

作業線量低減に向けた格納容器内線量率評価ツールの開発

Development of Evaluation Tool of Radiation Dose Rate in Primary Containment Vessel for Reduction of Radiation Exposure

中部電力(株) 電力技術研究所 稲垣 博光 Hiromitsu INAGAKI Member
(株)テクノ中部 葛谷 敏男 Toshio KUZUYA

We are developing a radiation dose rate evaluation tool for work areas in the primary containment vessel (PCV) of the Hamaoka BWR plant in order to reduce radiation exposure to workers. The evaluation tool is composed of two calculation codes; a water chemistry code and a radiation dose rate code. The radiation dose rate calculates radiation maps of the work areas in the PCV of Hamaoka plant. We compared measured values with calculated values in order to improve the accuracy of the tool. In order to demonstrate the tool, we evaluated the effectiveness of the introduction of additional shields to Hamaoka-3.

Keywords: Dose reduction, Radiation management, Dose rate map, Calculation code, 3D display

1. 緒言

沸騰水型原子力発電所（BWR）の定期点検期間中における放射線被ばくの多くは、原子炉格納容器内部の作業で生じる。格納容器内部は、作業場所として、狭く線量率が高いという特徴を有する。作業線量を低減するためには、配管内面への放射能蓄積抑制による放射線源の低減や放射線管理面（時間、距離、遮蔽）による対策が有効である。これに加えて、狭く高線量率であるという特徴から、作業環境の放射線分布を把握することも重要である。

格納容器内の放射線分布を把握する方法としては、各フロアに数点定めた場所の線量率を測定し、その測定値から簡易的に平面分布図を作成することが一般的である。しかし、格納容器内部には放射線源となる配管が入り組んでおり、遮蔽計算が複雑になるため、平面分布図が正確に作成されているとは言い難い。また、作業内容や遮蔽設置の検討には、当該フロアの放射線源だけでなく上下階の放射線源の考慮が不可欠であり、平面分布図だけでは十分でない。作業線量低減に取り組むために、格納容器内部にある全ての放射線源、構造物や遮蔽物を対象とした3次元での計算が可能な評価ツールが有効と考える。

プラント運転中には、格納容器内に立ち入ることができないため、定期点検時の作業計画段階で放射線分布を把握する方法としては、前回の定期点検時の線量率に、今回/前回の運転中の原子炉水放射能濃度比を乗じることが一般的である。配管への放射能蓄積は、材質や表面処理など系統によって、また同じ系統であっても水平/垂直/曲部等で異なり一

様ではないため、原子炉水中の放射能濃度比だけで評価する方法には限界がある。放射能蓄積メカニズムを考慮して個々の配管に適切に放射線源を設定できる評価ツールが有効と考える。

これらの点を踏まえ、格納容器内線量率評価ツールを開発した。このツールは、プラントの定期点検停止前に、作業環境となる格納容器内部の放射線分布を計算により予測評価するもので、被ばく低減の検討に本ツールを活用するメリットとして、以下の点が挙げられる。

【事前予測】定期点検開始前の作業計画段階において、作業環境の詳細な放射線分布（平面分布、立体分布）を把握できるため、有効な被ばく低減策を立案できる。

【対策評価】水質管理面（亜鉛注入や化学除染等）や放射線管理面（仮設・恒久遮蔽設置等）の効果を定量的に計算評価できるため、被ばく低減対策の導入を支援できる。

【情報共有】格納容器内部の構造物と放射線分布を3次元で感覚的に確認できるため、被ばく低減に関する放射線管理側と保守側あるいは作業員間の情報共有を支援できる。

格納容器内線量率評価ツールは、放射能蓄積の計算を行う水化学コード（ACTTUBE）と線量率分布の計算を行う線量率コード（RADTUBE）で構成される。いずれも核となる部分の開発は終わっており（詳細はそれぞれ文献[1]、[2]を参照されたい。）、実機データを用いたPDCAにより、評価精度の向上や機能改良を図っている。本稿では、作業線量低減に向けた取り組みの支援ツールとして、RADTUBEの結果表示機能の改善を図ったRADTUBE-3Dを中心に、その概要・評価精度と、被ばく低減活動における評価事例について述べる。

連絡先: 稲垣博光, 〒459-8522 名古屋市緑区大高町
字北関山 20-1, 中部電力(株)電力技術研究所, 電話:
050-7772-2836, E-mail: Inagaki.Hiromitsu@chuden.co.jp

2. RADTUBE-3D の概要

RADTUBE-3D の構成を Fig.1 に示す。主要配管の放射能蓄積量をもとに放射線源分布を設定し、構造物データを用いて遮蔽計算を行い、計算結果を 2 次元あるいは 3 次元の放射線分布で表示する。

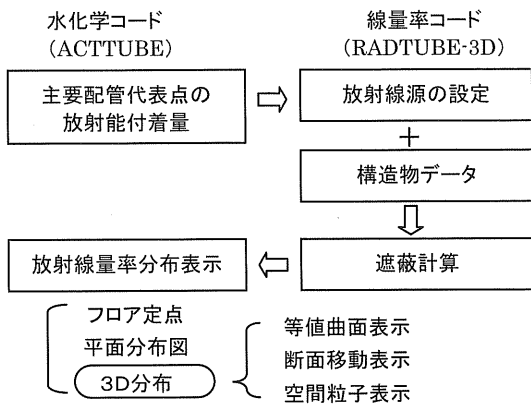


Fig.1 RADTUBE-3D の構成

2.1 放射線源の設定

格納容器内の放射線環境は、再循環系や冷却材浄化系等の配管の内表面に放射性腐食生成物が蓄積し、それが複数の放射線源となって形成される。放射線源として最も影響の大きい再循環系配管の模式図を Fig.2 に示す。これら配管への放射能蓄積量^{*}は、水化学コード ACT-TUBE で計算する^[1]。

(※ 放射性核種は ⁶⁰Co, ⁵⁸Co, ⁵⁴Mn, ⁶⁵Zn, ⁵⁹Fe, ⁵¹Cr を考慮)

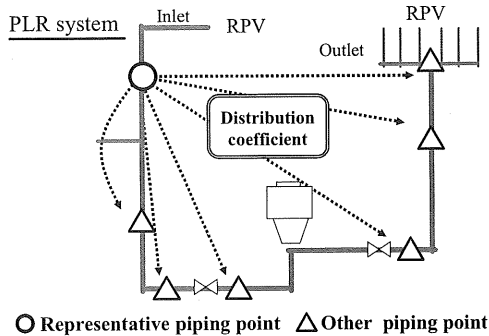


Fig.2 分配係数

格納容器内部の全体にわたる放射線分布を計算するためには、放射線源となる全ての配管内面の放射能蓄積に関するデータが必要であるが、ACT-TUBE で計算されるのは Fig.1 に示すように代表位置のみのデータである。そこで、次のような仮定をおいて、“分配係数”の概念を導入し、代表位置以外の全ての配管位置に対して設定した。

$$\text{分配係数} = \frac{\text{当該位置の放射能蓄積量}}{\text{代表位置の放射能蓄積量}}$$

分配係数導入にあたっての仮定

- ① 配管内面の放射能蓄積量と配管表面の線量率の比は、どの場所でも同じ。放射性核種の組成比も同じ。
- ② 分配係数は、プラント運転によって変化しない。(前回定期点検時と同じ)

浜岡原子力発電所では、プラントの試運転以降の格納容器内部を含む放射線サーベイによる配管線量率の測定データがある。仮定①のもと、これらの配管線量率の測定データを配管位置と履歴で整理して、全ての配管位置について分配係数を設定した。測定データのない配管位置については、系統・材質・配管径・水平/垂直別・位置関係から、類似した配管位置と同じ分配係数を設定した。

以上のようにして、ACTTUBE から得られる代表位置の放射能蓄積量と分配係数から、放射線源データを作成した。なお、仮定②では分配係数は不変であるとしているが、実際にはプラントの状況によっては変わる可能性もある(例えば、配管へのクラッド堆積あるいは除去)。この場合、最新の配管線量率の測定データとこれまでの履歴を確認して、必要に応じて分配係数を見直すことで対応する。

2.2 構造物の設定

格納容器内の放射線分布の計算には、前項の放射線源に加え、放射線の遮蔽物となる構造物のデータ(位置、材質、厚み、水の有無)が必要となる。これらの情報について、プラント建設時の図面や系統設計仕様書(新しいプラントでは CAD データ)および建設後の工事仕様書等を調査して、構造物データを作成した。格納容器内部の構造物は膨大で全てを対象とするのは不可能であるため、放射線分布の計算に必要なと思われる仮設・恒久遮蔽(鉛毛マット、鉄板)、ある程度の大きさ・厚みを有する配管・構造物(弁、ポンプ、ローカルクーラ)と床面・階段を対象とした。

構造物データは、円柱や球、直方体などの単純な幾何モデルの組み合わせとして作成される。例として、格納容器内部の 3 次元モデルを Fig.3 に示す。このようなモデルを用いて、現場写真との比較や、作業員へのインタビューを行い、データを確認した。

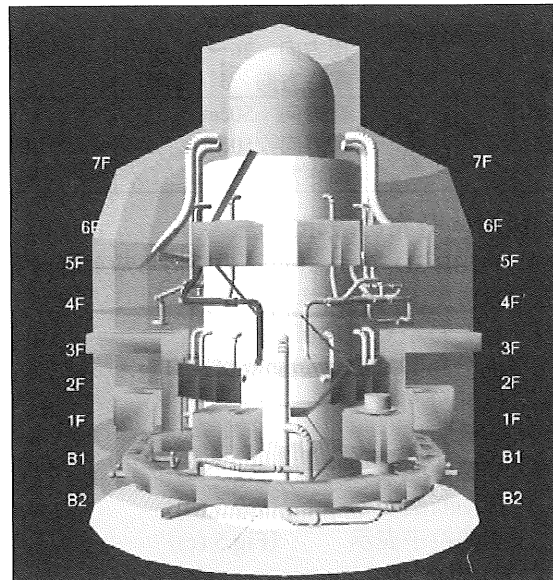


Fig.3 格納容器の 3 次元モデル

2.3 放射線分布の計算方法

格納容器内部の放射線分布は、次の手順で計算する。

- i. 格納容器内部をメッシュに分割する。各分割点が、線量率の評価位置となる。
- ii. ある配管位置の内面の放射性物質を、長さ・角度で“要素”に分割する。ここで放射性物質は、配管内面に一様に分布していると仮定する。
- iii. 放射線源の各要素と評価位置の間に存在する構造物の材質（鉄・鉛・コンクリート・水）・厚みを考慮して放射線遮蔽計算を行い、線量率寄与を求める。
- iv. 全要素の線量率寄与を足し合わせ、その配管位置の線量率寄与とする。
- v. 全ての配管位置について ii～iv を繰り返し、全ての配管位置の線量率寄与を足し合わせ、評価位置の線量率を求める。
- vi. 計算対象とする範囲の全ての評価位置について、ii～v を繰り返す。

放射線遮蔽計算は、放射線源、遮蔽物、評価位置が多数あることから、計算時間を考慮して、一般的な点減衰核法で行うこととした。ビルドアップ係数や換算定数は「放射線施設のしゃへい計算実務マニュアル 2000 年度版（原子力安全技術センター）」を参照した。計算時間は、評価対象範囲や分割数によるが、格納容器全体（うち高線量率エリアの B2～3 階）を対象とした場合の標準条件である Table 1 で実施する場合、Core2Quad Q9450 2.66GHz のパソコンで、平面分布図で 10 時間、3 次元表示で 3 日程度である。

Table 1 格納容器内全体計算の対象数

種別		メッシュ間隔	総数
放射線源 (配管・弁)		軸方向 1.7～7.1 cm 周方向 0.5～1.5 cm	980,000
構造物・遮蔽物		—	500
評価位置	平面分布図 (r, θ, z)	径方向 25cm 周方向 26～31 cm 高さ方向 5 (各階)	18,000
	3次元表示 (x, y, z)	縦方向 50cm 横方向 50cm 高さ方向 30cm	97,000

2.4 放射線分布の表示方法

RADTUBE-3D では、計算結果である放射線分布を、以下の方法で出力・表示できる。

- a. フロア特定点の数値
- b. 平面分布図（線量率マップ）（Fig.4）
- c. 3次元分布表示
 - 表示方法
 - ・等値曲面表示（Fig.5 (a)）
 - ・移動断面表示（Fig.5 (b)）
 - ・空間粒子表示（Fig.5 (c)）
 - 表示モード
 - ・全体表示モード
 - ・作業員視点モード（Fig.6）

フロア特定点の線量率の計算値は、実測値である放射線サーベイ記録の値と比較するための出力である。（浜岡 3 号機の定期点検停止時サーベイでは、格納容器内に 40 点程度設定されている。）また、Fig.4 に示す平面分布図は、発電所の放射線管理区域内に掲示される等、一般的な放射線管理に用いられる線量率マップを作成するための表示方法である。これらに加え、RADTUBE-3D では、格納容器内の放射線環境を把握しやすいように、放射線分布を配管・構造物と 3 次元画面で重ねて表示するため、3 種類の表示方法（等値曲面表示、移動断面表示、空間粒子表示）と 2 種類の表示モード（全体表示モード、作業員視点モード）を有している。

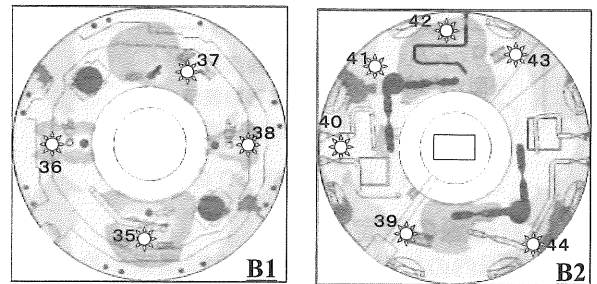
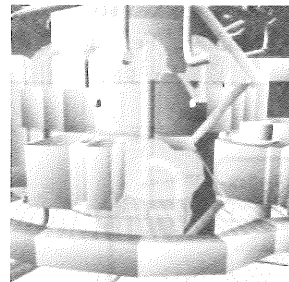
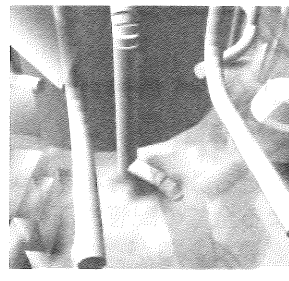


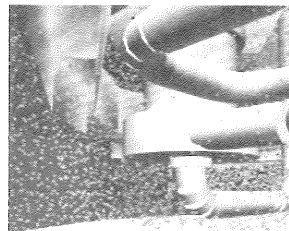
Fig.4 計算結果（平面分布図）の表示例
星印は放射線サーベイ位置。色は線量率区分に対応（寒色から暖色にかけて線量率が高くなる）



(a) 等値曲面表示



(b) 移動断面表示



(c) 空間粒子表示

Fig.5 計算結果（3次元表示）の表示例
色は(a)では同一線量、(b)(c)では線量率区分に対応

等値曲面表示は、同一線量率の点を結ぶ曲面を表示する表示方法で (Fig.5(a))、例えば 1mSv/h となる範囲がなくなるよう仮設遮蔽の場所・位置を検討する場合に利用できる。移動断面表示は、平面分布図を垂直方向に移動させる表示方法で (Fig.5(b))、作業場所の放射線分布を詳細に確認できる。空間粒子表示は、分散させた評価位置の線量率の点を微小距離だけランダムな方向に動かす表示方法で (Fig.5(c))、特に作業員視点モードで表示することにより、作業環境の放射線分布を感覚的に理解することができる。

全体表示モードでは、格納容器の 3次元モデルを上下左右移動・回転や拡大縮小することが可能で、前述の 3種類の表示方法を用いることで、任意の場所の放射線分布を把握することができる。局所的な放射線分布情報が得られることで、化学除染や遮蔽強化の対象場所をより明確化できるなど、被ばく低減対策の計画検討時に有効なツールになると考えている。

作業員視点モードでは、Fig.6 に示すように、実際の格納容器内に入った場合の視野で、作業環境を確認することができる。前述の放射線分布の代わりに、放射線源である配管等表面線量率を、色別あるいは発生粒子量で表示することもでき、作業時に注意すべき放射線源を視覚的に確認することができる。

RADTUBE-3D では、市販のゲーム用コントローラによる画面移動操作を採用し、線量率のメーター表示や格納容器内の現在位置のナビ画面を表示することで、格納容器内のウォークスルー機能を強化している。これにより、作業線量低減への取り組みにおいて、放射線管理部門での計画検討時だけでなく、保守部門での作業計画や作業打合せの際の情報共有ツールとしても活用できると考えている。なお、市販の 3D テレビや 3D キット・対応モニタを用いれば、配管や構造物の 3次元立体視、いわゆる 3D 映像を表示できるようにした。放射線分布の詳細を確認するような検討には不要であるが、格納容器内に入ったことのない新規作業員への教育等において、感覚的な理解の手助けになるとと思われる。

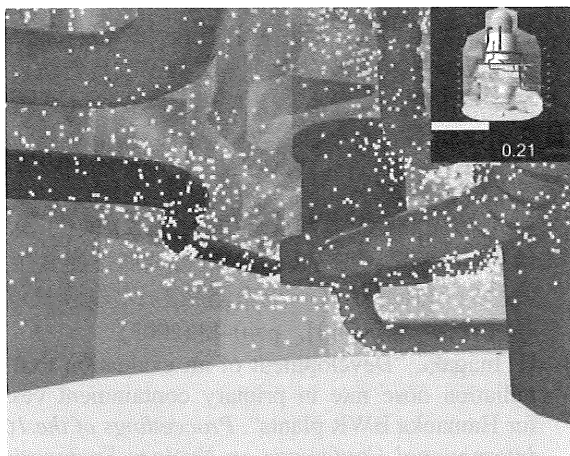


Fig.6 計算結果（作業員視点モード）の表示例

3. RADTUBE-3D の評価精度

3.1 計算条件

RADTUBE-3D の評価精度を確認するため、浜岡 4号機第 10 回定期点検停止時を対象として、停止 2 か月前に評価計算を実施して、計算値と実測値との比較を行った。評価計算では、格納容器内のフロア特定ポイント (B2~3 階の 26 ポイント) における線量率を計算値として求め、プラント停止直後に行われた放射線サーベイの結果を測定値とした。

ACTTUBE の計算では、放射性物質の移行挙動を規定するパラメータを過去の水質データ等から最適化した後、前回の配管代表位置における放射能蓄積量の測定値と当該運転サイクルの水質データから、今回停止時における代表位置の放射能蓄積量が出力される。RADTUBE-3D では、ACTTUBE の計算結果を入力値として、過去の放射線サーベイ記録から設定した分配係数と構造物データから、フロア特定ポイントにおける線量率が出力される。

浜岡 4号機での評価計算は、両計算コードの開発中に実施した仮計算から数えて 3 回目（定期点検毎に実施、3号機でも同様に 3 回実施済）であり、プログラムエラーや構造物データの入力ミス等の根本的な誤りはすでに解消しており、両計算コードの調整要素である水化学挙動パラメータや分配係数等も一度最適化を行って再度微調整したものを用いている。つまり、今回の評価計算は、PDCA による評価精度向上の取り組みの一過程である。

3.2 評価精度

フロア特定ポイントの線量率の計算値と実測値の比較を Fig.7 に示す。計算値と実測値の線量率の高低の傾向は概ね一致している。特に、被ばく低減の検討を行う上で重要な 1.0mSv/h を超えるポイントで良く一致しており、実用上問題のない結果と思われる。

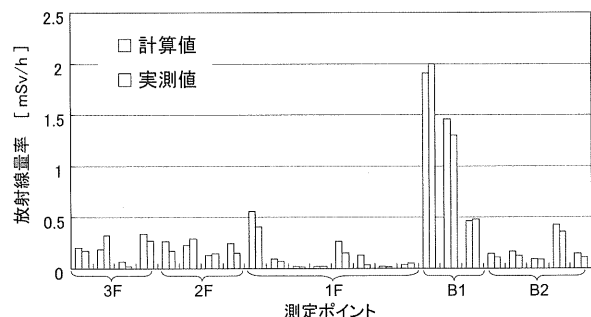


Fig.7 計算値と測定値の比較

次式で定義した計算値と実測値の計算誤差のばらつきを Fig.8 に示す。

$$\text{計算誤差}[\%] = (\text{計算値} - \text{実測値}) \div \text{実測値} \times 100$$

計算誤差のばらつきは 0 ではなく 30% にシフトしている。今回の評価計算では、ACTTUBE による放射能蓄積量 (≒ PLR 配管線量率) の結果も、30% 程度高めにずれており、そのずれをそのまま反映す

る結果となった。逆にいえば、RADTUBE-3D ではほとんどずれなかったと見ることができる。

評価精度としては、化学・放射線管理部門で古くから言われている“倍・半分の世界”を参考に、当面の目標を±50%に置いている。この観点からは、0.1mSv/h 以下の低い線量率で大きく外れたポイントが2つあるものの、±50%以内に8割近くのポイントが収まっており、良好な結果が得られたと考えている。

なお、前回・前々回の定期点検停止時に行った1,2回目の評価計算では、±50%以内に入ったポイントは各々3,5割程度であった。これより、PDCAによる評価精度向上の取り組みが着実に効果をあげていると言することができる。

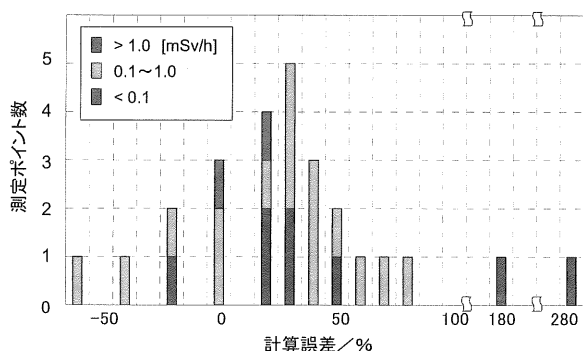


Fig.8 計算誤差のヒストグラム

4. 作業線量低減における評価事例

4.1 評価条件

最後に、RADTUBE-3D を用いた作業線量低減における評価事例として、浜岡3号機における遮蔽強化の効果評価について述べる。浜岡3号機では、同世代の他プラントに比べて定期点検時の被ばく線量が高い傾向にある。原因は放射線源である配管線量率が高めに推移しているため、被ばく低減の取り組みとして、高線量配管への遮蔽強化による対策が検討された。そこで、RADTUBE-3D を用いて、遮蔽強化による作業環境の線量率低減効果の評価を行った。

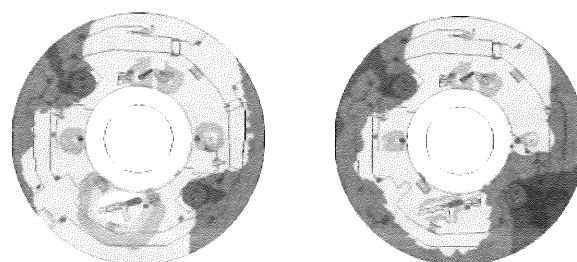
評価は、浜岡3号機15回定期点検停止時の線量率分布の計算結果と、これにTable 2に示す遮蔽設置を行った条件での計算結果を比較して行った。遮蔽設置条件としては、被ばく低減への効果が高いと思われる再循環系配管垂直部への鉛毛マットの設置や、冷却材浄化系配管上部の鉄板の厚みを増加する等の6カ所が選定されている。

Table 2 遮蔽設置の条件

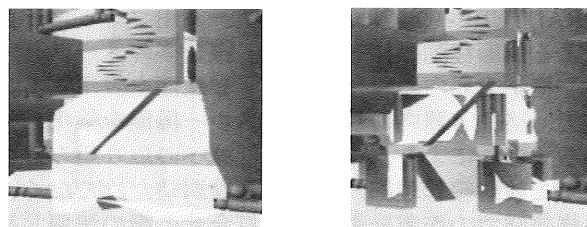
階	設置箇所	遮蔽物
2,3	PLR 垂直	鉛毛マット
1	PLR 垂直	鉛毛マット
	床面	鉄板
B1	PLR-RHR 分岐部	鉛毛マット
	PLR-RHR 分岐部床面	鉛毛マット
B2	PLR, RHR エルボ一部	鉛毛マット

4.2 評価結果

遮蔽設置なし・ありの条件で格納容器内の線量率分布を計算した結果の一例として、B1階の平面分布図とPLR-RHR分岐部付近の等値曲面表示を、それぞれFig.9(a), (b)に示す。Fig.9(b)中のオレンジ色が評価対象の遮蔽物で、水色が1.0mSv/hの等値曲面である。平面分布図からは全般的に線量率が低い青色の範囲が広がり、特に図下側のPLR-RHR分岐部周りにあった黄緑・黄色の範囲が配管近傍までに限定されることが分かる。等値曲面表示からは、配管分岐部分から1m以上広がっていた1.0mSv/hの領域が、遮蔽設置でほぼなくなることが分かる。なお、遮蔽物表面に水色がはみ出しているのは、計算時間の都合上、評価位置のメッシュを40×40×20cmと粗めにとったため、実際には遮蔽物の外側は1.0mSv/h以下になっていると思われる。



(a)平面分布図 (B1階)



(b)等値曲面表示 (PLR-RHR分岐部付近)

右図のオレンジ色が遮蔽物、水色が1.0mSv/hの等値曲面

Fig.9 遮蔽設置効果の評価結果

5. 結言

作業線量低減に向けて開発した格納容器内線量率評価ツール、特に3次元表示機能を強化したRADTUBE-3Dを中心に、概要と適用事例を述べた。ソフトウェアが有効に活用されるためには、常に利用する側のニーズを汲み取り、改善・改良を続けていく必要がある。今後も引き続き、本ツールの機能改良・精度向上に取り組んでいきたい。

参考文献

- [1] 稲垣博光, 岡本道明, 西川覚, 杉田雄二, 葛谷敏男, 辻利秀, "BWRにおける放射性腐食生成物移行挙動評価ツールの開発," 火力原子力発電技術協会誌, 54[4], p.40-48 (2003).
- [2] H. Inagaki, "Development of an evaluation tool of radiation dose rate in primary containment vessel for Hamaoka BWR plants", *Proceedings of the 16th International Conference on Nuclear Engineering*, Orlando, USA, May 11-15, 2008, 48688 (2008)