

## 公衆防護措置範囲予測への格納容器放射線の考慮

Study of containment radiation dose for emergency protection zone prediction

吉田 至孝 (Yoshitaka Yoshida)      鈴木 政時 (Masatoki Suzuki)



株式会社 **原子力安全システム研究所**

Institute of Nuclear Safety System, Incorporated

〒919-1205 福井県三方郡美浜町佐田64号

Tel 0770-37-9100 Fax 0770-37-2008

URL <http://www.inss.co.jp>

## 公衆防護措置範囲予測への格納容器放射線の考慮

### Study of containment radiation dose for emergency protection zone prediction

吉田 至孝 (Yoshitaka Yoshida)\*<sup>1</sup>      鈴木 政時 (Masatoki Suzuki)\*<sup>2</sup>

**要約** 原子力災害時における公衆防護措置の目安は、評価地点の屋外に人が留まっていた場合の外部被ばくによる実効線量と内部被ばくによる等価線量（以下、予測線量という）が用いられている。予測線量の計算は、SPEEDIをはじめとする大気拡散計算システムを用い、大気中に放出された放射性物質による被ばくを対象として実施される。一方、原子炉立地審査指針では、非居住区域と低人口地帯における判断の目安を定め、立地の妥当性が審査されている。両者の判断の目安には、外部被ばくによる実効線量で25倍、内部被ばくによる等価線量で15倍の差があり、原子炉立地審査指針の方が大きな値となっている。そこで、本研究では、原子力発電所の立地審査のために実施された解析結果に基づき、公衆防護措置範囲の予測に反映すべき事項を検討した。その結果、(1) 敷地境界付近において公衆防護措置が必要となるプラントがいくつか見られ、その要因としては格納容器内の放射性物質からの放射線による外部被ばくが支配的であること、(2) 格納容器放射線の寄与が大きいプラントは、スカイシャイン線が支配的であること、(3) 防護措置範囲は、プラント固有の設計に依存するものの、格納容器内線源の影響を考慮するとスカイシャイン線の影響により、同心円状に現われる場合があること、(4) 仮想事故条件下においては、炉心損傷が発生した場合、プラント固有の設計に依存するものの、環境への放出とは無関係に敷地境界付近において早期に防護措置が必要となる可能性があることを示した。

**キーワード** 原子力防災, 公衆防護措置, 予測線量, 直接線, スカイシャイン線

**Abstract** The effective dose from external exposure and the equivalent dose from internal exposure for people staying outdoors in the evaluation area (hereinafter both doses are defined as "predicted doses") are used as the aim for implementing emergency protective actions in the event of nuclear disaster. The predicted doses are calculated by the radiation dose from radioactive materials released into the atmosphere using an atmospheric diffusion simulation system (e.g. the SPEEDI system). On the other side, the Guidelines in Reactor Site Evaluation have established the aim of judgment in nonresidential area and low population zone and that uses for validation of nuclear reactor construction. The aim of judgment for both Guidelines specify the effective dose from external exposure 25 times more severe and the equivalent dose from internal exposure 15 times more severe than the aim of judgment for implementing emergency protective actions. In this study, we studied the items that should be applied to emergency protection zone prediction, based on the results of past analyses enforced for evaluating nuclear sites. As a result, (1) several plants were found to require the emergency protective action around the site boundaries, main factor was the radiation exposure from containment vessel. (2) The skyshine dose was predominantly, when the radiation exposure from containment vessel of a plant was the main factor. (3) The emergency protection zone might appear like concentrically around the radiation source depending on the individual nuclear plant design, when the influence of the radiation source in a containment vessel is considered. (4) When the core damage occurred under a hypothetical accident condition, emergency protective actions may be required depending on the individual nuclear plant design in the area around the site boundary in the early stage of an accident independent of any release of radioactive materials into the environment.

**Keywords** nuclear emergency preparedness, emergency protective action, predicted dose, direct dose, skyshine dose

\*1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

\*2 日本エヌ・ユー・エス株式会社

## 1. 緒言

原子力安全委員会は2007年5月に「原子力施設の防災対策について」（以下、防災指針という）を改訂<sup>(1)</sup>し、放射性物質放出前または直後の公衆防護措置を推奨した。これは放射性物質の環境への放出に伴う公衆の被ばくを意識したものであり、外部被ばくによる実効線量と内部被ばくによる等価線量（小児甲状腺被ばく線量）が対象となっている。外部被ばくによる実効線量は、50mSv以上が予測される場合は避難またはコンクリート屋内退避、10mSv以上が予測される場合は屋内退避を目安としている。内部被ばくによる等価線量は、500mSv以上が予測される場合は避難またはコンクリート屋内退避、100mSv以上が予測される場合は屋内退避を目安としている。予測線量の計算は、SPEEDIをはじめとする大気拡散計算システムを用い、大気中に放出された放射性物質による被ばくを対象として実施される。一方、「原子炉立地審査指針及びその適用に関する判断のめやすについて」<sup>(2)</sup>（以下、立地指針という）では、非居住区域と低人口地帯における事故発生後30日間の被ばく線量を評価し、基準を下回ることを確認するよう求めている。立地指針では、環境に放出された放射性物質と格納容器から放出される放射線による実効線量と小児甲状腺被ばく線量ならびに成人甲状腺被ばく線量が対象となっている。これらの、原子力防災における公衆防護措置の目安線量と立地評価における被ばく線量の基準には、実効線量で25倍、内部被ばくによる等価線量（甲状腺被ばく線量）で15倍の差がある。

そこで本研究では、立地指針に基づき評価された重大な事故と技術的見地からは起こるとは考えられない事故の被ばく線量から、公衆防護措置範囲の予測に反映すべき事項を検討し、運用中のシステムの見直しを実施した。

## 2. 立地指針

立地指針では、技術的見地からみて、最悪の場合には起るかもしれないと考えられる重大な事故（以下「重大事故」という。）の発生を仮定しても、周辺の公衆に放射線障害を与えないこと、重大事故を超えるような技術的見地からは起るとは考えられない事故（以下「仮想事故」という）の発生を仮定しても、周辺の公衆に著しい放射線災害を与えないこ

とが求められる。公衆が原則として居住しない区域（以下「非居住区域」という）に対しては重大事故を対象として、外部全身被ばく線量が250mSv以下、小児甲状腺被ばく線量が1.5Sv以下であること、適切な措置を講じうる環境にある地帯（以下「低人口地帯」という）に対しては仮想事故を対象として、外部全身被ばく線量が250mSv以下、成人甲状腺被ばく線量が3Sv以下であることを判断の目安としている。本章では、国内原子炉発電所の原子炉冷却材喪失時における重大事故と仮想事故の評価結果と防災指針で定める避難または屋内退避の目安の関係を整理して、公衆防護措置範囲の予測に反映すべき事項を抽出する。

### 2.1 重大事故の比較

原子炉冷却材喪失の重大事故の評価方法は、発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針<sup>(3)</sup>（以下、「安全評価指針」という）に定められている。そのうち主なものは、以下の通りである。

- (1)事象発生後、原子炉格納容器内に放出される核分裂生成物の量は、炉心内蓄積量に対し、希ガス2%、よう素1%の割合とする。
- (2)原子炉格納容器内に放出されたよう素のうち、有機よう素は10%とし、残りの90%は無機よう素とする。
- (3)無機よう素については、50%が原子炉格納容器内や同容器内の機器等に沈着し、原子炉格納容器からの漏えいに寄与しないものとする。
- (4)事故の評価期間は30日間を下回らない期間とする。

これらの条件で評価された国内原子力発電所の原子炉設置許可申請書に記載された外部全身被ばく線

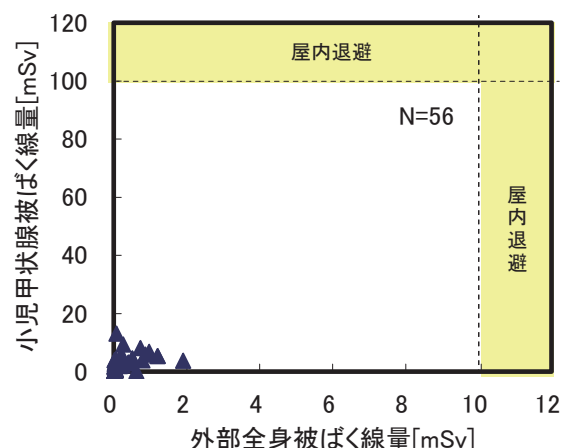


図1 原子炉冷却材喪失（重大事故）の被ばく線量

量と小児甲状腺被ばく線量の関係を図1に示す。この図より、何れの被ばく線量も防災指針の目安線量に対して十分低いことがわかる。すなわち、重大事故においては非居住区域周辺において公衆防護措置は不要であることを示している。

### 2.2 仮想事故の比較

原子炉冷却材喪失の仮想事故の評価方法も同様に安全評価指針で定められている。そのうち重大事故と異なる点は、事象発生後、原子炉格納容器内に放出される核分裂生成物の量は、炉心内蓄積量に対し、希ガス 100%、よう素 50%の割合とすることである。これは炉心溶融を想定したシビアアクシデントに相当する。

これらの条件で評価された国内原子力発電所の原子炉設置許可申請書の外部全身被ばく線量と成人甲状腺被ばく線量の関係を図2に示す。この図より、低人口地帯においては、成人甲状腺被ばく線量では屋内退避が必要となる場合が、外部全身被ばく線量では避難またはコンクリート屋内退避が必要となる場合があることを示している。成人甲状腺被ばく線量は呼吸に伴うものであり、環境に放出された放射性物質によるものである。一方、外部全身被ばく線量は格納容器内に閉じ込められた放射性物質による被ばく（以下、「格納容器放射線被ばく」という）と環境に放出された放射性物質による被ばく（以下、「プルーム外部被ばく」という）がある。格納容器放射線被ばく線量とプルーム外部被ばく線量の関係を図3に示す。この図より、格納容器放射線被ばく線量が支配的であり、低人口地帯において避難また

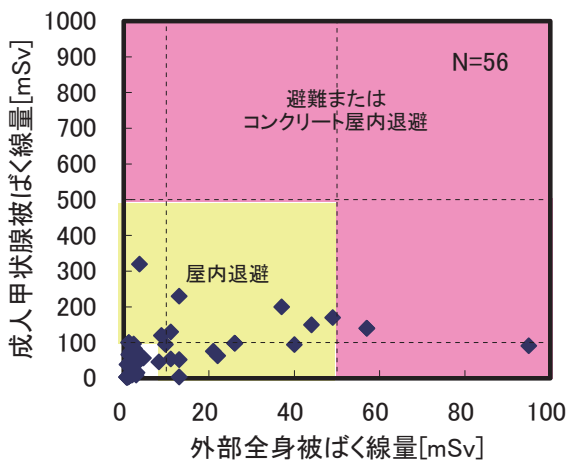


図2 原子炉冷却材喪失（仮想事故）の被ばく線量

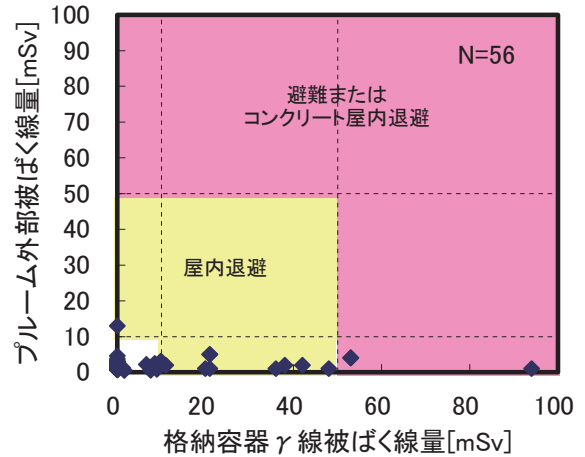


図3 外部全身被ばく線量の内訳

はコンクリート屋内退避が必要であることを示唆している。すなわち、原子力防災においては、公衆の防護措置範囲を検討する際に、炉心損傷に伴い格納容器内に蓄積された放射性物質による敷地境界付近のγ線被ばくの影響を無視できない可能性があると言える。

### 3. 格納容器放射線の評価

格納容器放射線被ばくを評価する際に、格納容器内に蓄積された放射性物質から放出されるγ線の量を求める必要がある。安全評価指針では、前述したとおり事故の評価期間は30日間を下回らない期間とされており、事故後30日間の積分線源強度が用いられている。

また、大気中でγ線が散乱するとエネルギーが低下するため直達線より弱くなり、γ線ビルドアップ係数を用いた散乱成分の補正を行うことにより評価される。しかし、2章で示した格納容器放射線被ばくは、格納容器は側壁と天井の厚さが大きく異なる場合があることから、格納容器側壁を透過してくるγ線（以下、「直接線」という）と格納容器の天井が薄いプラントは大気中で散乱し地上に降り注ぐγ線（以下、「スカイシャイン線」という）を考慮する必要がある。

#### 3.1 線源評価

国内原子力発電所の原子炉設置許可申請書に記載された格納容器内30日間積分線源は、γ線エネルギーを5群または15群に縮約されており、かつ

積分値のみが記載されている。そこで、円筒型コンクリート遮へいと鋼製格納容器を持つ 800MW 級 PWR の原子炉冷却材喪失事故時 ECCS 注入失敗シーケンスの格納容器内線源を用いて 30 日間の 5 群エネルギー線源強度の変化を計算した。単位時間あたりの光子数を図 4 に、積算線源強度比を図 5 に示す。

$\gamma$  線被ばく評価においては、高エネルギー  $\gamma$  線の寄与が大きく、線源エネルギー 2.5MeV の積算線源強度比では、最初の 24 時間で約 60% となり、残り 29 日間で約 40% を占めている。よって、30 日間積算線源強度を用いた仮想事故時の被ばく線量は、約 6 割が最初の 24 時間に受けるものと考えられる。

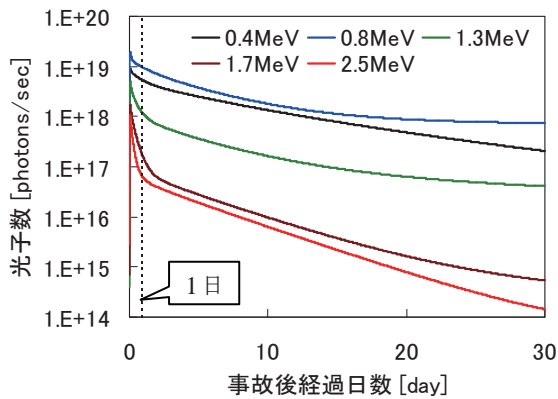


図 4 事故後 30 日間の線源の発生光子数の変化

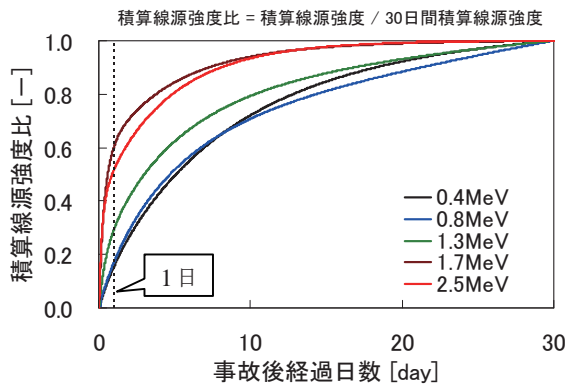


図 5 事故後 30 日間の積算線源強度比の変化

### 3.2 遮へい計算

図 4 に示した 1 日経過後の線源を用いて、円筒型コンクリート遮へいと鋼製格納容器を持つ PWR を対象として、格納容器を線源とする直接線とスカイシャイン線を計算した。直接線は QAD-IE<sup>(4)</sup> コード

を、スカイシャイン線は G33-IE<sup>(5)</sup> コードを用いた。両コードは Combinatorial Geometry により同一の遮へい体系が利用できる特徴がある。

非居住区域および低人口地帯が出現する可能性がある 300m 以遠の直接線とスカイシャイン線の計算結果を図 6 に示す。この図より、格納容器放射線被ばく線量はスカイシャイン線によるものが支配的であることがわかる。

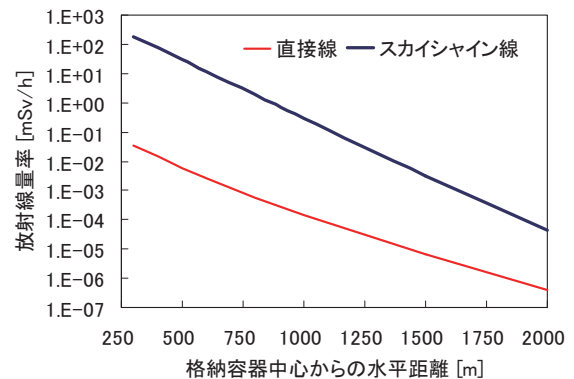


図 6 直接線とスカイシャイン線の計算結果

## 4. 公衆防護措置範囲予測への反映

立地指針に基づく仮想事故では、低人口地帯において公衆防護措置が必要となるプラントがいくつか見られ、その要因としては格納容器放射線被ばくによるものが支配的である。仮想事故で用いられている 30 日間積分線源は、事故後 1 日でその 6 割近くを占めることがわかった。また、格納容器放射線被ばくはスカイシャイン線の寄与が支配的であることもわかった。

そこで、原子力防災用公衆防護措置範囲迅速予測技術 (R-Cubic)<sup>(6-11)</sup> に本知見を反映することとした。

### 4.1 手法の見直し

R-Cubic システムでは、限られた情報に基づき原子炉内の放射性物質が格納容器内や環境に放出されていくプロセスを図 7 に示す手順で時間依存方程式により解いている。そこで、格納容器内に閉じ込められた放射性物質から放出される放射線のエネルギーを 18 群に分割して遮へい計算を行うこととした。計算対象核種は、最大 151 核種からユーザが指定したものを対象とした。直接線は、IE 法により

評価された透過距離 300mfp までのビルドアップ係数を内蔵する QAD-IE<sup>(4)</sup>を使用した。ビルドアップ係数の誤差は、40mfp まで 10% 以内、300mfp までファクター 2 程度<sup>(12)</sup>と評価されている。直接線は、格納容器を中心として 16 方位別に山による遮へいを考慮した。スカイシャイン線は、ビルドアップ係数・ラインビーム応答関数法とビルドアップ線束エネルギー分布を用いた FSKY4C<sup>(13-18)</sup>を使用した。FSKY4C のスカイシャイン線の計算誤差は 50% 以内<sup>(19)</sup>と評価されている。格納容器放射線被ばく線量の計算は、16 方位別・距離別に計算し、単位線源あたりの線量率でデータベース化し、予測線量等値線を作成する際に内挿補間と積分計算を行った。予測線量等値線図は、放出された放射性物質によるブルーム被ばく線量と格納容器放射線被ばく線量を

合計することにより作成した。その結果、高速計算性能を維持したまま、格納容器放射線の影響を考慮することが可能となった。

### 4.2 公衆防護措置範囲予測結果の比較

R-Cubic システムを用いて、円筒型コンクリート遮へいと鋼製格納容器を持つ PWR を対象として、原子炉冷却材喪失時 ECCS および格納容器スプレイ作動失敗シーケンスの予測線量と公衆防護措置範囲を計算した。気象条件は風向を北 ± 1/16 方位、風速 2m、大気安定度 C とした。放射性物質の放出は格納容器最高使用圧力以下のときは設計漏洩率、超過後は設計漏洩率の 100 倍と仮定した。図 8 に手法見直し前後の外部全身被ばく予測線量等値線図

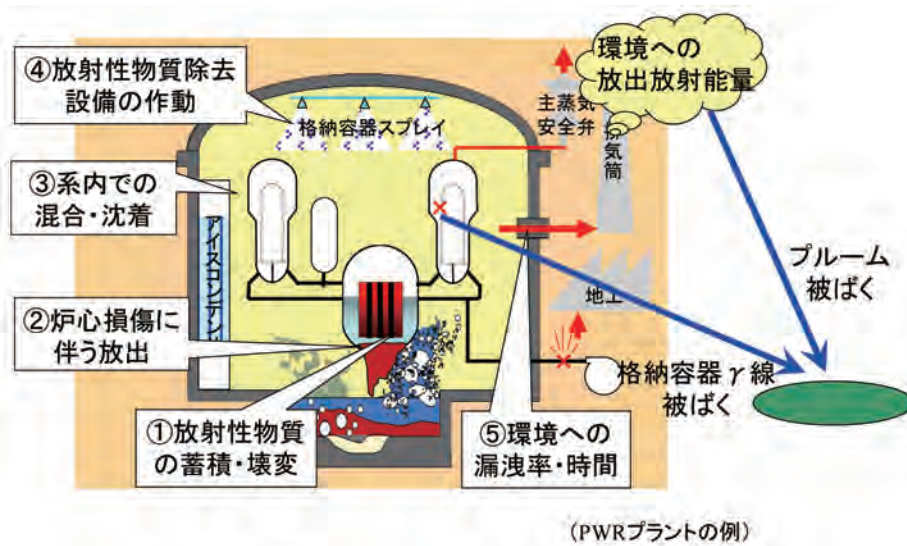


図 7 R-Cubic システムの計算手順

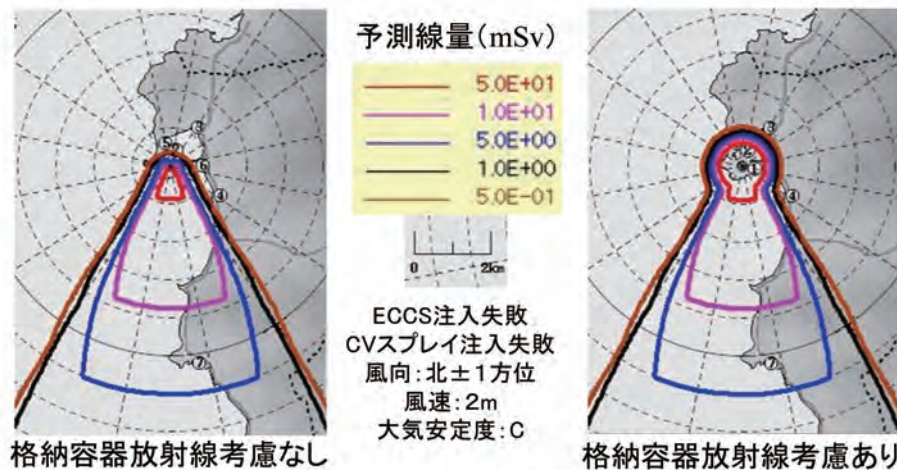


図 8 手法見直し前後の外部全身被ばく予測線量等値線図

を、図9に手法見直し前後の公衆防護措置範囲の予測結果を示す。

これらの結果から、見直し前は格納容器を起点としてほぼ扇形に広がりを見せていたが、見直し後は格納容器を中心とした同心円が加わっている。プラント固有の設計に依存するが、格納容器放射線被ばくの影響を考慮した場合は、スカイシャイン線の影響により、同心円状に防護措置範囲が現われる場合が認められた。

### 4.3 考察

円筒型コンクリート遮へいと鋼製格納容器を持つPWRを対象として、原子炉冷却材喪失の仮想事故条件を設定し、改良前後における炉心損傷後の24時間の予測線量と防護措置範囲を求めた。計算結果を図10に示す。これより、仮想事故条件下におい

ても、プラントによっては敷地境界付近に公衆防護措置が必要となる区域が発生することがわかる。すなわち、敷地境界付近では炉心損傷が発生した場合は、環境への放出とは無関係に早期に防護措置が必要となる場合があることを示唆している。

原子炉冷却材喪失事故の仮想事故評価条件を用いて、いくつかの円筒型コンクリート遮へいと鋼製格納容器を持つPWR及びドーム型コンクリート遮へいと鋼製格納容器を持つPWRの仮想事故時の外部被ばく実効線量とR-Cubicシステムによる計算結果を比較した。R-Cubicシステムの計算条件は、全炉心損傷、風向北±1/16方位、風速1～10m、大気安定度A～Fとし、事故発生24時間後まで実施した。評価地点は、仮想事故が対象とする低人口地帯の評価距離が明記されていないため、風下380m、680m、880m、1.13kmの4種類とした。比較にあたり、仮想事故の格納容器放射線による被ばく線量

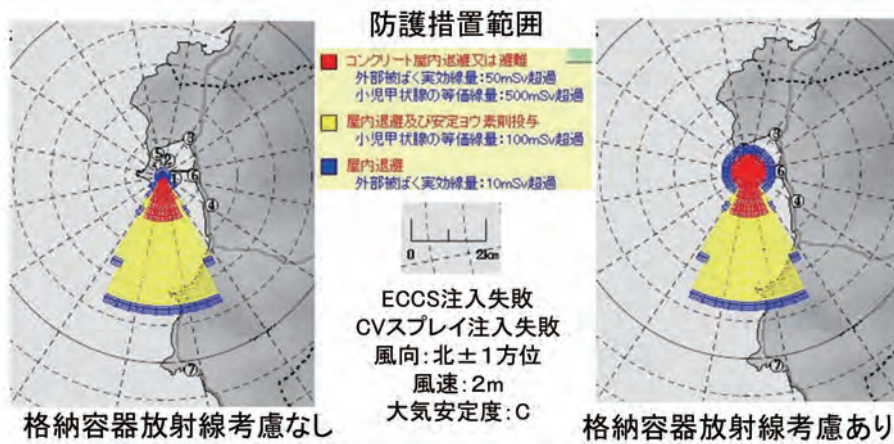


図9 手法見直し前後の公衆防護措置範囲の予測結果

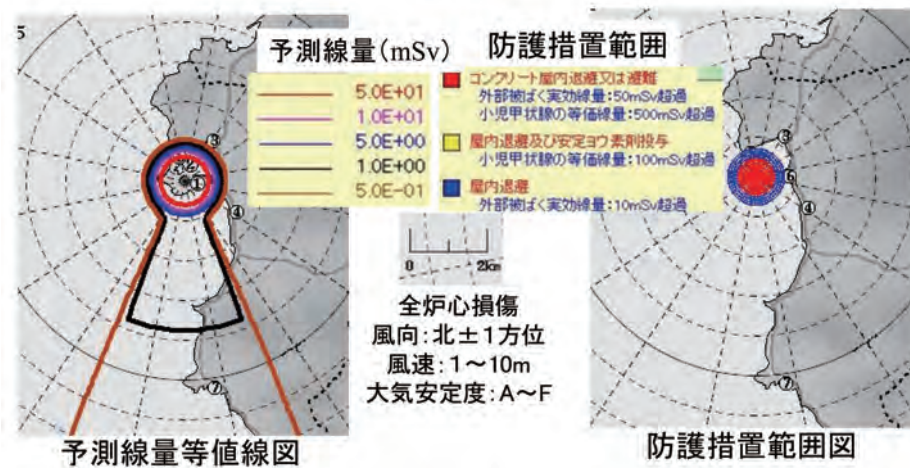


図10 仮想事故条件下における計算結果

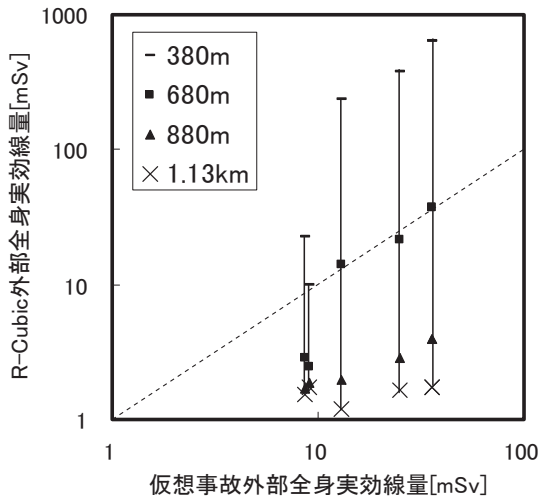


図 11 外部全身実効線量の比較

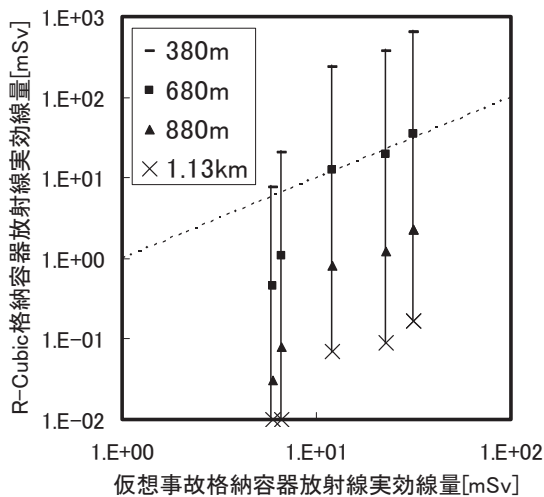


図 12 格納容器放射線実効線量の比較

は 0.6 倍 (24 時間分の被ばく線量) に換算した。外部全身実効線量の比較結果を図 11 に、格納容器放射線実効線量の比較結果を図 12 に示す。この結果より、仮想事故の外部全身実効線量および格納容器放射線実効線量の評価地点は、プラント個々に異なっているものの距離 380m ~ 1.13km の間に存在していることが示唆され、発電所の敷地境界の設定状況から概ね一致しているものと推察される。よって、R-Cubic システムは仮想事故の外部被ばく実効線量を良く再現できていると考えられる。

## 5. 結言

立地指針に基づき評価された非居住区域と低人口地帯における事故発生後 30 日間の被ばく線量と防

災指針が定める防護措置の目安を比較した。その知見に基づき、R-Cubic システムの見直しを行い、手法の妥当性を確認した。

以下に得られた知見を示す。

- (1) 仮想事故では敷地境界付近において防護措置が必要となるプラントがいくつか見られ、その要因としては格納容器放射線によるものが支配的である。
- (2) 格納容器放射線の寄与が大きいプラントでは、スカイシャイン線が支配的である。
- (3) プラント固有の設計に依存するものの、格納容器内線源の影響を考慮した場合は、スカイシャイン線の影響により、同心円状に防護措置範囲が現われる場合があることを確認した。
- (4) 仮想事故条件下においては、炉心損傷が発生した場合、プラント固有の設計に依存するものの、環境への放出とは無関係に敷地境界付近において早期に防護措置が必要となる可能性があることを示した。

## 文献

- (1) 原子力安全委員会, “原子力施設の防災対策について,” 原子力安全委員会安全審査指針集, 改訂 13 版, 大成出版 (2011).
- (2) 原子力安全委員会, “原子炉立地審査指針及びその適用に関する判断のめやすについて,” 原子力安全委員会安全審査指針集, 改訂 13 版, 大成出版 (2011).
- (3) 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,” 原子力安全委員会安全審査指針集, 改訂 13 版, 大成出版 (2011).
- (4) 吉田至孝, 山口勝義, “ガンマ線遮へい計算コード QAD の改良,” 原子力学会 2006 秋の大会予稿集, E57 (2006).
- (5) 吉田至孝, 山口勝義, 坂本幸夫, “ガンマ線スカイシャイン計算コード G33 の改良,” 原子力学会 2007 春の年会予稿集, B43 (2007).
- (6) 吉田至孝, “原子力防災用公衆防護措置範囲迅速予測技術の開発 - (1) 放射性物質放出量の予測手法 -,” 原子力学会 2007 秋の大会予稿集, F48 (2007).
- (7) 鈴木政時, “原子力防災用公衆防護措置範囲迅速予測技術の開発 - (2) 被ばく線量と防護措置範囲の予測手法 -,” 原子力学会 2007 秋の大会予稿集, F49 (2007).



- (8) 吉田至孝, “原子力防災用公衆防護措置範囲迅速予測技術の開発 – (3) 放射性物質放出量の比較計算 –,” 原子力学会 2008 春の年会予稿集, B30 (2008) .
- (9) 鈴木政時, “原子力防災用公衆防護措置範囲迅速予測技術の開発 – (4) 予測線量の比較計算 –,” 原子力学会 2008 春の年会予稿集, B31 (2008).
- (10) 吉田至孝, “原子力防災用放射線エネルギー迅速予測技術の開発,” INSS JOURNAL Vol.14, pp.346-360, (2007).
- (11) M. Suzuki, Y. Yoshida, “Development of a rapid prediction technology for emergency protection area at nuclear accidents”, HARMO12, Cavtat Hrvatska, Vol.43, pp.500-504 (2008).
- (12) 吉田至孝, 清水彰直, 放射線遮へい計算に用いるガンマ線ビルドアップ係数とその GP フィッティングパラメータ, INSS Monographs, No.2 (2006).
- (13) 吉田至孝, 清水彰直 他, “ガンマ線スカイシャイン高速計算法とその評価 – (1) 全体概要および大気中輸送計算の手法 –,” 原子力学会 2010 春の年会予稿集, C30 (2010).
- (14) 清水彰直, 播磨良子 他, “ガンマ線スカイシャイン高速計算法とその評価 – (2) 大気中輸送計算法の精度評価 –,” 原子力学会 2010 春の年会予稿集, C31 (2010).
- (15) 清水彰直, 播磨良子 他, “ガンマ線スカイシャイン高速計算法とその評価 – (3) ガンマ線遮へい透過計算の手法 –,” 原子力学会 2010 秋の大会予稿集, H38 (2010).
- (16) 吉田至孝, 清水彰直 他, “ガンマ線スカイシャイン高速計算法とその評価 – (4) ベンチマーク体系での精度評価 –,” 原子力学会 2010 秋の大会予稿集, H39 (2010).
- (17) 吉田至孝, 清水彰直, “ガンマ線スカイシャイン高速計算プログラム (FSKY4C) の作成,” INSS JOURNAL Vol.16, pp.244-253, (2009).
- (18) 吉田至孝, 清水彰直, “ガンマ線スカイシャイン高速計算プログラムの性能比較,” 放射線安全管理学会 2010 学術大会予稿集, 1A2-2 (2010).
- (19) Y. Yoshida, A. Shimizu, et. al., “Development and evaluation of fast calculation method for gamma ray skyshine dose using data libraries” , Nucl. Sci. Technol. Vol.48, No.7, pp.1057-1068 (2011).