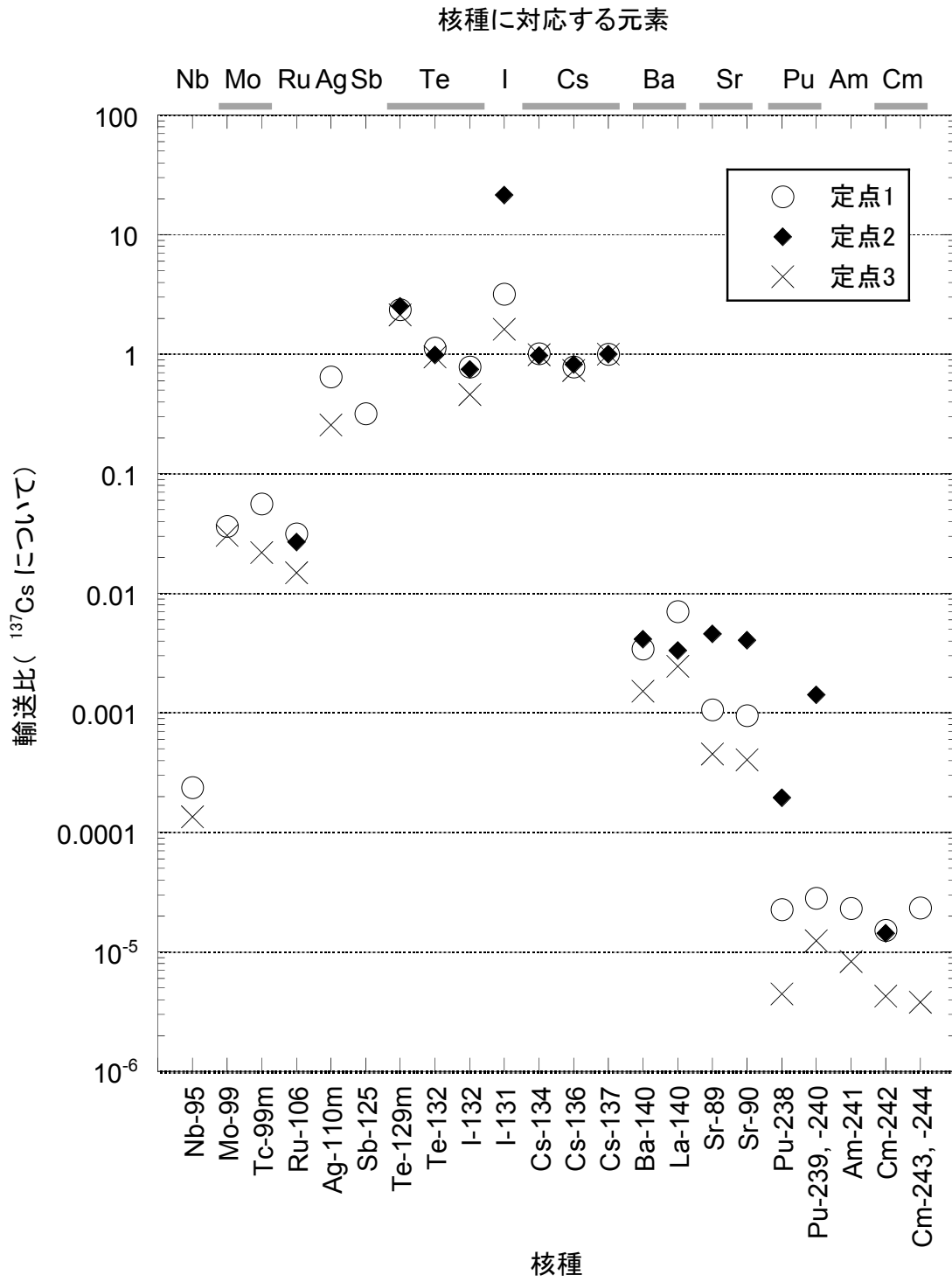


図 7  $^{137}\text{Cs}$  に対する輸送比



## 4. おわりに

福島第一原子力発電所事故において原子炉周辺の土壌に検出された核種について輸送比を定義して算出した。輸送比は、 $^{137}\text{Cs}$  を基準にした原子数の比であり、核種濃度と燃料組成の計算値を用いて計算した。輸送比は元素の拡散ふるまいを表す指標として有用と考えられ、事故に伴う廃止措置等においての利用が期待される。

## 参考文献

- 1) 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の検出状況について,” プレスリリース, 平成 23 年 3 月 28 日, 2011,  
<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11032806-j.html>.
- 2) 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の核種分析の結果について (続報),” プレスリリース, 平成 23 年 4 月 6 日, 2011,  
<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11040609-j.html>.
- 3) 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の核種分析の結果について (続報 3),” プレスリリース, 平成 23 年 4 月 14 日, 2011,  
<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11041407-j.html>.
- 4) 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の核種分析の結果について (続報 4),” プレスリリース, 平成 23 年 4 月 22 日, 2011,  
<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11042207-j.html>.
- 5) 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の核種分析の結果について (続報 5),” プレスリリース, 平成 23 年 4 月 27 日, 2011,  
<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11042710-j.html>.
- 6) 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の核種分析の結果について (続報 6),” プレスリリース, 平成 23 年 5 月 3 日, 2011,  
<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11050305-j.html>.
- 7) 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の核種分析の結果について (続報 7),” プレスリリース, 平成 23 年 5 月 8 日, 2011,  
<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11050804-j.html>.
- 8) 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の核種分析の結果について (続報 8),” プレスリリース, 平成 23 年 5 月 12 日, 2011,  
<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11051207-j.html>.

- 9) 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の核種分析の結果について(続報 9),” プレスリリース, 平成 23 年 5 月 17 日, 2011,  
<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11051709-j.html>.
- 10) 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の核種分析の結果について(続報 10),” プレスリリース, 平成 23 年 5 月 20 日, 2011,  
<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11052019-j.html>.
- 11) 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の核種分析の結果について(続報 11),” プレスリリース, 平成 23 年 5 月 21 日, 2011,  
<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11052107-j.html>.
- 12) 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の核種分析について(続報 12),” プレスリリース, 平成 23 年 5 月 25 日, 2011,  
<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11052506-j.html>.
- 13) 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の核種分析の結果について(続報 13),” プレスリリース, 平成 23 年 5 月 28 日, 2011,  
<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11052807-j.html>.
- 14) 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の核種分析の結果について(続報 14),” プレスリリース, 平成 23 年 5 月 31 日, 2011,  
<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11053113-j.html>.
- 15) 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の核種分析の結果について(続報 15),” プレスリリース, 平成 23 年 6 月 4 日, 2011,  
<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11060408-j.html>.
- 16) 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の核種分析の結果について(続報 16),” プレスリリース, 平成 23 年 6 月 11 日, 2011,  
<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11061106-j.html>.
- 17) 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の核種分析の結果について(続報 17),” プレスリリース, 平成 23 年 6 月 14 日, 2011,  
<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11061409-j.html>.
- 18) 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の核種分析の結果について(続報 18),” プレスリリース, 平成 23 年 6 月 15 日, 2011,  
<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11061507-j.html>.
- 19) 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の核種分析の結果について(続報 19),” プレスリリース, 平成 23 年 6 月 22 日, 2011,  
<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11062206-j.html>.

- 20) 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の核種分析の結果について(続報 20),” プレスリリース, 平成 23 年 6 月 25 日, 2011,  
<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11062507-j.html>.
- 21) 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の核種分析の結果について(続報 21),” プレスリリース, 平成 23 年 7 月 7 日, 2011,  
<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11070710-j.html>.
- 22) 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の核種分析の結果について(続報 22),” プレスリリース, 平成 23 年 7 月 8 日, 2011,  
<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11070809-j.html>.
- 23) 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の核種分析の結果について(続報 23),” プレスリリース, 平成 23 年 7 月 13 日, 2011,  
<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11071307-j.html>.
- 24) 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の核種分析の結果について(続報 24),” プレスリリース, 平成 23 年 7 月 21 日, 2011,  
<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11072108-j.html>.
- 25) 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の核種分析について(続報 25),” プレスリリース, 平成 23 年 7 月 24 日, 2011,  
<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11072405-j.html>.
- 26) 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の核種分析について(続報 26),” プレスリリース, 平成 23 年 7 月 29 日, 2011,  
<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11072912-j.html>.
- 27) 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の核種分析の結果について(続報 27),” プレスリリース, 平成 23 年 8 月 4 日, 2011,  
<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11080408-j.html>.
- 28) 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の核種分析の結果について(続報 28),” プレスリリース, 平成 23 年 8 月 5 日, 2011,  
<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11080510-j.html>.
- 29) 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の核種分析の結果について(続報 29),” プレスリリース, 平成 23 年 8 月 17 日, 2011,  
<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11081708-j.html>.
- 30) 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の核種分析の結果について(続報 30),” プレスリリース, 平成 23 年 8 月 25 日, 2011,  
<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11082508-j.html>.

- 31) 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の核種分析の結果について(続報 31),” プレスリリース, 平成 23 年 9 月 3 日, 2011,  
<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11090304-j.html>.
- 32) 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の核種分析の結果について(続報 32),” プレスリリース, 平成 23 年 9 月 15 日, 2011,  
<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11091509-j.html>.
- 33) 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の核種分析の結果について(続報 33),” プレスリリース, 平成 23 年 9 月 29 日, 2011,  
<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11092908-j.html>.
- 34) 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の核種分析の結果について(続報 34),” プレスリリース, 平成 23 年 10 月 6 日, 2011,  
<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11100609-j.html>.
- 35) 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の核種分析の結果について(続報 35),” プレスリリース, 平成 23 年 10 月 16 日, 2011,  
<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11101605-j.html>.
- 36) 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の核種分析の結果について(続報 36),” プレスリリース, 平成 23 年 10 月 25 日, 2011,  
<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11102504-j.html>.
- 37) 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の核種分析の結果について(続報 37),” プレスリリース, 平成 23 年 11 月 4 日, 2011,  
<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11110406-j.html>.
- 38) 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の核種分析の結果について(続報 38),” プレスリリース, 平成 23 年 11 月 12 日, 2011,  
<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11111207-j.html>.
- 39) 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の核種分析の結果について(続報 39),” プレスリリース, 平成 23 年 11 月 17 日, 2011,  
<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11111709-j.html>.
- 40) 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の核種分析の結果について(続報 40),” プレスリリース, 平成 23 年 11 月 23 日, 2011,  
<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11112306-j.html>.
- 41) 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の核種分析の結果について(続報 41),” プレスリリース, 平成 23 年 11 月 30 日, 2011,  
<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11113007-j.html>.

- 42) 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の核種分析の結果について(続報 42),” プレスリリース, 平成 23 年 12 月 8 日, 2011,  
<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11120810-j.html>.
- 43) 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の核種分析の結果について(続報 43),” プレスリリース, 平成 23 年 12 月 9 日, 2011,  
<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11120909-j.html>.
- 44) 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の核種分析の結果について(続報 44),” プレスリリース, 平成 23 年 12 月 15 日, 2011,  
<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11121505-j.html>.
- 45) 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の核種分析の結果について(続報 45),” プレスリリース, 平成 23 年 12 月 16 日, 2011,  
<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11121608-j.html>.
- 46) 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の核種分析の結果について(続報 46),” プレスリリース, 平成 23 年 12 月 17 日, 2011,  
<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11121709-j.html>.
- 47) 西原 健司, 山岸 功, 安田 健一郎, 石森 健一郎, 田中 究, 久野 剛彦, 稲田 聡, 後藤 雄一, “福島第一原子力発電所の滞留水への放射性核種放出,” 日本原子力学会和文論文誌, 11(1), 2012, pp.13-19.
- 48) 西原 健司, 岩元 大樹, 須山 賢也, “福島第一原子力発電所の燃料組成評価,” JAEA-Data/Code 2012-018, 2012, 190p.
- 49) Serrano-Purroy, D. et al., “Dynamic leaching studies of 48 MWd/kgU UO<sub>2</sub> commercial spent nuclear fuel under oxidic conditions,” Journal of Nuclear Materials, 434(1), 2013, pp. 451-460.

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
物質の量	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 <sup>2</sup>
体積	立法メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度、質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 <sup>(a)</sup> 、濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1
比透磁率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	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 <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(e)</sup>	1 <sup>(b)</sup>	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
周波数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz		s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N		m kg s <sup>-2</sup>
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
仕事率、工率、放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
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 <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
静電容量	ファラド	F	C/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup>
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光照射度	ルーメン	lm	cd sr <sup>(e)</sup>	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		s <sup>-1</sup>
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
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 <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
酸素活性化	カタール	kat		s <sup>-1</sup> 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
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
表面張力	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> = s <sup>-1</sup>
熱流密度、放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s <sup>2</sup>	m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> = s <sup>-2</sup>
熱容量、エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-3</sup>
比熱容量、比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電荷密度	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
電表面電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s A
電束密度、電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエントロピー、モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m <sup>4</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> = m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> sr)	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> = kg s <sup>-3</sup>
	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> mol

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>-21</sup>	zepto	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	yocto	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	1 h=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	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, l	1 L=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1 t=10 <sup>3</sup> 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	1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> 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=0.1 MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm <sup>2</sup> =(10 <sup>12</sup> cm) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	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	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>
フオト	ph	1 ph=1 cd sr cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(c)</sup>	Oe	1 Oe <sub>e</sub> =(10 <sup>3</sup> /4π) A m <sup>-1</sup>

(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=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 <sup>-4</sup> kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリ)、4.1868 J (「IT」カロリ)、4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 <sup>-6</sup> m

