

シビアアクシデント時原子力発電所内線量評価システムの改良 線量率換算係数の導入とアクセスルート編集機能の追加

Improvement of Dose Evaluation System for Employees at Severe Accident in a Nuclear Power Plant

- Introduction of the Dose Rate Conversion Coefficient & Addition of the Access Route Edit Function -

佐々木泰裕 (Yasuhiro Sasaki)* 南 則敏 (Noritoshi Minami)* 吉田 至孝 (Yoshitaka Yoshida)*

要約 原子力安全システム研究所では、発電所構内の線量率分布の把握と現場作業等による被ばく線量の把握を目的として、シビアアクシデント時の原子力発電所内線量評価システムを開発してきた。このシステムは、任意の評価点の線量率を評価可能、線源の変化を考慮した任意の時刻の線量率を評価可能、構内の線量率マップが表示可能、移動の際のアクセスルートに沿った被ばく線量が評価可能、という特徴を有しており、被ばく線量面からのアクシデントマネジメントガイドラインの検討等にも活用できるものである。

このシステムの線量評価機能の高度化を目的として、線量率換算係数の導入とアクセスルート編集機能の追加の改良を実施した。線量率換算係数の導入によって、発電所内線量率マップの計算時間が約20秒程度に短縮されるとともに、任意の評価点における線量率時間変化評価機能も追加された。さらに、アクセスルート編集機能の追加によって、ルート変更の場合の再評価を容易に行うことが可能になった。

キーワード 原子力発電所, シビアアクシデント, 被ばく線量評価, 線量率換算係数, アクセスルート編集機能

Abstract Institute of Nuclear Safety System, Inc. had developed the dose evaluation system to evaluate the radiation dose of employees at severe accident in a nuclear power plant. This system has features, which are (i) the dose rate of any evaluation point can be evaluated, (ii) the dose rate at any time can be evaluated in consideration of the change in the radioactive source, (iii) the dose rate map in the plant can be displayed (iv) the dose along the access route when moving can be evaluated, and it is possible to use it for examination of the accident management guideline on the dose side etc..

To upgrade the dose evaluation function of this system, the improvements had been done which were introduction of the dose rate conversion coefficient and addition of the access route edit function. By introducing the dose rate conversion coefficient, the calculation time of the dose rate map in the plant was shortened at about 20 seconds, and a new function to evaluate time-dependent dose rate of any evaluation point was added. By adding the access route edit function, it became possible to re-calculate dose easily at the route change.

Keywords nuclear power plant, severe accident, dose evaluation, the dose rate conversion coefficient, access route edit function

1. まえがき

原子力安全システム研究所 (以下「INSS」という) では、平成12年度より原子力発電所におけるシビアアクシデント発生時の発電所内線量評価システムの開発を進めている。

このシステムは、アクシデントマネジメントの実施、被災者の救助活動、故障機器の復旧作業、

従業員避難誘導等に伴う、従業員の発電所構内移動時の線量評価を行うことができ、被ばく線量を低く抑えるという面からのアクシデントマネジメントガイドラインに関する検討等にも活用できるものである。

これまでに、プロトタイプの開発に続いて、移動の際の滞在が考えられる区画を各建屋内の機器室、通路単位で設定した線量評価区画の拡張や遮へい計

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

算体系の簡略化による計算機能の効率化、建屋内スカイライン線考慮などの改良等を実施してきている。(1)~(3)

具体的な評価の流れは、MAAPコード⁽⁴⁾を用いて評価したシビアアクシデントの事象進展と、システムに内蔵している炉内蓄積量DBから、発電所内各部の放射線源の状況を解析する。そして、その放射線源の強度ならびに線源位置と従業員が移動の際に滞在する評価点との間に存在する遮へい壁等の設置状況から、内蔵している遮へい計算コードQAD-IE⁽⁵⁾⁽⁶⁾およびスカイライン線量計算コードG33-IE⁽⁵⁾⁽⁶⁾を用いて、直接線およびスカイライン線線量率を求める。それらの線量率と各評価点における滞在時間との積から被ばく線量を評価するものである。

本コードシステムは次のような特徴を有している。

- 建屋の遮へい構造物のモデル化により線量評価区画内の任意の評価点の線量率を評価できる
- シビアアクシデント時の線源の変化を追跡し、任意時刻の線量率が評価可能である
- 全線量評価区画に設定した代表評価点の線量に基づく構内の線量率マップが作成できる
- 構内のアクセスルートを設定することにより、従業員の被ばく線量が推定可能である

ここで線量率マップとは、線量率を建屋の各フロアまたは建屋外に設定した線量評価区画毎に、代表評価点の線量率の高さに応じて6段階に色分けして表示し、視覚的に確認することができるもので、その例を図-1に示す。この図では、赤色、黄色、青色の順に線量率が高くなる線量評価区画を示している。



図1 線量率マップ例

このような特徴を持つ線量評価システムではあったが、課題も残っていた。

例えば、プロトタイプ開発に引き続き実施した、個別プラントの線量評価研究に伴う線量評価区画の拡張等によって、1プラント当たりの線源数は約130~180になり、これに対する評価区画数も建屋外で約40、建屋内では約180~300に上っている。

このように多くの線源に対する多くの評価点の線量評価を行う場合、単純には数万回の遮へい計算を実施する必要があることから、これまでも線量計算機能の効率化を進めてきたものの、例えば建屋内全評価区画の線量率マップの計算には、1ケース当たり約20分間を要していた。

また、線量評価システムの改良の進展に伴い、新しい評価機能のニーズも高まってきた。

その一つが、任意の評価点の線量率の時間変化を評価する機能である。従来版のシステムでは線量率の時間変化を評価するには、評価時刻を変えて多数回の評価を実施し、その結果を集約して手作業でグラフ化する必要があり、線量率の時間変化を効率よく評価する機能を有していなかった。

さらに、発電所内移動の際のアクセスルート検討を行う場合、ルートは複数考えられるものの、その一部を変更した評価を行う場合にも、はじめに戻って全アクセスルートの設定を行う必要があり、アクセスルートの一部を変更した場合の評価を行うには効率的ではなかった。

本研究では、線量評価の高速化と上記のような課題の克服を目的として、次のような線量評価システムの改良を実施した。

- 線量率換算係数の概念の導入による、線量率マップ計算の高速化および任意の評価点における線量率時間変化評価機能の追加
- アクセスルートの一部変更による再評価機能の追加

2. 線量評価システムの改良

改良版システムの概念を図 - 2 に示す。

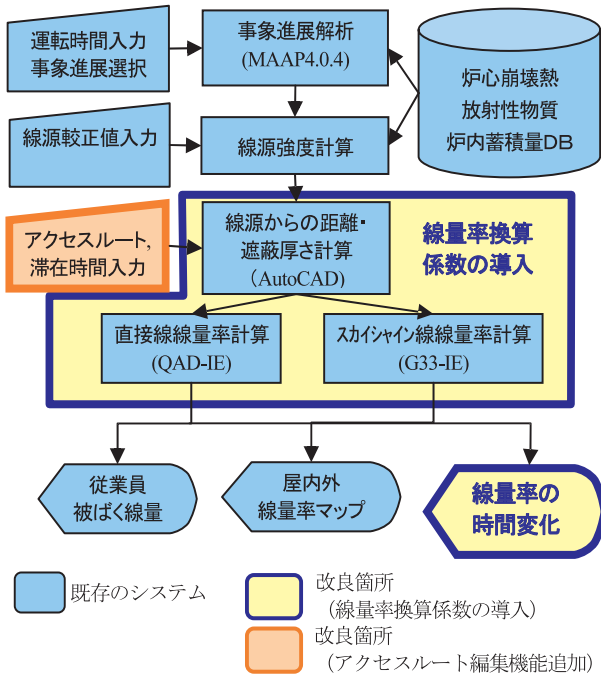


図2 改良版システムの概念図

改良版のシステムでは、単位線源による線量率を線量率換算係数として用いるための機能を追加するとともに、線量率の時間変化評価機能を追加した。また、アクセスルート編集機能を追加した。

以下に改良の概要について具体的に説明する。

2.1 線量率換算係数の導入

直接線の線量評価を例にすると、既存のシステムでは(1)式に示すように、時刻 t における線源 n のエネルギー群 m の線源 $G_{nm}(t)$ に対して、評価点におけるガンマ線強度 $\phi_{nm}(t)$ を評価し、(2)式に示すように実効線量換算係数 f_m を乗じて n, m について合算することにより線量を求めていた。

$$\phi_{nm}(t) = \int_v B_m \times U_d \times U_r \times G_{nm}(t) dV \quad (1)$$

$$S_d(t) = \sum_n \sum_m f_m \times \phi_{nm}(t) \quad (2)$$

- B_m : ビルドアップ係数 (散乱効果補正係数)
- f_m : エネルギー群 m の実効線量換算係数
- S_d : 評価点における直接線量率 (Sv/h)

ここで、 U_d, U_r は線源から評価点までの距離と媒質による減衰で、次式で表される。

$$U_d = \exp\{-\left(\mu_{air} r_{air} + \mu_{conc} r_{conc}\right)\}, U_r = 1/\left\{4\pi\left(r_{air} + r_{conc}\right)^2\right\}$$

- μ_{air} : 空気の線減衰係数
- μ_{conc} : コンクリートの線減衰係数
- r_{air} : 空気の等価遮へい厚 (m)
- r_{conc} : コンクリートの等価遮へい厚 (m)

改良版では(1)式を下(1)'式のように変形し、線源を単位線源強度 G_{nm0} と時間変化成分 $F_{nm}(t)$ に分離して考慮する。そして、あらかじめ単位線源強度に対する評価点におけるガンマ線強度 ϕ_{nm0} を評価し、これに実効線量換算係数 f_m を乗じて線量率換算係数 ($f_m \times \phi_{nm0}$) とする。これにより、以降の線量評価においては、(2)'式のように、この線量率換算係数 ($f_m \times \phi_{nm0}$) と線源の時間変化成分 $F_{nm}(t)$ との積によってのみ評価点における線量率を評価することができるようになるものである。

$$\phi_{nm0} \cdot F_{nm}(t) = \int_v B_m \times U_d \times U_r \times G_{nm0} dV \cdot F_{nm}(t) \quad (1)'$$

$$S_d(t) = \sum_n \sum_m f_m \times \phi_{nm0} \cdot F_{nm}(t) \quad (2)'$$

今回のシステム改良では、あらかじめ全評価区画の代表評価点の線量率換算係数をデータベース化しておき、代表評価点の線量率を計算する際には、データベースを用いて行うようにした。これにより、線量率マップ計算の高速化等、線量評価の効率化が図られることとなった。

また、任意の評価点に対しても、線源と評価点の線量率から求められる線量率換算係数を用いて、線量率時間変化 $S_d(t)$ が1回の計算で直接評価できるようにシステムを改良した。

これらの改良により、従来版では必要だった多数回の評価とその結果の集約作業が不要になり、任意の評価点における事象進展に伴う線量率の時間変化の評価が容易になった。

2.2 アクセスルート編集機能の追加

退避や機器の復旧等のためのアクセスルートに沿った線量評価を行う際に、従来版のシステムでは図 - 3 に示すように、評価時刻設定 評価点設定 計算という流れになっていた。

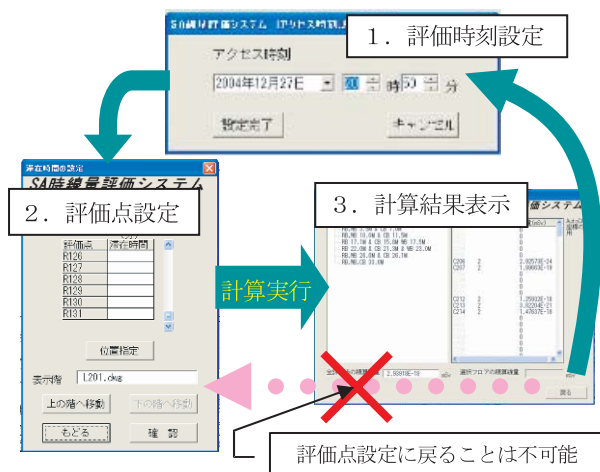


図3 アクセスルートに沿った線量計算(従来版)

このように、従来版では計算結果を見て一部のアクセスルートを変更しようとする場合、評価点設定画面に戻ることができない上、評価点の一部を変更する等の編集もできない仕様となっていた。

そのため、一部のアクセスルート変更の際も再度全評価点を設定し直す必要があり、アクセスルートを変更した場合の再評価を行うには効率的ではなかった。

これに対して、図 - 4 に示すようにシステムを改良した。

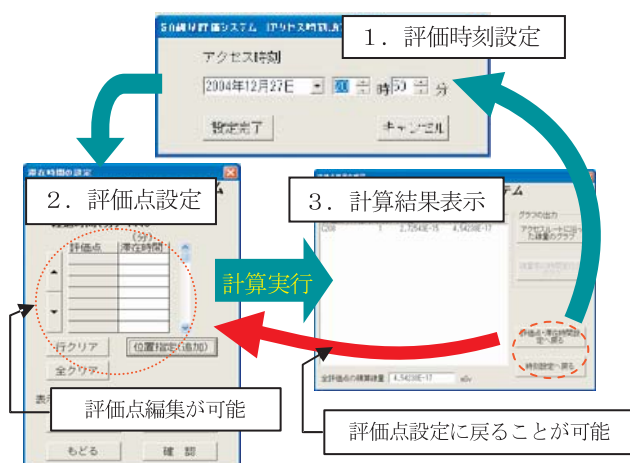


図4 アクセスルートに沿った線量計算(改良版)

改良版では、評価時刻設定 評価点設定 計算という一連の流れの後、評価時刻設定画面に加えて評価点設定画面にも戻ることができるようにした。

さらに評価点の設定においては、前回評価した地点の情報を元に、評価点の追加や削除、順番の入れ

替えを行うことができるようにした。

これらの改良により、容易にアクセスルートの再設定ができ、アクセスルートを変更した場合の再評価が容易にできるようになった。

3. 改良の成果

線量率換算係数の導入により、線量率マップ計算時間が大幅に短縮されるとともに線量率時間変化評価機能が追加された。また、アクセスルート編集機能も追加され線量評価が効率的に実施できるようになった。

以下にその適用事例を示す。

3.1 線量率換算係数の導入

3.1.1 線量率マップ計算の高速化

従来版と改良版で、線量率マップを計算するのに要した時間の比較例を表 - 1 に示す。改良版ではあらかじめ代表評価点の線量率換算係数をデータベース化しているため、従来版に比べて線量率マップ計算に要する時間が1/25～1/50と大幅に短縮され、約20秒で計算可能となった。

表1 線量率マップ計算に要する時間の比較

	プラントX	プラントY
従来版	8分32秒	17分10秒
改良版	18秒	21秒

CPU : Pentium 4 , 3.4GHz

プラントXとプラントYで、従来版での計算時間に差が見られるのは、プラントYの方が評価区画と線源の数が多く、遮へい計算の回数に差があったためであるが、改良版では計算時間の差はほとんどなくなった。

このように効率化された線量率評価機能を用いて、ほぼ同規模のプラントXとプラントYについて、小破断冷却材喪失事故(LOCA)を起因とし、再循環失敗からシビアアクシデントに至る事故時に、炉心損傷1時間後の機器復旧を想定した建屋内の線量率評価を試みた。

今回の試評価では、プラントXとプラントYで、非常用炉心冷却系(ECCS)と格納容器スプレイ系それ

それぞれについて、A系統またはB系統が復旧した場合の全評価区画の代表評価点の線量率、合計8ケースを改良版の線量評価システムを用いて評価した。

同様の作業は、従来版のシステムでも可能ではあったが、今回のように8ケースの評価を行うには、約4時間の計算時間を必要とした。今回の改良によって、計算時間が約3分以内と大幅に短縮された。

全代表評価点の線量率を高い順に並べて、順位が100位までの線量率をグラフ化したのが図-5および図-6である。

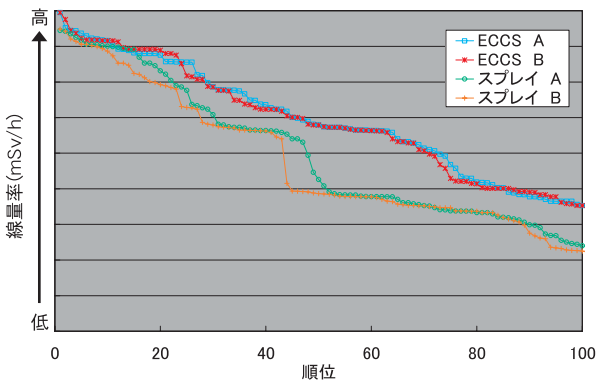


図5 機器復旧時の線量率分布 (プラントX)

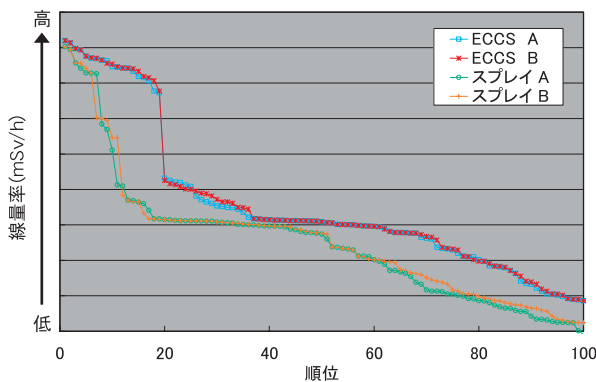


図6 機器復旧時の線量率分布 (プラントY)

この評価からは、それぞれのプラントで、機器の復旧によって線量率が高くなる区画の数は、復旧する機器がECCSか格納容器スプレイ系かに依存しており、A系統とB系統による差はあまりないことがわかった。

ただし、プラントXはプラントYに比べて、系統間で線量率が高くなる区画の数に少し差が見られる。

例えば格納容器スプレイを復旧する場合には、B系統に比べてA系統を復旧させた場合の方が、線量率が高くなる区画の数が増加することがこの図からわ

かる。これはA系統の格納容器スプレイ配管が、B系統の配管に比べて評価区画に近いエリアを通過しているため、その配管が線源となって線量率が高くなる区画の数が増加しているためである。

また、例えば線量率が100mSv/h以上となるような区画の数は、格納容器スプレイ復旧の場合で、プラントXの約50に対して、プラントYは約10とプラントXの方がプラントYに比べてやや多くなっている。評価区画の設定がプラントXとプラントYで異なるため定量的な評価を行うことはできないが、立ち入り制限が必要な区画がプラントXの方が比較的多い傾向にある。このことは現場立ち入り時の立ち入り制限区画の設定判断に影響する可能性がある。

3.1.2 線量率時間変化評価機能の追加

任意の評価点の線量率の時間変化を評価する機能を用いて、シビアアクシデント時の建屋外の線量率の時間変化を評価したものが図-7である。

この図では、建屋外の9地点(A～I)について、炉心損傷直後(約320分頃)の線量率上昇と、その後の線源の減衰による線量率低下の時間変化を示している。

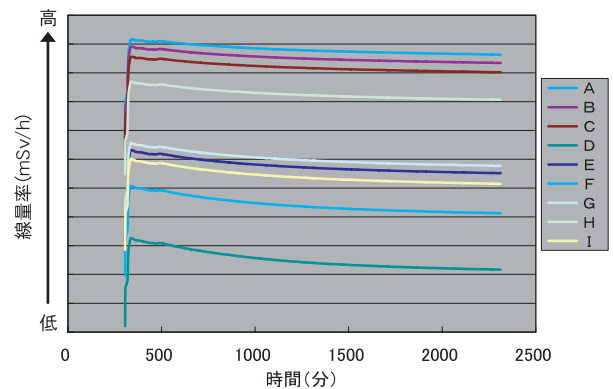


図7 線量率の時間変化 (建屋外)

従来版でこのようなデータを得ようとした場合、評価時刻を変えて多数回の計算を行い、得られた多数の線量率評価結果を集約する作業を行う必要があり、100回の計算に約5時間程度必要であった。

改良版では、線量率換算係数と時々刻々と変化する線源強度から、長くても約10分程度の1回の計算で最大20地点の線量率時間変化が得られるようになり、作業に要する時間が大幅に短縮された。

3.2 アクセスルートの編集機能の追加

シビアアクシデントに至るシナリオを対象に、炉心損傷直後に図 8および図 - 9のように ~ の5地点を巡る順序を変えた場合の線量評価を試みた。

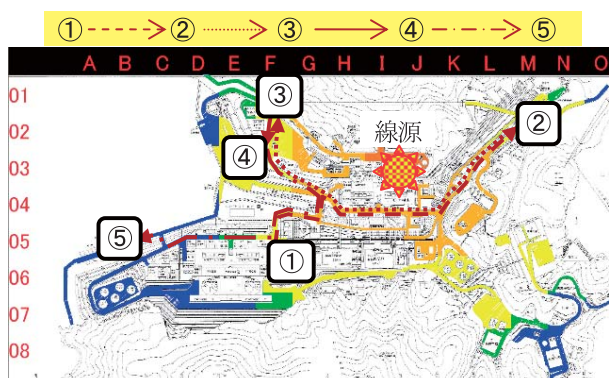


図8 アクセスルート図 (ケース)

ケース は、地点 から線源となる格納容器付近を經由して地点 に達し、その後そのルートに戻って地点 , , に至るルートである。

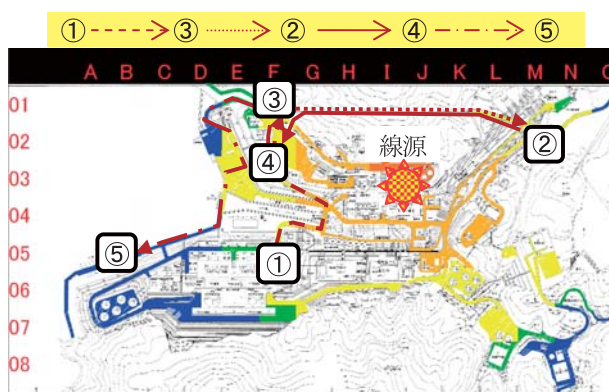


図9 アクセスルート図 (ケース)

一方、ケース は地点 から地点 に至り、発電所外の一般道路を經由して地点 に達し、さらにその道に戻って地点 , に至るルートである。

ケース のルートを通った場合の線量評価結果を図 - 10に示す。評価では各区画を2分程度で通過すると想定し、全行程に要する時間は58分である。

評価結果では、 - 間および - 間にある、線源に近い区画 (H-04,I-04,J-04,K-04,K-03) を通る際に受ける線量が高くなっており、移動の際に受ける総被ばく線量は約110mSvとなった。

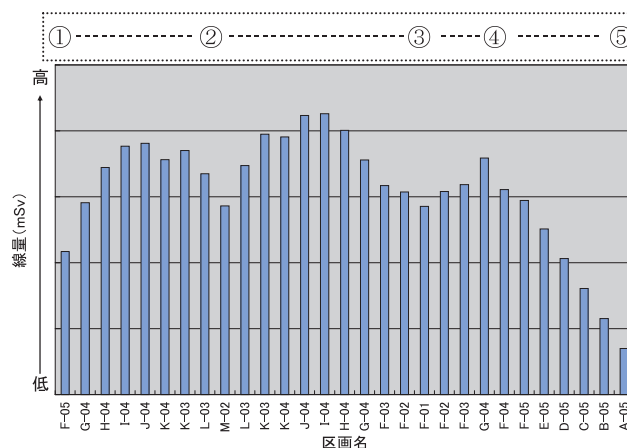


図10 線量評価結果 (ケース)

ケース のルートを通った場合の線量評価結果を図 - 11に示す。評価では各区画を2分程度で通過すると想定したが、 - 間、 - 間を移動する際のトンネルは評価区画外のため、トンネル移動の時間相当分10分をF-01区画の滞在時間に加えており、全行程に要する時間は56分であり、ケース と大きな差はない。

評価結果では、ケース は線源から離れた場所を通るため、移動の際に受ける総被ばく線量は約15mSvと、ケース とケース では7倍以上の差になることがわかった。

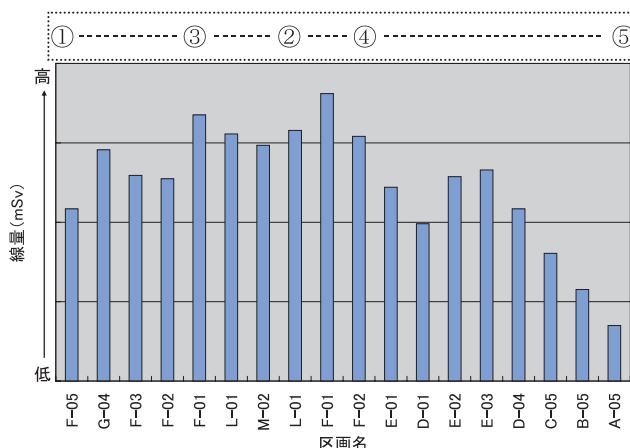


図11 線量評価結果 (ケース)

以上のように、本システムを用いることによって、シビアアクシデント時に発電所構内を移動する際のルートを、被ばく線量の観点から効率的に検討することができるようになった。

4. まとめ

INSSで開発したシビアアクシデント時発電所内線量評価システムに関して、線量率換算係数の概念を導入するとともに、アクセスルート編集機能を追加する改良を行った。

改良によって以下のような線量評価の効率化が図られた。

線量率マップの計算時間が、1ケース当たり約20秒と従来の1/25～1/50に大幅に短縮された。これによって、立ち入り制限区域の設定評価が効率的に行える見通しを得た。

従来は約5時間程度要していた線量率時間変化評価が、約10分程度の1回の計算で可能になった。

ルート変更に関する再評価が効率的に実施できるようになった。試評価として発電所構内移動時の線量評価を行い、ルートによっては7倍以上の差が出る場合があることを確認した。

今後は、アクシデントマネジメント実施時の代表的なアクセスルートのデータ格納機能追加等、さらなるシステムの効率化を図るとともに、被ばく線量面からのアクシデントマネジメントガイドラインに関する検討に活用する予定である。

テムの改良 - IE法によるビルドアップ係数の整備とQAD, G33両コードの深層透過問題への対応 - , INSS Journal, Vol.11, p.229 (2004).

文献

- (1) 吉田至孝, 入江隆, 郡山民男, 工藤清一, 西村和哉, "シビアアクシデント時の発電所内被ばく線量評価手法の検討," INSS Journal, Vol.8, p.174 (2001).
- (2) 吉田至孝, 入江隆, 郡山民男, 工藤清一, 西村和哉, "シビアアクシデント時従業員被ばく線量評価手法の検討," 日本原子力学会和文論文誌, Vol.1, pp.85-95 (2002).
- (3) 恩田隆司 吉田至孝, 工藤清一, 西村和哉, "シビアアクシデント時原子力発電所内線量評価システムの改良," INSS Journal, Vol.10, p.241 (2003).
- (4) "MAAP4 Modular Accident Analysis Program User's Manual," EPRI (1994)
- (5) Y.Sakamoto, S.Tanaka, "QAD-CGGP2 AND G33-GP2 : REVISED VERSIONS OF QAD-CGGP AND G33-GP," JAERI-M 90-110, Japan Atomic Energy Research Institute, (1990).
- (6) 恩田隆司 吉田至孝, 清水彰直, 坂本幸夫, "シビアアクシデント時原子力発電所内線量評価シス