

JAERI-M
91-198

高温工学試験研究炉の遮蔽設計における
核分裂生成物線源評価

1991年11月

沢 和弘・村田 勲・新藤 隆一・塩沢 周策

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）にて、お申し込みください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1991

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 ニッセイエプロ株式会社

高温工学試験研究炉の遮蔽設計における核分裂生成物線源評価

日本原子力研究所大洗研究所高温工学試験研究炉開発部
沢 和弘・村田 勲・新藤 隆一・塩沢 周策

(1991年10月21日受理)

高温工学試験研究炉 (HTTR) では、主に被覆層が破損した燃料粒子から核分裂生成物 (FP) が放出され、1次冷却材とともに1次冷却系に移行する。一方、1次冷却材としてヘリウムガスを用いており、冷却材自身の放射化、腐食生成物の発生がほとんど無い。そのため、FPからのガンマ線が遮蔽設計上考慮すべき主要な線源となる。

HTTRの遮蔽設計においては、FP線源を2種類に分類している。一つは永久構造物である遮蔽体の設計に用いるため、十分な保守性を有するように評価を行ったもので、もう一つは保守計画立案のためにより現実的な考え方で評価を行ったものである。

HTTRの1次冷却系内のガンマ線源を評価するために、FP放出割合、1次冷却材中濃度、系統内沈着分布の計算を行った。本報告書は、HTTRの遮蔽設計におけるFP線源評価方法及び結果を述べたものである。

Evaluation of Fission Product Sources for Shielding Design of HTTR

Kazuhiro SAWA, Isao MURATA, Ryuichi SHINDO and Shusaku SHIOZAWA

Department of HTTR Projects
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received October 21, 1991)

In the High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR), some amounts of fission products are released from fuel with failed coating and are transported in the primary cooling system with the primary coolant. On the other hand, the primary coolant of the HTTR is helium gas, then the primary coolant will not be activated itself and amount of corrosion products will be very small. Therefore, gamma ray from fission products will be main gamma ray source of shielding design of the HTTR.

The fission products source for the shielding design of the HTTR is classified into two types. The one is the source for shielding design, and is used to assess property of the radiation shielding materials which are made as permanent construction. Then it should be evaluated conservatively to prevent underestimating. The other is the source for planning of maintenance works, and is evaluated as realistic as possible.

In order to estimate the gamma ray source at various locations of the primary cooling system, fractional releases from fuel, concentrations in the primary coolant and plate-out distributions of fission products were calculated. This report describes the evaluation method and result of the fission products source for the shielding design of the HTTR.

Keywords: HTTR, Shielding Design, Primary Cooling System, Fission Products, Maintenance Works, Fractional Release, Plate-out Distribution

目 次

1. まえがき	1
2. 核分裂生成物線源の評価方法	3
2.1 燃料から放出される核分裂生成物	3
2.2 沈着分布	8
3. 評価結果	27
3.1 燃料からの放出割合及び1次冷却材中濃度	27
3.2 沈着分布	27
3.3 PF線源のまとめ	28
4. まとめ	47
謝 辞	47
参考文献	48
付録1 PLAINコード入力データ作成のための機器のモデル化	49
付録2 ガス状先行核の崩壊による沈着核分裂生成物量の評価	56

Contents

1. Introduction	1
2. Evaluation Method of Fission Products Source	3
2.1 Fractional Releases from Fuel	3
2.2 Plate-out Distribution	8
3. Results	27
3.1 Fractional Releases and Concentrations in Primary Coolant ..	27
3.2 Plate-out Distribution	27
3.3 Summary of Fission Products Source	28
4. Conclusions	47
Acknowledgement	47
References	48
Appendix 1 Modelling of Components (Input Data to PLAIN Code)	49
Appendix 2 Evaluation of Plate-out Fission Products Generated from Gaseous Precursors	56

本文中の式の記号表

- S : 燃料体からの放出速度 (Bq/s)
 λ : 崩壊定数 (1/s)
 P : 原子炉出力 30.75×10^6 (W)
 Y : 核分裂収率 (-)
 (R/B) : 放出率 (-)
 φ : 被覆燃料粒子の被覆層破損率 (-)
 T : 燃料温度 (K)
 K : 放出率計算時のパラメータ (-)
 A : 循環放射能量 (Bq)
 Ad : 沈着放射能量 (Bq)
 η : 核分裂生成物の純化設備による除去効率又は1次冷却設備への沈着効率
 純化設備による除去効率 0.9 (Kr, Xe)、0.99 (I)
 1次冷却設備への沈着効率 循環放射能量計算時 0 (Kr, Xe)、0.9 (その他)
 沈着放射能量計算時 0 (Kr, Xe)、1 (その他)
 W : 1次冷却設備中の1次冷却材流量 10.2 (kg/s)
 Wm : 1次冷却設備中の冷却材総量 670 (kg)
 t : プラント運転時間 3.8×10^8 (s)

添字

- i : 核種
 f : 貫通破損粒子
 s : 健全粒子
 Kr-88 : Kr-88に関する値
 P : 純化設備
 d : 沈着

1. まえがき

高温工学試験研究炉 (High Temperature Engineering Test Reactor、以下「HTTR」という。) は、原子炉熱出力30MW、原子炉冷却材出口温度 950°C (高温試験運転時) の、日本で初めての高温ガス炉である。HTTRの遮蔽設計の目的は軽水炉等の先行炉と全く同じであるが、実際に遮蔽評価を行うにあたっては、先行炉とは異なる高温ガス炉としての特徴を十分考慮する必要がある。

すなわち、高温ガス炉燃料体では、核分裂生成物 (Fission Products、以下「FP」という。) は主に被覆燃料粒子内に閉じ込められる。被覆燃料粒子及び燃料体の概念図をFig. 1.1に示す。炉心内に含まれる被覆燃料粒子の数は膨大で、燃料粒子被覆層の破損を全く無くすることは実際上不可能である。従って、運転中にある量のFPが燃料から放出されることは避けられない。FPの放出過程は拡散により記述することができ、燃料から1次冷却材中へ放出されるFPの量は、燃料粒子被覆層の破損率及び燃料温度によって決まる。燃料から放出されたFPは、冷却材とともに1次冷却設備を循環しガンマ線の発生源となる。FPのうち、沈着性の核種は、循環中に1次冷却設備の内壁面に沈着しガンマ線の発生源となる。一方、高温ガス炉では、1次冷却材に化学的に不活性なヘリウムガスを用いていることから、冷却材自身が放射化されず、また、腐食生成物もほとんど1次系に存在しない (但し原子炉压力容器など、一部では炉心からの中性子による放射化生成物が線源となる)。その代わり、軽水炉等では期待できる、水による遮蔽効果が無い。

以上のことから、1次冷却設備の機器・配管等の遮蔽設計では、FPが考慮すべき主要な線源となる。これらのFP線源の放出量及び系統内分布を適切に評価するために、計算コードの開発及び検証を行い、遮蔽設計に用いている。本報告書は、HTTRの遮蔽設計におけるFP線源評価の考え方、方法及び結果を述べたものであり、以下、2章には基本的考え方、燃料からのFP放出量及び沈着分布の評価方法を、3章にはこれらの評価結果を示した。

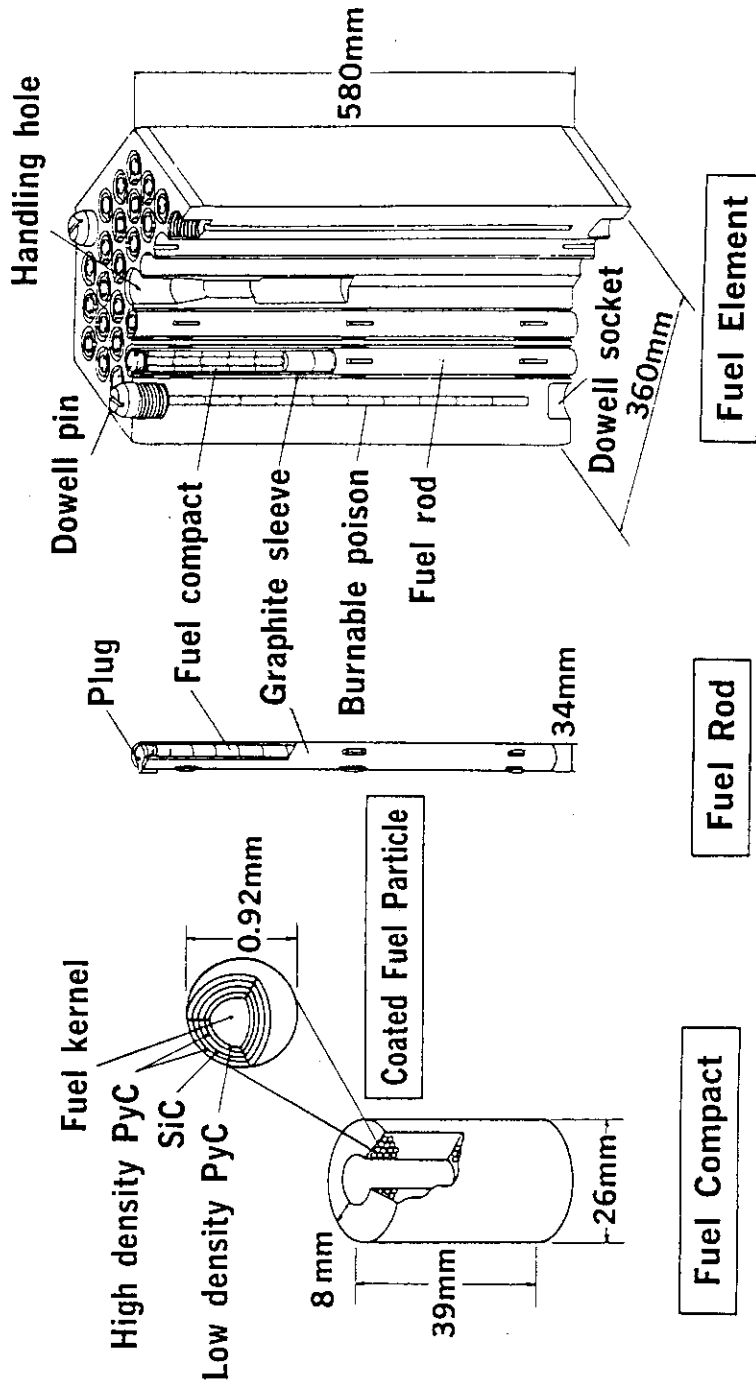


Fig. 1.1 Structure of HTTR fuel element.

2. 核分裂生成物線源の評価方法

HTTRの遮蔽設計は、科学技術庁告示第20号「試験研究の用に供する原子炉等の設置、運転等に関する規則等の規定に基づき、線量当量限度等を定める件」の規定にしたがって行っている。遮蔽設計においては、原子炉建家内を立ち入り頻度に応じた区画に分割し、それぞれの区画にたいして目安となる基準線量当量率の区分を定め、線源となる機器に対する遮蔽がその基準線量当量率を下回るように遮蔽厚さを決定する。従って遮蔽設計を適切に行うためには、線源を十分適切に評価する必要がある。

高温ガス炉では、膨大な数の被覆粒子を燃料として用いており、燃料核中で発生したFPは被覆層で閉じ込める。この燃料粒子の被覆層の破損率を完全に零にする事は實際上出来無いため、高温ガス炉の1次冷却系にはある程度の量のFPが存在する。一方、高温ガス炉では1次冷却材としてヘリウムガスを用いており、冷却材がほとんど放射化しないこと、腐食生成物がほとんど発生しないこと⁽¹⁾から、HTTRの遮蔽設計における線源は、①核分裂により生じるガンマ線及び中性子（これによる機器の放射化も含む）、並びに②燃料体から放出されたFPからのガンマ線の2つに大別される。前者は、原子炉回りの遮蔽に対してのみ影響するが、後者は、1次冷却材とともに系統内を移行するため、多くの場所の遮蔽に対して影響を与え、かつ、その定量化が難しい。

系統内のある場所（機器）におけるFPの存在量を評価するために、以下の計算を行っている。

- (1) 燃料体からのFP放出量計算
- (2) 1次ヘリウム純化設備による除去等を考慮した1次冷却材中のFP量計算
- (3) 沈着性のFPについては、系統内の沈着分布計算

これらの計算を行うコードについては、2.2節に述べるように検証計算を行い、その妥当性を示している^{(2)・(3)・(4)}が、計算には多くの入力データが必要であり、設計段階においてすべてを正確に算出することは難しい。一方、HTTRの遮蔽設計においては、従事者等の安全性を確保し、かつ、合理的な設計を行うために、線源評価において適切な余裕または保守性を見込む必要がある。そこで、HTTRの遮蔽設計においては、FP線源として以下の2種類を設計している。

- ① 遮蔽壁厚の評価に用いる線源（以下、「遮蔽評価用線源」という）
- ② 保守・補修時の作業員被曝評価に用いる線源（以下、「保守評価用線源」という）

遮蔽評価用線源は、永久構造物である遮蔽体の設計評価に用いるため、十分な保守性を有するように評価する。一方、保守評価用線源は、より現実的な考え方で評価を行い、追加遮蔽、補助遮蔽の準備等の保守計画を定めるために用いる。具体的な評価方法を以下、2.1及び2.2節に示す。

2.1 燃料から放出される核分裂生成物

本節では、燃料体からのFP放出量及び系統内に存在するFP総量の評価方法について述べる。

燃料体からのFP放出評価にあたっては、FPの半減期に応じて2つの計算方法を適用している。すなわち、半減期の短い希ガス・よう素は放射平衡になるため、燃料核内の核分裂による生成速度 (Birth rate) と放出速度 (Release rate) の比として定義される (R/B) 値を用いて計算する⁽²⁾。(R/B) 値は、スリーブガスキャプセル照射試験によって得られたKr-88のデータを基に、その他のクリプトン同位体、キセノン、よう素については、理論解に基づいた補正式を用いて計算している⁽⁵⁾。一方、Cs-137, Ag-110m等の比較的発揮性の高い金属FPは、長半減期の核種であるため、燃料核、燃料粒子被覆層、黒鉛スリーブ等の拡散過程において平衡状態にならないため、これらの拡散障壁等を考慮して解析している。

2.1.1 希ガス・よう素

1次冷却材中の希ガス・よう素の量は、燃料体からの放出速度を基に、崩壊、1次ヘリウム純化設備による除去及び放射性よう素については1次冷却設備の配管、機器表面への沈着による除去を考慮して計算する。

核種*i*の燃料体から放出速度 S_i (Bq/s)は、以下の式で表すことができる。

$$S_i = 3.2 \times 10^{10} \times \lambda_i \times P \times Y_i \times (R/B)_i \quad (1)$$

核種*i*の放出率は、核分裂生成物*i*の生成速度 (Birth rate) に対する放出速度 (Release rate) の比である。健全粒子からの放出率は、破損粒子からの放出率に較べて十分小さいため、放出率は以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} (R/B)_i &= \phi \cdot (R/B)_{f,i} + (1-\phi) \cdot (R/B)_{d,i} \\ &\approx \phi \cdot (R/B)_{f,i} \end{aligned} \quad (2)$$

従って、放出速度は、以下の式により計算する。

$$S_i = 3.2 \times 10^{10} \times \lambda_i \times P \times Y_i \times \phi \times (R/B)_i \quad (3)$$

① 崩壊定数 (λ_i)

「被ばく計算に用いる放射線エネルギーについて (昭和50年11月原子炉安全専門審査会、平成元年3月原子炉安全基準専門部会)」⁽⁵⁾の半減期から算出した値を用いる。

② 原子炉出力 (P)

原子炉の定格熱出力30MWに、熱出力測定誤差2%及び定常時安定度0.5%考慮し、30.75MWを用いる。

③ 核分裂収率 (Y_i)

^{235}U よりも ^{239}Pu の核分裂収率が大きい核種については、 ^{239}Pu の核分裂による生成率の増加を考慮する。

④ 燃料粒子の被覆層破損率 (ϕ)

遮蔽評価用線源の評価においては、運転上十分な裕度を有するよう、初期 (製造時) 破損を基に、運転中の追加破損、その他の予期せぬ運転中の破損を保守的に勘案し、1%の貫通破損粒子

が炉心内に一様に存在するものと仮定する。⁽⁶⁾

保守評価用線源の評価においては、より現実的な仮定として、初期（製造時）破損率に余裕を取った値である0.04%の貫通破損率及び0.16%のSiC層破損率を用いる。^(*)

⑤ 破損粒子からの放出率 $(R/B)_{f,i}$

Kr-88の貫通破損粒子からの放出率 $(R/B)_{f,Kr-88}$ は、スweepガスキャプセル照射試験で燃料温度の関数として得られたデータに基づき定めている。

遮蔽評価用線源の評価においては、データを包絡する(4)式を、保守評価用線源の評価においては、データの50%信頼度に相当する(5)式を用いている。

$$(R/B)_{f,Kr-88} = 2.70 \times 10^{-3} e^{-\frac{17750}{T}} + 2.24 \times 10^{-2} \quad (4)$$

$$(R/B)_{f,Kr-88} = 1.56 \times 10^{-3} e^{-\frac{17750}{T}} + 1.29 \times 10^{-2} \quad (5)$$

(4)及び(5)式の計算に用いる燃料温度としては、遮蔽評価用線源の評価には、工学的安全係数⁽⁷⁾を考慮した温度を、保守評価用線源の評価には、いわゆるノミナル温度を用いている。

その他の核種*i*の放出率は、(4)及び(5)式を基に、下式を用いて計算する。

$$(R/B)_i = K_i \sqrt{\frac{\lambda_i}{\lambda_{Kr-88}}} (R/B)_{f,Kr-88} \quad (6)$$

燃料体から1次冷却材中に放出された後、放射性よう素は1次ヘリウム純化設備のプレチャコールトラップにより、放射性希ガスはコールドチャコールトラップにより、それぞれ除去される。

1次冷却材中の各種*i*の循環放射能総量 A_i (Bq)は、以下の方法で求める。

$$\frac{dA_i}{dt} = S_i - \left(\lambda_i + \frac{W_{pi}}{W_m} \cdot \eta_{pi} + \frac{W}{W_m} \cdot \eta_{di} \right) \cdot A_i \quad (7)$$

通常運転時において循環放射能量は定常となるため、(7)式は以下のようなになる。

$$A_i = \frac{S_i}{\left(\lambda_i + \frac{W_{pi}}{W_m} \cdot \eta_{pi} + \frac{W}{W_m} \cdot \eta_{di} \right)} \quad (8)$$

さらに、HTTRでは、炉心内で燃料の破損限界を試験するための燃料限界照射試験を行う予定であり⁽⁸⁾、1次冷却材中のFP量はこの時が最も多くなると考えられる。遮蔽設計においては、この試験時においても遮蔽区分を満足する必要があるため、これまで述べた評価方法に基づき設計した燃料限界照射試験時の1次冷却材中のFP量の制限値を用いて評価を行う。

2.1.2 金属性核分裂生成物

金属性FPの燃料核から1次冷却材ヘリウム中への移行過程は、被覆燃料粒子中の移行と、燃

(*)最近の製造実績では、製造時の破損率は貫通破損率、SiC層破損率とも 10^{-5} 以下である。

料要素（燃料コンパクト及び黒鉛スリーブ）での移行の2つに大別できる。計算モデルの概念図をFig. 2.1に示す。

被覆燃料粒子中の金属性F Pの移行は、多領域の非均質領域における濃度拡散をFickの法則を用いてモデル化している。燃料要素での移行は、燃料コンパクトの外表面及び黒鉛スリーブの内、外表面における吸着及び黒鉛スリーブ部における拡散をモデル化している。さらに、黒鉛スリーブ外面から1次冷却材への移行については、金属性F Pの蒸気圧平衡及び1次冷却材の境界層での物質移動でモデル化している。評価の対象としている金属性F Pは、半減期が長く、また、燃焼中に炉心の温度及び出力が変化するので、これらの移行過程を解くのに非定常計算を行う必要がある。

HTTRの設計で炉心内の温度分布等に対して多数の評価点について計算を行うため、計算速度が早いことが要求される。そのため、計算速度が早い、TRFICコード⁽⁹⁾を使用している。

(1) 被覆燃料粒子からの放出の解析モデル

被覆燃料粒子からの金属性F Pの放出割合は、多重被覆した非均質領域での拡散をFickの第1及び第2法則を用いて計算する。

HTTR燃料体から1次冷却材中への金属性F Pの放出形態としては、以下の5種類をモデル化している。

① 燃料コンパクトの黒鉛素地中の汚染ウラン

燃料コンパクトの黒鉛素地中のウランの核分裂によって生じた金属性F Pは、被覆燃料粒子による保持効果がないため、そのまま燃料コンパクト外面へ移行するものとする。

② 被覆燃料粒子の被覆層中の汚染ウラン

核分裂反跳により定まる割合で、燃料コンパクトの黒鉛素地中に放出されるものとする。

③ 被覆燃料粒子の被覆層が全て破損した粒子（以下、「貫通破損粒子」という。）

燃料核中の拡散は考慮するが、被覆層における保持効果は全くないものとする。

なお、貫通破損粒子割合を定める検査方法⁽¹⁰⁾では、各被覆層の破損の程度を特定できないため、仮に周方向の一部分の被覆層が貫通破損している粒子があったとしても、被覆層が全周にわたってすべて無くなっていると見なしている保守的なモデルとなっている。

④ 被覆燃料粒子の被覆層のうち、炭化けい素層のみが破損した粒子（以下、「SiC層破損粒子」という。）

燃料核、内側高密度熱分解炭素層及び外側高密度熱分解炭素層中の拡散は考慮するが、SiC層における保持効果はないものとする。

なお、SiC層破損粒子割合を定める検査方法では、SiC層の破損の程度を特定できないため、仮に周方向の一部分のSiC層が破損している粒子があったとしても、SiC層が全周にわたってすべて無くなっているとみなしている保守的なモデルとなっている。

⑤ 被覆燃料粒子の被覆層が全て健全な粒子（以下、「健全粒子」という。）

燃料核及び被覆層中の拡散による保持効果を考慮する。特に、燃料温度が高い場合には、Cs-137などの長半期核種の健全粒子からの放出を考慮する必要がある。

ここで、SiC層の破損を特に分類しているのは、SiC層は高密度熱分解炭素層に比べて金属性F Pの保持能力が高く、放出割合の評価上、その健全性が結果に及ぼす影響が大きいため

である。

①、②及び③は、露出ラウン率としてまとめてその和が測定される。④は、SiC層破損率として測定される。

HTTRの被ばく評価及び遮へい評価に用いる線源の計算時には、製造時の破損、運転中の追加破損等を考慮して保守的に、貫通破損率を1%として計算している。

(2) 燃料要素からの放出の解析モデル

燃料要素内の金属性FPの移行過程としては、燃料コンパクト中の拡散、燃料コンパクトと黒鉛スリーブ間のギャップ部における移行、黒鉛スリーブ中の拡散及び黒鉛スリーブ外表面から1次冷却材中への移行に分類できる。各移行過程に対応する解析モデルを以下に示す。

① 燃料コンパクト中の拡散

燃料コンパクト中での拡散は、十分早いため、コンパクト内の濃度分布は準定常状態であると仮定している。

② 燃料コンパクトと黒鉛スリーブ中のギャップにおける移行

ギャップ中における蒸気圧平衡を仮定する。蒸気圧平衡の式としては、ラングミュアの式とフロイントリッヒの式の和を用いている。

③ 黒鉛スリーブ中の拡散

黒鉛スリーブ中の拡散は、燃料核及び被覆層と同様に、Fickの拡散方程式を用いて計算している。

④ 黒鉛スリーブ外面から冷却材への移行

蒸気圧平衡及び境界層での物質移行で計算している。

(3) 拡散係数及び吸着定数

金属性FPの放出割合は、解析モデル等のもとより、計算に使用する各種物性定数に強く依存するため、評価方法の妥当性を検討するに当たっては、適切な定数を用いる必要がある。金属性FPの放出割合の評価上重要な物性定数としては以下に示すものがある。

① 燃料核中の拡散定数

② 高密度熱分解炭素層中の拡散定数

③ SiC層中の拡散定数

④ 黒鉛スリーブ中の拡散定数

⑤ 燃料コンパクトと黒鉛スリーブ間の吸着平衡係数

⑥ 黒鉛スリーブとヘリウム間の吸着平衡係数

なお、バッファ層は、拡散障壁としてFPの保持機能を期待できないため、解析上は十分大きな拡散係数を用いている。また、燃料コンパクトの黒鉛素地部は、拡散障壁としてFPの保持機能を期待できないものと仮定してある。

これらの定数に関する実験データは、国内（日本原子力研究所）に加え、米国、西独等においても取得されている。これらのデータはその特性上、製造依存の場合が多く、ばらつきが大きい。また、金属性FPの放出割合の評価には、多くの物性定数を用いているため、放出割合の計算に用いる定数すべてについてデータを保守的に評価したものをを用いると、計算結果は非常な過大評価となり、原子炉の設計を制限することになる。従って、計算に用いる物性値、即ち拡散定数及

び吸着平衡係数については、総合的にその保守性を示せば良いという考え方に立ち、基本的には、データの50%信頼度として求めた拡散定数及び吸着平衡係数を解析に用いる。これは、特に物性値として保守的な値を用いなくても、(1)に述べたように、破損粒子のモデル、コンパクト中の拡散モデル等が保守的になっており、解析結果が過小評価となることはないと考えられるためである。

但し、遮へい評価用線源の計算においては、永久建造物の遮蔽壁等が後で不足することがないように、結果をより保守的とするため、最も効果的な障壁であるSiC層中の拡散定数として保守的な評価式を用いている。

評価に用いる定数は、国内で取得されたデータから作成した値を優先的に用いる。但し、国内で取得されていない物性値については、実験データが公開されており、かつ、その物性の製造方法等がHTTRに類似の材料について得られている海外のデータに基づくものを用いる。例としてCsの放出割合の計算に使用する拡散定数のデータをFig. 2.2からFig. 2.3に示す。⁽¹¹⁾

2.2 沈着分布

燃料体から放出されたFPは、1次冷却材ヘリウムとともに1次冷却設備内を循環し、そのうち希ガスをのぞくFPは、1次冷却設備の配管・機器等の内面に沈着する。この沈着総量は、これまでOGL-1 (Oarai Gas Loop No.1)等で行われてきた実験結果⁽¹²⁾から判断して全量が沈着すると考えられるため、100%の沈着割合を仮定し、以下の式で計算する。

$$\frac{dA_{di}}{dt} = \frac{W}{W_m} \cdot A_i - \lambda_i A_{di} \quad (9)$$

$$A_{di} = S_i \cdot \frac{\frac{W}{W_m}}{\lambda + \frac{W_{pi}}{W_m} + \frac{W}{W_m} \cdot \eta_{di}} \left\{ \frac{1 - e^{-\lambda t}}{\lambda_i} + \frac{e^{-(\lambda_i + \frac{W_{pi}}{W_m} \cdot \eta_{di} + \frac{W}{W_m})t} - e^{-\lambda t}}{\frac{W_{pi}}{W_m} \cdot \eta_{di} + \frac{W}{W_m}} \right\} \quad (10)$$

HTTRの遮蔽計算では、1次冷却材を含む配管、機器が多くの部屋に存在するため、沈着するFPの総量のみならずその分布も評価する必要がある。HTTRの1次冷却設備の系統概略図をFig. 2.4に示す。HTTRの1次冷却系における沈着分布の計算は、PLAINコード⁽¹³⁾を用いて行った。PLAINコードは、高温ガス炉システム内における沈着分布を評価するために日本原子力研究所において開発されてきたコードであり、OGL-1で測定された実験データ等を用いて検証されている。⁽¹⁴⁾

計算を行った核種は、HTTRの遮蔽設計上重要なセシウム (Cs-137)、よう素 (I-131)、銀 (Ag-110m)、アンチモン (Sb-125) である。その他の核種に対しては、アンチモンの沈着分布の

データを適用する。ただし、Ba-140と放射平衡になるLa-140は、1次冷却設備内に均一に一樣に分布するとした。

沈着分布の計算に当たっては、1次冷却設備についてその運転方法等に基づき、評価上以下の3種類に分類している。

① 主冷却系 (MCS : Main Cooling System)

この系統は、いわゆる主たる1次冷却設備であり、二重管、1次加圧水冷却器 (PWC : Pressurized Water Cooler)、中間熱交換器 (IHX : Intermediate Heat Exchanger)、循環機、等から構成される。沈着分布に影響を及ぼすと考えられる運転モードとしては、1次冷却材出口温度が 850°Cの定格運転及び 950°Cの高温試験運転がある。さらに、1次加圧水冷却器のみで除熱を行う単独運転と1次加圧水冷却器及び中間熱交換器で除熱を行う並列運転がある。

② 補助冷却系 (ACS : Auxiliary Cooling System)

この系統は、いくつかの異常状態においてのみ運転されるものであり、通常運転時は待機状態にある。構成する機器としては、二重管、補助冷却器、循環機、等がある。

③ 小口径配管等

1次ヘリウムサンプリング配管等の小口径の配管である。

2.2.1 主冷却系

主冷却系は、上述のように原子炉冷却材出口温度及び除熱方法の組み合わせとして4つのモードがあり、HTTRの運転期間(20年)の中のそれぞれの運転期間等は定めていない。従って、沈着分布は、各モードがそれぞれ20年間継続するものとして、4ケースについて評価を行い、各機器・配管毎に最も沈着割合が大きくなるモードの値を用いることとした。

また、主冷却系は、熱交換器等から構成されるため、沈着分布に影響を及ぼす流量、温度等が複雑に分布をしている。そのため、沈着分布の計算結果には相対的に大きい誤差が含まれると予想される。そこで、遮蔽評価線源の評価においては計算値が非安全側にならないように、2.2節で述べた燃料体からのFP放出量そのものを保守的に評価することに加え、沈着分布についてもPLAINコードによる計算結果に加えて、FPの沈着密度が系統内で一樣であると仮定し、機器・配管等が1次冷却設備と接している面積(接触面積)から算出した沈着分布(一樣分布)の評価も行い、各機器・配管毎に沈着割合が大きくなる方の値を用いることとした。

沈着分布の計算で用いている主冷却系のモデルをFig. 2.5に示す。ここで、FPは、1次加圧水冷却器及び中間熱交換器伝熱管に多く沈着すると予想されるため、モデル上この部分を詳細に3分割している。主な入力データとしては、FPの原子炉出口濃度、流量、流路直径、流路長さ、冷却材温度、配管温度、等である。計算に用いた入力データをTable 2.1に示す。また、表に示した入力データの計算根拠を付録1に示す。

2.2.2 補助冷却系

主冷却設備と補助冷却系の関係をFig. 2.6に示す。補助冷却系は、通常の運転状態において定格運転を行うことなく、待機運転状態にある。待機運転状態は、補助冷却設備から1次ヘリウム純化設備へ 200kg/s で1次冷却材ヘリウムガスが流れる、HTTR運転時間の大部分を占める

運転状態であり、冷却材は補助冷却設備二重管及び補助冷却器内は流れるが、補助冷却設備循環機ループ部分はバイパスする。また、補助冷却系の遮蔽設計上考慮すべきもう一つの状態として、補助冷却系起動試験状態がある。これは、定期的に短時間実施する起動試験であり、1次冷却材は1次ヘリウム純化設備へ 200kg/s 流れているのに加えて、補助冷却器低温側プレナムから補助冷却設備循環器ループ内を通り再び低温側プレナムへ戻る、流量約 3 t/h の流れができる。これらの運転状態を示す概念図をFig. 2.7に示す。なお、本来の補助冷却設備の目的である異常時における運転は、発生頻度及び異常によるFP量の増分が小さいことから、評価上は無視している。

沈着分布の計算に用いた入力データをTable 2.2 に示す。

2.2.3 小口径配管

小口径配管は1次冷却設備から数多く分岐しており、原子炉格納容器を貫通して多くの部屋を通過する。遮蔽設計上考慮すべき主要な小口径配管としては、1次ヘリウムサンプリング設備の配管、燃料破損検出装置の配管、等がある。PLAINコードによる沈着分布の計算では、1次冷却設備からの分岐点におけるヘリウム中のFP濃度を基に、流れ方向に沿って流量、ガス温度、配管温度等を入力して沈着分布を求める。小口径配管は、一般にガス及び配管温度は低くなり、供給される沈着性のFPは分岐点からある程度の距離内ですべて沈着し、そこから下流側へは行かないと考えられる。従って、ある程度下流側の配管への沈着量は、ガス状先行核が崩壊することによって生じる沈着性の娘核種によって決まると考えられる。評価上考慮した崩壊系列をFig. 2.8 に示す。ガス状先行核の崩壊により生じる娘核種の生成量の評価方法付録2に示す。

沈着分布の計算で用いている小口径配管の計算モデルを、1次ヘリウムサンプリング設備を例にFig. 2.9に示す。計算に用いた入力データをTable 2.3 に示す。

Table 2.1(1) Input data for plate-out calculation (PWC line, 850°C).

領域 番号	領域名	温 度 (°C)				冷却材 流量 (ton/hr)	流 路 面 積 (m ²)	管 形 状			管 材 質
		冷 却 材		管 壁				等 価 直 径 (m)	本 数 (本)	長 さ (m)	
		入 口	出 口	入 口	出 口						
A 1	圧力容器内管	850	850	850	850	44.6	9.95 ×10 ⁻²	0.356	1	2.2	ハステロイXR
A 2	"	"	"	"	"	"	0.149	0.436	1	1.345	"
B 1	2重管 内側	850	850	850	850	44.6	0.149	0.436	1	9.6	ハステロイXR
B 2	" "	850	850	850	850	45.3	0.149	0.436	1	1.2	"
B 3	PWC伝熱部	850	384	160	165	45.3	0.149	6.88 ×10 ⁻²	1	3.92	SUS321
B 4	PWC 出口 プレナム部	"	"	"	"	"	3.32	2.03	1	1.91	"
B 5	PWC → G/C 単 管	384	384	384	384	15.1	4.42 ×10 ⁻²	0.2372	3	4.0	STPA24
B 6	PWC フィルター (ケーシング)	384	384	386	386	15.1	0.445	0.7528	3	1.49	SCMV4
B 7	PWC フィルター	"	"	"	"	2.05 ×10 ⁻⁹	1.225 ×10 ⁻¹¹	3.5 ×10 ⁻⁶	2.205 ×10 ¹⁰	1.66 ×10 ⁻³	SUS316
B 8	PWC循環機	384	395	386	386	15.1	4.91 ×10 ⁻²	1.56 ×10 ⁻²	3	0.48	SFVAF22B
B 9	G/C → PWC 単 管	395	395	395	395	15.1	4.42 ×10 ⁻²	0.2372	3	3.03	STPA24
B 10	PWC 外胴	395	395	386	395	45.3	0.578	1.9 ×10 ⁻¹	1	4.1	SCMV4
B 11	2重管 外側 (PWC側)	395	395	395	395	45.3	0.135	0.119	1	1.2	SCMV4
B 12	2重管 外側 (RPV側)	395	395	395	395	44.6	0.135	0.119	1	9.6	SCMV4
A 3	炉 側 部	400	400	400	400	22.4	7.22	0.905	1	7.92	SUS316
A 4	上部遮へい体	420	420	450	450	4.70 ×10 ⁻²	4.15 ×10 ⁻⁴	0.023	954	0.27	"

Table 2.1(2) Input data for plate-out calculation (PWC and IHX lines, 850°C).

領域 番号	領域名	温度 (°C)				冷却材 流量 (ton/hr)	流路 面積 (m ²)	管形状			管材質
		冷却材		管壁				等 直 径 (m)	本 数 (本)	長 さ (m)	
		入 口	出 口	入 口	出 口						
A 1	圧力容器内管	850	850	850	850	44.6	9.95 ×10 ⁻²	0.356	1	2.20	ハステロイXR
A 2	"	"	"	"	"	"	0.149	0.436	1	1.345	"
B 1	2重管 内側	850	850	850	850	44.6	0.149	0.436	1	9.6	ハステロイXR
B 2	" " (PWC側)	850	850	850	850	29.7	0.149	0.436	1	1.2	"
B 3	PWC伝熱部	850	388	168	170	29.7	0.53	6.88 ×10 ⁻²	1	3.92	SUS321
B 4	PWC → G/C 単管	388	388	388	388	9.9	4.42 ×10 ⁻²	0.2372	3	5.5	STPA24
B 5	PWC フィルター (ケーシング)	388	388	390	390	9.9	0.445	0.7528	3	1.49	SCMV4
B 6	PWC フィルター	"	"	"	"	1.35 ×10 ⁻⁹	1.225 ×10 ⁻¹¹	3.5 ×10 ⁻⁶	2.205 ×10 ¹⁰	1.66 ×10 ⁻³	SUS316
B 7	PWC循環機	388	395	390	395	9.9	4.91 ×10 ⁻²	1.56 ×10 ⁻²	3	0.48	SFVAF22B
B 8	G/C → PWC 単管	395	395	395	395	9.9	4.42 ×10 ⁻²	0.2372	3	3.03	STPA24
B 9	PWC 外胴	395	395	395	395	29.7	0.578	1.9 ×10 ⁻¹	1	4.1	SCMV4
B10	2重管 外側 (PWC側)	395	395	395	395	29.7	0.135	0.119	1	1.2	"
B11	2重管 外側 (RPV側)	395	395	395	395	44.6	0.135	0.119	1	9.6	"
A 3	炉 側 部	400	400	400	400	22.4	7.22	0.905	1	7.92	SUS316
A 4	上部遮へい体	420	420	450	450	4.70 ×10 ⁻²	4.15 ×10 ⁻⁴	0.023	954	0.27	"

Table 2.1 (2) Continued

領域 番号	領域名	温 度 (°C)				冷却材 流量 (ton/hr)	流 路 面 積 (mf)	管 形 状			管 材 質
		冷 却 材		管 壁				等 価 直 径 (m)	本 数 (本)	長 さ (m)	
		入 口	出 口	入 口	出 口						
C 1	2重管 内側	350	850	850	850	14.9	0.034	0.208	1	4.8	ハステロイXR
C 2	IHX伝熱部	850	387	803	320	14.9	0.576	0.0248	1	5.51	"
C 3	IHX → G/C 単 管	387	387	387	387	14.9	0.163	0.4556	1	4.3	STPA24
C 4	IHX フィルター (ケーシング)	387	387	390.4	390.4	14.9	0.445	0.7528	1	1.49	SCMV4
C 5	IHX フィルター	"	"	"	"	2.13 $\times 10^{-9}$	1.225 $\times 10^{-11}$	3.5 $\times 10^{-6}$	6.99 $\times 10^{10}$	1.66 $\times 10^{-3}$	SUS316
C 6	IHX循環機	387	395	390.4	395	14.9	4.915	1.56	1	0.48	SFVAF22B
C 7	G/C → IHX 単 管	395	395	390	395	14.9	4.42 $\times 10^{-2}$	0.2372	1	4.3	STPA24
C 8	IHX 外胴	387	395	387	395	14.9	0.172	0.06	1	7.6	SCMV4
C 9	2重管 外側	395	395	395	395	14.9	0.135	0.119	1	4.8	"

Table 2.1(3) Input data for plate-out calculation (PWC line, 950°C).

領域 番号	領域名	温 度 (°C)				冷却材 流量 (ton/hr)	流 路 面 積 (m ²)	管 形 状			管 材 質
		冷 却 材		管 壁				等 価 直 径 (m)	本 数 (本)	長 さ (m)	
		入 口	出 口	入 口	出 口						
A 1	圧力容器内管	950	950	950	950	36.5	9.95 ×10 ⁻²	0.356	1	2.2	ハステロイXR
A 2	"	"	"	"	"	"	0.149	0.436	1	1.345	"
B 1	2重管 内側	950	950	950	950	36.5	0.149	0.436	1	9.6	ハステロイXR
B 2	" "	950	950	950	950	36.5	0.149	0.436	1	1.2	"
B 3	PWC伝熱部	950	384	160	165	36.5	0.53	6.88 ×10 ⁻²	1	3.92	SUS321
B 4	PWC 出口 プレナム部	"	"	"	"	"	3.32	2.03	1	1.91	"
B 5	PWC → G/C 単 管	387	387	387	387	12.3	4.42 ×10 ⁻²	0.2372	3	4.0	STPA24
B 6	PWC フィルター (ケーシング)	387	387	387	387	12.3	0.445	0.7528	3	1.49	SCMV4
B 7	PWC フィルター	"	"	"	"	1.66 ×10 ⁻⁹	1.225 ×10 ⁻¹¹	3.5 ×10 ⁻⁶	2.205 ×10 ¹⁰	1.66 ×10 ⁻³	SUS316
B 8	PWC循環機	387	395	387	395	12.3	4.91 ×10 ⁻²	1.56 ×10 ⁻²	3	0.48	SFVAF22B
B 9	G/C → PWC 単 管	395	395	395	395	12.3	4.42 ×10 ⁻²	0.2372	3	3.03	STPA24
B10	PWC 外胴	395	395	386	395	36.5	0.578	1.9 ×10 ⁻¹	1	4.1	SCMV4
B11	2重管 外側 (PWC側)	395	395	395	395	36.5	0.135	0.119	1	1.2	SCMV4
B12	2重管 外側 (RPV側)	395	395	395	395	36.5	0.135	0.119	1	9.6	SCMV4
A 3	炉 側 部	400	400	400	400	22.4	7.22	0.905	1	7.92	SUS316
A 4	上部遮へい体	420	420	450	450	4.70 ×10 ⁻²	4.15 ×10 ⁻⁴	0.023	954	0.27	"

Table 2.1(4) Input data for plate-out calculation (PWC and IHX lines, 950°C).

領域 番号	領域名	温 度 (°C)				冷却材 流量 (ton/hr)	流 路 面 積 (m ²)	管 形 状			管 材 質
		冷 却 材		管 壁				等 価 直 径 (m)	本 数 (本)	長 さ (m)	
		入 口	出 口	入 口	出 口						
A 1	圧力容器内管	950	950	950	950	36.5	9.95 ×10 ⁻²	0.356	1	2.20	ハステロイXR
A 2	"	"	"	"	"	"	0.149	0.436	1	1.345	"
B 1	2重管 内側	950	950	950	950	36.5	0.149	0.436	1	9.6	ハステロイXR
B 2	" " (PWC側)	950	950	950	950	24.3	0.149	0.436	1	1.2	"
B 3	PWC伝熱部	950	390	186	160	24.3	0.53	6.88 ×10 ⁻²	1	3.92	SUS321
B 4	PWC → G/C 単 管	390	390	390	390	8.1	4.42 ×10 ⁻²	0.2372	3	5.5	STPA24
B 5	PWC フィルター (ケーシング)	390	390	390	390	8.1	0.445	0.7528	3	1.49	SCMV4
B 6	PWC フィルター	"	"	"	"	1.00 ×10 ⁻⁹	1.225 ×10 ⁻¹¹	3.5 ×10 ⁻⁸	2.205 ×10 ¹⁰	1.66 ×10 ⁻³	SUS316
B 7	PWC循環機	390	395	390	395	8.1	4.91 ×10 ⁻²	1.56 ×10 ⁻²	3	0.48	SFVAF22B
B 8	G/C → PWC 単 管	395	395	395	395	8.1	4.42 ×10 ⁻²	0.2372	3	3.03	STPA24
B 9	PWC 外胴	395	395	395	395	24.3	0.578	1.9 ×10 ⁻¹	1	4.1	SCMV4
B10	2重管 外側 (PWC側)	395	395	395	395	24.3	0.135	0.119	1	1.2	"
B11	2重管 外側 (RPV側)	395	395	395	395	36.5	0.135	0.119	1	9.6	"
A 3	炉 側 部	400	400	400	400	22.4	7.22	0.905	1	7.92	SUS316
A 4	上部遮へい体	420	420	450	450	4.70 ×10 ⁻²	4.15 ×10 ⁻⁴	0.023	954	0.27	"

Table 2.1 (4) Continued

領域 番号	領域名	温 度 (°C)				冷却材 流量 (ton/hr)	流 路 面 積 (m ²)	管 形 状			管 材 質
		冷 却 材		管 壁				等 価 直 径 (m)	本 数 (本)	長 さ (m)	
		入 口	出 口	入 口	出 口						
C 1	2重管 内側	950	950	950	950	12.2	0.034	0.208	1	4.8	ハステロイXR
C 2	IHX伝熱部	950	389	894	318	12.2	0.576	0.0248	1	5.51	"
C 3	IHX → G/C 単 管	389	389	389	389	12.2	0.163	0.4556	1	4.3	STPA24
C 4	IHX フィルター (ケーシング)	389	389	389	389	12.2	0.445	0.7528	1	1.49	SCMV4
C 5	IHX フィルター	"	"	"	"	1.75 ×10 ⁻⁹	1.225 ×10 ⁻¹¹	3.5 ×10 ⁻⁶	6.99 ×10 ¹⁰	1.66 ×10 ⁻³	SUS316
C 6	IHX循環機	389	395	389	395	12.2	4.91	1.56	1	0.48	SFVAF22B
C 7	G/C → IHX 単 管	395	395	395	395	12.2	4.42 ×10 ⁻²	0.2372	1	4.3	STPA24
C 8	IHX 外胴	389	395	389	395	12.2	0.172	0.06	1	7.6	SCMV4
C 9	2重管 外側	395	395	395	395	12.2	0.135	0.119	1	4.8	"

Table 2.2 Input data for plate-out calculation (ACS line).

(Waiting condition)

領域 番号	領域名	温 度 (°C)				冷却材 流量 (ton/hr)	流路 面積 (m ²)	管 形 状			管 材 質
		冷 却 材		管 壁				等 価 直 径 (m)	本 数	長 さ (m)	
		入 口	出 口	入 口	出 口						
A 1	2重管 内管 (ライナ)	850	809	850	809	0.200	0.0189	0.155	1	7.4	ハステロイXR (ライナー)
A 2	AHX伝熱管	809	36	148	35	0.200	0.100	0.044	1	2.6	SUS321TB (tube)
A 3	AHX 上部ナム (外胴)	36	36	36	36	0.200	0.636	0.9	1	1.0	SCMV4
A 4	純化系方向 1½B配管	36	36	36	36	0.200	0.001314	0.0409	1	23.0	SCMV4

(850°C, test condition)

領域 番号	領域名	温 度 (°C)				冷却材 流量 (ton/hr)	流路 面積 (m ²)	管 形 状			管 材 質
		冷 却 材		管 壁				等 価 直 径 (m)	本 数	長 さ (m)	
		入 口	出 口	入 口	出 口						
	(AHX外胴へ追加)										
B 1	単 管	36	36	36	36	3.0	0.0707	0.300	1	0.2	STPA24
B 2	フィルタ	36	36	36	36	3.0	0.31	5.0 ×10 ⁻⁶	1	1.66 ×10 ⁻³	SUS304
B 3	He循環機	36	36	36	36	3.0	0.0707	0.30	1	1.0	STPA24
B 4	単 管	36	36	36	36	3.0	0.0161	0.1432	1	9.6	STPA24

Table 2.3 Input data for plate-out calculation (sampling line).

領域 番号	領域名	温 度 (°C)				冷却材 流量 (ton/hr)	流路 面積 (m ²)	管 形 状			管材質
		冷 却 材		管 壁				等 価 直 径 (m)	本 数	長 さ (m)	
		入 口	出 口	入 口	出 口						
A 1	配 管 (6.355 ^{OD})	40	40	40	40	6.4×10^{-4}	1.49×10^{-5}	4.35×10^{-3}	3	30	SUS304TP
A 2	配 管 (3/4B)	40	40	"	"	1.9×10^{-3}	3.46×10^{-4}	2.1×10^{-2}	1	10	"
A 3	ヘリウム圧縮機 バフタンク	40	40	"	"	"	3.2×10^{-2}	0.2	1	0.4	SUS304
A 4	" サージタンク	50	50	50	50	"	"	"	1	0.4	"
B 1 又は C 1	配 管 (6.355 ^{OD})	40	40	40	40	6.4×10^{-4}	1.49×10^{-5}	4.35×10^{-3}	1	30	SUS304TP

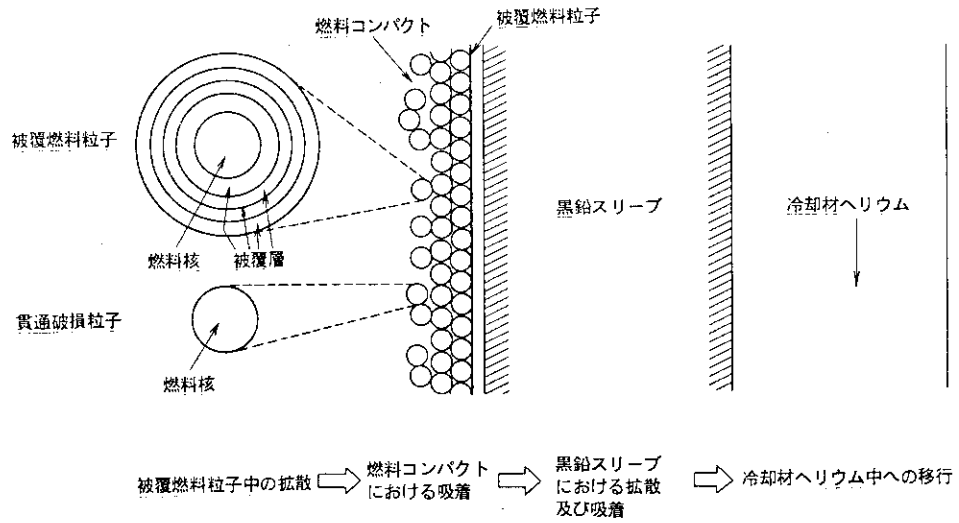


Fig. 2.1 Metallic fission product transport model.

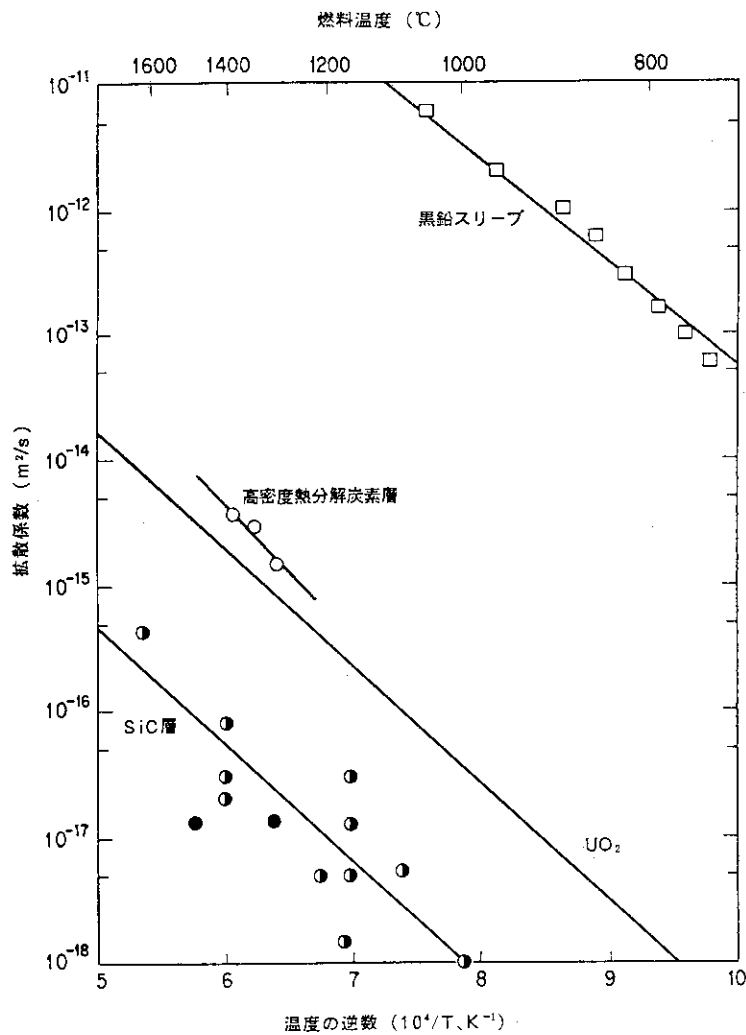


Fig. 2.2 Diffusion coefficients of Cs.

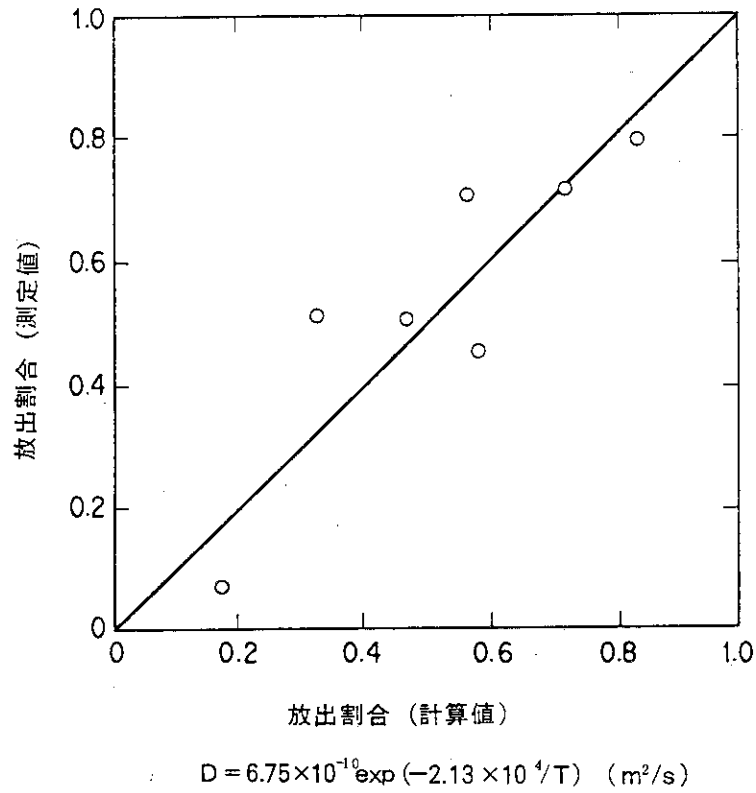


Fig. 2.3 Diffusion data of Cs in UO₂.

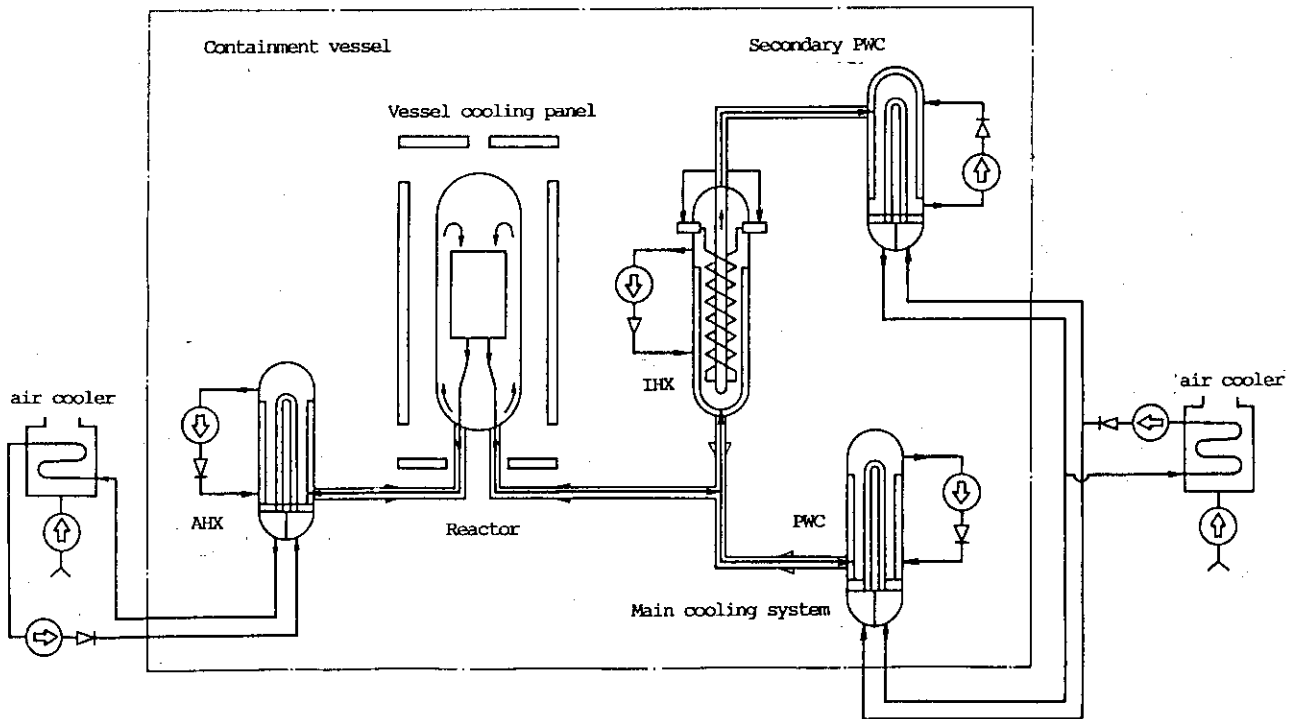
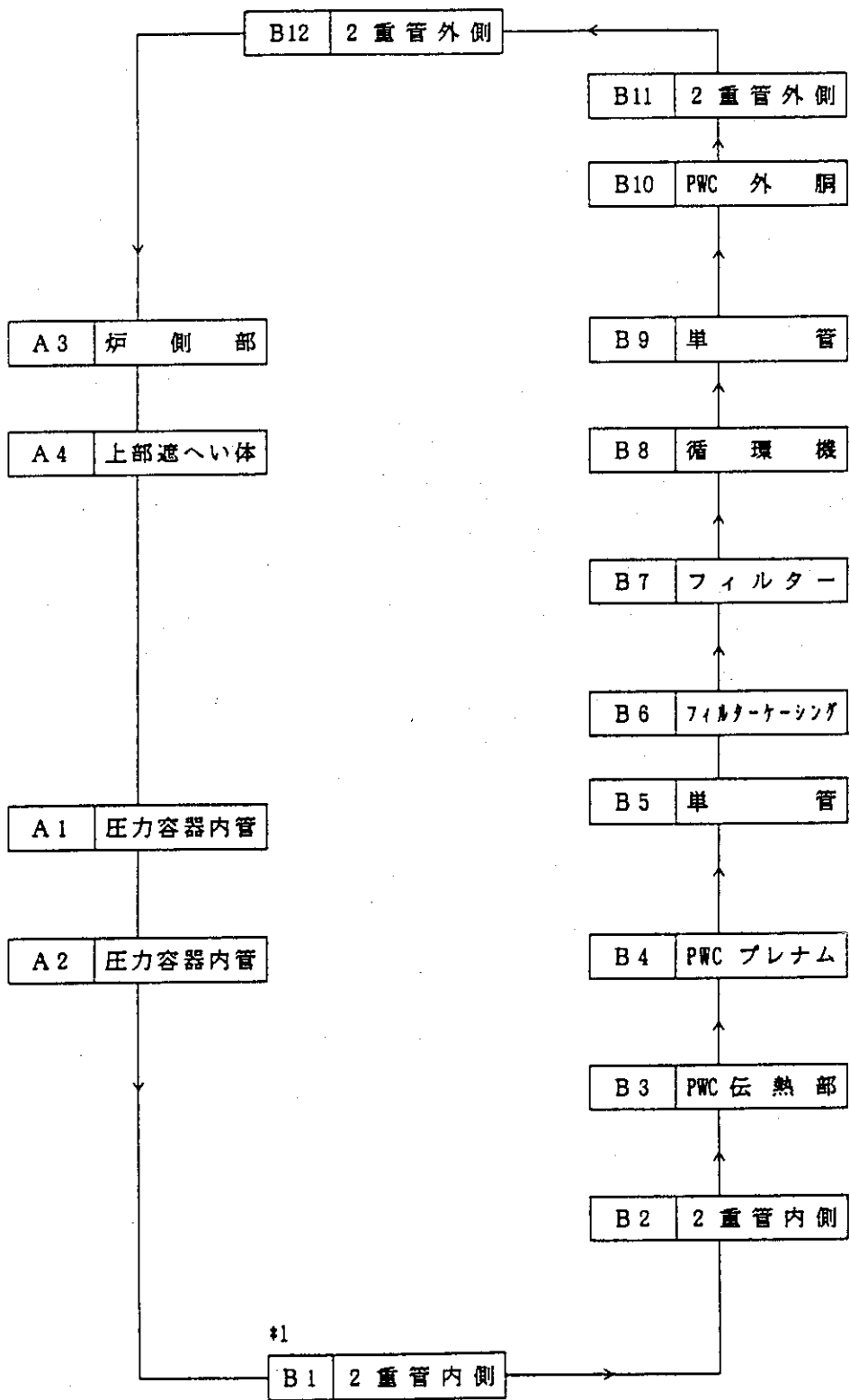


Fig. 2.4 Schematic diagram of HTTR cooling system.

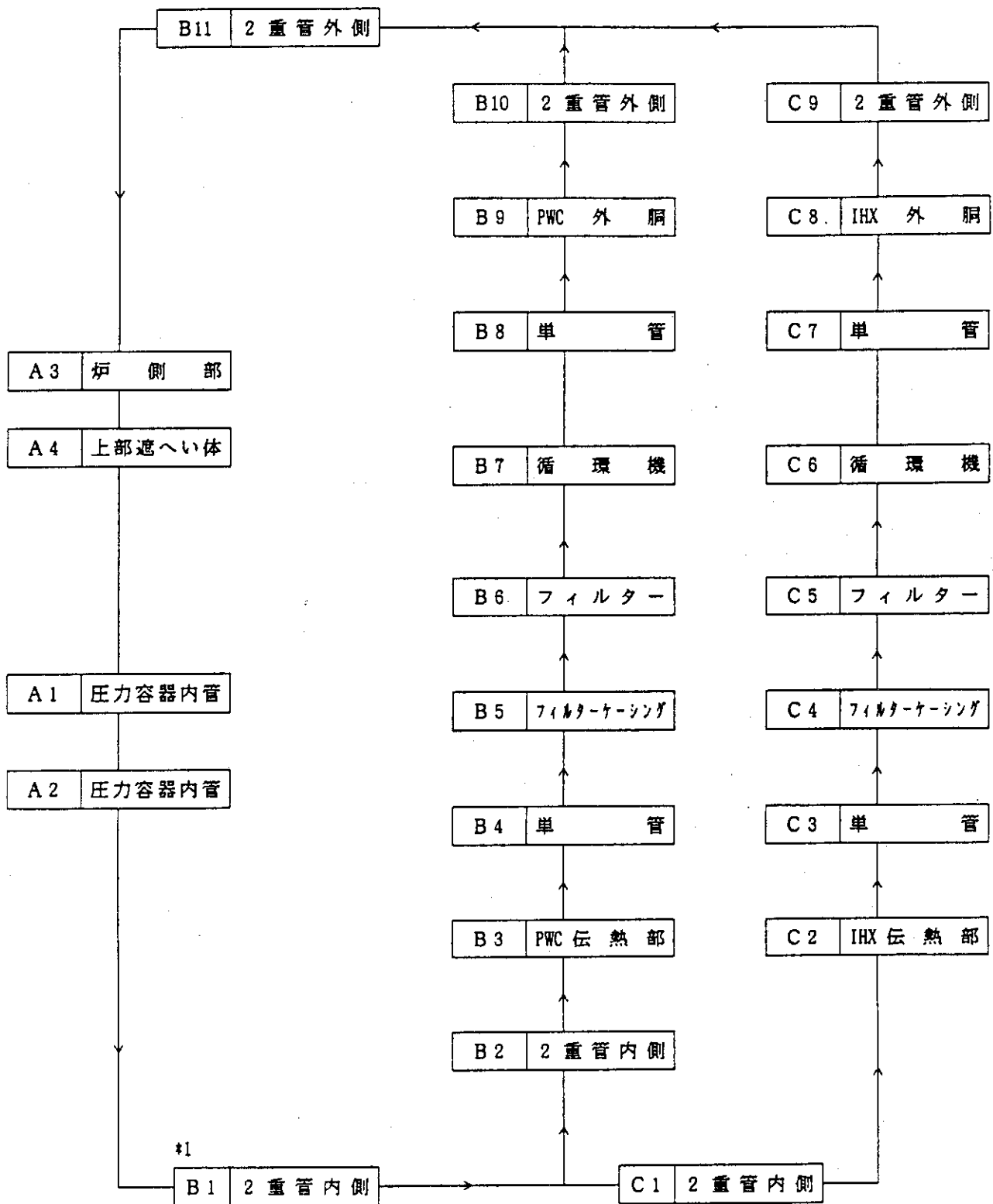


*1

領域 番号	領域名
----------	-----

 Table 2.1に対応

Fig. 2.5(1) Calculation model of MCS (PWC line).



*1

領域 番号	領域名
----------	-----

 Table 2.1 に対応

Fig. 2.5(2) Calculation model of MCS (PWC and IHX lines).

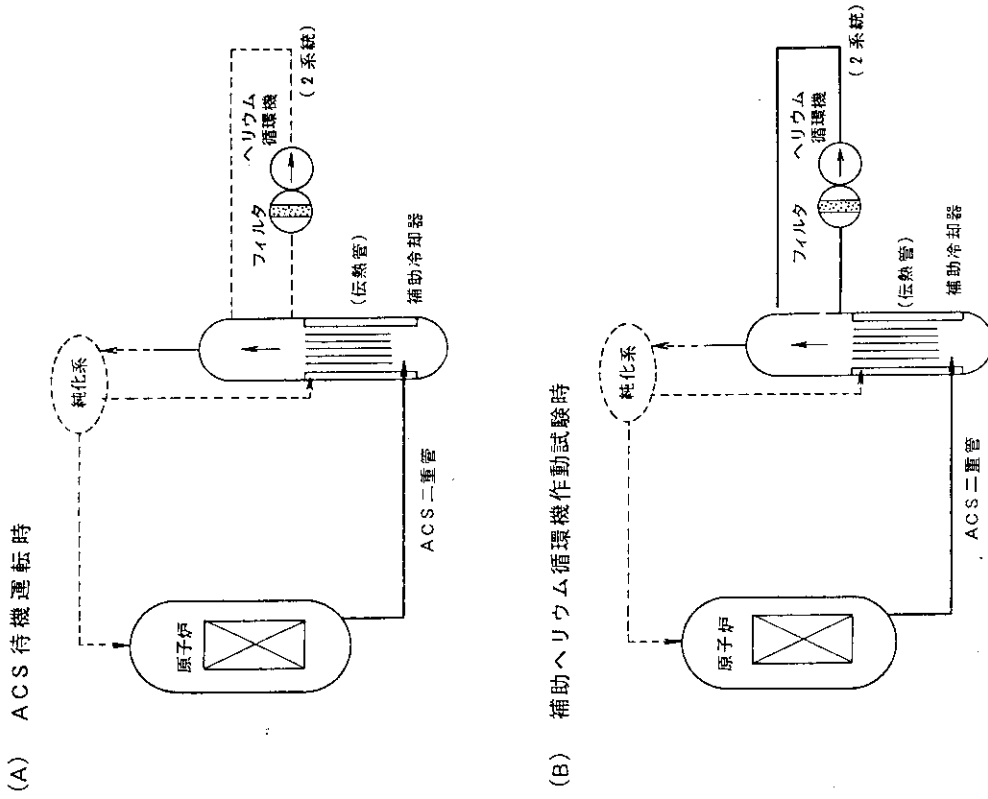


Fig. 2.7 Operating conditions of ACS.

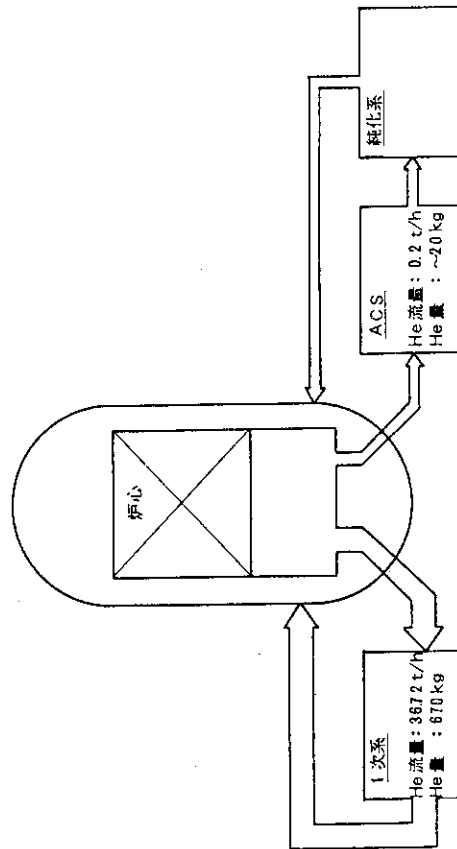


Fig. 2.6 Schematic diagram of MCS and ACS.

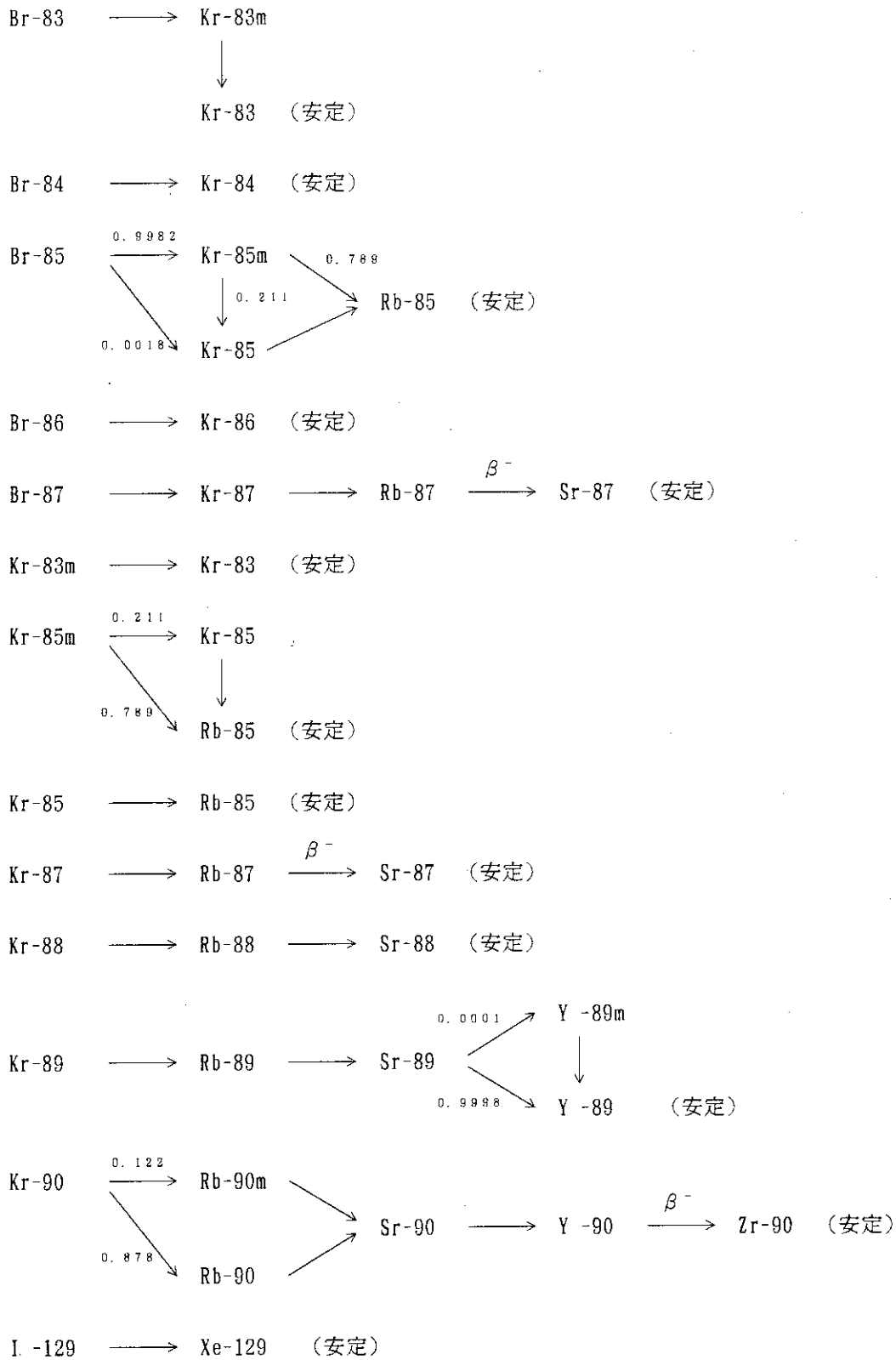


Fig. 2.8 Decay chain.

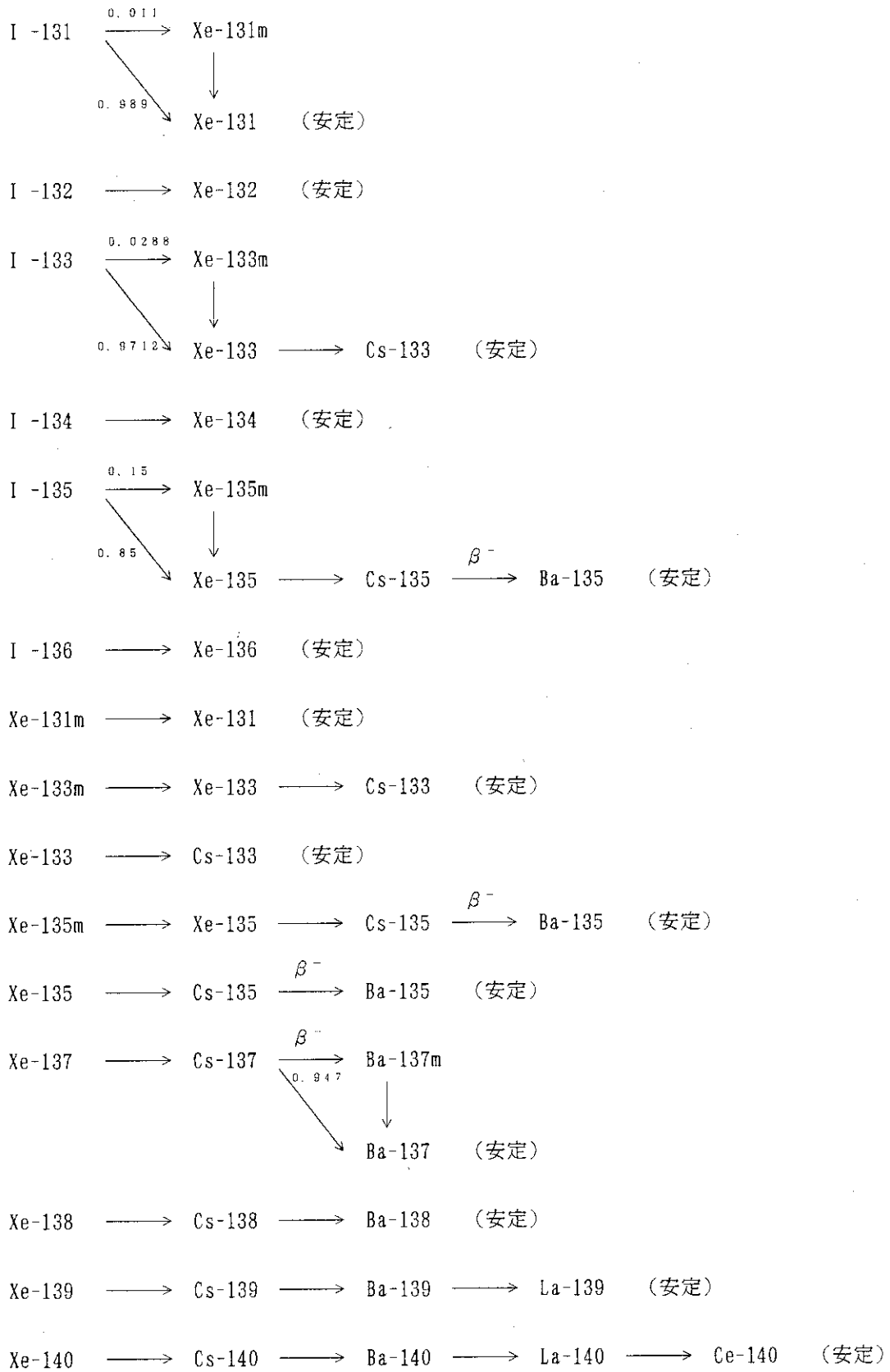


Fig. 2.8 Continued

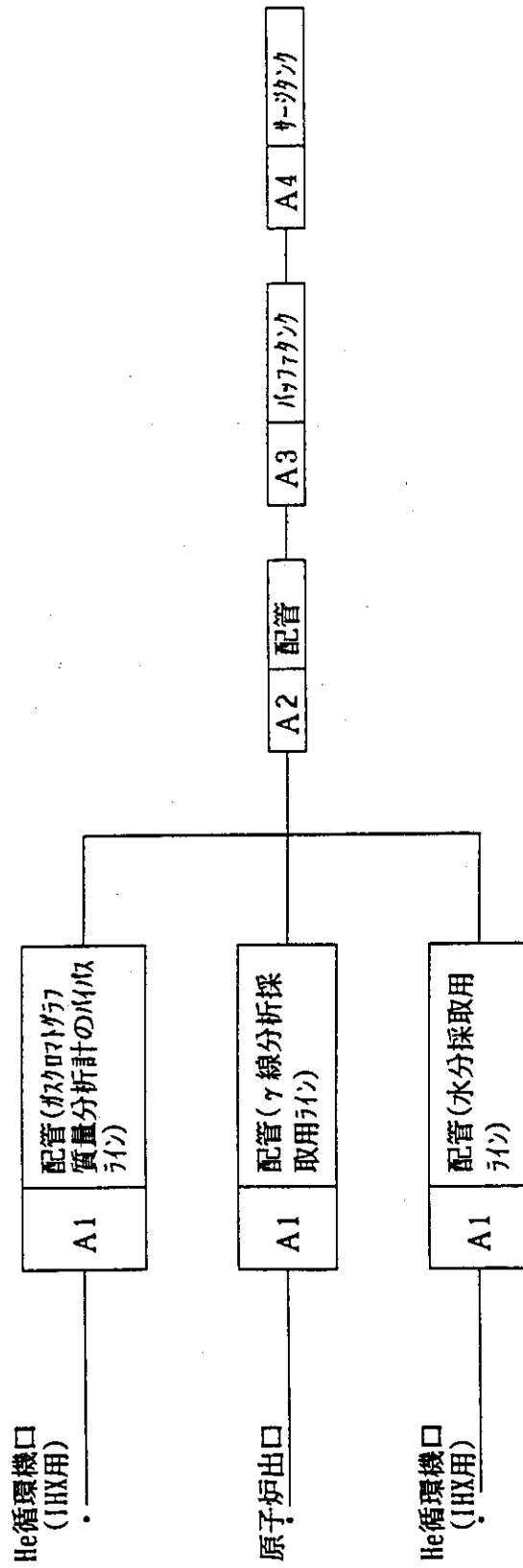


Fig. 2.9 Calculation model of sampling line.

3. 評価結果

3.1 燃料からの放出割合及び1次冷却材中濃度

本節では、2.1節で述べた方法にしたがって計算した1次冷却材ヘリウム中のFP量及び系統内に沈着するFP総量の評価結果を示す。計算に使用した破損率、燃料温度、FP放出率計算データベース、等の違いにより、遮蔽評価用線源は保守評価用線源よりも概略で約2桁大きくなる。

3.1.1 遮蔽評価用線源

遮蔽評価用線源の評価においては、1%の貫通破損粒子が炉心内に一様に存在するものと仮定した。遮蔽評価用線源の評価においては、燃料からの希ガス・よう素の放出率は、データを包絡する(4)式に基づき計算した(2.1節参照)。金属性FPの放出割合は、SiC層の拡散係数を保守的に設定した値に基づき計算した。燃料温度の計算には、工学的不確定因子を考慮した(ランダム温度)。また、HTTRでは、炉心内で燃料の破損限界を試験するための燃料限界照射試験を行う予定であり、1次冷却材中のFP量はこの時が最も多くなることが許容されている。この試験時においても遮蔽区分を満足するよう遮蔽設計を行う必要があるため、遮蔽評価用線源は、燃料限界照射試験時の1次冷却材中のFP量の制限値に対応させるものとした。

1次冷却材ヘリウム中のFP総量を核種毎にTable 3.1に示す。各評価領域における気相中FP量は、ヘリウム重量割合に対して比例配分した。また、1次冷却設備内に沈着するFP総量をTable 3.2に示す。

3.1.2 保守評価用線源

保守評価用線源の評価においては、0.04%の貫通破損粒子及び0.16%のSiC層破損粒子が炉心内に一様に存在するものと仮定した。希ガス・よう素の放出率は、データの50%信頼度である(5)式に基づき計算した(2.1節参照)。金属性FPの放出割合は、SiC層の拡散係数を現実的に定めた値に基づき計算した。燃料温度は、工学的不確定因子を考慮しないで計算した(ノミナル温度)。

1次冷却材ヘリウム中のFP総量を核種毎にTable 3.3に示す。各評価領域における気相中FP量は、ヘリウム重量割合に対して比例配分した。また、1次冷却設備内に沈着するFP総量をTable 3.4に示す。

3.2 沈着分布

沈着性核種の系統内沈着分布の計算は、2.2節で述べた方法に基づき行った。PLAINコードの入力条件の一つである気相中のFP濃度は、3.1節で求めた遮蔽評価用及び保守評価用1次冷却材ヘリウム中FP総量から求めた。

3.2.1 主冷却系

各モード毎の沈着分布の計算結果を、核種毎にTable 3.5 から 3.8に示す。Cs-137は、伝熱管温度が比較的低い1次加圧水冷却器及び沈着表面積の大きいフィルタに多く沈着する。I-131の沈着分布は、Cs-137と同傾向であるが、より温度の低い部位に沈着しやすい。Ag-110mは、Cs-137及びI-131よりも上流側の高温部に沈着し、その絶対値が少ないこともあり、フィルタ部の下流側には沈着しない。Sb-125の沈着分布は、Cs-137と同様である。半減期の長い核種（特にCs-137）では、遮蔽評価用沈着分布と保守評価用沈着分布が異なっており、遮蔽評価用沈着分布の方が相対的に下流側の沈着割合が大きくなっている。これは、沈着したFPが崩壊しないため、ヘリウム中のFP濃度が保守評価用線源よりも約2桁大きい遮蔽評価用線源を用いた場合、沈着密度の大きい部位の配管内面の沈着サイトが飽和し、下流側にFPが流れ易くなることによるものである。

一様分布も含め、各設備毎に最も大きな沈着割合を与えるケースに基づき遮蔽評価用沈着線源分布を定めた結果を核種毎にまとめたものをTable 3.9に示す。系統内沈着総量は、約2倍の保守性を有している。

各設備毎に最も大きな沈着割合を与えるケースに基づき定めた保守評価用沈着線源分布を核種毎にまとめたものをTable 3.10に示す。系統内沈着総量は10～40%程度の保守性を有している。

3.2.2 補助冷却系

補助冷却系の沈着分布の計算結果を、遮蔽評価用線源についてFig. 3.1に、保守評価用線源についてFig. 3.2に示す。補助冷却系の運転モードを考慮すると、使用期間中の補助冷却系に流入するFP量は1次冷却系に比べて少ないため、沈着分布は絶対値の違いのみで分布の形はほとんど同じとなっている。

3.2.3 小口径配管

サンプリング配管における沈着分布の計算結果を、遮蔽評価用線源についてTable 3.11に、保守評価用線源についてTable 3.12に示す。ここで、分岐点から4～5m以上下流側になると、FP自身の沈着量は十分小さくなり、これ以降ではガス状先行核の崩壊により沈着するFPの方が大きくなっている。

3.3 PF線源のまとめ

3.3.1 主冷却系

主冷却系の遮蔽評価用線源をまとめてTable 3.13に、保守評価用線源をTable 3.14に示す。表より、1次冷却系の遮蔽評価用線源及び保守評価用線源は、循環放射エネルギーよりも沈着放射エネルギーによって決まることが分かる。

3.3.2 補助冷却系

補助冷却系の遮蔽評価用線源をまとめてTable 3.15に、保守評価用線源をTable 3.16に示す。

補助冷却系の遮蔽評価用線源及び保守評価用線源は、純化系配管までの部分では、循環放射エネルギーよりも沈着放射エネルギーによって決まっている。但し、純化系配管下流の単管以降では、分岐後すぐにFPが沈着し下流側には行かないため、循環放射エネルギーが設計条件を定めている。

3.3.3 小口径配管

サンプリング配管の遮蔽評価用線源をまとめてTable 3.17に、保守評価用線源をTable 3.18に示す。各ラインの遮蔽評価用線源及び保守評価用線源は、配管上流側では沈着放射エネルギーが、下流側では循環放射エネルギーが設計条件を定めている。

Table 3.1 Circulating activities for shielding design.

核種名	放射能量 (Bq)	核種名	放射能量 (Bq)	核種名	放射能量 (Bq)	核種名	放射能量 (Bq)	核種名	放射能量 (Bq)
Ge-78	81E+07	Nb-95m	88E+05	Sn-132m	70E+11	Cs-139	13E+12		
Ge-79	3.74E+11	Nb-97m	9.14E+10	Sb-122m	1.22E+08	Cs-140	2.91E+10		
As-79	3.64E+08	Nb-98	4.62E+09	Sb-122m	1.17E+08	Ba-137m	4.32E+10		
As-83	3.36E+11	Nb-99	7.05E+09	Sb-126m	4.17E+07	Ba-140	1.42E+10		
Se-79	2.72E+03	Mo-100	2.20E+08	Sb-127m	4.65E+10	Ba-141	1.30E+10		
Se-81	2.22E+11	Mo-101	1.75E+10	Sb-128m	8.23E+11	Ba-142	1.90E+09		
Se-83	2.38E+11	Mo-102	1.80E+10	Sb-129	1.40E+11	La-140	1.32E+09		
Se-84	2.84E+11	Mo-104	1.57E+10	Sb-130m	1.40E+11	La-141	2.50E+09		
Se-83	1.12E+12	Tc-99m	1.04E+09	Sb-131m	2.78E+11	La-142	1.98E+10		
Br-83	1.22E+11	Tc-99	3.96E+00	Sb-132m	5.40E+11	La-143	1.48E+10		
Br-84	1.16E+12	Tc-102m	2.38E+10	Sb-133m	3.51E+11	La-144	8.88E+10		
Br-85	1.48E+12	Tc-104	2.64E+10	Sb-133m	1.79E+11	Ce-143	2.39E+10		
Br-86	1.48E+12	Tc-105	1.52E+06	Sb-133m	2.42E+11	Ce-144	9.67E+10		
Br-87	1.61E+12	Ru-103	6.49E+06	Sb-133m	3.02E+11	Ce-145	2.23E+10		
Kr-83	6.02E+13	Ru-106	2.36E+05	Te-1127m	1.87E+08	Ce-146	9.83E+10		
Kr-85	2.15E+13	Ru-107	2.95E+09	Te-1129m	8.19E+10	Ce-147	1.37E+10		
Kr-87	2.99E+13	Ru-108	7.40E+09	Te-1131m	6.06E+11	Ce-148	2.01E+10		
Kr-88	3.44E+13	Rh-103m	4.90E+09	Te-1132m	8.21E+11	Pr-144m	1.29E+10		
Kr-89	1.55E+13	Rh-105	1.06E+08	Te-1133m	1.14E+11	Pr-145	1.28E+10		
Kr-90	1.05E+13	Rh-106	1.16E+10	Te-1133m	5.57E+11	Pr-146	9.00E+09		
Kr-90	2.26E+12	Rh-107	1.13E+09	Te-1134	7.49E+11	Pr-147	1.42E+10		
Rb-88	9.98E+12	Rh-109	4.87E+09	Te-1134	5.12E+11	Pr-148	8.12E+10		
Rb-89	7.34E+11	Rh-111	9.46E+08	Te-1134	1.22E+12	Pr-149	1.71E+09		
Rb-90	8.88E+12	Pd-109m	3.75E+09	Te-1134	2.98E+11	Nd-149	1.25E+09		
Rb-91	4.92E+12	Pd-109	3.27E+09	Te-1134	1.36E+11	Nd-151	9.93E+09		
Rb-91	6.88E+12	Pd-111m	1.03E+08	Te-1134	1.51E+11	Nd-152	1.35E+05		
Rb-91	4.71E+10	Pd-111m	5.09E+08	Te-1134	2.46E+11	Pm-147m	1.77E+04		
Sr-89	6.37E+06	Ag-110m	5.45E+08	Te-1134	3.45E+11	Pm-148	3.76E+06		
Sr-90	2.36E+10	Ag-111m	9.39E+09	Te-1134	2.37E+11	Pm-149	2.61E+07		
Sr-91	2.47E+10	Ag-111m	1.52E+09	Te-1134	5.49E+11	Pm-150	3.06E+09		
Sr-92	3.03E+10	Ag-111m	7.63E+07	Te-1134	2.98E+11	Pm-151	1.77E+09		
Sr-93	4.46E+06	Ag-111m	1.33E+09	Te-1134	1.22E+12	Pm-152	1.30E+08		
Sr-94	4.64E+06	Ag-111m	3.33E+09	Te-1134	2.40E+11	Pm-153	7.90E+08		
Y-89m	1.04E+10	Ag-111m	7.79E+07	Te-1134	4.81E+11	Pm-154	1.04E+04		
Y-91	1.27E+10	Ag-111m	1.30E+11	Te-1134	1.22E+12	Pm-155	7.87E+09		
Y-91	1.08E+10	Ag-111m	3.00E+11	Te-1134	4.81E+11	Sm-153	1.92E+08		
Y-92	1.08E+10	Ag-111m	9.97E+11	Te-1134	5.52E+10	Sm-154	1.04E+09		
Y-93	3.14E+10	Ag-111m	3.33E+11	Te-1134	1.12E+12	Sm-155	7.70E+08		
Y-94	9.04E+02	Ag-111m	6.79E+11	Te-1134	4.81E+11	Su-152	1.33E+03		
Y-95	9.24E+02	Ag-111m	5.55E+11	Te-1134	1.12E+12	Su-153	1.34E+04		
Zr-95	9.24E+02	Ag-111m	1.12E+12	Te-1134	8.81E+11	Su-154	1.51E+05		
Zr-97	6.44E+08	Ag-111m	6.79E+11	Te-1134	1.12E+12	Su-155	1.34E+04		
Zr-97	4.14E+07	Ag-111m	5.55E+11	Te-1134	4.81E+11	Eu-154	6.25E+05		
Nb-93m	9.10E+02	Ag-111m	1.12E+12	Te-1134	1.12E+12	Eu-155	2.25E+05		

Table 3.2 Plate-out activities for shielding design.

核種名	放射能 (Bq)	核種名	放射能 (Bq)	核種名	放射能 (Bq)	核種名	放射能 (Bq)	核種名	放射能 (Bq)
Ge-78	36E+08	Nb-95	91E+09	Sb-132	05E+11	Cs-139	87E+10		
Ge-79	4.04E+12	Nb-97	1.91E+11	Sb-122	5.94E+10	Cs-140	5.58E+10		
As-79	6.96E+08	Nb-99	1.09E+11	Sb-125	3.51E+13	Ba-139	4.20E+12		
As-83	8.55E+09	Nb-99	1.72E+11	Sb-126	3.55E+13	Ba-140	4.94E+11		
Se-79	3.29E+08	Mo-100	3.69E+10	Sb-127	4.17E+10	Ba-141	1.72E+10		
Se-81	5.87E+08	Mo-102	3.03E+10	Sb-128	5.13E+11	Ba-142	5.69E+10		
Se-83	7.90E+11	Mo-104	5.29E+10	Sb-129	1.52E+12	La-140	1.15E+11		
Se-84	2.17E+12	Tc-99	4.74E+10	Sb-130	6.13E+11	La-141	1.16E+11		
Br-83	1.62E+12	Tc-99	1.06E+06	Sb-131	3.39E+12	La-143	5.82E+10		
Br-84	7.79E+12	Tc-101	4.58E+10	Sb-132	1.2E+12	Ce-143	5.24E+12		
Br-85	6.06E+12	Tc-102	1.47E+10	Sb-133	3.48E+11	Ce-144	5.91E+12		
Br-86	2.66E+12	Tc-103	6.28E+10	Sb-134	3.10E+12	Ce-145	5.49E+12		
Br-87	1.80E+12	Ru-105	4.34E+10	Te-125	8.10E+11	Ce-146	3.84E+10		
Kr-83	1.00E+00	Ru-106	2.47E+10	Te-127	3.36E+13	Ce-147	2.91E+10		
Kr-85	0.00E+00	Ru-107	1.74E+10	Te-129	1.00E+13	Ce-148	2.10E+10		
Kr-87	0.00E+00	Rh-108	1.68E+10	Te-131	3.38E+13	Ce-149	1.48E+12		
Kr-88	0.00E+00	Rh-109	8.59E+10	Te-133	1.354E+13	Pr-144	5.76E+10		
Kr-89	0.00E+00	Rh-110	1.32E+10	Te-134	3.90E+13	Pr-145	2.53E+12		
Kr-90	0.00E+00	Rh-111	5.61E+10	Te-135	1.324E+14	Pr-146	7.71E+10		
Rb-87	3.44E+13	Pd-109	2.52E+10	Te-136	8.28E+13	Pr-147	5.35E+10		
Rb-88	1.55E+12	Pd-110	1.07E+09	Te-137	1.328E+13	Pr-148	3.85E+10		
Rb-89	1.17E+12	Pd-111	5.83E+09	Te-138	4.85E+13	Pr-149	2.22E+10		
Rb-90	1.44E+12	Pd-112	1.07E+04	Te-139	1.485E+14	Nd-149	1.07E+10		
Rb-91	5.52E+10	Pd-113	4.86E+09	Te-140	5.178E+14	Nd-150	6.219E+10		
Rb-92	1.66E+13	Pd-114	2.47E+10	Te-141	1.96E+14	Nd-151	2.24E+09		
Rb-93	3.88E+12	Pd-115	2.22E+09	Te-142	5.96E+13	Pm-148	3.50E+09		
Rb-94	6.13E+10	Ag-110	2.05E+13	Te-143	1.06E+14	Pm-149	8.41E+10		
Y-89	5.17E+09	Ag-111	3.84E+11	Te-144	4.00E+12	Pm-150	6.65E+08		
Y-91	1.63E+12	Ag-112	3.32E+09	Te-145	0.00E+00	Pm-151	4.07E+09		
Y-92	3.68E+12	Ag-113	1.22E+11	Te-146	0.00E+00	Pm-152	3.07E+10		
Y-93	5.98E+12	Ag-114	6.56E+11	Te-147	0.00E+00	Pm-153	1.06E+10		
Y-94	1.24E+11	Ag-115	8.60E+08	Te-148	0.00E+00	Pm-154	1.27E+09		
Y-95	6.23E+10	Ag-116	1.86E+12	Te-149	0.00E+00	Pm-155	2.09E+09		
Zr-93	1.31E+10	Ag-117	3.86E+11	Te-150	0.00E+00	Sm-153	4.66E+10		
Zr-95	6.65E+10	Ag-118	3.36E+11	Te-151	7.81E+13	Sm-154	4.04E+08		
Zr-97	1.27E+10	Ag-119	1.33E+12	Te-152	7.27E+13	Sm-155	7.81E+08		
Zr-99	5.55E+10	Ag-120	3.36E+11	Te-153	4.44E+14	Eu-152	1.04E+08		
Nb-93	4.57E+10	Ag-121	2.33E+12	Te-154	2.44E+14	Eu-154	6.22E+10		
		Ag-122	7.66E+11	Te-155	2.62E+13	Eu-155	6.52E+10		

Table 3.3 Circulating activities for planning of maintenance works.

核種名	放射能量 (Bq)	核種名	放射能量 (Bq)	核種名	放射能量 (Bq)	核種名	放射能量 (Bq)	核種名	放射能量 (Bq)
Ge-78	1.81E+06	Nb-95m	8.8E+04	Sb-132	2.45E+09	Cs-139	1.38E+10		
Ge-79	1.74E+07	Nb-95	9.14E+05	Sb-132m	6.42E+04	Cs-140	1.49E+08		
As-77	2.36E+07	Nb-97m	4.91E+09	Sb-122	6.34E+06	Cs-137m	1.18E+08		
As-79	3.36E+08	Nb-98	9.62E+08	Sb-125	2.34E+05	Ba-140	1.14E+06		
As-83	3.36E+08	Nb-98m	7.05E+08	Sb-126m	4.72E+06	Ba-141	1.42E+09		
Se-79m	3.18E+09	Nb-100	2.20E+07	Sb-127	2.42E+08	Ba-142	1.29E+07		
Se-79	3.18E+09	Mo-99	1.75E+09	Sb-127m	1.42E+08	Ba-144	1.30E+07		
Se-81m	1.16E+09	Mo-101	1.87E+09	Sb-128m	4.29E+07	La-141	1.23E+08		
Se-83	1.42E+09	Mo-102	1.87E+09	Sb-128	5.33E+08	La-142	2.23E+08		
Se-84	1.51E+09	Mo-104	2.50E+09	Sb-129	2.45E+09	La-143	5.98E+09		
Se-84	1.80E+09	Tc-99m	1.04E+08	Sb-130m	1.54E+10	La-144	1.48E+09		
Br-84	1.60E+09	Tc-99	3.96E-01	Sb-131	1.83E+10	Ce-141	9.24E+05		
Br-84	7.05E+09	Tc-101	2.38E+09	Sb-131m	1.93E+10	Ce-143	2.85E+05		
Br-85	7.70E+09	Tc-102m	2.64E+06	Sb-132	1.26E+10	Ce-144	1.28E+05		
Br-86	7.40E+09	Tc-104	1.49E+09	Sb-132m	1.57E+10	Ce-145	1.26E+09		
Br-87	3.14E+11	Ru-105	6.52E+05	Sb-133	7.43E+06	Ce-146	9.81E+08		
Kr-83m	1.12E+11	Ru-106	2.36E+04	Te-125m	4.34E+07	Ce-147	1.83E+09		
Kr-85	1.21E+11	Ru-107	7.95E+08	Te-127m	4.34E+07	Ce-148	1.37E+09		
Kr-88	1.56E+11	Ru-108	4.90E+08	Te-129m	3.16E+09	Ce-148m	1.09E+07		
Kr-89	1.79E+10	Rh-103m	6.30E+07	Te-129	3.0E+09	Pr-144	1.29E+09		
Kr-90	5.49E+10	Rh-105m	1.16E+08	Te-131	1.16E+10	Pr-145	1.29E+08		
Kr-91	1.30E+10	Rh-106	1.13E+09	Te-132	2.87E+10	Pr-146	9.00E+09		
Rb-88	1.50E+10	Rh-107	5.13E+08	Te-133	1.95E+10	Pr-147	1.53E+09		
Rb-89	2.75E+10	Rh-109	4.46E+07	Te-133m	8.6E+10	Pr-148	2.42E+08		
Rb-90m	3.91E+10	Pd-111	7.5E+03	Te-134	3.71E+10	Pr-149	8.71E+06		
Rb-90	3.92E+10	Pd-109m	3.27E+07	Te-129	3.39E+09	Nd-149	1.25E+08		
Rb-91	2.0E+06	Pd-109	1.82E+07	I-131	1.55E+10	Nd-151	1.93E+08		
Sr-89	3.35E+08	Pd-111m	5.09E+07	I-132	7.88E+10	Pm-147m	1.17E+04		
Sr-91	2.47E+08	Pd-109m	5.51E+06	I-133	3.28E+10	Pm-148m	8.07E+05		
Sr-92	5.03E+09	Ag-110m	2.97E+08	I-133m	1.80E+10	Pm-149	3.81E+05		
Sr-93	6.22E+05	Ag-111m	3.93E+09	Xe-136	1.36E+10	Pm-150	2.61E+05		
Sr-94	6.66E+05	Ag-111	3.93E+09	Xe-133m	2.86E+11	Pm-151	3.06E+06		
Y-89m	4.47E+05	Ag-121	2.26E+05	Xe-135	5.72E+11	Pm-152	3.17E+08		
Y-90	4.43E+05	Sr-92	3.98E+06	Xe-137	7.29E+11	Pm-153	1.30E+07		
Y-91	2.02E+08	Sr-93	5.55E+05	Xe-138	2.36E+11	Pm-154	7.91E+06		
Y-92	1.08E+08	Sr-94	2.22E+09	Xe-139	1.250E+10	Sr-91	1.37E+07		
Y-93	1.14E+09	Sr-95	2.07E+09	Cs-134	2.44E+06	Sr-92	1.19E+07		
Zr-95	2.24E+02	Sr-95	1.88E+09	Cs-135	5.74E+01	Sr-93	1.33E+04		
Zr-97	8.87E+07	Sr-97	3.05E+09	Cs-136	8.46E+06	Sr-94	1.34E+01		
Zr-99	4.10E+07	Sr-99	4.48E+09	Cs-137	2.87E+06	Sr-95	1.65E+01		
Nb-93m	9.10E-03	Sr-93	1.07E-03	Cs-138	2.62E+11	Sr-96	6.79E+02		

Table 3.4 Plate-out activities for planning of maintenance works.

核種名	放射能量 (Bq)	核種名	放射能量 (Bq)	核種名	放射能量 (Bq)	核種名	放射能量 (Bq)	核種名	放射能量 (Bq)
Ge-78	2.36E+07	Nb-95m	1.91E+08	Sb-132m	2.63E+09	Cs-139	3.15E+10		
Ge-79	4.04E+07	Nb-95	1.91E+10	Sb-122m	1.01E+05	Cs-140	5.58E+09		
As-78	3.21E+07	Nb-97m	1.09E+10	Sb-122	3.45E+08	Ba-137m	1.94E+10		
As-79	8.55E+07	Nb-98	1.72E+10	Sb-125m	4.27E+11	Ba-140	1.83E+10		
As-83	3.29E+08	Nb-100	1.11E+09	Sb-126m	5.06E+07	Ba-141	1.20E+09		
Se-77	1.46E+07	Mo-99	3.03E+09	Sb-127	6.07E+10	Ba-142	5.69E+09		
Se-81	2.31E+09	Mo-101	5.29E+09	Sb-128m	1.73E+10	Ba-143	1.84E+10		
Se-83	1.14E+09	Mo-102	4.74E+09	Sb-129	2.08E+10	La-140	1.15E+10		
Se-84	1.64E+09	Mo-104	3.06E+09	Sb-130m	9.15E+10	La-141	1.16E+10		
Se-88	8.21E+09	Tc-99m	1.06E+10	Sb-131	3.15E+10	La-142	5.82E+09		
Br-83	4.02E+10	Tc-99	6.79E+05	Sb-132m	1.76E+10	La-143	5.24E+09		
Br-84	3.54E+10	Tc-101	1.06E+06	Sb-132	7.71E+10	Ce-141	1.17E+10		
Br-85	1.07E+10	Tc-104	4.58E+06	Sb-133	1.47E+10	Ce-143	1.08E+10		
Br-86	8.62E+09	Ru-103	6.28E+09	Sb-133m	2.08E+10	Ce-144	3.84E+09		
Br-87	9.36E+09	Ru-105	4.34E+09	Sb-125m	1.01E+11	Ce-145	2.91E+09		
Kr-83	0.00	Ru-106	2.74E+09	Te-127m	1.02E+11	Ce-146	2.48E+09		
Kr-85	0.00	Ru-107	1.25E+09	Te-129m	2.48E+11	Ce-147	1.75E+10		
Kr-88	0.00	Ru-108	7.25E+08	Te-131m	2.69E+11	Ce-148	1.71E+10		
Kr-89	0.00	Rh-103m	8.59E+09	Te-132m	2.59E+11	Pr-144m	7.44E+09		
Kr-90	0.00	Rh-105	1.32E+09	Te-133	1.80E+11	Pr-145	1.71E+10		
Kr-97	6.36E+02	Rh-106	6.61E+09	Te-133m	1.88E+12	Pr-146	5.83E+09		
Rb-88	1.54E+10	Rh-107	2.52E+09	Te-133	1.71E+11	Pr-147	4.35E+09		
Rb-89	8.23E+09	Rh-109	5.87E+08	Te-134	1.01E+11	Pr-148	3.22E+09		
Rb-90m	7.37E+09	Rh-117	1.07E+08	Te-134	2.53E+10	Pr-149	1.07E+09		
Rb-90	5.52E+10	Pd-109m	4.89E+08	Te-135	2.09E+12	Nd-149	6.19E+09		
Rd-91	9.02E+10	Pd-109	1.47E+09	Xe-131	3.11E+11	Nd-151	2.24E+08		
Sr-90	1.67E+10	Pd-111m	2.78E+06	Xe-132	1.11E+11	Nd-152	3.41E+08		
Sr-91	5.14E+10	Pd-111	2.25E+08	Xe-133	7.18E+11	Pm-148	6.65E+08		
Sr-92	1.82E+10	Ag-109m	2.05E+09	Xe-133m	2.10	Pm-149	4.30E+09		
Sr-93	6.13E+09	Ag-110m	1.43E+10	Xe-135	0.00	Pm-150	6.07E+06		
Sr-94	5.88E+06	Ag-111	3.26E+08	Xe-135m	0.00	Pm-152	1.12E+08		
Y-89	9.46E+10	Ag-111m	5.86E+10	Xe-137	0.00	Pm-153	7.06E+08		
Y-90	1.07E+10	Sn-123	1.02E+10	Xe-138	0.00	Pm-154	2.09E+08		
Y-91	2.17E+10	Sn-125	3.80E+10	Xe-138m	0.00	Sr-153	1.37E+08		
Y-92	1.12E+10	Sn-126	1.53E+07	Xe-139	0.00	Sr-155	1.29E+08		
Y-93	1.24E+10	Sn-127	9.73E+09	Cs-134	3.59E+11	Sr-155m	7.81E+07		
Y-94	1.23E+10	Sn-128	7.73E+09	Cs-135	3.49E+11	Sr-155	1.03E+06		
Y-95	6.31E+05	Sn-129	1.84E+10	Cs-136	3.20E+12	Eu-154	7.04E+05		
Zr-95	1.15E+09	Sn-130	4.75E+09	Cs-137	2.05E+11	Eu-155	2.53E+07		
Zr-97	5.22E+09	Sn-131	1.08E+10	Cs-138	1.43E+11				
Nb-93m	4.57E+04								

Table 3.5(1) Plate-out distribution of MCS (Cs-137, shielding design).

領域名	一様分布		定格運転		高温試験運転		沈着分布 計算値 最大値
	単独	並列	単独	並列	単独	並列	
RPV 内管	0.40	0.22	0.0019	0.0042	0.004	0.0027	0.40
2重管内側	1.4	0.92	0.0066	0.018	0.014	0.011	1.4
PWC	17	8.8	87	55	44	42	87
単管 (PWC)	1.5	0.93	0.18	0.55	0.76	0.60	1.5
Filter (PWC)	49	27	9.2	23	40	25	49
循環機 (PWC)	1.7	0.93	0.21	0.50	0.88	0.55	1.7
2重管外側	4.6	3.7	0.48	1.9	2.2	2.1	4.6
炉側部	23	13	2.5	6.7	11	7.2	23
上部遮へい体	1.8	0.96	0.13	0.36	0.59	0.39	1.8
IHX		34		3.8		13	34
単管 (IHX)		0.18		0.3		0.31	0.31
Filter (IHX)		8.6		8.0		8.5	8.6
循環機 (IHX)		0.31		0.14		0.14	0.31
合計	100	100	100	100	100	100	214

Table 3.5(2) Plate-out distribution of MCS
(Cs-137, planning of maintenance works).

領域名	一様分布		定格運転		沈着分布 計算値 最大値
	単独	並列	単独	並列	
RPV 内管	0.0019	0.0024	0.0013	0.0015	0.0024
2重管内側	0.0066	0.01	0.0045	0.0064	0.01
PWC	87	77	86	70	87
単管 (PWC)	0.18	0.25	0.19	0.26	0.26
Filter (PWC)	9.2	11	10	11	11
循環機 (PWC)	0.21	0.23	0.22	0.24	0.24
2重管外側	0.48	1.0	0.55	1.0	1.0
炉側部	2.5	3.4	2.8	3.5	3.5
上部遮へい体	0.13	0.18	0.15	0.18	0.18
IHX		2.3		9.1	9.1
単管 (IHX)		0.17		0.17	0.17
Filter (IHX)		4.6		4.7	4.7
循環機 (IHX)		0.079		0.076	0.079
合計	100	100	100	100	117

Table 3.6(1) Plate-out distribution of MCS (1-131, shielding design).

領域名	一様分布		定格運転		高温試験運転		沈着分布 計算値 最大値
	単独	並列	単独	並列	単独	並列	
RPV 内管	0.40	0.22	0.0056	0.007	0.005	0.0057	0.40
2重管内側	1.4	0.92	0.19	0.029	0.016	0.024	1.4
PWC	17	8.8	93	81	92	80	93
単管 (PWC)	1.5	0.93	0.12	0.17	0.62	0.19	1.5
Filter (PWC)	49	27	5.0	25.7	45.8	6.4	49
循環機 (PWC)	1.7	0.93	0.14	0.16	0.16	0.18	1.7
2重管外側	4.6	3.7	0.38	0.70	0.39	0.80	4.6
炉側部	23	13	1.6	2.2	11.9	2.5	23
上部遮へい体	1.8	0.96	0.097	0.13	0.11	0.15	1.8
IHX		34		6.8		6.9	34
単管 (IHx)		0.18		0.12		0.13	0.31
Filter (IHx)		8.6		2.6		3.0	8.6
循環機 (IHx)		0.31		0.058		0.065	0.31
合計	100	100	100	100	100	100	219

Table 3.6(2) Plate-out distribution of MCS
(1-131, planning of maintenance works).

領域名	一様分布		定格運転		沈着分布 計算値 最大値
	単独	並列	単独	並列	
RPV 内管	0.0056	0.007	0.005	0.0057	0.007
2重管内側	0.19	0.029	0.016	0.024	0.029
PWC	93	81	92	80	93
単管 (PWC)	0.12	0.17	0.13	0.19	0.19
Filter (PWC)	5.0	5.7	5.8	6.4	6.4
循環機 (PWC)	0.14	0.16	0.16	0.18	0.18
2重管外側	0.3	0.70	0.39	0.80	0.80
炉側部	1.6	2.2	1.9	2.5	2.5
上部遮へい体	0.097	0.13	0.11	0.15	0.15
IHX		6.8		6.9	6.9
単管 (IHx)		0.12		0.13	0.13
Filter (IHx)		2.6		3.0	3.0
循環機 (IHx)		0.058		0.065	0.065
合計	100	100	100	100	113

Table 3.7(1) Plate-out distribution of MCS (Ag-110m, shielding design).

領域名	一様分布		定格運転		高温試験運転		沈着分布 計算値 最大値
	単独	並列	単独	並列	単独	並列	
RPV 内管	0.40	0.22	8.7	6.5	8.9	6.7	8.9
2重管内側	1.4	0.92	22	21	23	21	23
PWC	17	8.8	59	30	58	30	59
単管 (PWC)	1.5	0.93	9.3	6.4	9.1	6.4	9.3
Filter (PWC)	49	27	1.3	0.64	1.3	0.64	49
循環機 (PWC)	1.7	0.93	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7
2重管外側	4.6	3.7	0.0	0.0	0.0	0.0	4.6
炉側部	23	13	0.0	0.0	0.0	0.0	23
上部遮へい体	1.8	0.96	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8
IHX		34		35		34	35
単管 (IHx)		0.18		0.10		0.09	0.34
Filter (IHx)		8.6		0.023		0.02	8.6
循環機 (IHx)		0.31		0.0		0.0	0.31
合計	100	100	100	100	100	100	225

Table 3.7(2) Plate-out distribution of MCS
(Ag-110m, planning of maintenance works).

領域名	一様分布		定格運転		沈着分布 計算値 最大値
	単独	並列	単独	並列	
RPV 内管	8.7	6.5	8.9	7.2	8.9
2重管内側	22	21	23	23	23
PWC	59	30	58	25	59
単管 (PWC)	9.3	6.4	9.1	6.9	9.3
Filter (PWC)	1.3	0.65	1.3	0.69	1.3
循環機 (PWC)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2重管外側	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
炉側部	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
上部遮へい体	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
IHX		35		37	37
単管 (IHx)		0.10		0.097	0.10
Filter (IHx)		0.023		0.022	0.023
循環機 (IHx)		0.0		0.0	0.0
合計	100	100	100	100	139

Table 3.8(1) Plate-out distribution of MCS (Sb-125, shielding design).

領域名	一様分布		定格運転		高温試験運転		沈着分布 計算値 最大値
	単独	並列	単独	並列	単独	並列	
RPV 内管	0.40	0.22	0.028	0.025	0.022	0.19	0.40
2重管内側	1.4	0.92	0.094	0.10	0.072	0.078	1.4
PWC	17	8.8	61	39	59	37	61
単管 (PWC)	1.5	0.93	0.66	0.68	0.72	0.72	1.5
Filter (PWC)	49	27	33	25	34	27	49
循環機 (PWC)	1.7	0.93	0.66	0.50	0.69	0.50	1.7
2重管外側	4.6	3.7	1.6	1.8	1.7	1.9	4.6
炉側部	23	13	2.7	2.1	2.8	2.2	23
上部遮へい体	1.8	0.96	0.44	0.35	0.47	0.36	1.8
IHX		34		22		20	34
単管 (IHx)		0.18		0.33		0.36	0.36
Filter (IHx)		8.6		8.4		9.4	9.4
循環機 (IHx)		0.31		0.052		0.05	0.31
合計	100	100	100	100	100	100	188

Table 3.8(2) Plate-out distribution of MCS
(Sb-125, planning of maintenance works).

領域名	一様分布		定格運転		沈着分布 計算値 最大値
	単独	並列	単独	並列	
RPV 内管	0.028	0.025	0.022	0.019	0.028
2重管内側	0.094	0.10	0.072	0.078	0.1
PWC	61	39	59	37	61
単管 (PWC)	0.66	0.68	0.72	0.72	0.72
Filter (PWC)	33	25	34	27	34
循環機 (PWC)	0.66	0.50	0.69	0.50	0.69
2重管外側	1.6	1.8	1.7	1.9	1.9
炉側部	2.7	2.1	2.8	2.2	2.8
上部遮へい体	0.44	0.35	0.47	0.36	0.47
IHX		22		20	22
単管 (IHx)		0.33		0.36	0.36
Filter (IHx)		8.4		9.4	9.4
循環機 (IHx)		0.053		0.05	0.53
合計	100	100	100	100	134

Table 3.9 Summary of plate-out distribution in MCS (shielding design).

領域名	Cs-137	I-131	Ag-110m	Sb-125	La-140
RPV内管	0.40	0.40	8.9	0.40	0.40
2重管内側	1.4	1.4	23	1.4	1.4
PWC	87	93	59	61	17
単管(PWC)	1.5	1.5	9.3	1.5	1.5
Filter(PWC)	49	49	49	49	49
循環機(PWC)	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7
2重管外側	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6
炉側部	23	23	23	23	23
上部遮へい体	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
IHX	34	34	35	34	34
単管(IHX)	0.31	0.18	0.34	0.36	0.18
Filter(IHX)	8.6	8.6	8.6	9.4	8.6
循環機(IHX)	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31
合計	214	219	225	188	143
備考					

Table 3.10 Summary of plate-out distribution in MCS (planning of maintenance works).

領域名	Cs-137	I-131	Ag-110m	Sb-125	La-140
RPV内管	0.0024	0.007	8.9	0.028	0.40
2重管内側	0.01	0.029	23	0.1	1.4
PWC	87	93	59	61	17
単管(PWC)	0.26	0.19	9.3	0.72	1.5
Filter(PWC)	11	6.4	1.3	34	49
循環機(PWC)	0.24	0.18	0.0	0.69	1.7
2重管外側	1.0	0.80	0.0	1.9	4.6
炉側部	3.5	2.5	0.0	2.8	23
上部遮へい体	0.18	0.15	0.0	0.47	1.8
IHX	9.1	6.9	37	22	34
単管(IHX)	0.17	0.13	0.10	0.36	0.18
Filter(IHX)	4.7	3.0	0.023	9.4	8.6
循環機(IHX)	0.079	0.065	0.0	0.53	0.31
合計	117	113	139	134	143
備考					

Table 3.11 Plate-out distribution of sampling line (shielding design).

領域名	Cs	Ag	I	Ba-140 La-140	その他	備考
配管 (0~1m)	8.50E+01	8.96E+01	9.37E+01	6.29E-01	7.72E+01	C/V 内の機器を サンプリングする 7本の配管の沈着 分布割合
配管 (1~2m)	7.43E+00	2.77E+00	4.52E+00	6.29E-01	3.32E+00	
配管 (2~3m)	6.49E-01	8.58E-02	2.18E-01	6.29E-01	1.42E-01	
配管 (3~4m)	5.68E-02	2.65E-03	1.05E-02	6.29E-01	6.12E-03	
配管 (4~5m)	4.96E-03	8.21E-05	5.08E-04	6.29E-01	2.63E-04	
配管 (5~6m)	4.34E-04	2.54E-06	2.45E-05	6.29E-01	1.13E-05	
配管 (6~7m)	3.79E-05	7.86E-08	1.18E-06	6.29E-01	4.85E-07	
配管 (7~8m)	3.69E-06	2.97E-09	6.67E-08	6.29E-01	2.46E-08	
配管 (8~9m)	3.22E-07	9.19E-11	3.22E-09	6.29E-01	1.06E-09	
配管 (9~10m)	2.82E-08	2.84E-12	1.55E-10	6.29E-01	4.55E-11	
配管 (10~30m)	2.70E-09	9.08E-14	7.87E-12	1.26E-01	2.04E-12	
配管	1.62E-30	4.74E-44	3.09E-38	4.33E-01	7.76E-40	
バッファタンク	4.23E-34	6.49E-49	1.53E-42	1.64E+00	2.75E-44	
サージタンク	3.24E-34	4.36E-49	1.09E-42	1.64E+00	1.93E-44	
配管 (0~1m)	6.30E+00	7.29E+00	1.46E+00	3.60E-01	1.85E+01	プレチャコールド ラップ下流機器を サンプリングする 4本の配管の沈着 分布割合
配管 (1~2m)	5.51E-01	2.26E-01	7.06E-02	3.60E-01	7.94E-01	
配管 (2~3m)	4.81E-02	6.98E-03	3.40E-03	3.60E-01	3.41E-02	
配管 (3~4m)	4.21E-03	2.16E-04	1.64E-04	3.60E-01	1.46E-03	
配管 (4~5m)	3.68E-04	6.68E-06	7.92E-06	3.60E-01	6.29E-05	
配管 (5~6m)	3.22E-05	2.07E-07	3.82E-07	3.60E-01	2.70E-06	
配管 (6~7m)	2.81E-06	6.40E-09	1.84E-08	3.60E-01	1.16E-07	
配管 (7~8m)	2.46E-07	1.98E-10	8.90E-10	3.60E-01	4.99E-09	
配管 (8~9m)	2.15E-08	6.13E-12	4.29E-11	3.60E-01	2.14E-10	
配管 (9~10m)	1.88E-09	1.90E-13	2.07E-12	3.60E-01	9.20E-12	
配管 (10~30m)	1.80E-10	6.05E-15	1.05E-13	7.20E+00	4.13E-13	
下流側配管	-----	-----	-----	6.71E+01	-----	
合計	100	100	100	100	100	

Table 3.12 Plate-out distribution of sampling line (planning of maintenance works).

領域名	Cs	Ag	I	Ba-140 La-140	その他	備考
配管 (0~1m)	8.50E+01	8.96E+01	9.37E+01	6.29E-01	8.87E+01	C/V 内の機器を サンプリングする 7本の配管の沈着 分布割合
配管 (1~2m)	7.43E+00	2.77E+00	4.52E+00	6.29E-01	3.81E+00	
配管 (2~3m)	6.49E-01	8.58E-02	2.18E-01	6.29E-01	1.64E-01	
配管 (3~4m)	5.68E-02	2.65E-03	1.05E-02	6.29E-01	7.03E-03	
配管 (4~5m)	4.96E-03	8.21E-05	5.08E-04	6.29E-01	3.02E-04	
配管 (5~6m)	4.34E-04	2.54E-06	2.45E-05	6.29E-01	1.30E-05	
配管 (6~7m)	3.79E-05	7.86E-08	1.18E-06	6.29E-01	5.57E-07	
配管 (7~8m)	3.69E-06	2.97E-09	6.67E-08	6.29E-01	2.83E-08	
配管 (8~9m)	3.22E-07	9.19E-11	3.22E-09	6.29E-01	1.22E-09	
配管 (9~10m)	2.82E-08	2.84E-12	1.55E-10	6.29E-01	5.22E-11	
配管 (10~30m)	2.70E-09	9.08E-14	7.87E-12	1.26E-01	2.34E-12	
配管	1.62E-30	4.74E-44	3.09E-38	4.33E-01	8.91E-40	
バッファタンク	4.23E-34	6.49E-49	1.53E-42	1.64E+00	3.16E-44	
サージタンク	3.24E-34	4.36E-49	1.09E-42	1.64E+00	2.21E-44	
配管 (0~1m)	6.30E+00	7.29E+00	1.46E+00	3.60E-01	7.00E+01	プレチャコールド ラップ下流機器を サンプリングする 4本の配管の沈着 分布割合
配管 (1~2m)	5.51E-01	2.26E-01	7.06E-02	3.60E-01	3.01E-01	
配管 (2~3m)	4.81E-02	6.98E-03	3.40E-03	3.60E-01	1.29E-02	
配管 (3~4m)	4.21E-03	2.16E-04	1.64E-04	3.60E-01	5.54E-03	
配管 (4~5m)	3.68E-04	6.68E-06	7.92E-06	3.60E-01	2.38E-05	
配管 (5~6m)	3.22E-05	2.07E-07	3.82E-07	3.60E-01	1.02E-06	
配管 (6~7m)	2.81E-06	6.40E-09	1.84E-08	3.60E-01	4.39E-07	
配管 (7~8m)	2.46E-07	1.98E-10	8.90E-10	3.60E-01	1.89E-09	
配管 (8~9m)	2.15E-08	6.13E-12	4.29E-11	3.60E-01	8.10E-10	
配管 (9~10m)	1.88E-09	1.90E-13	2.07E-12	3.60E-01	3.48E-12	
配管 (10~30m)	1.80E-10	6.05E-15	1.05E-13	7.20E+00	1.56E-13	
下流側配管	-----	-----	-----	6.71E+01	-----	
合計	100	100	100	100	100	

Table 3.13 Source for shielding design in MCS.

領域名	放射能量 (Bq)			光子発生数 (Photon/s)		
	循環	沈着	計	循環	沈着	計
2重管内管	6.85E+12	2.97E+14	3.04E+14	6.36E+12	7.37E+13	8.01E+13
2重管外管	4.96E+12	1.61E+14	1.66E+14	4.89E+12	1.21E+14	1.26E+14
PWC伝熱管	3.08E+13	2.58E+15	2.60E+15	3.03E+13	2.09E+15	2.12E+15
PWC外胴	4.00E+12	1.42E+14	1.46E+14	3.91E+12	5.28E+13	5.67E+13
PWCフィルタ	8.95E+12	1.72E+15	1.79E+15	8.80E+12	1.29E+15	1.34E+15
PWC循環機		5.96E+13			4.48E+13	
IHX伝熱管	3.28E+13	1.20E+15	1.24E+15	3.23E+13	8.98E+14	9.30E+14
IHX外胴	4.96E+11	1.08E+13	1.12E+13	4.89E+11	7.44E+12	7.93E+12
IHXフィルタ	4.00E+12	3.07E+14	3.22E+14	3.91E+12	2.33E+14	2.45E+14
IHX循環機		1.09E+13			8.17E+12	
RPV内管	3.67E+14	1.12E+14	1.35E+15	3.60E+14	2.51E+13	1.04E+15
原子炉側部		8.07E+14			6.06E+14	
上部遮蔽体		6.33E+13			4.74E+13	

Table 3.14 Source for planning of maintenance works in MCS.

領域名	放射能量 (Bq)			光子発生数 (Photon/s)		
	循環	沈着	計	循環	沈着	計
2重管内管	3.59E+10	1.25E+12	1.29E+12	3.54E+10	2.21E+11	2.56E+11
2重管外管	2.76E+10	1.96E+11	2.23E+11	2.73E+10	1.98E+11	2.25E+11
PWC伝熱管	1.71E+11	1.56E+13	1.58E+13	1.69E+11	1.30E+13	1.32E+13
PWC外胴	2.21E+10	6.22E+11	6.44E+11	2.18E+10	1.48E+11	1.70E+11
PWCフィル	4.96E+10	2.87E+12	2.98E+12	4.91E+10	2.81E+12	2.92E+12
PWC循環機		6.18E+10			6.31E+10	
IHX伝熱管	1.82E+11	4.26E+12	4.44E+12	1.80E+11	2.38E+12	2.56E+12
IHX外胴	2.76E+09	4.11E+10	4.37E+10	2.73E+09	3.61E+10	3.88E+10
IHXフィル	2.21E+10	9.10E+11	9.69E+11	2.18E+10	9.06E+11	9.67E+11
IHX循環機		3.77E+10			3.89E+10	
RPV内管	2.03E+12	1.48E+12	3.52E+12	2.01E+12	9.75E+11	2.99E+12
原子炉側部						
上部遮蔽体						

Table 3.15 Source for shielding design in ACS.

領域名	放射能量 (Bq)			光子発生数 (Photon/s)		
	循環	沈着	計	循環	沈着	計
二重管内管	2.04E+11	3.26E+13	3.28E+13	2.00E+11	8.89E+12	9.09E+12
AHX伝熱管	5.63E+12	1.54E+14	1.65E+14	5.53E+12	1.28E+14	1.34E+14
AHX上部パイプ	3.26E+12	5.08E+12	8.34E+12	3.21E+12	4.91E+12	8.12E+12
純化系配管	1.55E+11	4.15E+12	4.31E+12	1.52E+11	4.11E+12	4.26E+12
単管	7.26E+10	1.58E+09	7.42E+10	7.13E+10	1.18E+09	7.25E+10
循環機パイプ	2.61E+09	3.53E+08	2.96E+09	2.56E+09	3.23E+08	2.88E+09
循環機	3.67E+11	7.97E+09	3.75E+11	3.61E+11	5.99E+09	3.67E+11
単管	7.91E+11	1.72E+10	8.08E+11	7.77E+11	1.29E+10	7.90E+11

Table 3.16 Source for planning of maintenance works in ACS.

領域名	放射能量 (Bq)			光子発生数 (Photon/s)		
	循環	沈着	計	循環	沈着	計
二重管内管	1.03E+09	1.66E+11	1.67E+11	1.02E+09	5.10E+10	5.20E+10
AHX伝熱管	2.84E+10	8.75E+11	9.03E+11	2.81E+10	7.25E+11	7.53E+11
AHX上部フィルム	1.65E+10	3.16E+10	4.81E+10	1.63E+10	3.21E+10	4.84E+10
純化系配管	7.82E+08	2.85E+10	2.93E+10	7.73E+08	2.64E+10	2.72E+10
単管	3.66E+08	7.35E+06	3.73E+08	3.62E+08	5.61E+06	3.68E+08
循環機フィルタ	1.32E+07	1.86E+06	1.51E+07	1.30E+07	1.72E+06	1.47E+07
循環機	1.85E+09	3.72E+07	1.89E+09	1.83E+09	2.84E+07	1.86E+09
単管	3.99E+09	8.02E+07	4.07E+09	3.95E+09	6.11E+07	4.01E+09

Table 3.17 Source for shielding design in sampling line.

領域名		放射エネルギー (Bq)			光子発生数 (Photon/s)		
		循環	沈着	計	循環	沈着	計
格納 容器 内機 器か らの サン プリ ング 配管	0~1m	7.33E+07	3.16E+11	3.16E+11	7.21E+07	2.28E+11	2.28E+11
	1~2m	7.33E+07	1.51E+10	1.51E+10	7.21E+07	1.16E+10	1.17E+10
	2~3m	7.33E+07	8.40E+08	9.14E+08	7.21E+07	6.55E+08	7.27E+08
	3~4m	7.33E+07	6.70E+07	1.40E+08	7.21E+07	4.96E+07	1.22E+08
	4~5m	7.33E+07	2.05E+07	9.36E+07	7.21E+07	1.73E+07	8.93E+07
純化 系下 流の 機器 から の配 管	0~1m	7.33E+07	6.36E+10	6.36E+10	7.21E+07	4.70E+10	4.71E+10
	1~2m	7.33E+07	2.88E+09	2.96E+09	7.21E+07	2.22E+09	2.29E+09
	2~3m	7.33E+07	1.51E+08	2.25E+08	7.21E+07	1.17E+08	1.89E+08
	3~4m	7.33E+07	2.43E+07	9.77E+07	7.21E+07	2.02E+07	9.22E+07
下流側(563m)		4.29E+10	9.88E+09	5.29E+10	4.06E+10	8.55E+09	4.92E+10
下流側(96m)		1.64E+11	3.92E+10	2.04E+11	1.62E+11	3.41E+10	1.96E+11
ハッファタンク		4.81E+10	1.15E+10	5.96E+10	4.72E+10	9.95E+09	5.72E+10
サージタンク		4.88E+10	1.17E+10	6.07E+10	4.81E+10	1.01E+10	5.82E+10
ゲロ-フボックス		3.70E+05	0.0	3.70E+05	3.64E+05	0.0	3.64E+05

Table 3.18 Source for planning of maintenance works in sampling line.

領域名		放射エネルギー (Bq)			光子発生数 (Photon/s)		
		循環	沈着	計	循環	沈着	計
格納 容器 内機 器か らの サン プリ ング 配管	0~1m	3.70E+05	1.82E+09	1.82E+09	3.66E+05	1.38E+09	1.38E+09
	1~2m	3.70E+05	8.47E+07	8.51E+07	3.66E+05	6.82E+07	6.86E+07
	2~3m	3.70E+05	4.51E+06	4.88E+06	3.66E+05	3.67E+06	4.04E+06
	3~4m	3.70E+05	3.52E+05	7.22E+05	3.66E+05	2.85E+05	6.51E+05
	4~5m	3.70E+05	1.21E+05	4.92E+05	3.66E+05	1.34E+05	5.00E+05
純化 系下 流の 機器 から の配 管	0~1m	3.70E+05	2.06E+08	2.06E+08	3.66E+05	1.29E+08	1.29E+08
	1~2m	3.70E+05	9.40E+06	9.77E+06	3.66E+05	6.40E+06	6.77E+06
	2~3m	3.70E+05	5.62E+05	9.32E+05	3.66E+05	4.08E+05	7.74E+05
	3~4m	3.70E+05	1.31E+05	5.03E+05	3.66E+05	1.19E+05	4.85E+05
下流側(563m)		2.09E+08	5.22E+07	2.61E+08	2.06E+08	4.49E+07	2.51E+08
下流側(96m)		8.33E+08	2.07E+08	1.04E+09	8.22E+08	1.79E+08	1.00E+09
ハットタンク		2.43E+08	6.07E+07	3.03E+08	2.40E+08	5.23E+07	2.92E+08
サージタンク		2.47E+08	6.14E+07	3.08E+08	2.44E+08	5.32E+07	2.97E+08
グローブボックス		3.70E+05	0.0	3.70E+05	3.66E+05	0.0	3.66E+05

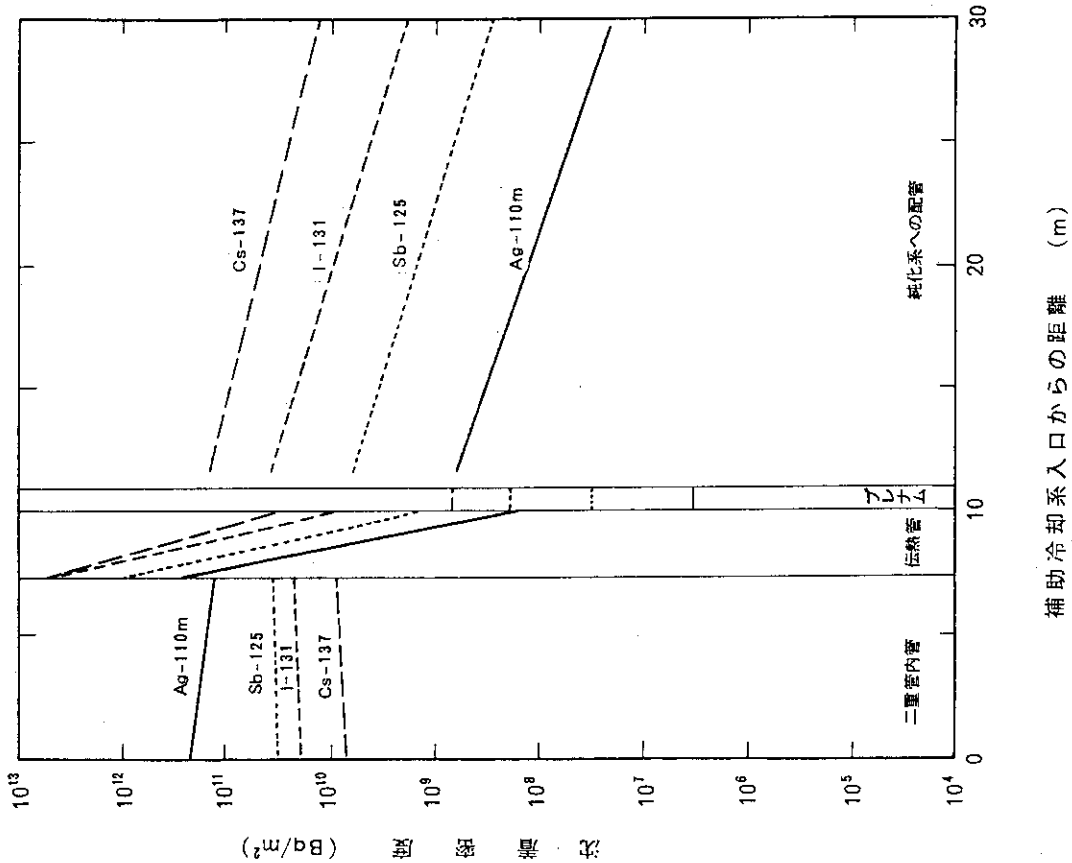


Fig. 3.1 Plate-out distribution in ACS (shielding design).

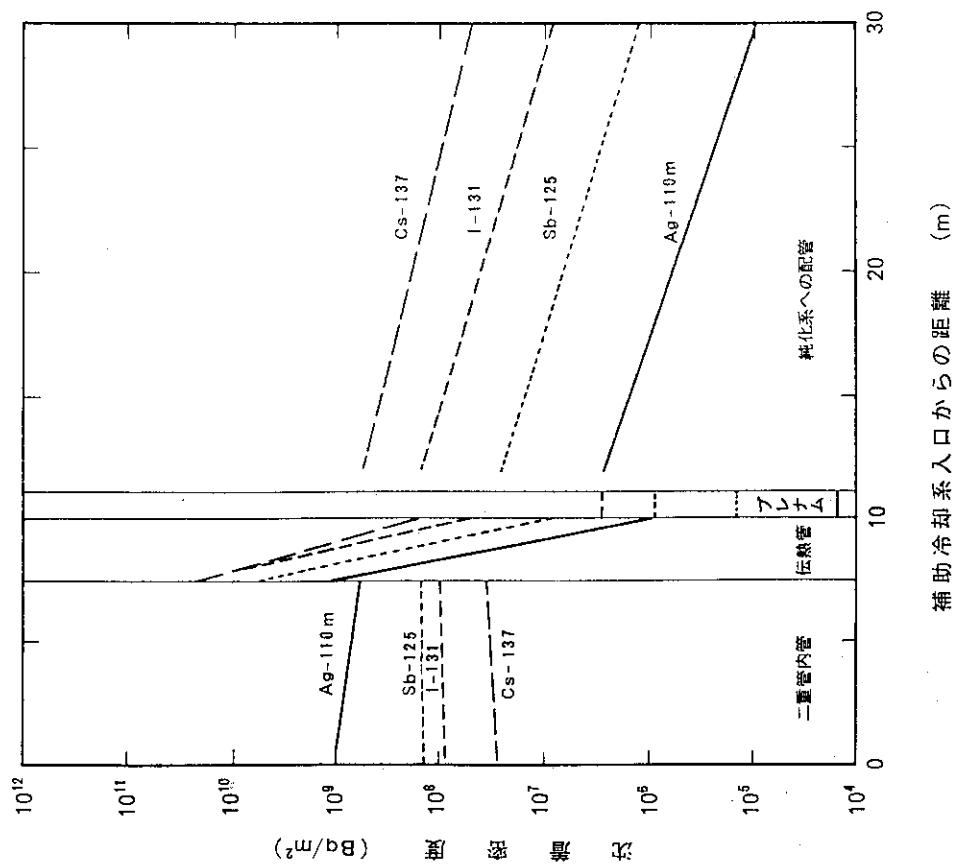


Fig. 3.2 Plate-out distribution in ACS (planning of maintenance works).

4. まとめ

HTTRの遮蔽設計におけるFP線源評価の考え方、方法及び結果を述べた。

HTTRでは、高温ガス炉の特徴である、燃料から1次系にFPが漏洩すること、冷却材ヘリウムがほとんど放射化されないこと、腐食生成物がほとんど発生しないことから、燃料体から放出され1次冷却材とともに系統内を移行するFPからのガンマ線が、多くの場所に対する線源となる。HTTRの1次冷却系内のある場所（機器）におけるFP線源を評価するために、以下の計算を行った。

- (1) 燃料体からのFP放出量計算
- (2) 循環FP量
- (3) FP沈着分布計算

FP線源として、その使用目的に応じ、遮蔽評価線源と保守評価用線源の2種類を評価した。遮蔽評価用線源は運転時の遮蔽評価に用いるため十分な保守性を有するように、一方、保守評価用線源は保守計画立案のためにより現実的な考え方で評価を行った。

保守評価用線源の評価結果の放出割合は、OGL-1におけるこれまでの燃料の照射試験結果⁽¹⁴⁾及び西独の高温ガス炉である熱出力4.6MWのAVR原子炉における実績値⁽¹⁵⁾等からみてほぼ妥当な値となっている。遮蔽評価用線源は保守評価用線源に対して約2桁の保守性を有している。

HTTRの遮蔽設計は、これらのFP線源を用いて行っており、設計の合理化を図っている。

謝 辞

本検討に当たっては、馬場治HTTRプラント開発室長をはじめとするHTTR開発部の皆様から多くの助言をいただいた。深く感謝いたします。また、本報告書の作成に当たって御指導頂いた、斎藤伸三高温工学試験研究炉開発部次長、田中利幸HTTR原子炉開発室長、栗原良一氏に深く感謝いたします。さらに、計算を行うに当たっては、三菱原子力工業(株)及び富士電機(株)の御協力を頂いた。深く感謝いたします。

4. まとめ

HTTRの遮蔽設計におけるFP線源評価の考え方、方法及び結果を述べた。

HTTRでは、高温ガス炉の特徴である、燃料から1次系にFPが漏洩すること、冷却材ヘリウムがほとんど放射化されないこと、腐食生成物がほとんど発生しないことから、燃料体から放出され1次冷却材とともに系統内を移行するFPからのガンマ線が、多くの場所に対する線源となる。HTTRの1次冷却系内のある場所（機器）におけるFP線源を評価するために、以下の計算を行った。

- (1) 燃料体からのFP放出量計算
- (2) 循環FP量
- (3) FP沈着分布計算

FP線源として、その使用目的に応じ、遮蔽評価線源と保守評価用線源の2種類を評価した。遮蔽評価用線源は運転時の遮蔽評価に用いるため十分な保守性を有するように、一方、保守評価用線源は保守計画立案のためにより現実的な考え方で評価を行った。

保守評価用線源の評価結果の放出割合は、OGL-1におけるこれまでの燃料の照射試験結果⁽¹⁴⁾及び西独の高温ガス炉である熱出力4.6MWのAVR原子炉における実績値⁽¹⁵⁾等からみてほぼ妥当な値となっている。遮蔽評価用線源は保守評価用線源に対して約2桁の保守性を有している。

HTTRの遮蔽設計は、これらのFP線源を用いて行っており、設計の合理化を図っている。

謝 辞

本検討に当たっては、馬場治HTTRプラント開発室長をはじめとするHTTR開発部の皆様から多くの助言をいただいた。深く感謝いたします。また、本報告書の作成に当たって御指導頂いた、斎藤伸三高温工学試験研究炉開発部次長、田中利幸HTTR原子炉開発室長、栗原良一氏に深く感謝いたします。さらに、計算を行うに当たっては、三菱原子力工業(株)及び富士電機(株)の御協力を頂いた。深く感謝いたします。

参考文献

- (1) 佐野川 好母、斎藤 伸三、「高温ガス炉開発の現状」、日本原子力学会誌 Vol. 29, No. 7 (1987)。
- (2) 沢 和弘、塩沢 周策、他、「高温工学試験研究炉における被覆燃料粒子の破損及びF P放出率の評価方法」、JAERI-M 88-258 (1988)。
- (3) 沢 和弘、塩沢 周策、他、「HTTR燃料体からのセシウム放出割合の評価法」、JAERI-M 90-063 (1990)。
- (4) 沢 和弘、馬場 治、「高温ガス炉におけるF P沈着解析コードPLAINの検証」、JAERI-M 91-084 (1991)。
- (5) 科学技術庁原子力安全調査室監修、「原子力安全委員会安全審査指針集」、大成出版社 (1989)。
- (6) 林 君夫、沢 和弘、塩沢 周策、他、「高温工学試験研究炉用燃料の健全性の評価と許容設計限界」、JAERI-M 89-162 (1989)。
- (7) 丸山 創、他、「高温工学試験研究炉炉心燃料最高温度計算用工学的安全係数の評価」、JAERI-M 88-250 (1988)。
- (8) Executive Committee of The 1st JAERI Symposium on HTGR Technologies, "PROCEEDINGS OF THE 1ST JAERI SYMPOSIUM ON HTGR TECHNOLOGIES", JAERI-M 90-103 (1990)。
- (9) P. D. Smith, "TRAFIC, A Computer Program for calculating the Release of Metallic Fission Products from an HTGR Core", GA-A 14721 (1978)。
- (10) 小林 紀明、他、「高温ガス炉燃料コンパクトの電気解砕 - 硝酸浸出法による露出ウラン率検査法-」、JAERI-M 87-023 (1987)。
- (11) K. SAWA, et. al., "Analytical Method of Fractional Release of Fission Products from Fuel Elements of HTTR", IAEA Specialists' Meeting, Oak Ridge, Nov. (1990)。
- (12) 露崎 典平、他、「OGL-1における¹³⁷Csの沈着分布」、JAERI-M 88-225 (1988)。
- (13) 馬場 治、沢 和弘、他、「高温ガス炉におけるF P沈着解析コード - PLAIN-」、JAERI-M 88-266 (1989)。
- (14) 福田 幸朗、他、「高温ガス炉用燃料に関する試験研究」、JAERI-M 89-007 (1989)。
- (15) D. T. GOODIN, et. al., "Safety Characteristics of Modular High Temperature Gas-cooled Reactor Fuel Elements", Conf-880506 (1988)。

付録1 PLAINコード入力データ作成のための機器のモデル化

沈着分布の計算はPLAINコードを用いて行った。1次冷却設備の機器等の形状は一般に複雑であり、計算コードの入力条件を作成する必要がある。PLAINコードの入力条件作成に当たって行った機器のモデル化を、沈着分布に影響を及ぼす主要な機器を例にその方法を示す。

PLAINコードの形状に関する入力条件としては、①流路面積、②等価直径、③長さ、等である。例とした機器は、以下のとおりである。

1. 1次加圧水冷却器
 - (1) 伝熱部
 - (2) 出口プレナム
 - (3) フィルタ
 - (4) ガス循環機
2. 中間熱交換器伝熱部
3. 補助冷却器伝熱部

1. 1次加圧水冷却器
 - (1) 伝熱部

伝熱部の沈着面としては伝熱管、ライナー、バッフル板がある。このうちFPが沈着する主要な沈着面は下記の結果より伝熱管である事が分かる。

従って、伝熱部のモデル化は伝熱管に着目して実施する。

領域 条件		伝熱管	ライナー	バッフル板
		表面積 (m ²)	84.4	15.3
管壁*1 温度 (°C)	入口	160	850*2	850*2
	出口	165	384*2	384*2
Cs ¹³⁷ 沈着放射能 濃度 (μCi/cm ²) *3		2 × 10 ³	40	40
Cs ¹³⁷ 沈着放射能 インベントリー(Ci)		1.8 × 10 ³	6.1	8.4

*1 850°C運転時の温度

*2 冷却材温度に等しいとした。

*3 PLAIN予備計算結果 (Fig. A-1 参照)

値は入口と出口の平均値を用いた。

① 流路面積

流路面積

各バッフル段におけるシェル中心部側近の管列部流路面積の平均値とした。ここで管列部流路面積はF式で求める。

$$A_c = (D_s - z_k d_o) \Delta L$$

A_c (m²) : 流路断面積

D_s (m) : シェルの内径

d_o (m) : 管外径

z_k (-) : シェル中心線上の管本数

ΔL (m) : バッフル板間隔

・ バッフル1段目

$$1.06 \text{ m}^2$$

・ バッフル2段目

$$0.62 \text{ m}^2$$

・ バッフル3, 4段目

$$3 \text{ 段目} \cdots \cdots 0.39 \text{ m}^2$$

$$4 \text{ 段目} \cdots \cdots 0.37 \text{ m}^2$$

・ バッフル5段目

$$0.22 \text{ m}^2$$

$$\text{平均値} = 0.53 \text{ m}^2$$

② 等価直径

主要沈着部である伝熱管に着目してモデル化する。

$$(\text{ぬれ縁と長さ}) = 2.54 \times 10^{-2} \cdot \pi \times 193 \text{本} \times 2 = 30.8 \text{ m}$$

$$(\text{等価直径}) = 4 \times (\text{流路面積}) / (\text{ぬれ縁ち長さ}) = \underline{6.88 \times 10^{-2} \text{ (m)}}$$

③ 長さ

伝熱部の表面積と同一となる長さとした。

・ 伝熱部外表面積

$$\pi \times 0.0254 \times (1.09 + 0.64 + 0.40 + 0.38 + 0.23) \times 193 \times 2 = 84.4 \text{ m}^2$$

・ バッフル板・防熱板・流体振動防熱板

$$\frac{\pi}{4} \times 1.46^2 \times 0.7 \times (12 + 6) = 21.1 \text{ m}^2$$

・ ライナー

$$\pi \times 1.46 \times 3.34 = 15.3 \text{ m}^2$$

$$(\text{長さ}) = (\text{表面積}) / (\text{ぬれ縁ち長さ}) = 120.8 / 30.8 = \underline{3.92 \text{ m}}$$

(2) 出口プレナム

① 流路面積

外胴内径部の流路面積とした。 $\frac{\pi}{4} \times 2.03^2 = \underline{3.24\text{m}^2}$

② 等価直径

外胴内径とした。 $\underline{2.03\text{m}}$

③ 長さ

出口プレナム部外胴長さとした。 $\underline{1.91\text{m}}$

出口プレナム部内表面積

$$\pi \times 2.03 \times 1.3 + \frac{\pi}{4} \times 2.03^2 \times 1.2 = 12.17\text{m}^2$$

よって、長さLは

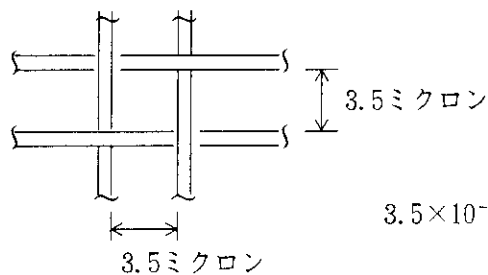
$$L = 12.17 / (\pi \times 2.03) = \underline{1.91\text{m}}$$

(3) フィルタ

(a) フィルタ部

① 流路面積

メッシュの寸法を下図の様に仮定し、1メッシュ当りの流路面積とした。



$$3.5 \times 10^{-6}\text{m} \times 3.5 \times 10^{-6}\text{m} = \underline{1.225 \times 10^{-11}\text{m}^2}$$

② 等価直径

$$\frac{4F}{U} = \frac{4 \times 1.225 \times 10^{-11}}{3.5 \times 10^{-6} \times 4} = \underline{3.5 \times 10^{-6}\text{m}}$$

③ 長さ

フィルタの板厚とした。 $\underline{1.66 \times 10^{-3}\text{m}}$

④ 本数

G/C 3基当りのフィルタ総本数にあるメッシュ数とした。

(b) ケーシング

① 流路面積

フィルター内も流路となる為、フィルターは無いものとモデル化した。

② 等価直径 : D_e

$$D_e = 4 A / L$$

③ ぬれ縁ち長さ L

$$L = L_1 + L_2 + L_3 + L_4$$

$$L_1 = \pi D_1$$

$$L_2 = \pi D_2$$

$$L_3 = \pi D_0 \cdot (\operatorname{cosec} \theta) \cdot n$$

$$L_4 = 2 \pi \{ (N-1) D_{\min} + (N-1)^2 p \}$$

ここで

A_1 : 内胴ライナー内径とセンターパイプ外径で囲む面積

A_2 : 伝熱管のしめる面積

D_1 : 内胴ライナー内径

D_2 : センターパイプ外径

d_0 : 伝熱管外径

n : 伝熱管本数

θ : 伝熱管傾斜角

L_1 : 内胴ライナーぬれぶち

L_2 : センターパイプぬれぶち

L_3 : 伝熱管ぬれぶち

L_4 : 伝熱促進板ぬれぶち

N : ヘリカルコイル層数

p : ヘリカルコイル径方向ピッチ

D_{\min} : ヘリカルコイル最内層径

である。

これらの式に設計値を入れると、

① 流路面積 $\underline{5.76 \times 10^{-1} \text{ m}^2}$

② 等価直径 $\underline{2.48 \times 10^{-2} \text{ m}}$

③ 長さ $\underline{5.51 \text{ m}}$ となる。

3. 補助冷却器伝熱部

① 流路面積

伝熱管本数33本 × 2組

$$\begin{aligned}
 \text{管外の流路面積} &= \frac{\pi}{4} d_e^2 \times \text{本数} \\
 &= \frac{\pi}{4} \times 0.044^2 \times 66 \\
 &= \underline{0.100 \text{ (m}^2\text{)}}
 \end{aligned}$$

② バッフル付シェル・チューブの場合（流体が管群に平行に流れる場合）

$$\text{相当直径} = \frac{4 \text{ (全容器-管の占める容積)}}{\text{ぬれ面長さ}}$$

$$d_e = \frac{4 \left(S_T S_L \sin \beta - \frac{\pi}{4} d_o^2 \right)}{\pi d_o}$$

$$S_T = S_L = 40\text{mm}, \quad \beta = 60^\circ, \quad d_o = 25.4\text{mm}$$

$$\therefore d_e = \frac{4 \times (0.04^2 \times \sin 60^\circ - \frac{\pi}{4} \times 0.0254^2)}{\pi \times 0.0254} = \underline{0.04406 \text{ (m)}}$$

③ 長さ

$$\text{バッフル間隔} \times \text{バッフル数} = 0.6 \times 1 + 0.4 \times 5$$

$$= \underline{2.6 \text{ (m)}}$$

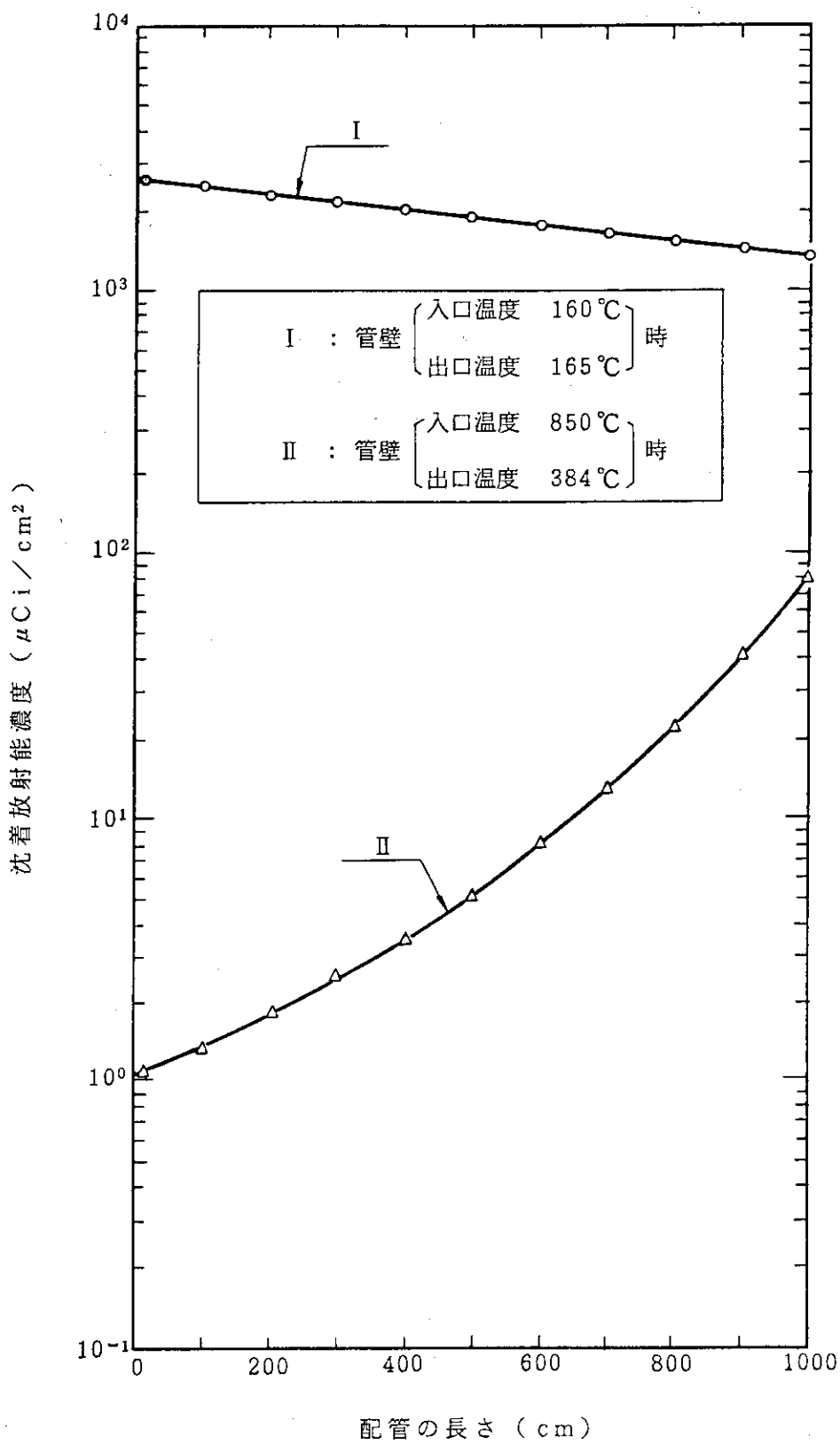


Fig. A-1 Plate-out distribution of Cs-137

付録2 ガス状先行核の崩壊による沈着核分裂生成物量の評価

1. 運転中

親、娘、孫の原子数を N 、 N' 、 N'' とすると、下記の連立方程式が成り立つ。

$$\frac{dN}{dt} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{dN'}{dt} = m \lambda N - \lambda' N' \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{dN''}{dt} = n \lambda' N' - \lambda'' N'' \quad \dots\dots\dots (3)$$

- ここで N : 親核種の原子数 (atoms)
- N' : 娘核種の原子数 (atoms)
- N'' : 孫核種の原子数 (atoms)
- S : 親核の単位時間当たりの生成量 (atoms/s)
- λ : 親核の崩壊定数。本文中の表 A.1 に示す (1/s)
- λ' : 娘核の崩壊定数。本文中の表 A.1 に示す (1/s)
- λ'' : 孫核の崩壊定数。本文中の表 A.1 に示す (1/s)
- m : 親核の崩壊による娘核の分岐比。
- n : 娘核の崩壊による孫核の分岐比。

親、娘、孫の放射能総量を Q 、 Q' 、 Q'' (Bq) とすると、これは下式で定義される。

$$Q = \lambda \cdot N \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$Q' = \lambda' \cdot N' \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$Q'' = \lambda'' \cdot N'' \quad \dots\dots\dots (6)$$

(4)、(5)、(6)式を用い、条件として

$$t = 0 \text{ で } Q' = Q'' = 0$$

$$t = T \text{ で } Q = Q_T$$

なることから、(1)、(2)、(3)を解くと時間 t に於ける親、娘、孫の放射能総量は下記の通りとなる。

$$Q = Q_T \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$Q' = m Q_T \times (1 - e^{-\lambda' t}) \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$Q'' = mnQ_T \times \left(1 + \frac{\lambda''}{\lambda' - \lambda''} e^{-\lambda' t} - \frac{\lambda'}{\lambda' - \lambda''} e^{-\lambda'' t} \right) \dots\dots\dots (9)$$

ここで T : 一次系内循環放射能総量評価時間(660日=5.7×10⁷S)

Q_T : 親核の原子炉運転660日に於ける一次系内循環放射能総量 (Bq)

なお、曾孫核種(評価対象核種: Y-89m, Y-90)の放射能は半減期が短く平衡状態にあると考えられる事から親核種(Sr-89, Sr-90)の放射能に等しくした。

2. 停止時

親、娘、孫の原子数をN, N', N'' とすると、親核に生成量の無いことから下記の連立方程式が成り立つ。

$$\frac{dN}{dt} = -(\lambda + \lambda_p) N \dots\dots\dots (10)$$

$$\frac{dN'}{dt} = m\lambda N - \lambda' N' \dots\dots\dots (11)$$

$$\frac{dN''}{dt} = n\lambda' N' - \lambda'' N'' \dots\dots\dots (12)$$

ここで N : 親核種の原子数 (atoms)

N' : 娘核種の原子数 (atoms)

N'' : 孫核種の原子数 (atoms)

S : 親核の単位時間当たりの生成量 (atoms/s)

λ : 親核の崩壊定数。本文中の表A.1に示す (1/s)

λ' : 娘核の崩壊定数。本文中の表A.1に示す (1/s)

λ'' : 孫核の崩壊定数。本文中の表A.1に示す (1/s)

m : 親核の崩壊による娘核の分岐比。

n : 娘核の崩壊による孫核の分岐比。

λ_p : 希ガスの純化系除去率。(1/s)

親、娘、孫の放射能総量をQ、Q'、Q'' (Bq)とすると、これは(4)~(6)で定義される。

t = 0 (停止直後) で Q = Q_T, Q' = Q'_T, Q'' = Q''_T である。

ここで Q_T : 停止直後の親核放射能総量(Bq)

Q'_T : 停止直後の娘核放射能総量(Bq)

Q''_T : 停止直後の孫核放射能総量(Bq)

又、希ガスの純化系除去率は炉停止後の圧力変化(41ata~17ata)に伴い 1.866×10⁻⁵~7.743×10⁻⁶(1/S)と変化するが線源評価上安全側となる 7.743×10⁻⁶(1/S)に設定すると、希

ガスの崩壊定数は純化系除去率に比べて充分大きくなり

$$\lambda + \lambda_p \approx \lambda$$

が成立する。

従って親、娘、孫の停止後 t に於ける放射能総量は下記の通りとなる。

$$Q = Q_T e^{-\lambda t} \dots\dots\dots (13)$$

$$Q' = Q'_T e^{-\lambda' t} + \frac{\lambda' m Q_T}{\lambda - \lambda'} (e^{-\lambda t} - e^{-\lambda' t}) \dots\dots\dots (14)$$

$$Q'' = (Q''_T + \frac{n \lambda'' Q'_T}{\lambda' - \lambda''} - \frac{m n \lambda' \lambda'' Q_T}{(\lambda' - \lambda'') (\lambda'' - \lambda)} e^{-\lambda t} \\ + n \lambda'' (- \frac{Q'_T e^{-\lambda' t}}{\lambda' - \lambda'} + \frac{m \lambda' Q_T e^{-\lambda t}}{(\lambda' - \lambda'') (\lambda' - \lambda)}) \\ + \frac{m \lambda' Q_T e^{-\lambda t}}{(\lambda - \lambda') (\lambda - \lambda'')}) \dots\dots\dots (15)$$

なお、曾孫核種（評価対象核種：Y-89m, Y-90）の放射能総量は半減期が短く平衡状態にあると考えられる事から親核種（Sr-89, Sr-90）の放射能総量に等しくした。