



資料4

放射性物質汚染廃棄物の焼却処理に関する科学的知見 (ガス状放射性セシウム (Cs) の挙動)

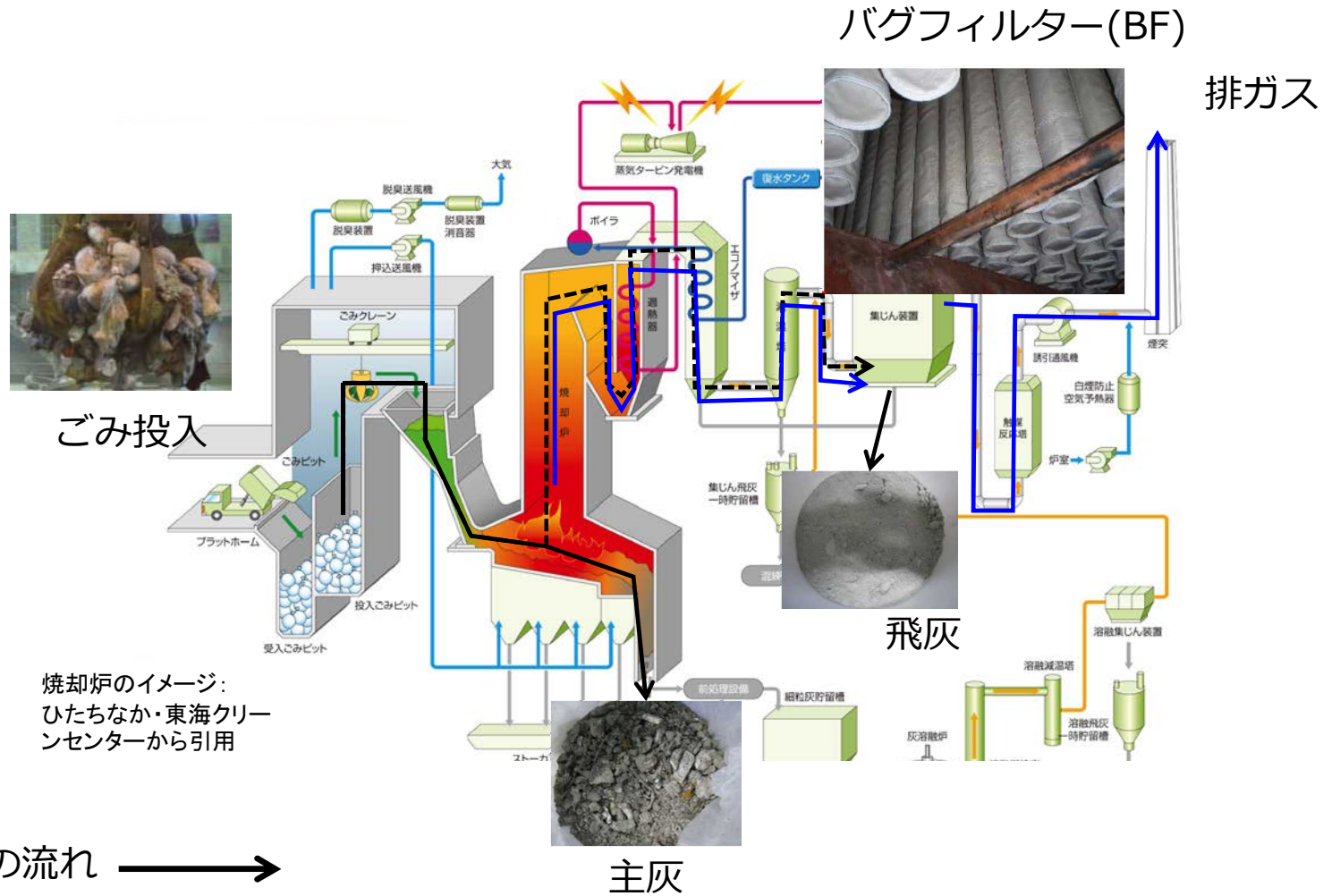


(独) 国立環境研究所
資源循環・廃棄物研究センター

内容

- 放射性物質を含む廃棄物の焼却処理について
- セシウム (Cs) の性質
- 焼却処理におけるCsの挙動
- バグフィルター処理時のCsの挙動

ごみ焼却の流れ



固体の流れ →

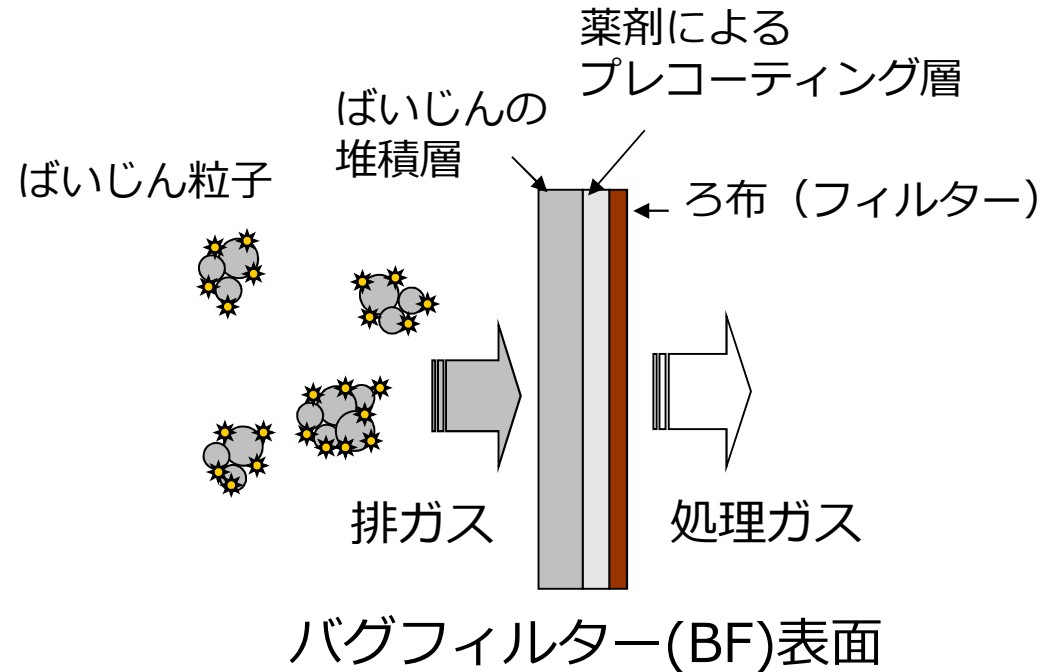
ばいじんの流れ - - - - -

排ガスの流れ →

バグフィルター(BF)の機能



バグフィルター(BF)



バグフィルター(BF)の機能：ばいじん粒子の除去が目的であり、
ガスを分離する膜ではない



ガス状の放射性Csの存在は無視できることから、ばいじん粒子に
含まれる放射性セシウムを除去することで、安全性が確保される

バグフィルター（BF）によるCs除去率

焼却施設におけるBF前後の排ガス中の放射性Cs濃度と除去率

施設	対象プロセス	入口濃度(Bq/m ³)		出口濃度(Bq/m ³)		除去率(%)		集塵装置	調査実施者	調査時期
		Cs134	Cs137	Cs134	Cs137	Cs134	Cs137			
福島県 あらかわCC	焼却	78	96	<0.008	<0.006	99.99<	99.99<	BF	環境省	10月
		98	126	0.008	<0.007	99.99	99.99<			12月
須賀川地方 保健環境組合	焼却	33	42	0.2	0.2	99.39	99.52	EP	環境省	10月
		43	57	0.2	0.2	99.53	99.65			12月
A市清掃工場	焼却	58	70	<0.054	<0.053	99.91<	99.92<	BF	国環研	10月
B市清掃工場	焼却	58	76	<0.1	<0.1	99.83<	99.87<	BF	国環研	12月
	溶融	677	844	<0.1	<0.1	99.99<	99.99<			
C市清掃工場	焼却	15	20	<0.012	<0.013	99.92<	99.94<	BF	国環研	2月
	焼却	64	85	<0.018	<0.017	99.97<	99.98<			3月
	溶融	39	51	<0.01	<0.011	99.97<	99.98<			2月
	溶融	98	133	<0.013	<0.013	99.99<	99.99<			3月
D市清掃工場	溶融	335	404	<0.4	<0.3	99.88<	99.93<	BF	A社	9月
	溶融24h 採取	220	330	<0.05	<0.07	99.98<	99.98<			3月



- ✓ BFの放射性Csの除去率は、概ね99.9%以上
- ✓ ガス状の放射性Csの濃度は、検出できないレベル

- 放射性物質を含む廃棄物の焼却処理について
- セシウム (Cs) の性質
- 焼却処理におけるCsの挙動
- バグフィルター処理時のCsの挙動

ガス状の放射性Csは検出できないレベル→Csの物理化学的性状からバグフィルター処理におけるガス状の放射性Csの挙動を考察する

セシウム (Cs)の性状

周期律表

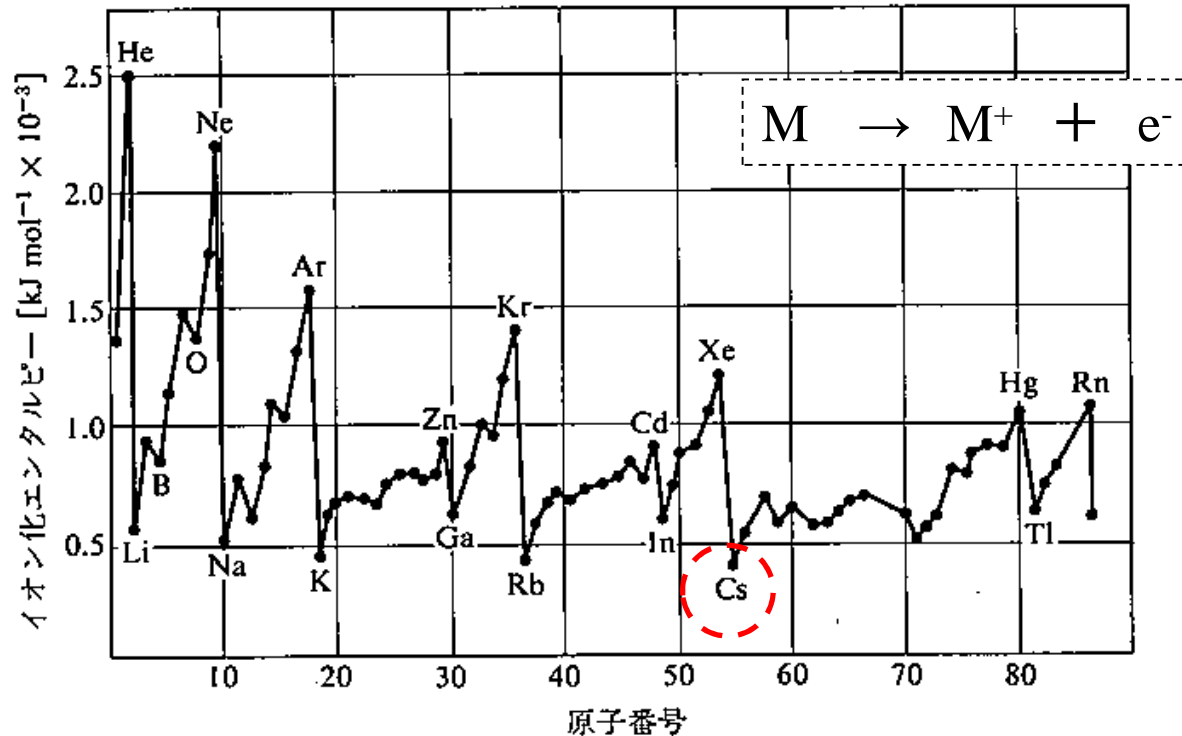
非金属：気体
液体
固体
金属：液体
固体
未確定・未発見
ランタノイド
アクチノイド

カリウム (K) や
ナトリウム (Na)
と同じアルカリ金
属金属

アルカリ金属

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H 水素																	2 He ヘリウム
2	3 Li リチウム	4 Be ベリリウム											5 B ホウ素	6 C 炭素	7 N 窒素	8 O 酸素	9 F フッ素	10 Ne ネオン
3	11 Na ナトリウム	12 Mg マグネシウム											13 Al アルミニウム	14 Si ケイ素	15 P リン	16 S 硫黄	17 Cl 塩素	18 Ar アルゴン
4	19 K カリウム	20 Ca カルシウム	21 Sc スカンジウム	22 Ti チタン	23 V バナジウム	24 Cr クロム	25 Mn マンガン	26 Fe 鉄	27 Co コバルト	28 Ni ニッケル	29 Cu 銅	30 Zn 亜鉛	31 Ga ガリウム	32 Ge ゲルマニウム	33 As ヒ素	34 Se セレン	35 Br 臭素	36 Kr クリプトン
5	37 Rb ルビジウム	38 Sr ストロンチウム	39 Y イットリウム	40 Zr ジルコニウム	41 Nb ニオブ	42 Mo モリブデン	43 Tc テクネチウム	44 Ru ルテチウム	45 Rh ロジウム	46 Pd パラジウム	47 Ag 銀	48 Cd カドミウム	49 In インジウム	50 Sn スズ	51 Sb アンチモン	52 Te テルル	53 I ヨウ素	54 Xe キセノン
6	55 Cs セシウム	56 Ba バリウム	57-71 ランタノイド	72 Hf ハフニウム	73 Ta タンタル	74 W タングステン	75 Re レニウム	76 Os オスミウム	77 Ir イリジウム	78 Pt 白金	79 Au 金	80 Hg 水銀	81 Tl タリウム	82 Pb 鉛	83 Bi ビスマス	84 Po ポロニウム	85 At アスタチン	86 Rn ラドン
7	87 Fr フランシウム	88 Ra ラジウム	89 -103 アクチノイド	104 Rf ラファエル	105 Db ドブニウム	106 Sg シーボーグ	107 Bh ボーリウム	108 Hs ハウンジウム	109 Mt メイテリウム	110 Ds ドームブルグ	111 Rg ローレンシウム	112 Cn コペルニシウム	113 Nh ニホニウム	114 Fl フルロビウム	115 Mc モックリウム	116 Lv リベルリウム	117 Ts テネシウム	118 Og オガネソン
			57 La ランタン	58 Ce セリウム	59 Pr プラセオジム	60 Nd ネオジム	61 Pm プロメチウム	62 Sm セミウム	63 Eu ユークリウム	64 Gd ガドリウム	65 Tb テルビウム	66 Dy ジロジウム	67 Ho ホルミウム	68 Er エルビウム	69 Tm テリウム	70 Yb イットリウム	71 Lu ルテチウム	
			89 Ac アクチン	90 Th トリアウム	91 Pa プロトアクチン	92 U ウラン	93 Np ネプツニウム	94 Pu プルトニウム	95 Am アメリシウム	96 Cm キュリウム	97 Bk ベルカリウム	98 Cf カリフォルニウム	99 Es エスビウム	100 Fm フェルミウム	101 Md メンデルシウム	102 No ノーベリウム	103 Lr ローレンシウム	

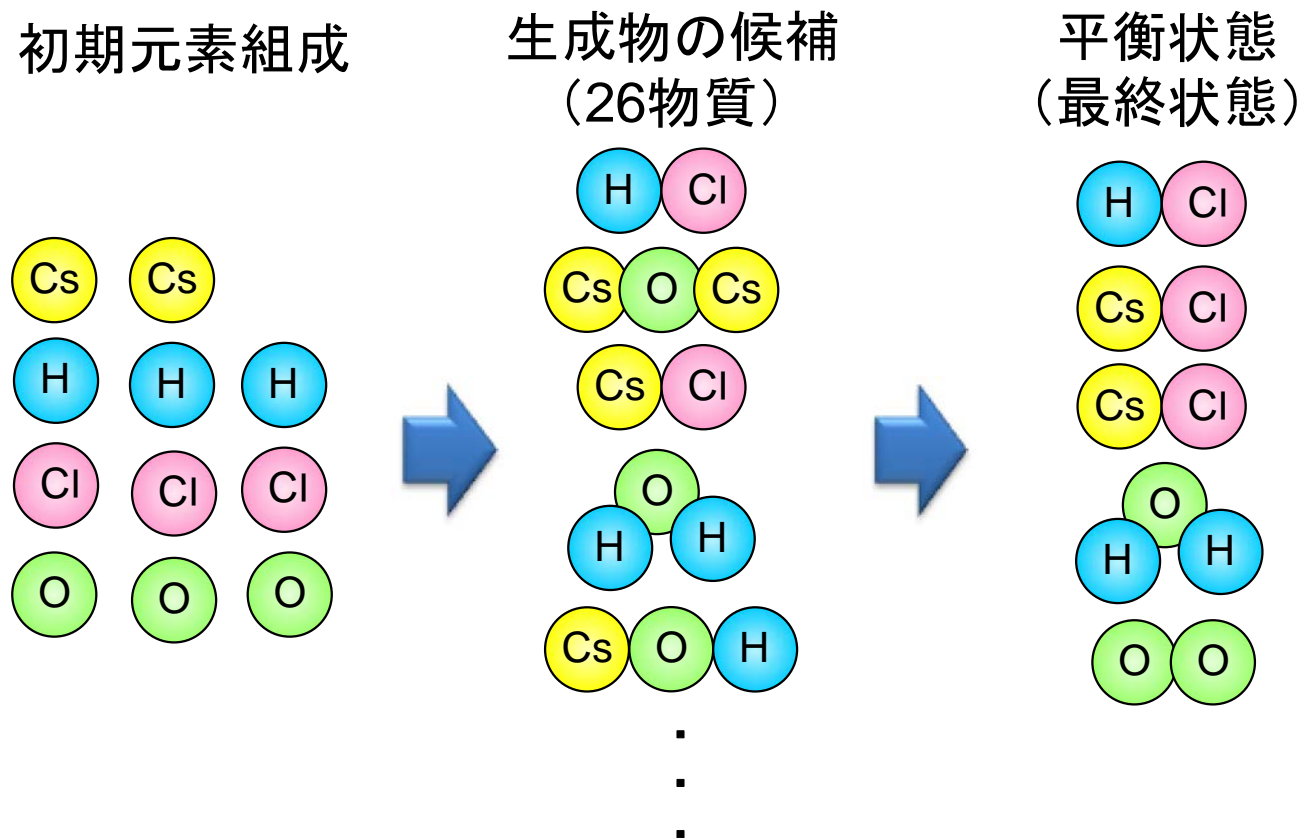
Csの性状II



アルカリ金属はイオン化し易く、**金属として存在せず**、
例えば、**食塩(NaCl)のような形態で存在**。

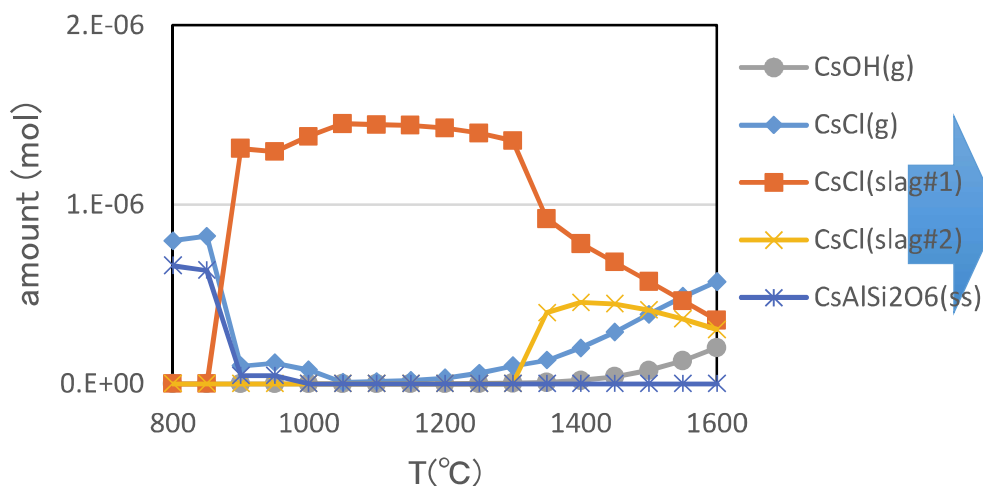
焼却処理におけるCsの化学形態は？

放射性Cs濃度は極めて低いことから (e.g. Cs134の 1 Bq = 2.1×10^{-11} mg)、化学形態まで分析することは困難。
 平衡計算 (最終的な安定状態を計算) により 存在形態 (化学種と状態 (ガスor固体)) を予測



平衡計算による焼却過程のCsの存在形態

- ✓ 焼却過程では、CsClガス と、固体としてCsAlSi₂O₆やスラグ相に存在すると予想



都市ごみ焼却を対象に平衡計算した場合の
800°C以上のCs化合物の生成挙動（1例）

固体のCsの形態は、
CsAlSi₂O₆やスラグであり、
主灰を形成

固体側

気体状のCsCl等
(850~900°C)

気体側

排ガス冷却過程
で凝縮

200°C以下へ冷却

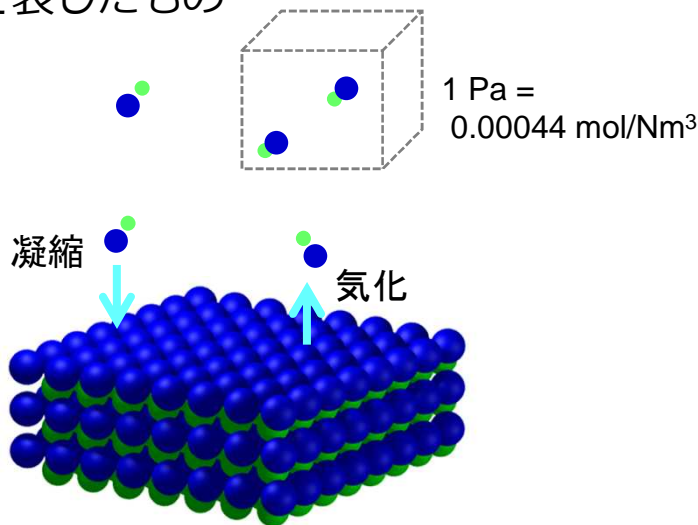
ばいじん（飛灰）の粒子
中に固体として取り込まれる。
気体として残存できる量は？

気体として最大濃度を見積もる

CsClがガスとして残存できる量、もしくはは固体のCsClからCsClガスとして揮発する量を飽和蒸気圧（ガスとしての最大濃度）から評価する。

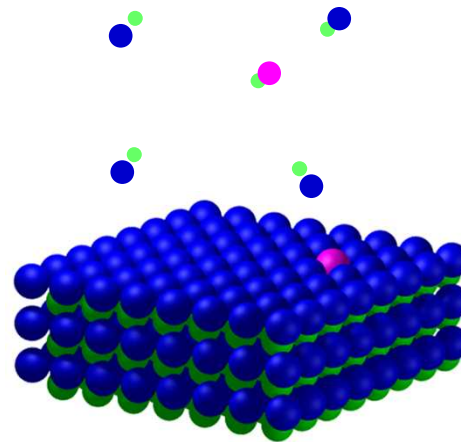
飽和蒸気圧：

単位体積あたりに気体としてその物質が存在できる最大濃度を圧力の単位で表したもの



飽和蒸気圧では固体から気体への気化速度と気体から固体への凝縮速度がつりあう

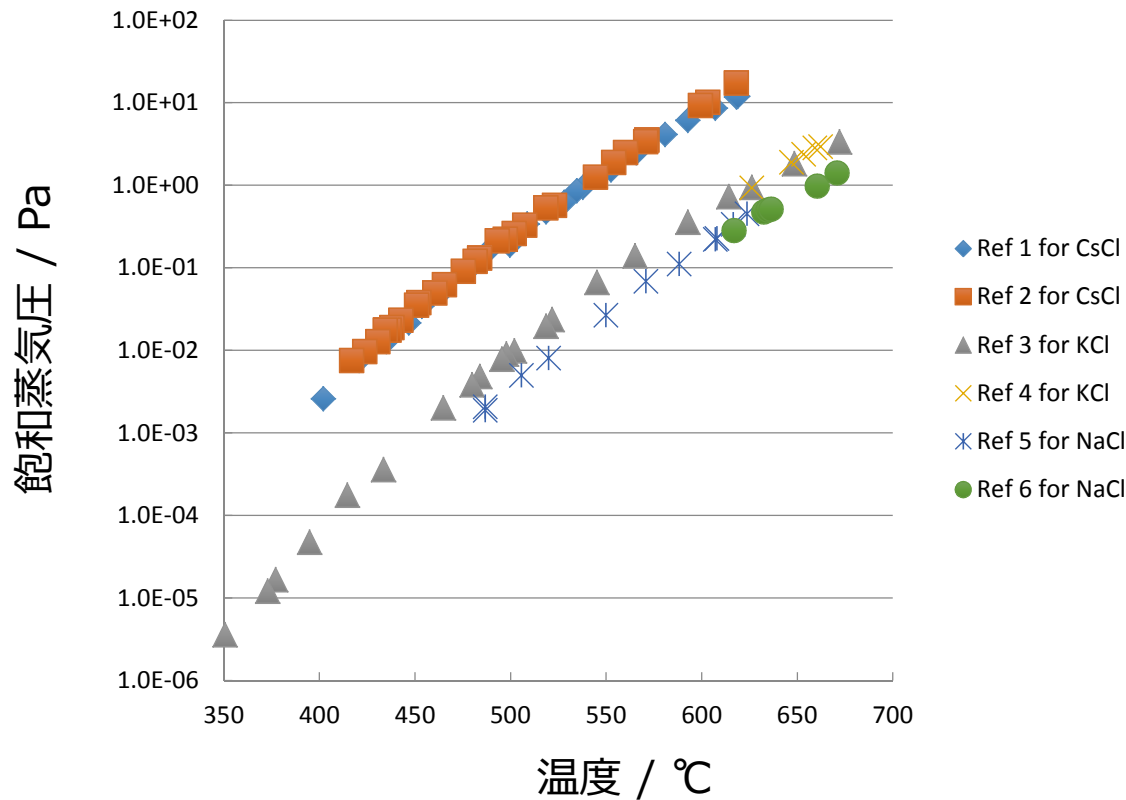
安定Cs10000個に対し放射性Csが1個含まれている場合、放射性CsClの分圧も全CsClの蒸気圧のほぼ1/10000となる



気体CsClのうち、放射性Csを含むものの割合は固体中の比率と同じと考えられる

CsCl等の飽和蒸気圧と温度の関係

- ✓ 400°Cで 10^{-3} Paオーダー、1 Pa=0.00000098気圧、200°C以下のバグフィルター温度域ではかなり低い蒸気圧と予想。



Ref1 Scheer, M.D. and Fine J. *J.Chem.Phys.* **1962**, 36, 1647-1653.; Ref2 Cugin, G.E. and Kimball, G.E. *J.Chem.Phys.* **1948**, 16, 1035-1048.; Ref3 & Ref5 Zimm, B.H. and Mayer, J.E. *J.Chem.Phys.* **1944**, 12, 362-369.; Ref4 & Ref6 Mayer, J.E. and Wintner, I.H. *J.Chem.Phys.* **1938**, 6, 301-306.

BF温度のCsClの飽和蒸気圧

実測値からバグフィルター温度（150～200℃）のCsClの飽和蒸気圧をClausius-Clapeyron式で推算した。

JCP(1962)の文献値*から推定

温度(℃)	温度(K)	飽和蒸気圧(Pa)
25	298.15	2.26E-22
150	423.15	2.81E-12
200	473.15	9.86E-10

*Scheer, M.D. and Fine J. *J.Chem.Phys.* **1962**, 36, 1647-1653.

JCP(1948)の文献値**から推定

温度(℃)	温度(K)	飽和蒸気圧 (Pa)
25	298.15	2.22E-22
150	423.15	3.02E-12
200	473.15	1.08E-09

Cogin, G.E. and Kimball, G.E. *J.Chem.Phys.* **1948, 16, 1035-1048.

- 150℃で $2.8 \sim 3.0 \times 10^{-12}$ Pa

空気中の気体分子全体の3.5京
(10^{16})分の1

- 200℃で $9.9 \times 10^{-10} \sim 1.1 \times 10^{-9}$ Pa

空気中の気体分子全体の100兆
(10^{12})分の1

安定CsのみからなるCsClの値

(参考)

1 Pa = 0.0000098気圧

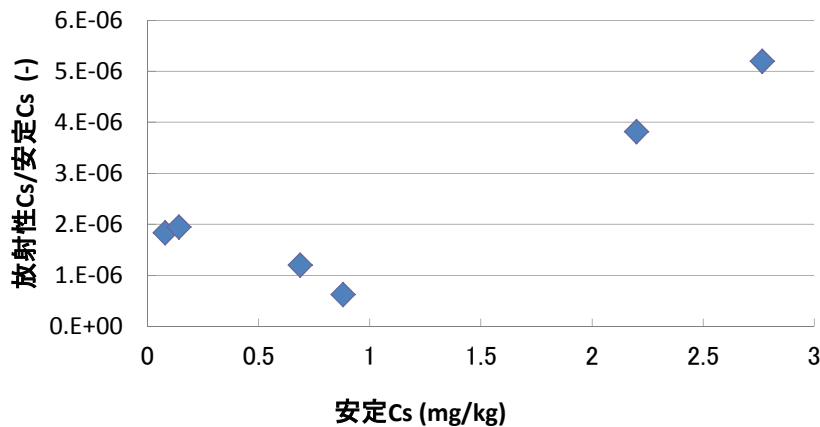
空気中の二酸化炭素 (CO₂)濃度 :

約400ppm = 40 Pa

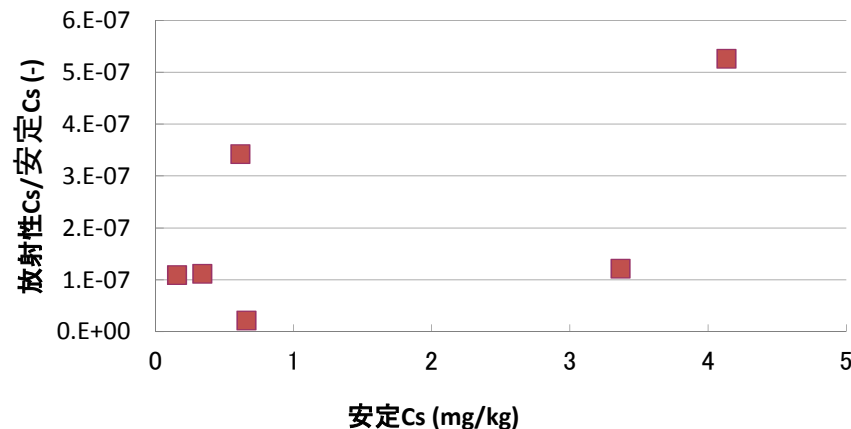
気象庁ウェブ「二酸化炭素濃度の観測結果」より

実際には安定Csと放射性Csが共存

- ✓ 実際の焼却では安定Csと放射性Csが共存しており、その存在比がガス状の存在比に比例すると考えられる。
- ✓ 都市ごみにおける放射性Cs/安定Csの比は $10^{-7} \sim 10^{-6}$ であり、放射性的のCsClの飽和蒸気圧は 10^{-15} Paオーダー以下



A市における都市ごみ及び灰等における安定Csと放射性Csの関係

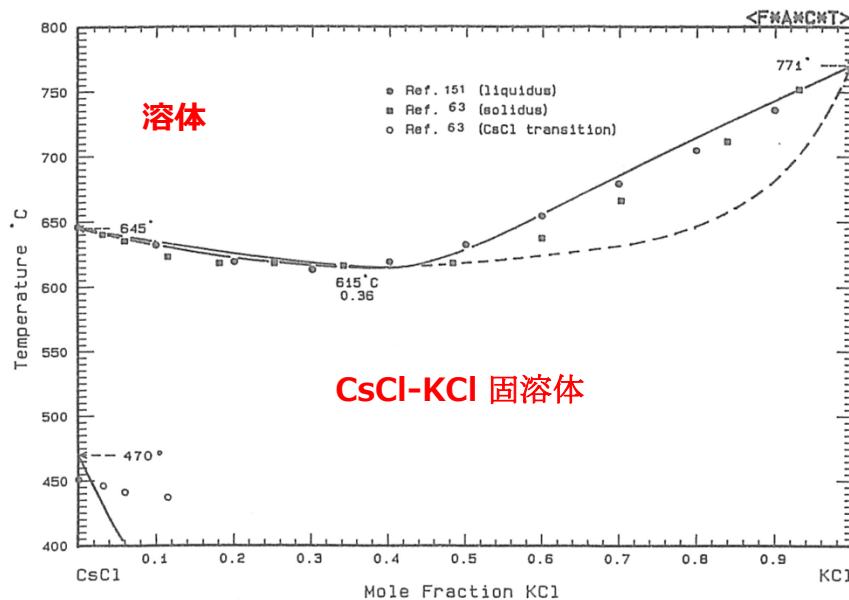


B市における都市ごみ及び灰等における安定Csと放射性Csの関係

- 放射性CsClガスの最大濃度は、空気中に存在する気体分子全体の1000京 \sim 1000垓(10^{20})分の1であり、存在しないと見なせるレベル。
- 200°Cの最大濃度 10^{-15} Pa = 0.0002 Bq/Nm³、ただし¹³⁷CsClとして換算)

他のアルカリ金属塩と一緒に固化する可能性

- ✓ CsClはKClと固溶体を形成する。つまり、CsClはKClとともに固体を形成する。
- ✓ 複数塩で固体を形成すると、飽和蒸気圧もCsとKの組成に影響を受ける。例えば、安定Cs/Kの比は $10^{-5} \sim 10^{-4}$ となり、これもまたCsClの飽和蒸気圧を桁違いに低くさせる可能性。



CsCl-KClの相図

J. Sangster, A.D. Pelton, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, **1987**, 16, 509.

プロット：実測による液相線・固相線および固体CsClの相転移点
線：固溶体と熔融塩の熱力学モデルによる推算結果

都市ごみ中の安定CsとKの含有量(g/kg)

元素	MSW1	MSW2	MSW3	MSW4
K	1.65	1.62	1.24	1.68
Cs	2.0×10^{-4}	4.4×10^{-4}	4.4×10^{-5}	8.4×10^{-5}

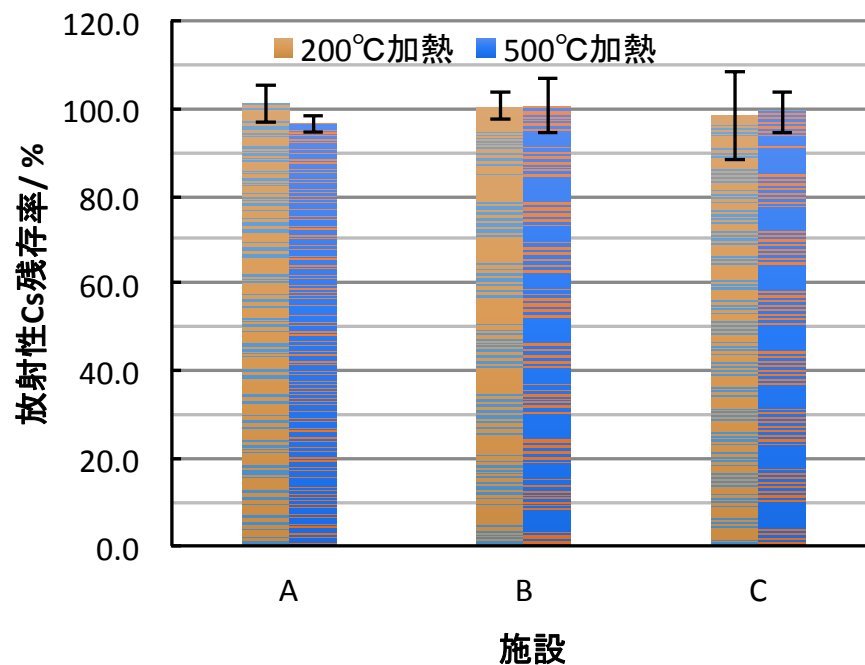
安定Cs/Kの比は $10^{-5} \sim 10^{-4}$ 、
放射性Cs/Kの比は $10^{-12} \sim 10^{-10}$



飽和蒸気圧がより低くなる可能性

200℃と500℃の飛灰の加熱試験

- ✓ 飛灰を200℃及び500℃で20時間加熱しても放射性Cs量が減少しないことを確認



飛灰加熱試験（20時間加熱）後の放射性Csの残存率

BFにおけるガス状のCsClについて

1. 平衡計算により焼却施設内のガス状のセシウムの化学形態は塩化セシウム (CsCl) と予想
2. バグフィルター温度 (150~200 °C) におけるCsClの飽和蒸気圧はそれぞれ 10^{-12} Pa~ 10^{-9} Pa程度、ガスとしての最大濃度は空気中の気体分子全体の100兆 (10^{12}) ~3.5京 (10^{16}) 分の1で、極めて低い。
3. 汚染された都市ごみの放射性Cs/安定Csの比は 10^{-7} ~ 10^{-6} であり、放射性のCsClのガス濃度は2. ガスの濃度のさらに6~7桁ほど低く、放射性CsClのガスは存在しないと見なしてよいレベル。
4. CsClは塩化カリウム (KCl) とともに固体を形成することから、この点においても安定及び放射性CsClの飽和蒸気圧が桁違いに低くなる可能性がある。
5. 飛灰を500°Cで20時間加熱しても放射性Csが揮発することを確認できなかった。