



## 1. 個人被ばく管理に係わる技術小論

### (1) 核燃料施設における放射線防護の最適化

伴 信彦 二之宮 和重 桜井 直行

東海事業所安全管理部

資料番号：81-7

1. Development of Technology on Individual Radiation Monitoring

(1) Optimisation of Radiological Protection in Nuclear Facilities

Nobuhiko Ban Kazushige Ninomiya Naoyuki Sakurai  
(Health and Safety Division, Tokai Works)

核燃料施設における防護の最適化の具体的手順を確立するために、①MOX燃料製造施設におけるグローブボックス遮蔽設計の最適化、②再処理工場の保守・修理作業における最適化、について検討した。前者については、仮想的なモデル事例に対して費用-便益分析を適用し、より現実的な最適化のために今後検討を要する項目を整理した。後者については、解析的な手法よりも専門家の判断に基づく最適化が適当であると考え、合理的な判断を支援する「放管情報データベース」のモデル設計を実施した。

#### 1. はじめに

防護の最適化（以下、最適化と呼ぶ）は、経済的・社会的要因も考慮しながら、被ばくを合理的に達成可能な限り低減することである。その適用範囲は広く、施設の安全設計から日常の放射線管理に至るまで、様々なレベルの問題が対象となる<sup>1)</sup>。

核燃料施設における最適化は、図-1のように分類される。大型施設が多いことから、設計段階の最適化をプラント全体規模の最適化と一工程規模の最適化に分けると便利である。運転段階の最適化には、定常作業に関するものと非定常作業に関するものがある。

我々はこれまでに、MOX燃料製造施設におけるグローブボックス遮蔽設計の最適化と、再処理工場の保守・修理作業の最適化について検討してきた<sup>2)</sup>。前者は一工程規模の設計に関する最適化であ

り、後者は、非定常作業に関する運転段階の最適化に該当する。それぞれの内容を以下に紹介する。

#### 2. MOX燃料製造施設におけるグローブボックス遮蔽設計の最適化（モデル検討）

MOX燃料製造施設では内部被ばく防止のためにグローブボックスが用いられるが、同時に高エネルギー中性子とAm-241からの低エネルギーγ線に対して遮蔽を施す必要がある。ここではMOX燃料粉末を取り扱う工程に問題を絞り、仮想的なモデルプラントについて事例解析を実施した。

##### 2.1 解析の範囲

解析のための問題設定は表-1のとおりである。施設の寿命は30年で、問題とする工程には常時20人

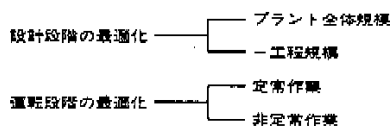


図-1 核燃料施設における最適化の分類

表-1 解析のための問題設定

|            |                                                                                                |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 施設寿命       | 30年                                                                                            |
| 作業人数       | 20人 (600人・年)                                                                                   |
| 作業時間       | グループⅠ：3,840人・時間/年(960時間/年×4人)<br>グループⅡ：5,760人・時間/年(480時間/年×12人)<br>グループⅢ：960人・時間/年(240時間/年×4人) |
| グローブボックス台数 | 8台                                                                                             |
| 鉛エプロン枚数    | 延べ60層                                                                                          |

表-2 遮蔽設計のオプション

| 遮蔽箇所       | ①パネル面            | ②ボックス底面      | ③下部ポート           | ④上部ポート          | ⑤鉛エプロン  |
|------------|------------------|--------------|------------------|-----------------|---------|
| 遮蔽材<br>No. | 鉛アクリル<br>1.5mmPb | 鉛板<br>1.5mm厚 | 古鉛ゴム板<br>0.2mmPb | 新鉛ゴム<br>2.5mmPb | 0.5mmPb |
| 1          | ○                | —            | —                | —               | —       |
| 2          | ○                | —            | —                | —               | —       |
| 3          | ○                | ○            | —                | —               | —       |
| 4          | ○                | ○            | ○                | —               | —       |
| 5          | ○                | ○            | ○                | ○               | —       |
| 6          | ○                | ○            | ○                | ○               | ○       |
| 7          | ○                | —            | —                | ○               | ○       |
| 8          | ○                | —            | —                | ○               | ○       |
| 9          | ○                | ○            | ○                | ○               | ○       |

(○)：遮蔽材あり、—：遮蔽材なし

の作業者がいるものとした。20人の作業者を3つのグループに分け、それぞれ異なる作業時間を仮定した。工程内には8台のグローブボックスがあり、ボックスの片面あたり6ユニットのパネルがあるものとした。また、作業者に鉛エプロンを着用させるオプションについては、耐用年数も考慮して延べ60着のエプロンが必要であるとした。

解析において考慮したファクターは防護の費用と集団線量で、解析手法には単純な費用-便益分析を用いた。

## 2.2 遮蔽設計のオプション

この事例では、遮蔽材の種類・厚さと遮蔽箇所の組合せによって、無数のオプションが考えられる。しかし、考慮できるオプションの数には限界があるため、表-2に示した9通りのオプションのみを解析の対象とした。表-2の遮蔽箇所を、対応する番号で図-2に示した。

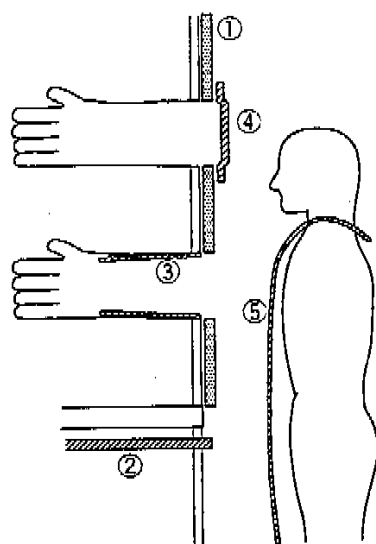


図-2 グローブボックス断面図

遮蔽箇所としては、パネル面、グローブボックス底面、下部ポート、上部ポートの4箇所と、作業者自身が着る鉛エプロンを考えた。オプションの数を限定するために、それぞれの箇所には1種類の遮蔽材のみを適用することとして、遮蔽材の有無の組合せによりオプションを決めた。

## 2.3 費用の評価

防護の費用については、遮蔽材と鉛エプロンの単価を調査し、その結果に基づいて設備費用を計算した。

損害の費用は、集団実効線量当量に $\alpha$ 値をかけて求めた。 $\alpha$ 値は土居らの文献<sup>3)</sup>から1990年時点の予測値 $1.46 \times 10^8$ 円/Svを引用した。単位作業時間当たりの実効線量当量は次のようにして求めた。まず、頭頸部、胸部および上腕部、腹部および大腿部の各代表点における $\gamma$ 線・中性子線フラックスを二次元輸送計算コードDOT3.5により計算した。次にICRP Publication 51<sup>1)</sup>の換算係数を用いてそれを実効線量当量率に変換し、各部位の荷重計数に応じた平均をとった。

## 2.4 防護の費用と線量の評価結果

それぞれのオプションに対して、防護の費用と線量を評価した結果を表-3に示す。ここで最大個人線量とは、表-1のグループIに属する作業者の年平均実効線量当量であり、集団線量は施設の操業期間全体にわたる集団実効線量当量予測を意味する。なお、表-3では防護の費用が小さい順にオプションを並べ替えてある。

オプション1と7は、最大個人線量が年線量限度50mSvを越えている。また、オプション4、8、9では、それぞれオプション3、5、6よりも多くの防護の費用を投じているにもかかわらず、線量は逆に高くなっている。これらを除外して残った2、3、5、6のオプションに対して費用-便益分析を実施した結果、表-4および図-3に示す結果が得られた。

表-3 防護の費用と線量の評価結果

| オプションNo. | 防護の費用<br>(円)       | 最大個人線量<br>(mSv/年) | 集団線量<br>(人・Sv) |
|----------|--------------------|-------------------|----------------|
| 1        | 0                  | 105.6             | 34.86          |
| 7        | $2.70 \times 10^4$ | 97.6              | 32.21          |
| 2        | $2.98 \times 10^7$ | 41.1              | 13.57          |
| 3        | $3.02 \times 10^7$ | 35.3              | 11.64          |
| 4        | $3.13 \times 10^7$ | 40.7              | 13.44          |
| 5        | $3.18 \times 10^7$ | 34.5              | 11.40          |
| 6        | $3.25 \times 10^7$ | 38.4              | 12.68          |
| 8        | $3.30 \times 10^7$ | 34.5              | 11.39          |
| 9        | $3.37 \times 10^7$ | 38.1              | 12.66          |

表-4 費用-便益分析の結果

| オプションNo. | 防護の費用<br>(円)       | 損害の費用<br>(円)       | 総費用<br>(円)         |
|----------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 2        | $2.98 \times 10^7$ | $1.98 \times 10^7$ | $4.96 \times 10^7$ |
| 3        | $3.02 \times 10^7$ | $1.70 \times 10^7$ | $4.72 \times 10^7$ |
| 5        | $3.18 \times 10^7$ | $1.66 \times 10^7$ | $4.84 \times 10^7$ |
| 6        | $3.30 \times 10^7$ | $1.66 \times 10^7$ | $4.97 \times 10^7$ |

防護の費用と損害の費用の合計、すなわち総費用が最小になるのはオプション3であり、これが解析解になる。オプション3は、パネル面を含鉛アクリルで、ボックス底面を鉛板で遮蔽するものである。

## 2.5 結果の解釈

感度分析を行って結果の信頼性を確認した結果、防護の費用を22%~590%の範囲で変動させても、オプション3が最適であるという解析解は変わらなかった。また、損害の費用を変動させた場合には、17%~450%の範囲で解析解は安定していた。

一方、今回の解析の主な不確定要因は、 $\alpha$ 値、延べ作業時間、線量率の計算精度であり、それらの不確定性を考慮すると、最適解が変わる可能性は十分にある。また、実際にはより多くのオプションを考える必要があり、現実的な最適化のためには、さらに綿密な解析が必要となる。

## 2.6 今後の検討課題

今回の解析を通して明らかになった課題を整理した。より現実的な最適化を行うためには、以下の内容について検討が必要であると考えられる。

- ①施設設計・許認可等との連携
- ②オプションの抽出と絞り込み
- ③合理的な線量推定の方法
- ④考慮すべきファクターの特定
- ⑤少人数の集団に対する個人線量分布の考え方
- ⑥確率的事象としての内部被ばくの扱い方

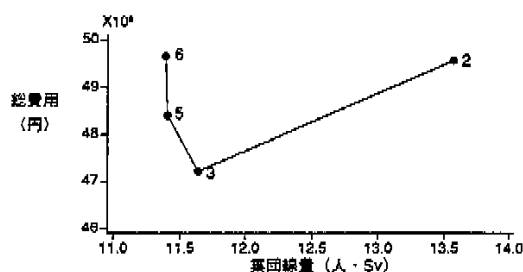


図-3 費用-便益分析の結果

まず第一に、実際の施設設計や許認可等の手続きの中に、最適化をどのように位置づけるかという問題がある。このことは、設計のどの時点で最適化を行うのかにも関係するため、問題の範囲や解析の複雑さに影響することになる。第二に、オプションの抽出と絞り込みの方法についての問題がある。今回の事例のように、およそ無数のオプションが考えられる場合には、解析に先立って必要最小限のオプションを抽出することがきわめて重要になる。第三に、最適化では必ず線量の評価が必要になるが、それを合理的に行うことが必要である。例えば、今回の事例では単純化したモデルで計算を行ったにも拘らず、長い計算時間を必要とした。このことは、オプションの数が多いときに問題となる。

その他、考慮すべきファクター、少人数の集団に対する個人線量分布の考え方、確率的事象としての内部被ばくの扱い方、等についても検討が必要である。

## 3. 再処理工場の保守・修理作業の最適化

### 3.1 再処理工場の保守・修理作業の特徴

再処理工場の保守・修理作業には、他の原子力施設に比べて多種多様な作業があり、すべての作業に対して事例解析を適用することは難しい。また、保守・修理作業の一般的な特徴として、

- (1) 作業の進捗状況に応じて臨機応変な判断を行う必要があるため、複雑な分析手法は馴染まない
- (2) 防護装備の強化に伴う作業者への負担等、定量化の難しいファクターが含まれる

等があげられる。

これらの特徴を総合すると、現状では、解析的な手法を用いるよりも専門家の判断によって個々に最適化を行うのが適当であると考えられる。その場合、より合理的な判断を行うためには、放射線管理の経験を適切な形でデータベース化する必要がある。すなわち、必要最小限の情報を、多種多様な作業に対する判断に役立つような形でまとめなければならない。再処理工場の保守・修理作業の最適化については、このような「放管情報データベース」を構築することを目標とし、そのためのモデル設計を行った。

### 3.2 放管情報データベースのモデル設計

作業の経験が効率的にフィードバックされるためには、放管情報データベースは次のような性能を持っていることが望まれる。

- ①情報の入力と検索・参照が容易に行えること。

表-5 放管情報データベースの入出力項目

|                    |                                                                                                   |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 作業開始時に入力する項目       | 作業件名<br>作業場所<br>作業概要<br>担当部署<br>工事元請会社<br>予定作業期間                                                  |
| 日々入力する項目           | 作業内容<br>入域者数                                                                                      |
| 変更・実施の度に<br>入力する項目 | グリーンハウス設置段数<br>モニタリングデータ<br>モニタリング器材の種類・設置位置<br>被ばく線量(計画値)<br>防護装備<br>防護装備選定にさいして着目した要因<br>判断の妥当性 |
| 作業終了後に入力する項目       | 被ばく線量(実績値)                                                                                        |

②情報が階層化され、有機的に結合していること。

③防護装備等については、その選定根拠も記録されていること。

④判断の根拠は、放射線レベルと対応づけて記述されていること。

⑤数値データと数値化できない情報が、整理されて混在していること。

これらの要求を満たすべく、以下の仕様でデータベースを設計した。

#### (1) ハードウェアおよび基本ソフトウェア

上記の①の要求を満たすために、ハードウェアとしてはユーザインターフェースに優れたMacintoshを使用することとした。また、Macintoshの標準ソフトウェアであるHyperCardのリンク機能を活用することで②が達成されるものと考えた。

#### (2) 入力項目

大まかな入力項目を表-5に示した。従来から定型フォーマットで記録していた項目がベースになっているが、③、④の要求を満たすために、防護装備選定の根拠、その判断に対する自己評価等の項目を加えた点が特徴的である。

表-5に示した項目のうち、作業場所・作業概要等の一般的事項を作業開始時に入力する。他の項目は作業の進捗に合わせて入力するが、被ばくの実績値に関してのみ、全作業終了後に最大値・合計値を入力する。これは現状の被ばく管理方式を考慮しての措置だが、理想としてはAPD等の日管理データをオンラインで取り込むのがよいと考えている。

#### (3) 入出力仕様

データ入力に際しては、コンピュータの指示にし

たがっていけば、自動的に必要項目の入力が完了するように設計した。操作者の負担を軽減するために、入力内容は可能な限り選択肢化してある。モニタリングデータの入力については、作業場所のマップをイメージスキャナで取り込み、マウスで指定したポイントに値を入力する方式を採用した。

入力されたデータの検索に際しては、リンク機能を活用して画面上のボタン1つで関連した情報に飛ぶことができるようになっている。モニタリングデータは自由にグラフ化できる他、定型フォーマットでのプリントアウト等、出力機能も充実させた。

#### 4. 今後の展望

ここに紹介したように、防護の最適化の適用範囲はきわめて広く、対象とする問題が異なればアプローチの方法は全く異なったものになる。したがって、今後の研究を進める上では、やみくもに事例解析を実施するのではなく、事例の分類と研究の方向性を明確にする必要がある。

今後の課題としては、設計段階の最適化について、本文中2.6に述べた事項に関する検討が必要である。これらの問題点がある程度解決されない限り、現実ベースでの最適化は困難であると思われる。また、プラント全体規模の最適化については、テスト的な事例解析で対処するのは難しく、実際の設計業務の中で実践していくしかないであろう。

運転段階の最適化については、今回は非定常作業に関する最適化を取り上げ、放管情報データベースのモデル設計を行った。今後はこの設計を基にしたデータベースの運用テストを行い、本格的なデータベースを構築していく必要がある。また、現状では解析的な手法による最適化は困難であるという結論になったが、意思決定分析法等が発展すれば、状況は変わるかもしれない。一方、定常作業に関する最適化では、作業の実績を最適化解析に繰り返しフィードバックできるため、工次次第では解析的な手法を適用しやすい分野であると思われる。今後はこのカテゴリーに分類される事例を抽出して、事例解析を実施することが重要である。

#### 参考文献

- 1) ICRP Publication 55: Optimization and Decision-Making in Radiological Protection, Pergamon Press, Oxford, (1989).
- 2) 佐 信彦、二之宮和重、石黒芳治: 核燃料施設における放射線防護の最適化、事例研究と今後の課題、日本保健物理学会第26回研究発表会要旨集、(1991)。
- 3) 土居雅広、中島政行: 最近の $\alpha$ 線について、保健物理20、(1985)。
- 4) ICRP Publication 51: 体外放射線に対する防護のためのデータ、日本アイソトープ協会、東京、(1988)。