

ダイバータ領域に導入される不純物ガス 由来の放射性生成核種の特性評価

Characterization of radioactive nuclides
generated from impurity seeding gases for
divertor radiative cooling in fusion DEMO

原型炉設計合同特別チーム

Joint Special Design Team for Fusion DEMO

国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構

National Institutes for
Quantum and Radiological Science and Technology

ダイバータ領域に導入される不純物 ガス由来の放射性生成核種の特性評価

原型炉設計合同特別チーム

染谷 洋二、丹治 和拓

平成 30 年 10 月

ダイバータ領域に導入される不純物ガス由来の放射性生成核種の特性格評価

原型炉設計合同特別チーム

染谷 洋二、丹治 和拓

核融合原型炉ではダイバータ領域に集中する熱負荷を緩和するため、不純物ガス（Ne、Ar、Kr、Xe 等）の注入を検討しているが、炉内での中性子照射によりそれらが放射化すると放射性ソースタームとなり、新たな安全上の問題になる可能性がある。本検討では、最新の放射化断面積が整備された高エネルギー粒子誘導放射能計算コード (DCHAIN-SP) を用いて、核融合原型炉の運転条件を想定し不純物ガスから生成される放射性核種の特徴を分析した。検討の結果、Ne から生成される放射性核種においては、安全上問題となる放射能濃度に達しない。Ar については、適用が可能と考えられるが、安全上問題となる Ar-39（半減期：269 年）の発生抑制のため、照射時間を調整する必要がある。一方、Kr、Xe については、生成される放射性生成核種が多く、生成される核種は濃度限度を超えることから、Kr の適用時には照射時間の制限や回収・保管等の対策を施す必要がある。Xe については、昇華によって大気中を拡散しやすく人の感受性の高い放射性核種（ヨウ素同位体、セシウム同位体など）が生成される傾向があり適用は避けるべきである。

Characterization of radioactive nuclides generated from impurity seeding gases for divertor radiative cooling in fusion DEMO

Joint Special Design Team for Fusion DEMO

Youji Someya, Kazuhiro Tanji

Impurity gases such as Ne, Ar, Kr or Xe are injected to the main chamber of a fusion reactor to reduce the heat load to the divertor plate. Part of these noble gases are activated in the divertor area and can potentially be a risk of mobilization and release to the environment in case of an accident. This paper describes the assessment of the radioactive nuclides generated from the impurity gases. In the assessment, the neutron energy spectrum calculated from a three-dimensional MCNP-5 model is used to determine the induced radioactivity of the gases using a DCHAIN-SP code with the nuclear library FENDL/A-2. It is found that under practical irradiation condition, Ne and Ar can be used as impurity gases without a safety constraint. When using Kr, it is necessary to limit the irradiation time in the vacuum vessel, and/or take measures for radioactive decay by the recovery and storage of used activated gases. Xe is not recommended to use as an impurity gas for divertor radiative cooling because of toxic nuclides production.

目次

1.	目的	1
2.	評価方法と計算条件	1
3.	計算結果	3
4.	考察	7
5.	まとめ	32
6.	謝辞	33
7.	参考文献	33

1. 目的

原型炉設計合同特別チーム（以下、特別チーム）で概念検討を進めている核融合原型炉において、ダイバータ領域に集中する熱負荷を緩和するため、不純物ガスを使用することを検討している。炉内に注入した不純物ガスは中性子照射により放射化し、可動性の放射性ソースタームとなるため、新たな安全上の問題となる可能性がある。そのため、原型炉の運転条件での放射化計算により、放射性生成核種の同定とそれらの特性を評価する必要がある。

本稿では、ダイバータ領域に適用が想定される不純物ガス（Ne, Ar, Kr, Xe 等）について、核融合原型炉の運転条件での中性子照射による放射化計算を実施し、生成される放射性核種の同定と照射期間や照射後経過期間に対する放射能濃度を評価した。さらに、日本の安全規制に基づき、安全上問題になる放射性生成核種の取扱や対策を検討した。

2. 評価方法及び計算条件

2.1 評価方法

評価対象である原型炉概念でのダイバータ領域における中性子スペクトルを 3 次元中性子輸送計算コード MCNP-5 [1]により算出し、この中性子スペクトルをインプットとし高エネルギー粒子誘導放射能計算コード DCHAIN-SP [2]を用いて不純物ガス（Ne, Ar, Kr, Xe）の誘導放射能濃度を評価する。

次に、安全上問題となりうる放射性生成核種の検討に際しては、放射性気体廃棄物としての環境放出規制だけでなく、フィルター集塵後に処分することも想定して放射性固体廃棄物の埋設区分の観点でも検討する。

放射性固体廃棄物については、既に整備されている発電所廃棄物における政令濃度区分値 [3]や処分濃度上限値 [4]を参考にして検討する。一方、放射性気体廃棄物については、排気中又は空気中の濃度限度 [5]の値（排気中又は空気中の濃度限度の値には、様々な化学形態があることから、その中でも一番保守的な値）を参考にして検討する。

2.2 不純物ガス密度

核融合原型炉のダイバータ領域に注入する不純物ガスの密度は、ダイバータプラズマシミュレーションコード SONIC の評価結果を用いる。計算に用いた不純物ガス密度を表 2-1 に示す。

表 2-1 不純物ガスの密度

不純物ガス元素	密度 (1/m ³)
Ne	5.0 × 10 ¹⁹
Ar	1.0 × 10 ¹⁹
Kr	3.3 × 10 ¹⁸
Xe	3.3 × 10 ¹⁸

2.3 使用コード及び核反応断面積

1) 中性子スペクトル計算

- ・ 三次元中性子・光子輸送コード：MCNP-5
- ・ 核反応断面積：FENDL-2.1 [6]

2) 放射化計算

- ・ 高エネルギー粒子誘導放射能計算コード：DCHAIN-SP
- ・ 核反応断面積：FENDL/A-2 [7]

2.4 中性子スペクトル

高エネルギー粒子誘導放射能計算コード DCHAIN-SP のインプットデータとして使用する中性子スペクトルは、三次元中性子・光子輸送コード MCNP-5 にて原型炉の3次元モデルのダイバータ領域内の中性子スペクトルを用いた。その際、MCNP-5 によって、中性子1個当たりで算出した中性子スペクトルに、核融合出力1.5GW に相当する中性子発生数 (5.33×10^{20} n/sec) を乗じた中性子スペクトルを使用した。図2-1に評価に使用した中性子スペクトルを示す。

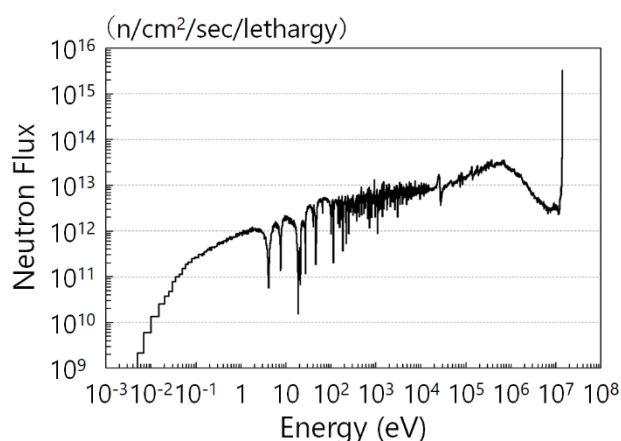


図2-1 ダイバータ領域における中性子スペクトル

2.5 照射期間

ダイバータ領域に不純物ガスを注入後、排気されるまでの時間は約100秒程度であるが、排気ガスから不純物ガスを分離した後に再度注入して絶えず循環させることを想定する。そのため、放射化計算に設定する照射時間は、安全側の見積もりとして1年間の連続照射とした。

2.6 評価時間（計算結果出力時間）

連続照射中に不純物ガスから生成される放射性核種の種類と濃度を評価するために、照射開始100秒後、1時間後、8時間後、1日後、1週間後(7日後)、1か月後(30日後)、3か月後(90日後)、半年後(0.5年後)、及び1年後として、中性子照射により生成される放射性核種の誘導放射能濃度を出力した。また、放射化ガスを集塵したフィルターを放射性固体廃棄物として処分することを鑑み、照射(放電)終了直後、照射終了1日後、1週間後、1か月後、1年後、3年後、5年後、10年後、30年後、及び50年経過後の誘導放射能濃度を出力した。

3. 計算結果

3.1 ネオン (Ne) 由来の放射性生成核種

Ne の天然割合 (Ne-20(90.48%)、Ne-21(0.3%)、Ne-22(9.3%)) をインプット条件とし、核反応により生成される核種を評価時間ごとに表 3-1 (生成量が支配的な 10 核種) に示す。さらに、ダイバータ領域に滞留する時間 (照射時間) を 100 秒後、1 時間後、8 時間後、1 日後、1 週間後 (7 日後)、1 か月後 (30 日後)、3 か月後 (90 日後)、半年後 (0.5 年後)、1 年後とした時の Ne の放射性生成核種 (生成量が支配的な 10 核種) を表 3-2 に示す。

表 3-1 1 年間照射後の Ne 由来の放射性生成核種

No	照射直後		照射終了1日後		照射終了1週間後		照射終了1か月後		照射終了1年後	
	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)
1	F-20	1.3E+02	H-3	5.1E-04	H-3	5.0E-04	H-3	5.0E-04	H-3	4.8E-04
2	O-19	3.0E+00	Na-24	2.9E-06	C-14	1.1E-06	C-14	1.1E-06	C-14	1.1E-06
3	F-22	2.0E+00	C-14	1.1E-06	Na-22	3.7E-07	Na-22	3.7E-07	Na-22	2.9E-07
4	F-21	8.3E-01	Na-22	3.7E-07	Na-24	3.7E-09	Be-10	2.4E-13	Be-10	2.4E-13
5	Ne-23	2.7E-01	F-18	3.7E-07	Be-10	2.4E-13	Na-24	3.0E-20		
6	N-16	1.6E-02	Be-10	2.4E-13						
7	F-18	3.3E-03								
8	N-17	9.8E-04								
9	H-3	5.1E-04								
10	Na-24	8.7E-06								
No	照射終了3年後		照射終了5年後		照射終了10年後		照射終了30年後		照射終了50年後	
	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)
1	H-3	4.3E-04	H-3	3.8E-04	H-3	2.9E-04	H-3	9.4E-05	H-3	3.0E-05
2	C-14	1.1E-06	C-14	1.1E-06	C-14	1.1E-06	C-14	1.1E-06	C-14	1.1E-06
3	Na-22	1.7E-07	Na-22	9.9E-08	Na-22	2.6E-08	Na-22	1.3E-10	Na-22	6.1E-13
4	Be-10	2.4E-13	Be-10	2.4E-13	Be-10	2.4E-13	Be-10	2.4E-13	Be-10	2.4E-13
5										
6										
7										
8										
9										
10										

表 3-2 ダイバータ領域に滞留する時間 (照射時間) ごとの Ne 由来の放射性生成核種

No	照射100秒後		照射1時間後		照射8時間後		照射1日後		照射1週間後	
	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)
1	F-20	1.3E+02	F-20	1.3E+02	F-20	1.3E+02	F-20	1.3E+02	F-20	1.3E+02
2	O-19	2.8E+00	O-19	3.0E+00	O-19	3.0E+00	O-19	3.0E+00	O-19	3.0E+00
3	F-22	2.0E+00	F-22	2.0E+00	F-22	2.0E+00	F-22	2.0E+00	F-22	2.0E+00
4	F-21	8.3E-01	F-21	8.3E-01	F-21	8.3E-01	F-21	8.3E-01	F-21	8.3E-01
5	Ne-23	2.2E-01	Ne-23	2.7E-01	Ne-23	2.7E-01	Ne-23	2.7E-01	Ne-23	2.7E-01
6	N-16	4.5E-08	N-16	1.8E-06	N-16	1.4E-05	N-16	4.3E-05	N-16	3.0E-04
7	N-17	2.9E-09	N-17	1.1E-07	F-18	2.1E-06	F-18	8.0E-06	F-18	6.2E-05
8	H-3	1.1E-09	F-18	6.3E-08	N-17	9.0E-07	N-17	2.7E-06	N-17	1.9E-05
9	F-18	5.4E-11	H-3	3.9E-08	H-3	3.1E-07	H-3	9.4E-07	H-3	6.6E-06
10	C-15	2.1E-11	C-15	7.8E-10	C-15	6.2E-09	C-15	1.9E-08	Na-24	1.5E-07
No	照射1か月後		照射3か月後		照射半年後		照射1年後			
	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)		
1	F-20	1.3E+02	F-20	1.28E+02	F-20	1.3E+02	F-20	1.3E+02		
2	O-19	3.0E+00	O-19	3.03E+00	O-19	3.0E+00	O-19	3.0E+00		
3	F-22	2.0E+00	F-22	1.98E+00	F-22	2.0E+00	F-22	2.0E+00		
4	F-21	8.3E-01	F-21	8.26E-01	F-21	8.3E-01	F-21	8.3E-01		
5	Ne-23	2.7E-01	Ne-23	2.66E-01	Ne-23	2.7E-01	Ne-23	2.7E-01		
6	N-16	1.3E-03	N-16	3.87E-03	N-16	7.9E-03	N-16	1.6E-02		
7	F-18	2.7E-04	F-18	8.11E-04	F-18	1.6E-03	F-18	3.3E-03		
8	N-17	8.1E-05	N-17	2.42E-04	N-17	4.9E-04	N-17	9.8E-04		
9	H-3	2.9E-05	H-3	9.46E-05	H-3	2.1E-04	H-3	5.1E-04		
10	Na-24	7.0E-07	Na-24	2.14E-06	Na-24	4.4E-06	Na-24	8.8E-06		

3.2 アルゴン (Ar) 由来の放射性生成核種

Ar の天然割合 (Ar-36(0.34%)、Ar-38(0.06%)、Ar-40(99.6%)) をインプット条件とし、核反応により生成される核種を評価時間ごとに表 3-3 (生成量が支配的な 10 核種) に示す。さらに、ダイバータ領域に滞留する時間 (照射時間) を 100 秒後、1 時間後、8 時間後、1 日後、1 週間後 (7 日後)、1 か月後 (30 日後)、3 か月後 (90 日後)、半年後 (0.5 年後)、1 年後とした時の Ar の放射性生成核種 (生成量が支配的な 10 核種) を表 3-4 に示す。

表 3-3 1 年間照射後の Ar 由来の放射性生成核種

No	照射直後		照射終了1日後		照射終了1週間後		照射終了1か月後		照射終了1年後	
	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)
1	Ar-41	4.5E+01	Ar-39	2.8E+00	Ar-39	2.8E+00	Ar-39	2.8E+00	Ar-39	2.8E+00
2	Cl-40	2.2E+01	Ar-37	9.8E-01	Ar-37	8.7E-01	Ar-37	5.5E-01	S-35	1.4E-02
3	S-37	1.8E+01	S-35	2.5E-01	S-35	2.4E-01	S-35	2.0E-01	Ar-37	7.3E-04
4	Ar-39	2.8E+00	Ar-41	5.0E-03	P-33	4.8E-04	H-3	3.7E-04	H-3	3.5E-04
5	Cl-39	2.1E+00	K-42	3.5E-03	P-32	3.7E-04	P-33	2.5E-04	Cl-36	5.2E-06
6	Ar-37	1.0E+00	P-33	5.6E-04	H-3	3.7E-04	P-32	1.2E-04	P-32	3.3E-07
7	S-35	2.5E-01	P-32	5.0E-04	Cl-36	5.2E-06	Cl-36	5.2E-06	Si-32	3.3E-07
8	Cl-38	1.5E-01	H-3	3.7E-04	K-42	1.1E-06	Si-32	3.3E-07	P-33	2.7E-08
9	Cl-38m	6.2E-02	Cl-36	5.2E-06	Si-32	3.3E-07	K-42	5.6E-09	K-42	5.5E-09
10	K-42	1.4E-02	Si-32	3.3E-07	Ar-42	5.6E-09	Ar-42	5.6E-09	Ar-42	5.5E-09
No	照射終了3年後		照射終了5年後		照射終了10年後		照射終了30年後		照射終了50年後	
	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)
1	Ar-39	2.8E+00	Ar-39	2.8E+00	Ar-39	2.7E+00	Ar-39	2.6E+00	Ar-39	2.5E+00
2	H-3	3.1E-04	H-3	2.8E-04	H-3	2.1E-04	H-3	6.9E-05	H-3	2.2E-05
3	S-35	4.3E-05	Cl-36	5.2E-06	Cl-36	5.2E-06	Cl-36	5.2E-06	Cl-36	5.2E-06
4	Cl-36	5.2E-06	P-32	3.2E-07	P-32	3.2E-07	P-32	2.9E-07	P-32	2.7E-07
5	P-32	3.3E-07	Si-32	3.2E-07	Si-32	3.2E-07	Si-32	2.9E-07	Si-32	2.7E-07
6	Si-32	3.3E-07	S-35	1.3E-07	K-42	4.5E-09	K-42	3.0E-09	K-42	1.9E-09
7	K-42	5.2E-09	K-42	5.0E-09	Ar-42	4.5E-09	Ar-42	3.0E-09	Ar-42	1.9E-09
8	Ar-42	5.2E-09	Ar-42	5.0E-09	Ca-41	7.6E-12	Ca-41	7.6E-12	Ca-41	7.6E-12
9	Ar-37	3.9E-10	Ca-41	7.6E-12	K-40	3.1E-12	K-40	3.1E-12	K-40	3.1E-12
10	Ca-41	7.6E-12	K-40	3.1E-12	S-35	6.9E-14	Al-26	1.0E-20	Al-26	1.0E-20

表 3-4 ダイバータ領域に滞留する時間 (照射時間) ごとの Ar 由来の放射性生成核種

No	照射100秒後		照射1時間後		照射8時間後		照射1日後		照射1週間後	
	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)
1	Cl-40	1.3E+01	Cl-40	2.2E+01	Ar-41	4.3E+01	Ar-41	4.5E+01	Ar-41	4.5E+01
2	S-37	3.8E+00	S-37	1.8E+01	Cl-40	2.2E+01	Cl-40	2.2E+01	Cl-40	2.2E+01
3	Ar-41	4.7E-01	Ar-41	1.4E+01	S-37	1.8E+01	S-37	1.8E+01	S-37	1.8E+01
4	Cl-38m	4.3E-02	Cl-39	1.1E+00	Cl-39	2.0E+00	Cl-39	2.0E+00	Cl-39	2.0E+00
5	Cl-39	4.2E-02	Cl-38	6.0E-02	Cl-38	8.9E-02	Cl-38	8.9E-02	Ar-37	1.3E-01
6	Cl-38	2.7E-03	Cl-38m	4.3E-02	Cl-38m	4.3E-02	Cl-38m	4.3E-02	Cl-38	9.0E-02
7	Ar-37	2.3E-05	Ar-37	8.3E-04	Ar-37	6.6E-03	Ar-37	2.0E-02	Ar-39	5.4E-02
8	Ar-39	8.9E-06	Ar-39	3.2E-04	Ar-39	2.6E-03	Ar-39	7.7E-03	Cl-38m	4.3E-02
9	S-35	1.4E-06	S-35	4.9E-05	S-35	3.9E-04	S-35	1.2E-03	S-35	8.0E-03
10	Cl-34	9.8E-07	Cl-34	1.4E-06	Cl-34	1.6E-06	K-42	1.4E-05	K-42	2.3E-04
No	照射1か月後		照射3か月後		照射半年後		照射1年後			
	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)
1	Ar-41	4.5E+01	Ar-41	4.51E+01	Ar-41	4.5E+01	Ar-41	4.5E+01		
2	Cl-40	2.2E+01	Cl-40	2.19E+01	Cl-40	2.2E+01	Cl-40	2.2E+01		
3	S-37	1.8E+01	S-37	1.82E+01	S-37	1.8E+01	S-37	1.8E+01		
4	Cl-39	2.0E+00	Cl-39	2.05E+00	Cl-39	2.1E+00	Ar-39	2.8E+00		
5	Ar-37	4.5E-01	Ar-37	8.35E-01	Ar-39	1.4E+00	Cl-39	2.1E+00		
6	Ar-39	2.3E-01	Ar-39	6.94E-01	Ar-37	9.7E-01	Ar-37	1.0E+00		
7	Cl-38	9.4E-02	Cl-38	1.04E-01	S-35	1.5E-01	S-35	2.5E-01		
8	Cl-38m	4.4E-02	S-35	8.72E-02	Cl-38	1.2E-01	Cl-38	1.5E-01		
9	S-35	3.3E-02	Cl-38m	4.76E-02	Cl-38m	5.3E-02	Cl-38m	6.2E-02		
10	K-42	1.1E-03	K-42	3.36E-03	K-42	6.9E-03	K-42	1.4E-02		

3.3 クリプトン (Kr) 由来の放射性生成核種

Kr の天然割合 (Kr-78(0.36%)、Kr-80(2.29%)、Kr-82(11.59%)、Kr-83(11.50%)、Kr-84(56.99%)、Kr-86(17.28%)) をインプット条件とし、核反応により生成される核種を評価時間ごとに表 3-5 (生成量が支配的な 10 核種) に示す。さらに、ダイバータ領域に滞留する時間 (照射時間) を 100 秒後、1 時間後、8 時間後、1 日後、1 週間後 (7 日後)、1 か月後 (30 日後)、3 か月後 (90 日後)、半年後 (0.5 年後)、1 年後とした時の Kr の放射性生成核種 (生成量が支配的な 10 核種) を表 3-6 に示す。

表 3-5 1 年間照射後の Kr 由来の放射性生成核種

No	照射直後		照射終了1日後		照射終了1週間後		照射終了1か月後		照射終了1年後	
	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)
1	Kr-83m	1.3E+03	Kr-85	3.5E+01	Kr-85	3.5E+01	Kr-85	3.5E+01	Kr-85	3.3E+01
2	Kr-85m	6.7E+02	Kr-79	2.8E+01	Kr-79	1.6E+00	Rb-86	2.3E-01	Se-75	2.6E-02
3	Kr-81m	1.7E+02	Kr-85m	1.6E+01	Rb-86	5.4E-01	Rb-84	2.2E-01	H-3	5.2E-03
4	Kr-79	4.5E+01	Br-82	3.0E+00	Br-77	4.9E-01	Se-75	1.8E-01	Kr-81	1.6E-03
5	Kr-85	3.5E+01	Br-77	2.8E+00	Rb-84	3.5E-01	H-3	5.5E-03	Rb-84	1.8E-04
6	Kr-79m	1.3E+01	Rb-86	6.7E-01	Se-75	2.0E-01	Kr-81	1.6E-03	Sr-85	3.1E-06
7	Br-83	5.5E+00	Rb-84	4.0E-01	Br-82	1.8E-01	Br-77	6.0E-04	Rb-83	2.2E-06
8	Br-82	4.8E+00	Se-75	2.1E-01	H-3	5.5E-03	Sr-85	1.1E-04	Kr-83m	1.8E-06
9	Br-77	3.7E+00	Kr-83m	1.7E-01	Kr-81	1.6E-03	As-74	3.5E-05	Rb-86	8.7E-07
10	Br-84m	3.5E+00	Br-80	1.6E-02	Se-77m	5.9E-04	Rb-83	3.2E-05	As-73	7.1E-07
No	照射終了3年後		照射終了5年後		照射終了10年後		照射終了30年後		照射終了50年後	
	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)
1	Kr-85	2.9E+01	Kr-85	2.6E+01	Kr-85	1.9E+01	Kr-85	5.1E+00	Kr-85	1.4E+00
2	H-3	4.7E-03	H-3	4.2E-03	H-3	3.2E-03	Kr-81	1.6E-03	Kr-81	1.6E-03
3	Kr-81	1.6E-03	Kr-81	1.6E-03	Kr-81	1.6E-03	H-3	1.0E-03	H-3	3.3E-04
4	Se-75	3.7E-04	Se-75	5.4E-06	Se-79	1.5E-07	Se-79	1.5E-07	Se-79	1.5E-07
5	Se-79	1.5E-07	Se-79	1.5E-07	Se-75	1.4E-10	Rb-87	4.0E-11	Rb-87	4.0E-11
6	Rb-83	6.1E-09	Rb-87	4.0E-11	Rb-87	4.0E-11	Y-90	2.9E-16	Y-90	1.8E-16
7	Kr-83m	5.0E-09	Rb-83	1.7E-11	Y-90	4.6E-16	Sr-90	2.9E-16	Sr-90	1.8E-16
8	Ge-73m	1.3E-09	Kr-83m	1.4E-11	Sr-90	4.6E-16	Ni-63	9.3E-19	Ni-63	8.1E-19
9	As-73	1.3E-09	Ge-73m	2.4E-12	Rb-83	7.2E-18	Br-82	4.9E-23	Br-82	4.9E-23
10	Sr-85	1.2E-09	As-73	2.4E-12	Kr-83m	5.9E-18	Se-82	4.9E-23	Se-82	4.9E-23

表 3-6 ダイバータ領域に滞留する時間 (照射時間) ごとの Kr 由来の放射性生成核種

No	照射100秒後		照射1時間後		照射8時間後		照射1日後		照射1週間後	
	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)
1	Kr-81m	1.7E+02	Kr-83m	4.3E+02	Kr-83m	1.3E+03	Kr-83m	1.4E+03	Kr-83m	1.4E+03
2	Kr-83m	1.4E+01	Kr-81m	1.7E+02	Kr-85m	4.8E+02	Kr-85m	6.5E+02	Kr-85m	6.7E+02
3	Kr-79m	9.5E+00	Kr-85m	9.6E+01	Kr-81m	1.7E+02	Kr-81m	1.7E+02	Kr-81m	1.7E+02
4	Kr-85m	2.9E+00	Kr-79m	1.3E+01	Kr-79m	1.3E+01	Kr-79	1.7E+01	Kr-79	4.4E+01
5	Br-79m	1.1E+00	Br-84m	3.5E+00	Kr-79	6.6E+00	Kr-79m	1.3E+01	Kr-79m	1.3E+01
6	Br-86	1.0E+00	Br-84	2.4E+00	Br-83	4.9E+00	Br-83	5.5E+00	Br-83	5.5E+00
7	Br-84m	6.1E-01	Br-82m	2.4E+00	Br-84m	3.5E+00	Br-84m	3.5E+00	Br-82	4.6E+00
8	Br-82m	4.1E-01	Br-77m	1.5E+00	Br-84	3.2E+00	Br-84	3.2E+00	Br-84m	3.5E+00
9	Br-77m	2.5E-01	Br-78	1.5E+00	Kr-87	2.7E+00	Kr-87	2.8E+00	Br-77	3.3E+00
10	Br-78	2.4E-01	Br-86	1.5E+00	Br-82m	2.4E+00	Br-82m	2.4E+00	Br-84	3.2E+00
No	照射1か月後		照射3か月後		照射半年後		照射1年後			
	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)		
1	Kr-83m	1.4E+03	Kr-83m	1.35E+03	Kr-83m	1.4E+03	Kr-83m	1.3E+03		
2	Kr-85m	6.7E+02	Kr-85m	6.71E+02	Kr-85m	6.7E+02	Kr-85m	6.7E+02		
3	Kr-81m	1.7E+02	Kr-81m	1.70E+02	Kr-81m	1.7E+02	Kr-81m	1.7E+02		
4	Kr-79	4.5E+01	Kr-79	4.52E+01	Kr-79	4.5E+01	Kr-79	4.5E+01		
5	Kr-79m	1.3E+01	Kr-79m	1.27E+01	Kr-85	1.8E+01	Kr-85	3.5E+01		
6	Br-83	5.5E+00	Kr-85	8.90E+00	Kr-79m	1.3E+01	Kr-79m	1.3E+01		
7	Br-82	4.8E+00	Br-83	5.47E+00	Br-83	5.5E+00	Br-83	5.5E+00		
8	Br-77	3.8E+00	Br-82	4.82E+00	Br-82	4.8E+00	Br-82	4.8E+00		
9	Br-84m	3.5E+00	Br-77	3.76E+00	Br-77	3.8E+00	Br-77	3.7E+00		
10	Br-84	3.2E+00	Br-84m	3.51E+00	Br-84m	3.5E+00	Br-84m	3.5E+00		

3.4 キセノン (Xe) 由来の放射性生成核種

Xe の天然割合 (Xe-124 (0.1%)、Xe-126 (0.1%)、Xe-128 (1.9%)、Xe-129 (26.4%)、Xe-130 (4.1%)、Xe-131 (21.2%)、Xe-132 (26.9%)、Xe-134 (10.4%)、Xe-136 (8.9%)) をインプット条件とし、核反応により生成される核種を評価時間ごとに表 3-7 (生成量が支配的な 10 核種) に示す。さらに、ダイバータ領域に滞留する時間 (照射時間) を 100 秒後、1 時間後、8 時間後、1 日後、1 週間後 (7 日後)、1 か月後 (30 日後)、3 か月後 (90 日後)、半年後 (0.5 年後)、1 年後とした時の Xe の放射性生成核種 (生成量が支配的な 10 核種) を表 3-8 に示す。

表 3-7 1 年間照射後の Xe 由来の放射性生成核種

No	照射直後		照射終了1日後		照射終了1週間後		照射終了1か月後		照射終了1年後	
	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)
1	Xe-131m	7.0E+02	Xe-131m	6.6E+02	Xe-131m	4.6E+02	Xe-131m	1.2E+02	I-125	2.3E+00
2	Xe-133	4.0E+02	Xe-133	3.6E+02	Xe-133	1.8E+02	I-125	1.1E+02	Cs-134	9.4E-01
3	Xe-135	2.2E+02	Xe-129m	1.7E+02	I-125	1.5E+02	Xe-127	3.2E+01	Xe-127	5.5E-02
4	Xe-125	1.9E+02	I-125	1.6E+02	Xe-129m	1.0E+02	Xe-129m	1.7E+01	Cs-137	4.9E-02
5	Xe-129m	1.8E+02	Xe-133m	9.0E+01	Xe-127	5.0E+01	Xe-133	9.3E+00	Ba-137m	4.6E-02
6	I-125	1.6E+02	Xe-125	7.1E+01	I-126	2.2E+01	I-126	6.6E+00	H-3	4.3E-03
7	Xe-133m	1.2E+02	Xe-127	5.6E+01	Xe-133m	1.3E+01	Cs-134	1.3E+00	Te-125m	2.6E-03
8	Xe-135m	1.0E+02	Xe-135	3.6E+01	Cs-134	1.3E+00	Cs-136	2.0E-01	Te-127m	6.9E-04
9	Xe-127	5.7E+01	I-126	3.1E+01	I-131	1.0E+00	Te-125m	1.5E-01	Te-127	6.8E-04
10	Xe-134m	5.0E+01	I-131	1.7E+00	Cs-136	6.6E-01	I-131	1.4E-01	Te-121m	1.6E-04
No	照射終了3年後		照射終了5年後		照射終了10年後		照射終了30年後		照射終了50年後	
	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)
1	Cs-134	4.8E-01	Cs-134	2.4E-01	Cs-134	4.6E-02	Cs-137	2.5E-02	Cs-137	1.6E-02
2	Cs-137	4.7E-02	Cs-137	4.4E-02	Cs-137	4.0E-02	Ba-137m	2.4E-02	Ba-137m	1.5E-02
3	Ba-137m	4.4E-02	Ba-137m	4.2E-02	Ba-137m	3.7E-02	H-3	8.5E-04	H-3	2.8E-04
4	H-3	3.9E-03	H-3	3.5E-03	H-3	2.6E-03	Cs-134	5.5E-05	Cs-135	3.9E-05
5	I-125	4.6E-04	Cs-135	3.9E-05	Cs-135	3.9E-05	Cs-135	3.9E-05	Ba-133	3.8E-07
6	Cs-135	3.9E-05	Sb-125	2.0E-05	Sb-125	5.7E-06	Ba-133	1.4E-06	I-129	7.1E-08
7	Sb-125	3.3E-05	Ba-133	7.4E-06	Ba-133	5.3E-06	I-129	7.1E-08	Cs-134	6.7E-08
8	Ba-133	8.4E-06	Te-125m	4.8E-06	Te-125m	1.4E-06	Sb-125	3.8E-08	Sn-121m	3.6E-09
9	Te-125m	8.4E-06	Te-121m	2.3E-07	I-129	7.1E-08	Te-125m	9.0E-09	Sn-121	2.8E-09
10	Te-127m	6.6E-06	Te-121	2.3E-07	Sn-121m	6.0E-09	Sn-121m	4.6E-09	Sb-125	2.5E-10

表 3-8 ダイバータ領域に滞留する時間 (照射時間) ごとの Xe による放射性生成核種

No	照射100秒後		照射1時間後		照射8時間後		照射1日後		照射1週間後	
	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)
1	Xe-134m	5.0E+01	Xe-135m	9.4E+01	Xe-135	1.0E+02	Xe-135	1.9E+02	Xe-131m	2.4E+02
2	Xe-125m	2.6E+01	Xe-134m	5.0E+01	Xe-135m	1.0E+02	Xe-125	1.4E+02	Xe-135	2.2E+02
3	Xe-135m	7.3E+00	Xe-125m	3.8E+01	Xe-125	6.1E+01	Xe-135m	1.0E+02	Xe-125	2.2E+02
4	Xe-127m	6.2E+00	Xe-135	1.4E+01	Xe-134m	5.0E+01	Xe-134m	5.0E+01	Xe-133	2.1E+02
5	Xe-137	5.7E-01	Xe-127m	9.8E+00	Xe-125m	3.8E+01	Xe-131m	4.0E+01	Xe-133m	1.1E+02
6	Xe-135	2.8E-01	Xe-125	8.8E+00	Xe-131m	1.4E+01	Xe-125m	3.8E+01	Xe-135m	1.0E+02
7	Xe-125	2.3E-01	Xe-137	2.2E+00	Xe-133m	1.2E+01	Xe-133	3.6E+01	Xe-129m	7.5E+01
8	I-128	6.0E-02	Xe-131m	1.7E+00	Xe-133	1.2E+01	Xe-133m	3.3E+01	Xe-134m	5.0E+01
9	Xe-131m	4.7E-02	Xe-133m	1.6E+00	Xe-127m	9.8E+00	Xe-129m	1.3E+01	Xe-125m	3.7E+01
10	Xe-133m	4.5E-02	Xe-133	1.5E+00	Xe-129m	4.6E+00	Xe-127m	9.8E+00	I-125	1.5E+01
No	照射1か月後		照射3か月後		照射半年後		照射1年後			
	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)	核種	放射能濃度 (Bq/cc)		
1	Xe-131m	5.8E+02	Xe-131m	6.95E+02	Xe-131m	7.0E+02	Xe-131m	7.0E+02		
2	Xe-133	3.9E+02	Xe-133	3.97E+02	Xe-133	4.0E+02	Xe-133	4.0E+02		
3	Xe-135	2.2E+02	Xe-135	2.20E+02	Xe-135	2.2E+02	Xe-135	2.2E+02		
4	Xe-125	2.2E+02	Xe-125	2.12E+02	Xe-125	2.0E+02	Xe-125	1.9E+02		
5	Xe-129m	1.6E+02	Xe-129m	1.78E+02	Xe-129m	1.8E+02	Xe-129m	1.8E+02		
6	Xe-133m	1.2E+02	I-125	1.27E+02	I-125	1.6E+02	I-125	1.6E+02		
7	Xe-135m	1.0E+02	Xe-133m	1.23E+02	Xe-133m	1.2E+02	Xe-133m	1.2E+02		
8	I-125	6.1E+01	Xe-135m	1.01E+02	Xe-135m	1.0E+02	Xe-135m	1.0E+02		
9	Xe-134m	5.0E+01	Xe-134m	4.96E+01	Xe-127	5.5E+01	Xe-127	5.7E+01		
10	Xe-125m	3.7E+01	Xe-127	4.63E+01	Xe-134m	5.0E+01	Xe-134m	5.0E+01		

4. 考察

不純物ガス (Ne, Ar, Kr, Xe) の放射化により生成する核種において、安全上問題となりうる核種について検討した。

放射性固体廃棄物については、発電所廃棄物における政令濃度区分値や処分濃度上限値に規定されている核種が生成されているかを確認した。Ne からは C-14、Ar からは Cl-36、Kr からは Sr-90、Xe からは I-129、Cs-137 が該当するが、放射能濃度が低いため問題にならないことが判明した。

放射性気体廃棄物については、Ne からは問題になる核種はないが、Ar, Kr, Xe からは、放射能濃度が高い核種があり、そのままでは環境中に放出できないことが判明した。

以下、不純物ガスごとに放射性生成核種の特徴を纏める。

4.1 Ne 由来の放射性生成核種について

表 3-1 より、一年間照射後から各冷却期間後 (評価時間) での放射能濃度が上位 10 核種に入る核種に対して、照射直後から照射終了 50 年後までの放射能濃度変化を図 5-1 に示す。照射直後に生成量の多い F-20 (半減期: 11.07 秒)、F-22 (半減期: 4.23 秒)、F-21 (半減期: 4.158 秒)、O-19 (半減期: 26.88 秒) は、半減期が秒単位であるために、図 4-1 に表示されないほど減衰している。F-18 (半減期: 109.77 分) は、照射直後に生成量が多いものの、照射終了 1 日にはほぼ無くなり、H-3 (半減期: 12.32 年) が支配的な核種となる。また、C-14 (半減期: 5700 年) と Na-22 (半減期: 2.6027 年) は、半減期が長いために残存している。フィルター集塵後に放射性固体廃棄物として処分する際に、安全上問題となりうる放射性生成核種には政令濃度区分値、処分濃度上限値に規定されている C-14 が挙げられるが、放射能濃度が 10^{-6} Bq/cm³ オーダーと低く安全上問題とならないことが分かった。

放射性気体廃棄物として安全上問題となりうる放射性生成核種を検討するために、排気中又は空気中の濃度限度と評価時間 (照射 100 秒後、照射 1 時間後、照射 8 時間後、照射 1 日後、照射 1 週間後、照射 1 か月後、照射 3 か月後、照射半年後、照射 1 年後) に生成される核種を比較し、濃度限度を超えている核種を抽出した。表 4-1 に濃度限度を超えている核種を示す。

照射 100 秒後時点で濃度限度を超えている核種は、O-19 (半減期: 26.88 秒)、F-20 (半減期: 11.07 秒)、F-21 (半減期: 4.158 秒)、F-22 (半減期: 4.23 秒)、Ne-23 (半減期: 37.24 秒) の 4 核種である。特に F-20 は、濃度限度の約 120 万倍と高く、次に F-22 が約 2 万倍と高い。

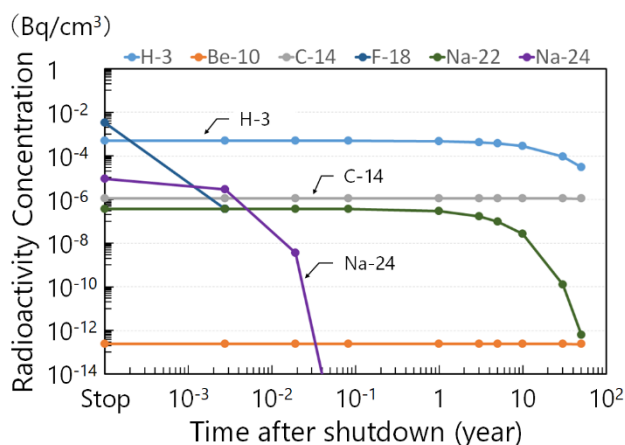


図 5-1 Ne ガスの照射直後から照射終了 50 年後までの放射能濃度変化

表 4-1 Ne における評価時間ごとの放射能濃度及び濃度限度の比較 (1/2)

※ : 濃度限度を超える核種

nuclide	半減期	別表第2 放射性同位元素の種類		別表第3 第3種	100秒照射	18時間照射	88時間照射	1日照射	1週間照射	1か月照射	3か月照射	半年照射	1年照射
		第5種	第3種										
H-3	12.32y	元素状水素	7E+01		1.1E-09	3.9E-08	3.1E-07	9.4E-07	6.6E-06	2.9E-05	9.5E-05	2.1E-04	5.1E-04
		メタン	7E-01										
		水	5E-03										
		有機物(メタンを除く)	3E-03										
He-6	801ms	記録なし	1E-04		3.6E-23	9.6E-21	1.8E-19	1.1E-18	2.3E-16	1.8E-14	4.8E-13	4.0E-12	3.2E-11
		記録なし	3E-06										
Li-8	839.9ms	記録なし	3E-06		9.2E-15	9.4E-15	3.0E-14	4.5E-14	4.6E-14	7.4E-14	2.8E-13	2.9E-13	2.0E-12
		記録なし	3E-06										
Be-8	6.700E-17s	記録なし	3E-06		1.1E-14	1.3E-14	3.6E-14	8.2E-14	1.5E-12	2.7E-11	2.5E-10	1.1E-09	4.5E-09
		記録なし	3E-06										
Be-10	1.387E+6y	酸化物、ハロゲン化合物及び希酸塩以外の化合物	1E-05		1.4E-25	3.2E-24	4.3E-22	6.3E-21	1.7E-18	1.3E-16	3.5E-15	3.0E-14	2.4E-13
		酸化物、ハロゲン化合物及び希酸塩以外の化合物	4E-06										
Be-11	13.81s	記録なし	3E-06		1.3E-15	3.2E-14	6.5E-14	3.0E-13	1.3E-11	2.4E-10	2.2E-09	8.9E-09	3.6E-08
		記録なし	3E-06										
B-12	20.20ms	記録なし	1E-04		1.3E-13	2.0E-13	4.1E-13	2.3E-12	9.3E-11	1.7E-09	1.5E-08	6.4E-08	2.5E-07
		記録なし	1E-04										
B-13	17.33ms	記録なし	1E-04		8.2E-17	1.9E-15	2.3E-13	1.2E-12	5.3E-11	9.6E-10	8.7E-09	3.8E-08	1.4E-07
		記録なし	1E-04										
C-14	5700y	蒸気	2E-04		7.9E-16	9.8E-13	1.9E-12	9.3E-12	4.1E-10	7.6E-09	6.8E-08	2.8E-07	1.1E-06
		一酸化物	1E-01										
C-15	2.448s	二酸化物	2E-02		2.1E-11	7.8E-10	6.2E-09	1.9E-08	1.3E-07	5.6E-07	1.7E-06	3.4E-06	6.9E-06
		メタン	5E-02										
N-13	9.965ms	記録なし	1E-04		6.7E-14	1.6E-14	3.1E-14	4.7E-14	5.5E-14	6.2E-14	1.2E-13	4.7E-13	3.2E-12
		記録なし	1E-04										
N-16	7.13s	[サブマージョン]	7E-04		4.9E-08	1.8E-06	1.4E-05	4.3E-05	3.0E-04	1.3E-03	3.9E-03	7.9E-03	1.6E-02
		[サブマージョン]	1E-04										
N-17	4.173s	記録なし	1E-04		2.9E-09	1.1E-07	9.0E-07	2.7E-06	1.9E-05	8.1E-05	2.4E-04	4.8E-04	9.8E-04
		記録なし	3E-06										
N-18	620ms	記録なし	3E-06		1.4E-12	4.9E-11	3.9E-10	1.2E-09	8.2E-09	3.5E-08	1.1E-07	2.2E-07	4.3E-07
		記録なし	3E-06										
O-19	26.88s	[サブマージョン]	7E-04		2.8E+00	3.0E+00	3.0E+00	3.0E+00	3.0E+00	3.0E+00	3.0E+00	3.0E+00	3.0E+00
		記録なし	7E-04										
F-18	108.77m	H, Li, Na, Si, P, K, Ni, Rb, Sr, Mo, Ag, Te, I, Cs, Ba, La, W, Pt, Tl, Pb, Po, Frのフッ化物, Seの無機化合物のフッ化物, Hgの有機化合物のフッ化物及び大部分の六価のウラン化合物(フッ化ウラン、フッ化ウラニル等)のフッ化物	4E-03		5.4E-11	6.3E-08	2.1E-06	8.0E-06	6.2E-05	2.7E-04	8.1E-04	1.6E-03	3.3E-03
		Mg, Al, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Cu, Ga, Ge, As, Y, Zr, Nb, Tc, Ru, Rh, Pd, Cd, In, Sn, Sb, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Hf, Re, Os, Ir, Au, Bi, Ra, Ac, Th, Pa, Np, Pu, Am, Cm, Bk, Cf, Es, Fm, Mdのフッ化物, Hgの無機化合物のフッ化物及び難溶性のウラン化合物(四フッ化ウラン等)のフッ化物	2E-03										
F-18	108.77m	Be, Sc, Co, Zn, Ce, Pr, Nd, Pm, Yb, Lu, Taのフッ化物及び不溶性のウラン化合物のフッ化物	2E-03		5.4E-11	6.3E-08	2.1E-06	8.0E-06	6.2E-05	2.7E-04	8.1E-04	1.6E-03	3.3E-03
		Be, Sc, Co, Zn, Ce, Pr, Nd, Pm, Yb, Lu, Taのフッ化物及び不溶性のウラン化合物のフッ化物	2E-03										

表 4-1 Ne における評価時間ごとの放射能濃度及び濃度限度の比較(2/2)

※ : 濃度限度を超える核種

nuclide	半減期	別表第2 放射能同位元素の種類		別表第3 第3欄	100秒照射	1時間照射	8時間照射	1日照射	1週間照射	1か月照射	3か月照射	半年照射	1年照射
		第5欄	第6欄										
F-20	11.07s	記載なし		1E-04	1.3E+02	1.3E+02	1.3E+02	1.3E+02	1.3E+02	1.3E+02	1.3E+02	1.3E+02	1.3E+02
F-21	4158s	記載なし		1E-04	8.3E-01	8.3E-01	8.3E-01	8.3E-01	8.3E-01	8.3E-01	8.3E-01	8.3E-01	8.3E-01
F-22	4.23s	記載なし		1E-04	2.0E+00	2.0E+00	2.0E+00	2.0E+00	2.0E+00	2.0E+00	2.0E+00	2.0E+00	2.0E+00
Ne-23	37.24s	記載なし		1E-04	2.2E-01	2.7E-01	2.7E-01	2.7E-01	2.7E-01	2.7E-01	2.7E-01	2.7E-01	2.7E-01
Na-24	3.38m	記載なし		1E-04	7.5E-23	2.1E-18	1.4E-16	1.0E-15	1.6E-14	7.6E-14	2.3E-13	4.8E-13	9.5E-13
Na-22	2.6027y	すべての化合物	9E-05	1E-04	1.3E-20	2.7E-19	1.7E-17	1.5E-16	7.5E-15	1.3E-13	1.1E-12	4.1E-12	1.4E-11
Na-24	14.997h	すべての化合物	4E-04	1E-04	5.3E-16	7.5E-15	4.6E-13	4.2E-12	2.0E-10	3.6E-09	3.0E-08	1.1E-07	3.7E-07
Na-24m	20.18ms	記載なし		1E-04	7.7E-15	2.2E-11	1.3E-09	9.5E-08	1.5E-07	7.0E-07	2.1E-06	4.4E-06	8.8E-06
Na-25	59.1s	記載なし		1E-04	1.2E-11	7.6E-10	6.2E-09	1.8E-08	1.3E-07	5.5E-07	1.7E-06	3.4E-06	6.8E-06
Na-26	1.07128s	記載なし		1E-04	2.5E-23	2.7E-19	1.6E-17	1.2E-16	1.8E-15	8.8E-15	2.7E-14	5.5E-14	1.1E-13
Mg-27	9.458m	酸化物、水酸化物、炭化物、ハロゲン化合物及び有機酸塩以外の化合物	2E-02										
		酸化物、水酸化物、炭化物、炭化物、ハロゲン化合物及び有機酸塩	1E-02										
											2.7E-25	4.8E-24	7.3E-23

しかしながら、放射性固体廃棄物の検討でも記載したが、これら核種の半減期が短いため、環境にすぐに放出するのではなく、十分に減衰（約1日程度）を待ってから環境に放出する方法を検討することにより、安全上問題となりうる核種にはならないと考えられる。

同様に、照射1週間後時点で濃度限度を超えているN-16（半減期：7.13秒）、照射3か月後時点で濃度限度を超えているN-17（半減期：4.173秒）、照射1年後時点で濃度限度を超えているF-18（半減期：109.77分）についても、十分に減衰させてから環境に放出する方法を検討することにより、安全上問題となりうる核種にはならないと考えられる。

最後に、照射1年間の仮定により安全側の過大評価であるが、上記に示した核種の他にF-18が安全上問題となりうる。これは、濃度限度の約2倍程度になるものの、照射終了1日後には4桁近く放射能濃度が下がることから、他の核種と同様に十分な減衰をさせてから環境に放出する方法を検討することにより、安全上問題となりうる核種にはならないと考えられる。

4.2 Ar由来の放射性生成核種について

表3-3より、一年間照射後から各冷却期間後（評価時間）での放射能濃度が上位10核種に入る核種に対して、照射直後から照射終了50年後までの放射能濃度変化を図4-2に示す。図5-2に示すようにAr-41（半減期：109.61分）は、照射直後に生成量が多いものの、1日経つとAr-39（半減期：269年）が照射終了50年後まで支配的な核種となる。Ar-39の次に多いのが、Ar-37（半減期：35.04日）であるものの、照射終了1年後からはS-35（半減期：87.37日）となり、照射終了3年後には、H-3（半減期：12.32年）がAr-39に次ぎに多い核種と分かった。フィルター集塵後に放射性固体廃棄物として処分する際に、安全上問題となりうる放射性生成核種には政令濃度区分値に規定されているCl-36（半減期： 3.01×10^5 年）が挙げられるが、放射能濃度が 10^{-6} Bq/cm³オーダーと低いため、安全上問題にならないことが分かった。

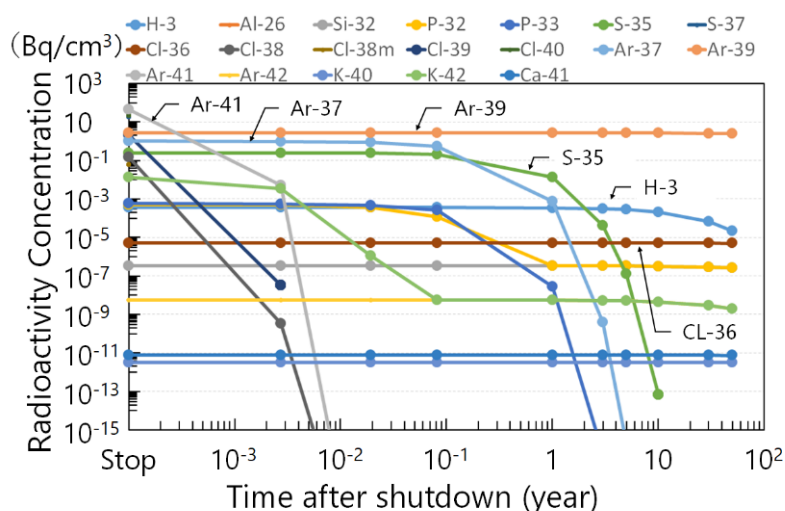


図4-2 Arガスの照射直後から照射終了50年後までの放射能濃度変化

放射性気体廃棄物として安全上問題となりうる放射性生成核種を検討するために、排気中又は空気中の濃度限度と評価時間（照射 100 秒後、照射 1 時間後、照射 8 時間後、照射 1 日後、照射 1 週間後、照射 1 か月後、照射 3 か月後、照射半年後、照射 1 年後）に生成される核種を比較し、濃度限度を超えている核種を抽出した。表 4-2 に濃度限度を超えている核種を示す。表 4-2 に示すように、照射 100 秒後時点で濃度限度を超えている核種は、Ar-41（半減期：109.61 分）、S-37（半減期：5.05 分）、Cl-38m（半減期：715m 秒）、Cl-40（半減期：1.35 分）、Cl-39（半減期：56.2 分）である。特に Ar-41 は、濃度限度の約 950 倍と高く、次に S-37、Cl-38m が約 400 倍である。濃度限度を超えている Ar-41 の半減期が約 110 分であるため、照射終了 1 日後の値が $5.0 \times 10^{-3} \text{ Bq/cm}^3$ となり濃度上限に近い値となる。そのため環境にすぐに放出するのではなく、十分に減衰（約 1 日以上程度）を待ってから環境に放出する方法を検討することにより、安全上問題となりうる核種にはならないと考えられる。また、Ar-39 に関しては、照射 100 秒程度では 10^{-6} Bq/cm^3 オーダーと低いため、安全上問題となりえないと考えられる。濃度限度を超えてしまうのは、1 か月照射後からであるため、運転時間を調整しつつ濃度限度を超えないような検討が必要と考える。

最後に、照射 1 年後に濃度限度を超えている核種は 15 核種ある。特に照射 100 秒後でも濃度限度を約 950 倍と超えていた Ar-41 は、濃度限度を約 9 万倍と超えてしまう。しかし、照射終了 1 日後の値が濃度上限に近い値となるため十分に減衰にさせてから環境に放出する方法を検討することにより、安全上問題となりうる核種にはならないと考えられる。Ar-41 の次に濃度限度を超えている核種は、S-35 が約 3 千倍、S-37 が約 2 千倍である。S-35 は半減期が 87.37 日と半減期が長いため、表 4-3 に示すように照射終了 3 年後でないと濃度限度と同じオーダーにならない。Ar-41 と同様に運転時間を調整しつつ濃度限度を超えないような検討が必要と考える。また、Ar-39 は濃度限度の 14 倍であるが、半減期が長いのでそのまま濃度限度を超えたままになる。従って、運転時間（照射時間）を調整するか、濃度限度を超えないように希釈するなどの対策が必要と考える。

表 4-2 Ar における評価時間ごとの放射能濃度及び濃度限度の比較 (1/4)

※ : 濃度限度を超える核種

nuclide	半減期	別表第2 放射能同位元素の種類		100秒照射	1時間照射	8時間照射	1日照射	1週間照射	1か月照射	3か月照射	半年照射	1年照射	
		第5欄	第3欄										
H-3	12.32y	元素状水素	7E-01	1.1E-09	4.1E-08	3.3E-07	9.9E-07	6.9E-06	3.0E-05	8.9E-05	1.8E-04	3.7E-04	
		水	7E-01										
		有機物(メタンを除く)	5E-03										
		上記を除去化合物	3E-03										
C-15													
N-16											3.1E-26	9.9E-25	
N-17										1.3E-26	4.7E-25	1.5E-23	
N-18											9.0E-27	2.9E-25	
O-19								6.7E-26	2.2E-23	1.8E-21	3.1E-20	4.9E-19	
F-18										1.2E-26	3.6E-25	1.1E-23	
F-20								1.8E-24	5.9E-22	4.8E-20	8.2E-19	1.3E-17	
F-21								2.0E-25	3.2E-23	1.8E-21	2.8E-20	4.1E-19	
F-22								4.4E-26	1.5E-23	1.2E-21	2.0E-20	3.2E-19	
Ne-23				3.5E-26	1.7E-23	3.6E-22	6.8E-21	2.1E-18	1.7E-16	4.5E-15	3.8E-14	3.0E-13	
Ne-24								9.9E-24	8.7E-23	1.2E-21	9.6E-21	7.5E-20	
Ne-25								3.1E-26	4.0E-25	1.2E-21	3.3E-21	6.7E-21	
Ne-25								3.4E-25	5.2E-22	1.6E-21	3.3E-21	6.7E-21	
Na-21										8.1E-27	1.4E-25	3.9E-24	
Na-22								3.9E-26	1.1E-23	2.2E-22	3.9E-21	1.1E-19	
Na-24								4.2E-27	1.1E-23	2.2E-22	3.9E-21	1.1E-19	
Na-24				5.2E-25	1.6E-22	1.6E-22	4.1E-21	3.4E-18	3.5E-16	1.0E-14	8.6E-14	6.9E-13	
Na-24m				9.3E-25	9.3E-24	4.3E-22	5.1E-21	1.5E-18	1.2E-16	3.3E-15	2.7E-14	2.2E-13	
Na-25								1.8E-24	9.0E-23	1.9E-21	6.4E-19	1.1E-14	
Na-25								1.9E-21	6.4E-19	1.4E-17	1.1E-14	9.1E-14	
Na-26				3.6E-26	6.9E-24	1.5E-22	2.7E-21	8.6E-19	6.7E-17	1.8E-15	1.5E-14	1.2E-13	
Na-28								2.1E-23	1.1E-22	3.4E-22	7.0E-22	1.4E-21	
Na-28				2.6E-17	3.3E-15	1.6E-14	1.1E-13	5.1E-12	9.4E-11	8.4E-10	3.5E-09	1.4E-08	
Mg-27				2.4E-24	1.1E-19	3.4E-17	4.3E-16	1.0E-14	5.2E-14	1.8E-13	3.4E-13	6.8E-13	
Mg-28				2.2E-20	3.9E-18	2.5E-16	2.3E-15	1.1E-13	2.1E-12	1.8E-11	7.6E-11	3.0E-10	
Mg-29								2.3E-25	3.9E-23	1.5E-22	1.5E-21	2.3E-20	
Al-26								1.4E-26	1.8E-25	6.1E-25	1.5E-21	2.3E-20	
Al-26				6.7E-27	3.4E-25	5.2E-24	8.2E-26	8.4E-26	1.8E-23	7.8E-23	6.9E-22	1.0E-20	
Al-28				1.2E-17	1.2E-15	1.5E-14	1.3E-13	6.7E-12	1.2E-10	1.1E-09	4.5E-09	1.8E-08	
Al-29				7.9E-17	2.1E-15	2.6E-14	2.1E-13	9.7E-12	1.6E-10	1.3E-09	4.7E-09	1.8E-08	
Al-30				3.3E-16	3.3E-15	1.7E-14	1.3E-13	5.9E-12	1.0E-10	8.3E-10	3.1E-09	1.2E-08	
Al-31				3.4E-21	4.1E-18	1.6E-16	6.8E-16	5.5E-15	2.4E-14	7.2E-14	1.5E-13	3.0E-13	
Al-32				2.5E-20	4.3E-18	2.7E-16	2.5E-15	1.2E-13	2.2E-12	2.0E-11	8.2E-11	3.3E-10	
Si-31	157.3m			6.1E-13	7.3E-10	2.8E-08	1.2E-07	9.7E-07	4.2E-06	1.3E-05	2.6E-05	5.2E-05	
Si-32													
Si-33	6.11s												
P-30													
P-32	14.2662d												
P-33	25.355d												
		酸化物、水酸化物、炭化物、硝酸塩及びアルミニウム酸化物、炭化物、硝酸塩以外の化合物	4E-03										
		酸化物、水酸化物、炭化物、硝酸塩	2E-03										
		アルミニウム酸化物以外の化合物	1E-03										
		記載なし											
		酸化物、水酸化物、炭化物、硝酸塩以外の化合物	1E-04										
		酸化物、水酸化物、炭化物、硝酸塩以外の化合物	4E-05										
		酸化物、水酸化物、炭化物、硝酸塩以外の化合物	1E-03										
		酸化物、水酸化物、炭化物、硝酸塩以外の化合物	8E-05										

表 4-2 Ar における評価時間ごとの放射能濃度及び濃度限度の比較 (2/4)

※ : 濃度限度を超える核種

nuclide	半減期	別表第2		別表第3 第5種 第3種	100秒照射	18時間照射	88時間照射	1日照射	1週間照射	1か月照射	3か月照射	半年照射	1年照射
		放射能同位元素の種類	第5種										
P-34	12.43s	記載なし		1E-04	2.2E-10	6.0E-08	5.4E-07	1.6E-06	1.1E-05	4.9E-05	1.5E-04	3.1E-04	6.2E-04
P-35	47.3s	記載なし		1E-04	1.8E-10	1.3E-08	1.1E-07	3.2E-07	2.3E-06	9.7E-06	2.9E-05	5.8E-05	1.2E-04
P-36	5.6s	記載なし		1E-04	1.2E-09	4.8E-08	3.9E-07	1.2E-06	8.2E-06	3.9E-05	1.0E-04	2.1E-04	4.8E-04
S-35	87.37d	蒸気(二酸化硫黄を含む)	1E-03										
		二酸化硫黄	2E-04		1.4E-06	4.9E-05	3.9E-04	1.2E-03	3.0E-03	3.3E-02	8.7E-02	1.5E-01	2.5E-01
S-37	5.05m	元素状硫黄(吸入摂取)、Ba、Ca、Sc、Co、Zn、As、Y、Nb、Sb、Ce、Pr、Nd、Pm、Sm、Eu、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Ta、Bi、Ra、Th、Pa、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Mdの硫化物と硫酸塩、Cuの無機化合物の硫化物、Ge、Mo、Ag、Cd、Snの硫化物、Hgの無機化合物の硫化物及び難溶、不溶性のウラン化合物の硫化物と硫酸塩	9E-06										
		蒸気(二酸化硫黄を含む)	1E-02		3.8E+00	1.8E+01	1.8E+01	1.8E+01	1.8E+01	1.8E+01	1.8E+01	1.8E+01	1.8E+01
S-38		二酸化硫黄	9E-03										
		元素状硫黄(吸入摂取)、Ba、Ca、Sc、Co、Zn、As、Y、Nb、Sb、Ce、Pr、Nd、Pm、Sm、Eu、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Ta、Bi、Ra、Th、Pa、Np、Pu、Am、Cm、Bk、Cf、Es、Fm、Mdの硫化物と硫酸塩、Cuの無機化合物の硫化物、Ge、Mo、Ag、Cd、Snの硫化物、Hgの無機化合物の硫化物及び難溶、不溶性のウラン化合物の硫化物と硫酸塩	2E-02		3.2E-12	3.5E-09	6.3E-08	9.1E-08	9.1E-08	9.1E-08	9.1E-08	9.1E-08	9.1E-08
S-39					7.6E-21	1.2E-17	3.9E-16	1.5E-15	1.2E-14	5.1E-14	1.5E-13	3.1E-13	6.2E-13
Cl-34					9.8E-07	1.4E-06	1.6E-06	1.6E-06	1.7E-06	1.9E-06	2.4E-06	3.2E-06	4.9E-06
Cl-34m					5.2E-08	1.1E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.5E-06	1.7E-06	2.2E-06	3.0E-06	4.6E-06
Cl-36					1.6E-11	5.9E-10	4.7E-09	1.4E-08	9.9E-08	4.2E-07	1.3E-06	2.6E-06	5.2E-06

表 4-2 Ar における評価時間ごとの放射能濃度及び濃度限度の比較 (3/4)

※ : 濃度限度を超える核種

nuclide	半減期	別表第2 放射線同位元素の種類		別表第3 第3種	100秒照射	18時間照射	8時間照射	1日照射	1週間照射	1か月照射	3か月照射	半年照射	1年照射
		第5種	第6種										
Cl-38	37.24m	H, Li, Na, Si, P, K, Ni, Rb, Sr, Mo, Ag, Te, I, Cs, Ba, La, Gd, W, Pt, Tl, Pb, Po, Frの塩化物, Seの無機化合物の塩化物, Hgの有機化合物の塩化物及び大部分の六価のウラン化合物の塩化物	5E-03	1E-04	2.7E-03	6.0E-02	8.9E-02	8.9E-02	9.0E-02	9.4E-02	1.0E-01	1.2E-01	1.5E-01
			3E-03		4.3E-02	4.3E-02	4.3E-02	4.3E-02	4.3E-02	4.3E-02	4.3E-02	4.3E-02	4.3E-02
Cl-38m	715ms	記載なし		1E-04	4.3E-02	4.3E-02	4.3E-02	4.3E-02	4.3E-02	4.3E-02	4.3E-02	4.3E-02	4.3E-02
Cl-39	56.2m	H, Li, Na, Si, P, K, Ni, Rb, Sr, Mo, Ag, Te, I, Cs, Ba, La, Gd, W, Pt, Tl, Pb, Po, Frの塩化物, Seの無機化合物の塩化物, Hgの有機化合物の塩化物及び大部分の六価のウラン化合物の塩化物	5E-03	1E-04	4.2E-02	1.1E+00	2.0E+00	2.0E+00	2.0E+00	2.0E+00	2.0E+00	2.1E+00	2.1E+00
			3E-03		4.3E-02	4.3E-02	4.3E-02	4.3E-02	4.3E-02	4.3E-02	4.3E-02	4.3E-02	4.3E-02
Cl-40	1.35m	H, Li, Na, Si, P, K, Ni, Rb, Sr, Mo, Ag, Te, I, Cs, Ba, La, Gd, W, Pt, Tl, Pb, Po, Frの塩化物, Seの無機化合物の塩化物, Hgの有機化合物の塩化物及び大部分の六価のウラン化合物の塩化物	5E-02	1E-04	1.3E+01	2.2E+01	2.2E+01	2.2E+01	2.2E+01	2.2E+01	2.2E+01	2.2E+01	2.2E+01
			4E-02		4.3E-02	4.3E-02	4.3E-02	4.3E-02	4.3E-02	4.3E-02	4.3E-02	4.3E-02	4.3E-02
Cl-41					5.8E-10	3.2E-08	9.7E-08	1.0E-07	1.0E-07	1.0E-07	1.0E-07	1.0E-07	1.0E-07
Cl-42					2.7E-20	3.7E-17	1.2E-15	4.8E-15	3.7E-14	1.8E-13	4.8E-13	9.8E-13	1.9E-12
Ar-37	35.04d				2.3E-05	3.3E-04	6.6E-03	2.0E-02	1.3E-01	4.5E-01	8.3E-01	9.7E-01	1.0E+00
Ar-39	269y				8.9E-06	3.2E-04	2.6E-03	7.7E-03	5.4E-02	2.3E-01	6.9E-01	1.4E+00	2.8E+00
Ar-41	109.61m				4.7E-01	1.4E+01	4.3E+01	4.5E+01	4.5E+01	4.5E+01	4.5E+01	4.5E+01	4.5E+01

表 4-2 Ar における評価時間ごとの放射能濃度及び濃度限度の比較 (4/4)

※ : 濃度限度を超える核種

nuclide	半減期	別表第2 放射能同位元素の種類		別表第3 第3欄										
		第5欄	第3欄	100秒照射	1時間照射	8時間照射	1日照射	1週間照射	1か月照射	3か月照射	半年照射	1年照射		
Ar-42				9.4E-17	1.1E-13	3.5E-12	1.4E-11	1.1E-10	4.6E-10	1.4E-09	2.8E-09	5.6E-09		
Ar-43				2.8E-21	3.7E-17	1.5E-15	5.9E-15	4.6E-14	2.0E-13	6.0E-13	1.2E-12	2.4E-12		
K-38				3.4E-16	1.5E-14	1.1E-12	1.1E-11	5.3E-10	9.7E-09	8.7E-08	3.6E-07	1.4E-06		
K-38m				2.0E-16	1.9E-15	1.1E-13	9.7E-13	4.8E-11	8.8E-10	7.9E-09	3.2E-08	1.3E-07		
K-40				1.5E-19	5.1E-19	2.0E-18	2.0E-17	1.1E-15	2.1E-14	1.9E-13	7.8E-13	3.1E-12		
K-42	12.321h		5E-05	1.2E-13	5.0E-09	1.4E-06	1.4E-05	2.3E-04	1.1E-03	3.4E-03	6.8E-03	1.4E-02		
K-43				6.2E-24	8.9E-18	2.0E-14	6.4E-13	3.9E-11	2.3E-10	7.1E-10	1.5E-09	3.0E-09		
K-44					7.6E-25	4.8E-21	1.8E-19	1.1E-17	6.2E-17	1.4E-16	2.2E-16	4.8E-16		
K-45									7.7E-27	1.7E-24	5.6E-23	1.6E-21		
K-46												5.4E-26		
Ca-41				1.3E-24	8.7E-23	7.1E-22	3.0E-20	3.9E-17	4.0E-15	1.1E-13	9.6E-13	7.8E-12		
Ca-45								3.4E-25	5.0E-22	1.1E-19	3.6E-18	1.0E-16		
Ca-47											5.3E-27	3.4E-25		
Sc-44										9.3E-25	6.3E-23	3.7E-21		
Sc-44m										3.3E-25	2.4E-23	1.4E-21		
Sc-45m									5.9E-27	3.9E-24	2.6E-22	1.5E-20		
Sc-46										4.2E-25	5.1E-23	5.0E-21		
Sc-46m										1.9E-24	1.2E-22	7.1E-21		
Sc-47											1.4E-26	1.3E-24		
Tl-45												6.4E-27		

4.3 Kr 由来の放射性生成核種について

表 3-5 より、一年間照射後から各冷却期間後（評価時間）での放射能濃度上位 10 核種に入る核種に対して、照射直後から照射終了 50 年後までの放射能濃度変化を図 4-3 に示す。Kr-83m（半減期：1.85 時間）、Kr-85m（半減期：4.480 時間）と照射直後から照射終了 1 日後までは多くなるが、Kr-85m から壊変した Kr-85（半減期：10.752 年）がそのまま照射終了後 50 年後まで支配的な核種となる。既に Kr-85 は、再処理施設では放射性廃棄物（気体廃棄物）と扱われている核種であり、日本原子力研究開発機構（JAEA）の東海再処理施設における Kr-85 の年間最大放出量の基準 [8]は、 $8.9 \times 10^7 \text{GBq}$ としている。

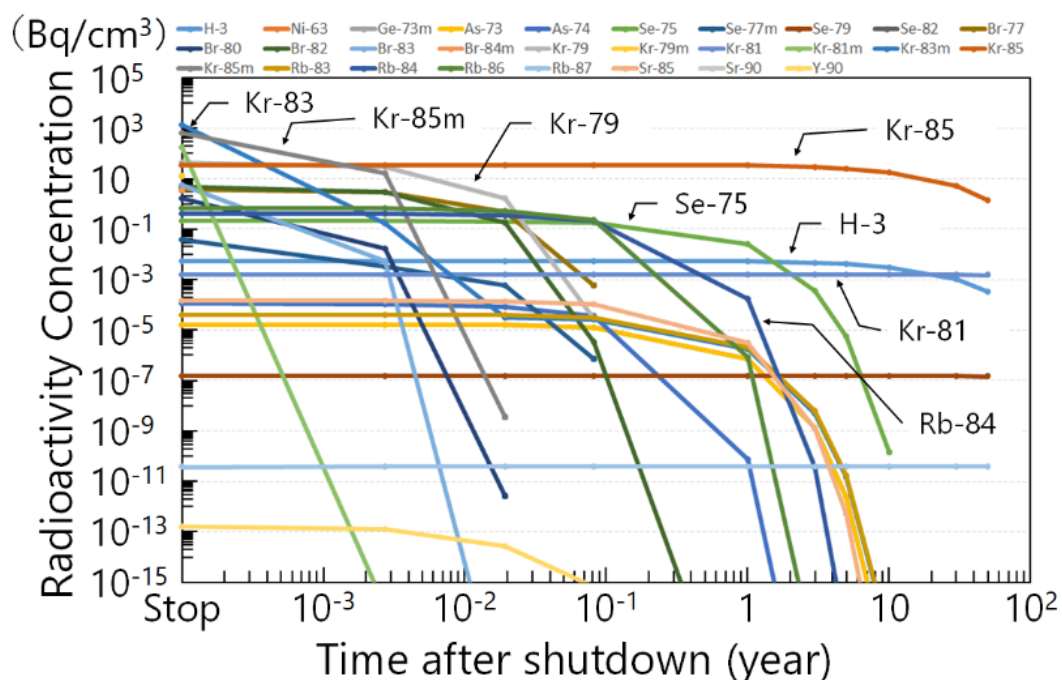


図 4-3 Kr ガスの照射直後から照射終了 50 年後までの放射能濃度変化

Kr-85 以外に多い核種として、Kr-79（半減期：35.04 時間）が照射終了 1 週間後まで、Rb-84（半減期：32.82 日）と Se-75（半減期：119.79 日）が照射 1 週間後から照射 1 年後まであるが、半減期の違いから Se-75 は、照射終了 3 年後まで Kr-85 の次に多い核種である。その後は、照射終了 10 年後まで H-3 に変わり、照射終了 10 年後からは、Kr-81（半減期： 2.29×10^5 年）に壊変する。フィルター集塵後に放射性固体廃棄物として処分する際に、安全上問題となりうる放射性生成核種には処分濃度区分値に規定されている Sr-90（半減期：28.90 年）が挙げられるが、放射能濃度が 10^{-6}Bq/cm^3 オーダーと低いため、安全上問題とならないことが分かった。

放射性気体廃棄物として安全上問題となりうる放射性生成核種を検討するために、排気中又は空気中の濃度限度と評価時間（照射 100 秒後、照射 1 時間後、照射 8 時間後、照射 1 日後、照射 1 週間後、照射 1 か月後、照射 3 か月後、照射半年後、照射 1 年後）に生成され

る核種を比較し、濃度限度を超えている核種を抽出した。表 5-3 に濃度限度を超えている核種を示す。照射 100 秒後時点で濃度限度を超えている核種は、23 核種ある。濃度限度を超えている核種でも特に、Kr-79m(半減期：50 秒)が約 9 万 5 千倍と高く、次に Kr-81m(半減期：13.10 秒)が約 2 万 8 千倍、Br-79m(半減期：5.1 秒)が約 1 万 1 千倍、Br-86(半減期：55.1 秒)が約 1 万倍と続いている。しかしながら、上記した核種の半減期が秒オーダーであるため、十分に減衰(約 1 日以上程度)を待ってから環境に放出する方法を検討することにより、安全上問題となりうる核種にはならないと考えられる。また、Kr-85 は、照射 100 秒程度では 10^{-5} Bq/cm³ オーダーと低いため、安全上問題にならない。

他方、Kr-85 は既に東海再処理施設では気体廃棄物として取り扱われており、Kr 回収技術の開発が進められている。回収方法としては、液化蒸留プロセスを採用したクリプトン回収技術開発施設を建設し、昭和 63 年(1988 年)からホット試験を開始し、回収技術の実証を目的とした試験を継続している。また、回収した Kr を安定に貯蔵する技術として、ゼオライト封入法、イオン注入法について開発をしている[8]。このように、Kr-85 は濃度限度を超えていないが、Kr の同位体の中で濃度限度を超えている Kr-79m、Kr-81m 等を回収し適切に処理することも検討することが必要と考える。

次に、照射 1 年後に濃度限度を超えている核種は 35 核種ある。照射 100 秒後では、濃度限度以下であった Kr-85 が濃度限度を約 300 倍と超えており、Kr-85 の半減期が 10.752 年であるために、濃度限度を超えたままの状態では照射終了 50 年後まで続くことになる。運転時間を調整するか、濃度限度を超えないように Kr を回収し適切に処理することも検討することが必要と考える。また、半減期が 119.79 日の Se-75 が濃度限度を約 2 千倍、半減期が 32.82 日の Rb-84 が濃度限度を約 4 千倍と超えているため、運転時間を調整しつつ濃度限度を超えないような検討が必要と考える。

表 4-3 Kr における評価時間ごとの放射能濃度及び濃度限度の比較 (1/6)

※ : 濃度限度を超える核種

nuclide	半減期	別表第2 放射能同位元素の種類		100秒照射	1時間照射	8時間照射	1日照射	1週間照射	1か月照射	3か月照射	半年照射	1年照射	
		第5種	第3種										
H-3	12.32y	元素水素	7E+01	1.8E-08	6.5E-07	5.2E-06	1.8E-05	1.1E-04	4.7E-04	1.4E-03	2.8E-03	5.5E-03	
		メタン	7E-01										
		水	5E-03										
		有機物(メタンを除く) 上記を除く化合物	3E-03										
Fe-59												87E-23	
Fe-61								9.3E-27	7.1E-25			1.8E-23	
Fe-63											7.5E-27	7.6E-26	
Co-58m												6.5E-27	
Co-60												2.2E-25	
Co-60m												2.9E-24	
Co-61									3.9E-26	3.3E-24	9.2E-26	2.9E-24	
Co-62									2.3E-25	2.1E-23	6.1E-23	1.1E-21	
Co-62m									2.7E-25	2.4E-23	3.9E-22	7.2E-21	
Co-63								4.5E-27	2.4E-23	4.5E-22	8.6E-21	8.6E-21	
Co-64								1.3E-24	2.1E-23	2.4E-22	3.8E-21	3.8E-21	
Co-66								1.6E-25	1.6E-22	1.5E-20	1.5E-20	6.1E-20	
Ni-63								1.6E-25	5.3E-23	4.9E-21	4.1E-26	4.2E-25	
Ni-65						3.1E-26	1.5E-24	6.6E-22	4.3E-20	7.2E-20	7.2E-20	1.1E-18	
Ni-66							2.8E-26	2.3E-23	4.3E-20	8.3E-19	5.4E-18	3.4E-17	
Ni-67						6.2E-27	2.0E-25	1.2E-22	1.9E-21	6.6E-20	7.0E-18	7.2E-18	
Ni-68								9.0E-26	1.3E-23	5.5E-22	7.9E-18	8.1E-17	
Ni-69								1.7E-25	6.6E-24	7.1E-23	3.1E-22	1.8E-21	
Cu-62								1.5E-24	1.8E-22	8.6E-26	2.9E-24	9.3E-23	
Cu-64								5.5E-20	4.6E-18	7.8E-21	1.0E-19	1.5E-18	
Cu-66				5.9E-27		4.1E-24	1.3E-22	3.8E-17	8.6E-15	1.2E-16	9.9E-16	7.5E-15	
Cu-67				7.2E-26		2.9E-22	2.2E-20	3.8E-17	4.6E-15	8.6E-14	4.3E-13	1.8E-12	
Cu-68				6.4E-23		3.5E-20	9.5E-19	3.0E-16	1.7E-14	2.6E-13	1.2E-12	4.9E-12	
Cu-68m				1.6E-23		1.0E-20	2.8E-19	8.7E-17	5.0E-15	7.5E-14	3.5E-13	1.4E-12	
Cu-69				3.7E-24		2.1E-21	4.8E-20	6.8E-18	1.8E-16	1.9E-15	7.8E-15	2.8E-14	
Cu-70						3.7E-27	1.2E-25	6.7E-23	9.5E-21	4.1E-19	4.6E-18	4.8E-17	
Cu-70m						5.4E-27	1.8E-25	1.0E-22	1.4E-20	6.2E-19	6.9E-18	7.2E-17	
Cu-71								2.4E-25	9.2E-24	9.8E-23	4.3E-22	1.8E-21	
Cu-72								2.4E-25	9.1E-24	9.7E-23	4.2E-22	1.8E-21	
Zn-63								7.0E-22	1.7E-19	5.8E-26	1.7E-24	4.8E-23	
Zn-65				4.6E-27		2.8E-26	5.0E-25	1.1E-17	1.7E-15	1.1E-17	1.7E-16	2.5E-15	
Zn-69				1.0E-24		4.1E-20	1.3E-16	9.5E-15	1.9E-13	1.7E-12	6.8E-12	2.5E-11	
Zn-69m				6.4E-26		3.0E-21	3.2E-17	4.0E-15	8.9E-14	8.1E-13	3.2E-12	1.2E-11	
Zn-71				1.1E-24		1.3E-20	4.0E-17	3.7E-15	3.1E-13	4.0E-12	2.2E-11	1.2E-10	
Zn-71m				1.5E-26		9.3E-22	7.1E-19	3.8E-15	3.8E-13	4.9E-12	2.6E-11	1.4E-10	
Zn-72				4.0E-27		4.7E-24	8.2E-21	3.2E-17	1.2E-15	1.3E-14	5.7E-14	2.4E-13	
Zn-73				3.7E-23		2.6E-21	1.5E-18	3.2E-17	1.7E-15	1.6E-14	7.1E-14	3.1E-13	
Zn-73m				5.4E-23		1.7E-19	1.5E-18	3.2E-17	1.6E-14	1.6E-14	7.2E-14	3.1E-13	
Zn-74				2.6E-24		1.6E-20	7.0E-18	9.4E-17	4.3E-16	1.3E-15	2.7E-15	5.4E-15	
Ga-66								2.5E-26	3.6E-25	1.9E-24	1.9E-24	1.0E-23	
Ga-67				6.1E-27		2.5E-22	1.2E-25	1.0E-22	5.5E-21	6.8E-20	3.2E-19	1.4E-18	
Ga-68				9.1E-23		3.5E-18	5.8E-16	1.5E-17	2.7E-16	4.4E-15	3.1E-14	2.1E-13	
Ga-70						5.8E-16	6.1E-15	3.2E-13	7.1E-12	8.1E-11	3.5E-10	1.4E-09	

表 4-3 Kr における評価時間ごとの放射能濃度及び濃度限度の比較 (2/6)

※ : 濃度限度を超える核種

nuclide	半減期	別添表2 放射性同位元素の種類		別添表3 濃度限度	100時間照射	19時間照射	88時間照射	1日照射	1週間照射	1か月照射	3か月照射	半年照射	1年照射
		酸化物以外の元素	酸化物										
Ge-72					1.1E-20	5.4E-16	2.5E-13	5.8E-12	7.3E-10	1.5E-08	1.3E-07	4.6E-07	1.4E-06
Ge-72m						1.4E-25	7.7E-23	2.4E-21	9.5E-19	3.7E-17	3.9E-16	1.7E-15	7.1E-15
Ge-73					8.3E-24	3.9E-19	1.7E-16	3.4E-15	3.3E-13	5.4E-12	4.3E-11	1.7E-10	6.1E-10
Ge-74					2.0E-24	9.6E-20	1.5E-17	2.7E-16	4.3E-14	1.2E-12	1.7E-11	7.1E-11	3.8E-10
Ge-74m					1.1E-23	4.1E-20	4.4E-18	7.4E-17	1.3E-14	4.0E-13	4.8E-12	2.6E-11	1.4E-10
Ge-75					1.8E-23	4.9E-21	3.0E-19	2.6E-18	1.3E-16	2.5E-15	2.2E-14	9.7E-14	4.1E-13
Ge-76					2.3E-22	8.3E-21	5.3E-19	4.7E-18	2.3E-16	4.7E-15	4.6E-14	2.0E-13	8.5E-13
Ge-77					1.6E-23	3.1E-20	1.8E-18	1.3E-17	1.7E-16	7.7E-16	2.4E-15	4.8E-15	9.7E-15
Ge-87								4.1E-26	4.6E-24	1.3E-22	1.0E-21	7.5E-21	
Ge-88						2.3E-26	1.7E-24	1.8E-21	1.8E-18	2.1E-19	5.8E-18	4.6E-17	3.4E-16
Ge-89					1.1E-24	5.4E-20	2.9E-17	6.7E-16	1.1E-13	2.8E-12	2.8E-11	1.2E-10	4.7E-10
Ge-91					3.2E-16	4.1E-13	2.6E-11	2.3E-10	1.0E-08	1.2E-07	5.3E-07	1.1E-06	2.0E-06
Ge-71m						2.4E-24	1.3E-21	2.7E-20	2.0E-18	1.7E-17	6.7E-17	1.6E-16	3.6E-16
Ge-73m	0.489s		記載なし	1E-04	8.5E-13	3.1E-11	2.9E-10	1.2E-09	2.5E-08	3.0E-07	2.0E-06	6.2E-06	1.7E-05
Ge-75	82.78m		酸化物、酸化物及びハロゲン化合物以外の化合物	8E-03	7.0E-15	1.6E-10	6.1E-09	2.3E-08	1.7E-07	7.8E-07	2.6E-06	5.7E-06	1.3E-05
Ge-75m	47.7s		酸化物、酸化物及びハロゲン化合物	3E-03	6.0E-13	5.4E-10	5.1E-09	1.6E-08	1.1E-07	4.8E-07	1.5E-06	3.4E-06	7.3E-06
Ge-77	11.30h		酸化物、酸化物及びハロゲン化合物以外の化合物	8E-04	4.9E-15	6.7E-12	3.9E-10	2.7E-09	3.6E-08	1.6E-07	5.0E-07	1.0E-06	2.1E-06
Ge-77m	32.8s		酸化物、酸化物及びハロゲン化合物	3E-04									
Ge-78			記載なし	1E-04	1.4E-12	1.1E-10	9.4E-10	2.9E-09	2.0E-08	8.9E-08	2.6E-07	5.2E-07	1.1E-06
Ge-79					3.5E-17	4.0E-14	1.2E-12	4.5E-12	3.5E-11	1.5E-10	4.5E-10	9.1E-10	1.8E-09
Ge-79m					5.2E-15	2.6E-13	2.1E-12	6.4E-12	4.5E-11	1.9E-10	5.9E-10	1.2E-09	2.5E-09
As-70					7.4E-15	4.9E-13	4.0E-12	1.2E-11	8.4E-11	3.6E-10	1.1E-09	2.3E-09	4.7E-09
As-71						7.8E-26	2.2E-24	1.8E-22	1.8E-20	1.6E-21	6.3E-21	1.9E-20	3.4E-20
As-72					3.7E-27	8.8E-23	4.7E-20	1.0E-18	7.3E-17	6.3E-16	2.5E-15	5.9E-15	1.3E-14
As-73	80.30d		すべての化合物	1E-04	3.0E-16	4.9E-13	3.9E-11	3.9E-10	1.8E-08	2.7E-07	1.9E-06	6.1E-06	1.7E-05
As-74	17.77d		すべての化合物	6E-06	3.6E-15	6.9E-12	5.3E-10	4.9E-09	1.6E-07	1.4E-06	9.7E-06	3.6E-05	1.1E-04
As-76	1.0947d		すべての化合物	2E-04	3.4E-14	5.1E-11	5.3E-09	8.0E-08	6.1E-06	4.9E-05	2.0E-04	5.2E-04	1.3E-03
As-77	38.83h		すべての化合物	3E-04	1.5E-15	6.0E-12	6.6E-10	1.0E-08	1.0E-06	9.7E-06	3.2E-05	6.5E-05	1.2E-04
As-78	90.7m		すべての化合物	1E-03	1.5E-13	5.3E-10	1.9E-08	7.3E-08	5.5E-07	2.4E-06	7.2E-06	1.5E-05	2.9E-05
As-79	9.01m		すべての化合物	9E-03	1.7E-12	1.1E-09	1.1E-08	3.2E-08	1.2E-07	3.3E-07	8.6E-07	1.7E-06	3.4E-06
As-80	15.2s		記載なし	1E-04	3.8E-11	1.8E-09	1.5E-08	4.9E-08	3.1E-07	1.3E-06	4.0E-06	8.1E-06	1.6E-05
As-81					1.5E-14	9.4E-13	7.6E-12	2.3E-11	1.6E-10	6.9E-10	2.1E-09	4.3E-09	8.8E-09
As-82					2.0E-14	9.8E-13	7.9E-12	2.4E-11	1.7E-10	7.1E-10	2.2E-09	4.4E-09	9.1E-09
As-82m					2.4E-14	1.1E-12	8.5E-12	2.6E-11	1.8E-10	7.7E-10	2.3E-09	4.8E-09	9.8E-09
Se-71						1.2E-24	2.6E-23	2.1E-21	2.6E-20	2.8E-20	1.1E-19	2.4E-19	5.0E-19
Se-72					2.2E-24	2.4E-20	1.4E-17	2.9E-16	2.4E-14	3.0E-13	1.2E-12	2.7E-12	5.6E-12
Se-73	7.15h		元素状セレン、酸化物、水酸化物及び炭化物以外の無機化合物	1E-03	2.4E-14	3.7E-11	2.6E-09	1.7E-08	1.8E-07	8.2E-07	2.5E-06	5.0E-06	1.0E-05
Se-73m			元素状セレン、酸化物、水酸化物及び炭化物	6E-04	2.8E-13	2.7E-10	5.0E-09	1.6E-08	1.2E-07	5.1E-07	1.5E-06	3.1E-06	6.2E-06
Se-75	119.79d		元素状セレン、酸化物、水酸化物及び炭化物以外の無機化合物	1E-04	1.6E-06	5.9E-05	4.7E-04	1.4E-03	9.7E-03	3.9E-02	9.8E-02	1.6E-01	2.1E-01
Se-75			元素状セレン、酸化物、水酸化物及び炭化物	1E-04									

表 4-3 Kr における評価時間ごとの放射能濃度及び濃度限度の比較 (3/6)

※ : 濃度限度を超える核種

nuclide	半減期	別添表3		100秒照射	19時間照射	88時間照射	1日照射	1週間照射	1か月照射	3か月照射	半年照射	1年照射
		別添表3 第5欄	別添表3 第3欄									
Se-77m	17.4s	放射線同位元素の種類		3.0E-02	3.0E-02	3.1E-02	3.1E-02	3.4E-02	3.5E-02	3.6E-02	3.7E-02	3.8E-02
		元素状セレン、酸化物、水酸化物及び炭化物以外の無機化合物	6E-01									
		元素状セレン、酸化物、水酸化物及び炭化物	5E-01									
Se-79	3.92m	放射線同位元素の種類		3.8E-13	1.7E-11	1.4E-10	4.1E-10	2.9E-09	1.2E-08	3.7E-08	7.5E-08	1.5E-07
		元素状セレン、酸化物、水酸化物及び炭化物以外の無機化合物	1E-04									
Se-81	18.45m	放射線同位元素の種類		3.1E-03	8.0E-02	1.5E-01	1.5E-01	1.5E-01	1.5E-01	1.5E-01	1.5E-01	1.5E-01
		元素状セレン、酸化物、水酸化物及び炭化物	1E-02									
		元素状セレン、酸化物、水酸化物及び炭化物以外の無機化合物	8E-03									
Se-81m	57.28m	放射線同位元素の種類		2.1E-03	5.4E-02	1.0E-01	1.0E-01	1.0E-01	1.0E-01	1.0E-01	1.0E-01	1.0E-01
		元素状セレン、酸化物、水酸化物及び炭化物	7E-03									
		元素状セレン、酸化物、水酸化物及び炭化物以外の無機化合物	3E-03									
Se-82		放射線同位元素の種類			5.3E-27	4.3E-26	1.3E-25	8.8E-25	3.8E-24	1.2E-23	2.4E-23	4.9E-23
		元素状セレン、酸化物、水酸化物及び炭化物以外の無機化合物	6E-03									
Se-83	57.28m	放射線同位元素の種類		1.4E-02	2.3E-01	2.7E-01	2.7E-01	2.7E-01	2.7E-01	2.7E-01	2.7E-01	2.7E-01
		元素状セレン、酸化物、水酸化物及び炭化物	4E-03									
Se-83m	70.1s	放射線同位元素の種類		1.6E-01	2.6E-01	2.6E-01	2.6E-01	2.6E-01	2.6E-01	2.6E-01	2.6E-01	2.6E-01
		元素状セレン、酸化物、水酸化物及び炭化物	4E-03									
Se-84		放射線同位元素の種類		2.8E-19	5.8E-17	5.5E-16	1.8E-15	1.4E-14	5.9E-14	1.7E-13	3.5E-13	6.9E-13
		元素状セレン、酸化物、水酸化物及び炭化物	4E-03									
Br-75		放射線同位元素の種類		1.6E-15	1.8E-12	4.9E-11	1.4E-10	2.4E-10	2.4E-10	2.4E-10	2.4E-10	2.3E-10
		元素状セレン、酸化物、水酸化物及び炭化物	4E-03									
Br-76	162h	放射線同位元素の種類										
		元素状セレン、酸化物、水酸化物及び炭化物	5E-04									
Br-76	162h	放射線同位元素の種類		3.1E-07	1.1E-05	7.7E-05	1.7E-04	2.7E-04	2.8E-04	2.8E-04	2.8E-04	2.7E-04
		元素状セレン、酸化物、水酸化物及び炭化物	3E-04									
Br-76m	1.31s	放射線同位元素の種類		1.7E-04	1.7E-04	1.7E-04	1.7E-04	1.8E-04	1.8E-04	1.8E-04	1.8E-04	1.8E-04
		元素状セレン、酸化物、水酸化物及び炭化物	1E-04									
Br-77	57.066h	放射線同位元素の種類										
		元素状セレン、酸化物、水酸化物及び炭化物	2E-03									
Br-77	57.066h	放射線同位元素の種類		5.0E-04	3.1E-02	3.2E-01	9.9E-01	3.8E+00	3.8E+00	3.8E+00	3.8E+00	3.7E+00
		元素状セレン、酸化物、水酸化物及び炭化物	1E-03									
Br-77m	4.28m	放射線同位元素の種類		2.5E-01	1.5E+00	2.3E+00	2.3E+00	2.3E+00	2.3E+00	2.3E+00	2.3E+00	2.3E+00
		元素状セレン、酸化物、水酸化物及び炭化物	1E-04									

表 4-3 Kr における評価時間ごとの放射能濃度及び濃度限度の比較 (4/6)

※ : 濃度限度を超える核種

nuclide	半減期	別添資料		100秒照射	1時間照射	8時間照射	1日照射	1週間照射	1か月照射	3か月照射	半年照射	1年照射
		放射性同位元素の種類	濃度限度									
Br-78	6.49m	H, Li, Na, Si, P, K, Ni, Rb, Sr, Mn, Ag, Te, I, Cs, Ba, La, Gd, W, Pt, Tl, Pb, Po, Frの有機化合物, Sawの無機化合物の有機化合物, Hgの有機化合物の有機化合物及び大部分の六価のウラン化合物の有機化合物	2E-02	2.4E-01	1.5E+00	1.5E+00	1.5E+00	1.5E+00	1.5E+00	1.5E+00	1.5E+00	1.5E+00
		Bk, Mg, Al, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Y, Zr, Nb, Tc, Ru, Rh, Pd, Cd, In, Sn, Sb, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, Re, Os, Ir, Au, Bi, Ra, Ac, Th, Pa, Np, Pu, Am, Cm, Bk, Cf, Es, Fm, Mdの有機化合物, Hgの無機化合物の有機化合物及び難溶性, 不溶性のウラン化合物の有機化合物	1E-02									
Br-79m	3.1s	記載なし	1E-04	1.1E+00	1.1E+00	1.1E+00	1.1E+00	1.1E+00	1.1E+00	1.1E+00	1.1E+00	1.1E+00
Br-80	17.68m	H, Li, Na, Si, P, K, Ni, Rb, Sr, Mn, Ag, Te, I, Cs, Ba, La, Gd, W, Pt, Tl, Pb, Po, Frの有機化合物, Sawの無機化合物の有機化合物, Hgの有機化合物の有機化合物及び大部分の六価のウラン化合物の有機化合物	2E-02	2.8E-02	4.5E-01	7.8E-01	9.2E-01	9.4E-01	9.9E-01	1.1E+00	1.3E+00	1.7E+00
		Bk, Mg, Al, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Y, Zr, Nb, Tc, Ru, Rh, Pd, Cd, In, Sn, Sb, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, Re, Os, Ir, Au, Bi, Ra, Ac, Th, Pa, Np, Pu, Am, Cm, Bk, Cf, Es, Fm, Mdの有機化合物, Hgの無機化合物の有機化合物及び難溶性, 不溶性のウラン化合物の有機化合物	1E-02									
Br-80m	4.4200h	H, Li, Na, Si, P, K, Ni, Rb, Sr, Mn, Ag, Te, I, Cs, Ba, La, Gd, W, Pt, Tl, Pb, Po, Frの有機化合物, Sawの無機化合物の有機化合物, Hgの有機化合物の有機化合物及び大部分の六価のウラン化合物の有機化合物	3E-03	2.1E-03	7.0E-02	3.5E-01	4.7E-01	4.9E-01	5.0E-01	5.3E-01	5.7E-01	6.6E-01
		Bk, Mg, Al, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Y, Zr, Nb, Tc, Ru, Rh, Pd, Cd, In, Sn, Sb, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, Re, Os, Ir, Au, Bi, Ra, Ac, Th, Pa, Np, Pu, Am, Cm, Bk, Cf, Es, Fm, Mdの有機化合物, Hgの無機化合物の有機化合物及び難溶性, 不溶性のウラン化合物の有機化合物	2E-03									
Br-82	35.282h	H, Li, Na, Si, P, K, Ni, Rb, Sr, Mn, Ag, Te, I, Cs, Ba, La, Gd, W, Pt, Tl, Pb, Po, Frの有機化合物, Sawの無機化合物の有機化合物, Hgの有機化合物の有機化合物及び大部分の六価のウラン化合物の有機化合物	3E-04	1.5E-03	8.7E-02	7.0E-01	1.8E+00	4.6E+00	4.8E+00	4.8E+00	4.8E+00	4.8E+00
		Bk, Mg, Al, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Y, Zr, Nb, Tc, Ru, Rh, Pd, Cd, In, Sn, Sb, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, Re, Os, Ir, Au, Bi, Ra, Ac, Th, Pa, Np, Pu, Am, Cm, Bk, Cf, Es, Fm, Mdの有機化合物, Hgの無機化合物の有機化合物及び難溶性, 不溶性のウラン化合物の有機化合物	2E-04									

表 4-3 Kr における評価時間ごとの放射能濃度及び濃度限度の比較 (6/6)

※ : 濃度限度を超える核種

nuclide	半減期	別添第2 放射性同位元素の種類		別添第3 第3種		100秒照射	1時間照射	8時間照射	1日照射	1週間照射	1か月照射	3か月照射	半年照射	1年照射	
		放射能濃度	濃度限度	放射能濃度	濃度限度										
Kr-88												2.5E-25	3.6E-24	4.2E-23	
Rb-81								1.2E-26	5.4E-24	3.4E-20	4.9E-18	1.2E-16	7.6E-16	4.0E-15	
Rb-81m								1.3E-26	3.0E-24	9.7E-21	1.3E-18	3.0E-17	1.9E-16	9.9E-16	
Rb-82							7.6E-22	3.7E-18	2.2E-16	1.9E-13	9.6E-12	1.9E-10	9.3E-10	3.5E-09	
Rb-82m							2.8E-23	8.6E-19	1.3E-16	1.7E-13	1.4E-11	2.7E-10	1.4E-09	5.2E-09	
Rb-83	86.2d						1.0E-17	4.5E-14	2.7E-12	1.6E-09	1.1E-07	2.2E-06	1.1E-05	4.1E-05	
Rb-84	32.82d						8.9E-10	4.3E-07	7.9E-06	5.8E-04	9.6E-03	6.9E-02	1.7E-01	4.1E-01	
Rb-84m	20.26m						2.8E-11	7.5E-07	4.0E-04	3.7E-03	1.6E-02	4.9E-02	1.0E-01	2.1E-01	
Rb-86	18.942d						6.6E-14	3.2E-09	1.3E-06	1.6E-03	2.4E-02	1.3E-01	3.2E-01	7.0E-01	
Rb-86m	1.017m						1.8E-10	7.4E-07	3.5E-05	1.7E-03	7.9E-03	2.2E-02	4.5E-02	9.2E-02	
Rb-87							9.4E-19	1.0E-15	2.8E-14	1.0E-13	3.3E-12	9.9E-12	2.0E-11	4.0E-11	
Rb-88	17.773m						3.4E-13	8.8E-09	4.5E-07	1.7E-06	1.3E-05	1.7E-04	3.4E-04	6.8E-04	
Rb-89								4.8E-24	2.4E-22	1.0E-19	7.7E-18	1.8E-16	1.2E-15	6.4E-15	
Rb-90								1.2E-26	3.8E-24	2.0E-26	6.4E-24	2.7E-22	3.8E-21	4.4E-20	
Rb-90m								2.0E-26	6.4E-24	2.0E-26	6.4E-24	4.6E-22	6.4E-21	7.4E-20	
Sr-82							4.1E-26	1.0E-24	2.5E-22	5.7E-18	3.2E-15	1.9E-13	1.8E-12	1.2E-11	
Sr-83							7.2E-23	1.1E-20	6.4E-17	3.3E-11	3.3E-11	4.3E-09	1.0E-07	6.4E-07	
Sr-83m							2.2E-23	4.6E-20	2.0E-16	1.2E-14	7.0E-12	5.4E-10	1.1E-08	3.6E-07	
Sr-85	64.850d						2.9E-22	1.9E-20	1.6E-16	3.0E-14	1.4E-10	4.3E-08	2.2E-06	1.5E-04	
Sr-85m	67.63m						3.9E-24	2.0E-18	3.4E-14	2.8E-12	2.0E-09	1.4E-07	2.7E-06	1.5E-05	
Sr-87m	2.815h						4.4E-22	5.9E-18	7.3E-14	7.1E-12	6.0E-09	4.5E-07	8.4E-06	4.5E-05	
Sr-88								6.4E-22	3.7E-18	1.6E-16	6.7E-14	5.1E-12	1.1E-10	7.6E-10	4.2E-09
Sr-90									5.3E-26	1.6E-22	5.4E-20	3.8E-18	5.3E-17	6.2E-16	
Sr-91										9.4E-26	3.9E-23	2.9E-21	4.1E-20	4.8E-19	
Y-86												4.2E-27	1.4E-24	4.2E-23	8.9E-22
Y-86m												2.3E-25	6.8E-24	1.4E-22	
Y-87										1.3E-25	6.5E-22	2.1E-19	6.4E-18	1.4E-16	
Y-87m										4.4E-25	8.8E-22	2.0E-19	5.3E-18	1.1E-16	
Y-88										2.2E-21	3.1E-18	6.3E-16	1.7E-14	3.4E-13	
Y-88m									9.6E-26	6.7E-18	5.6E-16	1.6E-14	1.4E-13	1.2E-12	
Y-90							6.0E-26	3.5E-22	1.6E-20	1.3E-20	1.0E-17	9.5E-16	1.4E-14	1.7E-13	
Y-90m									8.0E-26	4.3E-22	1.6E-19	1.1E-17	1.6E-16	1.8E-15	
Y-91										7.9E-24	1.9E-21	1.9E-21	5.0E-20	9.0E-19	
Y-91m										4.6E-23	3.9E-21	3.9E-21	5.8E-20	6.9E-19	
Y-92										8.3E-26	4.6E-23	1.2E-25	3.2E-24	5.6E-23	
Zr-87														4.5E-27	
Zr-88													1.5E-26	1.1E-24	5.1E-23
Zr-88m													1.8E-20	6.8E-19	1.8E-17
Zr-89										3.9E-27	4.0E-23	1.8E-20	3.2E-21	1.0E-19	2.7E-18
Zr-89m													3.4E-20	1.1E-18	2.7E-17
Zr-90m										3.8E-26	1.1E-22	3.4E-20	1.1E-18	2.7E-17	

4.4 Xeの放射性生成核種について

表 3-7 より、一年間照射後から各冷却期間後（評価時間）での放射能濃度上位 10 核種に入る核種に対して、照射直後から照射終了 50 年後までの放射能濃度変化を図 4-4 に示す。Xe からは多くの放射化核種が生成される。照射直後は Xe の同位体核種である Xe-131m（半減期：11.84 日）、Xe-133（半減期：5.2475 日）、Xe-135（半減期：9.14 時間）、Xe-125（半減期：16.9 時間）、Xe-129m（半減期：8.88 日）、Xe-133m（半減期：2.198 日）、Xe-135（半減期：9.14 時間）、Xe-127（半減期：36.346 日）、Xe-134m（半減期：290m 秒）が生成される。また、Xe-125 が壊変した I-125（半減期：59.407 日）も照射直後の生成量が多い。図 5-4 から、照射直後から照射終了 1 か月までは Xe-131m が支配的な核種となり、照射終了 1 か月後から照射終了 1 年後までは I-125 が支配的な核種となる。その後の照射終了 1 年後からは Cs-134 が支配的となり、照射終了 10 年も経つと Cs-137 が支配的な核種となる。フィルター集塵後に放射性固体廃棄物として処分する際に、安全上問題となりうる放射性生成核種は政令濃度区分値に規定されている I-129（半減期： 1.57×10^7 年）と、処分濃度上限値に規定されている Cs-137（半減期：30.08 年）が挙げられるが、I-129 の放射能濃度が 10^{-8} Bq/cm³ オーダー、Cs-137 の放射能濃度も 10^{-2} Bq/cm³ オーダーと低く安全上問題とならないことが分かった。

ここで、I については Kr と同様に東海再処理施設において実績がある[8]。I の放出量を低減させるために、銀系吸着材を用いたヨウ素フィルターを設置している。そのため、I については、ヨウ素フィルターを用いて適切に放出することを検討する必要がある。また、Xe からの放射性生成核種は、人の感受性が高い放射性核種（ヨウ素同位体、セシウム同位体など）を生成する傾向が強いため、その使用は好ましくないものとする。

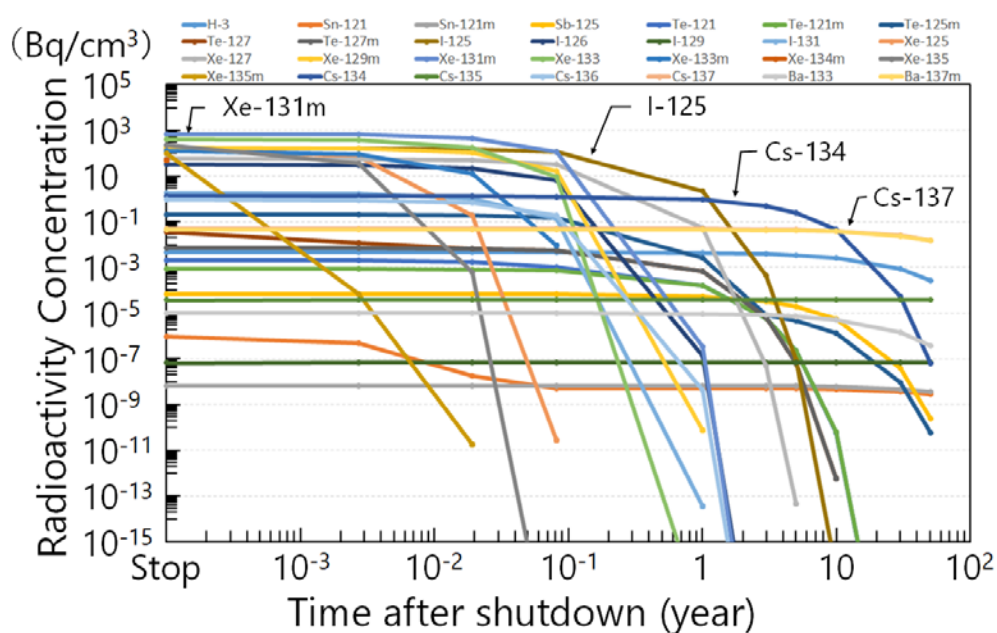


図 4-4 Xe ガスの照射直後から照射終了 50 年後までの放射能濃度変化

放射性気体廃棄物として安全上問題となりうる放射性生成核種を検討するために、排気中又は空気中の濃度限度と評価時間（照射 100 秒後、照射 1 時間後、照射 8 時間後、照射 1 日後、照射 1 週間後、照射 1 か月後、照射 3 か月後、照射半年後、照射 1 年後）に生成される核種を比較し、濃度限度を超えている核種を抽出した。表 5-4 に濃度限度を超えている核種を示す。表 4-4 に示すように、照射 100 秒後時点で濃度限度を超えている核種は、22 核種あり、その核種でも特に Xe-134m（半減期：290m 秒）が約 49 万倍、Xe-125m（半減期：57 秒）が約 3700 倍、Xe-135m（半減期：15.29 分）が約 3600 倍、Xe-127m（半減期：69.2 秒）が約 1200 倍となっている。しかし、Xe-135m 以外の核種の半減期が秒オーダーであり、Xe-135m についても半減期が約 15 分のため、十分に減衰（約 1 日以上程度）を待ってから環境に放出する方法検討することにより、安全上問題とならない。

一方で、Xe-131m は、照射 100 秒程度では濃度限度の半分の放射能濃度であるが、照射 8 時間で濃度限度を超えてしまう。また、I-125 についても Xe-131m と同様に照射 100 秒程度では濃度限度の四分の一程度の放射能濃度であるが、照射 8 時間で濃度限度を超えてしまう。従って、Xe-131m については十分な減衰を待ってから環境に放出する方法を検討し、I-125 については固体廃棄物と同様にフィルターなどで濃度限度を超えない方法を用いる必要があると考える。

次に、照射 1 年間は安全側の評価になり過ぎになるが、照射 1 年後で検討する。照射 1 年後に濃度限度を超えている核種は 55 核種ある。照射 100 秒後では、濃度限度以下であった I-125 が濃度限度を約 2 千万倍と超えており、I-125 の半減期が 59.407 日と比較的短い、濃度限度を超えたままの状態でも照射終了 3 年後まで続くことになる。そのため、フィルターなどで濃度限度を超えない方法を用いる必要があると考える。また、照射 100 秒後では、濃度限度を超えていなかった Cs-134 が約 7 万倍となり、Cs-137 も約 1600 倍となるため、Cs をフィルターなどで除去する必要がある。

表 4-4 Xe における評価時間ごとの放射能濃度及び濃度限度の比較 (1/6)

※ : 濃度限度を超える核種

nuclide	半減期	別添第2 放射能同位元素の種類		別添第3 第3種									
		元素/水素 /タリ	第5種 7E-01 7E-01 5E-03 3E-03	100秒照射	19時間照射	88時間照射	1日照射	1週間照射	1か月照射	3か月照射	半年照射	1年照射	
H-3	12.32y	水	5E-03	15E-08	5.4E-07	4.3E-06	1.3E-05	9.1E-05	3.9E-04	1.2E-03	2.3E-03	4.6E-03	
Rh-109												4.2E-27	
Rh-110												7.2E-27	
Rh-110m												6.6E-27	
Pd-109								8.0E-27	8.1E-25	2.3E-23	2.0E-22	1.6E-21	
Pd-109m								4.7E-26	1.6E-25	4.4E-24	3.7E-23	2.9E-22	
Pd-111								1.4E-26	3.6E-24	9.4E-23	7.6E-22	5.9E-21	
Pd-111m								3.1E-26	1.1E-24	3.0E-23	2.4E-22	1.9E-21	
Pd-112								2.2E-24	1.6E-22	4.0E-21	3.2E-20	2.3E-19	
Pd-113								1.0E-24	7.2E-23	1.8E-21	1.4E-20	1.0E-19	
Pd-113m								1.1E-26	7.9E-25	2.0E-23	1.6E-22	1.1E-21	
Pd-114												6.9E-27	
Ag-108								7.7E-27	7.4E-25	2.0E-23	1.7E-22	1.3E-21	
Ag-109m								9.0E-27	9.0E-27	4.7E-25	6.7E-24	8.9E-23	
Ag-110										1.4E-26	3.7E-25	9.1E-24	
Ag-110m								5.7E-26	4.7E-24	1.4E-22	1.2E-21	9.9E-21	
Ag-111								2.5E-25	7.2E-24	1.3E-22	9.8E-22	7.1E-21	
Ag-112							2.0E-26	3.7E-24	6.7E-23	7.4E-22	4.1E-21	2.2E-20	
Ag-113								1.4E-24	1.1E-22	2.9E-21	2.3E-20	1.7E-19	
Ag-113m								7.0E-25	5.3E-23	1.4E-21	1.1E-20	8.0E-20	
Ag-114								2.7E-25	2.0E-23	5.0E-22	4.0E-21	3.0E-20	
Ag-114m								4.6E-25	3.4E-23	8.5E-22	6.8E-21	5.2E-20	
Ag-115								1.8E-24	1.3E-22	3.1E-21	2.5E-20	1.8E-19	
Ag-115m								2.6E-24	1.8E-22	4.5E-21	3.6E-20	2.5E-19	
Ag-116								5.0E-27	3.7E-24	9.2E-21	7.3E-20	5.3E-19	
Ag-116m								2.8E-24	2.0E-22	5.0E-21	4.0E-20	2.9E-19	
Cd-109												9.9E-26	
Cd-111m								6.2E-26	9.0E-22	1.8E-20	1.4E-19	9.9E-19	
Cd-113m								2.9E-24	7.8E-20	2.0E-18	1.6E-17	1.2E-16	
Cd-115				4.1E-25	4.1E-25	2.3E-22	7.8E-21	2.9E-18	8.3E-17	7.8E-16	3.1E-15	1.2E-14	
Cd-115m				5.9E-27	4.3E-24	2.4E-22	1.9E-19	1.2E-17	2.5E-16	1.5E-15	1.5E-15	7.3E-15	
Cd-117				3.5E-23	1.3E-19	3.2E-18	2.1E-16	2.1E-16	3.7E-15	3.0E-14	1.1E-13	4.0E-13	
Cd-117m				2.7E-23	1.0E-19	2.9E-18	1.2E-16	1.2E-16	3.7E-15	3.0E-14	1.1E-13	4.0E-13	
Cd-118				5.2E-23	1.2E-20	1.9E-19	1.2E-17	1.2E-17	4.7E-16	8.6E-15	5.4E-14	3.0E-13	
Cd-119				6.2E-27	5.3E-23	4.7E-21	1.0E-19	7.0E-17	5.3E-15	1.1E-13	8.9E-13	3.6E-12	
Cd-119m				5.8E-27	4.3E-23	3.7E-21	8.2E-20	5.5E-17	4.2E-15	8.6E-14	5.4E-13	2.8E-12	
Cd-120				5.4E-25	2.0E-21	1.3E-19	1.2E-18	6.7E-17	2.1E-15	4.4E-14	2.8E-13	1.3E-12	
Cd-121				5.1E-25	6.8E-25	3.3E-23	2.9E-22	1.3E-20	3.2E-19	6.2E-18	4.0E-17	1.9E-16	
Cd-121m				6.8E-25	4.3E-23	3.7E-22	1.7E-20	4.1E-19	7.8E-18	5.0E-17	2.3E-16	1.3E-15	
Cd-122				1.3E-25	2.1E-22	1.4E-20	1.3E-19	5.5E-18	6.5E-17	2.8E-16	6.3E-16	1.3E-15	
Cd-123				8.2E-27	1.0E-23	4.6E-22	3.4E-21	1.4E-19	2.3E-18	1.6E-17	5.0E-17	1.5E-16	
In-111												3.9E-24	
In-111m												1.3E-25	
In-112								6.0E-27	2.1E-24	1.7E-22	2.7E-21	4.0E-20	

表 4-4 Xe における評価時間ごとの放射能濃度及び濃度限度の比較 (2/6)

※ : 濃度限度を超える核種

nuclide	別添表2 放射能評価要素の単位										別添表3 第5種	
	半減期	100秒照射	15分間照射	8時間照射	1日照射	1週間照射	1か月照射	3か月照射	半年照射	1年照射		
In-112m						49E-22	17E-24	13E-22	22E-21	32E-20		
In-113m						50E-26	79E-22	79E-22	17E-20	38E-19		
In-114				12E-25	46E-24	61E-22	14E-20	22E-19	15E-18	96E-18		
In-114m						38E-23	52E-21	12E-19	96E-19	67E-18		
In-115m						38E-17	21E-15	11E-15	37E-15	12E-14		
In-116		98E-25	88E-21	21E-18	22E-17	23E-16	11E-15	51E-15	17E-14	57E-14		
In-116m		24E-26	47E-21	47E-18	63E-17	71E-16	28E-15	26E-14	76E-14			
In-116n		28E-25	12E-21	27E-19	28E-18	33E-17	22E-16	14E-15	51E-15	19E-14		
In-117		14E-23	54E-19	11E-16	12E-15	58E-14	83E-13	48E-12	12E-11	28E-11		
In-117m		82E-23	36E-20	11E-17	16E-16	35E-15	12E-13	70E-13	18E-12	45E-12		
In-118		77E-20	11E-16	72E-15	65E-14	30E-12	42E-11	24E-10	61E-10	14E-09		
In-118m		84E-21	11E-16	88E-15	78E-14	36E-12	51E-11	28E-10	74E-10	17E-09		
In-118n		86E-21	14E-17	89E-16	81E-15	37E-13	52E-12	29E-11	76E-11	18E-10		
In-119		24E-23	30E-19	78E-17	16E-15	14E-13	10E-12	27E-12	52E-12	12E-11		
In-119m		11E-24	53E-20	27E-17	63E-16	58E-14	44E-13	13E-12	30E-12	89E-12		
In-120		12E-24	87E-21	34E-18	56E-17	52E-15	13E-13	17E-12	57E-12	23E-11		
In-120m		32E-25	12E-20	63E-18	99E-17	75E-15	17E-13	17E-12	69E-12	27E-11		
In-120n		43E-26	28E-21	18E-18	23E-17	15E-15	29E-14	27E-13	11E-12	41E-12		
In-121		14E-24	45E-21	38E-19	55E-18	15E-15	11E-13	21E-12	11E-11	37E-11		
In-121m		79E-26	13E-21	12E-19	18E-18	47E-16	34E-14	60E-13	33E-12	12E-11		
In-122		55E-24	64E-21	35E-19	42E-18	15E-15	12E-13	27E-12	17E-11	90E-11		
In-122m		74E-24	11E-20	59E-19	72E-18	26E-15	21E-13	48E-12	31E-11	16E-10		
In-122n		51E-25	76E-22	41E-20	50E-19	18E-16	15E-14	30E-13	21E-12	11E-11		
In-123		97E-24	16E-20	11E-18	10E-17	47E-16	11E-14	20E-13	12E-12	53E-12		
In-123m		13E-24	50E-21	31E-19	32E-18	15E-16	35E-15	63E-14	38E-13	17E-12		
In-124		15E-24	24E-21	16E-19	13E-18	39E-17	36E-16	18E-15	54E-15	19E-14		
In-124m		37E-25	61E-22	40E-20	32E-19	88E-18	73E-17	31E-16	86E-16	28E-15		
In-125		78E-23	11E-21	75E-20	67E-19	29E-17	34E-16	15E-15	34E-15	73E-15		
In-125m		19E-23	35E-22	24E-20	21E-19	91E-18	11E-16	47E-16	11E-15	23E-15		
In-126		37E-26	45E-23	20E-21	15E-20	63E-19	10E-17	71E-17	22E-16	64E-16		
In-126m		22E-26	28E-23	12E-21	93E-21	39E-19	62E-18	43E-17	13E-16	39E-16		
Sr-111								38E-27	13E-23	38E-24		
Sr-113						80E-27	59E-24	73E-22	17E-20	38E-19		
Sr-113m						72E-25	12E-22	54E-21	69E-20	92E-19		
Sr-117m						72E-11	89E-10	39E-09	81E-09	15E-08		
Sr-119m						33E-11	67E-10	49E-09	18E-08	42E-08		
Sr-121						14E-09	19E-08	12E-07	38E-07	11E-06		
Sr-121m						18E-15	19E-13	10E-11	21E-10	13E-09		
Sr-123						18E-15	19E-13	10E-11	21E-10	13E-09		
Sr-123m						11E-12	97E-12	48E-10	13E-08	27E-07		
Sr-125						58E-10	14E-08	11E-07	94E-07	32E-06		
Sr-125m						32E-12	12E-09	14E-08	14E-07	29E-07		
Sr-125n						89E-10	62E-09	27E-08	18E-07	33E-07		
Sr-126						42E-20	31E-19	13E-17	46E-15	13E-14		
Sr-127						12E-14	41E-13	13E-11	17E-10	68E-10		
Sr-127m						17E-12	13E-11	57E-11	17E-10	68E-10		
Sr-127n						42E-13	13E-12	88E-12	11E-10	44E-10		
Sr-128						10E-12	71E-12	76E-12	22E-10	44E-10		
Sr-128m						29E-12	29E-12	88E-12	11E-11	15E-11		
Sr-128n						50E-13	12E-12	13E-12	19E-12	26E-12		
Sr-129						23E-13	12E-12	13E-12	12E-12	12E-12		
Sr-129m						82E-14	23E-13	12E-12	12E-12	12E-12		
Sr-129n						68E-14	19E-13	93E-13	93E-13	93E-13		
Sr-130						11E-17	91E-17	26E-16	13E-15	13E-15		
Sr-130m						74E-21	93E-19	75E-18	11E-16	11E-16		

表 4-4 Xe における評価時間ごとの放射能濃度及び濃度限度の比較 (3/6)

※ : 濃度限度を超える核種

nuclide	半減期	別添表3 放射性同位元素の種類		別添表3 核種	100秒照射	18時間照射	88時間照射	1日照射	1週間照射	1か月照射	3か月照射	半年照射	1年照射
		放射性同位元素の種類	核種										
Sb-116							47E-27	1.2E-25	2.2E-23	4.8E-22	2.1E-21	4.6E-21	9.3E-21
Sb-117							1.2E-26	2.5E-24	5.1E-23	2.3E-22	2.3E-22	5.1E-22	1.0E-21
Sb-118					1.1E-26	5.0E-22	1.7E-19	2.4E-18	1.0E-16	8.8E-16	3.1E-15	8.5E-15	1.3E-14
Sb-118m					3.1E-17	7.1E-15	6.5E-14	2.2E-13	1.8E-12	8.8E-12	2.9E-11	6.0E-11	1.2E-10
Sb-119					5.1E-20	6.4E-17	3.4E-15	2.5E-14	1.2E-13	3.7E-12	7.4E-12	1.4E-11	
Sb-120					2.8E-16	2.5E-12	6.4E-10	6.4E-09	6.8E-08	2.4E-07	7.1E-07	1.4E-06	2.8E-06
Sb-120m					3.5E-14	1.4E-10	6.8E-08	2.0E-08	3.5E-08	8.0E-08	3.2E-07	8.0E-07	1.8E-06
Sb-122	2.7238d			3E-04	2.1E-17	1.6E-13	4.0E-11	4.2E-10	5.7E-09	2.3E-08	1.3E-07	3.3E-07	8.0E-07
Sb-122m	4.191m			1E-04	1.4E-16	7.2E-12	3.5E-09	7.9E-08	7.9E-06	5.9E-05	1.3E-04	1.7E-04	1.9E-04
Sb-124	80.20d			9E-05	3.6E-14	4.0E-10	2.8E-08	2.1E-07	3.4E-06	1.4E-05	3.0E-05	3.8E-05	3.8E-05
Sb-124m	80s			2E-05	5.4E-18	1.1E-14	1.1E-12	1.7E-11	5.4E-09	4.0E-07	7.7E-06	3.9E-05	1.3E-04
Sb-124n	20.2m			4E-02	2.3E-13	2.8E-11	3.7E-10	2.3E-09	1.2E-07	2.1E-06	1.5E-05	4.3E-05	1.0E-04
Sb-125	2.75656y			3E-06	2.5E-15	1.9E-12	3.9E-11	2.8E-10	1.4E-08	2.4E-07	1.7E-06	5.0E-06	1.2E-05
Sb-126	12.35d			1E-04	6.1E-18	6.6E-15	3.2E-13	3.5E-12	1.1E-09	9.9E-08	2.2E-06	1.4E-05	7.4E-05
Sb-126m	19.15m			4E-02	1.1E-16	1.9E-13	1.5E-11	1.8E-10	5.4E-09	9.9E-08	1.1E-06	4.4E-06	1.3E-05
Sb-126n	11s			1E-04	4.6E-13	3.7E-10	4.8E-08	1.5E-06	1.1E-07	8.0E-07	6.0E-06	2.0E-05	5.1E-05
Sb-127					5.6E-12	2.4E-10	1.9E-09	5.8E-09	4.2E-08	2.8E-07	1.9E-06	6.1E-06	1.6E-05
Sb-128					2.4E-16	3.8E-13	2.5E-11	1.9E-10	4.9E-09	3.2E-08	1.1E-07	2.3E-07	4.7E-07
Sb-128m					4.5E-15	6.0E-12	3.4E-10	2.2E-09	2.8E-08	7.7E-08	1.9E-07	3.6E-07	6.9E-07
Sb-129					2.4E-13	1.3E-10	1.3E-09	4.0E-09	2.4E-08	7.7E-08	1.8E-07	3.9E-07	6.8E-07
Sb-129m					4.6E-16	5.4E-13	2.1E-11	9.6E-11	7.8E-10	2.7E-09	4.9E-08	3.9E-08	6.6E-08
Sb-130					2.4E-16	1.6E-13	1.5E-12	4.5E-12	2.8E-11	1.7E-10	2.1E-09	2.1E-08	2.3E-08
Sb-130m					3.7E-16	3.9E-13	7.3E-12	2.0E-11	6.1E-11	1.7E-10	4.5E-10	8.9E-10	1.8E-09
Sb-131					7.9E-16	3.0E-13	2.7E-12	7.8E-12	3.5E-11	1.3E-10	3.8E-10	7.8E-10	1.6E-09
Sb-131m					6.5E-16	5.0E-13	6.5E-12	1.7E-11	4.1E-11	4.2E-11	4.2E-11	4.2E-11	4.2E-11
Sb-132					3.1E-17	2.1E-14	2.3E-13	6.1E-13	1.4E-12	1.5E-12	1.5E-12	1.5E-12	1.5E-12
Sb-132m					4.7E-17	8.7E-15	7.1E-14	2.0E-13	8.1E-13	1.0E-12	1.0E-12	1.0E-12	1.0E-12
Te-117					5.9E-17	1.5E-14	1.3E-13	3.6E-13	1.4E-12	1.8E-12	1.8E-12	1.8E-12	1.8E-12
Te-117m					1.4E-23	4.5E-25	2.8E-22	9.3E-21	1.9E-19	3.9E-17	1.8E-16	4.0E-16	3.8E-16
Te-118					2.3E-24	4.5E-26	2.2E-22	5.3E-21	9.2E-19	1.9E-17	8.7E-17	1.9E-16	3.8E-16
Te-119					3.1E-15	3.9E-12	2.3E-10	1.7E-09	2.7E-08	1.3E-07	3.9E-07	7.8E-07	1.5E-06
Te-119m					3.7E-16	4.8E-13	3.0E-11	2.8E-10	9.8E-09	8.7E-08	3.1E-07	6.4E-07	1.3E-06

表 5-4 Xe における評価時間ごとの放射能濃度及び濃度限度の比較 (5/6)

※ : 濃度限度を超える核種

nuclide	半減期	別添表2		別添表3	100秒照射	18時間照射	1週間照射	1か月照射	3か月照射	半年照射	1年照射
		放射性同位元素の種類	第5欄								
Te-134	41.8m	蒸気	1E-03		8.1E-06	1.9E-04	3.0E-04	3.0E-04	3.0E-04	3.0E-04	3.0E-04
		酸化物、水酸化物及び硫酸塩以外の化合物	2E-03								
		酸化物、水酸化物及び硫酸塩	2E-03								
I-122	3.63m	蒸気	7E-03		1.2E-06	4.3E-05	4.8E-05	4.9E-05	4.8E-05	4.8E-05	4.3E-05
		ヨウ化ヨウ素	1E-01								
		ヨウ化ヨウ素以外の化合物	3E-02								
I-123	13.2235h	蒸気	5E-04		5.3E-05	1.8E-02	5.1E-01	2.2E+00	2.1E+00	2.1E+00	1.9E+00
		ヨウ化ヨウ素	1E-03								
		ヨウ化ヨウ素以外の化合物	9E-06								
I-124	4.1760d	蒸気	1E-05		9.2E-06	3.3E-04	2.6E-03	7.4E-03	6.2E-02	9.3E-02	9.0E-02
		ヨウ化ヨウ素	2E-05								
		ヨウ化ヨウ素以外の化合物	6E-08								
I-125	59.407d	蒸気	1E-03		1.5E-06	2.1E-03	1.3E-01	9.3E-01	6.1E+01	1.6E+02	1.6E+02
		ヨウ化ヨウ素	4E-03								
		ヨウ化ヨウ素以外の化合物	5E-06								
I-126	12.93d	蒸気	2E-03		1.5E-06	5.5E-05	5.9E-04	5.0E-03	6.5E+00	3.1E+01	3.2E+01
		ヨウ化ヨウ素	5E-03								
		ヨウ化ヨウ素以外の化合物	1E-05								
I-128	24.99m	蒸気	2E-03		6.0E-02	1.1E+00	1.3E+00	1.3E+00	1.4E+00	1.6E+00	2.1E+00
		ヨウ化ヨウ素	9E-03								
		ヨウ化ヨウ素以外の化合物	1E-06								
I-129	1.57E+7y	蒸気	2E-06		2.2E-13	8.1E-12	6.9E-11	1.9E-10	1.4E-09	3.6E-08	7.1E-08
		ヨウ化ヨウ素	3E-06								
		ヨウ化ヨウ素以外の化合物	6E-06								
I-130	12.36h	蒸気	7E-06		3.9E-04	2.1E-02	1.5E-01	3.2E-01	4.3E-01	4.5E-01	4.7E-01
		ヨウ化ヨウ素	2E-04								
		ヨウ化ヨウ素以外の化合物	1E-04								
I-130m	8.84m	蒸気	5E-08		2.7E-02	2.2E-01	2.3E-01	2.3E-01	2.3E-01	2.4E-01	2.5E-01
		ヨウ化ヨウ素	7E-08								
		ヨウ化ヨウ素以外の化合物	1E-06								
I-131	8.0252d	蒸気	4E-04		1.9E-04	6.9E-03	5.4E-02	1.6E-01	8.7E-01	1.9E+00	1.8E+00
		ヨウ化ヨウ素	6E-04								
		ヨウ化ヨウ素以外の化合物	1E-03								
I-132	2.265h	蒸気	4E-04		8.0E-03	2.5E-01	9.5E-01	1.1E+00	1.1E+00	1.1E+00	1.1E+00
		ヨウ化ヨウ素	1E-03								
		ヨウ化ヨウ素以外の化合物	4E-04								
I-132m	1.387h	蒸気	6E-04		1.6E-03	4.7E-02	1.2E-01	1.2E-01	1.2E-01	1.2E-01	1.2E-01
		ヨウ化ヨウ素	1E-03								
		ヨウ化ヨウ素以外の化合物	3E-05								
I-133	20.80h	蒸気	7E-05		1.9E-05	7.7E-04	6.1E-03	1.5E-02	2.6E-02	2.6E-02	2.6E-02
		ヨウ化ヨウ素	8E-04								
		ヨウ化ヨウ素以外の化合物	2E-03								
I-133m	9h	蒸気	7E-05		6.5E-04	6.5E-04	6.5E-04	6.5E-04	6.5E-04	6.5E-04	6.5E-04
		ヨウ化ヨウ素	8E-04								
		ヨウ化ヨウ素以外の化合物	2E-03								
I-134	42.5m	蒸気	2E-03		4.8E-03	1.3E-01	2.4E-01	2.5E-01	2.4E-01	2.4E-01	2.4E-01
		ヨウ化ヨウ素	1E-04								
		ヨウ化ヨウ素以外の化合物	1E-04								
I-134m	3.52m	蒸気	1E-04		7.5E-03	2.7E-02	2.7E-02	2.7E-02	2.7E-02	2.7E-02	2.7E-02
		ヨウ化ヨウ素	2E-04								
		ヨウ化ヨウ素以外の化合物	3E-04								
I-135	6.58h	蒸気	1E-04		1.6E-05	6.2E-04	3.9E-03	5.7E-03	6.2E-03	6.2E-03	6.2E-03
		ヨウ化ヨウ素	2E-04								
		ヨウ化ヨウ素以外の化合物	3E-04								
I-136	53.4h	蒸気	1E-03		1.3E-03	2.3E-03	2.3E-03	2.3E-03	2.3E-03	2.3E-03	2.3E-03
		ヨウ化ヨウ素	1E-04								
		ヨウ化ヨウ素以外の化合物	1E-04								
Xe-123	2.08h	蒸気	1E-03		2.0E-02	6.2E+00	2.0E+00	2.2E+00	2.2E+00	2.0E+00	1.9E+00
		ヨウ化ヨウ素	3E-03								
		ヨウ化ヨウ素以外の化合物	7E-03								
Xe-125	16.9h	蒸気	7E-03		2.6E-01	8.8E+00	6.1E+01	1.4E+02	2.2E+02	2.1E+02	1.9E+02
		ヨウ化ヨウ素	3E-03								
		ヨウ化ヨウ素以外の化合物	7E-03								
Xe-127	36.346d	蒸気	3E-03		1.1E-03	4.5E-02	3.6E-01	1.1E+00	7.0E+00	4.6E+01	5.5E+01
		ヨウ化ヨウ素	5E-03								
		ヨウ化ヨウ素以外の化合物	3E-02								
Xe-127m	8.88d	蒸気	3E-02		6.2E-03	9.8E-02	9.8E-02	9.8E-02	9.8E-02	9.8E-02	1.0E-01
		ヨウ化ヨウ素	1E-02								
		ヨウ化ヨウ素以外の化合物	3E-02								

表 4-4 Xe における評価時間ごとの放射能濃度及び濃度限度の比較 (6/6)

※ :濃度限度を超える核種

nuclide	半減期	別添表2 放射性同位元素の濃度		別添表3 核種	100秒照射	1分照射	8時間照射	1日照射	1週間照射	1か月照射	3か月照射	半年照射	1年照射
		プルトニウム	セシウム										
Xe-131m	11.84d	47E-02	17E-00	40E-01	68E-23	89E-19	83E-17	55E-25	40E-25	48E-22	31E-20	30E-19	24E-18
Xe-133	5.2475d	42E-02	15E-00	12E-01	58E-18	23E-14	18E-12	83E-17	43E-20	30E-17	20E-15	28E-14	21E-13
Xe-134m	2.198d	45E-02	16E-00	12E-01	36E-15	17E-10	88E-08	23E-06	63E-04	20E-02	10E-01	23E-01	26E-05
Xe-134m	200ms	50E-01	50E-01	50E-01	70E-16	36E-11	20E-08	52E-07	14E-04	65E-03	81E-02	33E-01	14E-00
Xe-135	9.14h	28E-01	14E-01	10E-02	13E-13	23E-10	15E-08	99E-08	11E-06	59E-02	22E-01	48E-01	92E-01
Xe-135m	15.28m	73E+00	94E+01	10E+02	69E-14	42E-09	24E-06	50E-06	45E-03	61E-02	27E-01	57E-01	11E+00
Xe-137	3.818m	57E-01	22E+00	22E+00	33E-14	93E-08	63E-06	41E-06	47E-04	20E-03	53E-03	10E-02	19E-02
Cs-128					22E-08	21E-04	53E-21	18E-19	68E-17	41E-03	12E-02	29E-02	50E-02
Cs-129					38E-24	31E-21	90E-20	31E-21	21E-23	17E-23	46E-22	31E-20	31E-20
Cs-130													
Cs-131	9.688d												
Cs-132	6.480d												
Cs-134	2.0652y												
Cs-134m	2.912h												
Cs-135	2.3E+6y												
Cs-135m	53m												
Cs-136	13.04d												
Cs-136m	17.5h												
Cs-137	30.08y												
Cs-138m													
Cs-138													
Cs-140													
Ba-127													
Ba-128													
Ba-129													
Ba-129m													
Ba-131	11.50d												
Ba-131m	14.6m												
Ba-133	10.951y												
Ba-133m	38.83h												
Ba-135m	28.7h												
Ba-136m	0.3084s												
Ba-137m	2.552m												
Ba-139													
Ba-140													
Ba-141													
La-136													
La-136m													
La-137													
La-138													
La-140													
La-141													
La-142													
Ce-137													
Ce-137m													
Ce-139													
Ce-139m													
Ce-141													
Pr-140													
Pr-142													
Pr-142m													
Nd-141													
Nd-141m													

5. まとめ

ダイバータ領域での熱負荷低減のために注入される不純物ガス (Ne, Ar, Kr, Xe) の放射化計算を実施し、放射性気体廃棄物としての環境放出濃度や、フィルター集塵後の放射性固体廃棄物としての処分区分を検討した。表 5-1 に安全上考慮すべき放射性生成核種の特徴を示す。

Ne については放射性廃棄物の濃度規制の観点から安全上問題となる濃度に達しないことが分かった。Ar については、Ar-39 (半減期: 269 年) は放射性廃棄物の濃度規制の観点から安全上問題となるが、運転時間 (照射時間) を調整することにより、濃度限度以下にすることが可能と考えられる。一方、Kr、Xe については、生成される放射性生成核種が多く、生成される核種は濃度限度を超える。Kr については照射時間の制限や回収・保管等の対策を施す必要がある。Xe については、昇華によって大気中を拡散しやすくヒトの感受性の高い放射性核種が高濃度で生成されるため適用は避けるべきである。

表 5-1 不純物ガス (Ne, Ar, Kr, Xe) 由来の放射性生成核種の特徴

不純物 ガス	安全上考慮すべき核種 (半減期)	特徴	取扱いの 容易さ
Ne	C-14 (5700 年) Na-22 (2.6027 年) Na-24 (14.997 時間)	生成される核種の多くは短半減期核種であり、1 年間の連続照射後でも約 1 日程度の冷却期間を経れば、安全上問題となる核種はない。	○
Ar	Ar-39 (269 年) Ar-41 (109.61 分) Cl-36 (3.01×10 ⁵ 年) S-35 (87.37 日)	Ar の同位体核種が生成される。Ar-39 は 1 週間以上の照射で濃度限度を超える。当該核種は半減期が長い為に希釈後に排気する必要がある。また、S-35 は 1 時間以上の照射で濃度限度を超え、3 年間の冷却期間を経て環境放出が可能になる。	△
Kr	Sr-90 (28.9 年) Se-75 (119.79 日) Kr-79 (35.04 時間) Kr-85 (10.752 年) Rb-84 (32.82 日)	Kr の同位体核種が生成される。運転停止後に Kr-83m, Kr-85m が 9 割を占め、Kr-85m からの壊変で Kr-85 が生成される。半減期が長い Kr-85 は、1 日以上以上の照射で濃度限度を超えるので、照射期間を調整する必要がある。また、回収技術が確立しているが、長い期間の保管管理が必要になり実用的でない。	△
Xe	I-129 (1.57×10 ⁷ 年) Cs-137 (30.08 年) I-129 等の I の同位体 Xe-125 等の Xe の同位体 Cs-137 等の Cs の同位体	天然に存在する Xe の同位体が 9 つと他の不純物ガスより多く、そのために放射化により生成される核種が多い。また、ヒトの感受性の高い放射性核種が高濃度生成される傾向があり、使用は避けるべき。	×

謝辞

本報告書を纏めるにあたり、多くの貴重なご助言とご指導くださいました核融合炉システム研究開発部の飛田健次部長（原型炉設計合同特別チームリーダー）、核融合炉システム研究グループの坂本宜照グループリーダー（同チーム 物理設計グループリーダー）、同グループの日渡良爾主幹研究員（同チーム システム設計グループリーダー）に深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] X-5 Monte Carlo Team, MCNP - A general Monte Carlo N-particle transport code, version 5, LANL report, LA-CP-03-0245, April 2003 (rev. March 2005).
- [2] T. Kai et al., DCHAIN-SP 2001: High energy particle induced radioactivity calculation code, JAERI-Data/Code 2001-016 (2001)
- [3] 核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律施行令
- [4] 「核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則
- [5] 放射線を放出する同位元素の数量等を定める件（平成十二年科学技術庁告示）
- [6] D. Lopez Al-dama, A. Trkov, FENDL-2.1: update of an evaluated nuclear data library for fusion applications, in: IAEA Report INDC(NDS)-46, 2004
- [7] A. B. Paschenko, Summary Report for IAEA Consultants Meeting on Selection of Evaluations for the FENDL/A-2 Activation Cross Section Library, IAEA/INDC(NDS)-341 (1996)
- [8] 東海再処理施設の安全性確認に関する報告書(JNC TN8440 99-002)

<http://www.qst.go.jp>