JAEA-Review
2023-033
DOI:10.11484/jaea-review-2023-033

# JMTRの廃止措置移行後の事故影響評価

Accident Consequence Analysis for JMTR as a Decommission Facilities

永田 寛　大森 崇純　前田 英太　大塚 薫
中野 寛子　花川 裕規　井手 広史

Hiroshi NAGATA, Takazumi OMORI, Eita MAEDA, Kaoru OTSUKA
Hiroko NAKANO, Hiroki HANAKAWA and Hiroshi IDE

高速炉・新型炉研究開発部門
大洗研究所
環境技術開発センター
材料試験炉部

Department of JMTR
Waste Management and Decommissioning Technology Development Center
Oarai Research and Development Institute
Sector of Fast Reactor and Advanced Reactor Research and Development

January 2024

Japan Atomic Energy Agency　日本原子力研究開発機構

JAEA-Review

本レポートは国立研究開発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。
本レポートはクリエイティブ・コモンズ 表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。
本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の
条件で利用してください。（https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja）
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（https://www.jaea.go.jp）
より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構　JAEA イノベーションハブ　研究成果利活用課
〒 319-1112　茨城県那珂郡東海村大字村松 4 番地 49
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en).
Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under
the same terms and conditions as CC-BY.
For inquiries regarding this report, please contact Institutional Repository and Utilization Section,
JAEA Innovation Hub, Japan Atomic Energy Agency.
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112, Japan
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2024

JAEA-Review 2023-033

# JMTR の廃止措置移行後の事故影響評価

日本原子力研究開発機構　高速炉・新型炉研究開発部門　大洗研究所
環境技術開発センター　材料試験炉部

永田　寛、大森　崇純、前田　英太[+]、大塚　薫、
中野　寛子、花川　裕規、井手　広史

(2023 年 11 月 1 日受理)

JMTR 原子炉施設は 2017 年 4 月の「施設中長期計画」において廃止施設に位置付けられたことから、廃止措置計画認可申請書を原子力規制委員会に提出するに当たり、廃止措置計画に記載する必要がある、廃止措置の工事上の過失等があった場合に発生すると想定される原子炉施設の事故の種類、程度、影響等の評価をするため、廃止措置計画の第 1 段階で想定される事故について、その種類の選定と程度、一般公衆への被ばく影響の評価を行った。

廃止措置計画の第 1 段階で想定される事故として燃料取扱事故及び廃棄物の保管中の火災を選定し、大気中に放出された放射性物質による一般公衆への被ばく線量の評価を行ったところ、最大でも $1.9\times10^{-2}$ mSv（廃棄物の保管中の火災）であり、判断基準（5mSv）に比べて小さく、一般公衆に対して著しい放射線被ばくのリスクを与えることはないことが分かった。

大洗研究所：〒311-1393　茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002 番地
＋　大洗研究所　放射線管理部

JAEA-Review 2023-033

# Accident Consequence Analysis for JMTR as a Decommission Facilities

Hiroshi NAGATA, Takazumi OMORI, Eita MAEDA[+], Kaoru OTSUKA,
Hiroko NAKANO, Hiroki HANAKAWA and Hiroshi IDE

Department of JMTR
Waste Management and Decommissioning Technology Development Center
Oarai Research and Development Institute
Sector of Fast Reactor and Advanced Reactor Research and Development
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received November 1, 2023)

Japan Materials Testing Reactor (JMTR) was decided as a one of decommission facilities in April 2017. In order to submit the decommissioning plan to the Nuclear Regulation Authority, the type of accident assumed in the first stage of the decommissioning plan was selected, and the public exposure dose was evaluated.

A fuel handling accident and a fire accident during storage of waste were selected as assumed accidents in the first stage of the decommissioning plan. An evaluation of the public exposure dose from the radioactive materials released into the atmosphere due to these accidents was estimated to be a maximum of 0.019 mSv (due to a fire accident during storage of waste). This estimated value was found to be sufficiently smaller than the judging criteria (5 mSv), and not to pose a significant risk of radiation exposure to the general public.

Keywords : JMTR, Decommissioning, Accident Consequence Analysis

＋ Radiation Protection Department, Oarai Research and Development Institute

目　次

1.　序論 ---------- 1
2.　JMTR の概要 ---------- 1
3.　評価事象の選定 ---------- 1
4.　評価事象における一般公衆の被ばく線量評価 ---------- 3
4.1 評価条件及び放出量 ---------- 3
4.1.1 燃料取扱事故 ---------- 3
4.1.2 廃棄物の保管中の火災 ---------- 4
4.1.3 フィルタの破損 ---------- 5
4.2 被ばく評価 ---------- 5
4.2.1 相対濃度、相対線量 ---------- 6
4.2.2 線量評価 ---------- 7
4.3 評価結果 ---------- 8
4.3.1 燃料取扱事故 ---------- 8
4.3.2 廃棄物の保管中の火災 ---------- 9
5.　結論 ---------- 9
謝辞 ---------- 10
参考文献 ---------- 10
付録-1 ---------- 22
付録-2 ---------- 38
付録-3 ---------- 40

Contents

1. Introduction ---------- 1
2. Outline of JMTR ---------- 1
3. Select of Evaluation Event ---------- 1
4. Evaluation of the Public Exposure Dose ---------- 3
4.1 Evaluation Condition and Release Amount ---------- 3
4.1.1 Fuel Handling Accident ---------- 3
4.1.2 Fire Accident During Storage of Waste ---------- 4
4.1.3 Corruption of Filter ---------- 5
4.2 Evaluation of the Public Exposure Dose ---------- 5
4.2.1 Relative Concentration and Relative Exposure Dose ---------- 6
4.2.2 Evaluation of the Public Exposure Dose ---------- 7
4.3 Evaluation Results ---------- 8
4.3.1 Fuel Handling Accident ---------- 8
4.3.2 Fire Accident During Storage of Waste ---------- 9
5. Conclusion ---------- 9
Acknowledgement ---------- 10
References ---------- 10
Appendix-1 ---------- 22
Appendix-2 ---------- 38
Appendix-3 ---------- 40

## 表リスト

Table 2.1　JMTR の主要諸元 ---------- 11
Table 4.1.1 大気中に放出される核種と使用済燃料内の蓄積量（燃料取扱事故） ---------- 12
Table 4.1.2 大気中に放出される核種の量（燃料取扱事故） ---------- 13
Table 4.1.3 大気中に放出される核種の量（廃棄物の保管中の火災） ---------- 13
Table 4.2.1 方位別$\chi/Q$、$D/Q$の 97%値 ---------- 14
Table 4.2.2 実効線量の計算に用いる係数 ---------- 17

## 図リスト

Fig. 2.1　JMTR 俯瞰図 ---------- 18
Fig. 4.1.1 JMTR の燃料要素の概略 ---------- 19
Fig. 4.1.2 燃料取扱事故時の FP 放出条件及び放出経路 ---------- 20
Fig. 4.1.3 廃棄物の保管中の火災による放射性物質の放出条件及び放出経路 ---------- 21

This is a blank page.

# 1. 序論

材料試験炉「JMTR」は、1968 年 3 月に初臨界以来、38 年余にわたって運転され、2006 年 8 月に停止した。その後、2017 年 4 月の「施設中長期計画」[1)]において JMTR は廃止施設として位置付けられたことから、2019 年 9 月に廃止措置計画認可申請書[2)]を原子力規制委員会に提出し、2021 年 3 月に認可された。

廃止措置計画には、発電用原子炉施設及び試験研究用等原子炉施設の廃止措置計画の審査基準により、廃止措置の工事上の過失等があった場合に発生すると想定される原子炉施設の事故の種類、程度、影響等を記載する必要がある。したがって、廃止措置計画の第 1 段階で想定される事故について、その種類の選定と程度、一般公衆への被ばく影響の評価を行った。

本報告では、廃止措置計画の第 1 段階で想定される事故による一般公衆への被ばく線量の評価内容及びその結果について述べる。

# 2. JMTR の概要

JMTR は、軽水減速冷却タンク型で定格熱出力 50MW、最大中性子束が高速中性子、熱中性子とも約 $4\times10^{18}$n/m$^2$/s の汎用照射試験炉である[3)]。JMTR 主要諸元を **Table 2.1** に示す。

原子炉建家は、地上 1 階（一部 3 階）、地下 4 階の鉄筋コンクリート造りで、屋根は鋼管造鉄板貼球面構造の円筒形建家である。原子炉建家中央に炉プールがあり、原子炉を格納した圧力容器が配置されている。炉プールから照射後試験を行うホットラボ施設まではカナル（幅 3m、深さ 6.2m の水路）でつながっており、原子炉建家とホットラボ建家はカナル室で連結している。建家の周りには、南側にホットラボ建家、西側に特定施設建家、北側及び東側に照射準備室、居室実験室等の建家が配置されている。JMTR 俯瞰図を **Fig. 2.1** に示す。

# 3. 評価事象の選定

廃止措置計画の第 1 段階においては、放射性物質によって汚染された区域の解体撤去工事を行わず、廃止措置期間中においても安全確保上必要な機能を有する設備を維持管理することから、原子炉運転段階における原子炉停止時と同等の状態が継続する。したがって、原子炉設置変更許可において評価している事故事象から、「燃料取扱事故」（原子炉停止中において取扱中の使用済燃料要素が、何らかの原因によって損傷し、核分裂生成物が放出する事象を想定）を選定する。

この他、先行認可された他施設での選定内容や日本原子力学会標準（試験研究炉及び核燃料取扱施設等の廃止措置の計画：2013）[4)]を参考に、廃止措置工事上の過失、機械又は装置の故障、地震、火災、その他の災害による原子炉施設の事故の種類、程度、影響等を考慮した上で、起因事象を以下のとおり整理し、最も影響の大きい事故を選定する。

(1) 火災

廃止措置計画の第 1 段階で発生する放射性固体廃棄物は維持管理付随廃棄物である。これ

ら廃棄物のうち、可燃性の雑固体廃棄物を収納したカートンボックス（以下「可燃性カートンボックス」という。）や粒子状の放射性物質が蓄積したフィルタ（以下「使用済フィルタ」という。）は、火災防止のため金属製の容器又は金属製の保管庫に収納する。事故想定として、可燃性カートンボックス及び使用済フィルタを保管中に火災が発生し、粒子状の放射性物質が環境へ放出される事象（以下「廃棄物の保管中の火災」という。）を想定する。

(2) 爆発

管理区域内で可燃性ガスを利用していない。また、JMTR の第 1 段階においては、管理区域内の施設の解体撤去を行わないため、万一、可燃性ガスの漏洩に伴い何らかの原因で爆発したとしても、核燃料物質によって汚染されたものの飛散等は考えられないことから、爆発が起因となる事象は想定しない。

(3) 落下・衝突

使用済フィルタの交換作業において、使用済フィルタが何らかの原因（地震、過失等）で落下して破損（火災等を含む）し、付着している粒子状の放射性物質が環境へ放出される事象（以下「フィルタの破損」という。）を想定する。

(4) 動的機器の機能停止（外部電源の喪失）

廃止措置計画の第 1 段階における動的機器としては、性能維持施設として機能を維持する排風機やポンプ、モニタなどがあるが、これら設備機器が外部電源の喪失などに伴い機能が停止したとしても、外部への放射性物質の飛散、漏出にはつながらないため、動的機器の機能停止が起因となる事象は想定しない。

(5) 弁の誤開閉

廃止措置計画の第 1 段階において、弁の開閉を伴う作業としては、プールカナル循環系統などの循環運転が想定される。当該系統の保守作業時に配管のドレン弁を誤って開操作した場合、水位は下がるが、一定の位置で下げ止まる（サイフォン現象）構造となっているため、起因事象として想定しない。

(6) 異常切断

廃止措置計画の第 1 段階においては、管理区域内の施設の解体撤去に伴う核燃料物質によって汚染されたものの切断等を行わないことから、起因事象として想定しない。

(7) 津波・洪水

原子炉施設の設置場所は、標高 35～40m の位置にある。一方、茨城県津波浸水想定（L2 津波）である最大遡上高は T.P.+9.0m であることから十分な敷地高さを有しているため、津波に起因する事故を想定する必要はない。また、大洗町が公開している洪水・土砂災害ハザードマップより、JMTR 原子炉施設が浸水区域に指定されていないことから、洪水に起因する事故を想定する必要はない。

(8) 地震

原子炉施設では、各施設・設備について安全設計上の重要度に応じた耐震クラスを設定し、それぞれに応じた設計地震力に対して十分な耐震性を有する設計を行っている。また、解体に当たっては、解体する施設・設備の耐震クラスと耐震設計を考慮して、必要な強度を確保して作業を進める。したがって、廃止措置期間中において、地震に起因する事故を想定する

必要はない。

(9) その他の自然災害（外部火災、台風、竜巻等）

外部火災、台風、竜巻等により建家の一部が損壊することを想定しても、使用済燃料の破損又は内部火災のような放射性物質の散逸が生じる事故が発生しないことから、起因事象として想定しない。

以上から、廃止措置計画の第 1 段階において想定される事故事象として、「燃料取扱事故」、「廃棄物の保管中の火災」及び「フィルタの破損」を選定する。

## 4. 評価事象における一般公衆の被ばく線量評価

前項より選定した事故事象について、一般公衆の被ばく線量の評価を行う。

### 4.1 評価条件及び放出量

#### 4.1.1 燃料取扱事故

(1) 大気中に放出される核種

原子炉設置変更許可に記載のある、線量評価で考慮する大気中に放出される核種を **Table 4.1.1** に示す。この希ガス及びよう素は、粒子状の核分裂生成物（FP）等に比較して空気中に移行及びフィルタを透過しやすく、大気中に放出される可能性が大きいため、環境に放出された場合、公衆に与える放射線の影響が大きいからである[5)]。

(2) 使用済燃料内の FP 蓄積量

使用済燃料内の FP の蓄積量は、燃焼計算コード SWAT4.0[6)]及び核種生成崩壊計算コード ORIGEN-2[7)]により算出した全使用済燃料のウラン 1t 当たりの核種（冷却期間 4259 日）の結果を、燃料要素 1 体当たりに換算を行ったものを使用する（**付録-1** 参照）。使用済燃料内の FP 蓄積量を **Table 4.1.1** に示す。

(3) 放出条件

燃料取扱事故における評価条件について、以下の 3 ケースに分けて評価する。JMTR の燃料要素の概略を **Fig. 4.1.1** に示す。燃料取扱事故時の放出条件と放出経路を **Fig. 4.1.2** に示す。

a) ケース 1

使用済燃料の損傷範囲は原子炉設置変更許可と同様の範囲としたものである。なお、使用済燃料の FP の量は上記(2)で評価した値を用いる。

①損傷する使用済燃料（燃料板 19 枚）は一体とし、燃料板 1 枚に含まれる FP の 5%が水中に放出されるものとする。ここで燃料板の損傷は片側面とし、燃料芯材の片側全表面について芯材表面から FP の飛程に相当する約 15μm 深さ内で生成された FP が燃料からプール・カナル水中に放出されるものとして計算すると、燃料板 1 枚に内蔵される FP の約 3%（**付録-2** 参照）となるが、保守的評価とするため 5%とする。

②使用済燃料の FP の量は、原子炉出力が定格出力 50MW で 120 日連続運転した直後のも

のとし、その後、約 4250 日（原子炉停止後の 2006 年 8 月 1 日から 2018 年 3 月 31 日までの日数を表す）の冷却期間を経て損傷が発生するものとする。

③放出に寄与する FP のうち希ガス 100%、よう素 60%がプール・カナル水中に放出されるものとする（「水冷却型試験研究用原子炉施設の安全評価に関する審査指針」[8]の付録参照）。

④プール・カナル水中に放出された希ガスの水中への溶解は無視して、全量がプール・カナル水中外に放出されるものとする。

⑤プール・カナル水中に放出されたよう素は水に溶けやすいため、ほとんど水中にとどまると考えられるが、水中での除染係数は 500 とする（「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針」[9]の付録 I 参照）。

⑥プール・カナル水から空気中に移行した希ガス及びよう素は、通常排気設備を経て排気筒（高さ 80m）から放出される。

b) ケース 2

放出された FP は、ケース 1 のとおり、通常は排気設備を経て排気筒から放出されるが、保守的な想定（地震等により商用電源喪失や建家等の破損などを想定）として、放出経路を地上放出とした際の評価を行う。なお、放出に寄与する FP は希ガス及びよう素とする。

①～⑤（ケース 1 と同様）

⑥プール・カナル水から空気中に移行した希ガス及びよう素は、瞬時に地上放出されるものとする。

c) ケース 3

使用済燃料の損傷範囲を燃料体一体（燃料板 19 枚）とし、燃料板片側表面から燃料板 19 枚の全枚数の両表面と、原子炉設置変更許可よりも保守的に範囲を広げた計算ケースを想定する。なお、放出経路はケース 2 と同様、地上放出とする。

①損傷する使用済燃料（燃料板 19 枚）は一体とし、燃料 1 体に含まれる FP の 10%が水中に放出されるものとする。ここで、燃料芯材の表面より FP の飛程に相当する約 15μm 深さ内で生成された FP が燃料よりプール・カナル水中に放出されるものとして計算すると、燃料 1 体に内蔵される FP の約 6%（**付録-2** 参照）になるが、保守的評価とするため 10%とする。

②～⑤（ケース 1 と同様）

⑥（ケース 2 と同様）

(4) 放出量

上記により評価した使用済燃料内の FP 蓄積量と各々の放出条件から、燃料取扱事故によって大気中に放出される FP（希ガス及びよう素）の量を、**Table 4.1.2** に示す。

### 4.1.2 廃棄物の保管中の火災

(1) 火災を想定する廃棄物の種類について

廃止措置計画の第 1 段階で発生する放射性固体廃棄物は、雑固体廃棄物やフィルタなどの維持管理付随廃棄物である。これら廃棄物のうち、可燃性カートンボックスや使用済フィル

タは、火災防止のため、金属製の容器又は金属製の保管庫に収納することで防火対策を行っているが、それでもなお何かしらの影響により火災が発生することを想定する。

(2) 火災発生場所について

可燃性カートンボックスや使用済フィルタは、廃棄物管理施設に引渡すまでの間、JMTR 原子炉施設内の保管廃棄施設に保管する。保管廃棄施設に保管する際は、金属製の容器又は金属製の保管庫に収納することで防火対策を行うことから、火災が発生した際にこれら容器又は保管庫への延焼は考えられない。

よって、可燃性カートンボックス又は使用済フィルタ自体に何らかの原因により火災が発生することを想定し、金属製の容器又は金属製の保管庫毎で最も多くの可燃性カートンボックス及び使用済フィルタを保管できる箇所を火災発生場所として想定する。

したがって、JMTR 原子炉施設においては、一箇所で最も多くの可燃性カートンボックス及びフィルタを保管できる（20L 容器で最大 90 個）、原子炉建家 1 階の保管廃棄施設（金属製の保管庫）を対象とする。

(3) 廃棄物に含まれる放射性物質の量

火災が発生すると想定した可燃性カートンボックス及び使用済フィルタに蓄積される放射性物質の量は、過去の実績値（JMTR 原子炉施設の原子炉停止時の 2013～2017 年までのデータの平均値）から、可燃性カートンボックス及び使用済フィルタ 1 個当たり $2.0\times10^{7}$ Bq（放射性核種は Co-60）（**付録-3** 参照）とする。

(4) 放出条件

当該保管庫に保管した可燃性カートンボックス及び使用済フィルタの数量を 90 個とし、火災によりこれらに含まれる放射性物質の全量が通常排気設備を経て排気筒（高さ 80m）から放出されるケース（ケース 1）と瞬時に地上放出されるケース（ケース 2）の 2 ケースに分けて評価する。廃棄物の保管中の火災発生時の放出条件と放出経路を **Fig. 4.1.3** に示す。

(5) 放出量

上記により評価した廃棄物に含まれる放射性物質の量と各々の放出条件から、廃棄物の保管中の火災によって大気中に放出される放射性物質の量を、**Table 4.1.3** に示す。

### 4.1.3　フィルタの破損

使用済フィルタに蓄積される放射性物質の量は、過去の実績値（JMTR 原子炉施設の原子炉停止時の 2013～2017 年までのデータの平均値）から、使用済フィルタ 1 個当たり $4.6\times10^{7}$ Bq（放射性核種は Co-60）（**付録-3** 参照）となる。使用済フィルタが何らかの原因（地震、過失等）で落下して破損（火災等を含む）し、付着している粒子状の放射性物質が環境へ放出される事象を想定すると、フィルタは 1 ユニットで 4 個であることから、大気放出量は $1.9\times10^{8}$ Bq となる。これは上記で示した廃棄物の保管中の火災による大気放出量（$1.8\times10^{9}$ Bq）より十分小さいことから、廃棄物の保管中の火災による評価結果に包絡される。

## 4.2　被ばく評価

「燃料取扱事故」及び「廃棄物の保管中の火災」により環境へ放出された放射性物質による

一般公衆の被ばく線量について、呼吸に伴う吸入摂取による内部被ばく及びガンマ線放出核種からの外部被ばくを評価する。

#### 4.2.1　相対濃度、相対線量

原子炉施設から放出される放射性物質による敷地周辺の線量の評価は、実際に敷地で観測した気象データをもとにして、出現頻度からみて、それより悪い条件にめったに遭遇しないといえる大気拡散状態（気象条件）を推定することにより行う。拡散状態の推定は、敷地における2009年1月から2013年12月までの5年間の風向、風速及び大気安定度の観測データを使用し、「発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針」に示された方法に従って、相対濃度($\chi/Q$)、相対線量($D/Q$)を求めることにより行った。

(1) 線量計算に用いる相対濃度($\chi/Q$)

線量計算に用いる相対濃度は、次のようにして求める。

①相対濃度は、毎時刻の気象データと実効放出継続時間をもとに、方位別に敷地境界外で最大となる着目地点について求める。

②着目地点の相対濃度は、毎時刻の相対濃度を 5 年間について小さい方から累積した場合、その累積出現率が97%にあたる相対濃度とする。

③線量計算に用いる相対濃度は、上記②で求めた相対濃度のうちで最大の値を使用する。

(2) 相対濃度の計算

相対濃度($\chi/Q$)は以下式により計算する。

$$\chi/Q = \frac{1}{T} \cdot \sum_{i=1}^{T} (\chi/Q)_i \cdot {}_d\delta_i$$

$\chi/Q$　：実効放出継続時間中の相対濃度（h/m³）

T　：実効放出継続時間（h）

$(\chi/Q)_i$　：時刻 i における相対濃度（h/m³）

${}_d\delta_i$　：時刻 i において風向が当該方位 d にあるとき　${}_d\delta_i = 1$

時刻 i において風向が他の方位にあるとき　${}_d\delta_i = 0$

$(\chi/Q)_i$ は実効放出継続時間の長短、建家等の影響の有無に応じて、次のように計算する。

①建家等の影響がない場合

(a) 短時間放出の場合

短時間放出時における$(\chi/Q)_i$ の計算に当たっては、風向が一定と仮定して以下式により計算する。

$$(\chi/Q)_i = \frac{1}{3600 \cdot \pi \cdot \sigma_{yi} \cdot \sigma_{zi} \cdot U_i} \cdot exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_{zi}^2}\right)$$

(b) 長時間放出の場合

長時間放出時における$(\chi/Q)_i$ の計算に当たっては、放出放射性物質の全量が 1 方位内のみに一様分布すると仮定して以下式により計算する。

$$(\chi/Q)_i = \frac{2.032}{3600 \cdot \sigma_{zi} \cdot U_i \cdot x} \cdot exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_{zi}^2}\right)$$

$(\chi/Q)_i$ ：時刻 i における相対濃度（h/m³）

$\sigma_{yi}$ ：時刻 i において濃度分布の y 方向の拡がりパラメータ（m）

$\sigma_{zi}$ ：時刻 i において濃度分布の z 方向の拡がりパラメータ（m）

$U_i$ ：時刻 i における風速（m/s）

$H$ ：放出源の有効高さ（m）

$x$ ：放出源から着目地点までの距離（m）

②建家等の影響のある場合

建家の影響により上記の式が用いられない場合、$(\chi/Q)_i$ は以下式により計算する。

(a) 短時間放出の場合

$$(\chi/Q)_i = \frac{1}{3600 \cdot \pi \cdot \sum_{yi} \cdot \sum_{zi} \cdot U_i} \cdot exp\left(-\frac{H^2}{2 \cdot \sum_{zi}^2}\right)$$

$$\sum_{yi} = \left(\sigma_{yi}^2 + cA/\pi\right)^{1/2}$$

$$\sum_{zi} = (\sigma_{zi}^2 + cA/\pi)^{1/2}$$

$A$ ：建家等の風向方向の投影面積（m²）

$c$ ：形状計数

(b) 長時間放出の場合

$$(\chi/Q)_i = \frac{2.032}{3600 \cdot \sum_{zi} \cdot U_i \cdot x} \cdot exp\left(-\frac{H^2}{2 \cdot \sum_{zi}^2}\right)$$

方位別$(\chi/Q)$の累積出現頻度を求める時、静穏の場合には風速を 0.5 m/s として計算し、その風向は静穏出現前の風向を使用する。

実効放出継続時間は、事故期間中の放射性物質の全放出量を 1 時間当たりの最大放出量で除することにより求められる。

(3) 相対線量の計算

放射性雲からのガンマ線量については、$(\chi/Q)$の代わりに空間濃度分布とガンマ線量モデルを組み合わせた相対線量$(D/Q)$を、$\chi/Q$と同様な方法で求めて使用する。ただし、実効放出継続時間が 8 時間を超える場合でも、方位内で風向軸が一定と仮定して計算する。

方位別$\chi/Q$、$D/Q$の 97%値を **Table 4.2.1** に示す。

### 4.2.2 線量評価

線量評価は、原子炉設置変更許可と同様、「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針」[9]の付録Ⅱを参考とし、大気中に放出された放射性物質の吸入による実効線量とγ線の外部被ばくによる実効線量に分けて評価する。

(1) 内部被ばくの実効線量

放射性物質の吸入摂取による内部被ばくの実効線量は、以下式により求められる。

$$H_B = \sum K_{1i} \cdot M_a \cdot Q_i \cdot (\chi/Q)$$

$H_B$　：吸入摂取による実効線量（Sv）

$K_{1i}$　：核種 i の吸入摂取による実効線量係数（Sv/Bq）
（**Table 4.2.2** 参照）

$M_a$　：呼吸率（$m^3$/h）
（**Table 4.2.2** 参照）

$Q_i$　：核種 i の放出量（Bq）
（**Table 4.1.2** 及び **Table 4.1.3** 参照）

$\chi/Q$　：相対濃度（h/$m^3$）
（**Table 4.2.1** 参照）

(2) 外部被ばくの実効線量

放射性物質の外部被ばくの実効線量は、以下式により求められる。

$$H_r = K_2 \cdot Q_{ri} \cdot (D/Q)$$

$H_r$　：外部被ばく（ガンマ線）による実効線量（Sv）

$K_2$　：空気カーマから実効線量への換算係数（Sv/Gy）
（**Table 4.2.2** 参照）

$Q_{ri}$　：核種 i のガンマ線換算放出量（MeV・Bq）
（放出量（Bq）×ガンマ線実効エネルギー（MeV））
（**Table 4.2.2** 参照）

$D/Q$　：相対線量（Gy/（MeV・Bq））
（**Table 4.2.1** 参照）

## 4.3　評価結果

### 4.3.1　燃料取扱事故

燃料取扱事故により大気中に放出された放射性物質の吸入による実効線量とγ線の外部被ばくによる実効線量の結果は以下のとおり。

(1) ケース 1（排気筒からの放出の場合）（燃料板 1 枚に含まれる FP の 5%が水中に放出）

| | |
|---|---|
| よう素（I-129）の吸入による小児の内部被ばく | $1.1\times10^{-15}$ Sv |
| よう素（I-129）からのγ線による外部被ばく | $1.4\times10^{-19}$ Sv |
| 希ガス（Kr-85）からのγ線による外部被ばく | $3.4\times10^{-12}$ Sv |
| 合計 | $3.4\times10^{-12}$ Sv（$3.4\times10^{-9}$ mSv） |

(2) ケース 2（地上放出の場合）（燃料板 1 枚に含まれる FP の 5%が水中に放出）

| | |
|---|---|
| よう素（I-129）の吸入による小児の内部被ばく | $3.3\times10^{-13}$ Sv |
| よう素（I-129）からのγ線による外部被ばく | $3.1\times10^{-18}$ Sv |
| 希ガス（Kr-85）からのγ線による外部被ばく | $8.0\times10^{-11}$ Sv |
| 合計 | $8.0\times10^{-11}$ Sv（$8.0\times10^{-8}$ mSv） |

(3) ケース 3（地上放出の場合）（燃料 1 体に含まれる FP の 10%が水中に放出）

| | |
|---|---|
| よう素（I-129）の吸入による小児の内部被ばく | $1.3\times10^{-11}$ Sv |
| よう素（I-129）からのγ線による外部被ばく | $1.2\times10^{-16}$ Sv |
| 希ガス（Kr-85）からのγ線による外部被ばく | $3.0\times10^{-9}$ Sv |
| 合計 | $3.0\times10^{-9}$ Sv（$3.0\times10^{-6}$ mSv） |

### 4.3.2 廃棄物の保管中の火災

廃棄物の保管中の火災により大気中に放出された放射性物質の吸入による実効線量とγ線の外部被ばくによる実効線量の結果は以下のとおり。

(1) ケース 1（排気筒からの放出の場合）

| | |
|---|---|
| Co-60 の吸入による内部被ばく | $6.7\times10^{-8}$ Sv |
| Co-60 からのγ線による外部被ばく | $1.5\times10^{-9}$ Sv |
| 合計 | $6.8\times10^{-8}$ Sv（$6.8\times10^{-5}$ mSv） |

(2) ケース 2（地上放出の場合）

| | |
|---|---|
| Co-60 の吸入による内部被ばく | $1.9\times10^{-5}$ Sv |
| Co-60 からのγ線による外部被ばく | $3.4\times10^{-8}$ Sv |
| 合計 | $1.9\times10^{-5}$ Sv（$1.9\times10^{-2}$ mSv） |

## 5. 結論

廃止措置計画の第 1 段階で想定される事故として選定した燃料取扱事故及び廃棄物の保管中の火災により大気中に放出された放射性物質による一般公衆への被ばく線量の評価を行ったところ、燃料取扱事故では、排気筒から放出された場合で $3.4\times10^{-9}$ mSv、保守的に地上放出とした場合で $8.0\times10^{-8}$ mSv、原子炉設置変更許可の評価条件よりも燃料の損傷範囲を大きくした場合で $3.0\times10^{-6}$ mSv（燃料 1 体に含まれる FP の 10%が水中に放出）であった。また、廃棄物の保管中の火災では、排気筒から放出された場合で $6.8\times10^{-5}$ mSv、保守的に地上放出とした場合で $1.9\times10^{-2}$ mSv であった。

事故時による周辺公衆に与える放射線被ばくのリスクを確認する際の考え方として、「発電用原子炉施設及び試験研究用等原子炉施設の廃止措置計画の審査基準」には、「水冷却型試験研究用原子炉施設の安全評価に関する審査指針」[8)]（平成 3 年 7 月 18 日原子力安全委員会決定、平成 13 年 3 月 29 日原子力安全委員会一部改訂）解説における事故評価において示された考え方を参考とするとなっており、この指針では、「周辺公衆の実効線量の評価値が発生事故当たり 5mSv を超えなければ「リスク」は小さいと判断する。」となっている。

本評価結果は、最大でも $1.9\times10^{-2}$ mSv（廃棄物の保管中の火災）であり、判断基準（5mSv）に比べて小さく、一般公衆に対して著しい放射線被ばくのリスクを与えることはないことがわかった。

## 謝辞

本報告書を作成するに当たり、材料試験炉部　土谷邦彦氏には有益なご指導、ご助言をいただきました。また、本評価を実施するに当たり、原子力科学研究所　研究炉加速器技術部　研究炉技術課　新居昌至氏、材料試験炉部（OB）小向文作氏、東京ニュークリア・サービス株式会社の延原文祥氏、村崎穣氏にご指導、ご助言及びご協力いただきましたこと深く感謝いたします。

## 参考文献

1) 日本原子力研究開発機構, “施設中長期計画,” https://www.jaea.go.jp/about_JAEA/facilities_plan/（参照：2022 年 4 月 1 日）.
2) 日本原子力研究開発機構, “JMTR 原子炉施設（材料試験炉）に係る廃止措置計画認可申請書” (2019).
3) 照射試験炉センター, “JMTR 照射設備・照射後試験に関する技術レビュー,” JAEA-Review 2017-016 (2017), 170p.
4) 日本原子力学会, “日本原子力学会標準 試験研究炉及び核燃料取扱施設等の廃止措置の計画：2013,” AESJ-SC-A007:2013 (2014).
5) 土田昇, 他, “JMTR 低濃縮燃料炉心の安全解析(3)―安全評価及び立地評価における事故時の線量評価―,” JAERI-M 92-152 (1992), 92p.
6) 菊地丈夫, 他, “SWAT4.0 を用いた BWR 燃料の照射後試験解析,” JAEA-Research 2017-021 (2017), 56p.
7) A. G. Croff, “ORIGEN2 - A Revised and Updated Version of the Oak Ridge Isotope Generation and Depletion Code,” ORNL-5621, Oak Ridge National Laboratory (1980).
8) 原子力安全委員会, “水冷却型試験研究用原子炉施設の安全評価に関する審査指針,” 平成 13 年 3 月 (2001).
9) 原子力安全委員会, “発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針,” 平成 13 年 3 月.
10) ICRP, “Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides - Part 4 Inhalation Dose Coefficients,” ICRP Publication 71. Ann. ICRP 25 (3-4), (1995).
11) 原子力安全委員会，被ばく計算に用いる放射線エネルギー等について，平成 13 年 3 月 (2001).
12) 原子力安全委員会，発電用軽水型原子炉施設の安全審査における一般公衆の線量評価について，平成 13 年 3 月 (2001).

Table 2.1　JMTR の主要諸元

| | | |
|---|---|---|
| 原子炉型式 | | 軽水減速冷却タンク型 |
| 熱出力 | | 50MW |
| 炉心 | 直径 | 1560mm |
| | 有効燃料長 | 750mm |
| 原子炉圧力容器 | 材質 | ステンレス鋼（SUS304L） |
| | 直径（内面） | 3m |
| | 高さ | 9.5m |
| | 厚さ | 34mm |
| 生体遮へい体 | 材質 | コンクリート |
| | 厚さ | 2.5m |
| | 高さ（最大） | 15,800mm |
| 原子炉建家 | 直径 | 41.4m |
| | 高さ（地上） | 20.4m |
| | 高さ（地下） | 23.5m |
| 運転履歴 | 初臨界 | 1968（昭和 43）年 3 月 30 日 |
| | 最終運転 | 2006（平成 18）年 8 月 1 日 |
| | 累積積算出力量 | 166,612.8MWd |
| | 累積運転時間 | 85,809.65 時間 |

Table 4.1.1　大気中に放出される核種と使用済燃料内の蓄積量
（燃料取扱事故）

2018 年 12 月 31 日時点

| No.※1 | 核種 | 半減期 | 収率（%） | 蓄積量（Bq） | 評価対象 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | $^{83m}$Kr | 1.83 h | 0.53 | — | ×※2 |
| 2 | $^{85m}$Kr | 4.48 h | 1.31 | — | ×※2 |
| 3 | $^{85}$Kr | 10.73 y | 0.29 | $1.80\times10^{12}$ | ○ |
| 4 | $^{87}$Kr | 76.3 m | 2.53 | — | ×※2 |
| 5 | $^{88}$Kr | 2.8 h | 3.58 | — | ×※2 |
| 6 | $^{89}$Kr | 3.18 m | 4.68 | — | ×※2 |
| 7 | $^{90}$Kr | 32.32 s | 4.69 | — | ×※2 |
| 8 | $^{131m}$Xe | 11.9 d | 0.04 | — | ×※2 |
| 9 | $^{133m}$Xe | 2.25 d | 0.19 | — | ×※2 |
| 10 | $^{133}$Xe | 5.29 d | 6.77 | — | ×※2 |
| 11 | $^{135m}$Xe | 15.65 m | 1.06 | — | ×※2 |
| 12 | $^{135}$Xe | 9.083 h | 6.63 | — | ×※2 |
| 13 | $^{137}$Xe | 3.83 m | 6.13 | — | ×※2 |
| 14 | $^{138}$Xe | 14.17 m | 6.28 | — | ×※2 |
| 15 | $^{139}$Xe | 39.5 s | 5.16 | — | ×※2 |
| 16 | $^{131}$I | 8.06 d | 2.84 | — | ×※2 |
| 17 | $^{132}$I | 2.28 h | 4.21 | — | ×※2 |
| 18 | $^{133}$I | 20.8 h | 6.77 | — | ×※2 |
| 19 | $^{134}$I | 52.6 m | 7.61 | — | ×※2 |
| 20 | $^{135}$I | 6.61 h | 6.41 | — | ×※2 |
| — | $^{129}$I | $15.7\times10^{7}$ y | 0.66 | $5.30\times10^{6}$ | ○※3 |

※1：No.1～20 は原子炉設置変更許可申請書に記載のある核種を表す。

※2：原子炉が停止してから十数年経過し十分減衰していることから評価対象から外す。

※3：希ガス及びよう素のうち長半減期核種として選定。

Table 4.1.2　大気中に放出される核種の量
（燃料取扱事故）

単位：Bq

ケース 1

| 核種 | FP 蓄積量※1 | FP 放出量※2 | 水中放出量※3 | 気相部放出量※4 | 大気放出量※5 |
|---|---|---|---|---|---|
| Kr-85 | 9.47E+10 | 4.74E+09 | 4.74E+09 | 4.74E+09 | 4.8E+09 |
| I-129 | 2.79E+05 | 1.40E+04 | 8.37E+03 | 1.68E+01 | 1.7E+01 |

ケース 2

| 核種 | FP 蓄積量※1 | FP 放出量※2 | 水中放出量※3 | 気相部放出量※4 | 大気放出量※5 |
|---|---|---|---|---|---|
| Kr-85 | 9.47E+10 | 4.74E+09 | 4.74E+09 | 4.74E+09 | 4.8E+09 |
| I-129 | 2.79E+05 | 1.40E+04 | 8.37E+03 | 1.68E+01 | 1.7E+01 |

ケース 3

| 核種 | FP 蓄積量※1 | FP 放出量※2 | 水中放出量※3 | 気相部放出量※4 | 大気放出量※5 |
|---|---|---|---|---|---|
| Kr-85 | 1.80E+12 | 1.80E+11 | 1.80E+11 | 1.80E+11 | 1.8E+11 |
| I-129 | 5.30E+06 | 5.30E+05 | 3.18E+05 | 6.36E+02 | 6.4E+02 |

※1：FP 蓄積量
　　ケース 1、2＝（燃料要素 1 体）／（19 枚）
　　ケース 3＝（燃料要素 1 体）
※2：FP 放出量
　　ケース 1、2＝（FP 蓄積量）×5%
　　ケース 3＝（FP 蓄積量）×10%
※3：水中放出量
　　希ガス＝（FP 放出量）
　　よう素＝（FP 放出量）×60%
※4：気相部放出量
　　希ガス＝（水中放出量）
　　よう素＝（水中放出量）／500
※5：大気放出量
　　ケース 1；排気筒（80m）より放出
　　ケース 2、3；地上放出

Table 4.1.3　大気中に放出される核種の量
（廃棄物の保管中の火災）

| 核種 | 廃棄物 1 個当たりに含まれる放射性物質の量（Bq） | 廃棄物の数量（個） | 大気放出量（Bq） |
|---|---|---|---|
| Co-60 | 2.0E+07 | 90 | 1.8E+09 |

Table 4.2.1　方位別$\chi/Q$、$D/Q$の 97%値（1/3）
（排気筒から放出された場合）

| | χ/Q［h/m³］ | | D/Q［Gy/（MeV・Bq）］ | |
|---|---|---|---|---|
| 実効放出継続時間 | 1 時間 | | 1 時間 | |
| 有効高さ | 80m | | 80m | |
| 建屋投影面積 | 0 m² | | 0 m² | |
| 着目方位 | 計算地点までの距離（m） | 97%値 | 計算地点までの距離（m） | 97%値 |
| S | 1840 | $6.1\times10^{-10}$ | 630 | $2.1\times10^{-19}$ |
| SSW | 1690 | $7.0\times10^{-10}$ | 400 | $2.4\times10^{-19}$ |
| SW | 950 | $7.0\times10^{-10}$ | 320 | $2.6\times10^{-19}$ |
| WSW | 1250 | $5.6\times10^{-10}$ | 170 | $3.2\times10^{-19}$ |
| W | 1020 | $1.3\times10^{-10}$ | 150 | $\underline{3.2\times10^{-19}}$ |
| WNW | 970 | $1.7\times10^{-10}$ | 160 | $3.0\times10^{-19}$ |
| NW | 510 | $\underline{9.9\times10^{-10}}$ | 130 | $3.0\times10^{-19}$ |
| NNW | 1440 | $3.0\times10^{-10}$ | 110 | $2.8\times10^{-19}$ |
| N | 5610 | $2.2\times10^{-10}$ | 120 | $2.7\times10^{-19}$ |
| NNE | 1530 | $3.7\times10^{-10}$ | 160 | $2.7\times10^{-19}$ |
| NE | 1570 | $4.1\times10^{-10}$ | 730 | $1.7\times10^{-19}$ |
| ENE | 4190 | $9.8\times10^{-11}$ | 900 | $1.3\times10^{-19}$ |
| E | 4100 | $1.1\times10^{-10}$ | 890 | $1.5\times10^{-19}$ |
| ESE | 6820 | $2.2\times10^{-10}$ | 910 | $1.8\times10^{-19}$ |
| SE | 1480 | $5.1\times10^{-10}$ | 1060 | $2.2\times10^{-19}$ |
| SSE | 2000 | $6.6\times10^{-10}$ | 970 | $2.2\times10^{-19}$ |

注：気象データ（2009 年 1 月～2013 年 12 月）

下線は被ばく評価に用いる値

Table 4.2.1　方位別$\chi/Q$、$D/Q$の 97%値（2/3）
（地上放出された場合：JMTR 原子炉建家）

| | χ/Q [h/m³] | | D/Q [Gy/（MeV・Bq）] | |
|---|---|---|---|---|
| 実効放出継続時間 | 1 時間 | | 1 時間 | |
| 有効高さ | 0m | | 0m | |
| 建屋投影面積 | 0 m² | | 0 m² | |
| 着目方位 | 計算地点までの距離（m） | 97%値 | 計算地点までの距離（m） | 97%値 |
| S | 830 | $1.2\times10^{-7}$ | 830 | $5.3\times10^{-18}$ |
| SSW | 570 | $1.4\times10^{-7}$ | 570 | $4.9\times10^{-18}$ |
| SW | 490 | $9.6\times10^{-8}$ | 490 | $3.3\times10^{-18}$ |
| WSW | 330 | $1.9\times10^{-7}$ | 330 | $4.8\times10^{-18}$ |
| W | 280 | $8.5\times10^{-8}$ | 280 | $3.6\times10^{-18}$ |
| WNW | - | - | 160 | $1.8\times10^{-18}$ |
| NW | - | - | 150 | $1.2\times10^{-18}$ |
| NNW | - | - | 150 | $1.2\times10^{-18}$ |
| N | 490 | $3.2\times10^{-8}$ | 490 | $1.5\times10^{-18}$ |
| NNE | 590 | $7.8\times10^{-8}$ | 590 | $3.0\times10^{-18}$ |
| NE | 760 | $1.3\times10^{-7}$ | 760 | $5.0\times10^{-18}$ |
| ENE | 780 | $\underline{2.8\times10^{-7}}$ | 780 | $\underline{7.5\times10^{-18}}$ |
| E | 750 | $1.8\times10^{-7}$ | 750 | $7.0\times10^{-18}$ |
| ESE | - | - | 800 | $1.5\times10^{-19}$ |
| SE | - | - | 980 | $7.7\times10^{-20}$ |
| SSE | 1110 | $2.5\times10^{-8}$ | 1110 | $1.6\times10^{-18}$ |

注：気象データ（2009 年 1 月～2013 年 12 月）

下線は被ばく評価に用いる値

Table 4.2.1　方位別$\chi/Q$、$D/Q$の 97%値（3/3）
（地上放出された場合：カナル室）

| | χ/Q [h/m³] | | D/Q [Gy/（MeV・Bq）] | |
|---|---|---|---|---|
| 実効放出継続時間 | 1 時間 | | 1 時間 | |
| 有効高さ | 0m | | 0m | |
| 建屋投影面積 | 0 m² | | 0 m² | |
| 着目方位 | 計算地点までの距離（m） | 97%値 | 計算地点までの距離（m） | 97%値 |
| S | 760 | $1.3\times10^{-7}$ | 760 | $5.8\times10^{-18}$ |
| SSW | 550 | $1.5\times10^{-7}$ | 550 | $5.1\times10^{-18}$ |
| SW | 470 | $1.1\times10^{-7}$ | 470 | $3.4\times10^{-18}$ |
| WSW | 320 | $2.0\times10^{-7}$ | 320 | $4.9\times10^{-18}$ |
| W | 280 | $8.5\times10^{-8}$ | 280 | $3.6\times10^{-18}$ |
| WNW | - | - | 190 | $1.5\times10^{-18}$ |
| NW | - | - | 170 | $9.7\times10^{-19}$ |
| NNW | - | - | 170 | $9.7\times10^{-19}$ |
| N | 270 | $9.2\times10^{-8}$ | 270 | $2.8\times10^{-18}$ |
| NNE | 270 | $\underline{3.1\times10^{-7}}$ | 270 | $6.1\times10^{-18}$ |
| NE | 600 | $2.0\times10^{-7}$ | 600 | $6.2\times10^{-18}$ |
| ENE | 780 | $2.8\times10^{-7}$ | 780 | $\underline{7.5\times10^{-18}}$ |
| E | 760 | $1.8\times10^{-7}$ | 760 | $6.9\times10^{-18}$ |
| ESE | - | - | 780 | $1.6\times10^{-19}$ |
| SE | - | - | 930 | $9.2\times10^{-20}$ |
| SSE | 1010 | $2.9\times10^{-8}$ | 1010 | $1.8\times10^{-18}$ |

注：気象データ（2009 年 1 月～2013 年 12 月）

下線は被ばく評価に用いる値

Table 4.2.2　実効線量の計算に用いる係数

| | | |
|---|---|---|
| 吸入摂取による実効線量係数（Sv/Bq） | I-129 | $8.4\times10^{-8}$ （成人の場合）※1<br>$2.0\times10^{-7}$ （小児の場合）※2 |
| | Co-60 | $3.1\times10^{-8}$ ※2 |
| 呼吸率（$m^3$/h） | — | 1.2（$m^3$/h）（成人の場合）※3<br>0.31（$m^3$/h）（小児の場合）※3 |
| ガンマ線実効エネルギー（MeV） | Kr-85 | $2.2\times10^{-3}$ ※4 |
| | I-129 | $2.4\times10^{-2}$ ※4 |
| | Co-60 | 2.504 ※5 |
| 空気カーマから実効線量への換算係数（Sv/Gy） | — | 1.0 ※3 |

※1：核燃料物質使用変更許可申請書 添付１ 第 1-4 (1) 表より

※2：ICRP Publication 71[10)]より

※3：発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針[9)]より

※4：被ばく計算に用いる放射線エネルギー等について[11)]より

※5：発電用軽水型原子炉施設の安全審査における一般公衆の線量評価について[12)]より

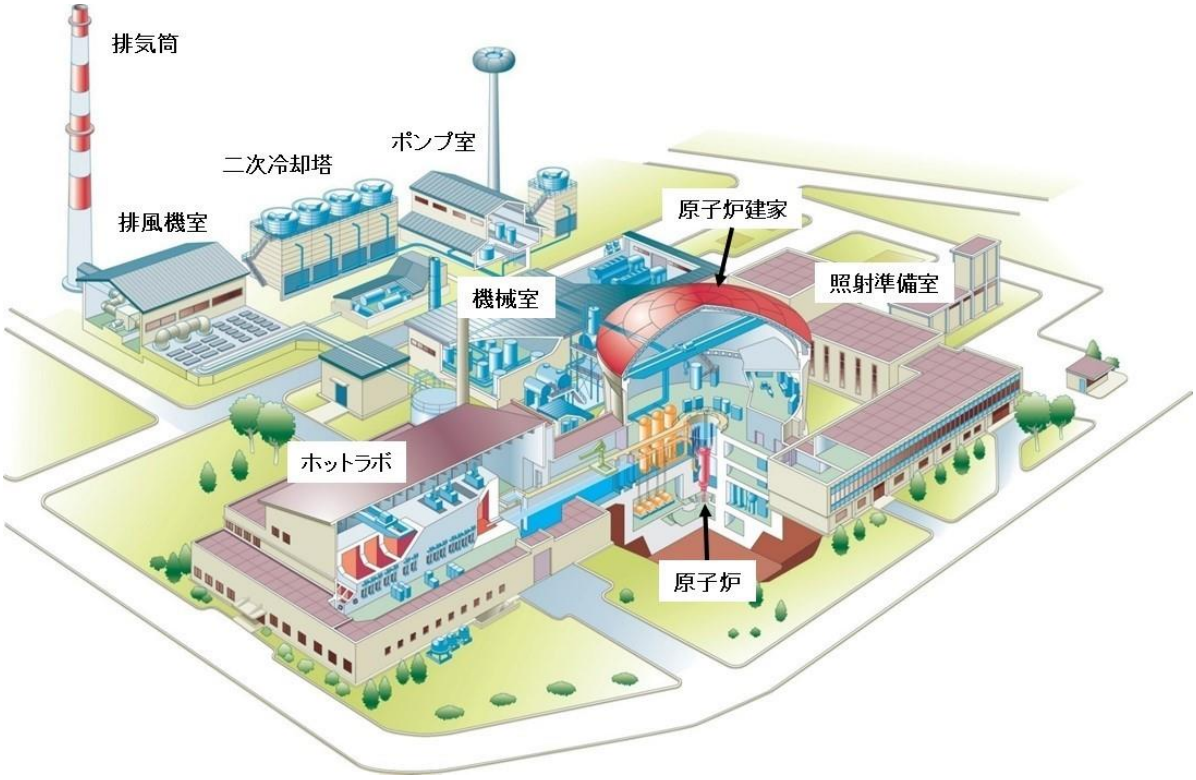



Fig. 2.1　JMTR 俯瞰図

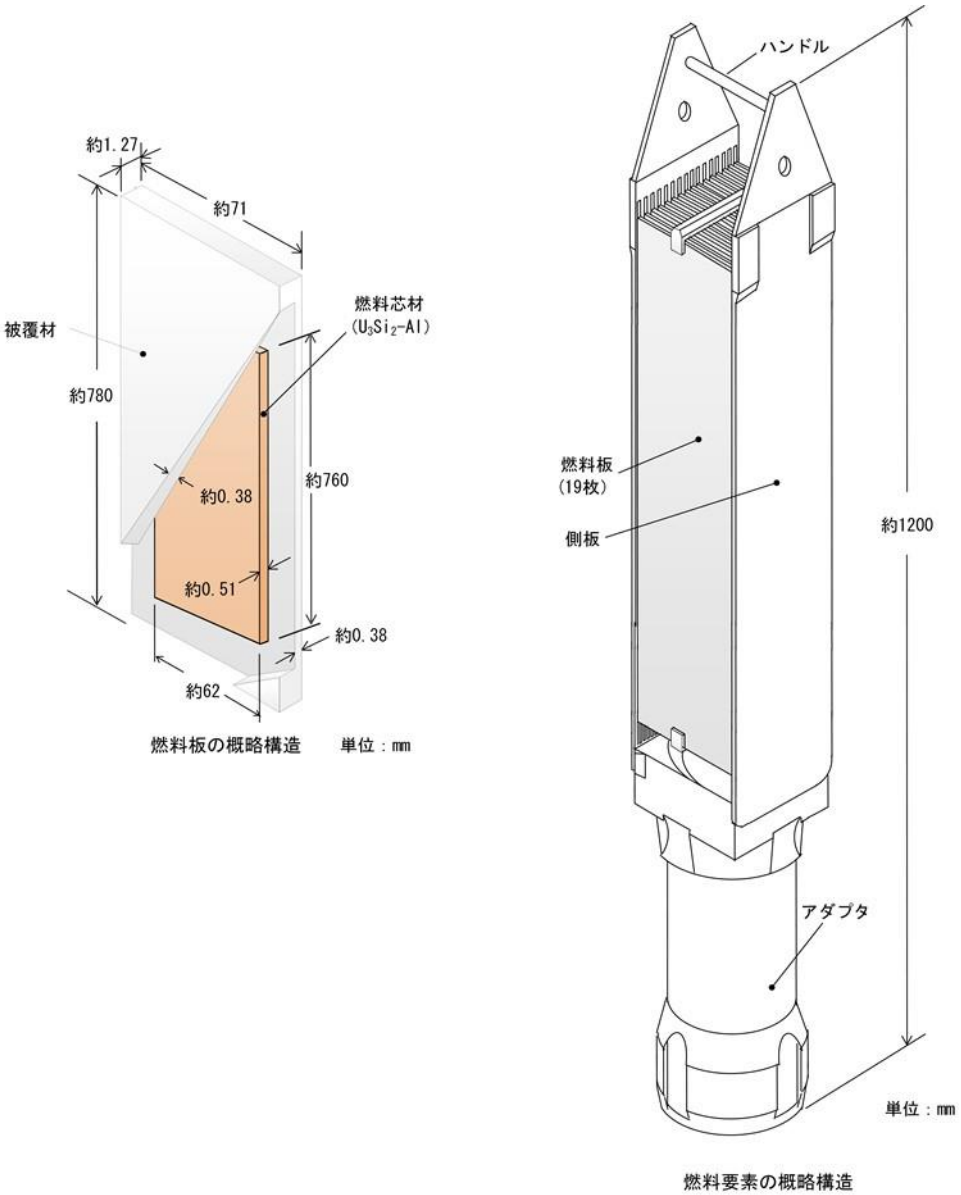
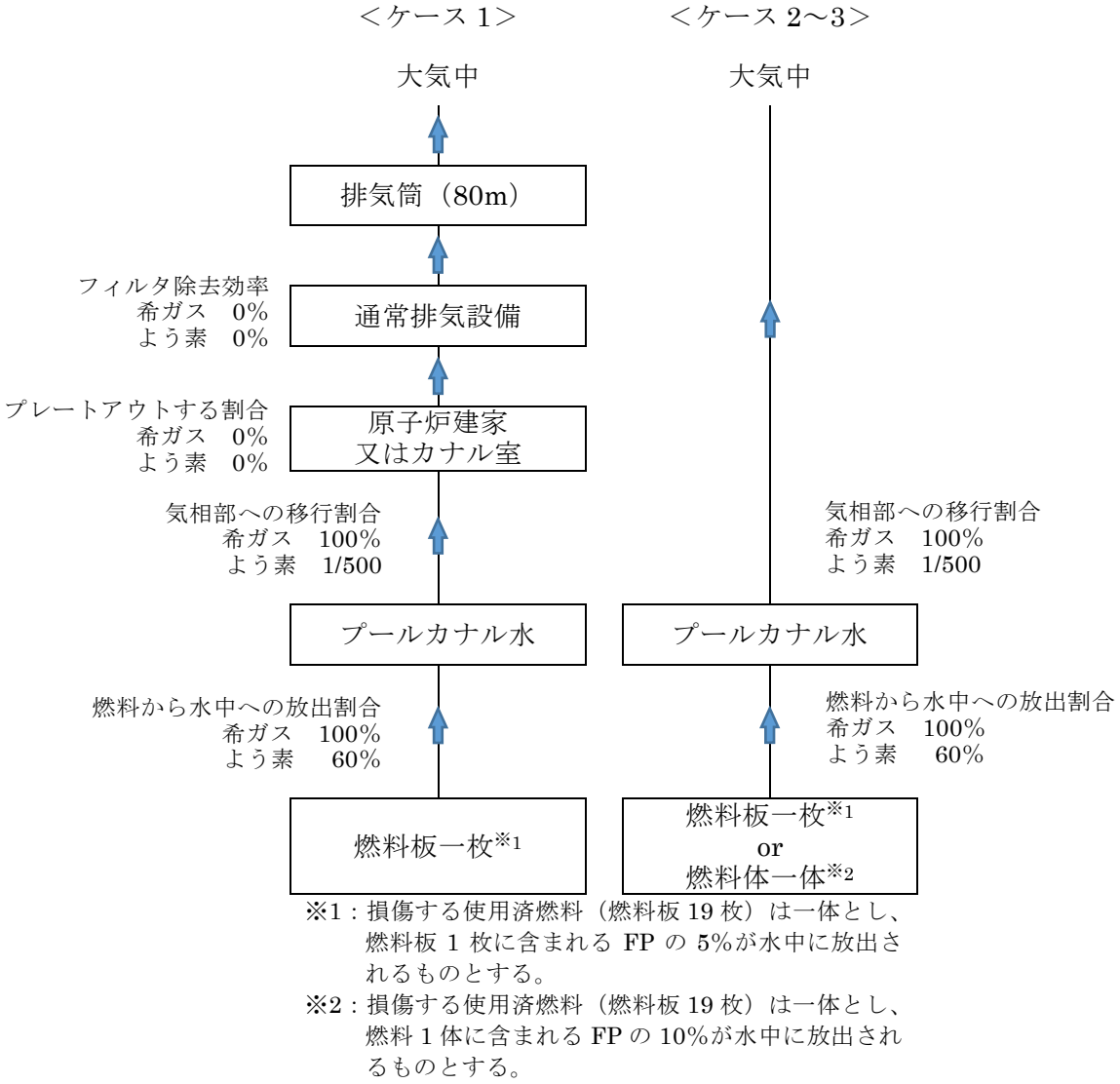



Fig. 4.1.1　JMTR の燃料要素の概略




※1：損傷する使用済燃料（燃料板 19 枚）は一体とし、燃料板 1 枚に含まれる FP の 5%が水中に放出されるものとする。

※2：損傷する使用済燃料（燃料板 19 枚）は一体とし、燃料 1 体に含まれる FP の 10%が水中に放出されるものとする。

Fig. 4.1.2　燃料取扱事故時の FP 放出条件及び放出経路

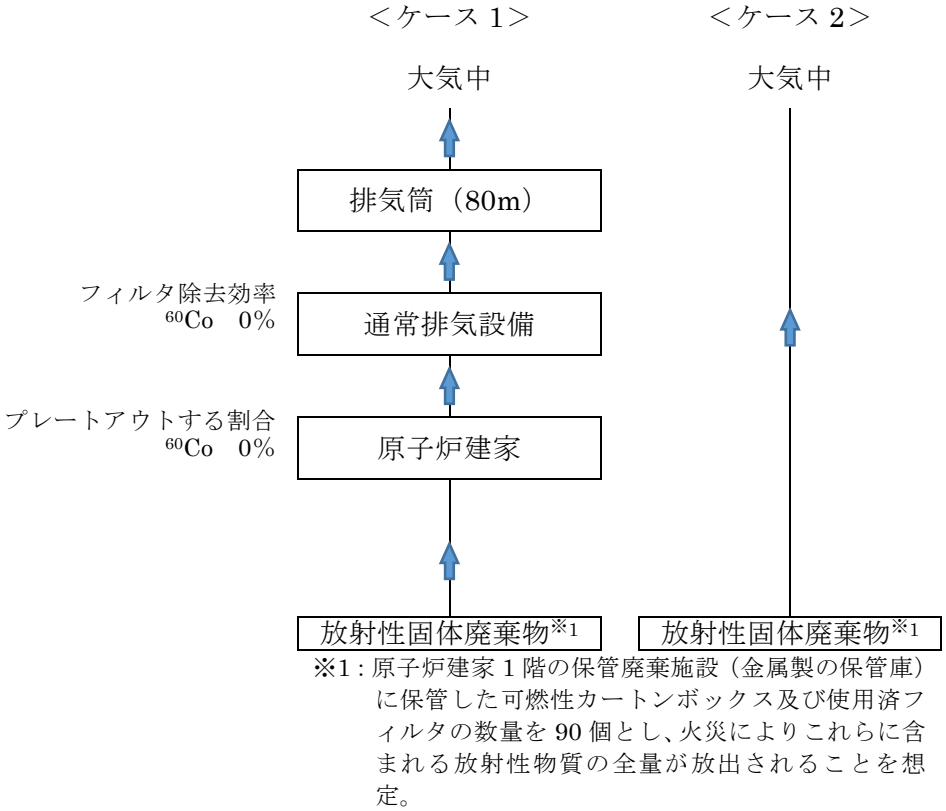



Fig. 4.1.3　廃棄物の保管中の火災による放射性物質の放出条件及び放出経路

# 付録-1

## 使用済燃料内の FP 蓄積量の評価

### 1. 概要

JMTR 原子炉施設に残存する使用済燃料の FP 蓄積量を評価するため、統合燃焼計算コードシステム SWAT4.0[A1-1)]と核種生成放管計算コード ORIGEN-2[A1-2)]を用いて評価を行う。

### 2. 評価方法

評価の流れは以下のとおり。

①SWAT4.0 による燃焼計算及び ORIGEN-2 のライブラリ作成

②ORIGEN-2 による各冷却時間におけるウラン 1t 当たりの放射能量の算出

③算出データを燃料要素 1 体当たり放射能量に換算

なお、SWAT4.0 は、入力に指定された燃焼履歴データに基づいて、連続エネルギモンテカルロコード MVP、MCNP5 又は核計算コード SRAC2006 を使用して燃焼ステップ毎に実効断面積の作成を行い、ORIGEN-2 フォーマットの実効断面積ファイルを指定された燃焼領域毎に用意し、それぞれの燃焼領域を対象に ORIGEN-2 により燃焼計算を実行する計算コードであり[A1-1)]、本評価では連続エネルギモンテカルロコードとして MCNP5[A1-3)]を用いて計算を行う。

(1) SWAT4.0 による計算

SWAT4.0 により、使用済燃料の組成を算出する。SWAT4.0 では、入力で指定した燃焼ステップ（時間幅とそのときの比出力）毎に、以下の計算を行う。

a) MCNP5 により、入力で燃焼領域として指定した燃料中の中性子束及び反応率を算出する。

b) 中性子束及び反応率から実効 1 群断面積を求めて ORIGEN-2 のライブラリを作成する。

c) 作成したライブラリを用いて ORIGEN-2 による燃焼計算を行う。

d) 燃焼計算で得られた組成を MCNP5 の入力の燃焼領域に設定する。

以上の計算を、入力時に指定した燃焼ステップに対して、繰り返し計算を行う。

(2) ORIGEN-2 による計算

ORIGEN-2 により、各冷却時間におけるウラン 1t 当たりの放射能量の算出を行う。この算出においては、SWAT4.0 が最後の燃焼ステップに対して作成した ORIGEN-2 の入力データとライブラリを用いる。この ORIGEN-2 の入力データには、初期組成としてそれまでの燃焼ステップの計算で得られた組成と、最後の燃焼ステップが設定されており、この最後の燃焼ステップに続いて、使用済燃料の各冷却時間を設定し、SWAT4.0 が作成したライブラリを用いて ORIGEN-2 を実行する。これにより、各冷却時間における全使用済燃料のウラン 1t 当たりの放射能量が得られる。

(3) 放射能量の換算

以上より算出した各冷却時間における放射能量を、燃料要素 1 体（2.076kg/要素）当たり

放射能量に換算する。

## 3. SWAT4.0 による評価

### 3.1　評価条件

(1) 炉心構成

JMTR 炉心構成を **Fig. A1.3.1** に示す。炉心には標準燃料要素 22 本とフォロワ燃料要素 4 本が装荷されている。I-8 位置には制御棒が全挿入されており、この位置のフォロワ燃料要素は考慮しない。燃料は LEU 燃料とする。

(2) 燃焼位置

SWAT4.0 において、燃焼させる燃料の位置は、**Fig. A1.3.1** に示す H-8 位置の燃料とする。

(3) 幾何形状

SWAT4.0 において、中性子束及び反応率計算に用いる MCNP5 の入力における幾何形状の全体図を **Fig. A1.3.2** に、炉心モデルを **Fig. A1.3.3** に示す。

(4) 比出力

比出力は、ウラン 1t 当たりの出力であり、SWAT4.0 の入力には MW 単位で設定する。この比出力は、JMTR の出力 50MW と、炉心に装荷されている燃料の重量及び原子個数密度から求めることができる。以下式より求めると、比出力は 975.1（MW/t）となる。

$$\rho_{U-235} = \frac{N_{U-235} \times 10^{24} \times A_{U-235}}{N_{Av}}$$

$$\rho_{U-238} = \frac{N_{U-238} \times 10^{24} \times A_{U-238}}{N_{Av}}$$

$$W_U = (\rho_{U-235} + \rho_{U-238}) \times V$$

$$P = \frac{50}{W_{U-235}/10^6}$$

$\rho_{U-235}$、$\rho_{U-238}$　：U-235 及び U-238 の密度（g/cm$^3$）

$N_{U-235}$、$N_{U-238}$　：U-235 及び U-238 の原子個数密度（atoms/b/cm）※1

$A_{U-235}$、$A_{U-238}$　：U-235 及び U-238 の原子量※2

$N_{Av}$　：アボガドロ数（/mol）※3

$W_U$　：ウランの重量（g）

$V$　：炉心内燃料の体積（cm$^3$）※4

$P$　：比出力（MW/t）

※1：LEU 燃料の原子個数密度を **Table A1.3.1** に示す。

※2：U-235；235.0439301、U-238；238.0507884（M. Wang et. al., “The AME2012 atomic mass evaluation (II). Tables, graphs and references,” Chinese Physics C, 2012, 36(12): 1603-2014 より）

※3：6.02214199E+23（/mol）（アイソトープ手帳第 10 版より）

※4：体積算出は以下値を用いる。

・標準燃料要素の燃料ミート寸法；0.051×5.95×75cm（厚さ×幅×高さ）

・フォロワ燃料要素の燃料ミート寸法：0.051×4.76×75cm（厚さ×幅×高さ）
・標準燃料要素の 1 体当たり燃料板枚数：19 枚
・フォロワ燃料要素の 1 体当たり燃料板枚数：16 枚
・標準燃料要素の炉心装荷体数：22 体
・フォロワ燃料要素の炉心装荷体数：4 体

(5) 燃焼ステップ

燃焼ステップの比出力と運転日数は以下のように設定する。

・新燃料から燃焼終了までの比出力：975.1 MW/t（運転中の冷却は考慮しない）
・運転日数：120 日（U-235 の燃焼度が 60%を超えるよう設定）

燃焼ステップを **Table A1.3.2** に示す。新燃料から 4 日間はステップを細かくとり、その後は 2 日間として 74 日目まで一定とし、その後 3 日を 2 ステップ、残りを 5 日ずつのステップとし、合計 53 ステップとした。

(6) ヒストリー設定

SWAT4.0 の入力には、MCNP5 の入力を含める。MCNP5 の入力には、以下のヒストリー数を設定した。

・1 サイクル当たりのヒストリー数：500,000
・スキップサイクル数：20
・合計サイクル数（スキップサイクル数を含む）：220

以上から、ヒストリー数は 50 万×200＝1 億ヒストリーとなる。

(7) 物質組成（原子個数密度）

SWAT4.0 の入力のうち、MCNP5 の入力部分に指定した物質組成（原子個数密度）を **Table A1.3.3** に示す。また、SWAT4.0 の入力には、燃焼させる燃料の原子個数密度として、燃料に含まれる酸素（O-16）の原子個数密度の値が必要である。JMTR の燃料は $UO_2$ ではないため、酸素の原子個数密度としては、非常に小さな値（1E-30）を設定した。

(8) 燃焼領域用の核種テーブル

SWAT4.0 では、MCNP5 の入力において指定した燃焼領域に対して、一つ前の燃焼ステップの ORIGEN-2 による結果で得られた組成を設定する。この組成設定においては、ORIGEN-2 による組成のうち、MCNP5 のライブラリに存在する核種のみを指定することができる。

SWAT4.0 には、MCNP5 用の JENDL-4.0 の核種テーブルとして、一部の核種を選択したもののみが付属している。このため、AceLibJ40 の全核種を含む核種テーブルを作成し、SWAT4.0 の実行時に核種テーブルとして指定した。

(9) 温度設定

SWAT4.0 の入力のうち、燃料と水の温度は 300K に指定した。

### 3.2 評価結果

SWAT4.0 による U-235 の燃焼結果を以下に示す。

・初期重量　　：　1.975E+05 g（ウラン 1t 当たり）
・熱出力 50MW、120 日運転後　：　6.338E+04 g（ウラン 1t 当たり）

・燃焼度　　：　67.91 ％

## 4. ORIGEN-2 による評価

### 4.1　評価条件

SWAT4.0 が最後の燃焼ステップに対して作成した ORIGEN-2 の入力データとライブラリを用いて、使用済燃料の各冷却時間を設定し、各冷却時間における全使用済燃料のウラン 1t 当たりの放射能量を算出する。

冷却時間と使用済燃料の本数を **Table A1.4.1** に示す。この使用済燃料は、すべて標準燃料要素として扱う。なお、評価時は 2018 年 3 月 31 日とし、原子炉停止時から 4259 日後とする。

### 4.2　評価結果

ORIGEN-2 による使用済燃料のウラン 1t 当たりの放射能量を、燃料要素 1 体（2.076kg/要素）当たり放射能量に換算する。算出した使用済燃料の FP 核種のうち、希ガス及びよう素の各冷却時間における放射能量の結果を、**Table A1.4.2** に示す。また、冷却時間のうち ID=1（165cy で使用し、原子炉停止時から 4259 日経過後の使用済燃料）における希ガス及びよう素の減推移を **Fig. A1.4.1** に示す。

## 参考文献

A1-1）鹿島陽夫, 他, “連続エネルギモンテカルロコード MVP、MCNP 及び核計算コード SRAC を使用する統合化燃料計算コードシステム—SWAT4.0,” JAEA-Data/Code 2014-028 (2014), 152p.

A1-2）原田康典, 他, “線量当量評価用パソコン版（ORIGEN-2）及び遮蔽計算（QAD, G33）コードの開発,” JAERI-Data/Code 97-013 (1997), 196p.

A1-3) X-5 Monte Carlo Team, “MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5 Volume Ⅰ: Overview and Theory,” LA-UR-03-1987 (2008).

Table A1.3.1　LEU 燃料の原子個数密度
（標準燃料要素、フォロワ燃料要素とも）

| 核種 | 存在比<br>（%） | NUCL ID | 原子個数密度<br>（atoms/b/cm） |
|---|---|---|---|
| U-235 | 100 | 92235 | 2.4300E-03 |
| U-238 | 100 | 92238 | 9.7480E-03 |
| Al-27 | 100 | 13027 | 2.8600E-02 |
| Si-28 | 92.2297 | 14028 | 7.6366E-03 |
| Si-29 | 4.6832 | 14029 | 3.8777E-04 |
| Si-30 | 3.0872 | 14030 | 2.5562E-04 |

Table A1.3.2　SWAT4.0 の入力に設定した燃焼ステップ

| No. | ステップ<br>（日） | 累積日数<br>（日） | No. | ステップ<br>（日） | 累積日数<br>（日） |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.1 | 0.1 | 28 | 2 | 44 |
| 2 | 0.2 | 0.3 | 29 | 2 | 46 |
| 3 | 0.2 | 0.5 | 30 | 2 | 48 |
| 4 | 0.2 | 0.7 | 31 | 2 | 50 |
| 5 | 0.3 | 1 | 32 | 2 | 52 |
| 6 | 1 | 2 | 33 | 2 | 54 |
| 7 | 1 | 3 | 34 | 2 | 56 |
| 8 | 1 | 4 | 35 | 2 | 58 |
| 9 | 2 | 6 | 36 | 2 | 60 |
| 10 | 2 | 8 | 37 | 2 | 62 |
| 11 | 2 | 10 | 38 | 2 | 64 |
| 12 | 2 | 12 | 39 | 2 | 66 |
| 13 | 2 | 14 | 40 | 2 | 68 |
| 14 | 2 | 16 | 41 | 2 | 70 |
| 15 | 2 | 18 | 42 | 2 | 72 |
| 16 | 2 | 20 | 43 | 2 | 74 |
| 17 | 2 | 22 | 44 | 3 | 77 |
| 18 | 2 | 24 | 45 | 3 | 80 |
| 19 | 2 | 26 | 46 | 5 | 85 |
| 20 | 2 | 28 | 47 | 5 | 90 |
| 21 | 2 | 30 | 48 | 5 | 95 |
| 22 | 2 | 32 | 49 | 5 | 100 |
| 23 | 2 | 34 | 50 | 5 | 105 |
| 24 | 2 | 36 | 51 | 5 | 110 |
| 25 | 2 | 38 | 52 | 5 | 115 |
| 26 | 2 | 40 | 53 | 5 | 120 |
| 27 | 2 | 42 | | | |

Table A1.3.3　物質の原子個数密度（1/3）

| No. | 物質名称 | 核種 | 天然存在比*（%） | NUCL ID | 原子個数密度（×$10^{24}$ atoms/cm$^3$） | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 核種毎 | 元素毎 | 合計 |
| 1 | HEU 燃料（標準） | U-235 | 100 | 92235 | 1.6920E-03 | 1.6920E-03 | |
| | | U-238 | 100 | 92238 | 1.2580E-04 | 1.2580E-04 | |
| | | Al-27 | 100 | 13027 | 4.7550E-02 | 4.7550E-02 | 4.936780E-02 |
| 2 | HEU 燃料（フォロワ） | U-235 | 100 | 92235 | 1.7640E-03 | 1.7640E-03 | |
| | | U-238 | 100 | 92238 | 1.3110E-04 | 1.3110E-04 | |
| | | Al-27 | 100 | 13027 | 4.9560E-02 | 4.9560E-02 | 5.145510E-02 |
| 3 | MEU 燃料（標準/フォロワ） | U-235 | 100 | 92235 | 1.8450E-03 | 1.8450E-03 | |
| | | U-238 | 100 | 92238 | 2.2270E-03 | 2.2270E-03 | |
| | | Al-27 | 100 | 13027 | 4.7680E-02 | 4.7680E-02 | 5.175200E-02 |
| 4 | LEU 燃料（標準/フォロワ） | U-235 | 100 | 92235 | 2.4300E-03 | 2.4300E-03 | |
| | | U-238 | 100 | 92238 | 9.7480E-03 | 9.7480E-03 | |
| | | Al-27 | 100 | 13027 | 2.8600E-02 | 2.8600E-02 | |
| | | Si-28 | 92.2297 | 14028 | 7.6366E-03 | | |
| | | Si-29 | 4.6832 | 14029 | 3.8777E-04 | | |
| | | Si-30 | 3.0872 | 14030 | 2.5562E-04 | 8.2800E-03 | 4.905799E-02 |
| 5 | HEU 燃料（17%燃焼、標準） | U-235 | 100 | 92235 | 1.4050E-03 | 1.4050E-03 | |
| | | U-238 | 100 | 92238 | 1.2580E-04 | 1.2580E-04 | |
| | | Al-27 | 100 | 13027 | 4.7550E-02 | 4.7550E-02 | 4.908080E-02 |
| 6 | HEU 燃料（17%燃焼、フォロワ） | U-235 | 100 | 92235 | 1.4640E-03 | 1.4640E-03 | |
| | | U-238 | 100 | 92238 | 1.3110E-04 | 1.3110E-04 | |
| | | Al-27 | 100 | 13027 | 4.9560E-02 | 4.9560E-02 | 5.115510E-02 |
| 7 | AL 共通（被覆、側板） | Al-27 | 100 | 13027 | 6.0240E-02 | 6.0240E-02 | 6.0240E-02 |
| 8 | $H_2O$（55℃、共通） | H-1 | 99.9885 | 1001 | 6.5942E-02 | | |
| | | H-2 | 0.0115 | 1002 | 7.5843E-06 | 6.5950E-02 | |
| | | O-16 | 100 | 8016 | 3.2970E-02 | 3.2970E-02 | 9.891958E-02 |
| 9 | Hf 吸収体（制御棒 SH-2） | Hf-174 | 0.16 | 72174 | 7.2128E-05 | | |
| | | Hf-176 | 5.26 | 72176 | 2.3712E-03 | | |
| | | Hf-177 | 18.6 | 72177 | 8.3849E-03 | | |
| | | Hf-178 | 27.28 | 72178 | 1.2298E-02 | | |
| | | Hf-179 | 13.62 | 72179 | 6.1399E-03 | | |
| | | Hf-180 | 35.08 | 72180 | 1.5814E-02 | 4.508013E-02 | 4.508013E-02 |
| 10 | Be（Be 反射体要素、Be 枠） | Be-9 | 100 | 4009 | 1.2360E-01 | 1.2360E-01 | 1.2360E-01 |
| 11 | Zr（γ 遮蔽板、OSF-1） | Zr-90 | 51.45 | 40090 | 2.2077E-02 | | |
| | | Zr-91 | 11.22 | 40091 | 4.8145E-03 | | |
| | | Zr-92 | 17.15 | 40092 | 7.3591E-03 | | |
| | | Zr-94 | 17.38 | 40094 | 7.4578E-03 | | |
| | | Zr-96 | 2.8 | 40096 | 1.2015E-03 | 4.290990E-02 | 4.290990E-02 |

Table A1.3.3　物質の原子個数密度（2/3）

| No. | 物質名称 | 核種 | 天然存在比*（%） | NUCL ID | 原子個数密度（×$10^{24}$ atoms/cm$^3$） | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 核種毎 | 元素毎 | 合計 |
| 12 | SUS316（OWL-2、HR-2、OGL-1） | Ni-58 | 68.0769 | 28058 | 6.6879E-03 | | |
| | | Ni-60 | 26.2231 | 28060 | 2.5762E-03 | | |
| | | Ni-61 | 1.1399 | 28061 | 1.1198E-04 | | |
| | | Ni-62 | 3.6345 | 28062 | 3.5705E-04 | | |
| | | Ni-64 | 0.9256 | 28064 | 9.0931E-05 | 9.8241E-03 | |
| | | Cr-50 | 4.345 | 24050 | 6.8260E-04 | | |
| | | Cr-52 | 83.789 | 24052 | 1.3163E-02 | | |
| | | Cr-53 | 9.501 | 24053 | 1.4926E-03 | | |
| | | Cr-54 | 2.365 | 24054 | 3.7154E-04 | 1.5710E-02 | |
| | | Mo-92 | 14.84 | 42092 | 1.8580E-04 | | |
| | | Mo-94 | 9.25 | 42094 | 1.1581E-04 | | |
| | | Mo-95 | 15.92 | 42095 | 1.9932E-04 | | |
| | | Mo-96 | 16.68 | 42096 | 2.0883E-04 | | |
| | | Mo-97 | 9.55 | 42097 | 1.1957E-04 | | |
| | | Mo-98 | 24.13 | 42098 | 3.0211E-04 | | |
| | | Mo-100 | 9.63 | 42100 | 1.2057E-04 | 1.2520E-03 | |
| | | Fe-54 | 5.845 | 26054 | 3.4456E-03 | | |
| | | Fe-56 | 91.754 | 26056 | 5.4089E-02 | | |
| | | Fe-57 | 2.119 | 26057 | 1.2492E-03 | | |
| | | Fe-58 | 0.282 | 26058 | 1.6624E-04 | 5.8950E-02 | 8.573585E-02 |
| 13 | He ガス | He-3 | 0.000137 | 2003 | 1.3700E-12 | | |
| | | He-4 | 99.999863 | 2004 | 1.0000E-06 | 1.000001E-06 | 1.000001E-06 |
| 14 | SUS304L | Ni-58 | 68.0769 | 28058 | 6.0922E-03 | | |
| | | Ni-60 | 26.2231 | 28060 | 2.3467E-03 | | |
| | | Ni-61 | 1.1399 | 28061 | 1.0201E-04 | | |
| | | Ni-62 | 3.6345 | 28062 | 3.2525E-04 | | |
| | | Ni-64 | 0.9256 | 28064 | 8.2832E-05 | 8.9490E-03 | |
| | | Cr-50 | 4.345 | 24050 | 7.5820E-04 | | |
| | | Cr-52 | 83.789 | 24052 | 1.4621E-02 | | |
| | | Cr-53 | 9.501 | 24053 | 1.6579E-03 | | |
| | | Cr-54 | 2.365 | 24054 | 4.1269E-04 | 1.7450E-02 | |
| | | Fe-54 | 5.845 | 26054 | 3.4994E-03 | | |
| | | Fe-56 | 91.754 | 26056 | 5.4933E-02 | | |
| | | Fe-57 | 2.119 | 26057 | 1.2686E-03 | | |
| | | Fe-58 | 0.282 | 26058 | 1.6883E-04 | 5.9870E-02 | 8.626861E-02 |
| 15 | 格子板（均質個数密度） | Ni-58 | 68.0769 | 28058 | 2.4024E-03 | | |
| | | Ni-60 | 26.2231 | 28060 | 9.2541E-04 | | |
| | | Ni-61 | 1.1399 | 28061 | 4.0227E-05 | | |
| | | Ni-62 | 3.6345 | 28062 | 1.2826E-04 | | |
| | | Ni-64 | 0.9256 | 28064 | 3.2664E-05 | 3.5290E-03 | |
| | | Cr-50 | 4.345 | 24050 | 3.5559E-04 | | |
| | | Cr-52 | 83.789 | 24052 | 6.8573E-03 | | |
| | | Cr-53 | 9.501 | 24053 | 7.7756E-04 | | |
| | | Cr-54 | 2.365 | 24054 | 1.9355E-04 | 8.1840E-03 | |
| | | Fe-54 | 5.845 | 26054 | 1.6822E-03 | | |
| | | Fe-56 | 91.754 | 26056 | 2.6407E-02 | | |
| | | Fe-57 | 2.119 | 26057 | 6.0985E-04 | | |
| | | Fe-58 | 0.282 | 26058 | 8.1160E-05 | 2.8780E-02 | |
| | | Al-27 | 100 | 13027 | 2.3670E-02 | 2.367E-02 | |
| | | H-1 | 99.9885 | 1001 | 9.1000E-03 | | |
| | | H-2 | 0.0115 | 1002 | 1.0466E-06 | 9.1010E-03 | |
| | | O-16 | 100 | 8016 | 4.5500E-03 | 4.5500E-03 | 7.781422E-02 |

Table A1.3.3　物質の原子個数密度（3/3）

| No. | 物質名称 | 核種 | 天然存在比*（%） | NUCL ID | 原子個数密度（×$10^{24}$ atoms/cm$^3$） | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 核種毎 | 元素毎 | 合計 |
| 16 | SUS304 | Ni-58 | 68.0769 | 28058 | 5.1228E-03 | | |
| | | Ni-60 | 26.2231 | 28060 | 1.9733E-03 | | |
| | | Ni-61 | 1.1399 | 28061 | 8.5777E-05 | | |
| | | Ni-62 | 3.6345 | 28062 | 2.7350E-04 | | |
| | | Ni-64 | 0.9256 | 28064 | 6.9651E-05 | 7.5250E-03 | |
| | | Cr-50 | 4.345 | 24050 | 7.5820E-04 | | |
| | | Cr-52 | 83.789 | 24052 | 1.4621E-02 | | |
| | | Cr-53 | 9.501 | 24053 | 1.6579E-03 | | |
| | | Cr-54 | 2.365 | 24054 | 4.1269E-04 | 1.7450E-02 | |
| | | Fe-54 | 5.845 | 26054 | 3.5865E-03 | | |
| | | Fe-56 | 91.754 | 26056 | 5.6300E-02 | | |
| | | Fe-57 | 2.119 | 26057 | 1.3002E-03 | | |
| | | Fe-58 | 0.282 | 26058 | 1.7304E-04 | 6.1360E-02 | 8.633456E-02 |
| 17 | SS 材（遮蔽板） | Fe-54 | 5.845 | 26054 | 4.9607E-03 | | |
| | | Fe-56 | 91.754 | 26056 | 7.7872E-02 | | |
| | | Fe-57 | 2.119 | 26057 | 1.7984E-03 | | |
| | | Fe-58 | 0.282 | 26058 | 2.3933E-04 | 8.487043E-02 | 8.487043E-02 |
| 18 | 炉プール水（35℃、共通） | H-1 | 99.9885 | 1001 | 6.6452E-02 | | |
| | | H-2 | 0.0115 | 1002 | 7.6429E-06 | 6.6460E-02 | |
| | | O-16 | 100 | 8016 | 3.3230E-02 | 3.3230E-02 | 9.968964E-02 |
| 19 | 空気 | N-14 | 99.632 | 7014 | 4.0261E-05 | | |
| | | N-15 | 0.368 | 7015 | 1.4871E-07 | 4.0410E-05 | |
| | | O-16 | 100 | 8016 | 9.5260E-06 | 9.5260E-06 | 4.993571E-05 |
| 20 | 普通コンクリート 02-a** | H-1 | 99.9885 | 1001 | 1.3738E-02 | | |
| | | H-2 | 0.0115 | 1002 | 1.5801E-06 | 1.3740E-02 | |
| | | O-16 | 100 | 8016 | 4.5930E-02 | 4.5930E-02 | |
| | | C | 100 | 6000 | 1.1530E-04 | 1.1530E-04 | |
| | | Na-23 | 100 | 11023 | 9.6410E-04 | 9.6410E-04 | |
| | | Mg-24 | 78.99 | 12024 | 9.7869E-05 | | |
| | | Mg-25 | 10 | 12025 | 1.2390E-05 | | |
| | | Mg-26 | 11.01 | 12026 | 1.3641E-05 | 1.2390E-04 | |
| | | Al-27 | 100 | 13027 | 1.7410E-03 | 1.7410E-03 | |
| | | Si-28 | 92.2297 | 14028 | 1.5329E-02 | | |
| | | Si-29 | 4.6832 | 14029 | 7.7835E-04 | | |
| | | Si-30 | 3.0872 | 14030 | 5.1309E-04 | 1.6620E-02 | |
| | | K-39 | 93.2581 | 19039 | 4.2955E-04 | | |
| | | K-40 | 0.0117 | 19040 | 5.3890E-08 | | |
| | | K-41 | 6.7302 | 19041 | 3.0999E-05 | 4.6060E-04 | |
| | | Ca-40 | 96.941 | 20040 | 1.4570E-03 | | |
| | | Ca-42 | 0.647 | 20042 | 9.7244E-06 | | |
| | | Ca-43 | 0.135 | 20043 | 2.0291E-06 | | |
| | | Ca-44 | 2.086 | 20044 | 3.1353E-05 | | |
| | | Ca-46 | 0.004 | 20046 | 6.0120E-08 | | |
| | | Ca-48 | 0.187 | 20048 | 2.8106E-06 | 1.5030E-03 | |
| | | Fe-54 | 5.845 | 26054 | 2.0171E-05 | | |
| | | Fe-56 | 91.754 | 26056 | 3.1664E-04 | | |
| | | Fe-57 | 2.119 | 26057 | 7.3127E-06 | | |
| | | Fe-58 | 0.282 | 26058 | 9.7318E-07 | 3.4510E-04 | 8.154300E-02 |

*：K. J. R. Rosman and P. D. P. Taylor, “Isotopic Compositions of the Elements 1997,”Pure and Appl. Chem., Vol.70, No.1, pp.217-235 (1998).

**：概略モデルにおいては、Fe の代わりに Ni とした組成を用いた。この Ni の原子個数密度は以下のとおり。
Ni-58 2.235E-04　Ni-60 8.609E-05　Ni-61 3.742E-06　Ni-62 1.193E-05　Ni-64 3.039E-06

Table A1.4.1　冷却時間と使用済燃料の本数

| ID | 冷却期間（days） | 使用済燃料の本数 | ID | 冷却期間（days） | 使用済燃料の本数 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 4259 | 29 | 27 | 5923 | 2 |
| 2 | 4302 | 10 | 28 | 5948 | 8 |
| 3 | 4336 | 11 | 29 | 5996 | 4 |
| 4 | 4386 | 10 | 30 | 6142 | 2 |
| 5 | 4434 | 1 | 31 | 6163 | 10 |
| 6 | 4443 | 11 | 32 | 6214 | 16 |
| 7 | 4638 | 10 | 33 | 6260 | 15 |
| 8 | 4677 | 11 | 34 | 6316 | 16 |
| 9 | 4742 | 10 | 35 | 6360 | 14 |
| 10 | 4780 | 11 | 36 | 6478 | 8 |
| 11 | 4841 | 10 | 37 | 6480 | 5 |
| 12 | 4877 | 11 | 38 | 6575 | 13 |
| 13 | 5002 | 15 | 39 | 6617 | 13 |
| 14 | 5044 | 11 | 40 | 6669 | 13 |
| 15 | 5105 | 10 | 41 | 6806 | 5 |
| 16 | 5143 | 11 | 42 | 6812 | 9 |
| 17 | 5198 | 2 | 43 | 6851 | 13 |
| 18 | 5199 | 8 | 44 | 6942 | 13 |
| 19 | 5259 | 11 | 45 | 6991 | 13 |
| 20 | 5415 | 1 | 46 | 7047 | 8 |
| 21 | 5433 | 2 | 47 | 7206 | 10 |
| 22 | 5581 | 8 | 48 | 7262 | 10 |
| 23 | 5731 | 13 | 49 | 7305 | 10 |
| 24 | 5835 | 10 | 50 | 7348 | 10 |
| 25 | 5890 | 3 | 51 | 7404 | 10 |
| 26 | 5891 | 8 | 52 | 7925 | 9 |
| | | | 合計 | | 507 |

Table A1.4.2　使用済燃料１体当たりの希ガス及びよう素の放射能量（1/3）

| ID / 核種 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $^{83m}$Kr | 1.66E-09 | 1.17E-09 | 8.92E-10 | 5.97E-10 | 4.10E-10 | 3.82E-10 | 7.93E-11 | 5.33E-11 | 2.97E-11 |
| $^{85m}$Kr | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{85}$Kr | 1.80E+12 | 1.79E+12 | 1.78E+12 | 1.76E+12 | 1.74E+12 | 1.74E+12 | 1.68E+12 | 1.67E+12 | 1.65E+12 |
| $^{87}$Kr | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{88}$Kr | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{89}$Kr | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{90}$Kr | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{131m}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{133m}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{133}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{135m}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{135}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{137}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{138}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{139}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{131}$I | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{132}$I | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{133}$I | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{134}$I | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{135}$I | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{129}$I | 5.24E+06 | 5.24E+06 | 5.24E+06 | 5.24E+06 | 5.24E+06 | 5.24E+06 | 5.24E+06 | 5.24E+06 | 5.24E+06 |
| ID / 核種 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| $^{83m}$Kr | 2.39E-11 | 1.46E-11 | 1.22E-11 | 4.46E-12 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{85m}$Kr | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{85}$Kr | 1.64E+12 | 1.62E+12 | 1.61E+12 | 1.58E+12 | 1.57E+12 | 1.55E+12 | 1.54E+12 | 1.52E+12 | 1.52E+12 |
| $^{87}$Kr | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{88}$Kr | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{89}$Kr | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{90}$Kr | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{131m}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{133m}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{133}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{135m}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{135}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{137}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{138}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{139}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{131}$I | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{132}$I | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{133}$I | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{134}$I | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{135}$I | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{129}$I | 5.24E+06 | 5.24E+06 | 5.24E+06 | 5.24E+06 | 5.24E+06 | 5.24E+06 | 5.24E+06 | 5.24E+06 | 5.24E+06 |

Table A1.4.2　使用済燃料１体当たりの希ガス及びよう素の放射能量（2/3）

| ID / 核種 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $^{83m}$Kr | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{85m}$Kr | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{85}$Kr | 1.51E+12 | 1.47E+12 | 1.46E+12 | 1.43E+12 | 1.39E+12 | 1.36E+12 | 1.35E+12 | 1.35E+12 | 1.34E+12 |
| $^{87}$Kr | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{88}$Kr | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{89}$Kr | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{90}$Kr | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{131m}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{133m}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{133}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{135m}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{135}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{137}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{138}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{139}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{131}$I | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{132}$I | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{133}$I | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{134}$I | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{135}$I | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{129}$I | 5.24E+06 | 5.24E+06 | 5.24E+06 | 5.24E+06 | 5.24E+06 | 5.24E+06 | 5.24E+06 | 5.24E+06 | 5.24E+06 |
| ID / 核種 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| $^{83m}$Kr | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{85m}$Kr | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{85}$Kr | 1.34E+12 | 1.32E+12 | 1.29E+12 | 1.29E+12 | 1.27E+12 | 1.26E+12 | 1.25E+12 | 1.24E+12 | 1.22E+12 |
| $^{87}$Kr | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{88}$Kr | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{89}$Kr | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{90}$Kr | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{131m}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{133m}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{133}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{135m}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{135}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{137}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{138}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{139}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{131}$I | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{132}$I | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{133}$I | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{134}$I | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{135}$I | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{129}$I | 5.24E+06 | 5.24E+06 | 5.24E+06 | 5.24E+06 | 5.24E+06 | 5.24E+06 | 5.24E+06 | 5.24E+06 | 5.24E+06 |

Table A1.4.2　使用済燃料１体当たりの希ガス及びよう素の放射能量（3/3）

| ID / 核種 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $^{83m}$Kr | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{85m}$Kr | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{85}$Kr | 1.22E+12 | 1.20E+12 | 1.19E+12 | 1.18E+12 | 1.15E+12 | 1.15E+12 | 1.14E+12 | 1.12E+12 | 1.11E+12 |
| $^{87}$Kr | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{88}$Kr | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{89}$Kr | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{90}$Kr | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{131m}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{133m}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{133}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{135m}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{135}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{137}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{138}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{139}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{131}$I | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{132}$I | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{133}$I | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{134}$I | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{135}$I | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{129}$I | 5.24E+06 | 5.24E+06 | 5.24E+06 | 5.24E+06 | 5.24E+06 | 5.24E+06 | 5.24E+06 | 5.24E+06 | 5.24E+06 |

| ID / 核種 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $^{83m}$Kr | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{85m}$Kr | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{85}$Kr | 1.10E+12 | 1.07E+12 | 1.06E+12 | 1.05E+12 | 1.04E+12 | 1.03E+12 | 9.42E+11 |
| $^{87}$Kr | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{88}$Kr | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{89}$Kr | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{90}$Kr | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{131m}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{133m}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{133}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{135m}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{135}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{137}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{138}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{139}$Xe | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{131}$I | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{132}$I | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{133}$I | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{134}$I | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{135}$I | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| $^{129}$I | 5.24E+06 | 5.24E+06 | 5.24E+06 | 5.24E+06 | 5.24E+06 | 5.24E+06 | 5.24E+06 |

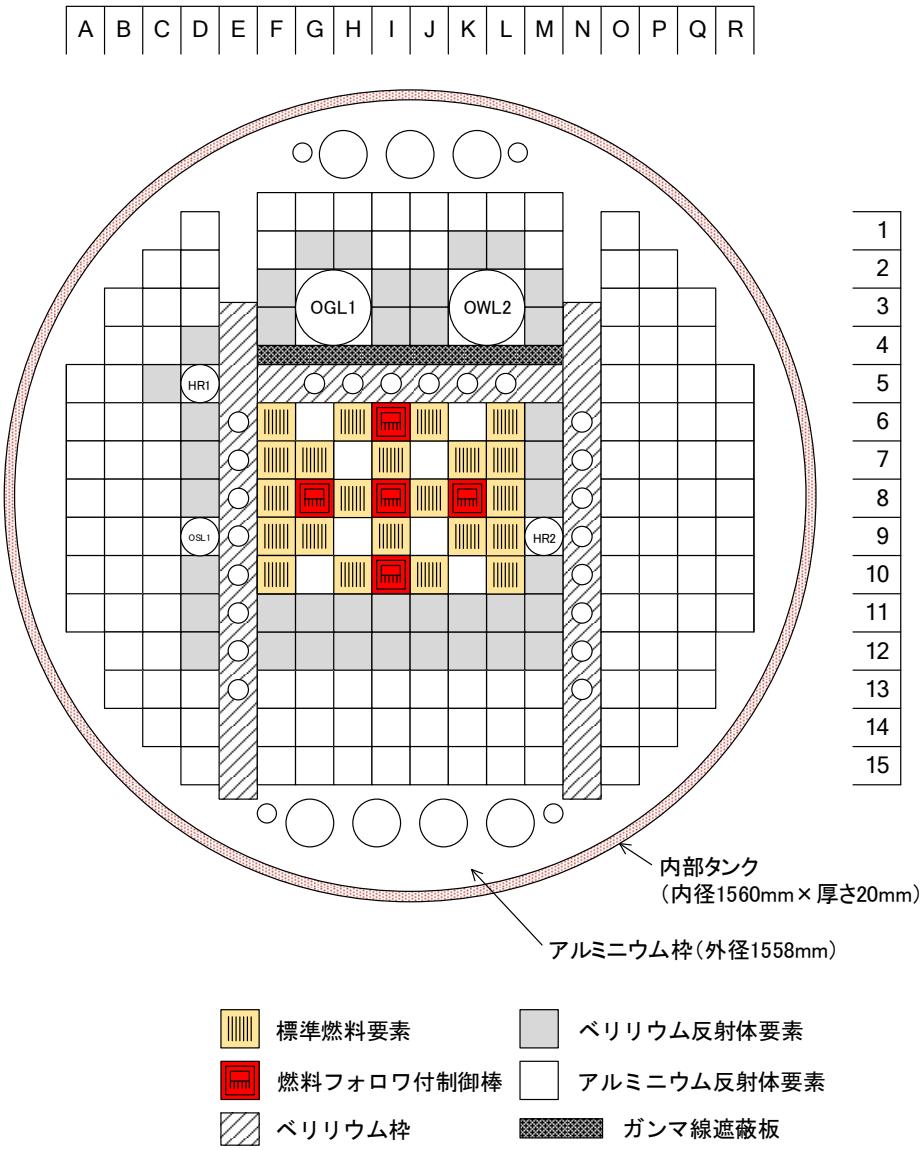



Fig. A1.3.1　JMTR 炉心構成

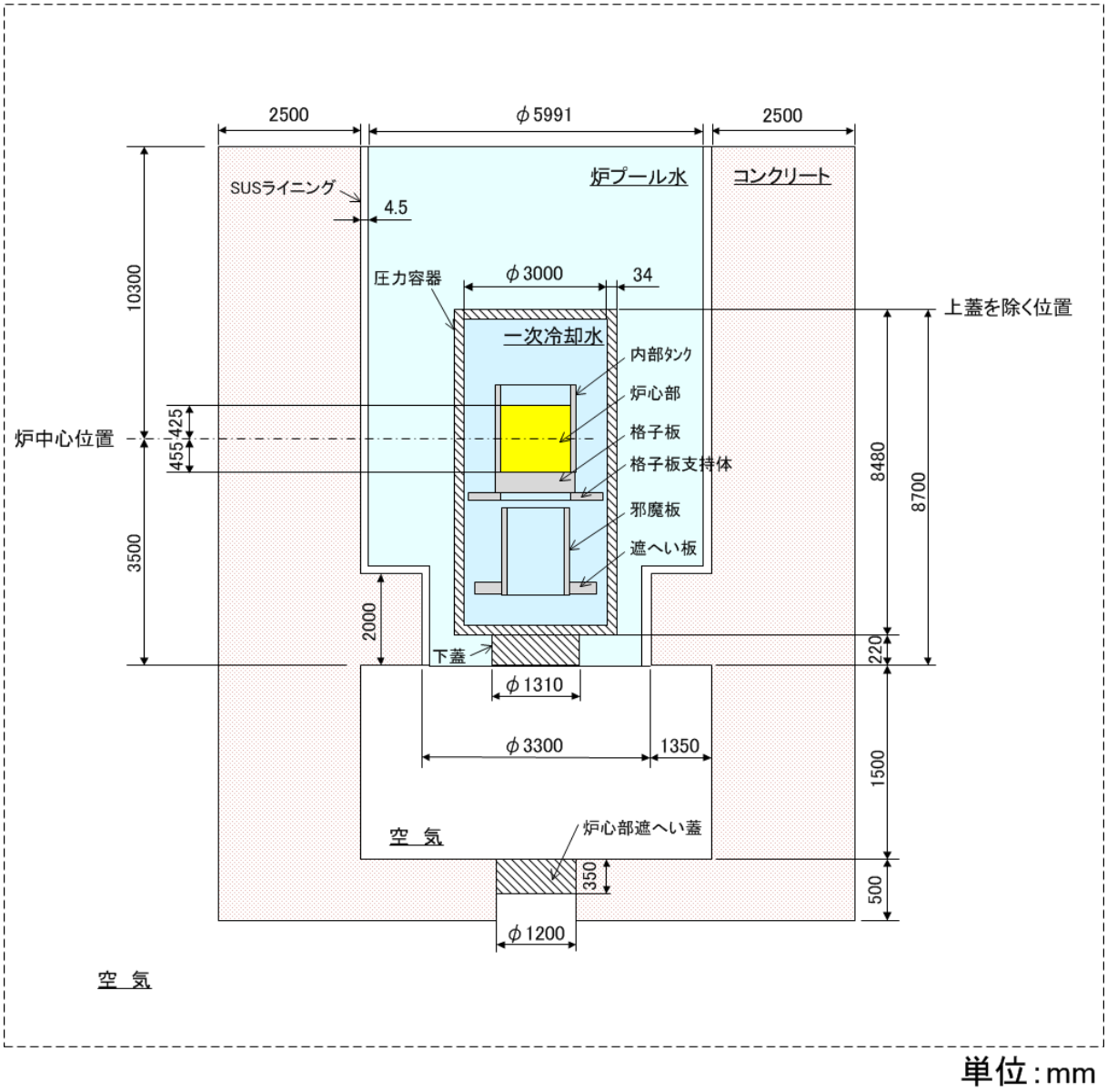



Fig. A1.3.2　対象施設全体の概略図

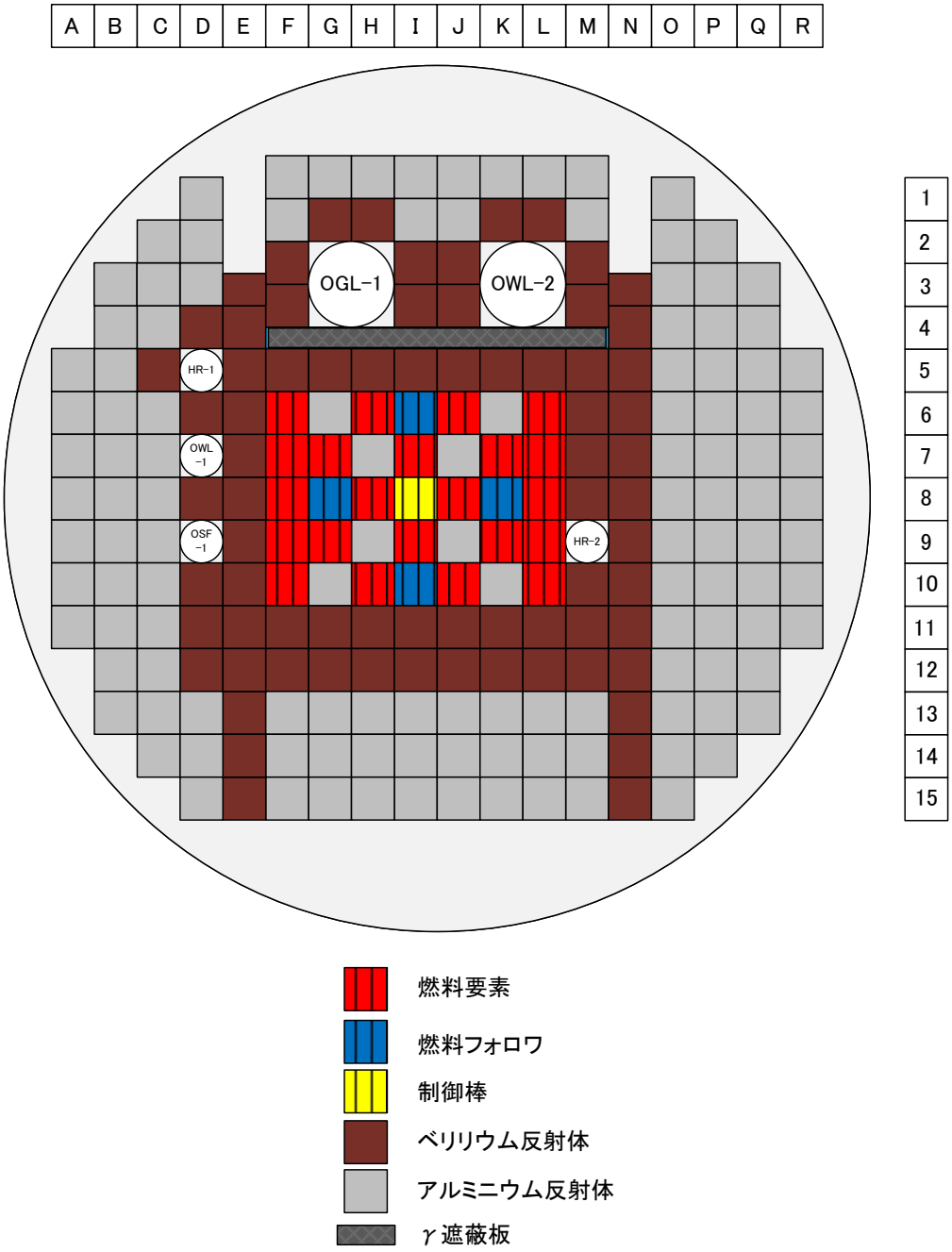



Fig. A1.3.3　JMTR 炉心モデル図

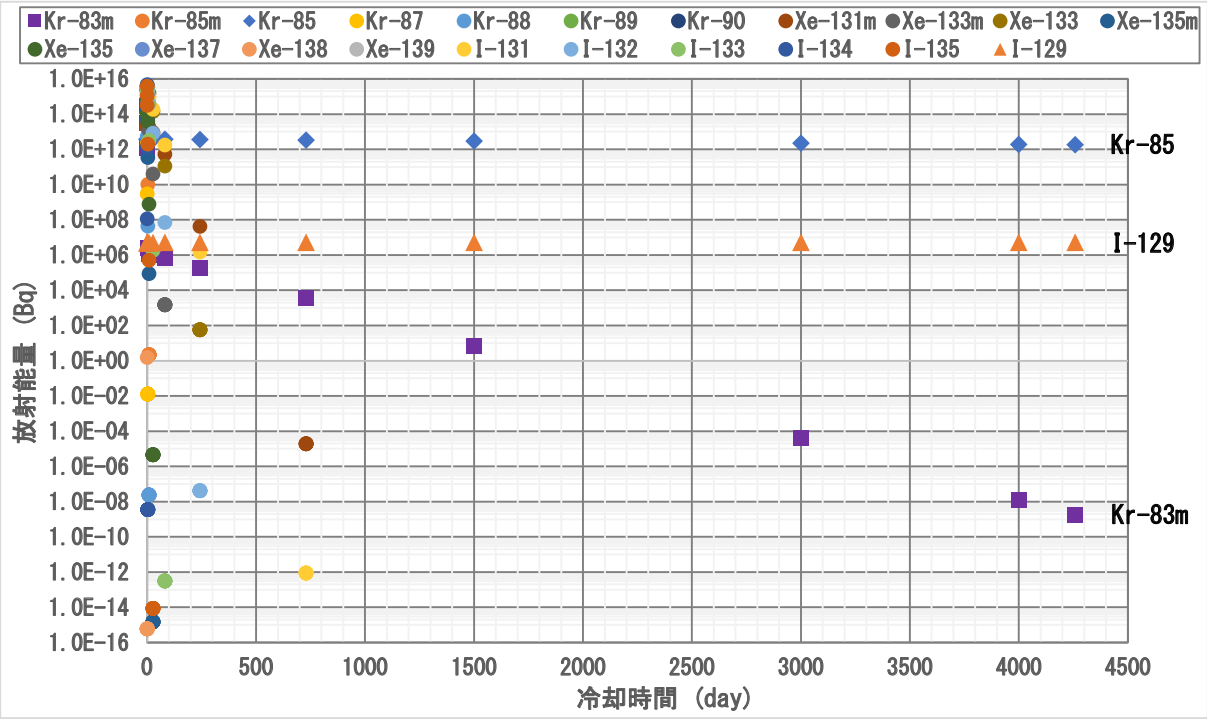



Fig. A1.4.1　使用済燃料（ID=1）の希ガス及びよう素の放射能量の推移

# 付録-2

## 使用済燃料からの FP 放出に寄与する量の考え方

### 1. 概要

事故評価の対象として選定した燃料取扱事故については、原子炉設置変更許可の添付書類十に記載のある内容をもとに評価を行っているが、事故時に使用済燃料から放出される FP の量の考え方については、原子炉設置変更許可から少し変更しているため、その考え方について以下にまとめておく。

### 2. FP 放出に寄与する量の考え方

#### 2.1　原子炉設置変更許可において（当初の考え方）

原子炉設置変更許可に記載の燃料取扱事故の想定については、炉心からの燃料要素の取出し作業時を想定しており、「JMTR の LEU 化に係る安全審査（二次審査）提出資料（平成 3 年 9 月～平成 4 年 1 月）」（私信）の第 7 回部会補足説明資料に以下のように記載されている。

(1) 燃料板 1 枚破損の想定について

燃料要素の取り扱いは、水中で専用の燃料取扱用具を使用して行う。この燃料取扱用具には、落下防止の対策が施されている。しかし、何らかの原因で燃料要素が落下したとしても、燃料要素の重量が軽く、かつ水の抵抗による減速が考えられ、更に想定される落下距離は最大でも 1.5m 程度であることから、炉心内の突起物等（キャプセル、燃料要素把手部等）に衝突して、燃料板が損傷する可能性は極めて少ない。また、衝突された炉心内の燃料要素は、衝突箇所が把手部（側板上端部）であることから燃料板に直接衝撃が加わらないため、損傷することはない。したがって、安全評価においては、落下した燃料要素の外側燃料板 1 枚の衝突面のみが擦り傷等により損傷が発生するものとしている。

(2) FP 放出量の算定

外側燃料 1 枚の衝突面から擦り傷等の損傷により FP が放出される場合を想定する。

FP 放出量は燃料板 1 枚に含まれるインベントリーの 5%が水中に放出されるものとしている。ここで、FP は外側燃料板の衝突面側の燃料芯材の表面から、FP のリコイルの深さ（15μm）に相当する体積分が漏洩するものとする。燃料芯材の体積に対する FP 放出に寄与する体積の割合（$V_{FP}$）は以下のとおりである。

V：燃料芯材の体積（L×W×t）

$V = 760 \times 62 \times 0.51 = 24031.2$（$mm^3$）

ΔV：FP 放出に寄与する体積

$\Delta V = 760 \times 62 \times 0.015 = 706.8$（$mm^3$）

$V_{FP} = \Delta V / V = 706.8 / 24031.2 = 0.0294 \fallingdotseq 3$（%）

上記のように、燃料芯材の体積に対する FP 放出に寄与する体積の割合（$V_{FP}$）は約 3%となるが保守的評価とするため 5%としている。

### 2.2　廃止措置計画において（許可からの変更内容）

廃止措置計画における燃料取扱事故の想定としては、既に燃料要素は炉心から取り出し、燃料ラックに格納されていることから、使用済燃料の搬出作業時（燃料ラックから輸送容器に格納する作業時）を想定する。

使用済燃料の輸送容器への格納は、炉心からの取出しと同様、燃料要素 1 体ずつ人力にて行う。格納作業時に何らかの原因により燃料要素が落下したとしても、水中での落下であり水の抵抗による減速が考えられ、何かしらの突起物等（燃料ラック、輸送容器、燃料要素把手部等）に衝突して、燃料板が損傷する可能性は極めて少ない。また、落下の際、燃料ラック又は輸送容器に格納された燃料要素に衝突したとしても、衝突箇所が把手部（側板上端部）であることから燃料板に直接衝撃が加わらないため、損傷することはない。

したがって、使用済燃料の搬出作業時における燃料取扱事故においても、落下した燃料要素の外側燃料板 1 枚の衝突面のみが擦り傷等により損傷が発生すると思われるが、より保守的な想定として、燃料板の両面に傷が発生すると仮定し、以下のように算出する。

V：燃料芯材の体積（L×W×t）

$V = 760 \times 62 \times 0.51 = 24031.2$（$mm^3$）

ΔV：FP 放出に寄与する体積

$\Delta V = 760 \times 62 \times 0.015 \times 2 = 1413.6$（$mm^3$）

$V_{FP} = \Delta V / V = 1413.6 / 24031.2 = 0.0588 \fallingdotseq 6$（%）

以上より、燃料芯材の体積に対する FP 放出に寄与する体積の割合（$V_{FP}$）は約 6%となるが保守的評価とするため 10%として評価を行う。また、破損する燃料板も 1 枚ではなく、燃料 1 体の枚数である 19 枚が破損すると仮定する。

# 付録-3

## 廃棄物に含まれる放射性物質の量について

廃棄物の保管中の火災の評価において、火災が発生すると想定した可燃性カートンボックス及び使用済フィルタに蓄積される放射性物質の量は、過去の実績値（JMTR 原子炉施設の原子炉停止時の 2013～2017 年までのデータの平均値）から、可燃性カートンボックス及び使用済フィルタ 1 個当たり $2.0\times10^{7}$ Bq（放射性核種は Co-60）、使用済フィルタ 1 個当たり $4.6\times10^{7}$ Bq（放射性核種は Co-60）としている。2013～2017 年までのデータの概略を以下に示す。

| 年数※1 | 種類 | 数量 | 線量当量率（μSv/h） | | 放射能量（Bq）※2 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 最小 | 最大 | 最小 | 最大 |
| 2013 | カートン | 848 | 0.2 | 14 | 4.4E+06 | 3.1E+08 |
| | フィルタ | 0 | — | — | — | — |
| 2014 | カートン | 1113 | 0.2 | 30 | 4.4E+06 | 6.6E+08 |
| | フィルタ | 220 | 0.2 | 4 | 7.8E+06 | 1.6E+08 |
| 2015 | カートン | 1497 | 0.2 | 15 | 4.4E+06 | 3.3E+08 |
| | フィルタ | 40 | 0.3 | 0.4 | 1.2E+07 | 1.6E+07 |
| 2016 | カートン | 409 | 0.2 | 120 | 4.4E+06 | 2.7E+09 |
| | フィルタ | 1 | 0.3 | | 1.2E+07 | |
| 2017 | カートン | 462 | 0.2 | 4 | 4.4E+06 | 8.8E+07 |
| | フィルタ | 1 | 0.2 | | 7.8E+06 | |
| 合計 | カートン | 4329 | 0.82（平均） | | 1.837E+07（平均） | |
| | フィルタ | 262 | 1.15（平均） | | 4.601E+07（平均） | |
| | カートン＆フィルタ | 4591 | 0.84（平均） | | 1.995E+07（平均） | |

※1：封入した年数を表す。

※2：β・γ固体廃棄物 A の放射能量は、大洗研究所放射性廃棄物管理要領の【別添１】固体廃棄物中の放射性物質濃度評価方法より、以下式により算出したものである。

$A_{\beta\gamma}=C\cdot S$

$A_{\beta\gamma}$：放射能量（β・γ放射性物質濃度）（Bq）

S：線量当量率（表面線量率）の実測値（Sv/h）

C：表面線量率放射性物質濃度換算係数（Bq/Sv/h）

この換算係数 S は表１－１より以下の数値を用いている。

紙バケツ、ペール缶：2.2E+13（Bq/Sv/h）

フィルタ　　：3.9E+13（Bq/Sv/h）