

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

大洗研究所（南地区）高速実験炉原子炉施設（「常陽」）

第 24 条（工場等周辺における直接ガンマ線等からの防護）に係る説明書

2019 年 10 月 28 日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

大洗研究所高速実験炉部

## 目 次

1. 要求事項の整理
2. 要求事項への適合性
  - 2.1 直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による敷地周辺の空間線量率に係る設計及び管理
  - 2.2 要求事項（試験炉設置許可基準規則第 24 条）への適合性説明

(別紙)

別紙 1 : 「炉心の変更」に関する基本方針

別紙 2 : 直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による敷地周辺の空間線量率

## 1. 要求事項の整理

「常陽」の炉心は、増殖炉心（以下「MK-I 炉心」という。）から照射用炉心（以下「MK-II 炉心」という。）へ変更された後、更に変更を加え、熱出力を 140MW とした照射用炉心（以下「MK-III 炉心」という。）に変更された。本申請では、更に変更を加え、熱出力を 100MW とした照射用炉心（以下「MK-IV 炉心」という。）を対象とする【「炉心の変更」に関する基本方針：別紙 1 参照】。試験炉設置許可基準規則第 24 条における要求事項等を第 1.1 表に示す。

第 1.1 表 試験炉設置許可基準規則第 24 条における要求事項  
及び本申請における変更の有無

| 要求事項  | 変更の有無 |
|---|-------|
| <p>1 試験研究用等原子炉施設は、通常運転時において試験研究用等原子炉施設からの直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による工場等周辺の空間線量率が十分に低減できるものでなければならない。</p> <p>【解釈】</p> <ul style="list-style-type: none"><li>第 24 条に規定する「十分に低減できる」とは、ALARA の考え方の下、「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」（平成元年 3 月 27 日原子力安全委員会了承）を参考に施設を設計し管理することをいう。また、原子炉設置（変更）許可申請書等において、空気カーマで一年間当たり 50 マイクログレイ以下となるように設計及び管理することとし、その旨明記する場合は、申請に当たってその線量を評価する必要はない。</li></ul> | 有     |

## 2. 要求事項への適合性

- 2.1 直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による敷地周辺の空間線量率に係る設計及び管理
- 原子炉施設は、通常運転時において、原子炉施設からの直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による敷地周辺の空間線量率が「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」を参考に、空気カーマで年間  $50 \mu\text{Gy}$  以下となるように設計及び管理する【直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による敷地周辺の空間線量率：別紙 2 参照】。

## 2.2 要求事項（試験炉設置許可基準規則第 24 条）への適合性説明

（工場等周辺における直接ガンマ線等からの防護）

第二十四条 試験研究用等原子炉施設は、通常運転時において試験研究用等原子炉施設からの直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による工場等周辺の空間線量率が十分に低減できるものでなければならない。

### 適合のための設計方針

原子炉施設は、通常運転時において、原子炉施設からの直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による敷地周辺の空間線量率が「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」を参考に、空気カーマで年間  $50 \mu\text{Gy}$  以下となるように設計及び管理する。

## 「炉心の変更」に関する基本方針

## 1. 概要

「常陽」の炉心は、増殖炉心（以下「MK-I炉心」という。）から照射用炉心（以下「MK-II炉心」という。）へ変更された後、更に変更を加え、熱出力を140MWとした照射用炉心（以下「MK-III炉心」という。）に変更された。本申請では、更に変更を加え、熱出力を100MWとした照射用炉心（以下「MK-IV炉心」という。）を対象とする。「炉心の変更」に関する基本方針を以下に示す。

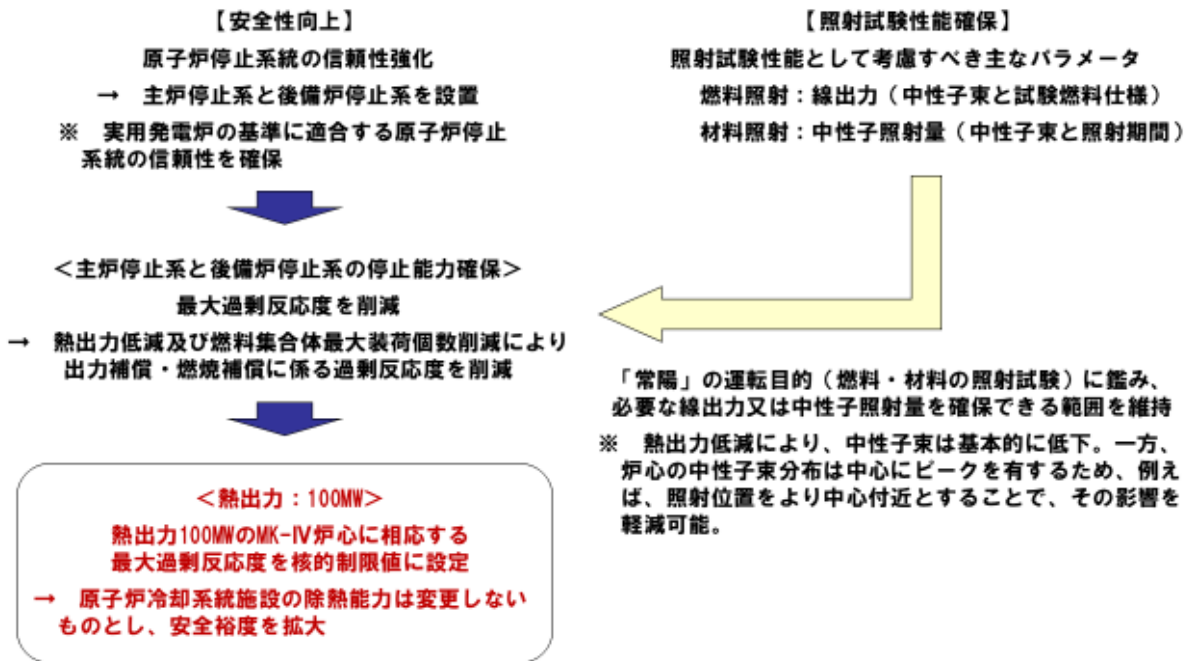
## 2. 「炉心の変更」に関する基本方針

「炉心の変更」は、改正された核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律の施行に伴い、「常陽」を「試験研究の用に供する原子炉等の位置、構造及び設備の基準に関する規則」等に適合させるための変更を行うにあたり、原子炉停止システムの信頼性を強化し、安全性を向上させること、一方で、高速炉燃料材料の開発等のための照射試験に必要な性能を維持することを目的とする（別図1.1参照）。

原子炉停止システムは、独立した主炉停止系と後備炉停止系を設けることで信頼性を向上する。それぞれの原子炉停止システムに要求される停止能力の確保には、最大過剰反応度の削減が必要であり、ここでは、熱出力の低減及び燃料集合体最大装荷個数の削減により、出力補償や燃焼補償に係る過剰反応度を削減して対応することとした。一方で、照射試験性能として考慮すべき主なパラメータである線出力と中性子照射量は、熱出力低減により基本的に低下する。必要な線出力又は中性子照射量を確保できる範囲に維持することも「常陽」の運転目的として肝要である。

熱出力を100MWとしたMK-IV炉心は、これらの要件を満足するものであり、当該炉心に相応する最大過剰反応度を核的制限値とする。なお、原子炉冷却システム施設の除熱能力は変更しないものとし、安全裕度を拡大することとしている。

「炉心の変更」に伴って生じる主な変更点等を別図1.2に示す。本申請にあつては、MK-IV炉心（熱出力100MW）での核設計や熱設計を実施するとともに、当該設計結果を炉心燃料集合体の機械設計や被ばく評価、安全評価等に反映する。



別図 1.1 「炉心の変更」に関する基本方針

**MK-IV炉心（熱出力100MW）条件として、以下の変更・評価等を実施（最新知見の反映を含む）**

**【核設計における主な変更点】**

- ・ 炉心構成（燃料集合体最大装荷個数削減に対応）
- ・ 核的制限値（最大過剰反応度削減に対応）
- ・ 反応度係数（炉心構成の変更に対応）
- ・ 動特性パラメータ（炉心構成の変更に対応）

**【核熱設計結果の反映】**

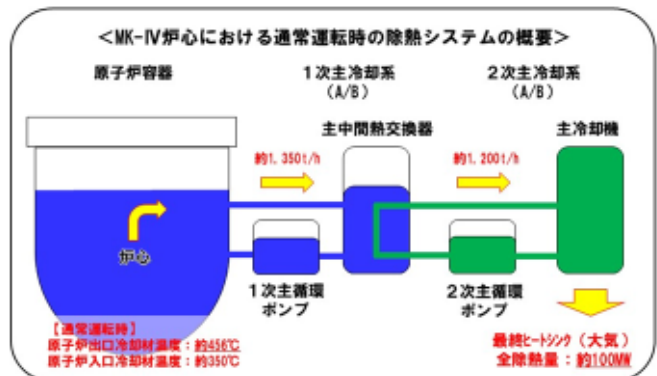
- ・ 炉心燃料集合体の機械設計（使用期間長期化対応を含む）
- ・ 動特性
- ・ 被ばく評価
- ・ 運転時の異常な過渡変化の評価
- ・ 設計基準事故の評価
- ・ 多量の放射性物質等を放出する事故の対策検討・評価

**【熱設計における主な変更点】**

- ・ 熱的制限値（熱出力低下に伴う使用期間長期化に対応）
- ・ 線出力密度や集合体冷却材流量（炉心構成の変更に対応）

**熱的制限値：** 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時において、原子炉停止系統及び安全保護系等の機能とあいまって**熱設計基準値（燃料の許容設計限界）**を超えないよう、かつ、その被覆管のクリープ寿命分數和と疲労寿命分數和を加えた累積損傷和が設計上の制限値である1.0を超えないよう、定格出力時における制限値として設定

|               | MK-III炉心（140MW） |        | MK-IV炉心（100MW） |        |
|---------------|-----------------|--------|----------------|--------|
|               | 熱的制限値           | 熱設計基準値 | 熱的制限値          | 熱設計基準値 |
| 燃料最高温度        | 2,530℃          | 2,650℃ | 2,350℃         | 2,650℃ |
| 被覆管最高温度（肉厚中心） | 675℃            | 830℃   | 620℃           | 840℃   |
| 冷却材最高温度       |                 | 910℃   |                | 910℃   |



別図 1.2 「炉心の変更」に伴って生じる主な変更点等



直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による  
敷地周辺の空間線量率

## 1. 概要

原子炉施設は、通常運転時において、直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による敷地周辺の空間線量率が十分に低減できるように施設する。ここでは、通常運転時における直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による敷地周辺の空間線量率を評価し、設計方針を満足していることを確認する。

## 2. 設計方針

通常運転時における直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による敷地周辺の空間線量率の評価にあたっては、直接ガンマ線について計算コード QAD-CGGP2R を用いる。スカイシャインガンマ線については、計算コード ANISN 及び G-33GP2R を用いる。敷地境界における空間線量率は、通常運転時において、空気カーマで年間  $50 \mu\text{Gy}$  以下を設計目標値とする。

## 3. 計算条件

### 3.1 線源条件

本計算で用いる線源は、原子炉建物及び原子炉附属建物について、遮蔽区分の上限線量 ( $20 \mu\text{Sv/h}$ ) に相当する仮想的な点線源を用いることとし、以下のように設定した。なお、通常運転時において、格納容器内の運転床面の大部分の線量率は、検出下限レベルである。炉上部ピット及びその上部の立入禁止区域には、局所的に  $20 \mu\text{Sv/h}$  を超えるポイントが存在するが、機器の隙間のストリーミングに起因するものであり、線源設定に用いた  $20 \mu\text{Sv/h}$  は十分な保守性を有する。

等価点線源強度は、建物毎に Ground Level の床面積と等価な表面積を有する半径  $r$  の半球を設定し、この半球表面上の線量率が各建物 Ground Level 床上遮蔽区分の上限線量率の値に等しいとして、Ground Level 上点線源を算出した。

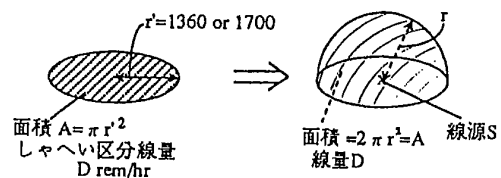
各建物の半球の半径  $r$  は以下の式により算出した。

#### ① 原子炉建物

$$\begin{aligned} \pi 1360^2 &= 2\pi r^2 \\ r &= 961.7 \text{ (cm)} \end{aligned}$$

#### ② 原子炉附属建物

$$\begin{aligned} \pi 1700^2 &= 2\pi r^2 \\ r &= 1202 \text{ (cm)} \end{aligned}$$



また、点線源強度  $S_i$  (photons/s) は以下の式を満たすように算出した。

$$D = \sum_i \frac{S_i \cdot K_i \cdot B_i e^{-\mu_i \cdot r}}{4\pi r^2}$$

ここで、

$S_i$  : 点線源強度 (photons/s) (スペクトルは第 3.1 表、第 3.2 表を参照)

$i$  : エネルギーを表す添字

$D$  : 半球表面上線量率 (=  $20 \mu\text{Sv/h}$ )

$r$  : 半球の半径 (cm)

$K_i$  : 線量率換算係数 ( $(\mu \text{ Gy/h}) / (\text{photons/cm}^2 \cdot \text{s})$ ) (第 3.1 表、第 3.2 表を参照)

$B_i$  : ビルドアップ係数

$\mu_i$  : 空気の線吸収係数

ただし、 $r \approx 1000$  (cm) 程度では  $B_i e^{-\mu_i r} \approx 1$  であるので実際の計算では  $B_i e^{-\mu_i r}$  の項は無視する。

なお、線量率換算係数は、ICRP Publication 74 に記載された光子フルエンスから空気カーマへの換算係数を元に、線源スペクトルの 18 群エネルギー群構造に内挿したものである。

また、線源スペクトルについては、以下を使用することとした。

- ① 原子炉建物 : 原子炉建物でのガンマ線は、原子炉容器とペデスタルとの間をストリーミングし、大回転プラグ外側の隙間から上方に漏えいする成分が支配的であることから、大回転プラグ上面の線源スペクトルを用いた。
- ② 原子炉附属建物 : 原子炉附属建物においては、外側炉心燃料集合体 (燃料要素最高燃焼度 90,000MWd/t とする。) の原子炉停止後 2 日の放出ガンマ線スペクトルを用いた。なお、原子炉附属建物に移送された使用済燃料に付着するナトリウムは、数 g と微量であるため線源には放射化ナトリウムを含まないものとした。

### 3.2 主要形状及び評価点

第 3.1 図、第 3.2 図に原子炉建物及び原子炉附属建物の評価用主要形状を示す。また、評価点と評価点までの距離を第 3.3 図及び第 3.3 表に示す。

評価点までの距離は、原子炉建物及び原子炉附属建物を中心とした時の各方向の敷地境界までの距離とした。

第 3.1 表 原子炉建物の線源スペクトル及び等価線源強度

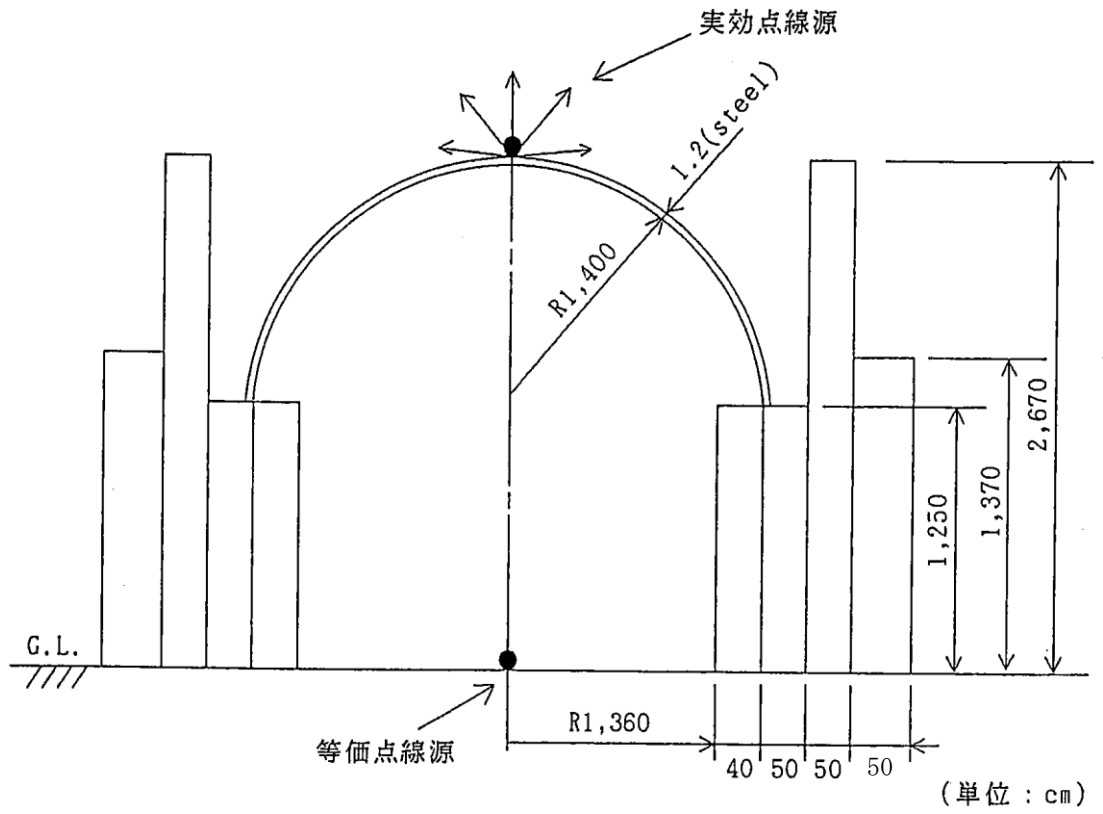
| 群数<br>No. | γ 線エネルギー (MeV) |      |        | 線源スペクトル<br>相対値 | 等価点線源強度<br>(Photon/s) | 線量換算係数<br>( $\mu$ Gy/h/flux) |
|-----------|----------------|------|--------|----------------|-----------------------|------------------------------|
|           | 上限             | 下限   | 代表     |                |                       |                              |
| 1         | 11.0           | 8.0  | 9.5    | 3.17E-03       | 3.20E+07              | 8.29E-02                     |
| 2         | 8.0            | 6.0  | 7.0    | 1.15E-01       | 1.16E+09              | 6.52E-02                     |
| 3         | 6.0            | 4.0  | 5.0    | 9.70E-02       | 9.79E+08              | 5.08E-02                     |
| 4         | 4.0            | 3.0  | 3.50   | 5.36E-02       | 5.41E+08              | 3.98E-02                     |
| 5         | 3.0            | 2.5  | 2.75   | 3.28E-02       | 3.32E+08              | 3.38E-02                     |
| 6         | 2.5            | 2.0  | 2.25   | 4.01E-02       | 4.05E+08              | 2.95E-02                     |
| 7         | 2.0            | 1.5  | 1.75   | 4.95E-02       | 4.99E+08              | 2.47E-02                     |
| 8         | 1.5            | 1.0  | 1.25   | 5.82E-02       | 5.87E+08              | 1.93E-02                     |
| 9         | 1.0            | 0.70 | 0.85   | 5.42E-02       | 5.47E+08              | 1.40E-02                     |
| 10        | 0.70           | 0.45 | 0.575  | 1.41E-01       | 1.42E+09              | 9.82E-03                     |
| 11        | 0.45           | 0.30 | 0.375  | 1.06E-01       | 1.07E+09              | 6.35E-03                     |
| 12        | 0.30           | 0.15 | 0.225  | 1.88E-01       | 1.90E+09              | 3.56E-03                     |
| 13        | 0.15           | 0.10 | 0.125  | 5.17E-02       | 5.22E+08              | 1.73E-03                     |
| 14        | 0.10           | 0.07 | 0.085  | 9.29E-03       | 9.38E+07              | 1.15E-03                     |
| 15        | 0.07           | 0.05 | 0.0575 | 1.04E-03       | 1.05E+07              | 1.05E-03                     |
| 16        | 0.05           | 0.03 | 0.0375 | 1.42E-05       | 1.44E+05              | 1.67E-03                     |
| 17        | 0.03           | 0.02 | 0.025  | 2.71E-06       | 2.73E+04              | 3.84E-03                     |
| 18        | 0.02           | 0.01 | 0.015  | 2.93E-06       | 2.96E+04              | 1.12E-02                     |
|           | 合計             |      |        | 1.00E+00       | 1.01E+10              |                              |

第 3.2 表 原子炉附属建物の線源スペクトル及び等価線源強度

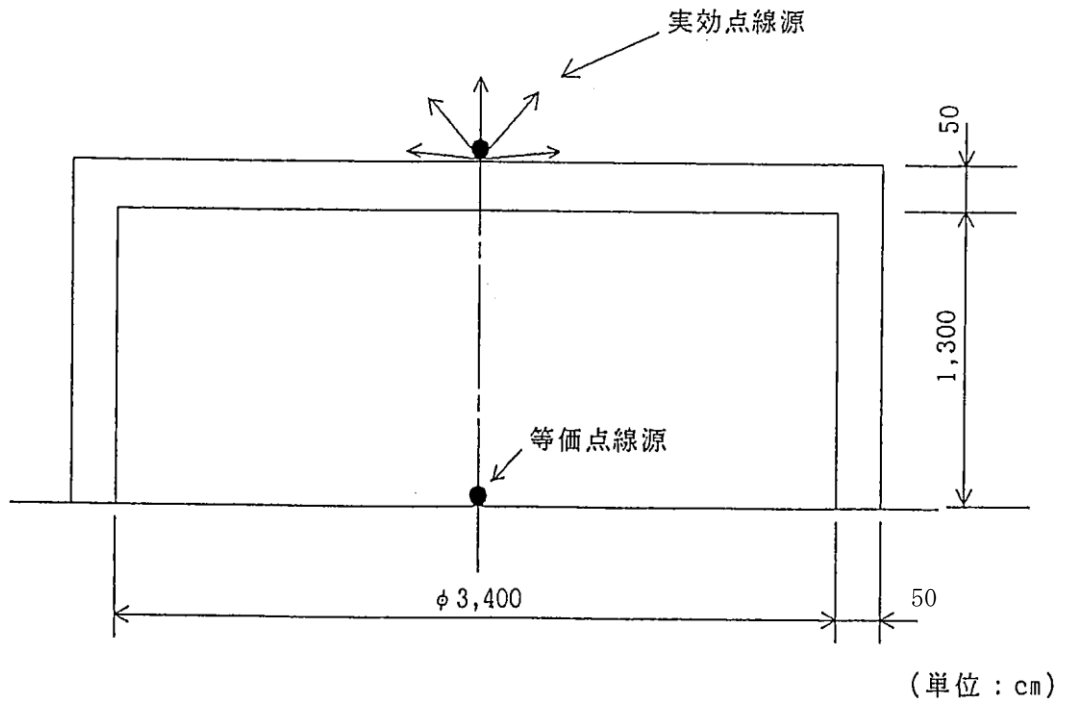
| 群数<br>No. | γ 線エネルギー (MeV) |      |        | 線源スペクトル<br>相対値 | 等価点線源強度<br>(Photon/s) | 線量換算係数<br>( $\mu$ Gy/h/flux) |
|-----------|----------------|------|--------|----------------|-----------------------|------------------------------|
|           | 上限             | 下限   | 代表     |                |                       |                              |
| 1         | 11.0           | 8.0  | 9.5    | 1.17E-13       | 5.23E-03              | 8.29E-02                     |
| 2         | 8.0            | 6.0  | 7.0    | 1.02E-12       | 4.54E-02              | 6.52E-02                     |
| 3         | 6.0            | 4.0  | 5.0    | 2.08E-10       | 9.27E+00              | 5.08E-02                     |
| 4         | 4.0            | 3.0  | 3.50   | 1.05E-05       | 4.70E+05              | 3.98E-02                     |
| 5         | 3.0            | 2.5  | 2.75   | 1.24E-03       | 5.56E+07              | 3.38E-02                     |
| 6         | 2.5            | 2.0  | 2.25   | 1.14E-03       | 5.09E+07              | 2.95E-02                     |
| 7         | 2.0            | 1.5  | 1.75   | 3.33E-02       | 1.49E+09              | 2.47E-02                     |
| 8         | 1.5            | 1.0  | 1.25   | 1.03E-02       | 4.62E+08              | 1.93E-02                     |
| 9         | 1.0            | 0.70 | 0.85   | 1.29E-01       | 5.75E+09              | 1.40E-02                     |
| 10        | 0.70           | 0.45 | 0.575  | 1.30E-01       | 5.81E+09              | 9.82E-03                     |
| 11        | 0.45           | 0.30 | 0.375  | 4.27E-02       | 1.91E+09              | 6.35E-03                     |
| 12        | 0.30           | 0.15 | 0.225  | 9.09E-02       | 4.06E+09              | 3.56E-03                     |
| 13        | 0.15           | 0.10 | 0.125  | 1.19E-01       | 5.31E+09              | 1.73E-03                     |
| 14        | 0.10           | 0.07 | 0.085  | 5.39E-02       | 2.41E+09              | 1.15E-03                     |
| 15        | 0.07           | 0.05 | 0.0575 | 3.09E-02       | 1.38E+09              | 1.05E-03                     |
| 16        | 0.05           | 0.03 | 0.0375 | 6.04E-02       | 2.70E+09              | 1.67E-03                     |
| 17        | 0.03           | 0.02 | 0.025  | 5.20E-02       | 2.32E+09              | 3.84E-03                     |
| 18        | 0.02           | 0.01 | 0.015  | 2.45E-01       | 1.10E+10              | 1.12E-02                     |
|           | 合計             |      |        | 1.00E+00       | 4.47E+10              |                              |

第 3.3 表 被ばく評価の評価点距離

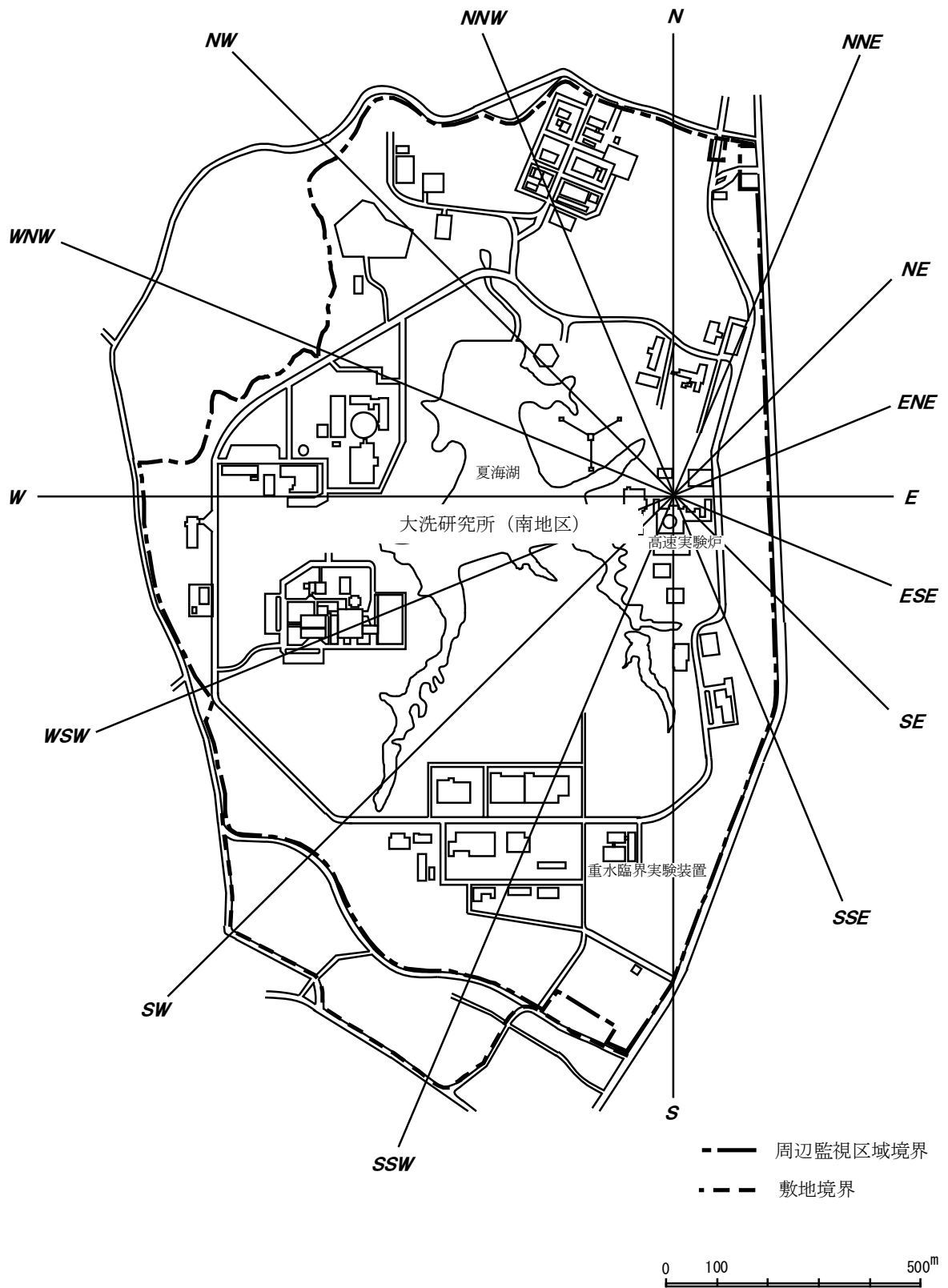
| No. | 評価方向 | 評価距離<br>(km) |
|-----|------|--------------|
| 1   | N    | 0.70         |
| 2   | NNE  | 0.42         |
| 3   | NE   | 0.24         |
| 4   | ENE  | 0.19         |
| 5   | E    | 0.17         |
| 6   | ESE  | 0.19         |
| 7   | SE   | 0.26         |
| 8   | SSE  | 0.47         |
| 9   | S    | 0.85         |
| 10  | SSW  | 0.96         |
| 11  | SW   | 0.94         |
| 12  | WSW  | 0.94         |
| 13  | W    | 0.99         |
| 14  | WNW  | 0.71         |
| 15  | NW   | 0.90         |
| 16  | NNW  | 0.76         |



第 3.1 図 原子炉建物の評価用主要形状



第 3.2 図 原子炉附属建物の評価用主要形状



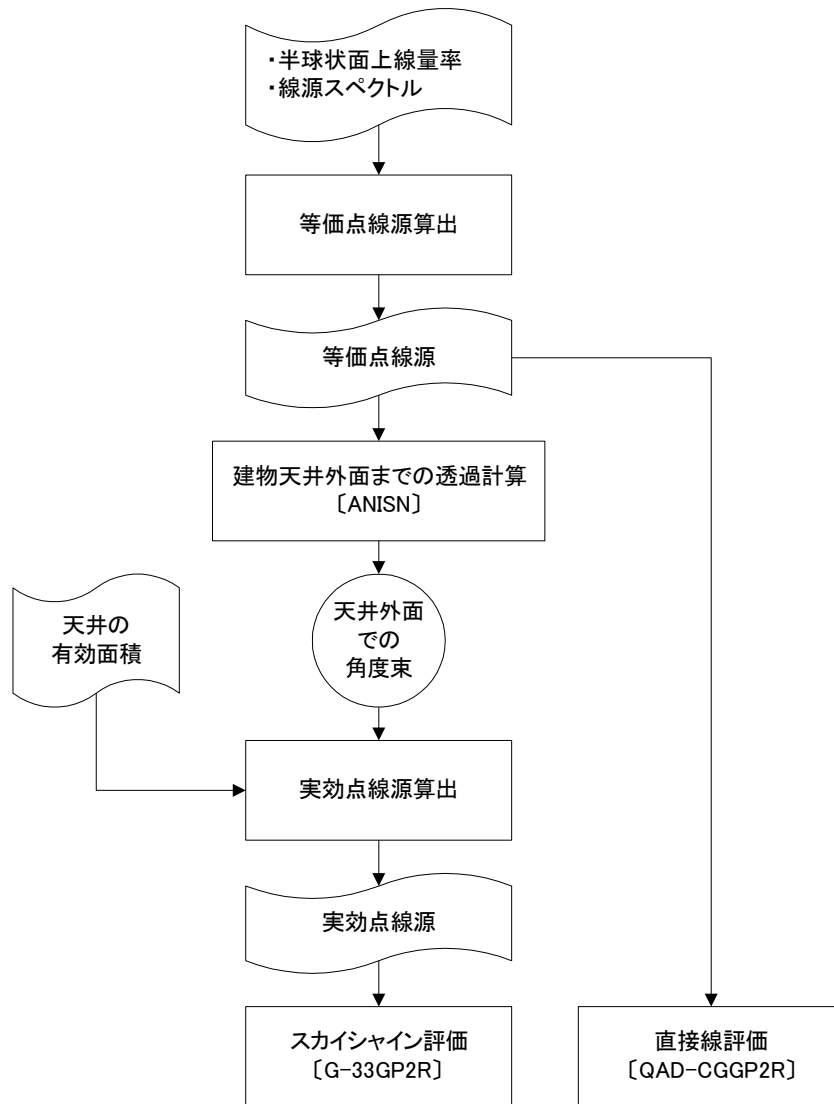
第 3.3 図 被ばく評価の評価点

#### 4. 計算方法

原子炉建物及び原子炉附属建物を3次元でモデル化し、それぞれの平常時における直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線の空間線量率を計算した。空間線量率の計算フローを第4.1図に示す。

空間線量率は、建物壁面を水平方向に透過する直接ガンマ線と建物天井を透過し上空へ抜けて散乱するスカイシャインガンマ線との合計で算出される。直接ガンマ線計算にはQAD-CGGP2Rを用い、スカイシャインガンマ線計算にはANISN及びG-33GP2Rを用いる。





第 4.1 図 空間線量率の計算フロー

## 5. 評価結果

各評価点の原子炉建物、原子炉附属建物及び合計線量率を第 5.1 表に示す。

第 5.1 表より、最も建物に近い方向 E の 0.17km 地点においても空間線量率は、空気カーマで 6.4  $\mu\text{Gy}/\text{y}$  である。以上により、空間線量率は、空気カーマで年間 50  $\mu\text{Gy}$  を下回り、設計方針を満足する。

第 5.1 表 直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による空間線量率

| 評価地点 |     |          | 空間線量率                               |                                |                               |                                     |                                |                               | 建物<br>合計<br>$\mu\text{Gy}/\text{y}$ |
|------|-----|----------|-------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
|      |     |          | 原子炉建物                               |                                |                               | 原子炉附属建物                             |                                |                               |                                     |
| No.  | 方向  | 距離<br>km | スカイシャイン線<br>$\mu\text{Gy}/\text{y}$ | 直接線<br>$\mu\text{Gy}/\text{y}$ | 合計<br>$\mu\text{Gy}/\text{y}$ | スカイシャイン線<br>$\mu\text{Gy}/\text{y}$ | 直接線<br>$\mu\text{Gy}/\text{y}$ | 合計<br>$\mu\text{Gy}/\text{y}$ |                                     |
| 1    | N   | 0.70     | 1.47E-03                            | 2.33E-04                       | 1.71E-03                      | 3.93E-03                            | 8.48E-03                       | 1.24E-02                      | 1.41E-02                            |
| 2    | NNE | 0.42     | 3.70E-02                            | 1.36E-03                       | 3.84E-02                      | 1.01E-01                            | 9.78E-02                       | 1.99E-01                      | 2.38E-01                            |
| 3    | NE  | 0.24     | 3.80E-01                            | 6.72E-03                       | 3.87E-01                      | 1.09E+00                            | 7.65E-01                       | 1.85E+00                      | 2.24E+00                            |
| 4    | ENE | 0.19     | 7.73E-01                            | 1.22E-02                       | 7.85E-01                      | 2.24E+00                            | 1.59E+00                       | 3.83E+00                      | 4.62E+00                            |
| 5    | E   | 0.17     | 1.04E+00                            | 1.61E-02                       | 1.06E+00                      | 3.05E+00                            | 2.21E+00                       | 5.26E+00                      | 6.32E+00                            |
| 6    | ESE | 0.19     | 7.73E-01                            | 1.22E-02                       | 7.85E-01                      | 2.24E+00                            | 1.59E+00                       | 3.83E+00                      | 4.62E+00                            |
| 7    | SE  | 0.26     | 2.89E-01                            | 5.43E-03                       | 2.94E-01                      | 8.21E-01                            | 5.87E-01                       | 1.41E+00                      | 1.70E+00                            |
| 8    | SSE | 0.47     | 2.02E-02                            | 9.51E-04                       | 2.11E-02                      | 5.48E-02                            | 6.04E-02                       | 1.15E-01                      | 1.36E-01                            |
| 9    | S   | 0.85     | 3.08E-04                            | 1.06E-04                       | 4.14E-04                      | 7.87E-04                            | 2.71E-03                       | 3.50E-03                      | 3.92E-03                            |
| 10   | SSW | 0.96     | 1.05E-04                            | 6.23E-05                       | 1.67E-04                      | 2.56E-04                            | 1.23E-03                       | 1.49E-03                      | 1.66E-03                            |
| 11   | SW  | 0.94     | 1.27E-04                            | 6.85E-05                       | 1.96E-04                      | 3.13E-04                            | 1.42E-03                       | 1.73E-03                      | 1.93E-03                            |
| 12   | WSW | 0.94     | 1.27E-04                            | 6.85E-05                       | 1.96E-04                      | 3.13E-04                            | 1.42E-03                       | 1.73E-03                      | 1.93E-03                            |
| 13   | W   | 0.99     | 7.93E-05                            | 5.41E-05                       | 1.33E-04                      | 1.90E-04                            | 1.00E-03                       | 1.19E-03                      | 1.32E-03                            |
| 14   | WNW | 0.71     | 1.32E-03                            | 2.21E-04                       | 1.54E-03                      | 3.52E-03                            | 7.83E-03                       | 1.14E-02                      | 1.29E-02                            |
| 15   | NW  | 0.90     | 1.88E-04                            | 8.31E-05                       | 2.71E-04                      | 4.70E-04                            | 1.89E-03                       | 2.36E-03                      | 2.63E-03                            |
| 16   | NNW | 0.76     | 7.77E-04                            | 1.69E-04                       | 9.46E-04                      | 2.04E-03                            | 5.32E-03                       | 7.36E-03                      | 8.31E-03                            |